

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL**

BRUNO NONEMACHER

**ANÁLISE DA FRAGMENTAÇÃO DE CAVACOS DE USINAGEM DE AÇO SAE
1045 E AISI H13 SUBMETIDOS À MOAGEM EM MOINHOS DE BOLAS**

**FARROUPILHA
2024**

BRUNO NONEMACHER

**ANÁLISE DA FRAGMENTAÇÃO DE CAVACOS DE USINAGEM DE AÇO SAE
1045 E AIS H13 SUBMETIDOS À MOAGEM EM MOINHOS DE BOLAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais para a obtenção do grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Tecnologia da Transformação de Materiais

Orientador: Prof. Dra. Daniela Lupinacci Villanova

FARROUPILHA
2024

CIP - Catalogação na Publicação

N812a Nonemacher, Bruno, 1991-
Análise da fragmentação de cavacos de usinagem de aço SAE 1045 e
AISI H13 submetidos à moagem em moinho de bolas. / Bruno Nonemacher
-- 2024.
106 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) -- (Mestrado profissional em Tecnologia e
Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência
e tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Farroupilha, 2024.
Orientadora: Daniela Lupinacci Villanova.

1. Resistência de materiais. 2. Usinagem. 3. metalurgia do pó.
I. Villanova, Daniela Lupinacci, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 620.1

BRUNO NONEMACHER

**ANÁLISE DA FRAGMENTAÇÃO DE CAVACOS DE USINAGEM DE AÇO SAE
1045 E AISI H13 SUBMETIDOS À MOAGEM EM MOINHOS DE BOLAS**

Trabalho Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito para obtenção do título de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Lisiane Trevisan
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul- IFRS

Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS

Prof. Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Orientador: Prof. Dra. Daniela Lupinacci Villanova - IFRS

Apresentado e aprovado em: 12 de Abril de 2024.

Local da defesa: IFRS - *Campus* Farroupilha.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha noiva, minha família e meus amigos que sempre estiveram ao meu lado durante os dias de estudo e trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me dado força, saúde e persistência para poder alcançar este objetivo.

Agradeço a minha noiva Tuane, meus pais Flávio e Linéa e minha irmã Flávia por me apoiar e incentivar durante esse período de empenho e dedicação. Sem vocês nada disso seria possível.

Gostaria de agradecer a minha orientadora, professor Dra. Daniela Lupinacci Villanova. Primeiramente pela oportunidade para o desenvolvimento dessa pesquisa e por todos os ensinamentos e tempo dedicado para a orientação.

Gostaria de agradecer aos meus colegas Everton, Fernando, Gilmar, Jonas e Laura, técnicos de laboratório do IFRS – *Campus* Farroupilha, pelo suporte dado ao setor em minha ausência durante as atividades de pesquisa.

Gostaria de agradecer aos professores do IFRS - *Campus* Farroupilha, Feliz e Caxias do Sul que de alguma forma estiveram presentes neste estudo, em especial a professora Dra. Lisiane Trevisan e o professor Dr. Edson Luiz Francisquetti pelos auxílios e importantes contribuições.

Gostaria de agradecer ao Engenheiro Mecânico Guilherme Klóss, da empresa BK Usinagem, pela doação dos resíduos de usinagem utilizados nesta pesquisa e ao Laboratório de Materiais Cerâmicos – LACER, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, pela realização dos ensaios de caracterização por difração a *laser*.

Agradeço ao Instituto Federal do Rio Grande do Sul - IFRS pela oportunidade de fazer parte de mais um grande curso dentro desta incrível e conceituada instituição de ensino.

RESUMO

Um dos processos mais utilizados na manufatura industrial é a usinagem. Devido a impossibilidade de eliminar a produção de resíduos industriais deste processo na forma de cavaco, com objetivo de agregar valor a estes e promovendo produções mais sustentáveis, torna-se interessante o reprocessamento dos resíduos. Estes cavacos apresentam a possibilidade de serem reprocessados e transformados em pós metálicos, possibilitando seu reaproveitamento na produção de novas peças e componentes, através do processo de metalurgia do pó, por exemplo. Esta pesquisa teve por finalidade analisar a fragmentação dos cavacos de usinagem submetidos ao processo de moagem em moinho de bolas. Porções de cavacos de usinagem de materiais do tipo aço SAE 1045 e AISI H13 foram submetidos ao processo de moagem por períodos de 20, 40 e 80 horas. Após a moagem, os cavacos residuais foram separados e caracterizados quanto à morfologia, distribuição de tamanhos, microdureza e microestrutura. Além das caracterizações, aplicou-se aos cavacos residuais o cálculo de eficiência de moagem para o processo. Em relação aos cavacos residuais, percebeu-se que, para ambos os materiais, o processo de moagem utilizado foi capaz de fragmentá-los e torná-los partículas menores. Percebeu-se que, para o aço SAE 1045, houve alteração significativa no formato dos grãos microestruturais e no aumento da microdureza. Já para o H13, não houve alterações nestes aspectos. Quanto aos pós produzidos, verificou-se a obtenção de pós finos e superfinos, com faixa granulométrica predominante de 1 a 25 μm e com morfologia heterogênea. Para o Aço SAE 1045 foram observadas partículas no formato de flocos para 20 horas de moagem e morfologia poligonal para os demais tempos e para o Aço AISI H13 as partículas variavam entre os tipos esféricos e poligonais. A análise de escoabilidade caracterizou os pós dos dois materiais com regime de escoamento do tipo livre e, por fim, o teste compressibilidade demonstrou que os pós apresentam comportamentos semelhantes durante a compressão das amostras. Conclui-se com esta pesquisa que, mesmo representando baixa eficiência, o processo de moagem com utilização de moinho de bolas é capaz de processar os cavacos de usinagem e torná-los partículas menores a ponto de obter-se pós metálicos com dimensões superfinas e que estas partículas podem servir como matéria-prima para o processo de metalurgia do pó, principalmente para o processo de moldagem por injeção metálica, dada as características do material obtido.

Palavras-chave: Usinagem. Cavacos. Moinho de Bolas. Pó Metálico. Metalurgia do Pó.

ABSTRACT

One of the most commonly used processes in industrial manufacturing is machining. Due to the impossibility of eliminating the production of industrial waste in the form of chips from this process, with the aim of adding value to them and promoting more sustainable productions, the reprocessing of the waste becomes interesting. These chips have the possibility of being reprocessed and transformed into metal powders, allowing their reuse in the production of new parts and components, through processes such as powder metallurgy, for example. The purpose of this research was to analyze the fragmentation of machining chips subjected to the milling process in a ball mill. Portions of machining chips from materials such as SAE 1045 steel and AISI H13 were subjected to milling for periods of 20, 40, and 80 hours. After milling, the residual chips were separated and characterized regarding morphology, size distribution, microhardness, and microstructure. In addition to these characterizations, the milling efficiency calculation was applied to the residual chips. Regarding the residual chips, it was observed that, for both materials, the milling process used was capable of fragmenting them into smaller particles. It was noted that for SAE 1045 steel, there was a significant change in the shape of the microstructural grains and an increase in microhardness. However, for H13 steel, there were no changes in these aspects. Regarding the produced powders, the obtaining of fine and superfine powders was verified, with a predominant particle size range of 1 to 25 μm and heterogeneous morphology. For SAE 1045 steel, flake-shaped particles were observed after 20 hours of milling, while polygonal morphology was observed for the other times. For AISI H13 steel, the particles varied between spherical and polygonal shapes. Flowability analysis characterized the powders of both materials with a free-flowing regime, and finally, the compressibility test demonstrated that the powders exhibit similar behaviors during the compression of the samples. In conclusion, this research shows that, despite representing low efficiency, the milling process using a ball mill is capable of processing machining chips and turning them into smaller particles to obtain metal powders with superfine dimensions. These particles can serve as raw material for the powder metallurgy process, especially for metal injection molding, given the characteristics of the material obtained.

Keywords: Machining. Chips. Ball Milling. Metal Powder. Powder Metallurgy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação entre o consumo de energia e aproveitamento de matéria-prima obtidos para diferentes processos de fabricação.....	21
Figura 2: Comparação entre resistência mecânica e tolerância dimensional obtidas via diferentes processos de fabricação.	21
Figura 3: Variação do custo de produção por peça para os processos de usinagem e metalurgia do pó.	22
Figura 4: Fluxograma das etapas que contemplam o processo de metalurgia do pó.	24
Figura 5: Processo de atomização de metal fundido em água.....	25
Figura 6: Mecanismos de Fragmentação: Impacto (a); Compressão (b), Abrasão ou Cisalhamento (c).....	27
Figura 7: Princípio de funcionamento de um moinho de bolas.	28
Figura 8: Moinho vibratório do tipo SPEX: Equipamento completo (a); Recipiente de moagem (b); Demonstração do princípio de moagem no interior do recipiente de moagem (c).....	29
Figura 9: Moinho do tipo Planetário: Equipamento completo (a); Demonstração do princípio de moagem no interior do recipiente de moagem (b).....	30
Figura 10: Moinho atritor do tipo szegvari (a); Demonstração do interior do recipiente de moagem (b).....	31
Figura 11: Princípio de funcionamento do moinho do tipo Simoloyer.....	31
Figura 12: Moinho Atritor do tipo Simoloyer: Equipamento Completo (a); Movimentação das esferas de acordo com a rpm eixo girante (b).....	32
Figura 13: Moinho de Bolas: Esquema construtivo de um moinho de bolas (a). Movimentação das bolas de acordo com a rpm eixo girante (b).	33
Figura 14: Regimes de Moagem: Cascata (a); Catarata (b).	34
Figura 15: Comportamento da carga de bolas em recipiente de moagem.	35
Figura 16: Sequência de compactação de peças produzidas via metalurgia do pó.....	41
Figura 17: Fluxograma simplificado das etapas que contemplam os procedimentos experimentais.....	47
Figura 18: Resíduos de usinagem na forma de cavaco: Aço SAE 1045 (a); Aço AISI H13(b).	48
Figura 19: Itens utilizados no procedimento de moagem: Jarro cerâmico (a); Bolas cerâmicas (b).	50
Figura 20: Equipamento do tipo moinho de bolas.	51

Figura 21: Análise do regime de movimentação da carga durante moagem: Rotação do moinho fornecendo energia potencial à carga (a); Carga sendo lançada após energia potencial ser superior à cinética (b); Bolas e cavacos chocando-se na parte inferior do moinho gerando a fragmentação (c).	52
Figura 22: Amostras de cavacos de aço embutidos: Aço SAE 1045 (a); Aço AISI H13 (b).	55
Figura 23: Método utilizado para medição do ângulo de repouso.	57
Figura 24: Procedimento para verificação do ângulo de repouso de pó metálico: Bocal do funil apoiado em base de acrílico (a); Elevação do funil liberando a passagem do particulado.	58
Figura 25: Matriz utilizada no ensaio de compressibilidade.	59
Figura 26: Sequência utilizada durante ensaio de compressibilidade. Preenchimento da cavidade (a); Compactação (b); Extração (c).	60
Figura 27: Distribuição de tamanho de partículas de cavacos pós-moagem – Aço SAE 1045.	64
Figura 28: Microdureza Vickers encontrada na superfície dos cavacos – Aço SAE 1045.	67
Figura 29: Pó metálico resultante da moagem de aço SAE 1045.	68
Figura 30: Fator de empacotamento para partículas com distintas dimensões.	73
Figura 31: Distribuição do tamanho de partícula para o pó de aço SAE 1045: 20 horas de moagem (a); 40 horas de moagem (b); 80 horas de moagem (c).	74
Figura 32: Curvas de compressibilidade para pó de aço SAE 1045.	76
Figura 33: Distribuição do tamanho de partículas de cavacos pós-moagem – Aço AISI H13.	81
Figura 34: Microdureza Vickers encontrada na superfície dos cavacos – AÇO AISI H13.	84
Figura 35: Pó metálico resultante da moagem de aço AISI H13.	85
Figura 36: Fator de empacotamento em função da geometria da partícula.	89
Figura 37: Distribuição do tamanho de partícula para o pó de aço AISI H13: 20 horas de moagem (a); 40 horas de moagem (b); 80 horas de moagem (c).	91
Figura 38: Curvas de compressibilidade para pó de aço AISI H13.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Geometrias associadas às principais técnicas de obtenção de partículas de pós.	39
Tabela 2: Estudos sobre produção de pós metálicos através da moagem por fragmentação mecânica.	42
Tabela 3: Composição química do aço SAE 1045.	48
Tabela 4: Composição química do aço AISI H13.	49
Tabela 5: Parâmetros de moagem utilizados durante os procedimentos de moagem.	53
Tabela 6: Classificação de partículas sólidas de acordo com a dimensão.	53
Tabela 7: Classificação de escoamento de acordo com o ângulo de repouso apresentado.	58
Tabela 8: Análise morfológica dos cavacos pré e pós-moagem – Aço SAE 1045.	61
Tabela 9: Microestruturas apresentadas pelos cavacos de aço SAE 1045 pré e pós-moagem.	65
Tabela 10: Comportamento da fragmentação do aço SAE 1045 em função do tempo de moagem.	66
Tabela 11: Microscopia Eletrônica de Varredura para aço SAE 1045 moído por 20 horas. ..	69
Tabela 12: Microscopia Eletrônica de Varredura para aço SAE 1045 moído por 40 horas. ..	70
Tabela 13: Microscopia Eletrônica de Varredura para aço SAE 1045 moído por 80 horas. ..	71
Tabela 14: Dimensões obtidas através da difração a laser em pó de aço SAE 1045.	72
Tabela 15: Escoamentos obtidos a partir dos ângulos de repouso para pó de aço SAE 1045. ..	75
Tabela 16: Eficiência de moagem para os experimentos com cavacos de aço SAE 1045.	77
Tabela 17: Fragmentação produzida em função do tempo de moagem.	78
Tabela 18: Análise morfológica dos cavacos pré e pós-moagem – Aço AISI H13.	78
Tabela 19: Microestruturas apresentadas pelos cavacos pré e pós-moagem – Aço AISI H13.	82
Tabela 20: Comportamento da fragmentação em função do tempo de moagem – Aço AISI H13.	83
Tabela 21: Microscopia Eletrônica de Varredura para aço AISI H13 moído por 20 horas. ...	86
Tabela 22: Microscopia Eletrônica de Varredura para aço AISI H13 moído por 40 horas. ...	87
Tabela 23: Microscopia Eletrônica de Varredura para aço AISI H13 moído por 80 horas. ...	88
Tabela 24: Dimensões obtidas através da difração a laser em pó de aço H13.	90
Tabela 25: Escoamentos obtidos a partir dos ângulos de repouso para pó de aço H13.	92
Tabela 26: Eficiência de moagem para os experimentos realizados com cavacos de aço AISI H13.	94

Tabela 27: Fragmentação produzida em função do tempo de moagem.	94
Tabela 28: Similaridades e diferenças obtidas após testes e caracterizações sobre Aço SAE 1045 e AISI H13.	95

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA e PROBLEMA	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 REAPROVEITAMENTO DE MATERIAIS	18
2.2 GERAÇÃO ATUAL DE RESÍDUOS DE USINAGEM	19
2.2.1 Reaproveitamento de resíduos de usinagem	19
2.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO VERSUS METALURGIA DO PÓ	20
2.4 METALURGIA DO PÓ	22
2.4.1 Obtenção do pó metálico	24
2.4.1.1 Atomização de metais fundidos	25
2.4.1.2 Redução química	25
2.4.1.3 Deposição Eletrolítica	26
2.4.1.4 Decomposição Química	26
2.4.1.5 Fragmentação Mecânica	26
2.5 FRAGMENTAÇÃO EM MOINHOS	27
2.5.1 Tipos de moinhos	28
2.5.2 Recipiente de moagem	33
2.5.3 Velocidade de moagem	33
2.5.4 Tempo de moagem	36
2.5.5 Razão massa de bola e massa de pó	36
2.5.6 Volume ocupado do recipiente de moagem - Fator de enchimento	37
2.5.7 Meio de moagem	37
2.5.8 Agente controlador do processo (ACP)	38
2.5.9 Temperatura de moagem	38
2.6 CARACTERIZAÇÃO DOS PÓS	38
2.7 HOMOGENEIZAÇÃO E MISTURA DOS PÓS	40
2.8 COMPACTAÇÃO DO PÓS	41
2.9 ESTUDOS CORRELACIONADOS	42
3. MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	47
3.2. MATERIAIS	47
3.2.1. Aço SAE 1045	48
3.2.2 Aço AISI H13	48

3.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	49
3.3.1 Coleta dos cavacos	49
3.3.2 Limpeza dos cavacos	49
3.3.3 Moagem dos cavacos	50
3.4. SEPARAÇÃO DOS CAVACOS E PÓS METÁLICOS.....	53
3.5. CARACTERIZAÇÕES	54
3.5.1 Caracterizações dos cavacos	54
3.5.1.1 Caracterização Morfológica	54
3.5.1.2 Análise da distribuição de tamanhos de cavacos.....	54
3.5.1.3 Caracterização da microdureza.....	55
3.5.1.4 Caracterização microscópica	55
3.5.2 Caracterização de pós metálicos	56
3.5.2.1 Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	56
3.5.2.2 Distribuição de tamanho de partícula	56
3.5.2.3 Escoabilidade.....	56
3.5.2.4 Compressibilidade	58
3.6. EFICIÊNCIA DE MOAGEM	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1 AÇO SAE 1045	61
4.1.1 Cavacos Residuais de aço SAE 1045	61
4.1.1.1 Morfologia dos cavacos.....	61
4.1.1.2 Análise da distribuição de tamanhos dos cavacos residuais.....	63
4.1.1.3 Caracterização microscópica	64
4.1.1.4 Microdureza.....	67
4.1.2 Pó de aço SAE 1045	68
4.1.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	69
4.1.2.2 Tamanho de partícula	72
4.1.2.3 Escoabilidade.....	75
4.1.2.4 Compressibilidade	76
4.1.3 Eficiência de moagem.....	77
4.1.4 Fragmentação produzida em função do tempo de moagem.....	77
4.2 AÇO AISI H13	78
4.2.1 Cavacos Residuais de aço AISI H13	78
4.2.1.1 Morfologia dos cavacos.....	78
4.2.1.2 Análise da distribuição de tamanhos dos cavacos residuais.....	80
4.2.1.3 Caracterização microscópica	82
4.2.1.4 Microdureza.....	84

4.2.2	Pó de aço AISI H13.....	85
4.2.2.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	86
4.2.2.2	Tamanho de partícula	89
4.2.2.3	Escoabilidade.....	92
4.2.2.4	Compressibilidade	93
4.2.3	Eficiência de moagem.....	94
4.2.4	Fragmentação produzida em função do tempo de moagem.....	94
4.3	COMPARATIVO ENTRE OS AÇOS SAE 1045 E AISI H13	95
5.	CONCLUSÕES.....	99
5.1	TRABALHOS FUTUROS	100
REFERÊNCIAS	101

1. 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 destes materiais, aplicando-os em novos processos de fabricação objetivando a reciclagem, 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 UNEP (*United Nations Environment Programme*), em 1989, introduziu o conceito de produção mais limpa como uma abordagem sistemática e organizada que busca a redução dos efeitos nocivos e otimiza os 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. No entanto, uma alternativa de reprocessamento seria sua transformação em pós metálicos. Isso facilitaria 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).

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. E 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).

O termo “Metalurgia do Pó” pode ser definido como um processo de conformação de metais, que envolve a produção de pós, compactação e sinterização, e tem como objetivo final a produção de peças (Chiaverini, 2001). As indústrias vêm investindo cada vez mais na

utilização deste processo de fabricação. Verifica-se que 70% do mercado mundial da metalurgia do pó se encontra no segmento automotivo. Este setor tem necessitado cada vez mais de peças economicamente viáveis para a aplicação em escala industrial (Dutra, 2007).

Cada pó metálico produzido pelos diferentes processos constituintes da metalurgia do pó apresenta características físicas e químicas distintas, ou seja, diferentes tamanhos, formatos e composição. São estas características que irão definir a aplicação de cada pó na produção de um determinado componente. O processo de caracterização é uma das etapas mais importantes realizada durante a produção destes pós (Han et al., 2016). Atualmente, inúmeras técnicas de caracterização são utilizadas, entre elas destacam-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise de área superficial, escoabilidade do pó, granulometria e teste de compressibilidade (Oliveira, 2021).

As características e propriedades dos pós podem variar dependendo do método de produção utilizado, o que exerce influência direta em etapas posteriores do processamento por metalurgia do pó (Klein, 2011). Atualmente, os processos de produção conhecidos são: atomização por água ou gás, redução no estado sólido, eletrólise, decomposição química e fragmentação mecânica. Uma das maneiras de obtenção, via fragmentação mecânica, trata-se da moagem dos metais através da utilização de moinhos de bolas. Estes são capazes de gerar partículas com formato irregular e granulometria de 0,1 a 400 μ m (Zauner, 2006).

Considerando o exposto acima, este trabalho de pesquisa teve por finalidade verificar a viabilidade técnica da produção de matéria-prima para o processo de metalurgia do pó através da moagem de cavacos de usinagem de dois aços diferentes e avaliar a evolução da fragmentação em moinho de bolas.

1.1 JUSTIFICATIVA e PROBLEMA

A sucata proveniente da usinagem é adquirida pelas siderúrgicas por preços que variam de R\$0,80 a R\$3,50 por quilograma para materiais como aços e ferros fundidos, e R\$3,00 a R\$5,00 para não-ferrosos, como o alumínio (Marmeleiro, 2022).

Comparando o preço mencionado para comercialização da sucata com o preço da matéria-prima para metalurgia dos pós, 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).

Devido aos preços elevados das matérias-primas e dos custos no fornecimento de energia para o desenvolvimento de sinterizados, tem-se percebido um maior desenvolvimento

de pesquisa por novos métodos de fabricação. Estes incluem processar os resíduos de usinagem transformando-os em matéria-prima para fabricação de componentes mecânicos (Popi *et al.*, 2020). Associado ao exposto e, 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 inovadoras que possibilitem seu reaproveitamento.

1.2 OBJETIVOS

Após prévio levantamento literário, análise de infraestrutura de laboratórios e materiais disponíveis, definiu-se os objetivos geral e específicos apresentados abaixo.

1.2.1 Objetivo Geral

- Avaliar a viabilidade técnica de realizar o reaproveitamento de resíduos derivados dos processos de usinagem para produção de pós metálicos através da moagem de cavacos em função do tempo de processo, obtendo matéria-prima para a metalurgia do pó, e analisar o processo de fragmentação em moinho de bolas de cavacos de dois aços diferentes.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Processar os cavacos metálicos dos aços SAE 1045 e AISI H13, através de moagem em moinhos de bolas, variando o tempo de processo;
- Avaliar alterações morfológicas, microestruturais e microdureza nos cavacos após a moagem;
- Caracterizar os pós metálicos obtidos através das análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise de área superficial, escoabilidade do pó, granulometria e teste de compressibilidade.
- Compreender o processo de fragmentação desses aços.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo está apresentada a revisão bibliográfica relacionada a conteúdos tomados como bases para realização desta pesquisa. De maneira sequencial, estão expostos conteúdos ligados a aproveitamento de materiais com foco em sustentabilidade, ecoeficiência e ecoefetividade. Na sequência, é realizada a comparação entre processos de fabricação industriais e a metalurgia do pó. Após isso, são tratados os principais tópicos sobre este processo metalúrgico, trazendo a abordagem sobre as etapas que o envolvem. Com objetivo de

estruturação literária, há uma abordagem direcionada à etapa de moagem, apresentando estudos ligados a condições de moagem de materiais metálicos. Por fim, apresentam-se os materiais e métodos utilizados neste trabalho.

2.1 REAPROVEITAMENTO DE MATERIAIS

Com o objetivo de desenvolver dentro dos processos produtivos técnicas que tenham capacidade de diminuir a geração de resíduos e aproveitar ao máximo a matéria prima e energia, as empresas do setor metalmeccânico estão adotando abordagens práticas voltadas para a ecoeficiência e ecoefetividade, duas filosofias ligadas a produção sustentável (Carvalho & Gomes, 2008).

A ecoeficiência, parâmetro que já desperta a atenção de entidades governamentais e da sociedade, é utilizada como um indicador para medir e avaliar o desempenho empresarial e significa produzir mais e melhor com menos recursos e gerando o mínimo de resíduos possível. Este termo pode-se definir ainda como a eficiência econômica e ambiental de uma empresa (Lutkemeyer, 2014).

De acordo com Carvalho e Gomes (2008), a ecoeficiência se tornou um avanço que contribui para uma sociedade sustentável. Passando por um momento em que as empresas estão preocupadas com o máximo aproveitamento de seus recursos e com a imagem que repassa aos seus clientes e sociedade, a ecoeficiência tem a capacidade de desenvolver a empresa dentro do que se chama melhoria contínua, agregando valor aos serviços prestados e transformando uma maior quantidade de materiais com menos energia. Outra consequência ocorrente da adoção de princípios ecoeficientes é a redução da poluição ambiental e o aumento da qualidade dos produtos.

Mesmo sendo uma filosofia a ser seguida, em longos prazos, a ecoeficiência não é capaz de promover mudanças consideráveis na produção industrial, uma vez que a cultura implementada pode se perder ao passar do tempo. Desta forma, obedecer a uma abordagem de ecoefetividade se torna mais interessante na busca de padrões duradouros. A ecoefetividade se baseia em princípios que norteiam processos de produção em ciclos fechados onde há preocupação desde a escolha e uso da matéria prima até o reaproveitamento dos resíduos do processo (Costa, 2009).

Para Costa (2009), a ecoefetividade é caracterizada por seguir as seguintes estratégias:

- Ausência de produtos tóxicos conhecidos;

- Escolha de matérias-primas menos agressivas ao meio ambiente e ao ser humano;
- Inovação na escolha de matérias-primas com menor impacto social e ambiental, atendendo a função inicial;
- Reinventar para garantir efeitos reais e positivos para o meio ambiente.

2.2 GERAÇÃO ATUAL DE RESÍDUOS DE USINAGEM

Durante levantamentos bibliográficos, objetivou-se estimar a quantidade de resíduos de usinagem gerada em nível nacional ou até mesmo mundial. Infelizmente não foram encontrados valores a serem considerados.

Através do estudo realizado por Pereira et al. (2021), juntamente com o levantamento da geração de resíduos repassada pela empresa que forneceu materiais para execução desta pesquisa, é possível ter uma noção do volume significativo gerado mesmo em pequenas empresas de usinagem. Seguem os dados apurados:

- Pereira et al. (2021), relatou nos resultados de sua pesquisa de campo que uma empresa que tem em sua planta cinco tornos CNC, dois tornos mecânicos e cinco centros de usinagem, rodando em dois turnos, tem a capacidade de usinar, entre materiais ferrosos e não-ferrosos, cerca de 18.500 quilogramas por mês de material e desse total, propiciar a geração de 5000 quilogramas de cavacos.
- A empresa que realizou a doação dos materiais faz uso de dois tornos e um centro de usinagem CNC e gera mensalmente aproximadamente 2000 quilogramas de cavacos de aço. Esta ainda acrescentou que estes são comercializados como sucata por um valor de R\$ 0,40 por quilograma.

2.2.1 Reaproveitamento de resíduos de usinagem

Além do tradicional caminho da reciclagem e consequente 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 se apresentou como promissor e chamou a atenção de empresas do ramo de transformação de materiais, além de pesquisadores do meio acadêmico. Consiste no recolhimento dos cavacos junto às máquinas de usinagem, separação por tipo de material, limpeza com reagentes químicos e posterior secagem em estufa. Após a 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 consequentemente 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 adesão 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 microns, como mencionada na introdução deste trabalho (Monteiro, 2016).

