

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PEDRO AUGUSTO PEGORER FRASSAN

**ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE TÉCNICA DE PRODUÇÃO DE PEÇAS A
PARTIR DE RESÍDUOS DE USINAGEM UTILIZANDO-SE DA METALURGIA DO
PÓ**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

PEDRO AUGUSTO PEGORER FRASSAN

**ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DE PEÇAS A
PARTIR DE RESÍDUOS DE USINAGEM UTILIZANDO-SE DA
METALURGIA DO PÓ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Mecânica, do Departamento de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Orientadora: Prof.^a Ma. Heliety Rodrigues Borges Barreto

PONTA GROSSA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Mecânica
Bacharelado em Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

**ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE TÉCNICA DE PRODUÇÃO DE PEÇAS A
PARTIR DE RESÍDUOS DE USINAGEM UTILIZANDO-SE DA METALURGIA DO
PÓ**

por

PEDRO AUGUSTO PEGORER FRASSAN

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 11 de junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Ma.Heliety Rodrigues Borges Barreto
Orientadora

Profa. Ma.Sandra Mara Kaminski Tramontin
Membro Titular

Prof. Me.Fabio Edenei Mainginski
Membro Titular

Prof.Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho
Coordenador do Curso

- A Folha de Aprovação assinada encontra-se arquivada na Secretaria Acadêmica -

Dedico este trabalho aos meus pais Rosa
Angela Pegorer Frassan e Jose Antônio
Frassan, que foram os grandes
responsáveis pela realização do sonho de
chegar a graduação em Engenharia
Mecânica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me dado energia e benefícios para que eu concluísse este trabalho.

Agradeço aos meus pais Rosa Angela Pegorer Frassan e Jose Antônio Frassan, ao meu irmão Guilherme Pegorer Frassan e a minha namorada Samanta C. Krynsky por toda a paciência nos períodos de ausência e ao incentivo que me deram para que eu pudesse chegar a conclusão desse trabalho e do Curso de Engenharia Mecânica na UTFPR, Campus Ponta Grossa.

Agradeço aos professores que sempre estiveram dispostos em sanar minhas dúvidas durante esse processo e especialmente a Professora Orientadora Heliety Rodrigues Borges Barreto.

Agradeço a Larissa Krambeck e ao Guilherme Bartmeyer, por me ensinarem a utilizar o forno de atmosfera controlada e me ajudarem nos momentos de necessidade.

Agradeço ao meu Gerente Mauricio Freitas e ao meu tutor Diego Souza na DAF Caminhões Brasil S/A, por terem me disponibilizado dez dias de férias para que eu pudesse terminar este trabalho.

Aos meus amigos e colegas de classe que estiveram juntos comigo durante essa caminhada.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que fizeram parte dessa minha caminhada e parte decisiva da minha vida.

A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo todo.

(Einstein, Albert, 1931)

RESUMO

A problemática dos recursos naturais e a questão dos mesmos serem finitos leva cada vez mais a busca de soluções em reciclagem de materiais que anteriormente eram descartados. Cavacos e limalhas provenientes de processos de usinagem são abundantes em muitas indústrias metal-mecânicas, e são uma ótima fonte de materiais recicláveis. Tem-se como objetivo desse trabalho a reciclagem desses materiais, em especial a limalha, através de processos relacionados a metalurgia do pó. O processo explorado pelo trabalho é muito semelhante aquele usado na sinterização dos pós metálicos. Houve a classificação das limalhas, sua compactação, sinterização, ensaios e resultados. Os resultados foram a princípio inesperados do ponto de vista da praticidade buscada para a reciclagem das limalhas. Levando-se a considerar que a reciclagem desse material, por meio da utilização da metalurgia do pó, não seja algo simples, devido a sua natureza física e de contaminantes presentes, que são o principal obstáculo para a sua reciclagem de maneira rápida e com baixo impacto econômico e para o meio ambiente.

Palavras Chave: Metalurgia do pó. Limalhas. Sinterização. Fluido de corte.

ABSTRACT

The problem of natural resources and the issue of these are finite, increasingly leads to the search for solutions in recycling of materials that were previously discarded. Chip and slivers from machining processes are plentiful in many metal-mechanical industries and are a good source of recyclable materials. The purpose of this work is recycling these materials, especially the filings, through processes related to powder metallurgy. The process exploited by this work is like that used in the sintering of the metallic foils, the sorting of the chips, their compaction, sintering and results. The results were initially unexpected from the point of view of practicality sought for the recycling of filings. Taking into consideration of the process of recycling this material is not something simple, due to its nature and contaminations that it undergoes during previous processes by which it is submitted.

Keywords: Powder metallurgy. Slivers. Sintering. Cutting fluid.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplificação de cavacos contínuos.	19
Figura 2 - Exemplificação de cavacos gerados por ruptura.	19
Figura 3 - Exemplificação de cavacos gerados por cisalhamento.	20
Figura 4 - Microestrutura de um material sinterizado de oxido de alumínio.	26
Figura 5 - Fluxograma simplificado do processo.	30
Figura 6 - Limalhas coletadas no Laboratório de Usinagem, DAMEC Universidade Tecnológica Federal do Paraná.	32
Figura 7 - Ilustração do microscópio ótico Olympus BX 60.	33
Figura 8 - Prensa manual SERVITCH com capacidade máxima de 30 toneladas. ...	34
Figura 9 - Matriz utilizada no processo de compactação.	35
Figura 10 - Vista superior da matriz usada para compactação dos corpos de prova.	35
Figura 11 – Balança Shinadzu AUX220.	36
Figura 12 - Forno utilizado no processo de sinterização, modelo FT 1200, marca INTI	37
Figura 13 - Ilustração do sistema de ligação do cilindro de gás que fornece a atmosfera para o forno.	39
Figura 14 - Primeiro processo de sinterização.	40
Figura 15 - Processo de aquecimento do terceiro processo de sinterização.	41
Figura 16 - Processo de aquecimento do quarto processo de sinterização.	41
Figura 17 - Imagem usada para caracterização das partículas quanto a sua forma.	45
Figura 18 - Partículas produzidas por cisalhamento.	46
Figura 19 - Partículas que mostram características de formas arrancadas, produzidas pelo processo de corte.	47
Figura 20 - Partícula com característica acicular.	48
Figura 21 - Partículas usadas no software ImageJ, para determinação do perímetro e área.	50
Figura 22 – Aparecimento de fluido de corte no momento da compactação.	51
Figura 23 - Amostras após processo de compactação.	52
Figura 24 - Resultado da primeira sinterização realizada a 700 °C durante uma hora.	55
Figura 25 - Resultado das amostras expostas a água.	56
Figura 26 - Resultado do segundo processo de sinterizacao realizado repetindo os padroes do primeiro processo.	57
Figura 27 - Evidencia da formacao de fuligem entre as particulas de limalha.	59
Figura 28 - Resultado do terceiro processo de sinterização realizado com temperatura de 900 °C durante uma hora.	60
Figura 29 - Corpo de prova após a terceira sinterização a temperatura de 900 °C por uma hora.	62
Figura 30 - Óleo no fundo do tubo do forno após a sinterização do material.	63

Figura 31 - Sequência de descontaminação das limalhas usadas no processo do trabalho.	64
Figura 32 - Resultado da sinterização das partículas que passaram por tratamento para retirada do fluido de corte.....	65
Figura 33 - Resultado da sinterização das amostras feitas com limalha lavada, com ampliação de 3x.	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Abertura da malha das peneiras.	22
Quadro 2 - Temperatura e tempos de sinterização para alguns tipos de materiais. .	25
Quadro 3 - Peneiras utilizadas no procedimento de peneiramento das limalhas.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados dimensionais das partículas analisadas utilizando o ImageJ.....	49
Tabela 2 - Informações dimensionais e de massa das amostras feitas com limalhas lavadas.....	53
Tabela 3 - Dados dimensionais e massa dos corpos de prova confeccionados com limalhas.....	53
Tabela 4 - Resultados do primeiro procedimento de sinterização.....	55
Tabela 5 - Comparativo entre valores médios das amostras antes e depois do processo de sinterização.....	56
Tabela 6 - Resultados da segunda sinterização, realizada a 700 °C durante uma hora.....	58
Tabela 7 - Comparativo entre os resultados dimensionais e de massa antes e depois da segunda sinterização.....	58
Tabela 8 - Dados da terceira sinterização.....	61
Tabela 9 - Dados comparativos entre as amostras antes e depois da sinterização.....	61
Tabela 10 - Resultados da sinterização a 900 °C durante uma hora, das amostras confeccionadas com a limalha lavada.....	66
Tabela 11 - Comparação entre os dados das amostras antes e depois do processo simétrica.....	66

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVO GERAL DO PROJETO	16
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 TIPOS DE CAVACOS	18
2.1.1 Cavacos Contínuos	18
2.1.2 Cavaco de Ruptura	19
2.1.3 Cavaco de Cisalhamento	20
2.2 METALURGIA DO PÓ.....	20
2.2.1 Caracterização do Pó.....	21
2.2.1.1 Processo de Caracterização do Pó por Imagem	21
2.2.1.2 Processo de Caracterização do Pó por Peneiramento	21
2.2.2 Compactação	22
2.2.2.1 Compactação Unidirecional em Matriz Rígida.....	23
2.2.3 Caracterização a Verde.....	24
2.2.4 Sinterização.....	24
2.2.4.1 Estágios pelo Qual o Material Passa Durante o Processo de Sinterização.....	26
2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	27
2.3.1 Densidade	27
2.3.2 Porosidade	28
2.3.3 Imagem	28
2.3.3.1 Macrografia	28
2.3.3.2 Micrografia.....	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 OBTENÇÃO DA LIMALHA	32
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS LIMALHAS	32
3.2.1 Metodologia do Peneiramento.....	33
3.2.2 Metodologia da Microscopia Ótica	34
3.3 COMPACTAÇÃO	34
3.4 CARACTERIZAÇÃO A VERDE.....	35
3.5 SINTERIZAÇÃO	36
3.5.1 Primeiro Processo de Sinterização	39
3.5.2 Segundo Processo de Sinterização	40
3.5.3 Terceiro Processo de Sinterização.....	40
3.5.4 Quarto Processo de Sinterização.....	41
3.7 LAVAGEM DAS LIMALHAS	42
3.8 CARACTERIZAÇÃO FINAL	43
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO	44

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS LIMALHAS	44
4.1.1 Caracterização por Peneiramento	44
4.1.2 Classificação por Microscopia	44
4.1.3 Classificação Quanto à Forma das Partículas.....	45
4.2 DEFINIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS	48
4.3. COMPACTAÇÃO DAS PARTÍCULAS.....	51
4.4 CARACTERIZAÇÃO A VERDE DOS CORPOS DE PROVA.	52
4.5 RESULTADOS DAS SINTERIZAÇÕES.....	54
4.5.1 Resultado da Primeira Sinterização.	54
4.5.2 Resultados da Segunda Sinterização	57
4.5.3 Resultado do Terceiro Processo de Sinterizadas.....	60
4.6 RESULTADOS DO PROCESSO DE LAVAGEM DAS LIMALHAS.....	63
4.7 COMPACTAÇÃO DAS PARTÍCULAS LAVADAS	64
4.8 SINTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS FEITAS COM PARTÍCULAS LAVADAS...	65
5.CONCLUSÃO	68
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
7.REFERENCIAS.....	70

1. INTRODUÇÃO

Na atualidade a preocupação com a geração e a correta destinação dos resíduos sólidos provenientes da produção industrial é algo que se tornou relevante para a indústria de modo geral. Tal relevância tomou tal forma que fez com que surgisse um novo seguimento, voltado para a reciclagem e reutilização de materiais industriais, para a correta destinação dos resíduos industriais (SIMIAO, 2011).

A indústria metal mecânica brasileira tem grande importância econômica para a nação e é dela que vem grande parte dos resíduos industriais tais como cavacos e pós grosseiros, que serão objeto de estudo deste trabalho. A pouco tempo atrás não se tinha a preocupação sobre qual a melhor maneira de se descartar estes materiais, estes eram enviados novamente as siderúrgicas a fim de fundi-los novamente na forma de lingotes, com a preocupação de corrigi-los no que diz respeito a sua composição química. Porém, o retrabalho desses cavacos e pós metálicos traz um custo dispendioso em energia, sendo assim a indústria de maneira geral vem buscando maneiras alternativas para o reaproveitamento desses resíduos provenientes da usinagem. A tecnologia do pó ou metalurgia do pó mostra-se como uma saída viável para o reaproveitamento desde tipo de resíduo proveniente da usinagem (ZAPAROLLI, 2016).

Através da metalurgia do pó, é possível transformar das limalhas e pós grosseiros provenientes da usinagem e outras atividades industriais, em pós mais finos que possam vir a ser sinterizados na forma de outras peças que tenham relevância econômica para a indústria, tais como setor automobilístico, de ferramentas, eletrodomésticos e ferramentas elétricas (GALVÃO, 2008).

A metalurgia do pó é o processo metalúrgico de fabricação de peças metálicas, que se distingue dos processos metalúrgicos convencionais pelas características (CHIAVERINI 2001):

- Utilização de pós metálicos e não metálicos como matérias-primas;
- Ausência de fase líquida ou presença apenas parcial da fase líquida durante o processo de fabricação;
- Produção de peças com formas definitivas ou praticamente definitivas, dentro de tolerâncias muito estreitas, geralmente sem

necessidade de operação de usinagem posterior ou de qualquer outro tipo de acabamento;

- Produção de componentes com características estruturais e físicos impossíveis de se obter por qualquer processo metalúrgico;
- Obtenção de peças de grandes series, tornando o processo altamente competitivo em relação aos processos convencionais. (CHIAVERINI 2001)

As soluções que vem sendo estudadas até então caracterizam-se pelo método de compactação que o material pode ser submetido, os tipos de moagem que este pode sofrer, quais os tipos de liga de aço que podem ser reciclados utilizando-se da metalurgia do pó. Porém, as soluções estudadas por outros autores não podem ser aplicadas ao problema em questão, sendo assim será proposta uma nova metodologia para a obtenção de uma liga de aço através do reaproveitamento de cavacos e pós metálicos provenientes da usinagem.