2.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO VERSUS METALURGIA DO PÓ

O elevado desenvolvimento tecnológico, atrelado a alta demanda produção de componentes e desenvolvimento de materiais de engenharia, requisitam o desenvolvimento de novos processos ou até mesmo o melhoramento de processos existentes. Pesquisas constantemente realizadas buscam otimizar o desempenho de processos industriais e consequentemente produzir melhores componentes e isso significa que há a necessidade de desenvolver o conhecimento sobre o comportamento dos materiais e parâmetros de fabricação a fim de aperfeiçoar os processos (Cremonezi et al., 2009).

De acordo com Delforge (2007), o ramo de fabricação mecânica apresenta uma vasta possibilidade de obtenção de peças, entre os processos existentes podemos citar a usinagem, fundição, conformação, metalurgia do pó, injeção e extrusão, impressão 3D, entre outros. Entre os processos mencionados, a metalurgia do pó (MP) é considerada uma tecnologia promissora que vem evoluindo consideravelmente nos últimos dez anos, principalmente no que tange a produção de componentes automotivos.

Visando o uso racional dos recursos materiais, é extremamente importante que os processos utilizados para produção de peças sejam pensados e projetados com objetivo de maximizar o uso energia de transformação e utilização de matéria-prima. A metalurgia do pó coloca-se no mercado competitivo como uma tecnologia que faz uso destas características de fabricação. Como pode-se observar na figura 1, a MP destaca-se por apresentar um baixo

consumo de energia por quilograma de material processado, além de apresentar 95% de aproveitamento da matéria-prima utilizada para produção das peças em seu processo (Cremonezi et al., 2009).

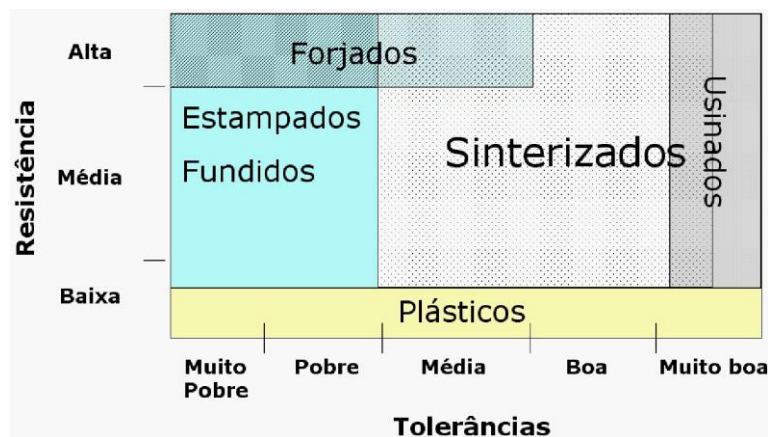
Figura 1: Comparação entre o consumo de energia e aproveitamento de matéria-prima obtidos para diferentes processos de fabricação.



Fonte: Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009.

Outro ponto importante a ser mencionado em peças produzidas via metalurgia do pó é que se caracteriza como propriedade importante na avaliação de peças produzidas via fabricação mecânica é a resistência mecânica em relação à tolerância dimensional. Na figura 2 pode-se observar a comparação entre diferentes processos de obtenção de peças e a MP em relação à propriedade mencionada (Delforge, 2007).

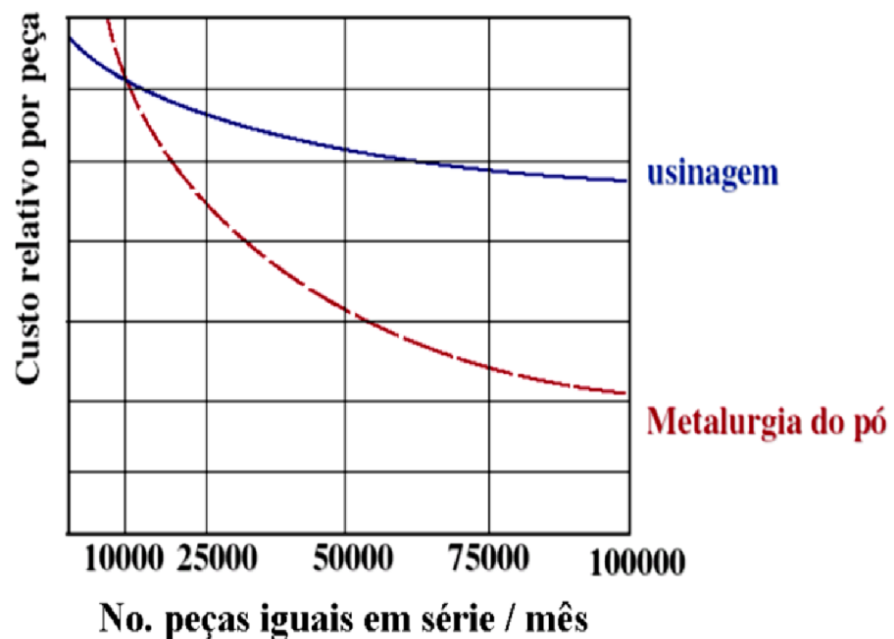
Figura 2: Comparação entre resistência mecânica e tolerância dimensional obtidas via diferentes processos de fabricação.



Fonte: Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009.

Atualmente, a usinagem é o maior competidor da metalurgia do pó, já que também é embarcada com a capacidade de produzir peças com boa resistência mecânica e elevada precisão dimensional. Porém, a partir do momento que a produção dos componentes atinge o patamar de alto volume produzido, a técnica de metalurgia do pó acaba apresentando um menor custo por peça produzido. Através da observação do gráfico apresentado na figura 3, pode-se observar o exposto (Pallini M., 2005).

Figura 3: Variação do custo de produção por peça para os processos de usinagem e metalurgia do pó.



Fonte: Pallini, 2005.

Analisando o gráfico exposto na figura acima, pode-se observar que, para ambos os processos comparados, com o aumento do número de peças produzidas, há uma diminuição considerável no valor de produção, principalmente para peças complexas, com peso de até 1kg e volumes acima de 10.000 peças/mês (Pallini & Carvalho, 2006).

2.4 METALURGIA DO PÓ

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 fusão dos materiais processados, fazendo uso somente de pressão e calor (Masuda, Higashitani, & Yoshida, 2006).

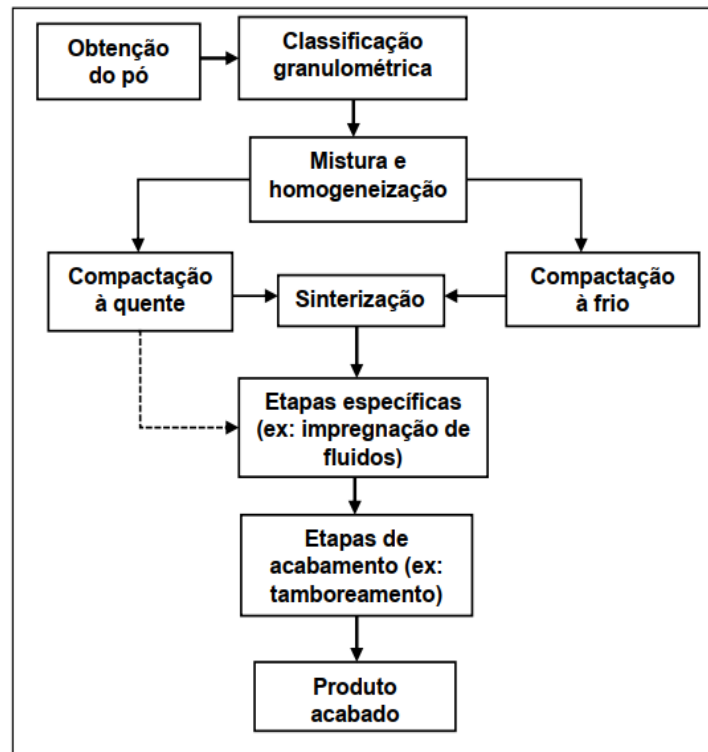
Uma técnica que vem se desenvolvendo rapidamente devido características essenciais como processo rápido e econômico para produção em larga escala. Caracterizada por minimizar os desperdícios de matéria prima e por produzir em grandes quantidades peças com alta qualidade nos quesitos de acabamento superficial e tolerâncias dimensionais, além de dispensarem processos posteriores por oferecerem 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 M., 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 4 etapas. A primeira etapa trata-se da obtenção do pó, que pode ser metálico ou não, e a segunda é caracterizada pela mistura dos pós constituintes. Após obtenção da mistura homogênea, ocorre a compactação dando forma ao que chamamos de compactado verde. Por fim, realiza-se a operação de sinterização, procedimento em que as peças previamente compactadas são aquecidas a temperaturas ligeiramente abaixo da temperatura de fusão. A figura 4 representa o fluxograma resumido das etapas que abrangem o processo de MP (Masuda, Higashitani, & Yoshida, 2006).

Figura 4: Fluxograma das etapas que contemplam o processo de metalurgia do pó.



Fonte: Batista, 2019.

Um dos pontos a ser superado pelos fabricantes de peças que abastecem o mercado automotivo é produzir peças que obedeçam ao chamado processo *near net shape*, ou seja, as medidas e o formato são muito próximos dos desejados. Esses produtos devem requisitar o mínimo de processos posteriores a sua fabricação e conseqüentemente propiciar menor geração de resíduos. A tecnologia da metalurgia do pó se caracteriza por ser o processo capaz de atingir este objetivo (Moraes, Simon & Vargas, 2015).

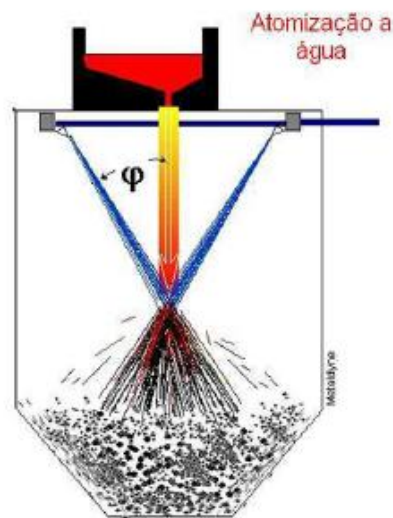
2.4.1 Obtenção do pó metálico

Uma das etapas do processo metalúrgico em questão é a obtenção do pó metálico. As principais técnicas de obtenção são: atomização de metais fundidos, redução química, deposição eletrolítica, decomposição química e fragmentação mecânica. As características e propriedades dos pós podem variar dependendo do método de produção utilizado, o que exerce influência direta em etapas posteriores do processamento por metalurgia do pó (Monteiro, 2016). Na sequência serão abordadas as técnicas de obtenção de pó referenciadas.

2.4.1.1 Atomização de metais fundidos

Técnica utilizada para produção de qualquer tipo de pó metálico, é considerada o método mais importante e largamente utilizado para fabricação de pó de ferro, principal matéria-prima utilizada na produção de peças via metalurgia do pó. O processo de atomização pode ser classificado em três categorias, a água, gás e centrífuga. Um filete de metal fundido é pulverizado através de um fluxo de gás ou água, obtendo partículas finas e com dimensão inferior a 150 microns, que são depositadas no fundo de uma câmara, através da ação da gravidade. A figura 5 apresenta a simplificação do processo citado (Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009).

Figura 5: Processo de atomização de metal fundido em água.



Fonte: Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009.

2.4.1.2 Redução química

O processo de redução química de metais é a forma clássica para obtenção de pó metálico. Neste processo os compostos metálicos são reduzidos e colocados em fornos com atmosfera controlada e temperatura abaixo do ponto de fusão do metal para após serem moídos até a forma desejada (Schwab, 2019). A redução do metal é caracterizada pela geração de gases como monóxido de carbono e hidrogênio, e é realizada em baixas temperaturas para evitar a sinterização entre as partículas, porém a baixa temperatura prejudica o processo de redução, por isso é necessário achar a temperatura ideal para que o processo se torne eficiente. A redução química é usada principalmente para a produção de ferro, cobre, tungstênio, molibdênio, níquel,

cobalto e consiste em reduzir os óxidos de metal por meio de monóxido de carbono ou hidrogênio (Rodrigues, 2004).

2.4.1.3 Deposição Eletrolítica

Mesmo sendo caracterizado por apresentar algumas restrições econômicas, este processo apresenta como principal vantagem a produção de pós com alta pureza, excelente propriedade a ser considerada para peças produzidas via metalurgia do pó. A deposição eletrolítica é utilizada para obtenção de pós metálicos como ferro, cobre e metais preciosos. Nesse processo o pó metálico pode ser produzido por precipitação no cátodo de uma célula eletrolítica sob determinadas condições. Exemplos comuns de pós produzidos por esse processo incluem o titânio, paládio, cobre, ferro e berílio. A principal vantagem do processo eletrolítico é a elevada pureza do produto obtido. (Rodrigues, 2004)

2.4.1.4 Decomposição Química

Neste processo um composto metálico sofre decomposição a temperaturas elevadas, os principais pós obtidos são o ferro e o níquel (Chiaverini, 2001). Existem dois tipos de decomposição térmica, a decomposição por carbonilas e de hidretos metálicos. O processo por carbonilas, é um processo no qual as carbonilas são obtidas pela reação do metal com o monóxido de carbono sob pressão e temperaturas controladas. No processo por hidretos metálicos que consiste na fragilização de um metal reativo com a introdução de hidrogênio, usando alto vácuo e temperaturas entre 400 e 700 °C, com pressões parciais de hidrogênio. Após esta etapa, o metal é moído em um moinho de bolas com atmosfera de argônio de alta pureza. Sob a forma de pós, o metal é desgaseificado em vácuo, na faixa de temperatura 650 - 760°C, até completa remoção do hidrogênio (Monteiro, 2016).

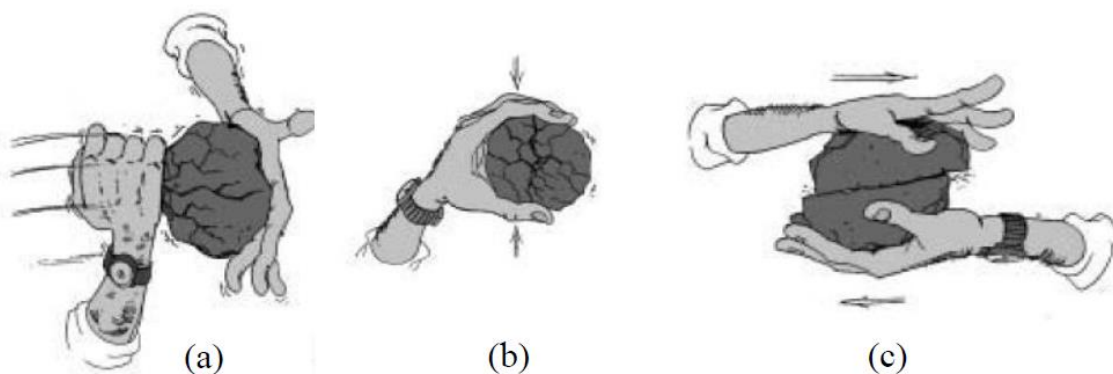
2.4.1.5 Fragmentação Mecânica

A última técnica de obtenção de pós metálicos abordada neste capítulo, trata-se da fragmentação mecânica, onde a produção de um pó metálico ocorre através da utilização de esforços de impacto, atrito, cisalhamento e compressão. Em alguns casos, os processos mecânicos são utilizados apenas para redução do tamanho das partículas, diminuição da aglomeração e mistura de novas ligas ou até mesmo para alteração das propriedades dos pós como densidade e velocidade de escoamento (Upadhyaya, 2002). No tópico a seguir será apresentado de maneira mais detalhada os princípios que envolvem o processo de fragmentação, bem como os processos existentes que fazem uso deste recurso.

- PRINCÍPIOS DA FRAGMENTAÇÃO

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 com tamanho e forma desejado 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 6 traz uma breve exposição da atuação dos mecanismos que envolvem a fragmentação mecânica.

Figura 6: Mecanismos de Fragmentação: Impacto (a); Compressão (b), Abrasão ou Cisalhamento (c).



Fonte: Metso, 2010.

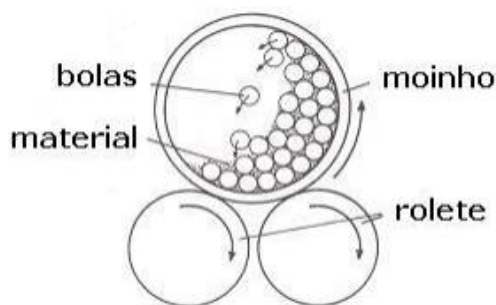
Cada mecanismo de fragmentação leva a formação de diferentes tipos de pós quanto ao formato e distribuição granulométrica. O mecanismo de impacto fornece partículas com ampla distribuição granulométrica. A compressão propicia a formação de dois tipos de produtos: partículas grossas e partículas finas, estas decorrentes da quebra por compressão no ponto de maior aplicação da carga (Wills & Napier, 2006). O cisalhamento age como abrasão. Neste caso, a força aplicada não é suficiente para fraturar a partícula por inteira, gerando apenas diminuição do tamanho da original e formando partículas muito finas (Valadão & Araujo, 2007).

2.5 FRAGMENTAÇÃO EM MOINHOS

Uma das maneiras de obtenção, via fragmentação mecânica, para o processo de metalurgia do pó, trata-se da moagem dos metais através da utilização de moinhos. Estes, são capazes de gerar partículas com formato irregular e granulometria de 0,1 a 400 μ m (German,

1997). A figura 7 traz como exemplo um moinho de bolas, em que um container gira sobre roletes de modo a movimentar e arremessar as bolas uma contra as outras, reduzindo o tamanho das partículas através do impacto e atrito provocado no processo (Rodrigues, 2004).

Figura 7: Princípio de funcionamento de um moinho de bolas.



Fonte: Rodrigues, 2004.

De acordo com Rodrigues (2004), as condições de moagem podem ser otimizadas mediante os parâmetros inerentes ao processo. Quanto mais completo for o controle das variáveis de moagem, melhor será o produto obtido. Entre os fatores que influenciam no processo de moagem podemos destacar os seguintes:

- ❖ Tipo de moinho;
- ❖ Tipo de recipiente de moagem;
- ❖ Rotação de moagem;
- ❖ Tempo de moagem;
- ❖ Razão massa de bola e massa de pó;
- ❖ Volume ocupado no recipiente de moagem;
- ❖ Atmosfera de moagem;
- ❖ Agente Controlador do Processo (PCA);
- ❖ Temperatura de moagem.

2.5.1 Tipos de moinhos

Dentre os principais tipos de moinhos utilizados para produção de pós, destacam-se os moinhos do tipo vibratório, planetário, atritores e o moinho de bolas. As principais diferenças entre eles e que são fatores a serem levados em consideração durante a escolha do moinho é a

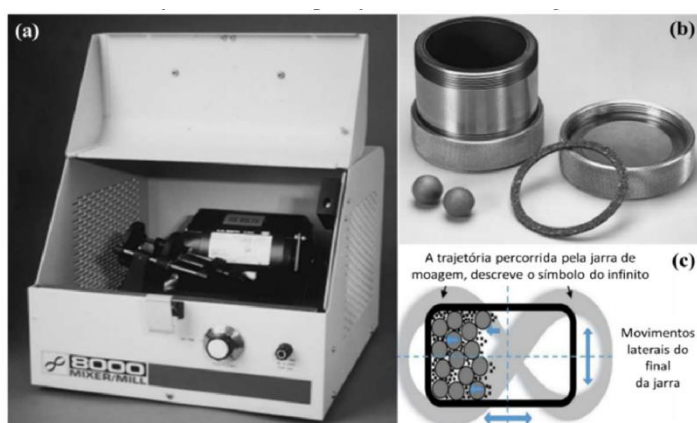
capacidade volumétrica, eficiência de moagem e dispositivos adicionais utilizados para alteração da temperatura de moagem (Castagnet, 2008).

- **Moinho Vibratório**

Do inglês, Shaker Mill, os moinhos vibratórios são largamente conhecidos como moinhos do tipo SPEX, devido ao nome da empresa que os fabrica, a SPEX (Castagnet, 2008). Para Zolriasatein (2012), entre os principais estudos empregados no processamento de materiais com este tipo de forno, destacam-se o ramo metalúrgico, materiais de construção, produtos químicos, mineração, entre outras. A figura 8 (a) apresenta o equipamento em questão.

Moinho vibratórios SPEX geralmente são utilizados em laboratórios de pesquisa para estudo de moagem de pós variados. A figura 8 (b) ilustra o recipiente de moagem utilizado pelo moinho, juntamente com as esferas. Fixado à estrutura principal do moinho, o recipiente realiza uma combinação de movimentos de translação longitudinal e transversal, gerando uma trajetória que descreve o sinal do infinito. As velocidades das esferas dentro do moinho são de aproximadamente m/s, gerando elevadas forças de impacto. É devido a isso que este tipo de moinho é considerado como moagem de alta energia. A figura 8 (c) faz representação da cinemática ocorrente (Zolriasatein et al., 2018; Suryanarayana, 2001).

Figura 8: Moinho vibratório do tipo SPEX: Equipamento completo (a); Recipiente de moagem (b); Demonstração do princípio de moagem no interior do recipiente de moagem (c).



Fonte: Adaptado de Suryanarayana, 2001.

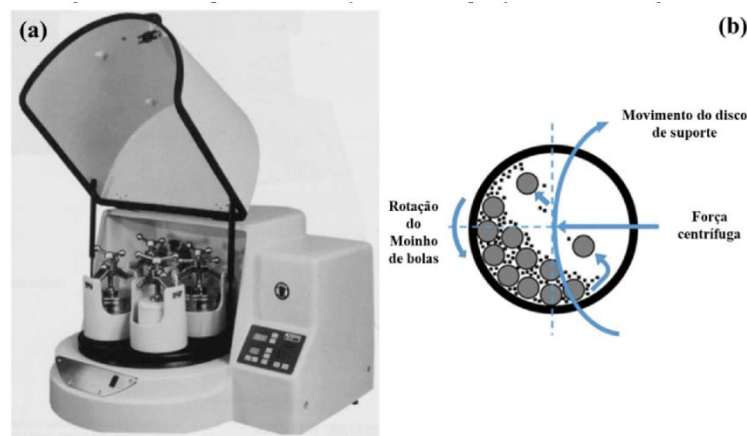
- **Moinho Planetário**

Assim como o moinho SPEX, o planetário é amplamente utilizado em pesquisas laboratoriais. O nome que recebe este equipamento se deve aos tipos de movimentos de translação em torno do eixo do moinho e rotação em torno de seu próprio eixo. As figuras 9 (a)

e 9 (b), demonstram, respectivamente, as características construtivas do moinho e auxiliam no entendimento dos movimentos realizados por ele. Pode-se fazer associação destes movimentos aos movimentos característicos realizados pelos planetas (Takimi, 2004; Suryanarayana, 2001).

A movimentação realizada pelo recipiente de moagem gera uma força centrífuga e consequente interação entre as esferas, a parede e o material a ser fragmentado. Em comparação ao moinho SPEX, o planetário alcança altas velocidades lineares, porém as frequências de impacto são menores e, devido a isso, apresenta menor energia de moagem (Suryanarayana, 2001).

Figura 9: Moinho do tipo Planetário: Equipamento completo (a); Demonstração do princípio de moagem no interior do recipiente de moagem (b).



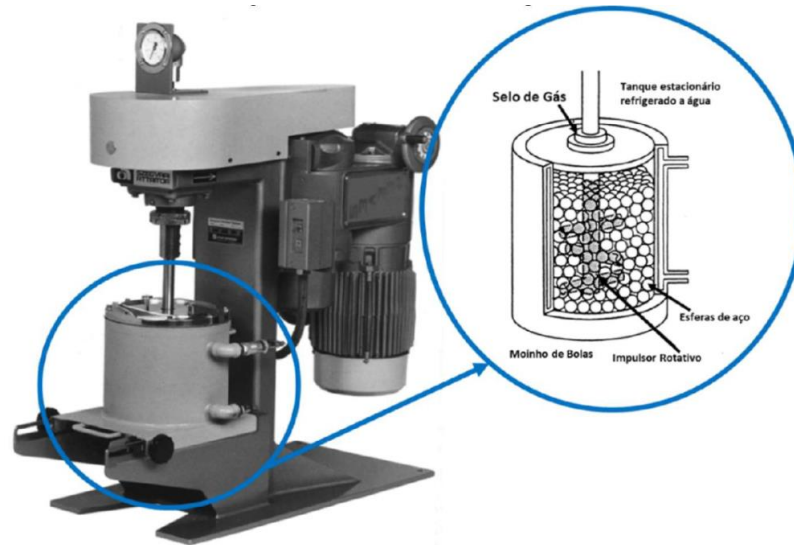
Fonte: Adaptado de Suryanarayana, 2001.

- **Moinho Atritor**

Os moinhos atritores, são caracterizados por possibilitar a moagem de uma grande quantidade de pó em uma só vez, variando esta carga de 0,5 a 40kg e podendo trabalhar com velocidades de até 5m/s, caracterizando alta energia de moagem. Além da disponibilidade de variados volumes de moagem, são comercializados sob os seguintes materiais construtivos: Vidro, SiC, WC, Alumina, aço carbono, aço inoxidável, dentre outros. (Bezerra, 2013)

Dentre os moinhos do tipo atritor existentes, destacam-se o Szagvari, como demonstrado na figura 10 e o Simoloyer, observado na figura 11. O primeiro, desenvolvido por Andrew Szegvari, consiste basicamente de um cilindro vertical e um eixo concêntrico com hastes horizontais mecanicamente impulsionadas.

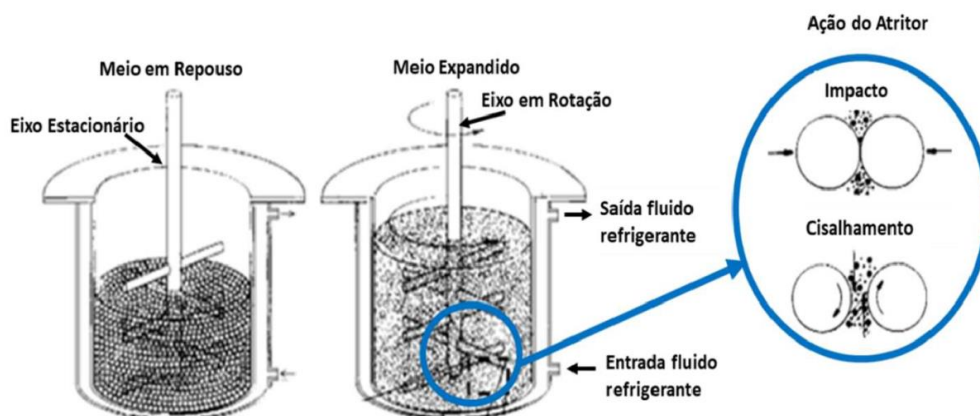
Figura 10: Moinho atritor do tipo szegvari (a); Demonstração do interior do recipiente de moagem (b).



Fonte: Adaptado de Suryanarayana, 2001.

No momento em que há a rotação das hastes horizontais, inicia-se a interação entre a massa de pó e as esferas dentro do jarro de moagem, gerando esforços de impacto e cisalhamento. São estes mecanismos que propiciam a fragmentação do material. A figura 11 expõem o princípio de funcionamento do moinho atritor do tipo Simoloyer (Bezerra, 2013; Takimi, 2004).

Figura 11: Princípio de funcionamento do moinho do tipo Simoloyer.