O ser humano torna-se cada vez mais consciente no que diz respeito ao meio ambiente, pois torna-se cada vez mais claro que os recursos naturais que o Planeta Terra pode nos prover são finitos. Frente a provável escassez de matérias primas num futuro não tão distante quando imaginávamos, o ser humano passou a ter uma maior preocupação com o desperdício desses recursos (SIMIAO, 2011).

Sendo assim a utilização da metalurgia do pó para a reciclagem desse tipo de material toma força, pois será necessário menor gasto energético para sua reciclagem. Além do gasto energético ser menor, está a possibilidade da produção de peças semiacabadas através de processos envolvendo a metalurgia do pó.

Tendo em vista contribuir para com a reutilização e reciclagem deste tipo de material, propõem-se o estudo para a confecção de uma liga composta por diversos tipos de materiais, sinterizado através das qualidades e propriedades provenientes no pó e da metalurgia do pó.

1.1 Objetivo Geral do Projeto

Verificar a possibilidade da utilização das limalhas de diversos materiais provenientes das serras de corte e usinagem, do Laboratório de Usinagem do Bloco

K da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. Para serem utilizados em processos de sinterização, por meio de metalurgia do pó.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

As etapas que devem ser seguidas para que se possa obter o resultado esperado para o objetivo geral são:

- Pesquisa bibliográfica sobre o assunto explorado;
- Verificar a possibilidade de uso da limalha de aço e outros materiais sem que haja a necessidade de moagem;
- Estudar a compressibilidade e sinterabilidade das misturas elaboradas;
- Realizar uma avaliação do produto final, no que diz respeito às características mecânicas e microestruturais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O consumo de metais como o aço cresce de acordo com os níveis de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) de cada país. Países que são considerados emergentes crescem de maneira mais acelerada em comparação aos desenvolvidos, assim adotando tecnologias similares aquelas utilizadas em países desenvolvidos. Sendo assim, a produção atual de aço teria que ser elevada a nove vezes o que é produzido hoje, para que se possa atender todos esses mercados emergentes. Tendo em vista a importância do aço para a civilização atual, torna-se importante sua reciclagem tanto para diminuição de custos quanto para o meio ambiente. A cada tonelada de sucata reciclada de maneira tradicional são economizados 1.140 kg de minério de ferro, 154 kg de carvão e reduz em 70% o consumo de água em siderúrgicas (ZAPAROLLI, 2016).

O processo de usinagem é um dos mais utilizados na indústria atualmente, e dele é proveniente diversos tipos de refugos sólidos, líquidos e vapores. Em um processo de usinagem as partículas sólidas são compostas pelos cavacos da peça que está sendo usinada e de partículas que se desprendem da ferramenta de corte (MATERIAL AND ENERGY WASTES MINIMIZATION IN A MACHINING SYSTEM: A REVIEW, 2013).

2.1 TIPOS DE CAVACOS

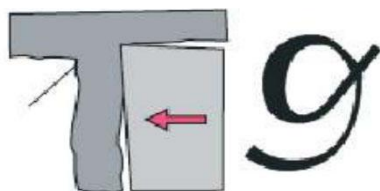
Pesquisadores vem classificando cavacos de diversas maneiras ao longo dos anos. As classificações mais comuns são aquelas encontradas nas literaturas alemãs e americanas, que se constituem em 3 tipos de cavacos (FERRARESI, 2011).

2.1.1 Cavacos contínuos

São constituídos por lamelas, que se encontram dispostas de maneira contínua. Lamela é uma palavra utilizada para se definir uma camada de material do cavaco, estas camadas são constituídas de grãos cristalinos (FERRARESI, 2011), (AMORIM, 2002). O cavaco contínuo observado na figura 1 é proveniente da usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, com pequeno avanço da ferramenta

de corte, sendo a velocidade de corte superior a 60 m/min, para que o cavaco seja contínuo não se deve haver interferência de vibrações e atrito entre ferramenta e peça. (FERRARESI, 2011).

Figura 1 - Exemplificação de cavacos contínuos.



Fonte - <<http://superusinagem.blogspot.com.br/2011/03/cavacos.html>>. Acesso em: 12 maio 2018

2.1.2 Cavaco de Ruptura

Este é constituído de fragmentos arrancados da peça que está passando pelo processo de usinagem, os grupos lamelares são separados em pequenas porções como demonstrado na figura 2. Tem como origem na usinagem de materiais frágeis como ferro fundido e latão (FERRARESI, 2011).

Figura 2 - Exemplificação de cavacos gerados por ruptura.

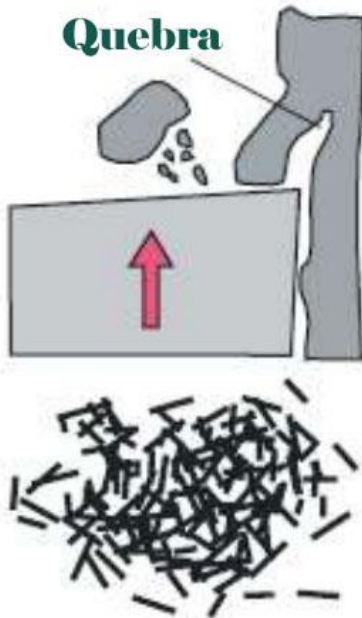


Fonte - <<http://superusinagem.blogspot.com.br/2011/03/cavacos.html>>. Acesso em: 12 maio 2018

2.1.3 Cavaco de cisalhamento

Este tipo de cavaco se caracteriza pelo fato de ter se cisalhado e se fundido a outro cavaco logo em seguida, formando-se a partir da diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento, esta diminuição da resistência se dá pelo aparecimento de vibrações no processo, que fazem o cavaco variar em espessura, aumento de deformações e ao fato da estrutura mecanográfica apresentar grande heterogeneidade (FERRARESI, 2011), (AMORIM, 2002). O cavaco gerado por cisalhamento pode ser observado na figura 3.

Figura 3 - Exemplificação de cavacos gerados por cisalhamento.



Fonte - Fonte - <<http://superusinagem.blogspot.com.br/2011/03/cavacos.html>>. Acesso em: 12 maio 2018.

2.2 METALURGIA DO PÓ

A metalurgia do pó é um processo que consiste na compactação de pós metálicos seguidos de sinterização tendo como objetivo a fabricação de peças metálicas. (CHIAVERINI, 2001).

2.2.1 Caracterização do Pó

A caracterização do pó metálico é uma etapa importante na metalurgia do pó, pois ela determina a maneira correta com que o pó será utilizado. Esse conhecimento se faz cada vez mais necessário, tendo em vista que processos industriais se utilizando da metalurgia do pó expandem-se cada vez mais. A caracterização dos pós metálicos tem como objetivo entender seu comportamento em serviço, determinar tolerâncias no que diz respeito às suas propriedades, e mais importante de todos, estudar e assegurar o comportamento do pó durante a etapa de processamento (CHIAVERINI, 2001).

2.2.1.1 Processo de Caracterização do Pó por Imagem

O processo de caracterização do pó por imagem (microscopia) tem como objetivo avaliar morfológicamente as partículas de pó produzidos pelo processo de moagem. Com o auxílio de uma lupa ótica é possível observar de maneira bem representativa o formato das partículas. O formato dos pós está diretamente ligado com o processo utilizado para a sua obtenção, os pós que são obtidos pelo processo de moagem têm o formato irregular e escamoso (CHIAVERINI, 2001). A microscopia é considerada um dos métodos mais eficientes, pois é através dele que se pode enxergar a partícula de forma individual, assim podendo tomar suas medidas (CHIAVERINI, 2001).

2.2.1.2 Processo de Caracterização do Pó por Peneiramento

O peneiramento é um dos passos de maior importância, pois é através dele que se tem a distribuição granulométrica do material. O peneiramento também permite a preparação de pós com dimensões diferentes para que possam ser misturados posteriormente, em aplicações a serem definidas (CHIAVERINI, 2001).

As peneiras são padronizadas seguindo a Serie de Taylor, as quais são praticamente idênticas as do National Bureau of Standards ou U.S. Sieve Series (CHIAVERINI, 2001). O quadro 1 mostra as series de peneiras que são comumente empregadas na metalurgia do pó.

Quadro 1 - Abertura da malha das peneiras.

Diagrama da Peneira		U.S. Standards	Taylor Standard
Micros	Número de Malha	Abertura da Peneira (mm)	Número de Malha
177	80	0,177	80
149	100	0,149	100
125	120	0,125	115
105	140	0,105	150
88	170	0,88	170
74	200	0,74	200
63	230	0,63	250
53	270	0,53	270
44	325	0,44	325
37	400	0,37	400

Fonte - CHIAVERINI, 2001.

As peneiras são utilizadas da seguinte maneira, são empilhadas com o maior tamanho de malha no topo e um prato no fundo, uma quantidade adequada de amostra de pó é distribuída sobre a peneira que se encontra no topo, em seguida é colocada uma tampa. Então o conjunto de peneira é agitado, durante um período de tempo predeterminado. Ao final do processo de agitação, cada quantidade que fica retida na peneira é pesada de modo separado (CHIAVERINI, 2001).

Posteriormente ao peneiramento e pesagem, utiliza-se as massas para calcular a porcentagem de material que ficou retido em cada peneira, faz-se um gráfico número de malha x massa, identificando a frequência acumulada em cada peneira como forma de identificar o perfil do pó que está sendo utilizado e que foi produzido pelo processo de moagem.

2.2.2 Compactação

Esta é a primeira etapa da consolidação no material na metalurgia do pó, e tem como seguintes objetivos: conformar o pó na forma projetada, determinar as dimensões finais especificadas sempre levando em conta alguma alteração possível, determinar a densidade a verde, determinar a resistência mecânica e conferir o necessário contato entre as partículas para facilitar a etapa de sinterização (CHIAVERINI, 2001).

A compactação geralmente é realizada aplicando-se pressão; porém, dependendo do produto a ser confeccionado não há a aplicação de pressão, como

no caso de filtros, neste caso o pó solto no molde é levado a sinterização (CHIAVERINI, 2001). O tipo mais comum de compactação é a de matriz rígida, com pressão sendo aplicada unidirecionalmente de ação simples ou dupla (CHIAVERINI 2001).

2.2.2.1 Compactação Unidirecional em Matriz Rígida

As prensas empregadas nesse tipo de compactação podem ser do tipo mecânico, hidráulico ou podem apresentar uma combinação entre esses dois sistemas. As prensas mecânicas têm um alto rendimento, permitindo assim uma elevada produção com um menor consumo de energia e uma maior faixa de pressões atuantes (CHIAVERINI, 2001). No momento da seleção das prensas deve se levar em consideração dois importantes fatores a capacidade da prensa em toneladas e seu curso, sendo o curso responsável pela ejeção dos moldes compactados.

Dados que devem ser levados em consideração na hora da escolha de uma prensa são: capacidade em toneladas, o curso, o representativo da profundidade de enchimento e o curso de ejeção. A capacidade de ejeção também se faz importante no momento de escolha de uma prensa, este sendo especificado em toneladas (CHIAVERINI, 2001).

Para a pesquisa será utilizada uma prensa de ação simples, esse tipo de prensa inclui uma matriz que confere o contorno externo da peça, uma punção superior que comprime a peça pelo topo, uma punção inferior e um macho (CHIAVERINI, 2001). A aplicação de pressão se dá pelo topo, a punção inferior tem como objetivo dar forma a peça e somente será movimentado para a ejeção da peça que está sendo compactada (CHIAVERINI, 2001).

O ciclo de compactação se dá da seguinte forma: enchimento do molde como o pó metálico previamente misturado com um lubrificante para facilitar a retirada da peça final da matriz, aplicação de pressão utilizando-se da punção superior, movimento para cima da punção inferior para a ejeção da peça compactada (CHIAVERINI, 2001).

2.2.3 Caracterização a Verde

A caracterização a verde é um procedimento muito utilizado na metalurgia do pó, este sempre realizado antes da sinterização do material compactado. A importância desse passo no processo consiste na verificação da habilidade do pó metálico compactado manter suas dimensões antes da sinterização. Observa-se que este compactado já foi retirado da matriz, e só falta passar pelo processo de sinterização para finalizar o processo.

O travamento mecânico proporcionado pelas irregularidades das superfícies das partículas confere a resistência a verde do material compactado, outro fator é a deformação plástica que o material sofre devido à pressão aplicada (CHIAVERINI, 2001).

2.2.4 Sinterização

A sinterização é algo bem simples, mas que requer alguns cuidados como um bom forno, uma atmosfera protetora para evitar a oxidação da peça no momento da sinterização e instrumentos de medição e controle (CHIAVERINI, 2001). Ainda com todas essas precauções ainda há algumas variáveis que podem afetar o resultado final da sinterização, essas variáveis são: a natureza do pó, a mistura de pós, a característica de compactação a verde que o pó apresenta, e outras características como densidade, porosidade etc (CHIAVERINI, 2001). Em outras palavras a sinterização é um processo de difusão no estado sólido.

Na primeira fase da sinterização que ocorre com o aquecimento do compactado a verde, há o aumento do contato entre as partículas, ocorrendo já nessa fase mudanças no interior do compactado, como por exemplo, modificações em geometrias internas (CHIAVERINI, 2001). Um dos efeitos iniciais do aquecimento é a contração das partículas, afetando o seu tamanho, e como consequência aumentando a densidade do material. Também pode ocorrer o fenômeno da esferoidização da estrutura porosa, modificando a estrutura do compactado (CHIAVERINI 2001). O quadro 2 fornece algumas temperaturas e tempos para o processo de sinterização, levando em conta aquelas matérias que são mais comumente utilizados em processos envolvendo a metalurgia do pó.

Quadro 2 - Temperatura e tempos de sinterização para alguns tipos de materiais.

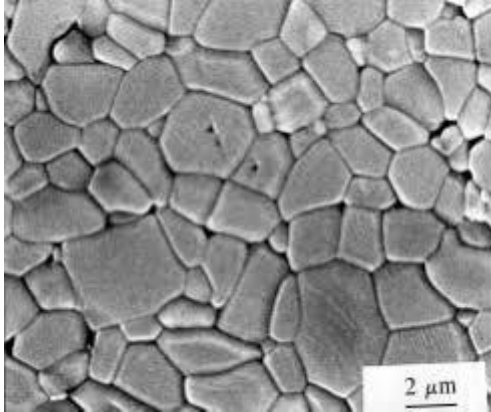
Material	Temperatura C	Tempo (min)
Bronze	760-860	10-20
Cobre	845-900	12-45
Latão	845-900	10-45
Ferro, ferro-grafita, etc.	1010-1150	8-45
Níquel	1010-1150	30-45
Aço Inoxidável	1095-1290	30-60
Imas Alnico	1205-1300	120-150
Ferritas	1205-1480	10-600
90W-6Ni-4Cu	1345-1595	10-120
Carboneto de Tungstênio	1425-1480	20-30
Molibdênio	2055	120 aprox.
Tungstênio	2345	480 aprox.
Tântalo	2400	480 aprox.

Fonte - CHIAVERINI, 2001.

Pode se dizer também que durante as primeiras etapas da sinterização pode ocorrer o “fenômeno de transporte”, que nada mais é do que um mecanismo difusional, um fluxo de difusão influenciado por defeitos que se encontram no retículo cristalino do material. Como resultado desse “fenômeno de transporte” começa a ocorrer uma maior interação entre as partículas, aumentando o seu contato e até mesmo se verificando as primeiras ligações (CHIAVERINI, 2001). Essas primeiras ligações fazem com que aumente a coesão entre as partículas do compactado, entretanto essa maior coesão ainda não leva a mudanças dimensionais na peça que está sofrendo o processo de sinterização. Como consequência dessa ligação entre as duas partículas começa a se formar um contorno de grão bem na ligação das duas partículas, ficando caracterizado um aumento de lacunas, defeitos cristalinos, podendo gerar um fluxo difusional diferente nesta região (CHIAVERINI 2001).

O resultado de um material sinterizado é exemplificado pela figura 4.

Figura 4 - Microestrutura de um material sinterizado de oxido de alumínio.



Fonte - <https://www.researchgate.net/figure/Microestrutura-de-un-material-sinterizado-de-Al-2-O-3-obtido-por-EPD-sobre-grafito_fig6_45192119>. Acesso em: 12 maio 2018.

2.2.4.1 Estágios pelo qual o Material Passa Durante o Processo de sinterização

A sinterização ocorre nos seguintes estágios: (a) ligação inicial entre as partículas e a formação do pescoço (como descrito anteriormente), (b) crescimento do pescoço, (c) fechamento dos canais que estão interligando os poros, (d) arredondamento dos poros, (e) contração dos poros ou densificação do compactado, (f) crescimento eventual dos poros (CHIAVERINI 2001). Cada estágio pelo qual o material passa será descrita na sequência.

(a) Ligação inicial: é a primeira fase do processo de sinterização, onde o material vai começar a ser aquecido ocasionando a difusão e como consequência o aparecimento dos contornos de grãos entre uma partícula e outra. Essa primeira ligação não afeta as dimensões do compactado, mas faz com que a coesão entre as partículas aumente consideravelmente (CHIAVERINI 2001). Tem que se observar que quanto maior a densidade do compactado a verde melhor será essa coesão no primeiro estágio de sinterização.

(b) Crescimento do pescoço: é a fase da sinterização que começa a ocorrer um maior grau de interação entre as partículas, o que exige um maior transporte de material no interior da massa em sinterização. Nesta fase não ocorre a diminuição dos poros do compactado (CHIAVERINI 2001).

(c) Fechamento dos canais de ligação entre os poros: esta fase sim apresenta grande mudança na massa sinterizada, há a formação de poros isolados. Uma das causas que levam ao fechamento dos poros ou ao seu

isolamento é o crescimento dos pescoços. O fechamento de poros não é algo que ocorre somente nesta fase, esse fenômeno pode continuar ocorrendo sobreposta a outras fases da sinterização (CHIAVERINI 2001).

(d) Arredondamento dos poros: está diretamente ligado ao crescimento dos pescoços e a elevadas temperaturas de sinterização, esta fase é extremamente importante, pois a porosidade tem influência direta nas propriedades mecânicas do material acabado (CHIAVERINI 2001).

(e) Contração dos poros: esta fase só fica evidenciada com o aumento da densidade da massa sinterizada. A contração dos poros leva a uma diminuição do volume da peça que está sendo sinterizada, este processo envolve o movimento dos componentes sólidos da massa sinterizada, assim como os gases que são expulsos da massa sinterizada devido a contração dos poros (CHIAVERINI 2001).

(f) Crescimento eventual dos poros: essa fase tem ligações com a anterior de contração dos poros, pois com a contração dos poros menores ocorre o seu desaparecimento, com isso restam somente os poros maiores. Contudo, não se pode associar qualquer densificação do material com essa fase da sinterização (CHIAVERINI 2001).

2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Um dos processos de análise dos corpos de provas que foram desenvolvidos é a caracterização por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos dos mesmos. Dentro do processo de caracterização foram realizados os seguintes ensaios do material: ensaio de flexão, densidade, porosidade imagem e dureza LRT, os quais serão descritos mais profundamente. (DEDAVID, 2007) (DUARTE, 2003).

2.3.1 Densidade

A densidade de ligas e metais que passam pelo processo de sinterização dificilmente têm a mesma densidade dos materiais que não sofreram esse processo. Isso ocorre porque os materiais sinterizados apresentam grande porosidade

intrínseca, a qual em determinados casos é uma característica desejável para o material (CHIAVERINI, 2001). Portanto, a densidade é uma característica muito importante em materiais sinterizados, de modo que a sua determinação se faz uma das coisas mais importantes para o processo de fabricação de produtos que tenham metal sinterizado.

2.3.2 Porosidade

A porosidade em materiais sinterizados afetam a sua densidade aparente assim como a sua compressibilidade e a porosidade da peça acabada. Há a necessidade de se distinguir dois tipos de porosidade: porosidade do tipo esponjosa, está caracterizada pela presença de poros que não estão interligados, e a porosidade na qual ocorre essas ligações. Neste segundo caso deve-se prestar atenção em poros que estão ligados na superfície do material, este acontecimento está relacionado com o aumento da superfície aparente do material, além de facilitar a adsorção de gases durante seu processamento (CHIAVERINI, 2001).

2.3.3 Imagem

A caracterização por imagem tem a finalidade de através da observação das amostras, utilizando-se da macrografia e da micrografia, verificar o comportamento das partículas após a sinterização. Observar como foram efetuados as ligações entre elas e o aparecimento de novos contornos de grãos, estes provenientes do processo de difusão pelo qual o material passa durante o processo de sinterização. Sendo assim, tanto a macrografia quanto a micrografia vão ser esmiuçadas com maior clareza a seguir.

2.3.3.1 Macrografia

O ensaio macro gráfico consiste na observação a olho nu ou com uma ampliação de no máximo de 10 vezes, de uma superfície plana preparada através de um lixamento e ataque químico. Um reagente é aplicado na superfície do corpo de prova com o objetivo de ajudar a ressaltar detalhes da estrutura do material (INFOSOLDA, 2016).

O termo macrografia além de ser usado para definir o tipo de ensaio, também pode ser usado para descrever impressões e fotografias retiradas dos corpos de ensaio (INFOSOLDA, 2016).

O processo de macrografia é um ensaio aplicado como método de verificação do processo produtivo pelo qual o produto passou, sendo ele laminação, forjamento, sinterização e fundição. Este ensaio permite identificar homogeneidades e heterogeneidades presentes no material e constatar a existência de descontinuidades presentes, como porosidade e segregações (INFOSOLDA, 2016).

2.3.3.2 Micrografia

Ensaio de micrografia é realizado com ajuda de microscópios, e consiste no estudo de produtos metalúrgicos, onde se pode observar as fases presentes no material, a granulação do material, o teor aproximado de carbono presente no aço e a distribuição dos demais constituintes ou de inclusões.

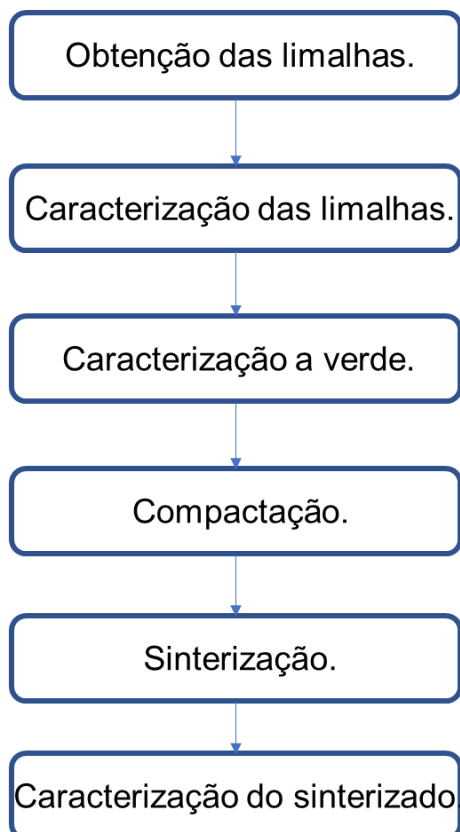
O corpo de prova que será utilizado nesse ensaio dependendo de suas dimensões podem ou não ser embutidos. No caso de amostras muito pequenas recomenda-se o embutimento para facilitar o manuseio do corpo de prova, podendo ser este realizado a frio ou a quente.

Através de um microscópio são retiradas fotografias do corpo de prova, estas são armazenadas em um computador para posterior análise.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do trabalho em questão pode ser visualizada de maneira resumida na figura 5.

Figura 5 - Fluxograma simplificado do processo.



Fonte - Autoria Própria.

Ressalta-se a opção de desmembrar a metodologia em passo para tornar o entendimento de todo o processo mais compreensível para aqueles que não tenham tanto contato com laboratórios.

Primeiro passo: Os cavacos foram coletados no Laboratório de Usinagem do DAMEC da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Nesta etapa alguns cuidados foram tomados, como a secagem dos cavacos, tendo em vista a utilização de fluidos de corte no processo de usinagem e corte de materiais, os quais são a base de água, a secagem se torna importante para evitar a oxidação dos cavacos, pois o material oxidado compromete a qualidade das limalhas. As limalhas coletadas e que foram utilizadas para a obtenção dos resultados desse trabalho são de uma

pluralidade de materiais, não sendo possível a olho nu determinar com exatidão os materiais que formam a composição total das limalhas.

Segundo passo: O processo de caracterização do pó foi feito em três etapas distintas:

1. Caracterização por peneiramento,
2. Caracterização com o auxílio do microscópio ótico para determinar o tamanho das partículas,
3. Caracterização das limalhas quanto a sua forma.

Ao final da caracterização das partículas será avaliado a sua qualidade e determinada o passo a passo para as próximas etapas.

Terceiro passo: Etapa na qual o material foi compactado. Nesta etapa a compactação foi feita com uma única pressão de 5 toneladas, localizada no Laboratório de Ensaio Destrutivos e não Destrutivos na Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Quarto passo: etapa de caracterização a verde do material, etapa posterior a da compactação onde foi estudado o comportamento do material já compactado, mas sem ter sido sinterizado. Passo importante onde pode se observar se o pó tem características de se manter com suas dimensões de compactação antes de ser sinterizado. As amostras a verde foram pesadas e medidas no que diz respeito ao seu diâmetro e espessura.

Quinto passo: Sinterização, parte crucial no processo de metalurgia do pó, sendo a temperatura do forno e o ambiente interno deste muito importante, entretanto a temperatura de sinterização só pode ser definida depois do processo de caracterização do pó e compactação, ficando assim difícil de definir neste momento uma temperatura para esta etapa. Esta etapa foi feita usando o forno com atmosfera controlada do laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Sexto passo: caracterização final do metal. Neste passo foi realizadas caracterizações do material após a sua sinterização.

3.1 OBTENÇÃO DA LIMALHA

A limalha foi coletada no Laboratório de Usinagem no bloco K da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa onde ficam armazenados para o seu descarte.

Na etapa de obtenção da limalha também foi realizado uma secagem da mesma devido a sua contaminação por fluido de corte. A secagem se deu utilizando papel toalha para a absorção do excesso do fluido de corte e a sua exposição ao sol.

As limalhas antes de serem compactadas podem ser observadas na figura 6.

Figura 6 - Limalhas coletadas no Laboratório de Usinagem, DAMEC Universidade Tecnológica Federal do Paraná.



Fonte Autoria Própria

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS LIMALHAS

A etapa de peneiramento se deu utilizando-se da mesa vibratória, localizada no Laboratório de Ensaio Destrutivos e não Destrutivos. A etapa de microscopia foi feita utilizando-se do microscópio óptico modelo Olympus BX 60, figura 7, localizado no Laboratório de Preparação Metalográfica, DAMEC na Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Figura 7 - Ilustração do microscópio óptico Olympus BX 60.



Fonte - Autoria Própria.

3.2.1 Metodologia do Peneiramento

Antes de se iniciar o processo de peneiramento, a limalha foi pesada, utilizando uma balança digital, a mesma encontra-se no Laboratório de Ensaio destrutivos e Não Destrutivos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O processo de peneiramento foi feito utilizando as peneiras relacionadas no quadro 3.

Quadro 3 - Peneiras utilizadas no procedimento de peneiramento das limalhas.

Peneira (ABNT)	Abertura da Malha (mm)
4	4,700
80	0,180
100	0,150
120	0,125
FUNDO	0,000

Fonte - Autoria Própria.

O peneiramento foi feito durante uma hora, em mesa vibratória.

3.2.2 Metodologia da Microscopia Ótica

Para a classificação do material por microscopia foram tiradas cerca de 60 fotos de 6 amostras distintas, tendo uma aplicação de 10 vezes. Foi utilizada a ampliação mínima, de 50 vezes, do microscópio. A ampliação mínima se deve ao fato das partículas apresentarem um tamanho superior aos encontrados em pós convencionais.

Devido à alta aglomeração do material foi necessária a preparação em uma lâmina de vidro para que se pudesse desaglomerar e tirar fotos mais nítidas das partículas.