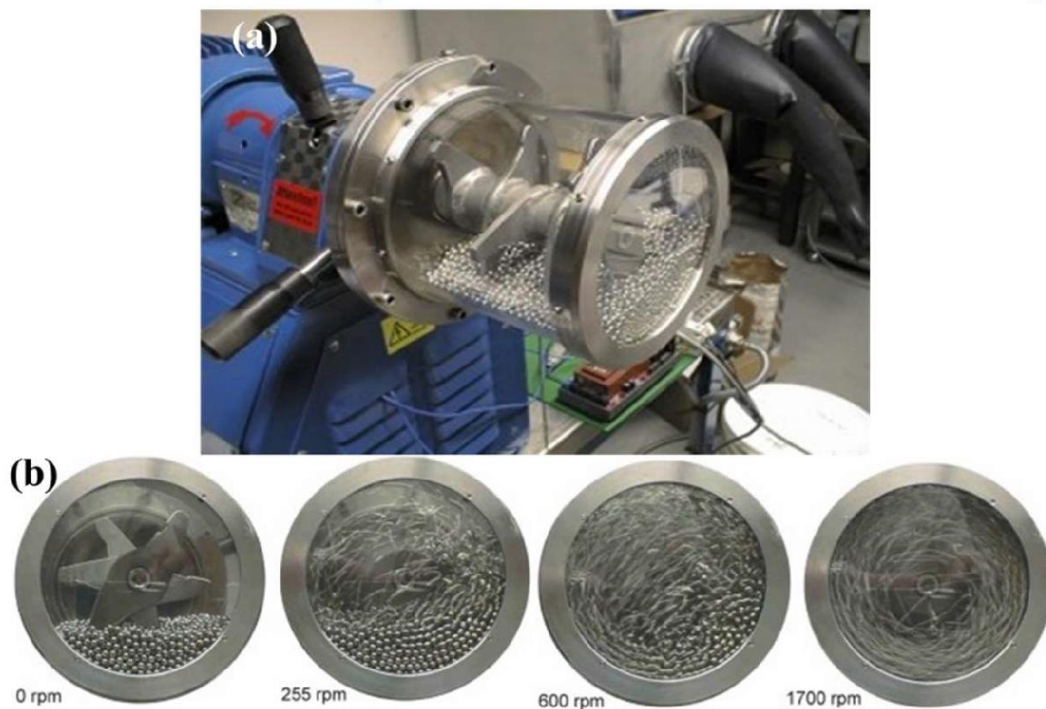


Fonte: Adaptado de Zoz, 2000.

Considerado uma variação do Szegvari, o moinho atritor do tipo Simoloyer foi criado por Henning Zoz. Este moinho tem como principal característica construtiva a existência de um eixo que gira em altas velocidades no interior do jarro, impulsionando as esferas durante a moagem. A vantagem obtida neste tipo de moinho é a capacidade de redução da sedimentação

do material a ser moído devido as altas rotações, geralmente 2 a 3 vezes maiores que a do moinho Szegvari, assim como a anergia envolvida na moagem (Takimi, 2004; Zoz et al., 2000). A figura 12 (a) e 12 (b), apresentam, respectivamente, o equipamento de moagem do tipo Simoloyer e a movimentação realizada pelos corpos de moagem durante o processamento de materiais.

Figura 12: Moinho Atritor do tipo Simoloyer: Equipamento Completo (a); Movimentação das esferas de acordo com a rpm eixo girante (b).

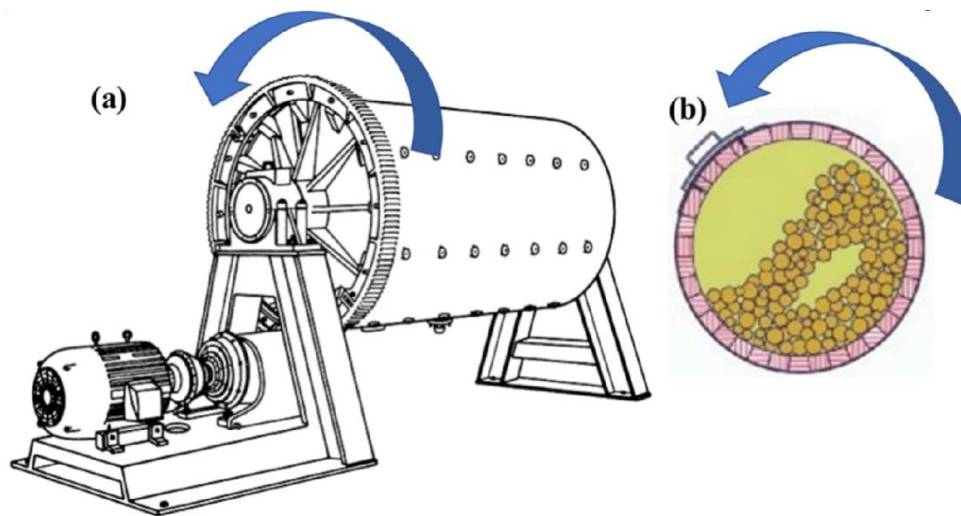


Fonte: Adaptado de Zoz, 2000.

- **Moinho de Bolas**

O moinho de bolas convencional, consiste basicamente de 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 acabam caindo em queda livre chocando-se umas com as outras e com o material a ser moído, gerando a fragmentação. De maneira geral, o aumento da velocidade de rotação, aumenta a energia envolvida no processo e maximiza a taxa de moagem (Castagnet, 2008). As figuras 13 (a) e 13 (b) apresentam, respectivamente, a estrutura do moinho e a movimentação realizada pela carga em moagem dentro dele.

Figura 13: Moinho de Bolas: Esquema construtivo de um moinho de bolas (a).
Movimentação das bolas de acordo com a rpm eixo girante (b).



Fonte: Adaptado de Suryanarayana, 2001.

Geralmente utilizados na industrial mineral, são aplicados à moagens de partículas grosseiras, com dimensões variando de 5 a 250 mm. São considerados equipamentos de moagem fina, com capacidade de produzir produtos 80% passantes em malha 35 mesh ou até produtos extremamente finos (Takimi, 2004).

2.5.2 Recipiente de moagem

Os recipientes utilizados em processos de moagem podem ser fabricados dos mais variados tipos de materiais e apresentarem distintas configurações de projeto interno, isso depende de fatores como material a ser moído e dos parâmetros de moagem utilizados (Suryanarayana, 2001).

Considerando o processo de moagem, em que há a existência de choques mecânicos entre corpos moedores, material e a parede do recipiente, é importante que o material desta parede apresente boa resistência ao desprendimento e desgaste afim de não se incorporar ao material fragmentado. Os materiais mais utilizados na fabricação desses recipientes são: porcelana, alumina, (cerâmicos), aço endurecido, aço ferramenta, aço inoxidável, titânio, etc (Suryanarayana, 2001).

2.5.3 Velocidade de moagem

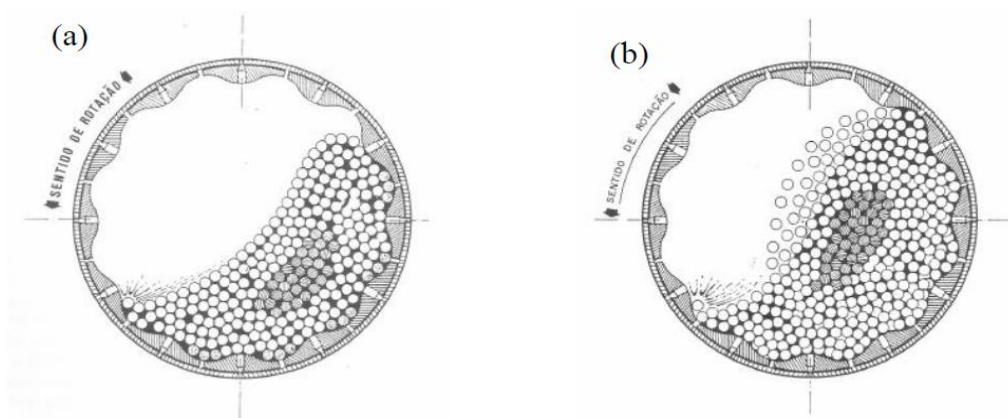
A velocidade é considerada um dos parâmetros mais importantes entre as variáveis inerentes ao processo de moagem. É através da definição das velocidades de moagem utilizadas

que se obtém as energias adquiridas no processo. De maneira geral, o aumento da velocidade propicia o aumento da energia de moagem e, conseqüentemente, a diminuição do tempo de moagem (Castagnet, 2008). Porém, a escolha de velocidades muito elevadas, consideradas acima da velocidade crítica, podem acarretar na diminuição da eficiência de moagem devido ao aumento da temperatura, uma vez que essa temperatura pode levar a decomposição de soluções sólidas em fases indesejadas e conseqüentemente, contaminação da carga (Suryanarayana, 2001)

A velocidade de rotação do moinho influencia diretamente no movimento da carga realizado dentro do recipiente de moagem. A partir do momento em que a carcaça do moinho está rotacionando a força centrífuga atuante no processo age e eleva a carga, junto à parede da carcaça, até um ponto em que a força peso se torna predominante e então obriga a carga a ser lançada, respeitando uma trajetória parabólica. De acordo com a rotação atuante, os movimentos obtidos nestes lançamentos são classificados de duas formas: cascata ou catarata (Bezerra, 2013).

O movimento do tipo cascata é caracterizado pela ação da moagem por atrito, uma vez que as esferas rolam sobre a carga. Já no catarata, o movimento realizado sob maiores rotações, a fragmentação acontece por meio do impacto proveniente do lançamento das bolas sobre a carga. As figuras 14 (a) e 14 (b) apresentam a cinemática envolvida em cada processo (Beraldo, 1987).

Figura 14: Regimes de Moagem: Cascata (a); Catarata (b).

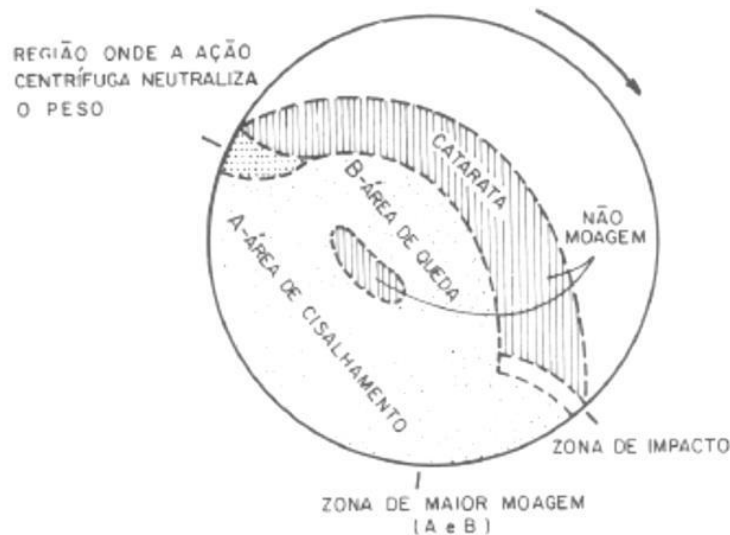


Fonte: Beraldo, 1987.

Como é possível observar na figura 15, a carga em moagem apresenta três zonas de moagem durante a sua movimentação dentro do recipiente. A primeira, chamada de zona de cisalhamento, há o predomínio de mecanismos de compressão e cisalhamento e o movimento

é caracterizado pela rolagem das bolas, umas sobre as outras. A zona de quebra é o local onde ocorre o movimento do tipo cascata e, por fim, na zona de impacto, a moagem acontece pelo regime de catarata (Beraldo, 1987).

Figura 15: Comportamento da carga de bolas em recipiente de moagem.



Fonte: Beraldo, 1987.

De acordo com Francioli *et al*, (2015), recomenda-se a utilização de velocidades de moagem com valores que varia de 60 a 80% do valor da velocidade crítica. Deve-se evitar velocidades abaixo desta faixa, pois propicia a ocorrência da moagem por regime cascata, que apresenta baixa eficiência de moagem. Por outro lado, a utilização de velocidades acima do range recomendado, pode acarretar no lançamento das bolas contra o recipiente, aumentando o desgaste e o consumo de corpos moedores. Em resumo, a utilização de rotações que resultem no processamento através do regime do tipo catarata é mais eficiente por apresentar boa energia de moagem.

Como dito, a definição da velocidade de rotação do moinho define qual o regime de moagem ocorrerá, cascata ou catarata. Para o conhecimento da rotação utilizada é necessário estimar a velocidade crítica (V_c) e sobre ela respeitar a faixa de 60 a 80%. Para esta estimativa, utiliza-se a equação número 1.

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

Onde,

V_c : Velocidade crítica, em rotações por minuto [rpm]

D : Diâmetro interno do moinho [metros]

Para os autores de ASM Handbook (1998), maiores velocidades de rotação aumentam a energia de moagem e, conseqüentemente, apresentam maior eficiência de moagem. Entretanto, aponta que velocidades mais baixas podem ser interessantes quando se objetiva a produção de partículas com dimensões mais refinadas.

2.5.4 Tempo de moagem

O tempo de moagem talvez seja um dos parâmetros de moagem mais importante inerente ao processo. Este deve ser o menor possível quando se objetiva alta eficiência de moagem, porém isso vai depender de variáveis como: tipo de moinho utilizado, intensidade de moagem, relação massa de bola massa de pó, temperatura de moagem e material da carga (Suryanarayana, 2001).

Não há equações para estimativa de tempo de moagem utilizado para determinada aplicação, a combinação das variáveis acima citadas é que vão determiná-lo. Por exemplo, diferentes tipos de materiais da carga, resultarão distintos tempos de moagem. Moinhos que fazem uso de cinemática que resultem em alta energia de moagem (MAE) apresentam tempo de cominuição infinitamente inferior a processo com baixa energia, como um moinho de bolas convencional, por exemplo (Nandi & Montedo, 2009).

Segundo Suryanarayana (2001) e Takimi (2004), deve-se evitar a moagem por períodos muito prolongados, pois isto gera contaminação da carga e surgimento de fases indesejáveis. De maneira geral, deve realizar a moagem pelo período necessário para se obter a dimensão desejada das partículas, não mais que isso.

2.5.5 Razão massa de bola e massa de pó

Também denominada como relação da carga, a relação massa de bola e massa de pó é dependente do processo de moagem e do tipo de moinho utilizado e essa caracteriza a massa de bolas colocadas no recipiente em relação a massa de material a ser fragmentado. Para moinhos pequenos, do tipo SPEX, geralmente são utilizadas relações de 10:1, já em moinhos maiores, como Atritores, pode-se chegar a relações de 50:1 ou até 100:1. De maneira geral, algumas pesquisas apontam a utilização de relações de carga variando de 1:1 até 220:1, dependentes do processo (Suryanarayana, 2001).

A relação de carga tem ligação direta com o tempo de moagem. Como regra, quanto maior for essa relação, menor será o tempo de moagem. Isso se deve pelo fato da ocorrência de maior número de corpos moedores, conseqüentemente, maior número de colisões por segundo

(Takimi, 2004). Para Metso (2010), moinhos de bolas a relação de carga utilizada pode variar de 1:1 a 5:1.

2.5.6 Volume ocupado do recipiente de moagem - Fator de enchimento

De acordo com Suryanarayana (2001), a operação de moagem em recipientes onde há a fragmentação do material, ocorre através de forças de impacto derivadas das colisões entre corpos moedores e o material a ser cominuído. Desta forma, para que haja as colisões, é necessário que a carga em moagem se mova livremente dentro do recipiente. Visto isso, é importante estabelecer um nível de preenchimento do recipiente para que este seja suficiente para gerar o máximo aproveitamento de seu volume, sem afetar na capacidade de moagem, limitando na movimentação da carga.

- Cálculo do 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 pode ser estimado com a utilização da equação 2 (Nandi & Montedo, 2009).

$$F = 113 - 126 \cdot \frac{H}{D} \quad (2)$$

Onde,

F: Fator de enchimento [%]

H: Distância do topo do moinho ao topo da carga em repouso [metros]

D: Diâmetro do moinho [metros]

A porcentagem da carga do moinho geralmente não excede 50% de volume. Na prática, os moinhos trabalham com fatores de enchimento que variam entre 30 e 45% (Francioli, Carvalho & Tavares, 2015).

2.5.7 Meio de moagem

Também conhecido como atmosfera de moagem, o meio de moagem tem total influência na qualidade dos pós obtidos uma vez que podem evitar a contaminação ou oxidação destes durante o processamento. Entre os meios de moagem comumente utilizados destacam-se a utilização de gases inertes como argônio e hélio. Outras atmosferas como nitrogênio ou amônia também são utilizadas para alguns casos em que se objetiva a produção de nitretos ou hidretos metálicos (Suryanarayana, 2001; Takami, 2004).

2.5.8 Agente controlador do processo (ACP)

Durante um processo de moagem, o material particulado sofre altas deformações plásticas, principalmente em processos de moagem de alta energia. Essas deformações geram a chamada soldagem a frio, fenômeno que não é interessante para o bom resultado do processo. Agentes controladores de processo (ACP), conhecidos como surfactantes ou lubrificantes, são elementos líquidos, sólidos ou gasosos que podem ser adicionados a carga com objetivo de diminuir os efeitos da soldagem (Asm Hadbook, 1998).

Segundo Takimi (2004), os ACP mais utilizados são ácido esteárico, hexano, metanol, etanol e nitrogênio líquido e a quantidade aplicada varia de 1 a 5% da massa da carga de produto em moagem.

2.5.9 Temperatura de moagem

Parte da energia mecânica ocorrente no processo de moagem, principalmente se tratarmos moagem de alta energia, é dissipada na forma de calor. Este é responsável por elevar a temperatura do recipiente onde ocorre a fragmentação. Além da energia proveniente das colisões dos corpos moedores, o tempo de moagem, materiais envolvidos e o tipo de moinho também são influentes na geração de calor no processo. Para processos de moagem em que não há alta energia de fragmentação, como o moinho de bolas, a geração de calor é extremamente baixa e pode ser desconsiderada (Takimi, 2004).

2.6 CARACTERIZAÇÃO DOS PÓS

Os componentes fabricados pelo processo de metalurgia do pó apresentam propriedades que dependem diretamente das características do particulado. Conhecendo as particularidades destes, é possível prever o seu comportamento quanto em trabalho, bem como as propriedades de uma peça finalizada. Durante a produção de componentes metálicos via MP, é indispensável a caracterização de todo pó elementar (matéria-prima) que formará a liga ou compósito (Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009).






De acordo com o Chiaverini (2001), inúmeras características e informações referentes aos pós necessitam ser consideradas e estudadas. Entre elas, destacam-se as seguintes:



- Pureza e composição química;
- Microestrutura da partícula;
- Tamanho e forma da partícula;
- Porosidade da partícula;

- Densidade aparente;
- Velocidade de escoamento;
- Superfície específica;
- Compressibilidade;
- Resistência verde.

Características quanto a forma e dimensão das partículas são diretamente relacionadas à seleção de pós metálicos. Etapas como transporte, compactação e sinterização de particulados exigem o conhecimento de sua distribuição de tamanho e geometrias. Propriedades microestruturais como resistência mecânica, densidade, entre outras são afetadas diretamente pela forma e dimensão das partículas (Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009). A tabela 1 apresenta a geometria característica associada a determinada técnica de processamento e obtenção de pós.

Tabela 1: Geometrias associadas às principais técnicas de obtenção de partículas de pós.

Tipo	Processo de Obtenção	Formato (Geometria)
Acicular	Decomposição Química	
Irregular com forma de bastão	Decomposição Química e Moagem	
Dendrítico	Eletrólise	
Floco	Moagem	
Esférico	Atomização Processo Carbonila (Fe)	

Arredondado	Atomização e Decomposição Química	
Irregular	Atomização e Decomposição Química	
Poroso	Redução de Óxidos	
Poligonal	Desintegração Mecânica Processo Carbonila	

Fonte: Adaptado de Upadhyaya, 2002.

Entender a distribuição de tamanho e as geometrias das partículas é essencial para otimizar o processo de fabricação e garantir a qualidade e as propriedades desejadas das peças metálicas. Isso geralmente envolve técnicas de caracterização, como análise granulométrica e microscopia eletrônica de varredura, por exemplo (Hong, 2018).

2.7 HOMOGENEIZAÇÃO E MISTURA DOS PÓS

A mistura dos pós é uma etapa extremamente importante e que antecede a compactação das peças a serem produzidas via MP. Neste momento deve-se conhecer as características da matéria-prima da compactação como dimensão e forma das partículas, sua escoabilidade, entre outros fatores que devem afetar diretamente a qualidade do produto compactado (Klein A. N., 2001).

De acordo com Schaerer (2006), para se obter uma composição uniforme da massa de pó a ser compactada e propiciar o sucesso na etapa de compactação, realizam-se os procedimentos de homogeneização e mistura, que se destacam por verificar a similaridade entre as características morfológicas do pó, como forma e tamanho das partículas e granulometria, com objetivo de evitar a segregação. Para a mistura e homogeneização de determinadas ligas, pode-se fazer uso de misturadores ou moinhos.

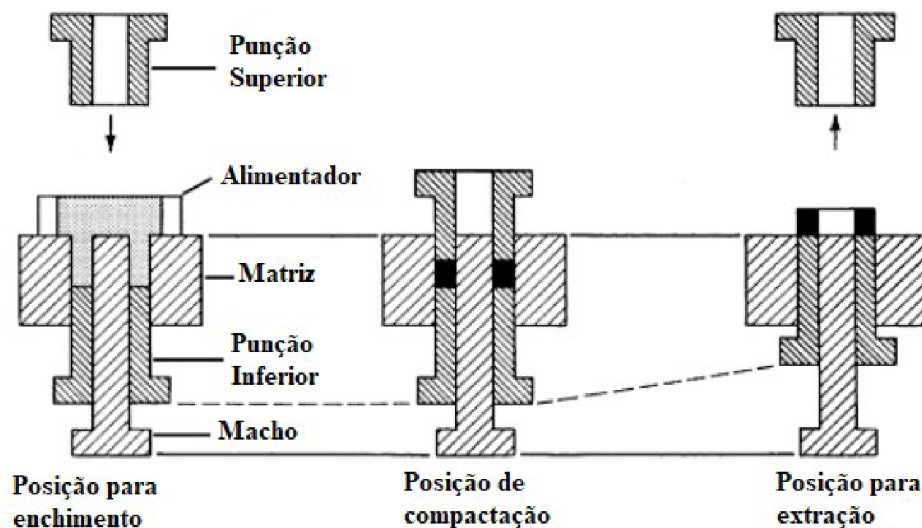
A etapa de mistura é caracterizada pela união dos pós elementares, lubrificantes, agentes controladores e ligantes. Esta pode ser realizada ao ar, em meios líquidos ou até mesmo em atmosferas controladas para evitar oxidação do material. Realizar a distribuição granulométrica correta é fundamental para obtenção de material compactado com área superficial e volume de vazios ideais para que ocorra a relação de contato necessária durante a difusão das partículas decorrentes do processo de sinterização (Schaerer, 2006).

2.8 COMPACTAÇÃO DO PÓS

A compactação é denominada a etapa onde as peças a serem produzidas via metalurgia do pó tomam forma e começam a se materializar. Usualmente, a compactação pode ocorrer através da prensagem uniaxial, que consiste na adição do pó metálico em uma cavidade chamada matriz. Esta apresenta as características geométricas da peça a ser produzida. Após a cavidade preenchida, dois punções, um inferior e outro superior exercem força gerando a compactação. Para aplicação desta força faz-se uso de prensas hidráulicas ou mecânicas (Moro & Auras, 2007).

Na figura 16 está exposto o processo simplificado de compactação demonstrando as três principais etapas constituintes, alimentação ou enchimento, compactação e extração da peça, denominada compactado verde (Albaro, 2001).

Figura 16: Sequência de compactação de peças produzidas via metalurgia do pó.



Fonte: Porter, 1998.

2.9 ESTUDOS CORRELACIONADOS

Diversas pesquisas relacionadas ao aproveitamento de materiais metálicos considerados resíduos industriais vêm desenvolvendo estratégias que possibilitem o beneficiamento destes resíduos como objetivo de torná-los matéria-prima para outros processos industriais. A tabela 2 apresenta os principais estudos relacionados à utilização do princípio de moagem via fragmentação mecânica para produção de pós metálicos a serem utilizado como matéria-prima para o processo de metalurgia do pó.

Tabela 2: Estudos sobre produção de pós metálicos através da moagem por fragmentação mecânica.

Título: Reaproveitamento de cavacos de usinagem através de moagem de alta energia para a fabricação e caracterização de pós metálicos da liga de alumínio AA6061.

Autor/Ano: Elton Ítalo Vieira Xavier¹; Lorene Ester Fernandes²; Diogo Monteiro do Nascimento³; Moisés Euclides da Silva Júnior⁴; Sandra Torres Zarzar⁵; Everthon Rodrigues de Araújo⁶; Oscar Olimpio de Araujo Filho⁷, 2019.

Objetivo: Este trabalho visou o estudo de uma metodologia para a fabricação de pós metálicos da liga de alumínio AA6061, a partir de cavacos de usinagem. Buscou, por meio da técnica de moagem de alta energia, fabricar pós com características que viabilizassem o seu uso como matéria-prima na metalurgia do pó e comparar os pós fabricados com os disponíveis comercialmente para esse fim.

Resultados: Foram obtidos pós que apresentaram distribuição granulométrica unimodal, tamanho mediano de partícula comparável aos pós disponíveis comercialmente, e composição química definida para a liga AA6061.

Título: Efeito das variáveis operacionais na moagem descontínua.

Autor/Ano: Francioli, D.M.; Carvalho, R.M.; Tavares, L.M.M., 2015.

Objetivo: Este trabalho consistiu na realização de experimentos em um moinho de bolas com moagem de minério com alteração nos seguintes parâmetros: grau de enchimento de bolas, velocidade de rotação do moinho, preenchimento de vazios, tamanho dos corpos moedores e porcentagem de sólidos.

Resultados: A mudança desses parâmetros gerou alterações na granulometria final do minério assim como na energia consumida, a qual foi medida com o auxílio de um sensor de torque. Desse modo, foi possível verificar melhora na eficiência do processo com aumento do tamanho dos corpos moedores e graus intermediários de enchimento do moinho e porcentagem de sólidos. A utilização

do DEM através do software EDEM® possibilitou uma melhor análise do movimento da carga dentro do moinho dadas as diversas condições operacionais testadas.

Título: Apresentação de métodos de reaproveitamento de resíduos metálicos na indústria metalmeccânica.

Autor/Ano: Francisco, E. E.; Oliveira, A. L., 2020.

Objetivo: Este trabalho apresentou pesquisas ligadas aos resíduos sólidos gerados na indústria metalmeccânica. Propôs-se a orientar e disponibilizar ações informativas, como o processo de briquetagem, que possibilitasse a reutilização de diversos tipos de materiais, o processo de metalurgia do pó, que trata da reutilização do aço SAE 1020, e por fim, o processo de limpeza de cavacos contaminados, permitindo um descarte limpo de resíduos sem prejudicar o meio ambiente.

Resultados: O processo de briquetagem na reutilização de resíduos metálicos na indústria metalmeccânica, mostrou-se uma opção viável para empresas que utilizam uma gama variável de materiais (ferro fundido, aço, silício, alumínio, zamac, magnésio, entre outros) na linha de produção. O processo de reutilização por metalurgia do pó, também se mostrou uma opção viável para as indústrias metalúrgicas, que em sua linha de produção possui um grande volume de aço SAE 1020.

Título: Análise de métodos de reaproveitamento de cavaco metálico contaminado considerando abordagens de ecoeficiência e ecoefetividade.

Autor/Ano: Moraes, C. A. M.; Simon,; Vargas, M., 2015.