Posterior a retirada das fotos, essas foram submetidas ao software ImageJ, para que fosse possível a determinação das dimensões das partículas.

3.3 COMPACTAÇÃO

A etapa de compactação foi feita usando a prensa hidráulica manual com capacidade máxima de compressão de 30 toneladas, SERVITECH, ilustrada na figura 8, localizado no Laboratório de Ensaio Destrutivos e não Destrutivos do DAMEC. A carga de compactação utilizada foi de 5 toneladas para todas as amostras.

Figura 8 - Prensa manual SERVITECH com capacidade máxima de 30 toneladas.



Fonte - Autoria Própria.

A matriz utilizada na compactação tem formato cilíndrico como pode ser visualizado nas figuras 9 e 10.

Figura 9 - Matriz utilizada no processo de compactação.



Fonte - Autoria Própria.

Figura 10 - Vista superior da matriz usada para compactação dos corpos de prova.



Fonte - Autoria Propria.

3.4 CARACTERIZAÇÃO A VERDE

A caracterização a verde dos corpos de prova foi feita depois das mesmas passarem pela compactação, com o objetivo de ver a recuperação elásticas das mesmas. Foi utilizado um paquímetro para mensurar o diâmetro e espessura das amostras, e uma balança de precisão modelo Shinadzu AUX220 com capacidade máxima de 220 gramas, capacidade mínima de 10 gramas erro de um grama e

desvio padrão de 0,1 grama., localizada no Laboratório de Preparação Metalográfica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, mostrada na figura 11.

Figura 11 – Balança Shinadzu AUX220.



Fonte - Aatoria Própria.

A mesma balança usada para a caracterização a verde das amostras depois da compactação, foi usada para a pesagem das amostras depois que passaram pelo processo de sinterização.

3.5 SINTERIZAÇÃO

O processo de sinterização da limalha proveniente da serra se deu por meio da utilização do forno de atmosfera controlada FT 1200 (Fornos INTI), localizado no Laboratório de Preparação Metalográfica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O gás usado no controle da atmosfera foi o argônio mais hidrogênio Ar / H₂ 95/5, e tem teve como função a proteção das amostras para que as mesmas não sofressem oxidação durante o processo. O forno utiliza-se de um filtro de água para que o fluxo de gás seja filtrado e resfriado antes que o mesmo seja liberado para atmosfera, como pode ser visto na figura 12.

Figura 12 - Forno utilizado no processo de sinterização, modelo FT 1200, marca INTI



Fonte - Autoria Própria.

Foram realizados quatro processos de sinterização neste trabalho, todos serão descritos a seguir.

Para título de maior compreensão e efeitos de estudos posteriores que possam a vir a ser utilizado este mesmo modelo de forno com atmosfera controlada FT 1200 (Fornos INTI), fica descrita sua maneira de utilização para a sinterização de matérias que necessitem de atmosfera controlada:

1. Liga-se o forno da tomada;
2. Liga-se os dois disjuntores que se localizam na parte de traz do mesmo;
3. Liga-se o forno no botão vermelho circular, localizado na parte inferior da inscrição "LIGA";
4. Inicia-se a configuração do forno pelo botão função:
 - a. Primeira função configurada é a de temperatura máxima, que variou conforme o processo de sinterização abortado no trabalho;
 - b. A segunda função configurada foi a rampa de aquecimento, esta usada a padrão do forno de 20 °Cpor minuto;

- c. A terceira função é a de ajuste do tempo que ocorrerá a sinterização, neste trabalho foi padronizado em sessenta minutos.
5. Liga-se o cilindro de gás durante dez minutos para que ocorra a limpeza da atmosfera dentro do forno, neste passo há a necessidade de se ajustar o fluxo de gás, para que o mesmo não entre em excesso dentro do tubo do forno;
 6. Depois da limpeza da atmosfera liga-se a resistência através do botão verde quadrado;
 7. Aperta o botão S/S para que a contagem da temperatura se inicie, essa contagem é importante para que o forno esquite até a temperatura desejada para o trabalho;
 8. Quando a sinterização termina, o visor verde que mostra a temperatura mostra "PRO", então desliga-se a resistência, por final espera o forno esfriar;
 9. Quando o forno chega a 400 °C, o mesmo pode ser aberto, sem que aja problemas de trincas na cerâmica de isolamento, a abertura do forno serve para seu resfriamento mais acelerado;
 10. Retira-se as amostras do forno quando a temperatura estiver próxima da temperatura ambiente;
 11. O procedimento de desligamento do forno se dá pelo mesmo botão onde o mesmo foi ligado, há a necessidade de se desligar os dois disjuntores que encontram-se na parte de trás do forno e a retirada do mesmo da tomada, por motivos de segurança.

Na figura 13 demonstra as ligações entre o forno e o cilindro de gás que fornece a atmosfera para o forno durante o processo de sinterização.

Figura 13 - Ilustração do sistema de ligação do cilindro de gás que fornece a atmosfera para o forno.



Fonte 1 - Autoria Própria.

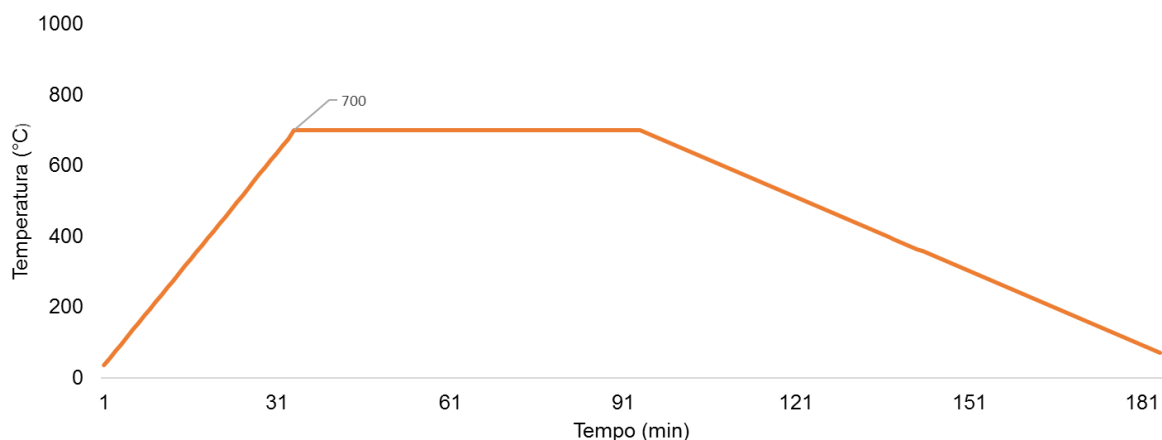
3.5.1 Primeiro Processo de Sinterização

O primeiro processo de sinterização utilizou-se dos seguintes parâmetros:

- Temperatura máxima de 700 °C;
- Rampa de aquecimento do forno de 20 °C por minuto;
- Tempo até o aquecimento de máximo de 35 minutos;
- Tempo de sinterização de 60 minutos.

Na figura 14 pode ser visto o gráfico de aquecimento do forno, demonstrando a rampa de aquecimento, o período de sinterização e seu respectivo resfriamento.

Figura 14 - Primeiro processo de sinterização.



Fonte - Autoria Própria.

3.5.2 Segundo Processo de Sinterização

O segundo processo de sinterização foi feito repetido os parâmetros da primeira, com o objetivo de verificar se a água teve alguma influência no aumento das dimensões dos corpos de prova, como ocorrido no processo de sinterização anterior. O aquecimento pode ser visto na figura 14.

Os parâmetros usados foram os seguintes:

- Temperatura máxima de 700 °C;
- Rampa de aquecimento do forno de 20 °C;
- Tempo até o aquecimento de máximo de 35 minutos;
- Tempo de sinterização de 60 minutos.

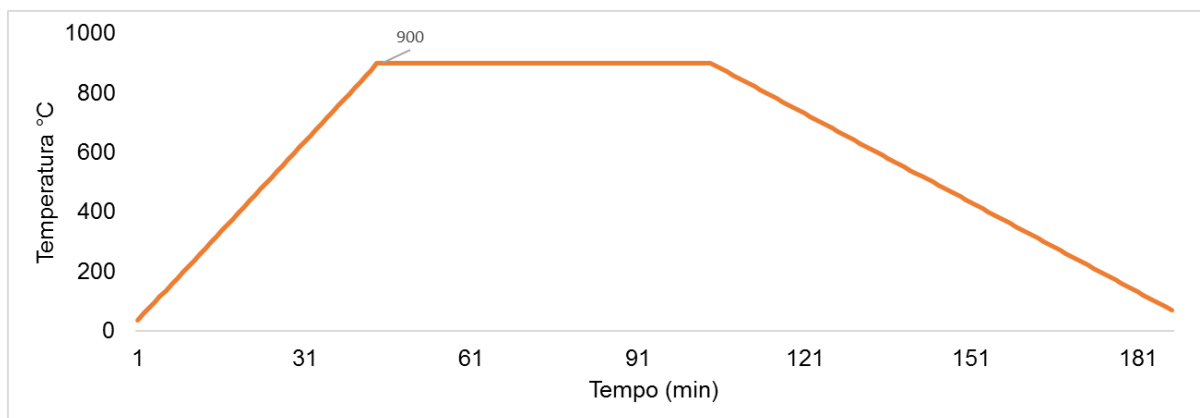
3.5.3 Terceiro Processo de Sinterização

O terceiro processo de sinterização foi realizado levando em conta os seguintes parâmetros:

- Temperatura máxima de 900 °C;
- Rampa de aquecimento de 20 °C;
- Tempo até o aquecimento máximo de 45 minutos;
- Tempo de sinterização de 60 minutos.

A rampa de aquecimento, o processo de sinterização e o respectivo processo de resfriamento estão expostos na figura 15.

Figura 15 - Processo de aquecimento do terceiro processo de sinterização.



Fonte - Autoria Própria.

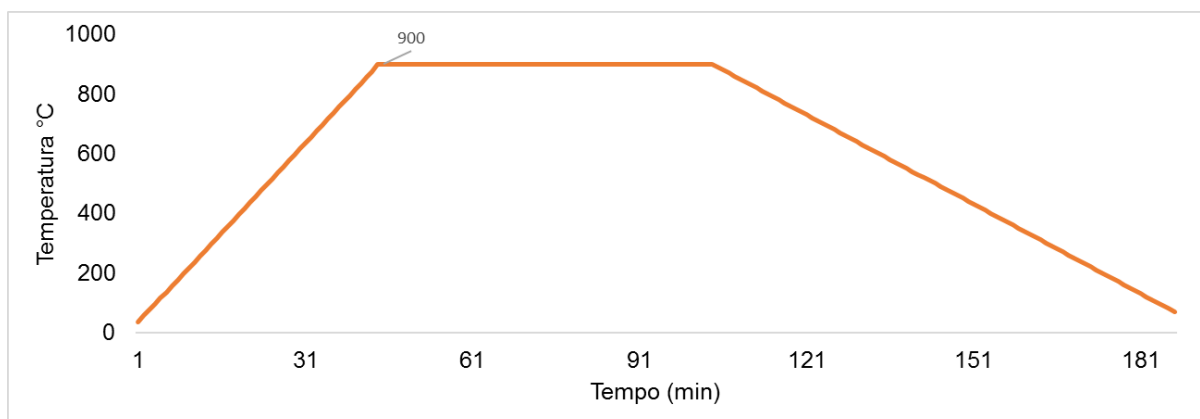
3.5.4 Quarto Processo de Sinterização

A sinterização se seguiu utilizando-se dos seguintes parâmetros:

- Temperatura máxima de 900 °C;
- Rampa de aquecimento de 20 °C;
- Tempo até o aquecimento máximo de 45 minutos;
- Tempo de sinterização de 60 minutos.

Na figura 16 estão exemplificados a rampa de aquecimento, o processo de sinterização e o resfriamento que se seguiu.

Figura 16 - Processo de aquecimento do quarto processo de sinterização.



Fonte - Autoria Própria.

3.6 LAVAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Notou-se após o primeiro processo de sinterização a formação de uma espessa camada de uma substância enegrecida, essa se assemelhava-se com fuligem. Devido ao aparecimento da fuligem ficou decidido que as amostras ainda não sinterizadas deviam ser lavadas, seguindo o seguinte processo:

A lavagem das amostras já compactadas foi feita submergindo os corpos de prova em água com detergente por uma hora, posterior a esse processo foram submersos em acetona por 20 minutos e colocados numa estufa a 200 °C para que o restante da água evaporasse e os corpos de prova não sofressem nenhum tipo de oxidação.

Posterior a esse processo de lavagem se deu a sinterização de mais 20 amostras, processos os quais foram descritos anteriormente sendo o segundo processo de sinterização item 3.5.2 o terceiro processo de sinterização, item 3.5.3.

3.7 LAVAGEM DAS LIMALHAS

A partir dos três primeiros resultados de sinterização ficou evidente que a contaminação pelo fluido de corte era algo que influenciava diretamente a sinterização e união das partículas metálicas, e que o primeiro processo de lavagem com as limalhas já compactadas foi ineficiente para retirar toda a contaminação. Sendo assim, ficou decidido a necessidade de se descontaminar as limalhas antes do processo de compactação, processo este descrito a seguir.

O processo de lavagem das limalhas se deu por meio de imersão das mesmas em uma solução formada com água e detergente, com trocas sucessivas da solução. Foram realizadas ao todo 15 lavagens, onde as partículas eram agitadas para que os contaminantes ficassem em suspensão, nesse momento a solução de água mais detergente era descartada.

Posterior a lavagem com água mais detergente, as limalhas ficaram submersas em acetona durante vinte minutos para que fosse retirado o excesso de umidade e evitando assim a oxidação.

Depois de passarem pela imersão em acetona, as limalhas foram secas usando um secador, até que não apresentassem mais umidade. Essas amostras passaram pelos mesmos processos que as limalhas que não passaram pelo processo de lavagem antes de serem compactadas.

3.8 CARACTERIZAÇÃO FINAL

A caracterização final das amostras foi feita depois do processo de sinterização, e foram usadas as seguintes metodologias.