Objetivo: Este trabalho teve como proposta avaliar a ecoeficiência e ecoefetividade dos métodos empregados na limpeza de cavacos metálicos contaminados com fluido de corte de empresas metalúrgicas. Desta forma, foi feito um estudo sobre a reutilização do cavaco de alumínio, analisando os métodos de limpeza utilizados, a eficiência do método, a destinação caso não possível reutilizar e, avaliado dentro das características citadas, qual o mais ecoeficiente e/ou ecoefetivo.

Resultados: Evidenciaram que a cultura de reparar, reutilizar, reciclar e destinar, ao invés de promover ações como a remodelagem de um sistema produtivo em ciclo fechado em que não há geração de resíduos é ainda mais prático e realístico atualmente. Também deixou claro que os princípios ecoeficientes e ecoefetivos melhoram o desempenho ambiental das empresas, diminuindo gastos com despesas para insumos, matéria-prima e destinação dos resíduos, além de contribuir para atingir maiores níveis de sustentabilidade.

Título: Reaproveitamento de cavacos de usinagem utilizando a metodologia de processamento da metalurgia do pó.

Autor/Ano: Witkowski, V., 2018.

Objetivo: Este estudo teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas e características físicas em corpos de provas prensados e posteriormente sinterizados, visando verificar a viabilidade de utilizar cavacos de usinagem de aço 1020 na fabricação de peças sinterizadas.

Resultados: Demonstraram que a temperatura de sinterização e a falta de homogeneidade interferem nos números finais dos ensaios e comprovou que é possível o reaproveitamento desse material para produção de peças novas.

Título: Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material. Uma nova tecnologia para a reciclagem de metais?

Autor/Ano: Delforge, D. Y. M.; Ferreira, I.; Silva, C. G. R.; Paris, E. A. G.; Marcelo, A. L.; Novaes, R. H., 2007

Objetivo: Avaliar a utilização de uma determinada quantidade de cavaco de aço inoxidável da série 316, misturada ao pó do mesmo material, para a produção e estudo de corpos-de-prova sinterizados.

Resultados: O comportamento mecânico do produto final foi avaliado através de ensaios de ruptura transversal recomendados e normalizados pela MPIF - Metal Powder Industries Federation e pela ASTM. As análises efetuadas pela metalografia quantitativa convencional das amostras sinterizadas demonstraram regiões de intensa difusão, portanto, regiões de sinterização de longo alcance. A resistência mecânica dos corpos-de-prova foi comparada com a resistência mecânica do aço inoxidável sinterizado, sem cavaco. Os resultados obtidos foram muito acima do esperado, demonstrando a viabilidade desse novo procedimento.

Título: Aproveitamento de resíduos de granalha de aço-carbono por metalurgia do pó.

Autor/Ano: Meneghel, L., 2017.

Objetivo: Aproveitamento dos resíduos do jateamento de granalha de aço-carbono, utilizando a técnica da metalurgia do pó para transformar em componentes com características técnicas suficientes para usos industriais futuros.

Resultados: A utilização da técnica de metalurgia do pó como forma de aproveitamento do resíduo de granalha apresentou-se possível. No entanto, os corpos consolidados pela M/P apresentaram baixa dureza. O estudo sugere que o material deve ser tratado termicamente para ser transformado

em componente final com propriedades mecânicas satisfatórias. Comparado aos pós comerciais, os corpos de prova apresentaram melhores propriedades de compressibilidade resultando em maior resistência verde, e também maior sinterabilidade.

Título: Estudo do reaproveitamento de cavacos de uma liga de bronze ao chumbo via rota de metalurgia do pó.

Autor/Ano: Junior, J. F. B., 2019.

Objetivo: Este trabalho teve como proposta o reaproveitamento dos cavacos de usinagem convencional da liga de bronze ao chumbo de composição próxima à norma UNS C98840, por meio da rota de processamento e manufatura da metalurgia do pó.

Resultados: A sinterização em temperaturas acima de 800°C não foi favorável para o tipo de liga estudada e a sinterização em fornos de atmosfera oxidante resultou em um material de baixa resistência e comportamento frágil. Além disso, no caso das amostras submetidas à sinterização em atmosfera inerte, foi possível constatar a formação de fase líquida de chumbo, devido à precipitação deste na superfície das amostras na forma de gotículas, e, no caso da sinterização em atmosfera oxidante, verificou-se por meio de estereoscopia que houve segregação de fases ao longo material.

Título: Estudo de viabilidade técnica de reciclagem de cavacos para uso em metalurgia do pó.

Autor/Ano: Gatamorta, F.; Junior, C. C. F.; Santos, E. B.; Stella, J. A.; Franco, M. F.; Oliveira, W. A., 2013.

Objetivo: Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método alternativo para a fabricação de produtos por metalurgia do pó, através do reuso de cavacos gerados no processo de fresamento.

Resultados: Os resultados mostram a viabilidade na utilização da moagem como método alternativo na produção de produtos para metalurgia do pó. O processo de sinterização com o uso de atmosfera formada por pó de grafite foi eficaz para a sinterização do pó produzido.

Título: Obtenção de ligas intermetálicas utilizando como base cavacos de aço inoxidável e sucata de alumínio via metalurgia do pó.

Autor/Ano: Mendonça, E. S.; Coelho, R. E.; Carvalho, C.O., 2019.

Objetivo: O objetivo deste trabalho foi a elaboração de materiais intermetálicos utilizando latas recicláveis de alumínio. Inicialmente, os cavacos de aço foram usinados por torneamento a seco e as latas de alumínio picotadas com dimensões entre 5 e 10 mm.

Resultados: Os pós da moagem e as amostras tratadas termicamente foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia por energia dispersiva e difração de raios X. Foram realizados também, nas amostras tratadas termicamente, ensaios de dureza e microdureza. Os resultados obtidos permitiram verificar a formação de fases intermetálicas de Fe, uma estrutura de excelentes propriedades mecânicas associado com leveza, ideal para uso em estruturas sustentação metálicas em substituição ao aço A-36.

Título: Desenvolvimento de processos de reciclagem de cavacos de zircaloy via refusão em forno elétrico a arco e metalurgia do pó.

Autor/Ano: Pereira, L. A. T, 2014.

Objetivo: Este trabalho teve como objetivo geral desenvolver processos de reciclagem de cavacos de usinagem da liga Zircaloy-4, resultantes da fabricação de componentes de elementos combustíveis propondo e aperfeiçoando tecnologias para a reciclagem e reaproveitamento desse material. Foram abordados os processos de fundição e de metalurgia do pó.

Resultados: Os lingotes foram tratados termicamente e laminados, sendo que as microestruturas foram caracterizadas por microscopia óptica e eletrônica de varredura. Os resultados para ambos os métodos mostraram que a composição do Zircaloy reciclado cumpre as especificações químicas e apresentaram microestrutura adequada para uso nuclear. Os bons resultados do método de metalurgia do pó sugeriram a possibilidade de produzir pequenas peças, como as tampas do encamisamento (end-caps), usando a sinterização no formato quase final (*near net shape*).

Fonte: Autoria própria, 2022.

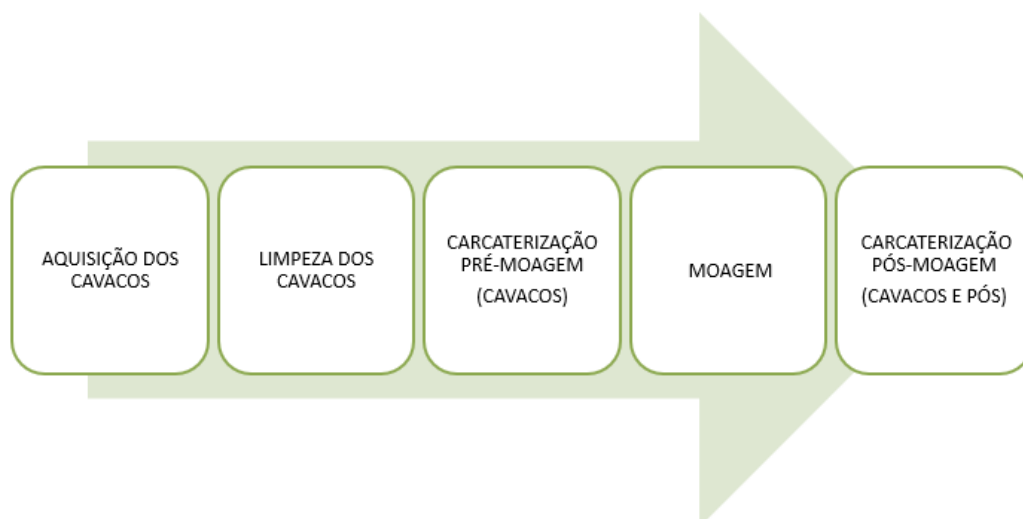
Através dos estudos mencionados acima, tornou-se possível a verificação e entendimento aprofundado sobre o reaproveitamento de materiais através do processo de moagem em moinhos e os parâmetros inerentes a eles. Este ponto foi muito importante para definição dos materiais e métodos utilizados durante esta pesquisa.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nesta etapa do projeto são apresentados os materiais e métodos que foram trabalhados para analisar o comportamento da fragmentação dos cavacos e o desenvolvimento de pós metálicos produzidos via moagem em moinho de bolas. Inicialmente estão apresentados os materiais e equipamentos utilizados na pesquisa e após isso, a metodologia aplicada para o processamento dos materiais, a caracterização dos pós adquiridos e análise dos resultados obtidos. Por fim, apresenta-se o comparativo entre os resultados, apresentado diferenças e similaridades entre os materiais. A figura 17 apresenta o fluxograma das etapas realizadas ao longo da pesquisa.

Figura 17: Fluxograma simplificado das etapas que contemplam os procedimentos experimentais.



Fonte: Autor, 2022.

3.2. MATERIAIS

Para realização desta pesquisa, foram utilizados os resíduos do tipo cavaco de usinagem obtidos junto a usinagem de materiais metálicos em empresas do ramo situadas na região da Serra Gaúcha. Trata-se de cavacos de dois materiais ferrosos com médio teor de carbono, o aço SAE 1045 e H13. A escolha destes materiais justificou-se por serem materiais que geram grandes volumes de resíduos de usinagem. Nas figuras 18(a) e 18(b) estão expostos os cavacos mencionados.

Figura 18: Resíduos de usinagem na forma de cavaco: Aço SAE 1045 (a); Aço AISI H13(b).



Fonte: Autor, 2023.

3.2.1. Aço SAE 1045

O SAE 1045 é um aço classificado como médio teor de carbono, fornecido de forma laminada e/ou trefilada sem tratamento térmico, aplicado na fabricação de peças de grande porte que necessitam de boa resistência mecânica ou até mesmo para produção de eixos, parafusos, pinos, porcas, hastes, tirantes, placas e bases, entre outras aplicações gerais (Diferro, 2022).

A composição química do aço em questão foi obtida através do certificado fornecido pela favorit durante a venda dos materiais à empresa de usinagem. Na tabela 3 pode-se observar a composição do aço SAE 1045.

Tabela 3: 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: (Favorit, 2022).

3.2.2 Aço AISI H13

Por se tratar de um material com boa resistência térmica, é utilizado para trabalhos a quente, uma vez que mantém as suas propriedades de dureza e resistência mecânica em elevadas temperaturas. Ligado com cromo-molibdênio-vanádio, apresenta alta resistência mecânica e

boa resistência ao desgaste, mesmo em temperaturas elevadas. Devido à estas características, o aço H13 é amplamente aplicado na fabricação de matrizes para forjamento a quente, moldes para injeção, ferramentas de corte, moldes para fundição, entre outros (Aço especial, 2022).

A tabela 4 apresenta a composição aço AISI H13, também solicitada junto à empresa fornecedora do cavaco.

Tabela 4: Composição química do aço AISI H13.

Composição Química do Aço AISI H13							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0,370	1,050	0,340	0,017	0,001	5,100	1,250	0,94

Fonte: (Favorit, 2022).

3.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Durante a primeira etapa ocorreu a coleta e limpeza dos resíduos de usinagem. É importante que no decorrer dos processos de usinagem não haja mistura entre cavacos de diferentes materiais, pois seria economicamente inviável realizar a separação destes, o que pode ser uma limitação do processo. Todas as etapas destacadas a partir deste momento foram realizadas nos laboratórios de metalurgia do pó, ensaios mecânicos e análise metalográfica, localizados no setor metalmeccânico do IFRS - *Campus Farroupilha*.

3.3.1 Coleta dos cavacos

Neste momento, realizou-se a coleta dos cavacos provenientes do processo de usinagem junto às máquinas operatrizes. Tratou-se do recolhimento do material junto à máquina de usinagem do tipo torno CNC de uma empresa do ramo de fabricação localizada na cidade de Caxias do Sul. Durante o processo de usinagem os cavacos são removidos das peças através do corte pela ferramenta de usinagem e então caem sobre uma bandeja onde ficam depositados para serem recolhidos. Neste estudo, a empresa fornecedora realizou separadamente a coleta dos materiais.

3.3.2 Limpeza dos cavacos

Decorrente do processo de usinagem, os cavacos adquiridos junto à empresa de usinagem estavam impregnados com fluido de corte. Trata-se de um óleo mineral solúvel em água responsável por facilitar o corte do material durante a usinagem através da diminuição

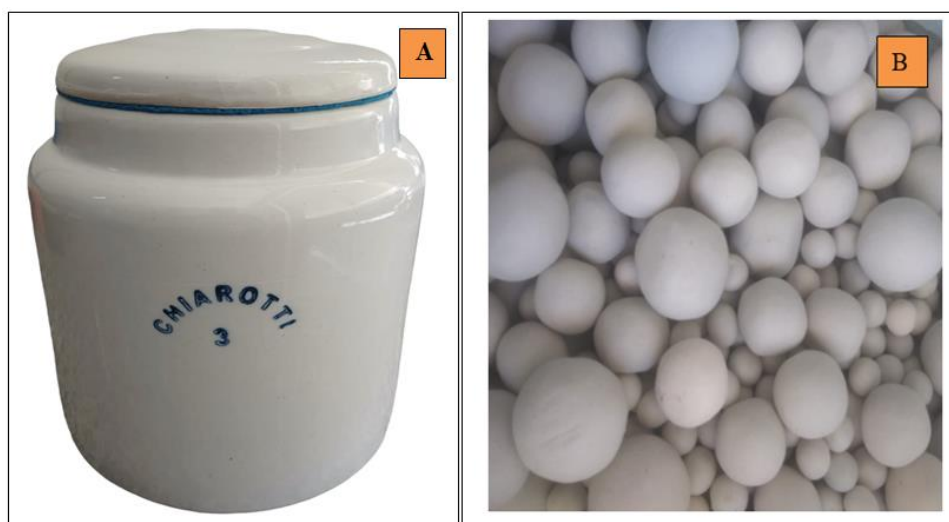
do atrito e da temperatura durante o processo. Para remoção deste fluido, utilizou-se a lavagem com água e detergente neutro. Após isso, os cavacos passaram pelo processo de secagem com ventilação forçada e ar aquecido.

3.3.3 Moagem dos cavacos

Após a obtenção do cavaco limpo e seco, realizou-se a pesagem dos cavacos para posterior moagem. Este procedimento foi realizado em uma balança digital marca Shimadzu, modelo UW6200H, que apresenta capacidade de medição de até 6200 gramas e resolução de duas casas decimais. Definida com base na literatura, a relação de massa de bola e massa de cavacos foi de 5:1. Desta forma, utilizou-se uma massa de bolas de 3000 gramas e 600 gramas de cavacos.

A moagem do material foi realizada através da utilização de um moinho de bolas pertencente ao laboratório de metalurgia do pó do IFRS - *Campus* Farroupilha. O equipamento é constituído de jarro cerâmico com capacidade de 3000 ml e bolas com formatos esféricos com diâmetros variando de 1/4 a 1", ambos fabricados em porcelana. Nas figuras 19 (a) e 19 (b) estão apresentados o jarro e as bolas cerâmicas mencionadas.

Figura 19: Itens utilizados no procedimento de moagem: Jarro cerâmico (a); Bolas cerâmicas (b).



Fonte: Autor, 2023.

Durante o processo de moagem, o jarro gira sobre roletes emborrachados através da transmissão de rotação fornecida por um motor elétrico no qual a velocidade é controlada por um inversor de frequência. O equipamento pode ser observado na figura 20.

Figura 20: Equipamento do tipo moinho de bolas.

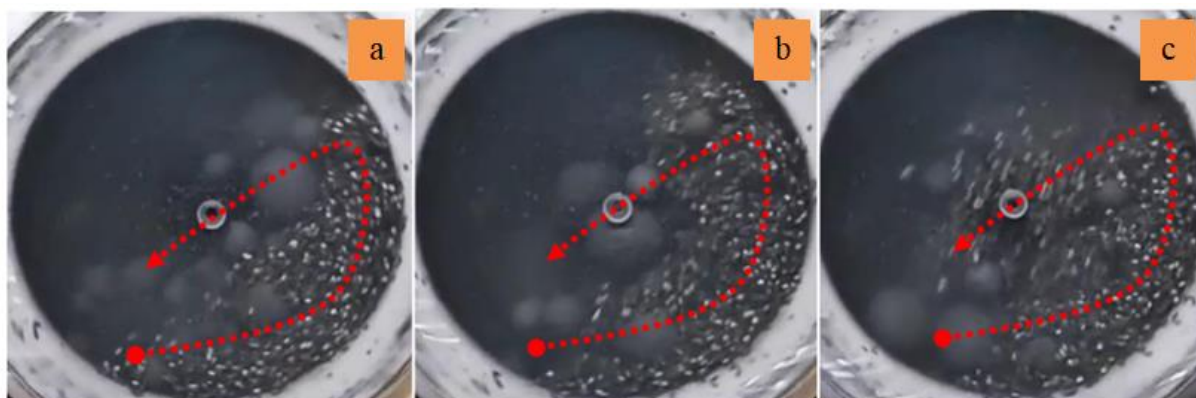


Fonte: Autor, 2022.

Como mencionado em tópicos anteriores, a utilização de regime de moagem do tipo catarata é mais desejável uma vez que apresenta maior energia de fragmentação. Francioli *et al.*, (2015), mencionam que este regime depende da velocidade de rotação e que a recomendada para a operação de moagem é de 60 a 85% da rotação crítica.

A partir do cálculo realizado através da equação 1, para um diâmetro interno do jarro de 195 mm, a rotação crítica encontrada para esta situação é de 95,80 rpm. Com base nestas informações, optou-se por verificar o comportamento da carga sob três rotações que representam 60, 70 e 80% sobre o valor crítico.

Figura 21: Análise do regime de movimentação da carga durante moagem: Rotação do moinho fornecendo energia potencial à carga (a); Carga sendo lançada após energia potencial ser superior à cinética (b); Bolas e cavacos chocando-se na parte inferior do moinho gerando a fragmentação (c).



Fonte: Autor, 2023

A verificação do regime da carga foi observada através de filmagem com recurso de câmera lenta e a ele aplicado pequenos cortes. Analisando a figura 21, pode-se observar que o regime decorrente da velocidade de 57 rpm, é o catarata. Esta velocidade foi escolhida por representar aproximadamente 60% da velocidade crítica. Este parâmetro foi aplicado aos dois materiais.

Após verificação do regime de moagem e definição da rotação a ser utilizada, juntamente com a definição dos parâmetros de moagem embasados na literatura, foram fixados os parâmetros de relação entre a massa das bolas e a do material a ser fragmentado e o fator de enchimento (%). Na tabela 5 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 5: Parâmetros de moagem utilizados durante os procedimentos de moagem.

Experimento (N°)	Parâmetros inerentes do Processo				
	Material	Rotação (RPM)	Fator de Enchimento (%)	Relação Massa Bolas e Massa Cavaco	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
4	Aço AISI H13	57	40	5:1	20
5	Aço AISI H13	57	40	5:1	40
6	Aço AISI H13	57	40	5:1	80

Fonte: Autor, 2023.

3.4. SEPARAÇÃO DOS CAVACOS E PÓS METÁLICOS

Após cada experimento, realizou-se a separação entre o cavaco residual e o pó metálico. Para esta separação, utilizou como parâmetro de referência a condição apresentada na tabela 6, em que partículas com dimensões maiores que 300 μm são consideradas sólidos e as menores, pó, mesmo que grosseiro (Woodcock & Mason, 1987). Neste trabalho, o material denominado sólido será mencionado como cavacos ou cavacos residuais.

Tabela 6: Classificação de partículas sólidas de acordo com a dimensão.

Classificação	Faixa Dimensional (μm)
Sólido Grosseiro	5 – 100 mm
Sólido Granular	0,3 – 5 mm
Pó Grosseiro	100 – 300 μm
Pó Fino	10 – 100 μm
Pó Superfino	1 – 10 μm
Pó Ultrafino	< 1 μm

Fonte: Adaptado de Woodcock & Mason, 1987.

Durante a separação, fez-se utilização de equipamento do tipo peneirador eletromecânico, da marca Pavitest, que é constituído de peneiras empilhadas sobre base vibratória. Como não havia peneiras de 300 μm , utilizou-se a peneira ligeiramente inferior disponível, a de 230 μm (65 mesh). O material retido na peneira de 230 μm , foi considerado como cavaco residual (sólido). Já o material passante nesta peneira, considerou-se pó. Para este procedimento, o tempo de vibração foi de três minutos.

3.5. CARACTERIZAÇÕES

A partir deste tópico, estão apresentadas as caracterizações realizadas para os cavacos residuais do processo de moagem e também para os pós resultantes deste.

3.5.1 Caracterizações dos cavacos

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, microscopia (verificação microestrutural e comportamento da propagação de trincas) e microdureza Vickers.

3.5.1.1 Caracterização Morfológica

O objetivo desta análise foi verificar a evolução da fragmentação com o passar o tempo de moagem, ou seja, verificar qual o formato e dimensão ocorrente em cada procedimento. A preparação das amostras contou com a separação de pequenas porções do cavaco residual retido em cada peneira. Estas foram colocadas sobre papel milimetrado e, após isso, realizou-se da captura de imagens através da utilização de uma lupa da marca Leica, modelo S6D.

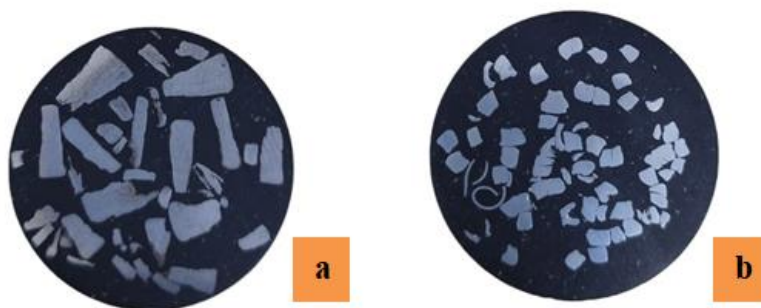
3.5.1.2 Análise da distribuição de tamanhos de cavacos

Procurado aprofundar a investigação sobre a relação entre o tempo de moagem e distribuição da dimensão dos cavacos residuais, optou-se para realização da análise de distribuição de tamanhos. Esta foi realizada através do processo de peneiramento. Para ambos os materiais, foram empregadas peneiras com abertura de 6, 10, 20, 28, 35 a 65 Mesh, correspondentes a 3350, 2000, 841, 650, 500 e 230 μm , respectivamente. Durante este procedimento, realizou-se o empilhamento das peneiras de maneira crescente de acordo com sua abertura. O tempo de vibração foi de três minutos para cada situação, sob mesma condição de vibração. Após cada procedimento, foi realizada a pesagem dos cavacos retidos em cada peneira.

3.5.1.3 Caracterização da microdureza

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 aceleraria o processo de fragmentação com o passar do tempo (Chiaverini, 2001). Para averiguação deste fenômeno, optou-se pela realização da medição da microdureza Vickers. Amostras de cavacos que foram embutidas em baquelite para microscopia, foram aproveitadas para levantamento da microdureza. Nas figuras 22 (a) e 22 (b) estão representados os corpos de prova de aço SAE 1045 e AISI H13, respectivamente.

Figura 22: Amostras de cavacos de aço embutidos: Aço SAE 1045 (a); Aço AISI H13 (b).



Fonte: Autor, 2023.

Os parâmetros utilizados no ensaio de microdureza foram baseados no estudo feito por Gontarski, *et al.* (2021), com base nas normas ABNT 2019 - A e ASTM 2017 - B, que recomendam a carga de 1,961 N, com tempo de endentação de 10 segundos. Para cada amostra, foram realizadas três endentações nas superfícies de três diferentes cavacos e por fim, calculada a média dessas medições.

3.5.1.4 Caracterização microscópica

Para avaliação microscópica, os cavacos foram lixados em lixas d'água com 220, 320, 400, 600, 1200 e 1500 Mesh e em seguida polidos com pasta de alumina 0,05 e 0,3 μm . Posteriormente, foram atacados com ácido Nítrico 3% e, por fim, limpos com álcool etílico. A análise microscópica foi realizada com objetivo de verificar alteração da microestrutura do cavaco em fragmentação e observação de possíveis nucleações e propagações de trincas geradas na moagem. Para este ensaio, utilizou-se um microscópio ótico, marca Leica, modelo DM 2500 M.

3.5.2 Caracterização de pós metálicos

Neste estudo, as técnicas utilizadas para caracterização de pós metálicos foram a microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise de escoabilidade, granulometria à laser e teste de compressibilidade.

3.5.2.1 Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As amostras foram analisadas através das técnicas de microscopia eletrônica de varredura no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM) da UFRGS. O equipamento utilizado foi um microscópio eletrônico, marca Hitachi, modelo TM3000. As amostras foram depositadas sobre fitas dupla face de carbono em stubs (porta-amostras). As imagens foram coletadas em uma ampliação de 500, 1000 e 2000 vezes.

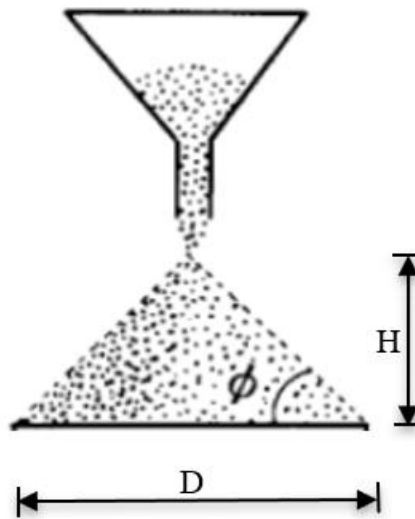
3.5.2.2 Distribuição de tamanho de partícula

Com objetivo de identificar a distribuição de tamanho das partículas do pó obtido na moagem, optou-se por realizar o ensaio de difração a *laser* ou também chamado granulometria a laser. A norma ASTM E112-13:2022 trata dos procedimentos a serem adotados nesta técnica. Durante o ensaio, a amostra foi dispersa em álcool isopropílico com agitação e ação de ultrassom, no próprio equipamento. O ensaio foi realizado em um granulômetro a laser, marca Cilas, modelo 1180L, do Laboratório de Materiais Cerâmicos - LACER da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

3.5.2.3 Escoabilidade

A técnica recomendada para verificação da propriedade em questão, seria referenciada na norma ISO 4490:2018, que trata do escoabilidade de pós metálicos através da utilização do Funil de Hall. Para o ensaio são necessárias 50 g de pó. Entretanto, durante esta pesquisa, não se obteve esta quantidade. Desta forma, optou-se pelo método empregado por Campos (2012), que se baseou na análise do ângulo de repouso para medir o escoamento de materiais granulares, como pós, grãos ou partículas sólidas. Neste método, o material é descarregado a partir de um funil, conforme indicado na figura 23. É medido o ângulo máximo de inclinação em que o monte do material pode ser mantido sem escorregar.

Figura 23: Método utilizado para medição do ângulo de repouso.



Fonte: Adaptado de Juliano & Barbosa-Cánovas, 2010.