1. Medição do diâmetro e espessura das amostras,
2. Pesagem das amostras depois de sinterizadas,
3. Análise de imagem feita com ajuda de uma lupa do Laboratório de Usinagem do DAMEC da Universidade Tecnológica Federal do Paraná

4.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão expostos os resultados dos procedimentos experimentais, assim como as discussões necessária para se entender os fatos ocorridos durante todo o experimento.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS LIMALHAS

Nos próximos itens serão discutidos os resultados da etapa de caracterização das limalhas, que foram realizados através de peneiramento e microscopia. E ainda se utilizando dos resultados da microscopia pode se definir a forma das partículas que fazem parte da limalha que foi utilizada nesse trabalho.

4.1.1 Caracterização por Peneiramento

Ao término do peneiramento verificou-se que as partículas não haviam passado pela primeira malha, que tem abertura de 0,125 mm. Sendo assim, chega-se à conclusão que as partículas têm tamanho superior a abertura da malha da peneira de #120 mesh. Para se tirar a prova dos tamanhos da partícula, ficou decidido realizar um segundo peneiramento, alterando as peneiras, e por consequência a abertura das mesmas.

Após o segundo peneiramento verificou-se que as partículas tinham somente passado pela peneira de #4 mesh, ficando em sua totalidade retidas na peneira de #80 mesh. Portanto chega-se à conclusão que as partículas têm um tamanho que nos impossibilita de classifica-las utilizando-se do processo de peneiramento. Optando-se pela classificação de partículas por microscopia, descrito na sequência.

4.1.2 Classificação por Microscopia

Durante o processo de preparo de amostras que serviriam para as fotos, o material se mostrou aglomerado, trazendo dificuldades para separa-lo e confeccionar boas imagens para o trabalho em questão. O material estava aglomerado de certa forma, que ao colocá-lo na placa, não era possível separa-lo,

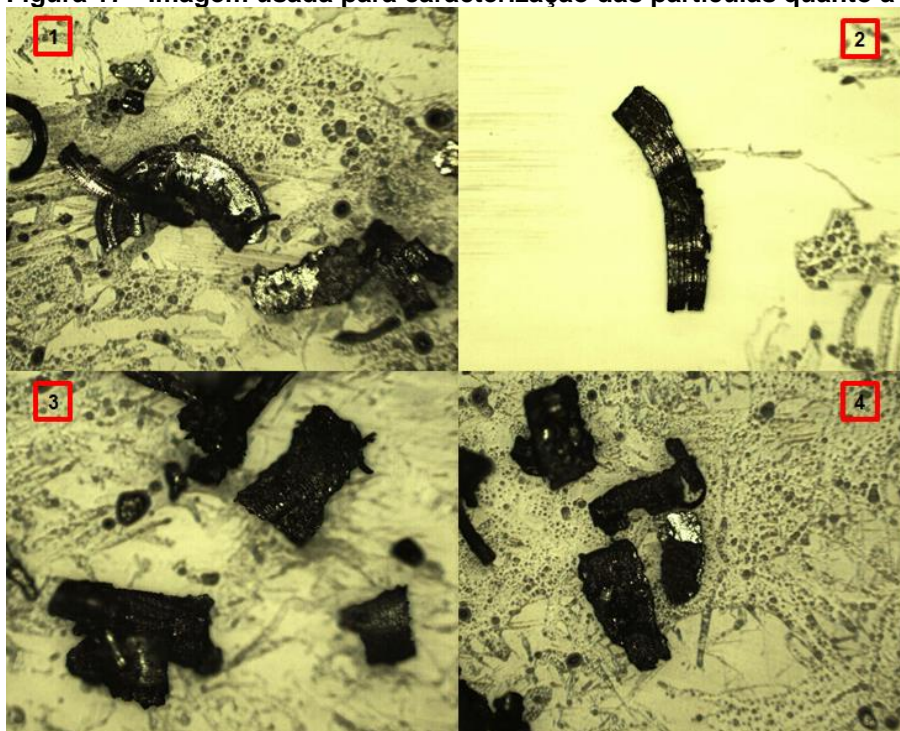
levando a se questionar se o material não poderia estar magnetizado devido ao processo de corte, pelo que o mesmo havia passado.

Usando uma lâmina de vidro foi possível diminuir a aglomeração das partículas em questão, facilitando assim a obtenção de imagens, essas imagens foram fundamentais para verificar a forma das partículas e assim definir a característica predominante das mesmas, fato que será discutido a seguir.

4.1.3 Classificação Quanto à Forma das Partículas

A Figura 17 ilustra 4 das 60 fotos retiradas para o trabalho e a partir delas pode ser constatar algumas características que se repetem em todas as fotos retiradas. A partir dessa foto pode se classificar como sendo dois tipos de cavacos diferentes. O primeiro sendo o cavaco formado pelo cisalhamento do material durante o processo de corte, onde pode ser observado as lamelas justapostas bem definidas, como em (1) e (2). O segundo caso, pode ser definido como sendo cavacos de ruptura, onde pode se ver que os cavacos foram arrancados do material que estava sendo serrado, essa característica pode ser vista em (3) e (4).

Figura 17 - Imagem usada para caracterização das partículas quanto a sua forma.

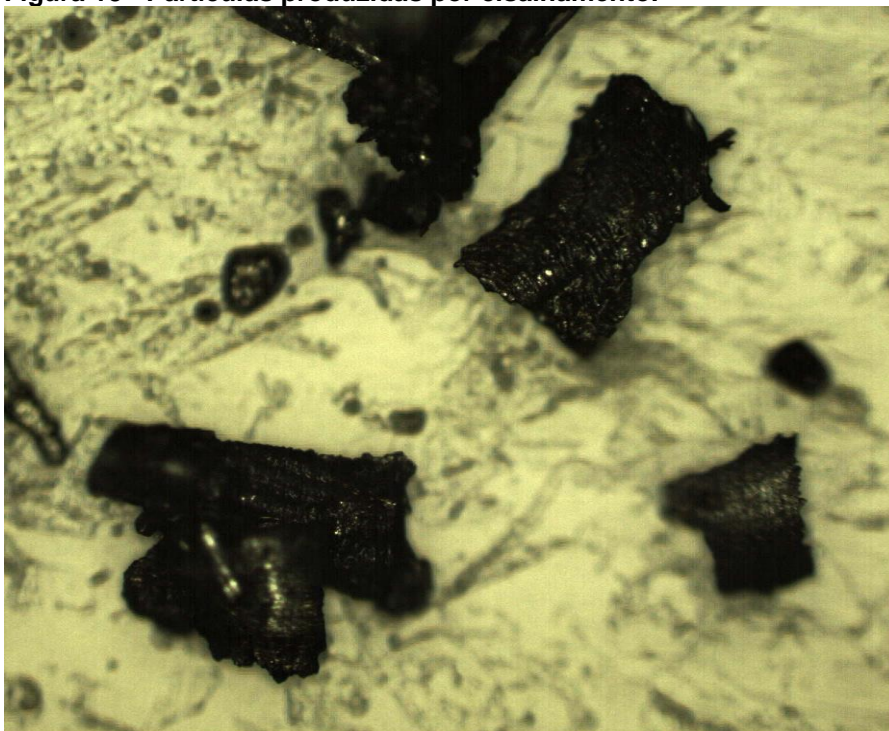


Fonte - Autoria Própria.

Nas figuras 17 e 18, observa-se no fundo da imagem pequenos pontos escuros e alguns borrões, estes não são partículas de metais com tamanhos inferiores aqueles evidenciados em primeiro plano, mas sim, fluido de corte que contamina o material estudado. Observa-se por essas imagens que o fluido de corte tem uma presença expressiva nas imagens, demonstrando assim o grau de contaminação das partículas.

Na Figura 18, pode-se observar com maior clareza a justaposição das lamelas do material, as quais foram determinantes para a classificação como sendo um cavaco formado por cisalhamento.

Figura 18 - Partículas produzidas por cisalhamento.

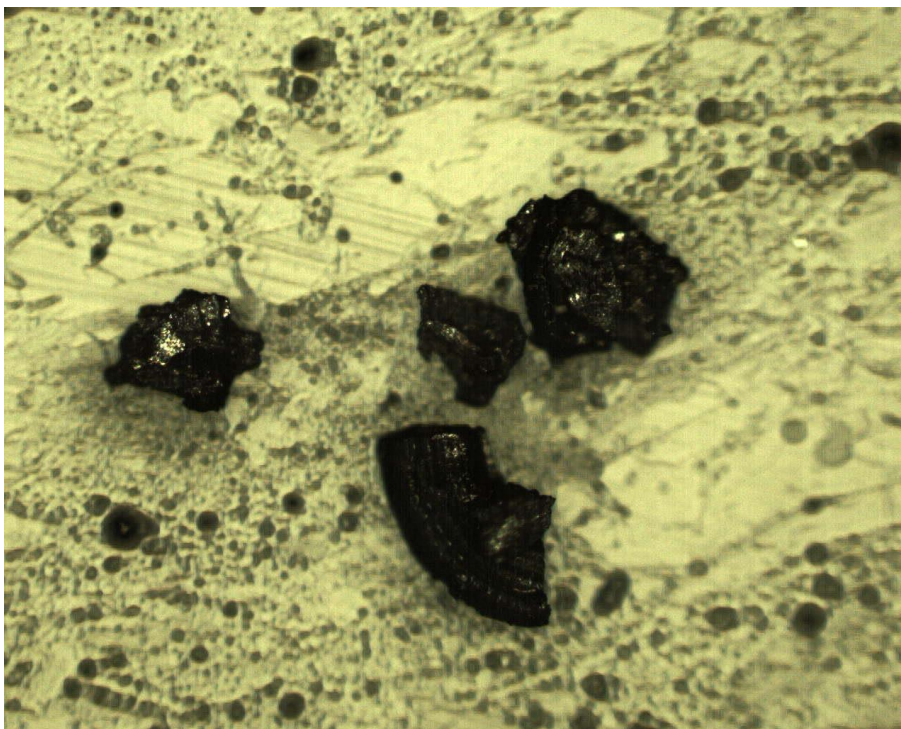


Fonte - Autoria Própria.

Na figura 18 pode ser notado com maior nitidez que os cavacos foram arrancados da peça durante seu processo de corte, essa conclusão pode ser tomada a partir do formato que os mesmos tomaram, com suas extremidades e laterais irregulares e deformadas.

Pelas figuras 18 e 19 pode-se observar também que não existe porosidade nas partículas que fazem parte desse estudo, pois não há evidências de poros em meio a partícula, isso se deve ao método pelo qual elas foram obtidas, de maneira mecânica, no qual o corte do material é realizado.

Figura 19 - Partículas que mostram características de formas arrancadas, produzidas pelo processo de corte.

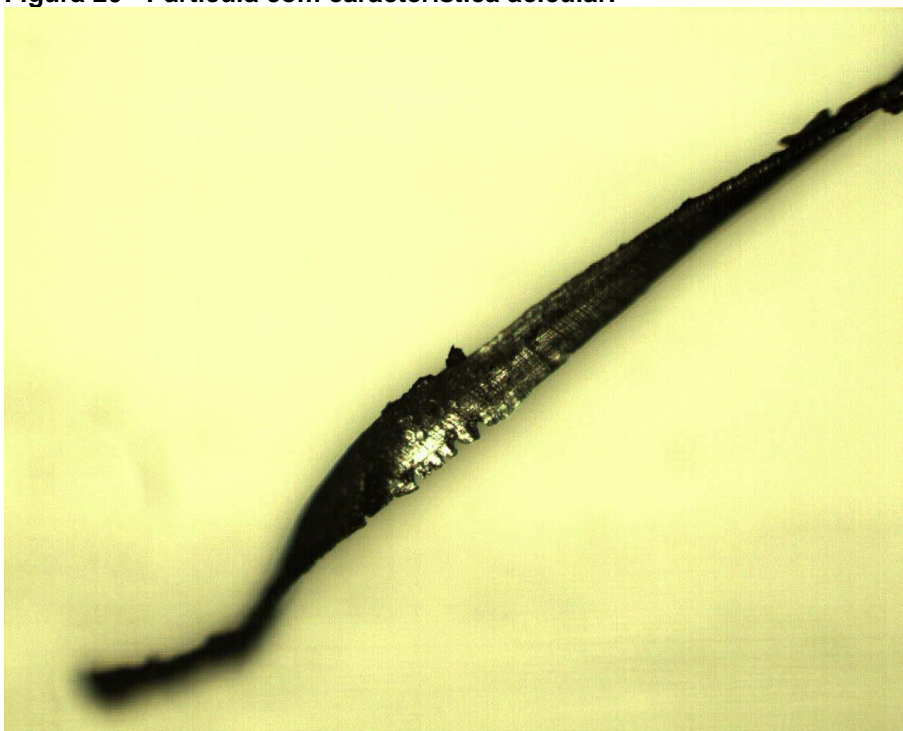


Fonte - Autoria Própria.

Existem 9 tipos de partículas a serem consideradas na metalurgia do pó, dentre essas nove a que melhor se encaixa nessa situação é a acicular, a qual é proveniente por desintegração mecânica no material, pois durante o processo de corte do mesmo, há uma desintegração parcial do material no local que está sendo efetuado o corte. Isso deixa o material com extremidades irregulares e arredondadas características principais para se chegar à conclusão de que a partícula pode ser denominada como sendo acicular.

Entretanto, há a necessidade de se salientar que dentre as partículas estudadas pode-se observar que há também formatos de que lembram as classificações acicular como pode ser observado na figura 20.

Figura 20 - Partícula com característica acicular.



Fonte - Autoria Própria.

Conclui-se então que o processo de corte por serra, faz com que surjam diversas formas de partículas, levando-se a conclusão de que o material é extremamente irregular. Essa irregularidade pode estar associada com sua alta capacidade de aglomerar-se. Essa boa capacidade de se aglomerar pode ser levada em conta no momento de sua compactação, levando talvez a um material com menor quantidade de poros depois da sua compactação.

Por outro lado, uma das suas principais características citadas anteriormente, que são suas bordas irregulares, pode levar a problemas no momento da compactação, levando a crer que o material possa ficar preso no molde depois de compactado. Com isso conclui-se que haverá a necessidade de se utilizar lubrificante em quantidades superiores quando comparado a pós de provenientes de decomposição química, atomização e moagem.

4.2 DEFINIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS

Os tamanhos de partícula foram definidos usando o software ImageJ. Devido ao fato dessas partículas terem uma grande facilidade de se aglomerar, muito

provavelmente devido ao fato de terem formatos muito irregulares e terem um tamanho superior ao normal tratado na metalurgia do pó.

Ainda devido a sua característica de se aglomerarem facilmente, houve a necessidade de se retirar diversas fotos, muitas dessas fotos não foram passíveis de serem utilizadas para a caracterização do tamanho das partículas. Pois quando as mesmas eram submetidas ao software, o mesmo não conseguia distinguir as partículas do fundo da imagem. Ao mesmo tempo, imagens de partículas que se encontravam muito próximas ou até mesmo muito aglomeradas, o programa entendia que se tratava de uma única partícula, não sendo possível traçar o tamanho das mesmas.

Sendo assim, foi possível utilizar somente imagens que tinham poucas partículas, e que essas estivessem com uma distância suficiente para que o software entendesse que eram partículas individuais e não somente uma

Os dados dimensionais das partículas estão na tabela 4:

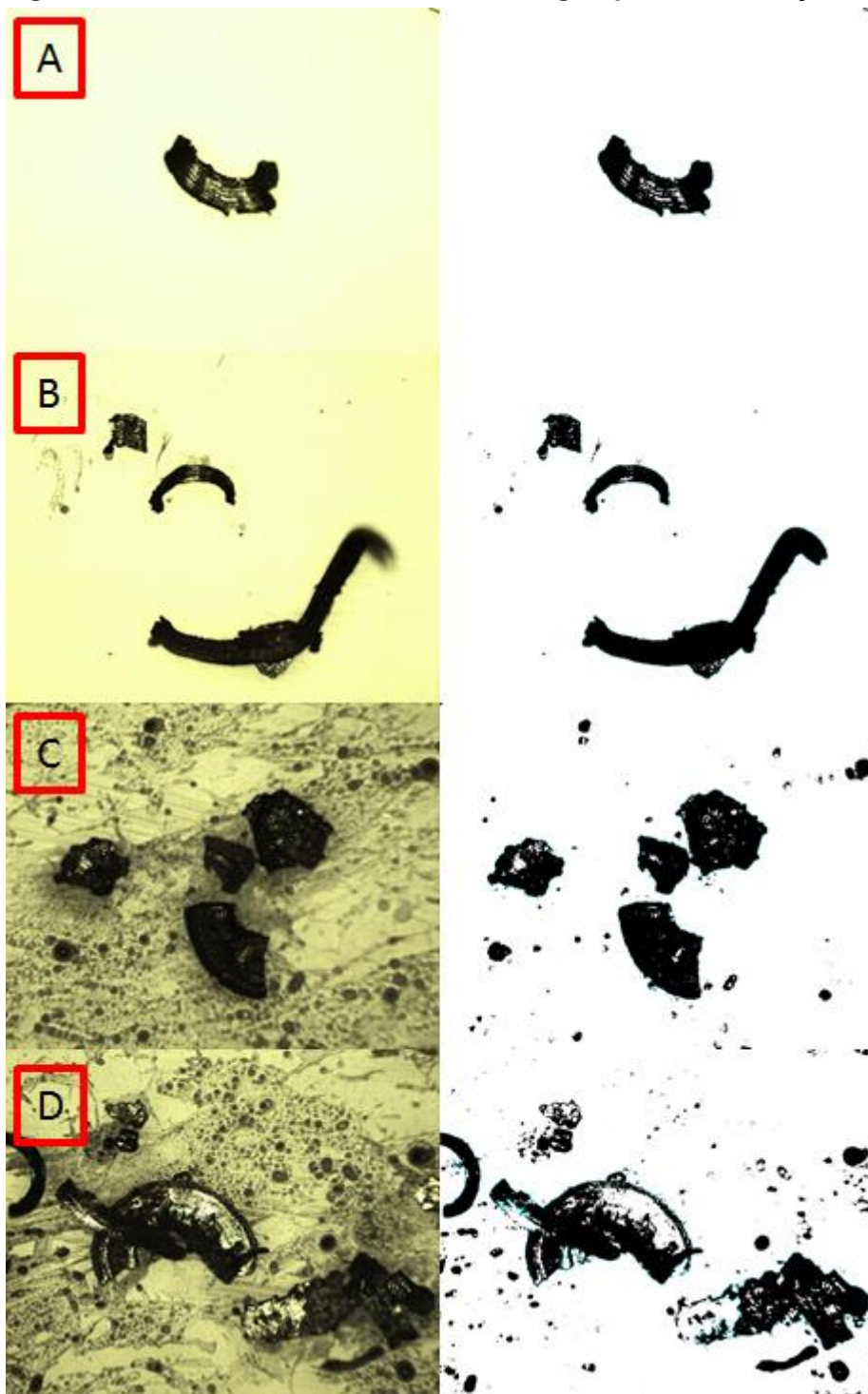
Tabela 1 - Dados dimensionais das partículas analisadas utilizando o ImageJ.

		Área (mm)	Perímetro (mm)
A	1	7,028	17,920
B	2	2,789	8,974
	3	5,385	12,827
	4	1,530	9,973
	5	12,134	37,777
C	6	7,920	31,361
	7	1,220	6,010
	8	1,556	8,709
D	9	8,285	25,351
	10	8,657	10,984
	Media	5,650	16,989
	Desvio Padrão	3,819	11,321

Fonte 2 - Autoria Própria.

As partículas usadas no software para chegar ao resultado da tabela 4 podem ser vistas na figura

Figura 21 - Partículas usadas no software ImageJ, para determinação do perímetro e área.



Fonte - Autoria Própria.

Pode ser observado que a limalha proveniente da serra tem é dimensionalmente maior do que quando comparado a partículas usadas tradicionalmente na metalurgia do pó.

Partículas comumente usadas na metalurgia do pó tem seu tamanho expressa em micron, enquanto as partículas que foram usadas nesse processo têm como o milímetro como tamanho médio.

Para se ter uma melhor noção de quão grande são as partículas usadas nesse procedimento tem as seguintes médias:

- Área média das partículas: 5,650 mm²;
- Perímetro médio das partículas: 16,989 mm.

4.3. COMPACTAÇÃO DAS PARTÍCULAS

Devido ao excesso de fluido de corte não houve mais a necessidade de se utilizar o lubrificante para a compactação do material. Na figura 22 também pode ser visto um dos corpos de prova ainda dentro na matriz, notando-se também a grande quantidade de fluido que se despreendeu do mesmo devido à compactação.

Figura 22 – Aparecimento de fluido de corte no momento da compactação.



Fonte - Autoria Própria.

O resultado das limalhas de serra compactada pode ser visto na figura 23.

Figura 23 - Amostras após processo de compactação.



Fonte - Aatoria Própria.

Todas as amostras foram confeccionadas tomando o peso de 6 gramas como sendo padrão, para que as amostras se tornassem padronizadas.

Houve a confecção de trinta amostras com limalhas que não haviam passado por nenhum processo de lavagem, as limalhas somente foram secadas ao ambiente e com ajuda de papel toalha para a retirada do excesso de fluido de corte. Posteriormente foram confeccionadas mais 10 amostras com as limalhas que passaram pelo processo de lavagem.

4.4 CARACTERIZAÇÃO A VERDE DOS CORPOS DE PROVA.

Verificou-se que ao retirar o material prensado da matriz, este não perdeu a sua forma já definida; entretanto as amostras se mostraram muito frágeis a ponto de ser possível quebra-las com as mãos. As amostras não lavadas apresentavam uma quantidade muito grande de fluido de corte, o que colaborou para a retiradas das amostras da matriz sem maiores problemas.

Os resultados dimensionais e de massa das dez amostras feitas com limalhas lavadas estão expostas na tabela 5.

Tabela 2 - Informações dimensionais e de massa das amostras feitas com limalhas lavadas.

Amostras	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Volume (mm ³)	Massa (g)	Densidade (g/cm ³)
1	20,55	4,40	1458,6328	5,7782	0,39610
2	20,50	4,40	1451,5435	5,1619	0,35560
3	20,80	4,50	1528,3008	5,8449	0,38240
4	20,50	4,60	1517,5228	5,9409	0,39150
5	20,70	4,70	1580,9139	6,2232	0,39360
6	20,50	4,70	1550,5124	6,0476	0,39000
7	20,60	4,80	1598,9885	5,9590	0,37270
8	20,50	4,65	1534,0176	5,2404	0,34160
9	20,55	4,60	1524,9343	5,9549	0,39050
10	20,50	4,00	1319,5850	5,1459	0,39000
Media	20,570	4,535	1506,4952	5,7297	0,38040
Desvio Padrão	0,103	0,229	80,257	0,396	0,0183

Fonte 3 - Autoria Própria.

Na tabela 5 estão expostos os resultados dimensionais das trinta amostras que não passaram por processo de lavagem.

Tabela 3 - Dados dimensionais e massa dos corpos de prova confeccionados com limalhas que não passaram por tratamento.

Amostras	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Volume (mm ³)	Massa (g)	Densidade (g/cm ³)
1	20,44	6,10	2000,60	6,6854	0,334
2	20,50	5,90	1946,39	5,8429	0,300
3	20,50	6,60	2177,32	5,8762	0,270
4	20,50	6,15	2028,86	5,6854	0,280
5	20,50	6,40	2111,34	5,6858	0,269
6	20,50	5,80	1913,40	5,5354	0,289
7	20,50	6,10	2012,37	5,5738	0,277
8	20,50	6,45	2127,83	5,1951	0,244
9	20,50	6,30	2078,35	5,6574	0,272
10	20,50	5,20	1715,46	4,9153	0,287
11	20,50	6,30	2078,35	5,8280	0,280
12	20,50	6,10	2012,37	5,6834	0,282
13	20,50	6,30	2078,35	5,7999	0,279
14	20,50	6,30	2078,35	5,5408	0,267
15	20,50	6,40	2111,34	5,7717	0,273
16	20,50	5,90	1946,39	4,8779	0,251
17	20,50	4,90	1616,49	4,5759	0,283
18	20,50	5,90	1946,39	5,4017	0,278
19	20,50	6,30	2078,35	5,7709	0,278
20	20,50	6,80	2243,29	6,2398	0,278
21	20,50	6,20	2045,36	5,7752	0,282

Continuação tabela 6.

22	20,50	5,10	1682,47	4,8714	0,290
23	20,50	5,80	1913,40	5,4085	0,283
24	20,50	5,60	1847,42	5,3940	0,292
25	20,50	6,20	2045,36	5,6388	0,276
26	20,50	5,65	1863,91	5,3133	0,285
27	20,50	6,40	2111,34	5,8603	0,278
28	20,50	6,10	2012,37	5,4172	0,269
29	20,50	6,10	2012,37	5,6823	0,282
30	20,50	6,10	2012,37	5,8292	0,290
Media	20,50	6,05	1994,93	5,5778	0,280
Desvio Padrão	0,01	0,43	140,70	0,4160	0,015

Fonte - Autoria Própria.

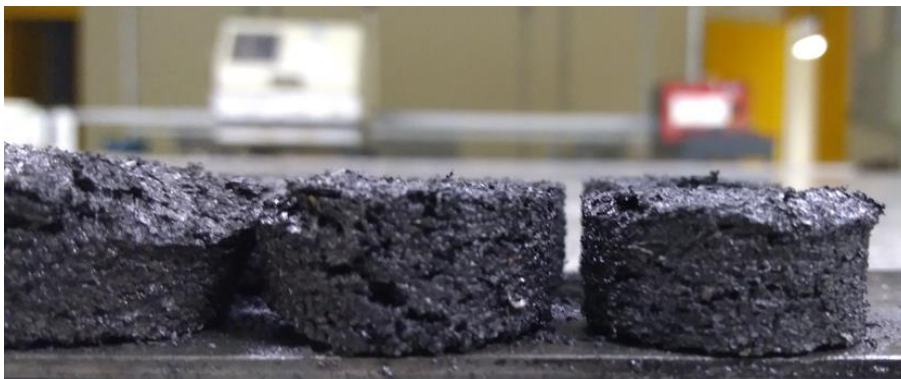
4.5 RESULTADOS DAS SINTERIZAÇÕES

Nesta secção serão discutidos os resultados das sinterizações realizadas com as amostras confeccionadas com limalhas que não passaram por processo de lavagem prévio. Todos os processos respeitaram as metodologias explicadas anteriormente.

4.5.1 Resultado da Primeira Sinterização.

Como descrito anteriormente, o primeiro processo de sinterização foi realizado com uma temperatura máxima de 700 °C, durante uma hora. Porém, neste primeiro processo as amostras ficaram resfriando dentro do forno durante a noite e parte do dia seguinte, totalizando mais de 12 horas, nesse período houve a entrada de água dentro do forno, danificando as amostras já sinterizadas, figura 24.

Figura 24 - Resultado da primeira sinterização realizada a 700 °C durante uma hora.



Fonte - Autoria Própria.

Como pode ser visualizado na figura 24, as amostras foram retiradas do forno totalmente enegrecidas, devido a formação de fuligem, proveniente da combustão do óleo do fluido de corte, houve também um aumento dimensional das amostras, observa-se também que as amostras apresentam uma grande quantidade de água, proveniente da água usada como filtro da atmosfera do forno.

Na tabela 7 estão expostas as dimensões e massa resultante deste primeiro processo de sinterização.

Tabela 4 - Resultados do primeiro procedimento de sinterização.

	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Volume (mm³)	Massa (g)	Densidade (g/cm³)
1	22,90	10,50	4322,4494	8,1143	0,1877
2	24,60	11,90	5653,1021	7,9521	0,1407
3	22,90	11,10	4569,4465	7,8971	0,1728
4	23,10	11,00	4607,7224	8,0994	0,1758
5	23,00	10,70	4443,3355	7,6655	0,1725
6	24,00	11,10	5018,9760	7,8149	0,1557
7	23,80	13,60	6047,3134	7,4928	0,1239
8	23,80	11,00	4891,2094	7,6774	0,1570
9	23,10	10,50	4398,2804	7,9718	0,1812
10	24,10	11,00	5015,2944	7,8459	0,1564

Fonte - Autoria Própria.