A determinação do ângulo de repouso é realizada através da equação 3. Para tanto, o levantamento dimensional da altura e diâmetro da base de todos os montes foi realizada com um traçador de altura analógico e um paquímetro digital, respectivamente. Ambos com resolução de 0,01 mm.

$$\phi = \arctg \frac{H}{D/2} \quad (3)$$

Onde,

H = Altura do monte formado [mm]

D = Diâmetro da base do monte [mm]

O escoamento do material é determinado pelo ângulo de repouso calculado e classificado conforme Woodcock e Mason (1987) em muito livre, livre, médio, coesivo e muito difícil, conforme indicado na tabela 7.

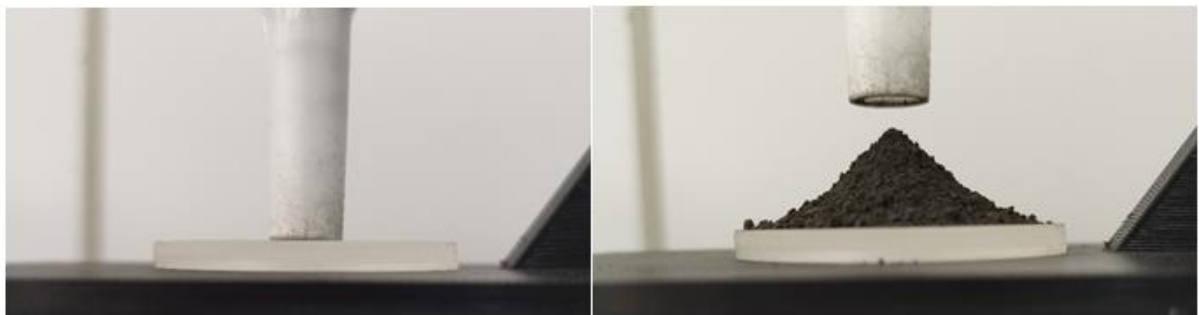
Tabela 7: Classificação de escoamento de acordo com o ângulo de repouso apresentado.

Ângulo de repouso (°)	Escoamento
25 – 30	Muito Livre
30 – 38	Livre
38 – 45	Médio
45 – 55	Coesivo
Maior que 55	Muito Difícil

Fonte: Adaptado de Woodcock & Mason, 1987.

Para tanto, a avaliação da escoabilidade constou das seguintes etapas: primeiramente efetuou-se o posicionamento do bocal do funil sobre uma base de acrílico com objetivo de evitar a passagem imediata do pó. Após isso, houve o preenchimento do particulado no funil e, por fim, a elevação do funil a uma altura fixa liberando a passagem do pó e conseqüentemente, geração do monte cônico. Nas imagens 24 (a) e 24 (b), observa-se a seqüência adotada.

Figura 24: Procedimento para verificação do ângulo de repouso de pó metálico: Bocal do funil apoiado em base de acrílico (a); Elevação do funil liberando a passagem do particulado.



Fonte: Autor, 2024.

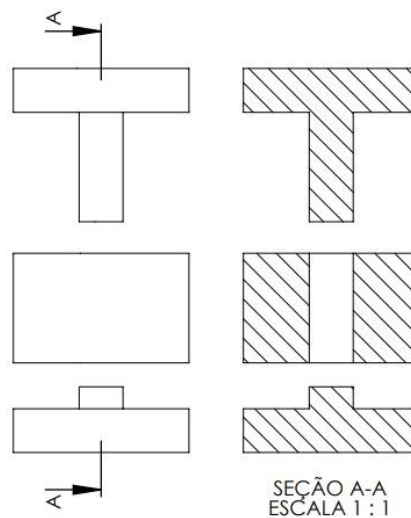
3.5.2.4 Compressibilidade

Para o teste de compressibilidade, uma amostra do material é submetida a uma carga axial, geralmente por meio de uma máquina de ensaio, que aplica forças de compressão graduais. Este teste é utilizado quando há objetivo de verificar a variação da densidade aparente do compactado sob diferentes pressões de compactação (Grupo Setorial de Metalurgia do Pó,

2009). O procedimento adotado para verificação da densidade aparente foi embasado na norma ASTM B212.

Para a realização da compressibilidade, optou-se pela compactação em matriz cilíndrica, com diâmetro e profundidade da cavidade de 10 mm e 20 mm, respectivamente, fabricada em aço ferramenta AISI D6. Na figura 25 está representada a matriz utilizada.

Figura 25: Matriz utilizada no ensaio de compressibilidade.



Fonte: Autor, 2024.

Embasado em estudo realizado por Castagnet (2008), juntamente com informações técnicas obtidas no livro do grupo setorial de metalurgia do pó (2009), optou-se pelos seguintes parâmetros de ensaio: velocidade de 5 mm/min e pressão máxima de 500 MPa. Este foi realizado em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL20000, com capacidade de 20 toneladas e respeitou a seguinte sequência: preenchimento da matriz com pó metálico, compactação e extração da amostra. A figura 26 demonstra a sequência mencionada.

Durante a compactação da amostra, ocorre o aumento da sua densidade, uma vez que a máquina de ensaios realiza o avanço do punção dentro da cavidade da matriz, diminuindo o volume interior. Conhecendo as dimensões do diâmetro e da altura da matriz, torna-se possível calcular o volume da amostra. Com o controle de deslocamento do punção e aplicação de carga oferecidos pelo equipamentos, pode-se calcular a densidade aparente para cada pressão de compactação. Para este cálculo fez-se uso da equação 4. A massa de cada amostra foi medida após sua extração da matriz.

$$Dv = \frac{m}{A (H-Dp)} \quad (4)$$

Onde,

D_v = Densidade aparente [g/cm^3];

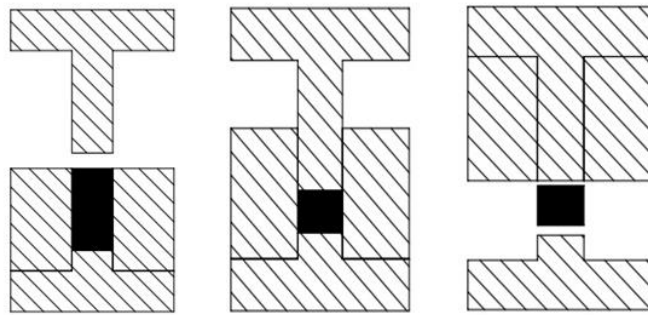
m = Massa da amostra [g];

A = Área da seção do cilindro formado pela matriz [mm^2];

H = Altura inicial da cavidade da matriz;

D_p = Deslocamento do punção [mm];

Figura 26: Sequência utilizada durante ensaio de compressibilidade. Preenchimento da cavidade (a); Compactação (b); Extração (c).



Fonte: Autor, 2024.

3.6. EFICIÊNCIA DE MOAGEM

Durante esta pesquisa, tratou-se a eficiência de moagem como à capacidade de um processo de moagem em transformar uma determinada massa de sólidos grosseiros em um pó. Para a verificação da eficiência de moagem obtida em cada tempo de moagem, utilizou-se a equação 5. Considerou-se a massa de cavacos e não a do pó produzido, pois parte do pó fica aderido nas paredes do moinho, nas superfícies das bolas e dos cavacos, inviabilizando o cálculo. Para minimização de erros devido à aderência de pó residual na superfície dos cavacos, estes foram lavados com álcool isopropílico e secos antes da pesagem.

$$E = \frac{M_{Ci} - M_{Cr}}{M_{Ci}} \times 100 \quad (5)$$

Onde,

E = Eficiência de moagem [%]

M_{Cr} = Massa de cavaco residual [gramas]

M_{Ci} = Massa de cavaco inicial [gramas]

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico estão expostos os resultados obtidos durante a pesquisa.

4.1 AÇO SAE 1045

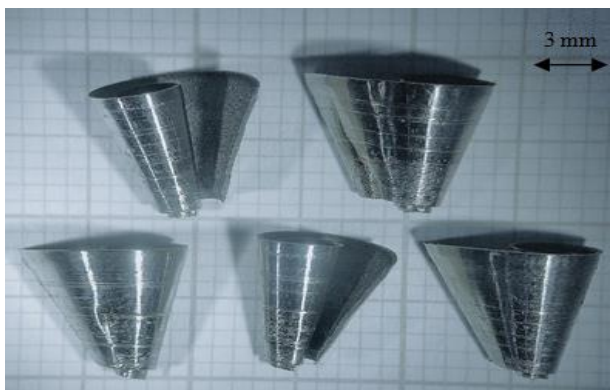
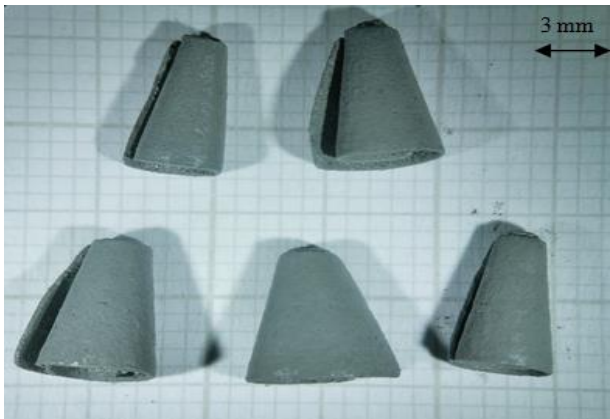
A partir deste tópico, serão apresentados os resultados obtidos a partir das caracterizações realizadas em cavacos residuais e pós metálicos de aço SAE 1045.




4.1.1 Cavacos Residuais de aço SAE 1045


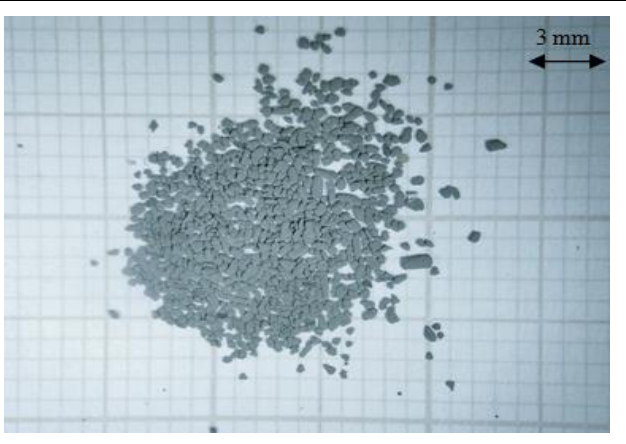
4.1.1.1 Morfologia dos cavacos

A análise morfológica foi realizada nos cavacos antecedentes ao processo de moagem e, também após este. A tabela 8 apresenta a alteração morfológica para cada situação.

Tabela 8: Análise morfológica dos cavacos pré e pós-moagem – Aço SAE 1045.

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

<p>Cavaco: Elementos com dimensão entre 2 e 3 mm.</p> <p>Presente em: Moagem de 20, 40 e 80 horas.</p> <p>Características: Cavacos fragmentados, decorrente da moagem. Formato irregular predominante. Presença de pó metálico aderido à superfície.</p>	
<p>Cavaco: Elementos com dimensão entre 0,8 e 2 mm.</p> <p>Presente em: Moagem de 20, 40 e 80 horas.</p> <p>Características: Cavacos fragmentados, decorrente da moagem. Formato irregular predominante. Presença de pó metálico aderido à superfície.</p>	
<p>Cavaco: Elementos com dimensão entre 0,6 e 0,8 mm.</p> <p>Presente em: Moagem de 20, 40 e 80 horas.</p> <p>Características: Cavacos fragmentados, decorrente da moagem. Formato irregular predominante. Presença de pó metálico aderido à superfície.</p>	

<p>Cavaco: Elementos com dimensão entre 0,5 e 0,6 mm.</p> <p>Presente em: Moagem de 20 e 80 horas.</p> <p>Características: Cavacos fragmentados, decorrente da moagem. Formato irregular predominante. Presença de pó metálico aderido à superfície.</p>	
<p>Cavaco: Elementos com dimensão entre 0,2 e 0,5 mm.</p> <p>Presente em: Moagem 80 horas.</p> <p>Características: Cavacos fragmentados, decorrente da moagem. Formato irregular predominante. Presença de pó metálico aderido à superfície.</p>	

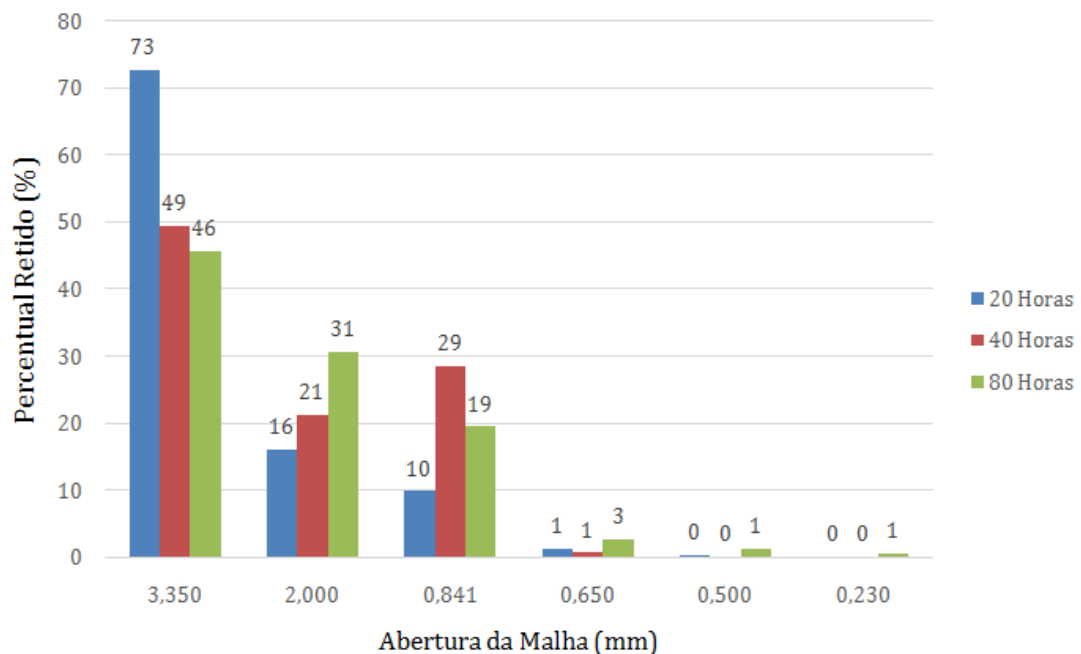
Fonte: Autor, 2023.

Visualmente, observou-se uma variação na morfologia do cavaco, passando de espiral para forma irregular e corpo achatado. Não foi possível correlacionar esta modificação diretamente com o tempo de moagem, uma vez que este formato 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 aleatória.

4.1.1.2 Análise da distribuição de tamanhos dos cavacos residuais

Após peneiramento e pesagem da massa retida em cada peneira, chegou-se à distribuição de tamanhos representada no gráfico da figura 27.

Figura 27: Distribuição de tamanho de partículas de cavacos pós-moagem – Aço SAE 1045.



Fonte: Autor, 2023.

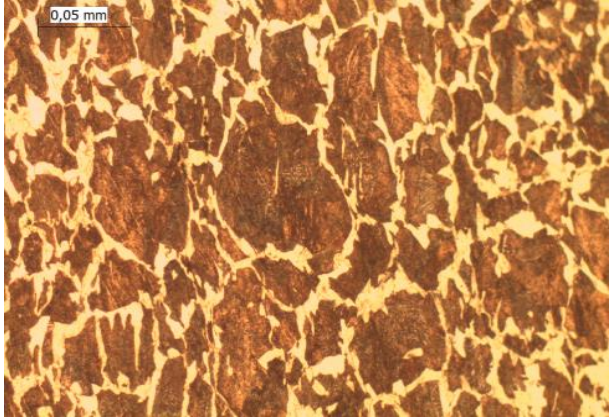
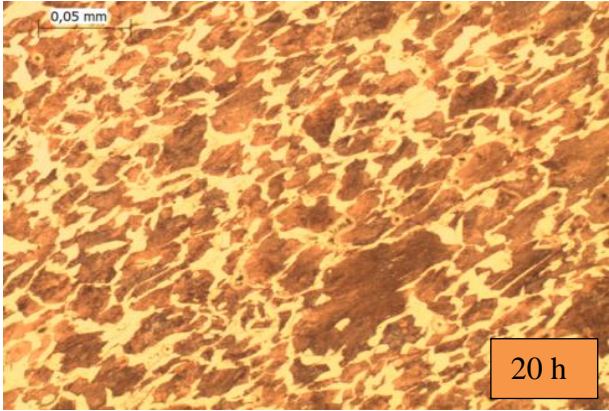
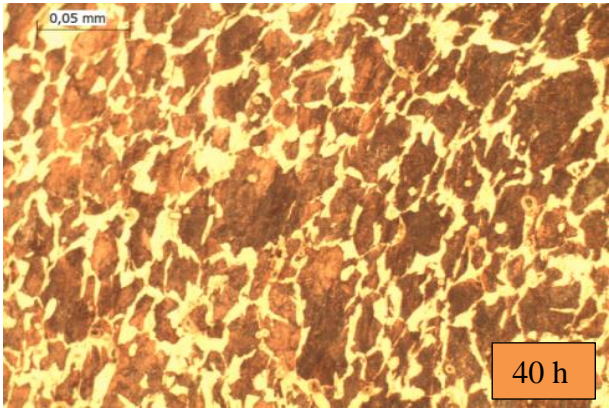
O gráfico da distribuição de tamanhos mostrou claramente que o tempo de moagem tem grande influência no processo, principalmente ao aumentar o tempo de 20 h para 40 h. Percebe-se que para 20 horas há um grande acúmulo de cavacos com dimensões ainda originais e que há diferença considerável entre o intervalo 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.

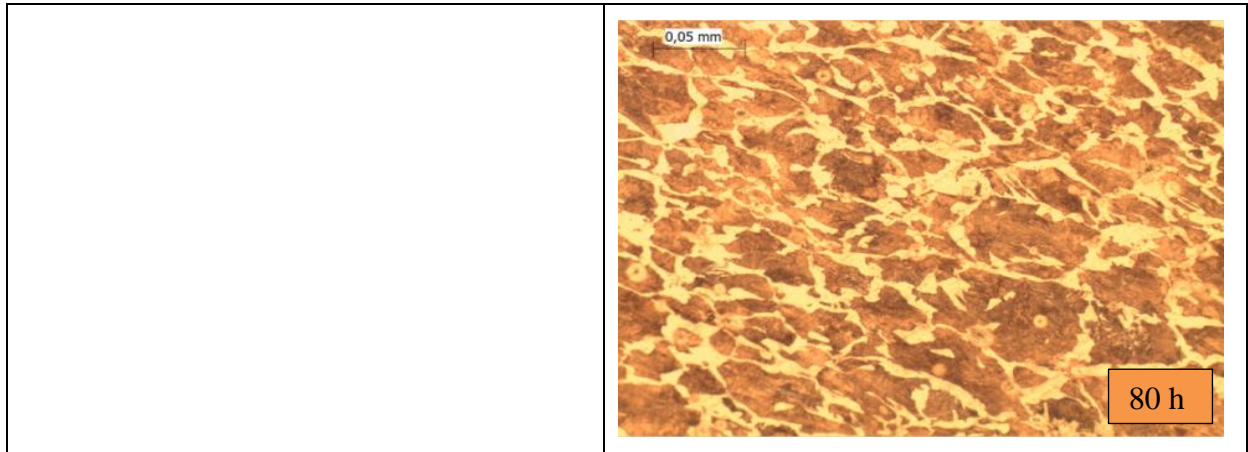
Além do material retido nas peneiras, observou-se a existência de um pó bastante fino que ficou aderido nas superfícies dos cavacos, inviabilizando sua contabilização nas análises realizadas. No fundo do equipamento também foi possível observar o acúmulo deste pó.

4.1.1.3 Caracterização microscópica

Para verificação da microestrutura apresentada pelos cavacos originais e residuais, aplicou-se a técnica de microscopia óptica. Na tabela 9, estão apresentadas as análises referidas.

Tabela 9: Microestruturas apresentadas pelos cavacos de aço SAE 1045 pré e pós-moagem.

Pré-moagem	
Situação	Microestrutura
<p>Tempo de Moagem: Sem moagem.</p> <p>Características: Microestrutura típica da um aço SAE 1045, com perlita contornada por ferrita. Grãos com tamanhos distintos e formatos semelhantes, predominantemente equiaxiais.</p>	
Pós-moagem	
<p>Tempo de Moagem: 20, 40 e 80 horas de moagem.</p> <p>Características: 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: Autor, 2023.

Como já mencionado, 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 (Chiaverini, 2001). Para esta comprovação, buscou-se verificar, também através de análise microscópica óptica, o fenômeno mencionado. Os resultados estão expostos na tabela 10.

Tabela 10: Comportamento da fragmentação do aço SAE 1045 em função do tempo de moagem.

TEMPO DE MOAGEM		
20 HORAS	40 HORAS	80 HORAS
		

Fonte: Autor, 2023.

Pode-se verificar que os choques mecânicos decorrentes do processo agiram 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

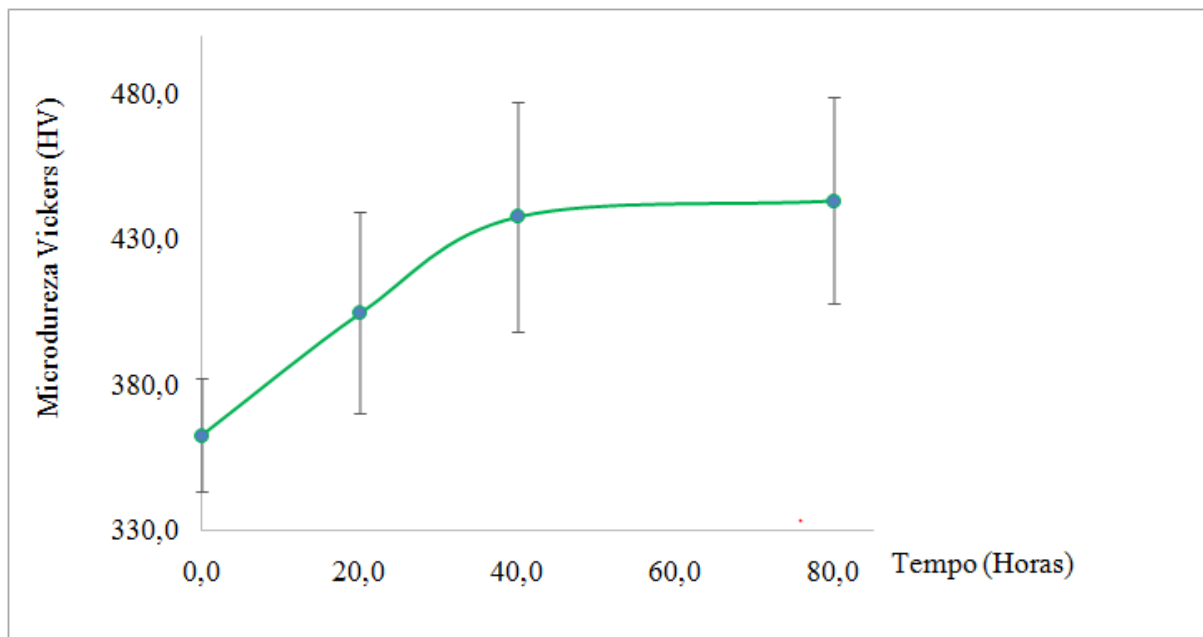
percebeu-se um acréscimo no aparecimento das trincas com maiores dimensões ou até mesmo na iminência da fragmentação completa.

Para este material, as trincas surgem tanto nas arestas dos cavacos, quanto no centro e, a partir disso, propagam-se transversalmente até gerar a fratura total.

4.1.1.4 Microdureza

Para verificação da existência de encruamento, optou-se pela análise de microdureza Vickers. No eixo referente à microdureza, são apresentados os valores médios de três medições realizadas em três cavacos diferentes para cada condição de moagem. Os resultados obtidos estão expostos no gráfico da figura 28.

Figura 28: Microdureza Vickers encontrada na superfície dos cavacos – Aço SAE 1045.



Fonte: Autor, 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 uma tendência de aumento 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 foi significativa. Avaliando o gráfico, verificou-se que a propriedade avaliada apresentou 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. Um ponto a ser

destacado na alteração da propriedade de microdureza é baixa tensão de escoamento do aço SAE 1045, aproximadamente 350 MPa. Este fator também contribui para que haja encruamento dos grãos e conseqüentemente aumento a propriedade mencionada (Giassi Ferro e Aço, 2024). Provavelmente, os esforços gerados no processo de moagem devem ter sido suficientes para ultrapassar a tensão de escoamento, uma vez que se percebeu esse aumento de dureza.

A microdureza do cavaco sem moagem já apresentava valores superiores a um material do tipo aço SAE 1045 em sua forma original, em torno de 370HV. A dureza para este material na sua forma original fica em torno de 250 HV (Silva, *et al.*, 2019). Isso se deve ao encruamento ocorrido durante a usinagem do material no processo de torneamento, conforme resultados obtidos por (Gravalos, *et al.* (2007). Neste trabalho, os autores verificaram que, durante o processo de remoção do cavaco por usinagem em torneamento, há um encruamento superficial e conseqüente aumento da dureza.

4.1.2 Pó de aço SAE 1045

Após a realização da moagem e separação do cavaco residual, obteve-se um pó metálico fino. Na figura 29, está exposto este material. Percebeu-se, visualmente, que este se apresenta bastante aglomerado.

Figura 29: Pó metálico resultante da moagem de aço SAE 1045.

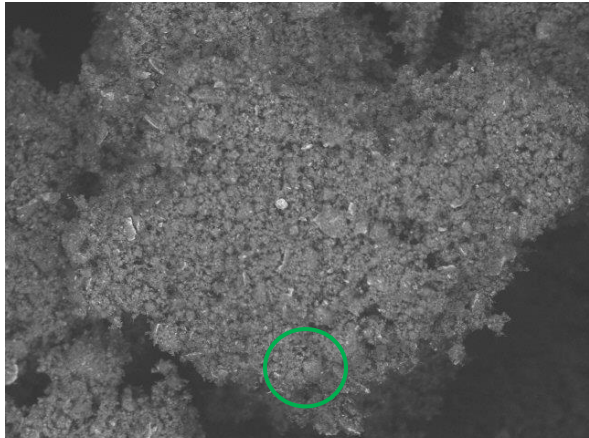
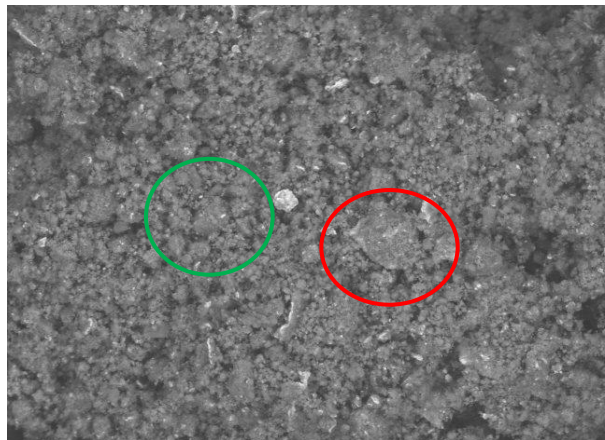
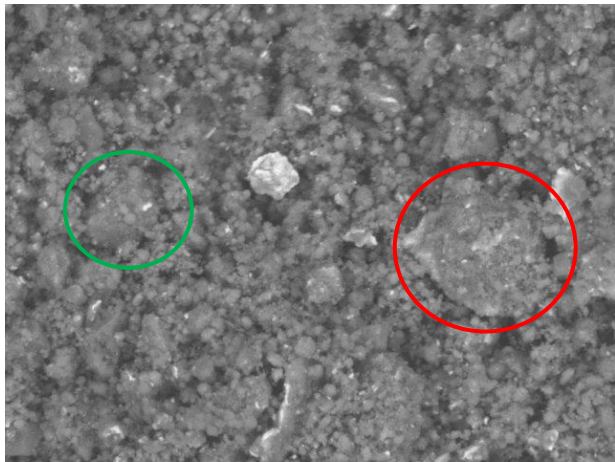


Fonte: Autor, 2023.

A partir deste ponto, estão representadas as técnicas utilizadas para a caracterização do pó de aço SAE 1045.

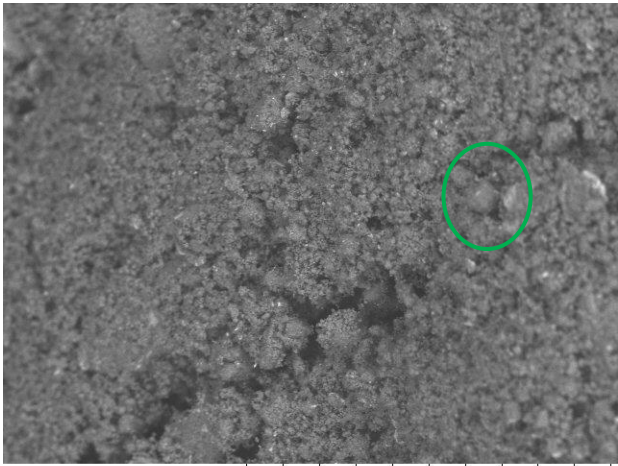
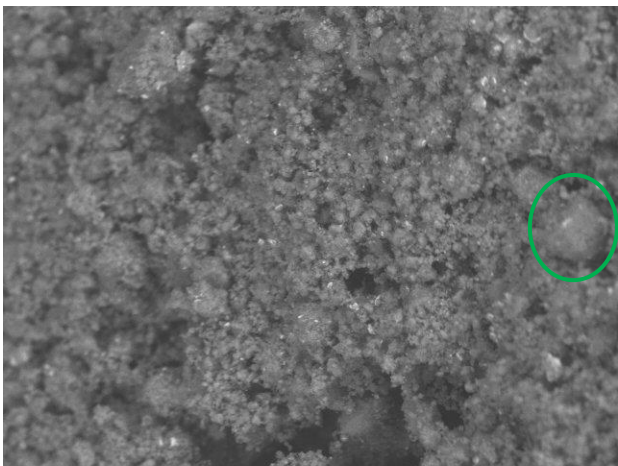
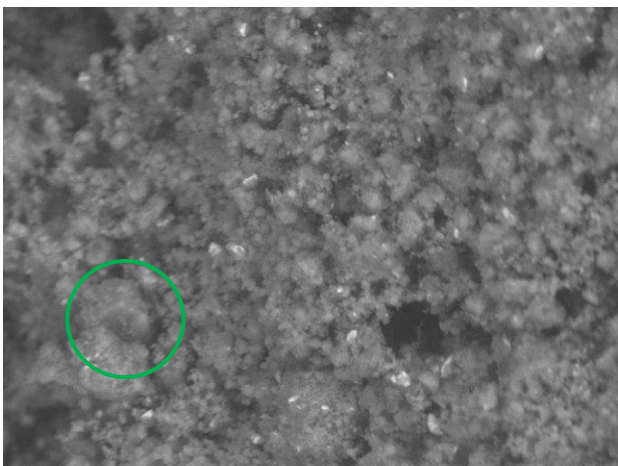
4.1.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Tabela 11: Microscopia Eletrônica de Varredura para aço SAE 1045 moído por 20 horas.

Pó metálico de aço SAE 1045	
Tempo de Moagem: 20 Horas.	
<p>Características: Pó fino, de difícil separação e, conseqüentemente, surgimento de aglomerados. Esta aglomeração dificultou a determinação da morfologia das partículas constituintes. No entanto, considerou-se a formação de uma morfologia heterogênea, pois foram verificados formatos do tipo floco (destaque em vermelho) e também poligonal (destaque em verde).</p>	 <p>TM3000_3587 2023/06/19 16:21 HL D8.3 x500 200 um</p>
	 <p>TM3000_3589 2023/06/19 16:23 HL D8.3 x1.0k 100 um</p>
	 <p>TM3000_3590 2023/06/19 16:24 HL D8.3 x2.0k 30 um</p>

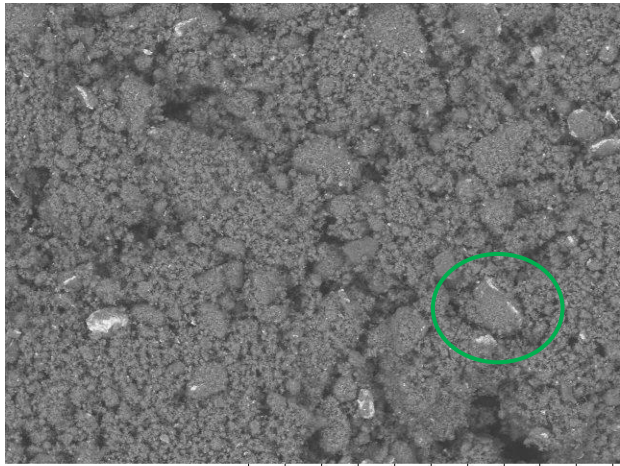
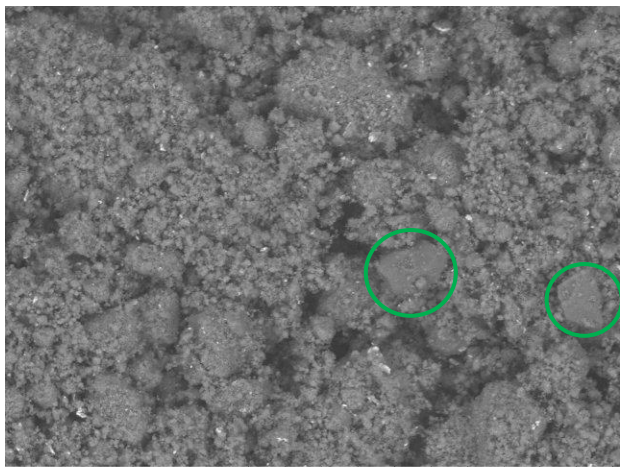
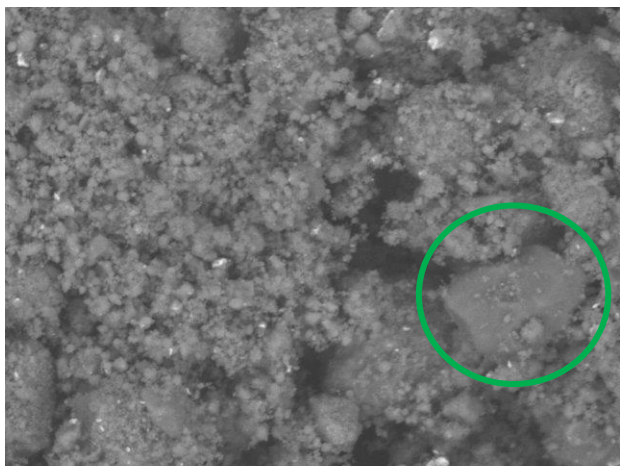
Fonte: Autor, 2024.

Tabela 12: Microscopia Eletrônica de Varredura para aço SAE 1045 moído por 40 horas.

Tempo de Moagem: 40 Horas.	
<p>Características: Pó fino, de difícil separação e, conseqüentemente, surgimento de aglomerados. Esta aglomeração dificultou a determinação da morfologia das partículas constituintes. Também considerou-se a formação de uma morfologia heterogênea. Em destaque, partículas de formato poligonal (destaque em verde).</p>	 <p>TM3000_3592 2023/06/19 16:26 HL D7.3 x500 200 um</p>
	 <p>TM3000_3593 2023/06/19 16:27 HL D7.2 x1.0k 100 um</p>
	 <p>TM3000_3595 2023/06/19 16:30 HL D7.2 x2.0k 30 um</p>

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 13: Microscopia Eletrônica de Varredura para aço SAE 1045 moído por 80 horas.

Tempo de Moagem: 80 Horas.	
<p>Características: Pó fino, de difícil separação e, conseqüentemente, surgimento de aglomerados. Aglomeração dificulta a determinação da morfologia das partículas constituintes. De maneira geral, observa-se morfologia heterogênea, com a identificação de várias partículas no formato poligonal (destaque em verde).</p>	 <p>TM3000_3602 2023/06/19 16:42 HL D8.2 x500 200 um</p>
	 <p>TM3000_3603 2023/06/19 16:43 HL D8.2 x1.0k 100 um</p>
	 <p>TM3000_3605 2023/06/19 16:45 HL D8.2 x2.0k 30 um</p>

Fonte: Autor, 2024.

Em primeira análise, nas microscopias apresentadas nas tabelas 11 a 13, percebeu-se a aglomeração dos pós de aço SAE 1045, limitando a captura de imagens com foco ideal sob as partículas. Esta aglomeração pode ser explicada pela dimensão da área superficial dos pós. De acordo com Chiaverini (2001), partículas com menores dimensões propiciam maiores áreas de contato e, conseqüentemente, aumento entre as forças coesivas, gerando a aglomeração. Em análise aos histogramas apresentados no próximo tópico, verificou-se a presença de partículas com dimensões menores que 1 μm , considerado um pó ultrafino; essa observação vai ao encontro da afirmação acima, uma vez que se observou a existência de partículas com dimensões muito pequenas.

Mesmo com a existência de aglomeração percebeu-se que não há um padrão na morfologia das partículas, e esta análise foi dificultada dado o grau de aglomeração percebido. No entanto, foram observadas partículas do tipo floco e poligonal para 20 horas de moagem; para 40 e 80 horas, apenas formatos poligonais foram identificados. Provavelmente, para 20 horas o material ainda apresentava certo grau de ductilidade, produzindo a partícula bastante deformada. Entretanto, este formato tende a dificultar a escoabilidade do material (Kiminami, Castro & Oliveira, 2013).

4.1.2.2 Tamanho de partícula

Após realização do ensaio de difração a *laser*, verificou-se as dimensões de partículas expostas na tabela 14.

Tabela 14: Dimensões obtidas através da difração a *laser* em pó de aço SAE 1045.

Tempo de moagem (Horas)	Diâmetro médio (μm)	Diâmetro a 10% (μm)	Diâmetro a 50 % (μm)	Diâmetro a 90% (μm)
20	6,38	0,88	4,22	15,05
40	8,47	1,02	5,54	20,87
80	9,21	0,99	5,83	24,28

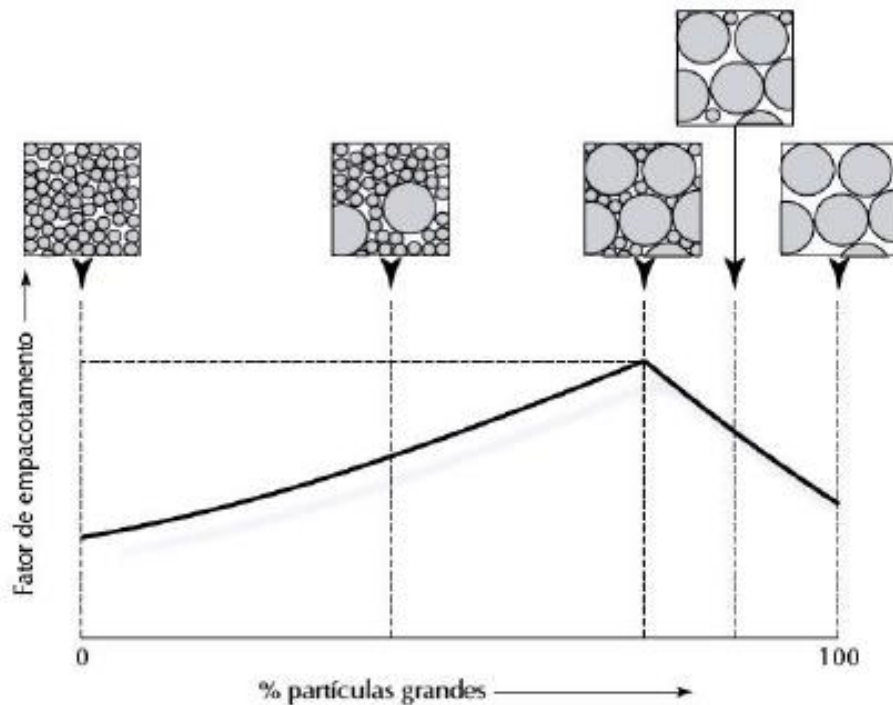
Fonte: Autor, 2024.

Em análise às dimensões médias, percebeu-se um comportamento não comum, pois a dimensão da partícula de pó metálico aumentou com maiores tempos de moagem. Isso se deve, provavelmente, pela aglomeração de partículas tão pequenas a ponto de não dispersarem suficientemente durante o ensaio realizado por difração. Outro ponto a se destacar foi a variação

do tamanho de partículas: desde dimensões menores que $1 \mu\text{m}$ até aproximadamente 20 vezes esta dimensão. Este padrão se repetiu para os três tempos de moagem.

O formato e a dimensão de partículas têm influência direta no processo de compactação de peças, pois irão definir a densidade destas. Assim, a existência de partículas com dimensões variadas apresenta-se com um ponto positivo uma vez que as de menores dimensões ocupam os espaços vazios formados pelas maiores, resultando em uma maior densidade. A figura 30 demonstra essa característica (Kiminami *et al.* (2013).

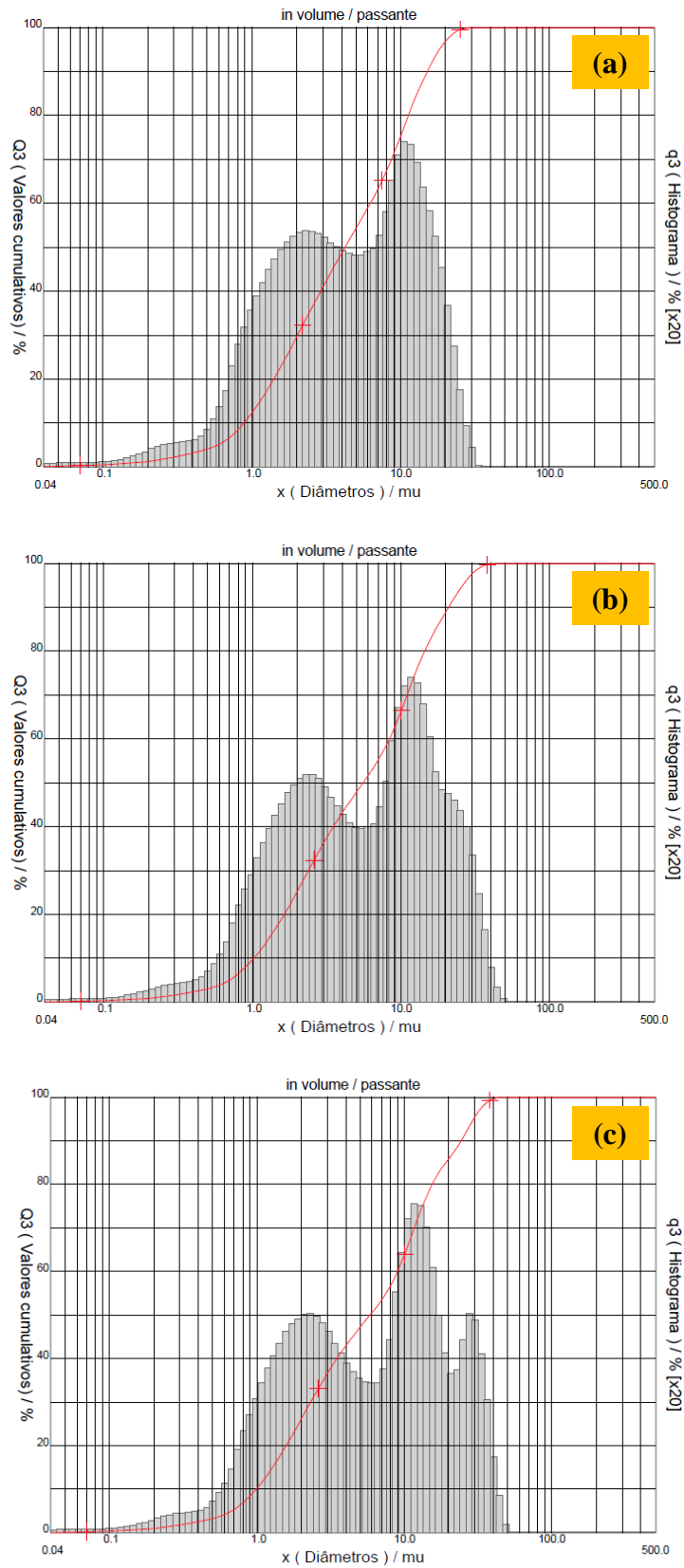
Figura 30: Fator de empacotamento para partículas com distintas dimensões.



Fonte: Kiminami, Castro & Oliveira, 2013.

A distribuição dos tamanhos de partículas decorrentes de cada período de moagem, pode ser verificada nos histogramas apresentados abaixo.

Figura 31: Distribuição do tamanho de partícula para o pó de aço SAE 1045: 20 horas de moagem (a); 40 horas de moagem (b); 80 horas de moagem (c).



Fonte: Autor, 2024.

Avaliando os histogramas apresentados, percebeu-se um comportamento semelhante do tipo bimodal entre os tempos de moagem em relação à dimensão obtida (Kiminami *et al.*, 2013). As curvas referentes as porcentagens acumulativas de massa em função do tamanho médio mostram que os pontos de 10% de massa acumulada referem-se a partículas com aproximadamente 1 μm de dimensão e os pontos de 50% referem-se a partículas com dimensões girando em torno de 5 μm . Já para 90% de massa acumulada, percebe-se dimensões médias de aproximadamente 15, 20 e 24 μm , para os tempos de 20, 40 e 80 horas, respectivamente.

4.1.2.3 Escoabilidade

Durante a análise de escoabilidade do pó de aço SAE 1045, fez-se a verificação das alturas e diâmetros das bases dos montes e, a partir disso, obtenção dos ângulos de repouso para cada condição de moagem. Os ângulos e escoamentos resultantes estão apresentados na tabela 15.

Tabela 15: Escoamentos obtidos a partir dos ângulos de repouso para pó de aço SAE 1045.

Tempo de moagem (Horas)	Ângulo de repouso (°)	Escoamento
20	35,75	Livre
40	34,60	Livre
80	37,12	Livre

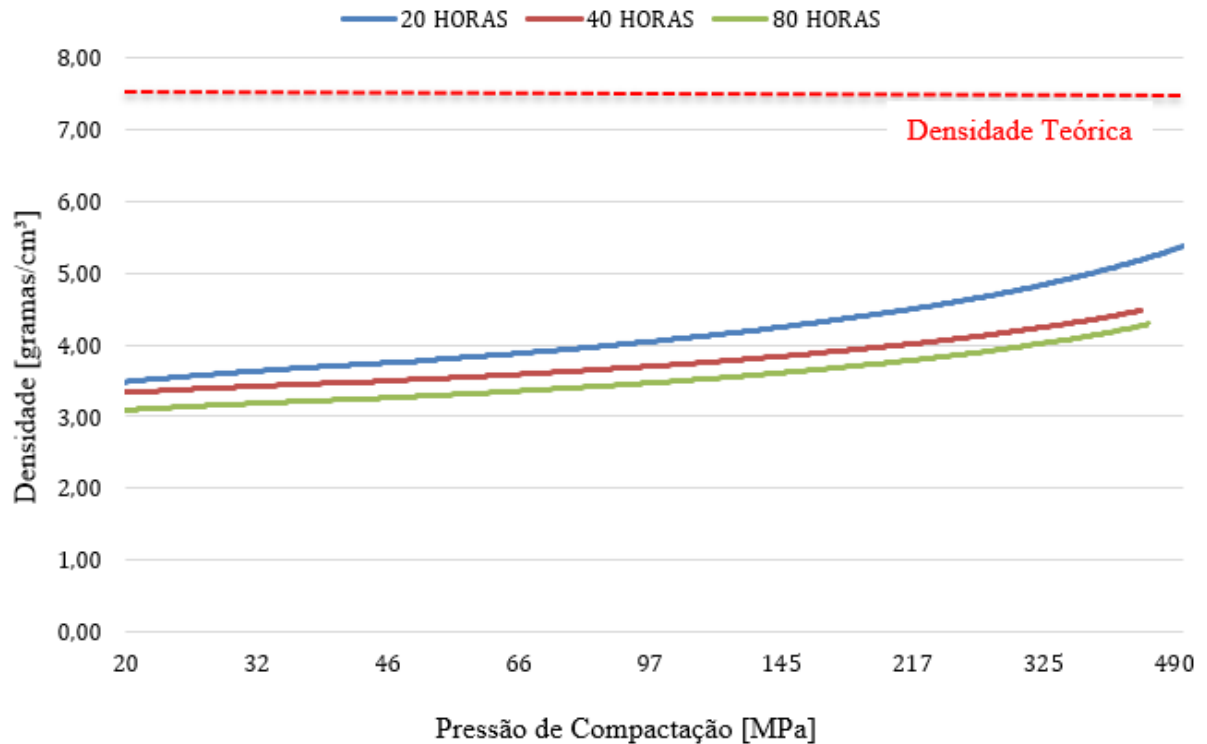
Fonte: Autor, 2024.

Em análise aos ângulos de repouso, verificou-se que os escoamentos existentes para os pós produzidos são do tipo livre. De acordo com German (2009), um escoamento livre facilita esses processos, garantindo a uniformidade e a qualidade dos produtos. Em processos industriais como a metalurgia do pó, é essencial que o pó metálico flua livremente para preencher completamente os moldes ou matrizes.

4.1.2.4 Compressibilidade

Após testes de compactação nos pós de aço SAE 1045, obtiveram-se as curvas de densidade versus tensão de compressão apresentadas no gráfico da figura 32.

Figura 32: Curvas de compressibilidade para pó de aço SAE 1045.



Fonte: Autor, 2024.

Após interpretação das curvas acima, verifica-se que as amostras correspondentes aos três períodos de moagem demonstraram comportamento semelhantes. Mesmo considerando a aglomeração dos pós, percebe-se que o preenchimento da matriz ocorre de maneira similar, propiciando o resultado encontrado. Este comportamento similar entre as amostras também pode ser embasado na semelhança da distribuição granulométrica entre as três condições de moagem.

Uma vez que a pressão de compactação utilizada foi menor que a necessária para a compactação usual para pós metálicos, que podem chegar até 800 MPa, conforme recomendado por German, (1997) e que não houve utilização de aditivos de compactação (lubrificantes), conclui-se que estes foram pontos importantes para a densidade obtida não se aproximar mais da densidade teórica.

4.1.3 Eficiência de moagem

A tabela 16 apresenta os resultados da eficiência de moagem calculada durante a moagem de cavacos de aço AISI H13.

Tabela 16: Eficiência de moagem para os experimentos com cavacos de aço SAE 1045.

TEMPO DE MOAGEM					
20 HORAS		40 HORAS		80 HORAS	
Massa de Cavaco inicial (g)	Massa de Cavaco residual (g)	Massa de Cavaco inicial (g)	Massa de Cavaco residual (g)	Massa de Cavaco inicial (g)	Massa de Cavaco residual (g)
600,20	592,30	600,05	569,53	600,02	560,75
Eficiência de Moagem (%)	1,31	Eficiência de Moagem (%)	5,08	Eficiência de Moagem (%)	6,54

Fonte: Autor, 2023.

Após a verificação da moagem de cavacos de aço SAE 1045, percebeu-se que o processo apresentou aumento significativo de 1,31 para 5,08% na eficiência de moagem nos períodos de 20 para 40 horas, mas que isso não se repetiu para 80 horas. De toda forma, nota-se que o processo de moagem utilizado apresentou baixa produtividade, principalmente se comparado com cerâmicos, usualmente fragmentados em moinhos de bolas; geralmente para estes, períodos de moagem de 6 horas são capazes de cominuir mais que 90 % do material inicial (Bosa, 2007).

4.1.4 Fragmentação produzida em função do tempo de moagem

Após separação entre os materiais classificados como cavaco residual (sólidos com dimensões superiores a 230 μm) e pó (partículas com dimensões inferiores a 230 μm), obtiveram-se as porcentagens representadas na tabela 17. A massa inicial adicionada no moinho, para cada tempo de moagem, foi de 600 gramas.

Tabela 17: Fragmentação produzida em função do tempo de moagem

Material	Tempo de Moagem [Horas]		
	20	40	80
Cavaco Residual	98,71 %	94,92 %	93,45 %
Pó	1 %	4,5 %	6,3%

Fonte: Autor, 2024.

É importante destacar que houve considerável quantidade de pó metálico que fica aderido nas superfícies dos cavacos residuais e que ocorreram perdas de materiais durante o procedimento de separação, principalmente do pó metálico.

4.2 AÇO AISI H13


A partir deste tópico, serão apresentados os resultados obtidos a partir das caracterizações realizadas em cavacos residuais e pós metálicos provenientes da moagem em aço AISI H13.


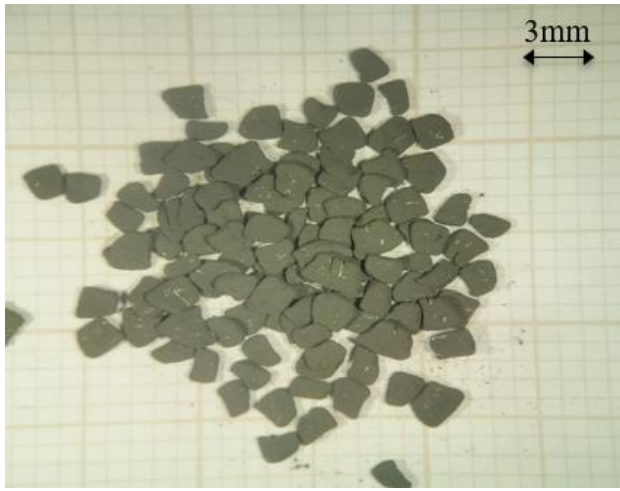

4.2.1 Cavacos Residuais de aço AISI H13

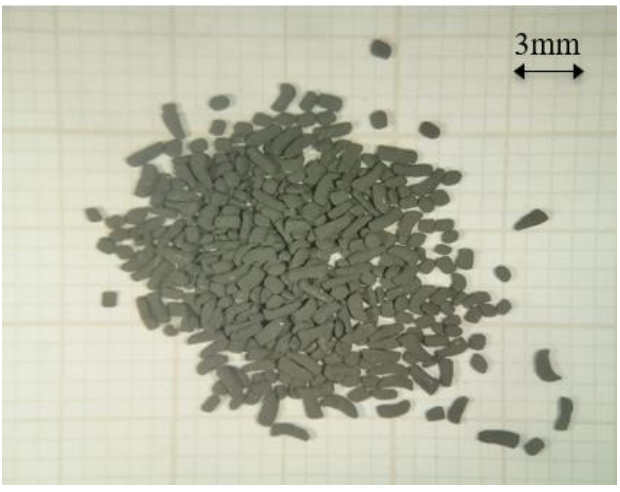
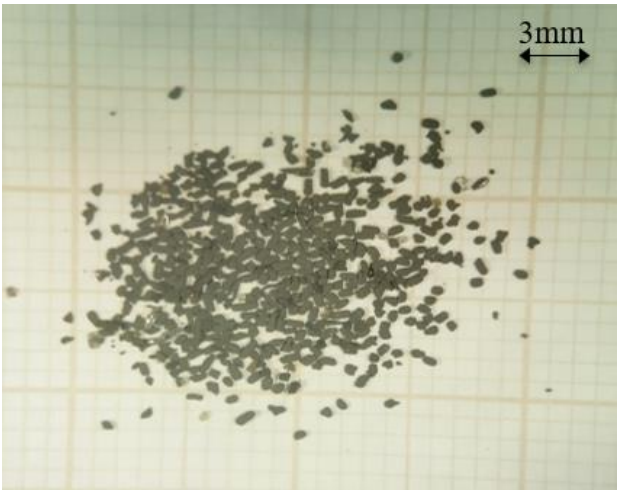
4.2.1.1 Morfologia dos cavacos

A análise morfológica foi realizada nos cavacos antes e após o processo de moagem. A tabela 18 apresenta a alteração morfológica para cada situação.