A tabela 7 também traz a informação de densidade das amostras, está calculada levando-se em consideração a massa das amostras e seu volume, a densidade do material não foi levada em conta nesse procedimento, por não se saber a real natureza do mesmo, e quais os metais presentes na limalha retirada da serra.

A tabela 8 traz um comparativo entre as amostras antes da sinterização e depois, neste comparativo torna-se evidente o aumento considerável nas dimensões das amostras.

Tabela 5 - Comparativo entre valores médios das amostras antes e depois do processo de sinterização.

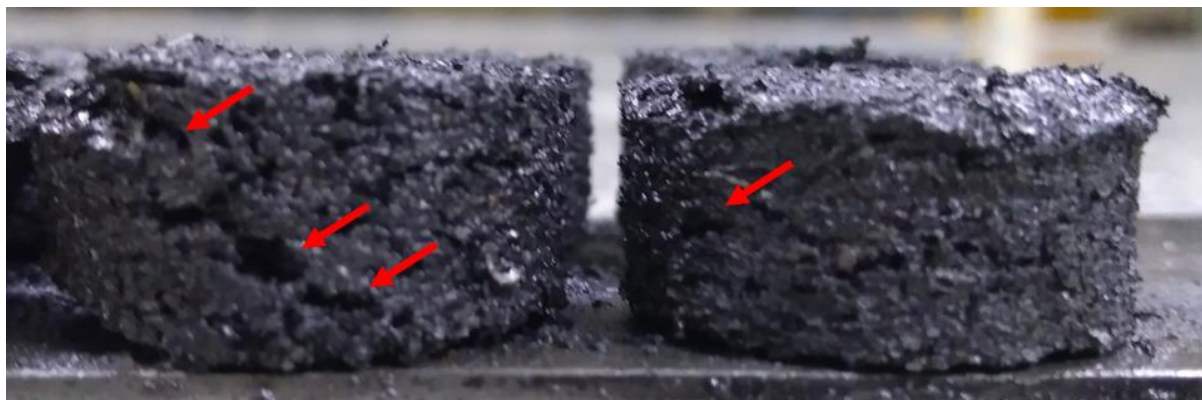
Dados	Antes	Depois	$\Delta\%$
Diâmetro Médio (mm)	20,49846	23,53	13%
Espessura Media (mm)	6,062821	11,24	46%
Volume Médio (mm ³)	1999,8	4896,713	59%
Massa Media (g)	5,632969	7,85312	28%
Densidade Media (g/cm ³)	0,282	0,1624	-74%

Fonte - Autoria Própria.

Devido ao fato da grande deformação que as amostras sofreram houve a dificuldade de identifica-las para fazer uma análise individual. Sendo assim, ficou decidido que seriam usadas as medias das amostras antes e depois da sinterização.

Como houve um aumento considerável na espessura das amostras cerca de 46%, vide tabela 8, o contato prolongado da água foi levado em conta como sendo uma das causas para o ocorrido, além da formação da fuligem durante o processo. Para se ter certeza que a água foi agente fundamental para o aumento da espessura o segundo processo de sinterização foi feito repetindo os parâmetros usados no primeiro, mas tomando o cuidado de retirar as amostras no mesmo dia que foi realizado o procedimento.

Figura 25 - Resultado das amostras expostas a água.



Fonte - Autoria Própria.

Na figura 25 pode ser visto que as amostras sofreram uma descompactação durante o processo de sinterização, na figura 25 fica evidente espaços que se abriram nas amostras. Este é outro fato no qual a exposição a água pode ter tido influência e não somente pela formação da fuligem e da carbonização das amostras.

Devido aos fatos ocorridos nessa etapa de sinterização, ficou decidido que havia a necessidade de limpeza das amostras, mesmo que já compactadas, com o objetivo de retirada do excesso do fluido de corte que estava queimando no processo e danificando as amostras.

4.5.2 Resultados da Segunda Sinterização

O segundo processo de sinterização seguiu os mesmos padrões adotados no primeiro procedimento, temperatura máxima de 700 °C e tempo de sinterização de uma hora. O procedimento foi repetido com o intuito de se certificar que não foi somente a água a causadora do aumento de espessura, massa e a descompactação das amostras.

Nesse segundo procedimento as amostras a serem sinterizadas já haviam passado pelo processo de lavagem, onde ficaram imersas em água e detergente já compactadas com o intuito de diminuir ou neutralizar os danos causados pelo fluido de corte presente nas amostras. O resultado da segunda sinterização pode ser visto na figura 26.

Figura 26 - Resultado do segundo processo de sinterização realizado repetindo os padrões do primeiro processo.



Fonte - Autoria Própria.

A tabela 9 traz o compilado dos resultados obtidos no segundo processo de sinterização.

Tabela 6 - Resultados da segunda sinterização, realizada a 700 °C durante uma hora.

	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Volume (mm³)	Massa (g)	Densidade (g/cm³)
1	23,20	10,60	4478,6950	4,0735	0,0910
2	23,10	10,40	4356,3920	4,2805	0,0983
3	23,00	10,60	4401,8090	4,5861	0,1042
4	23,80	10,30	4579,9506	4,4429	0,0970
5	23,00	10,90	4526,3885	4,3900	0,0970
6	23,00	11,40	4734,0210	3,9931	0,0843
7	23,00	8,60	3571,2790	4,0478	0,1133
8	22,80	11,40	4652,0482	4,6411	0,0998
9	22,90	10,00	4116,6185	4,4143	0,1072
10	22,70	11,00	4449,5292	4,5139	0,1014

Fonte - Autoria Própria.

Nota-se a partir da tabela 9 que ainda sim houve um aumento na espessura das amostras. Entretanto houve uma diminuição nas massas das amostras. Portanto a água teve influência mais direta somente no que diz respeito ao aumento de peso das amostras, quanto ao caso do aumento em espessura, a mesma pode ter influenciado, mas a formação da fuligem é a causa principal do aumento de espessura e da descompactação das amostras.

A tabela 10 mostra as diferenças quando comparado as amostras antes da sinterização e depois.

Tabela 7 - Comparativo entre os resultados dimensionais e de massa antes e depois da segunda sinterização.

Dados	Antes	Depois	Δ%
Diâmetro Médio (mm)	20,49846	23,05	11%
Espessura Media (mm)	6,062821	10,52	42%
Volume Médio (mm ³)	1999,8	4386,673	54%
Massa Media (g)	5,632969	4,33832	-30%
Densidade Media (g/cm ³)	0,282	0,0994	-184%

Fonte - Autoria Própria.

Levando-se em conta os dados apresentados na tabela 10, fica evidente que o maior causador do aumento de espessura das amostras é a formação de carbono entre as partículas, e a água é responsável pelo aumento da massa das amostras. Sendo que a espessura das amostras ainda teve um grande crescimento de 42%,

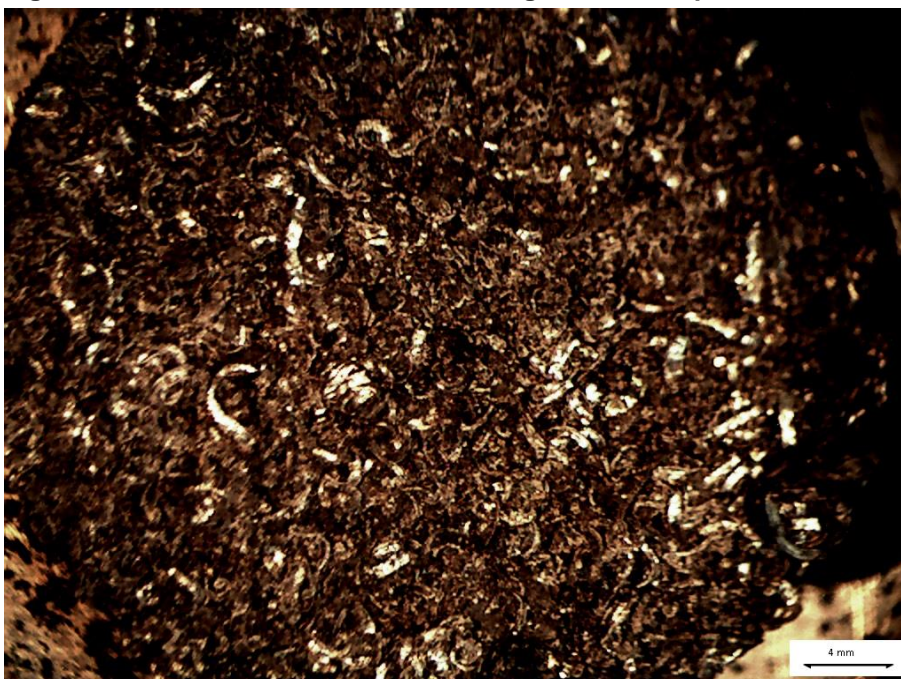
enquanto a massa das amostras teve uma queda de 30%. Essa diminuição da massa das amostras é resultado da reação química de queima do óleo do fluido de corte que estava presente nas amostras.

Ao se comparar as figuras 26 e 23 nota-se a grande influência que a formação de carbono teve nas amostras, as mesmas ficaram ainda mais frágeis e enegrecidas devido a fuligem formada durante a sinterização, além do aspecto descompactado que as mesmas adquiriram. As amostras passaram a se desmanchar evidenciando que não houve o processo de sinterização, ligação entre as partículas.

A formação de fuligem nas amostras impediu que as partículas de limalha se ligassem formando uma única estrutura. A formação da fuligem entre as partículas de metal pode ser vista na figura 26.

A figura 27 foi obtida por meio de uma lupa com ampliação de 3 vezes, essa imagem deixa totalmente evidente que as partículas não conseguiram se unir devido a formação de fuligem, parte mais escura da figura. Fica claro pelo contraste das partículas, tons prateados, e as partes mais escuras, fuligem.

Figura 27 - Evidencia da formacao de fuligem entre as particulas de limalha



Fonte - Autoria Própria.

A falta de sinterização mostrada na figura 27 deixou o corpo de prova encontra-se como uma característica friável, isso inviabilizou as técnicas usadas na metalurgia do pôr para sua análise, não sendo possível determinar a porosidade da amostra e sua dureza. Porém, fica evidente que a amostra não apresenta nenhum tipo de resistência mecânica devido à falta de união das partículas que formam o corpo de prova.

A partir dos resultados demonstrados nas duas primeiras sinterizações ficou decidido proceder com um terceiro processo aumentando a temperatura máxima do processo para 900 °C, com a expectativa de mudanças no resultado, como uma menor formação de fuligem e uma possível união das partículas, formando um único corpo como esperado.

4.5.3 Resultado do Terceiro Processo de Sinterizadas

A terceira sinterização foi realizada variando o parâmetro temperatura para 900 °C. Foram sinterizados dez corpos de provas durante uma hora. O aumento de temperatura teve o intuito de verificar a possibilidade de se eliminar a fuligem que estava se formando e verificar a possibilidade de sinterização das partículas, a figura 28 evidencia os resultados das amostras sinterizadas a 900 °C.

Figura 28 - Resultado do terceiro processo de sinterização realizado com temperatura de 900 °C durante uma hora.



Fonte - Autoria Propria.

A amostra exemplificada na figura 28 é a que mais evidenciou a formação de fuligem, proveniente da queima do óleo. Os resultados desta sinterização são expostos na tabela 11.

Tabela 8 - Dados da terceira sinterização.

	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Volume (mm³)	Massa (g)	Densidade (g/cm³)
1	23,00	10,00	4152,6500	4,8068	0,1158
2	22,70	9,50	3842,7752	4,4694	0,1163
3	22,50	9,50	3775,3594	3,9576	0,1048
4	22,70	9,70	3923,6757	4,5238	0,1153
5	23,00	8,40	3488,2260	3,8151	0,1094
6	23,00	10,00	4152,6500	4,7326	0,1140
7	22,90	9,60	3951,9538	4,4254	0,1120
8	22,60	9,00	3608,5194	4,4001	0,1219
9	22,80	9,70	3958,3217	4,8339	0,1221
10	22,30	10,10	3942,7638	4,108	0,1042

Fonte - Autoria Propria.

A tabela 12 mostra um comparativo entre os dados dimensionais, massa, volume e densidade médios das amostras antes da sinterização e depois do processo.

Tabela 9 - Dados comparativos entre as amostras antes e depois da sinterização.

Dados	Antes	Depois	Δ%
Diâmetro Médio (mm)	20,49846	22,75	10%
Espessura Media (mm)	6,062821	9,55	37%
Volume Médio (mm ³)	1999,8	3879,689	48%
Massa Media (g)	5,632969	4,40727	-28%
Densidade Media (g/cm ³)	0,282	0,1136	-148%

Fonte - Autoria Própria.

Como pode ser visto na tabela 12 no processo de sinterização utilizando uma temperatura de 900 °C fica evidente que a espessura média das amostras aumentou em 37%, mas em uma proporção menor quando comparada com os processos anteriores, enquanto a massa reduziu em 28%, menos quando comparado com a segunda sinterização.

A figura 29, foi feita utilizando a lupa com ampliação de três vezes, e mostra que mesmo aumentando a temperatura do processo ainda não foi possível que houvesse a união das partículas metálicas.

Figura 29 - Corpo de prova após a terceira sinterização a temperatura de 900 °C por uma hora.