Tabela 18: Análise morfológica dos cavacos pré e pós-moagem – Aço AISI H13.

Pré-moagem	
Situação	Morfologia
<p>Cavaco: Elementos com dimensões maiores que 2 mm.</p> <p>Características: Morfologia do tipo “lascas”, proveniente do processo de usinagem. Todos os cavacos com tamanhos originais e semelhantes.</p>	

Pós-moagem	
Situação	Morfologia
<p>Cavaco: Elementos com dimensões maiores que 2 mm.</p> <p>Presente em: Moagem de 20, 40 e 80 horas.</p> <p>Características: Morfologias do tipo “lascas”, similar ao original, juntamente com o aparecimento de cavacos já fragmentados em processo de moagem. Presença de pó metálico aderido à superfície.</p>	
<p>Cavaco: Elementos com dimensão entre 0,8 e 2 mm.</p> <p>Presente em: Moagem de 20, 40 e 80 horas.</p> <p>Características: Cavacos fragmentados, decorrente da moagem. Formato irregular predominante. Presença de pó metálico aderido à superfície.</p>	
<p>Cavaco: Elementos com dimensão entre 0,6 e 0,8 mm.</p> <p>Presente em: Moagem de 20, 40 e 80 horas.</p> <p>Características: Cavacos fragmentados, decorrente da moagem. Formato irregular predominante. Presença de pó metálico aderido à superfície.</p>	

<p>Cavaco: Elementos com dimensão entre 0,5 e 0,6 mm.</p> <p>Presente em: Moagem de 40 e 80 horas.</p> <p>Características: Cavacos fragmentados, decorrente da moagem. Formato irregular predominante. Presença de pó metálico aderido à superfície.</p>	
<p>Cavaco: Elementos com dimensão entre 0,2 e 0,5 mm.</p> <p>Presente em: Moagem de 80 horas.</p> <p>Características: Cavacos fragmentados, decorrente da moagem. Formato irregular predominante. Presença de pó metálico aderido à superfície.</p>	

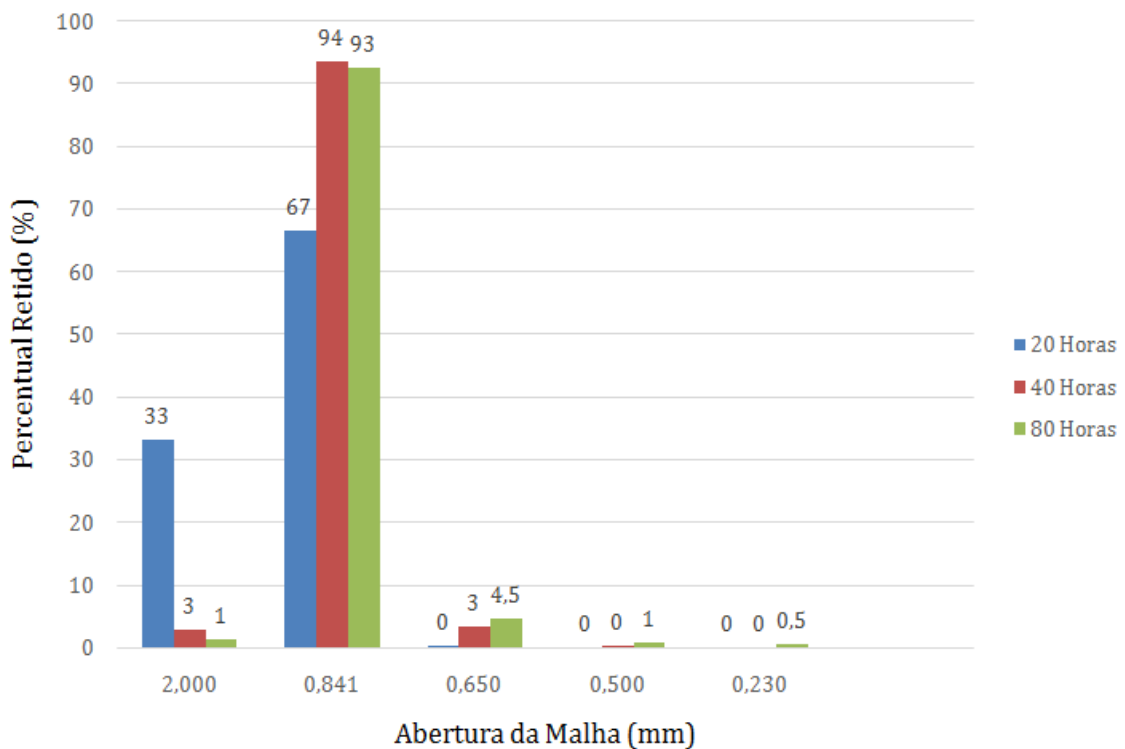
Fonte: Autor, 2023.

Analisando-se as imagens da tabela 17, verificou-se que os cavacos originalmente com formato do tipo lascas passaram para irregular com corpos achatados, muito similares ao formato obtido pelos cavacos de aço SAE 1045 durante o processo de moagem. Como o novo formato é verificado em todos os períodos de moagem, não se pode correlacionar o tempo de fragmentação com o formato obtido.

4.2.1.2 Análise da distribuição de tamanhos dos cavacos residuais

Após peneiramento e pesagem da massa retida em cada peneira, chegou-se à distribuição de tamanhos representada no gráfico da figura 33.

Figura 33: Distribuição do tamanho de partículas de cavacos pós-moagem – Aço AISI H13.



Fonte: Autor, 2023.

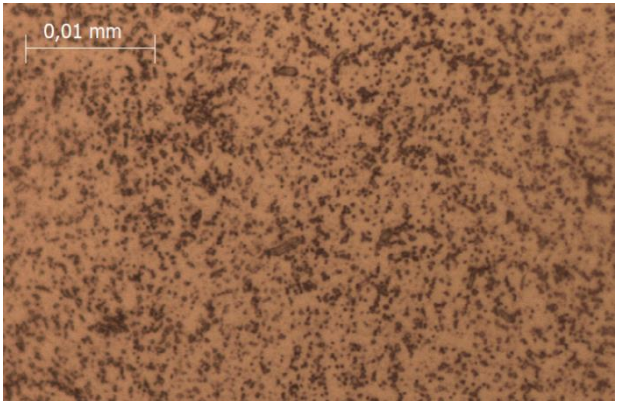
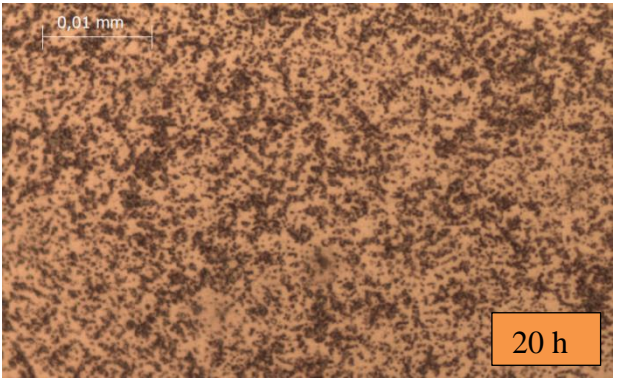

A análise demonstrou que, com o passar do tempo de moagem, houve alteração na dimensão dos cavacos residuais. Através da leitura do gráfico, percebeu-se, para todos os períodos de moagens, a ocorrência da fragmentação, principalmente entre as peneiras de dimensão de 2,000 mm e 0,841 mm. Pode-se verificar que para o tempo de 20 horas, 33 % do material ficou retido na primeira peneira (abertura de 2 mm) e o restante ficou retido na segunda peneira (0,841 mm). Já para os períodos de 40 e 80 horas, praticamente todo material foi passante na primeira peneira, ficando retido em sua maioria na segunda. Destaca-se o período de 80 horas por gerar cavacos residuais em todas as peneiras seguintes, mesmo que em pequena quantidade. A peneira com abertura de 3,350 mm não foi apresentada no gráfico, pois nenhuma massa de cavaco de aço H13 ficou retida nesta.

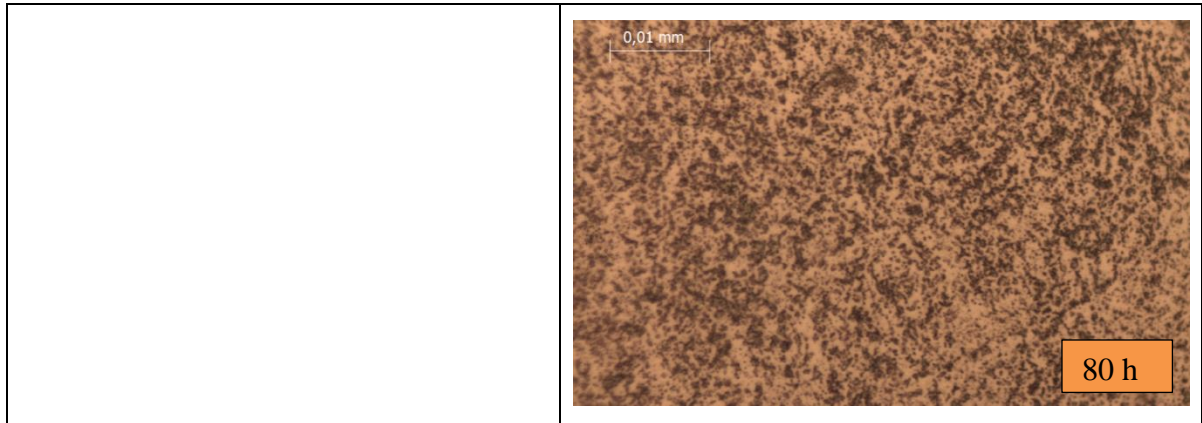
Assim como na análise realizada para o aço SAE 1045, aqui também se observou a existência de um pó aderido nas superfícies dos cavacos e acúmulo deste no fundo do equipamento, inviabilizando sua contabilização.

4.2.1.3 Caracterização microscópica

Para a verificação de possíveis alterações da microestrutura do cavaco devido à fragmentação, foi empregada a caracterização por microscopia óptica. Na tabela 19, estão apresentadas as análises referidas.

Tabela 19: Microestruturas apresentadas pelos cavacos pré e pós-moagem – Aço AISI H13.


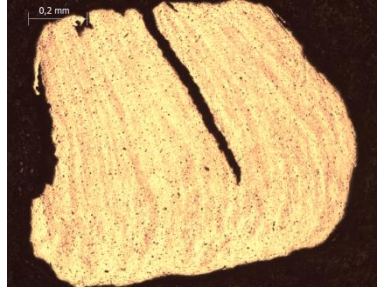
Pré-moagem	
Situação	Microestrutura
<p>Tempo de Moagem: Sem moagem.</p> <p>Características: Microestrutura padrão do aço AISI H13, com presença de carbonetos (pontos escuros) em matriz ferrítica (cor clara) (Alves, 2021).</p>	
Pós-moagem	
<p>Tempo de Moagem: 20, 40 e 80 horas de moagem.</p> <p>Características: Microestrutura semelhante aos cavacos sem moagem, formada por matriz ferrítica (cor clara) e carbonetos precipitados (pontos escuros) (Alves, 2021).</p>	 



Fonte: Autor, 2023.

Assim como na análise realizada sobre os cavacos de aço SAE 1045, realizou-se a verificação do aparecimento e comportamento das propagações de trincas nos cavacos de H13. As imagens obtidas estão expostas na tabela 20.

Tabela 20: Comportamento da fragmentação em função do tempo de moagem – Aço AISI H13.

TEMPOS DE MOAGEM		
20 HORAS	40 HORAS	80 HORAS
		

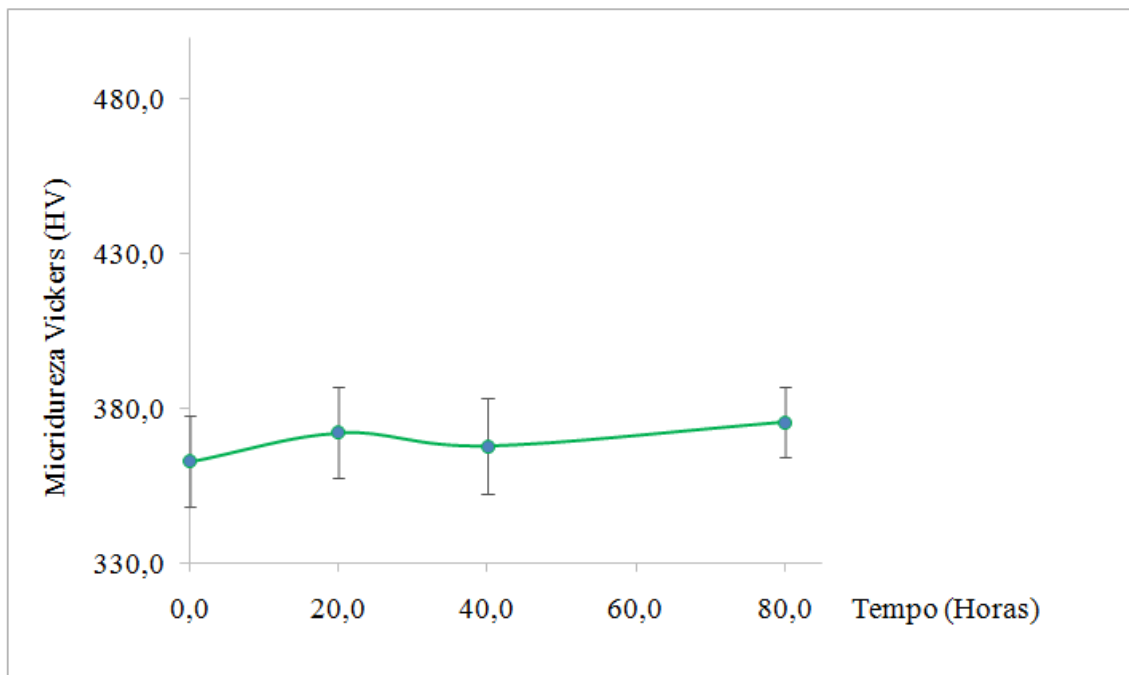
Fonte: Autor, 2023.

Observando as imagens da tabela 20, verificou-se que os choques decorrentes do processo atuaram sobre os cavacos gerando sua fragmentação através do surgimento e propagação de trincas. Predominantemente, as trincas surgem nas arestas dos cavacos e migram na direção transversal até atravessá-los totalmente, gerando o novo fragmento. Isso se deve pela geometria original do cavaco que apresenta pontos de concentração de trincas em suas arestas. Apesar dos cavacos diminuírem suas dimensões durante o processo, mantêm-se semelhante o mecanismo de formação das trincas, como pode ser observado para a moagem de 80 horas.

4.2.1.4 Microdureza

Objetivando a verificação da existência de aumento da dureza por encruamento, realizou-se análise de microdureza sobre as amostras da H13. São apresentados os valores médios de três medições realizadas em três cavacos diferentes para cada condição de moagem. Os resultados obtidos estão expostos no gráfico da figura 34.

Figura 34: Microdureza Vickers encontrada na superfície dos cavacos – AÇO AISI H13.



Fonte: Autor, 2023.

Diferentemente do observado no levantamento da microdureza do aço SAE 1045, para os cavacos de aço AISI H13 não se verificou aumento desta propriedade. De acordo Indusmart (2024), a tensão de escoamento do aço em questão é superior a 1000 MPa; a pouca variação de dureza observada deve indicar que a energia envolvida durante os impactos das bolas em moagem não foi suficiente para encruar o material e aumentar a propriedade de dureza.

Para este material, também se verificou que a dureza dos cavacos sem moagem está acima do que seria o normal para o material, registrando em torno de 370 HV. A dureza normal para o aço AISI H13 apresenta-se em torno de 270 HV (Matias Junior, 2018). Conclui-se, também, que esse fenômeno decorre do encruamento já existente no cavaco devido à usinagem por torneamento, como mencionado em tópico de análise da microdureza para o aço SAE 1045.

4.2.2 Pó de aço AISI H13

Após a realização da moagem e separação do material fragmentado, obteve-se um pó metálico fino. Na figura 35, está exposto este material. Visualmente, aqui também se percebeu o elevado grau de aglomeração do pó obtido.

Figura 35: Pó metálico resultante da moagem de aço AISI H13.

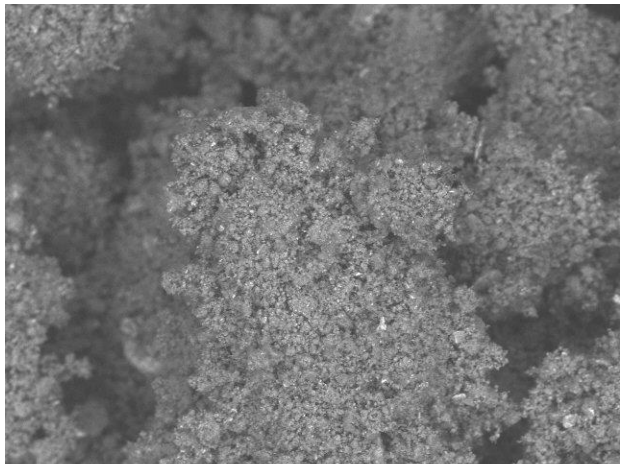




Fonte: Autor, 2023.

A partir deste ponto, estão representadas as técnicas utilizadas para caracterizar o pó de aços AISI H13.

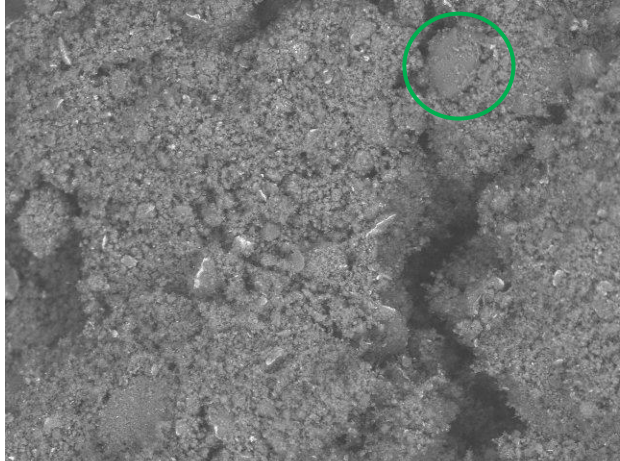
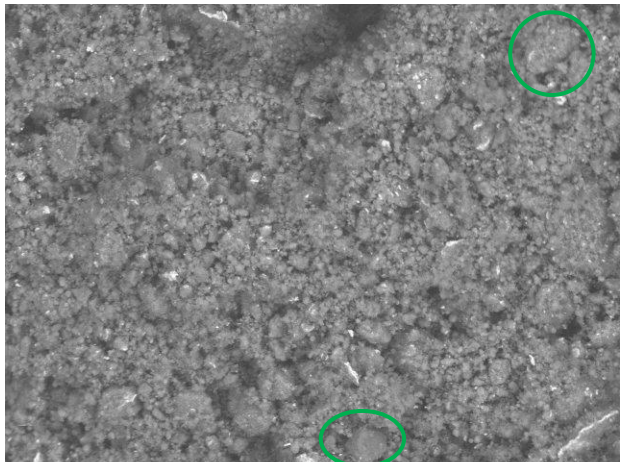
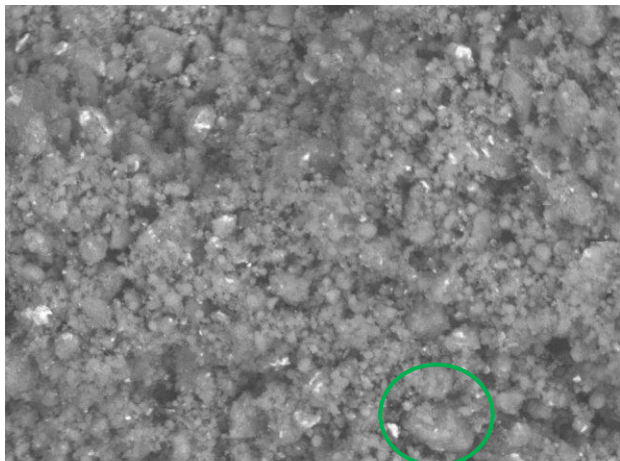
4.2.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Tabela 21: Microscopia Eletrônica de Varredura para aço AISI H13 moído por 20 horas.

Tempo de Moagem: 20 Horas.	
<p>Características: Pó fino, de difícil separação e, conseqüentemente, surgimento de aglomerados. Esta aglomeração dificultou a determinação da morfologia das partículas constituintes. Considerou-se, portanto, a formação de uma morfologia heterogênea. No entanto, observou-se a presença de partículas mais esféricas (destaque em vermelho), se comparadas ao aço SAE 1045.</p>	 <p>TM3000_3570 2023/06/19 15:43 HL D8.2 x500 200 um</p>
	 <p>TM3000_3568 2023/06/19 15:42 HL D8.2 x1.0k 100 um</p>
	 <p>TM3000_3567 2023/06/19 15:41 HL D8.2 x2.0k 30 um</p>

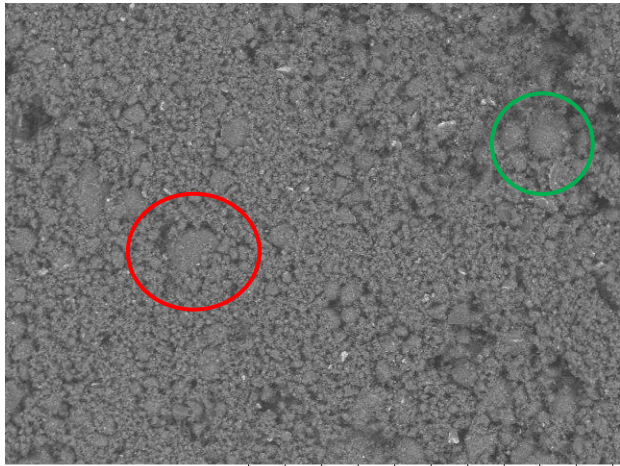
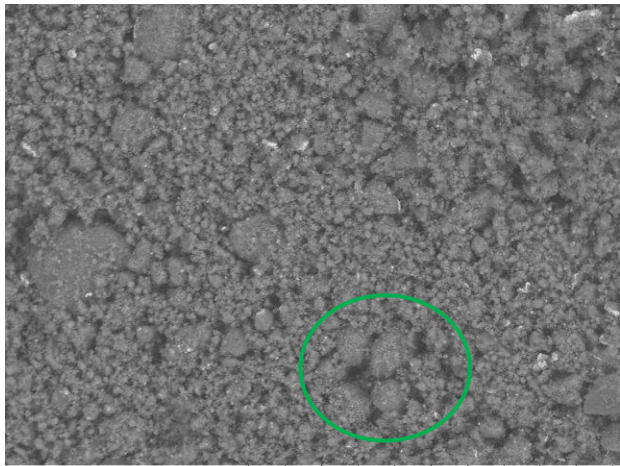
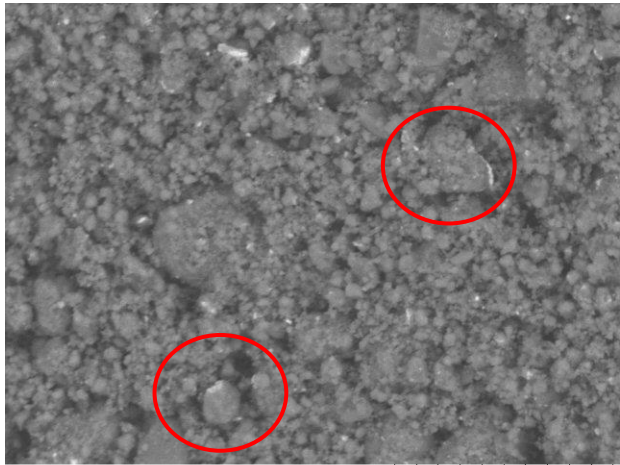
Fonte: Autor, 2024.

Tabela 22: Microscopia Eletrônica de Varredura para aço AISI H13 moído por 40 horas.

Tempo de Moagem: 40 Horas.	
<p>Características: Pó fino, de difícil separação e, conseqüentemente, surgimento de aglomerados. A aglomeração dificultou a determinação da morfologia das partículas constituintes. De maneira geral, considerou-se a formação de uma morfologia heterogênea. Em destaque (em verde), partículas com formato poligonal.</p>	 <p>TM3000_3572 2023/06/19 15:54 HL D8.8 x500 200 um</p>
	 <p>TM3000_3573 2023/06/19 15:54 HL D8.8 x1.0k 100 um</p>
	 <p>TM3000_3575 2023/06/19 15:55 HL D8.8 x2.0k 30 um</p>

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 23: Microscopia Eletrônica de Varredura para aço AISI H13 moído por 80 horas.

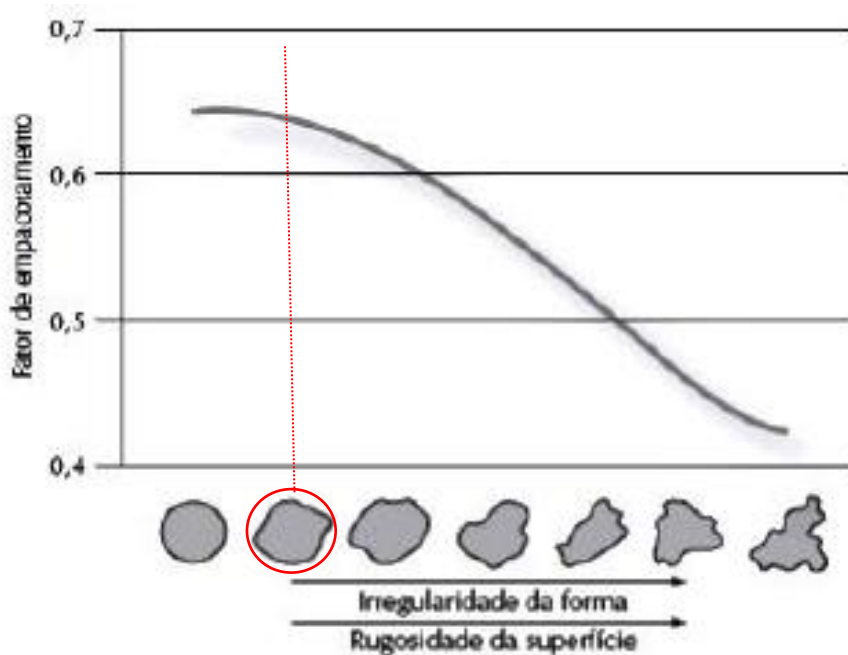
Tempo de Moagem: 80 Horas.	
<p>Características: Pó fino, de difícil separação e, conseqüentemente, surgimento de aglomerados. A aglomeração dificultou a determinação da morfologia das partículas constituintes. De maneira geral, considerou-se a formação de uma morfologia heterogênea. Em destaque partículas com formato variando entre o poligonal (destaque em vermelho) e o esférico (em verde).</p>	 <p>TM3000_3597 2023/06/19 16:38 HL D8.7 x500 200 um</p>
	 <p>TM3000_3598 2023/06/19 16:38 HL D8.7 x1.0k 100 um</p>
	 <p>TM3000_3600 2023/06/19 16:40 HL D8.7 x2.0k 30 um</p>

Fonte: Autor, 2024.

Assim como para o aço SAE 1045, devido a existência de partículas de pó ultrafinas, percebeu-se aglomeração nas microscopias realizadas sobre o pó de aço AISI H13, tornando difícil a captura de imagens com focos apropriados. As forças de coesão geradas devido as grandes áreas de contato entre partículas muito pequenas devem ter ocasionado este fenômeno. Em análise às microscopias eletrônicas de varredura, verificou-se para o pó de aço AISI H13 não se percebeu existência de partículas com formato de floco. As morfologias observadas variaram entre poligonais e esféricas.

A obtenção de um formato aproximado ao esférico gera um aumento do fator de empacotamento e consequente aumento na densidade do compactado, como pode ser visto na figura 36. A densidade deve impactar diretamente nas características do compactado e nas propriedades finais da peça sinterizada via metalurgia do pó ou até mesmo na acomodação das partículas durante um processo de injeção metálica (Silva, 2020).

Figura 36: Fator de empacotamento em função da geometria da partícula.



Fonte: Adaptado de Kiminami, Castro & Oliveira, 2013.

4.2.2.2 Tamanho de partícula

Após realização do ensaio de difração a *laser* no pó de aço H13, verificou-se as dimensões de partículas expostas na tabela 24.

Tabela 24: Dimensões obtidas através da difração a laser em pó de aço H13.

Tempo de moagem (Horas)	Diâmetro médio (μm)	Diâmetro a 10% (μm)	Diâmetro a 50% (μm)	Diâmetro a 90% (μm)
20	6,29	0,96	4,12	14,80
40	7,16	0,97	4,68	16,85
80	8,56	1,02	5,63	21,12

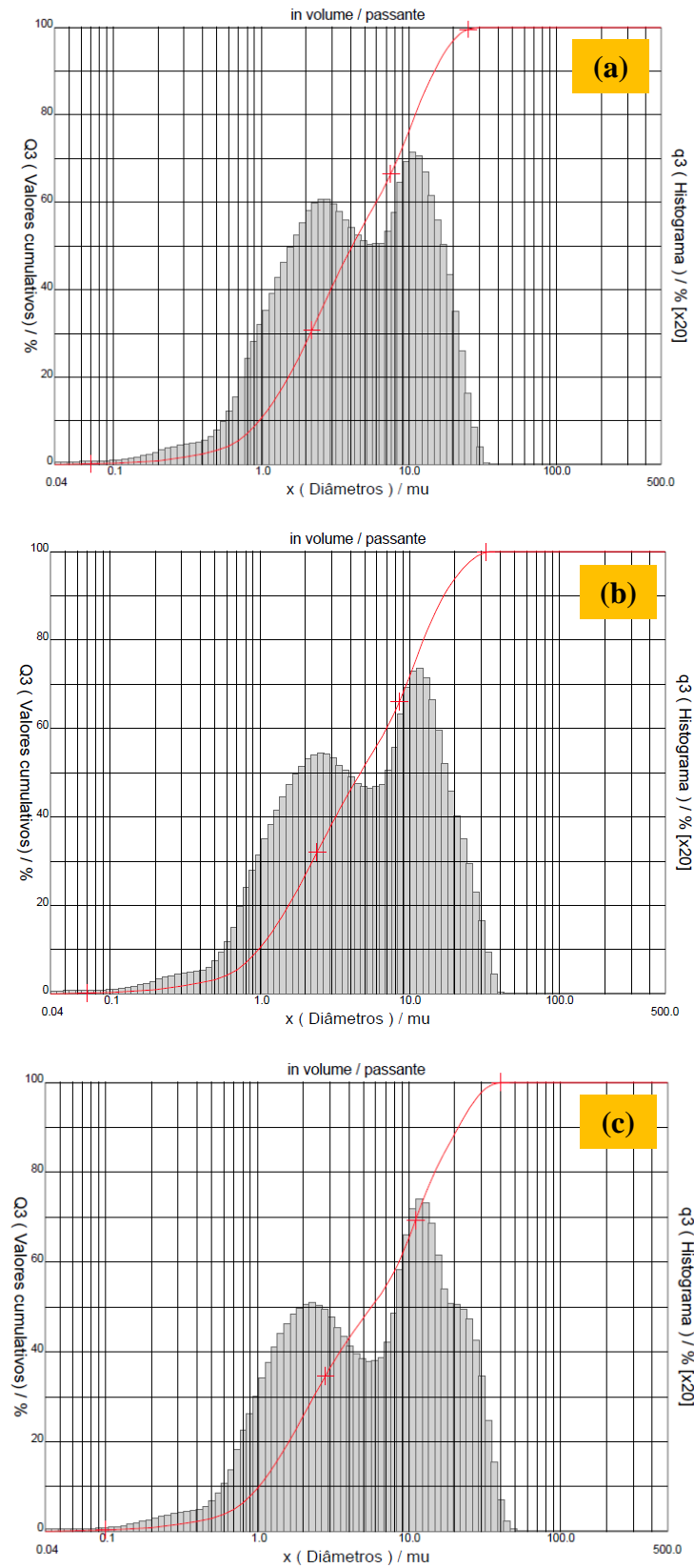
Fonte: Autor, 2024.

O mesmo comportamento observado em análises de pós de aço 1045, foi verificado nos pós de aço AISI H13, ou seja, o aumento da dimensão média das partículas com o passar do tempo de moagem; isso é provavelmente justificado pela maior aglomeração de partículas pequenas e possível não dispersão correta durante o ensaio realizado por difração. Novamente, percebeu-se a presença de partículas com dimensões menores que $1 \mu\text{m}$ até aproximadamente 20 vezes esta dimensão, padrão repetido para os três tempos de moagem.

A existência de partículas com dimensões distintas apresenta-se com um ponto influente para determinação da densidade do compactado. As partículas maiores permitem a existência de pequenos poros, os quais são preenchidos pelas menores durante a compactação e posterior sinterização (Kiminami *et al.* (2013).

A distribuição dos tamanhos decorrentes de cada período de moagem pode ser verificada nos histogramas apresentados na figura 37.

Figura 37: Distribuição do tamanho de partícula para o pó de aço AISI H13: 20 horas de moagem (a); 40 horas de moagem (b); 80 horas de moagem (c).



Fonte: Autor, 2024.

Com o mesmo comportamento verificado para o pó de aço SAE 1045, percebeu-se um comportamento do tipo bimodal entre os tempos de moagem em relação à dimensão obtida (Kiminami *et al.*, 2013). As porcentagens acumulativas em massa de 10% referem-se a partículas com aproximadamente 1 μm de dimensão. Os pontos de 50% representam partículas com dimensões girando em torno de 5 μm . Já para 90% de massa acumulada, percebem-se dimensões médias de aproximadamente 14, 16 e 21 μm , para os tempos de 20, 40 e 80 horas, respectivamente.

4.2.2.3 Escoabilidade

Após verificação dimensional dos montes gerados durante o escoamento do pó de aço H13 pelo funil, obteve-se os ângulos de repouso para cada condição de moagem. Os ângulos e escoamentos resultantes estão apresentados na tabela 25.

Tabela 25: Escoamentos obtidos a partir dos ângulos de repouso para pó de aço H13.

Tempo de moagem (Horas)	Ângulo de repouso (°)	Escoamento
20	34,65	Livre
40	35,80	Livre
80	36,30	Livre

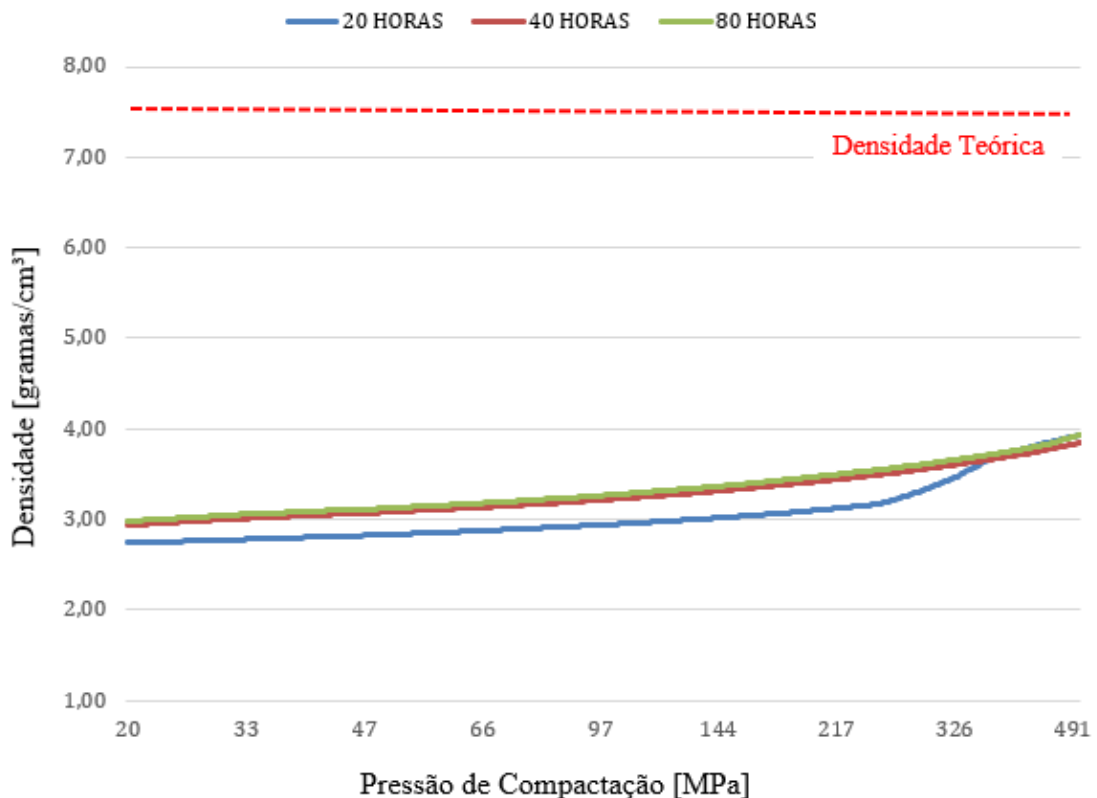
Fonte: Autor, 2024.

Mesmo com a aglomeração ocasionada pela existência de particulados ultrafinos, a presença de dimensões variadas e maiores colaborou para que o escoamento do pó ocorresse de maneira livre. Acrescentando a avaliação sobre morfologia e dimensão do pó obtido espera-se que, durante um processo de dosagem ou preenchimento de cavidades, o material flua livremente, de maneira rápida e uniforme (German, 2009).

4.2.2.4 Compressibilidade

Após testes de compactação nos pós de aço AISI H13, obtiveram-se as curvas de densidade versus tensão de compressão apresentadas no gráfico da figura 38.

Figura 38: Curvas de compressibilidade para pó de aço AISI H13.



Fonte: Autor, 2024.

Em análise às curvas expostas, verificou-se comportamentos semelhantes das amostras para todos os períodos de moagem. Como já mencionado na discussão deste ensaio para o aço SAE 1045, é importante destacar que a semelhança entre as dimensões das partículas verificadas pelo estudo da distribuição granulométrica deve embasar o comportamento similar durante compactação.

Destaca-se novamente que a pressão de compactação para este ensaio foi menor que a indicada para o processo e que não houve utilização de aditivos de compactação (lubrificantes), propiciando menores resultados de densidade aparente.

Percebeu-se que a densidade aparente foi menor que a obtida para as amostras de pós de aço SAE 1045. Em análise a este ponto, não se pode afirmar que a morfologia tenha interferido na densificação dos dois materiais.

4.2.3 Eficiência de moagem

A tabela 26 apresenta os resultados da eficiência de moagem calculada durante a moagem de cavacos de aço AISI H13.

Tabela 26: Eficiência de moagem para os experimentos realizados com cavacos de aço AISI H13.

TEMPO DE MOAGEM					
20 HORAS		40 HORAS		80 HORAS	
Massa de Cavaco inicial (g)	Massa de Cavaco residual (g)	Massa de Cavaco inicial (g)	Massa de Cavaco residual (g)	Massa de Cavaco inicial (g)	Massa de Cavaco residual (g)
600,10	593,45	600,05	577,12	600,05	565,00
Eficiência de Moagem (%)	1,10	Eficiência de Moagem (%)	3,82	Eficiência de Moagem (%)	5,84

Fonte: Autor, 2024.

Pode-se verificar que a eficiência de moagem verificada para o processamento do aço H13 praticamente dobrou com o aumento do tempo de moagem, indo de 1,10 para 3,82 % nos períodos de 20 para 40 horas e chegando em 5,84 % após 80 horas. Porém, assim como já averiguado no material anterior, demonstra-se como um processo de moagem com baixa eficiência.

4.2.4 Fragmentação produzida em função do tempo de moagem

Após separação entre os materiais classificados como cavaco residual (sólidos com dimensões superiores a 230 μm) e pó (partículas com dimensões inferiores a 230 μm), obtiveram-se as porcentagens representadas na tabela 27. A massa inicial adicionada no moinho, para cada tempo de moagem, foi de 600 gramas.

Tabela 27: Fragmentação produzida em função do tempo de moagem.

Material	Tempo de Moagem [Horas]		
	20	40	80
Cavaco Residual	98,89 %	96,17 %	94,15 %
Pó	1 %	3,5 %	5,3%

Fonte: Autor, 2024.

O somatório do material produzido via moagem não representa 100 % da massa total adicionada ao processo, pois uma parte do pó metálico ficou aderido nas superfícies dos cavacos residuais. Além disso, houve perdas de materiais durante o procedimento de separação, principalmente do pó metálico.

4.3 COMPARATIVO ENTRE OS AÇOS SAE 1045 E AISI H13

A tabela 28 apresenta as principais similaridades e diferenças encontradas após a realização de testes e caracterizações sob os materiais que passaram por moagem.

Tabela 28: Similaridades e diferenças obtidas após testes e caracterizações sobre Aço SAE 1045 e AISI H13.

Cavacos Residuais		
Teste / Caracterização	Similaridades	Diferenças
Morfologia dos Cavacos	<ul style="list-style-type: none"> • Durante a moagem, cavacos tiveram alteração de sua forma original para formato irregular; • Presença de pó aderido na superfície dos cavacos residuais; 	-
Distribuição de Tamanhos de Cavacos Residuais	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento do tempo de moagem tende a gerar partículas com dimensões semelhantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Devido a diferença na dimensão inicial, os cavacos de aço H13, por serem menores originalmente, não ficaram retidos na peneira de 3,350 (superior); apresentaram maior retenção nas peneiras de menor abertura;

<p>Microdureza</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Valor da microdureza para os cavacos de aços SAE 1045 e AISI H13, sem moagem, apresenta valores similares. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aço SAE 1045 apresentou aumento na sua microdureza após processo de moagem, enquanto para o aço AISI H13 não se verificou alteração na propriedade.
<p>Microestrutura</p>	<p>-</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alteração na morfologia dos grãos do aço SAE 1045 pelo processo de moagem. Isso não foi verificado para o aço AISI H13. • Para o aço SAE 1045 percebe-se que a trincas surgem tanto nas arestas dos cavacos quanto no centro destes e se alastram transversalmente até gerar o fragmento. Já no aço AISI H13, o início da trinca ocorre predominantemente a partir das arestas dos cavacos.
<p>Eficiência de Moagem</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo rendimento para ambos os materiais. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aço SAE 1045 demonstrou aumento considerável na eficiência de moagem dos períodos de 20 a 40 horas. Porém, este padrão não se repetiu para os períodos de 40 a 80 horas. • Aço AISI H13 demonstrou aumento constante da eficiência de acordo com o aumento do período de moagem.

Pós Metálicos		
Teste / Caracterização	Similaridades	Diferenças
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	<ul style="list-style-type: none"> Ambos os materiais apresentaram pó fino, de difícil separação, com surgimento de aglomerados. 	<ul style="list-style-type: none"> Aço SAE 1045: Morfologia heterogênea. Foram observadas as presenças de partícula no formato de flocos para 20 horas de moagem e morfologia poligonal para os demais tempos. Aço AISI H13: Morfologia heterogênea, com formatos do tipo esféricos e poligonais.
Distribuição de Tamanhos de Partículas (Granulometria)	<ul style="list-style-type: none"> Aumento da dimensão média das partículas de pós de ambos os materiais com o aumento do tempo de moagem. Faixa granulométrica variando de aproximadamente 1μm a aproximadamente 25 μm. 	-
Escoabilidade	<ul style="list-style-type: none"> Ambos os materiais apresentaram escoamento do tipo livre. 	-
Compressibilidade	<ul style="list-style-type: none"> Ambos os materiais apresentaram comportamentos similares durante a compactação de suas amostras em relação aos três períodos de moagem. 	<ul style="list-style-type: none"> Densidade aparente do compactado de aço SAE 1045 foi maior que a do aço AISI H13. A diferença da densificação pode ser decorrente de uma desfragmentação desigual

	<ul style="list-style-type: none">• A presença de aglomerados deve ter interferido na densificação dos pós.	entre os aglomerados dos dois açós.
--	---	-------------------------------------

Fonte: Autor, 2024.

5. CONCLUSÕES

Em confronto ao objetivo principal proposto nesta pesquisa, confirmou-se a possibilidade de fragmentar os cavacos, propiciando o reaproveitamento de resíduos provenientes dos processos de usinagem através da moagem em moinho de bolas. Isso pode contribuir para a geração de matéria-prima para o processo de metalurgia do pó, principalmente para o processo de moldagem por injeção (MIM), dada as características dos pós obtidos.

Em relação ao processo de moagem, cavacos residuais e pós metálicos produzidos, destacaram-se os seguintes pontos:

- À medida que o tempo de moagem aumentou, mais eficiente se tornou a fragmentação do resíduo de usinagem, embora este aumento não tenha sido linear.
- Percebeu-se que a fragmentação dos cavacos respeita um padrão de formato ao final da moagem, mas que este padrão não depende do tempo de moagem.
- O processo de moagem por moinho de bolas, considerado processo de moagem de baixa energia, não foi eficiente no que tange ao tempo necessário para processamento de uma determinada massa de material. Porém, foi capaz de cominuir consideravelmente um resíduo metálico de usinagem e também produzir pós ultrafinos mesmo em períodos pequenos.
- Durante a análise da microestrutura e da microdureza nos cavacos residuais, percebeu-se que para o aço SAE1045, há um leve encruamento dos grãos, elevando a dureza do material. Este fato não foi observado no aço AISI H13.
- Para ambos os materiais, produziu-se pós metálicos com formatos similares, com morfologia heterogêneas, variando entre poligonais e esféricas.
- As dimensões dos pós obtidos foram similares para o aço SAE 1045 e para o AISI H13, com uma faixa que compreendeu predominantemente 1 μm até 25 μm .

Além do sucesso na produção do pó, confirmou-se que a fragmentação destes materiais, via moagem em moinho de bolas, mesmo que em baixa eficiência de produção, foi possível. Diante de melhorias, como determinação de parâmetros ideais de moagem, este processo pode se apresentar como uma rota alternativa interessante para dar um destino mais promissor para os resíduos de usinagem, além de agregar valor a estes.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Após realização da pesquisa, sugerem-se para trabalhos futuros os seguintes estudos:

- Alteração dos parâmetros em busca do aumento da eficiência de moagem;
- Utilização de meio criogênico durante o processo de moagem, visando acelerar o processo de moagem através da fragilização do material;
- Realização de tratamentos térmicos pré-moagem em resíduos de usinagem visando obter microestruturas que acelerem o processo de moagem através do aumento da fragilização do material.
- Realização de moagem através de um processo contínuo e não por batelada.

REFERÊNCIAS

- AÇOESPECIAL. (2022). **Aço SAE 1045 e suas propriedades**. Retrieved from Aço Especial: <https://www.acoespecial.com.br/>
- ALBARO, J. L. (2001). **A operação de prensagem: Considerações técnicas e sua aplicação industrial**. Parte V: Descrição da etapa de prensagem. Cerâmica Industrial.
- ALVES, G. (2021). **Análise comparativa de propriedades mecânicas e microestruturais dos aços AISI H13 Standard, AISI H13 ESR e JIS SKD 61**. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação.
- 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 .
- BOSAA, A., FERROA, A. S., WANDERLINDA, A., PASINIA, D., PATRÍCIOA, M. C., TASSIA, R., MODESTOA, C. DE O., DE NONI JR.A, A., & CARGNINA, M. (2007). **Influência do Resíduo in natura das Matérias-primas, Carga de Bolas e Resíduo Final no Tempo de Moagem via Úmida em Moinho de Bolas**. Unidade Industrial de Cerâmica, Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657337f8c9d6e028b472e/pdf/ci-12-6587657337f8c9d6e028b472e.pdf>. Acesso em: Janeiro de 2024.
- CAMPOS, M. M. de. (2012). **Análise da escoabilidade de pós**. Universidade Federal de São Carlos. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4092/4315.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 24 de janeiro de 2024.
- CARVALHO, F. P., & GOMES, J. M. (2008). **Ecoeficiência na Produção de Cera de Carnaúba no Município de Campos Maior**. Revista de Economia e Sociologia Rural.
- CASTAGNET, Mariano. **Avaliação da compressibilidade de misturas de pós de nióbio e alumínio ativadas mecanicamente**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2008. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-21082009-175647/publico/MarianoCastagnet.pdf>. Acesso em 25 de janeiro de 2024.
- CHIAVERINI, V. (2001). **Metalurgia do pó: técnica e produtos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.
- COSTA, A. A. (2009). **A ecoefetividade do design: Proposição de uma ferramenta de análises e sua aplicação em sistemas de produtos e serviços**. PE - Brasil: Dissertação de mestrado, CAC, Design, Universidade Federal de Pernambuco.
- CREMONEZI, A., KLEIN, A., RODRIGUES, D., & FILGUEIRA FILHO, D. T. (2009). **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. Editora Metallum Eventos Técnicos e Científicos.

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?srsItd=AfmBOorJa_RXYAmpZZ614rffRrKSieVnRcAszblZN3kkBRrplX_Uqmf4wwk.

DIFERRO. (2022). **Aços para construção mecânica: Aço SAE 1045.** Retrieved from Diferro - Aços Especiais: <https://www.diferro.com.br/>

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

FAVORIT. (2022). **Aços para construção mecânica: Aço SAE 1045.** Retrieved from Favorit: <https://favorit.com.br/>

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.** Princenton: Metal Powder Industries Federation.

GERMAN, R. M. (2009). **Powder Metallurgy Science.** Metal Powder Industries Federation.

Giassi Ferro e Aço. (2024). **O aço SAE 1045 e suas propriedades.** Disponível em: <https://giassiferroeaco.com.br/o-aco-sae-1045-e-suas-propriedades/>. Acesso em: Março de 2024.

GONTARSKI, T. L., CASALI, R. M., & MIKOWSKI, A. (2021). **Dureza vickers: Definição, normatização e perspectivas de pesquisa: uma revisão.** Retrieved from Brazilian Journal of Development: <https://brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/view/24707/19726>

GRAVALOS, M. T., Martins, M., Diniz, A. E., & Mei, P. R. (2007). **Efeito da usinagem na estrutura e propriedades mecânicas do aço superaustenítico ASTM A351 CN3MN.** Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. (2009). **A metalurgia do pó. Alternativa econômica com menor impacto ambiental.** São Paulo: Metallum Eventos Técnicos.

HAN, Q., SETCHI, R., & EVANS, S. L. (2016). **Síntese e caracterização de nanocompósitos avançados de Al-Al₂O₃ moídos por esferas para fusão seletiva a laser.** Powder technology.

HONG, S. M. (2018). **Powder Metallurgy Science.** Metal Powder Industries Federation.

INDUSMART. (2024). **Aço Ferramenta H13.** Disponível em: <https://www.indusmart.com.br/materiais/aco-ferramenta-h13/>. Acesso em: Março de 2024.

JULIANO, P; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. (2010): **Food Powders Flowability Characterization: Theory, Methods, and Applications.** Revista Food Science and Technology, v. 1. p. 211-239.

- MATIAS JUNIOR, E. (2018). **Comportamento Mecânico do Aço AISI H13 Temperado**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica. Engenharia Mecânica,. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/27465/1/CP_COEME_2018_2_01.pdf. Acesso em: 30 de janeiro de 2024.
- KIMINAMI, C.S.; CASTRO, W.B.; OLIVEIRA, M.F. (2013). **Introdução aos Processos de Fabricação de Produtos Metálicos**. 1.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2013. 235p.
- KLEIN, A. N. (2001). **Metalurgia do Pó: Disciplina de Processamento de Materiais a Partir do Pó**. Florianópolis.
- KLEIN, A. N. (2011). **Metalurgia do Pó: Alternativa econômica com menor impacto ambiental**. São Paulo: Grupo Setorial de Metalurgia do Pó.
- LUTKEMEYER, M. (2014). **Avaliação da aderência aos princípios de sustentabilidade em desenvolvimento de produto à luz de abordagens ecoeficientes e ecoefetivas: uma aplicação no setor automotivo**. São Leopoldo : Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas - UNISINOS.
- MARMELEIRO, D. (2022). **Preços de sucatas**. São Paulo.
- 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.
- MORO, N., & AURAS, A. P. (2007). **Processos de Fabricação: Metalurgia do Pó e o futuro da indústria**. Florianópolis: Centro Federal de Educação e Tecnologia de Santa Catarina.
- OLIVEIRA, L. B. (2021). **Caracterização de pós metálicos para processos de fabricação não convencional**. São Paulo: UNIFESP.
- PALLINI, M. (2005). **Metalurgia do Pó – mercado & design & comparação com processos concorrentes**. Salvador: International Conference on Powder Technology – PTECH.
- PALLINI, M., & CARVALHO, M. (2006). **A Redução de custo na indústria automotiva através do sinterizado**. Society of Automotive Engineers,.
- PEREIRA, E. B., LIMA, L. J., THEODORO, J. M., & ESPADA, M. F. (2021). **Uma abordagem econômica sobre a coleta de resíduos 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**. Brazilian Journals of Business :Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BJB/article/view/16503>.
- PORTER, J. (1998). **Powder Metal Technologies and Application**. ASM Handbook.

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

SCHAERER, M. M. (2006). **Análise numérica do comportamento de densidade de pós**. Rio de Janeiro: Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro.

SCHWAB, P. V. (2019). **Influência da sinterização e infiltração de cobre nas propriedades de engrenagens produzidas por metalurgia do pó**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

SILVA, J. R. et al. (2020). **Estudo do Impacto da Forma de Partículas de Pó Metálico nas Propriedades de Compactados por Metalurgia do Pó**. Revista Brasileira de Metalurgia, 10(2), 45-56.

SILVA, L. F. S., DUTRA, C. P., SOUZA, V. B., & FERNANDES, K. C. (2019). **Estudo da dureza do aço SAE 1045 submetido ao tratamento térmico de têmpera e resfriado em diferentes materiais**. Revista Interdisciplinar do Pensamento Científico, ISSN: 2446-6778.

TAKIMI, A. S. (2004). **Obtenção de superligas nicraly nanoestruturadas por moagem de alta energia e sua aplicação por aspersão térmica hipersônica (HVOF)**. Dissertação, Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

WOODCOCK, C. R.; MASON, J. S. Bulk (1987). **Solids Handling: An introduction to the practice and technology**. Glasgow: Leonard Hill.

ZAUNER, R. (2006). **Micro moldagem por injeção de pó**. Microelectronic Engineering: Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167931706002644?via%3Dihub>.