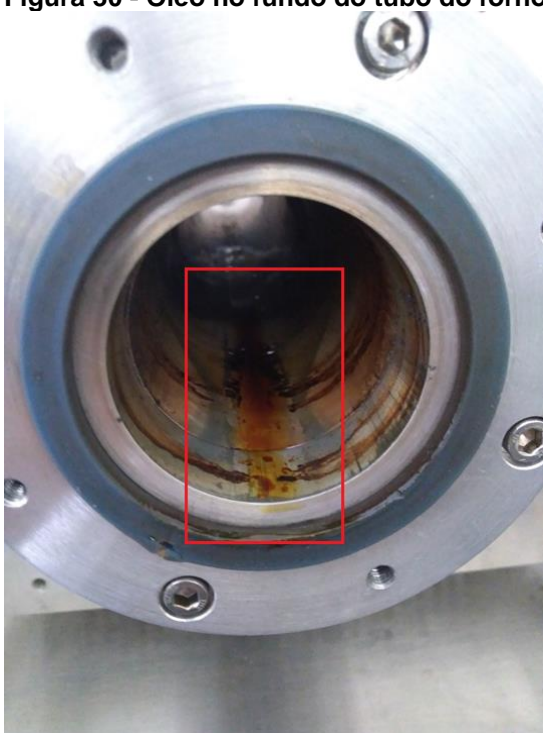


Fonte - Aatoria Própria

A figura 29 fica evidente a formação de fuligem, sendo este um dos principais motivos para que as partículas não se unissem no momento da sinterização, mesmo aumentando a temperatura para 900 °C, os resultados da terceira sinterização foram praticamente os mesmos dos dois processos anteriores.

Outro fato relevante para o trabalho e que ocorreu em todos os processos de sinterização, independentemente do tempo e temperatura, foi o aparecimento de óleo em forma líquida no fundo do tubo do forno, o que torna mais evidente, que um dos grandes problemas desse projeto é o fluido de corte presente nos corpos de prova. O óleo citado pode ser observado na figura 30.

Figura 30 - Óleo no fundo do tubo do forno após a sinterização do material.



Fonte - Autoria Propria.

Como a lavagem dos corpos de prova não obtiveram um resultado satisfatório para o trabalho, ficou decido a necessidade de lavagem do material antes de sua compactação, os resultados desse processo de limpeza serão expressos no item 4.6.

4.6 RESULTADOS DO PROCESSO DE LAVAGEM DAS LIMALHAS

Pode-se notar na primeira lavagem, que o material tem diversas contaminações, o detergente que estava sendo usado foi totalmente neutralizado, devido a quantidade de óleo que se encontrava na limalha. A partir dessa primeira lavagem notou-se a necessidade de sucessivas trocas de água com detergente para que se pudesse limpar o material. Pois seu grau de contaminação por fluido de corte e outros particulados era alto.

Na segunda imagem descrita como quinta lavagem da figura 31 pode ser visto o material em sua quinta lavagem, nota-se ainda uma grande turbidez na mistura de água mais detergente e muito particulado em suspensão; até esse momento o material ficava de molho na solução por cinco minutos; porém, para que as partículas em suspensão pudessem ser retiradas iniciou-se a agitação da mistura com uma colher e a remoção da água com as partículas ainda em suspensão.

O procedimento de retirar a solução com as partículas ainda em suspensão surtiu o efeito desejado, aumentando a rapidez da lavagem das partículas, e diminuiu o ciclo de lavagem as quais as mesmas estavam sendo submetidas.

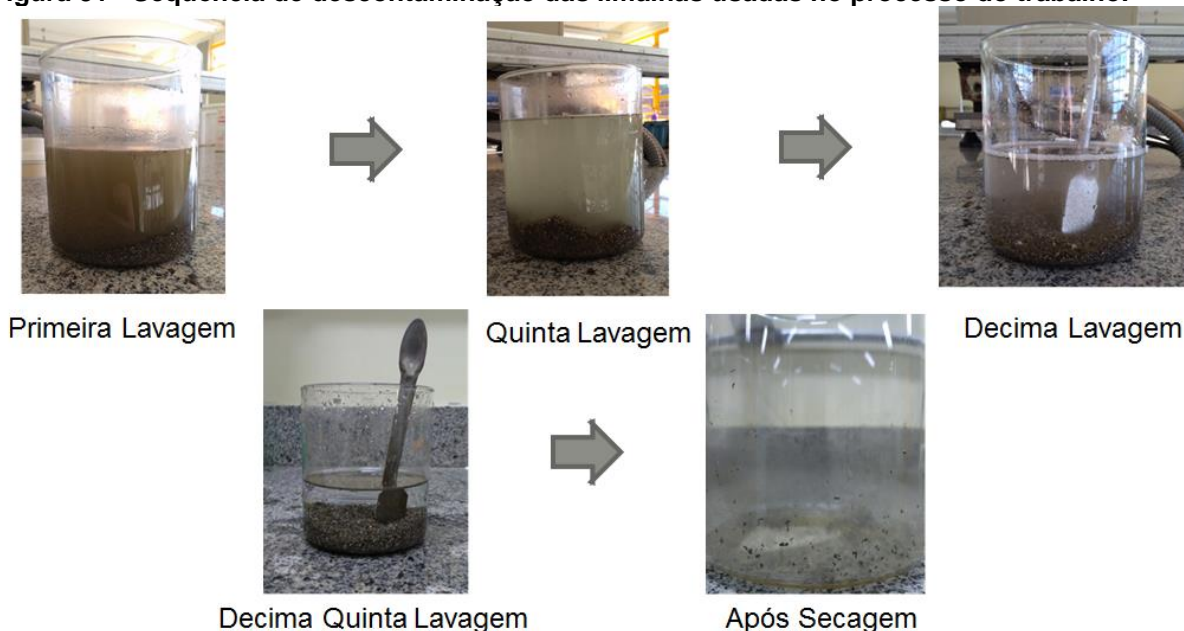
Na decima lavagem, vista na figura 31, pode-se notar que a solução já se encontra mais limpa, onde pode ser observada a colher no interior no béquer, algo que não era possível na primeira e quinta lavagem. O mesmo processo de lavagem foi mantido para esta decima troca de água.

Na decima quinta lavagem, figura 31 demonstra a última troca de água do processo de lavagem, não pode ser mais vista turbidez na água e não há mais partículas em suspensão na solução.

Posterior a decima quinta lavagem as partículas foram imersas em acetona por 10 minutos, passando posteriormente por um processo de secagem utilizando-se de um secador.

Mesmo após o processo de lavagem e secagem, as partículas ainda apresentavam traços do fluido de corte, como ilustrado na imagem descrita como após secagem na figura 31.

Figura 31 - Sequência de descontaminação das limalhas usadas no processo do trabalho.



Fonte - Autoria Própria.

4.7 COMPACTAÇÃO DAS PARTÍCULAS LAVADAS

As partículas depois de lavadas e limpas passaram pelo mesmo processo de compactação das partículas não lavadas, foram compactadas usando uma pressão

de cinco toneladas na mesma prensa hidráulica. A matriz usada para a compactação foi a mesma usada para se compactar as trinta amostras iniciais. Entretanto, nesse processo de compactação não houve a saída de fluido de corte das amostras como ocorreu na primeira compactação. Desta vez as amostras estavam livres do excesso de fluido de corte que era prejudicial no momento da sinterização.

4.8 SINTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS FEITAS COM PARTÍCULAS LAVADAS

Os parâmetros de sinterização para as limalhas lavadas foram os mesmos usados na última sinterização, temperatura máxima de 900 °C e tempo de sinterização de uma hora.

O intuito de lavar a limalha proveniente da serra, foi eliminar o máximo de fluido de corte antes que esses fossem compactados e sinterizados. Os resultados dessa sinterização estão na figura 32.

Figura 32 - Resultado da sinterização das partículas que passaram por tratamento para retirada do fluido de corte.



Figure - Autoria Propria.

Como pode ser observado na figura 32, mesmo depois de todo o processo de limpeza pelo qual a limalha foi submetida, ainda houve a formação de fuligem em meio as partículas. Porém, há a necessidade de se salientar que desta vez o aparecimento de fuligem foi bem menor, embora ainda tenha sido suficiente para impedir a sinterização do material.

A tabela 13 traz os resultados do processo de sinterização.

Tabela 10 - Resultados da sinterização a 900 °C durante uma hora, das amostras confeccionadas com a limalha lavada.

	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Volume (mm³)	Massa (g)	Densidade (g/cm³)
1	22,40	5,10	2008,7962	4,7438	0,2362
2	22,70	6,40	2588,8170	5,7118	0,2206
3	22,50	5,90	2344,6969	5,4680	0,2332
4	22,70	6,00	2427,0159	5,1852	0,2136
5	22,70	5,90	2386,5656	5,4372	0,2278
6	22,60	5,90	2365,5849	5,4588	0,2308
7	22,40	6,00	2363,2896	5,6859	0,2406
8	22,50	5,90	2344,6969	5,5120	0,2351
9	22,30	5,30	2068,9750	4,7264	0,2284
10	23,00	6,30	2616,1695	4,8747	0,1863

Fonte - Autoria Propria.

Pode se notar na tabela 13 que houve novamente aumento na espessura das amostras, assim como aumento em seu diâmetro. Pode ser observado a redução na massa das amostras, devido a combustão do fluido de corte remanescente nas amostras.

A tabela 14 traz um comparativo entre o antes e depois da sinterização das amostras.

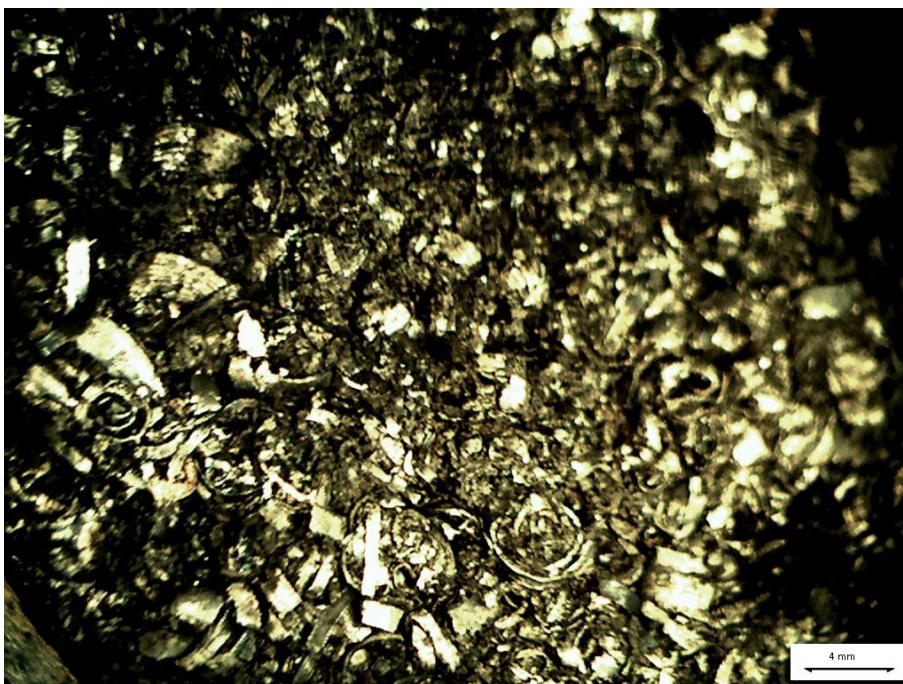
Tabela 11 - Comparação entre os dados das amostras antes e depois do processo simétrica.

Dados	Antes	Depois	Δ%
Diâmetro Médio (mm)	20,5700	22,58	9%
Espessura Média (mm)	4,5350	5,87	23%
Volume Médio (mm ³)	1506,4951	2351,461	36%
Massa Media (g)	5,7297	5,28038	-9%
Densidade Media (g/cm ³)	0,38	0,2253	-69%

Fonte - Autoria Própria.

Na tabela 14 fica evidente que houve um aumento nas dimensões das amostras assim como a redução da massa das amostras. Esse comportamento se repetiu quando comparado com as amostras feitas sem que houvesse a lavagem da limalha. Isso deixa evidente que ainda houve a contaminação por fluido de corte; porém, com uma menor intensidade quando comparado com as amostras anteriores. A formação da fuligem pode ser vista na figura 37.

Figura 33 - Resultado da sinterização das amostras feitas com limalha lavada, com ampliação de 3x.



Fonte - Autoria Própria.

A figura 33 foi obtida com uma lupa e ampliação de 3 vezes. Nessa imagem fica nítido que ainda houve a formação de fuligem entre as partículas metálicas impedindo que as mesmas se unissem no momento da sinterização. Entretanto, pode ser notado a quantidade de fuligem formada durante o processo é menor quando comparada aos casos anteriores.

Essa menor formação de fuligem em meio as partículas se devem ao processo de lavagem que as partículas passaram antes de serem compactadas e sinterizadas, houve uma sensível redução de fluido de corte presente nas amostras. Entretanto não foi possível sua retirada por completo, e os resquícios de óleo de corte que ainda ficaram presente nas amostras possibilitou novamente a formação de fuligem que é extremamente prejudicial para o processo.

5.CONCLUSÃO

Através do processo experimental ficou evidente a formação de uma espessa fuligem em meio as partículas metálicas, essa fuligem é proveniente da queima incompleta do óleo, presente no fluido de corte. Essa queima incompleta se deve à falta de oxigênio e as altas temperaturas necessárias para sinterizar o material em questão.

A fuligem que se forma durante o processo impede que as partículas metálicas se liguem culminando na sinterização do material e assim a formação de uma estrutura única que possa aguentar trabalhos mecânicos. Essa falta de união das partículas deixou o material ainda mais frágil quando comparado com as amostras antes do processo de sinterização, essa fragilização do material impediu que maiores análises pudessem ser realizadas no material como testes de dureza, porosidade dentre outros utilizados na metalurgia do pó.

A lavagem das limalhas sem a compactação se deu usando uma solução de água e detergente, sendo necessárias sucessivas trocas, chegando a um total de quinze trocas, mais imersão em acetona. Uma característica dos óleos usados em fluidos de corte é a sua solubilidade em água, característica na qual tornou mais difícil a sua remoção.

Conclui-se, portanto, que devido à grande contaminação pelo óleo do fluido de corte a utilização das limalhas de matérias metálicas, provenientes das serras de corte, é inviável para processo de sinterização sem que antes esse material seja tratado de forma adequado para a retirada de todo o óleo presente. Conclui-se também que somente o processo de lavagem das partículas em uma solução de água e detergente não foram suficientes para a total limpeza do material.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros trabalhos mais elaborados com as partículas metálicas, explorando uma possível moagem das mesmas com o objetivo de refinar as partículas, facilitando a sua sinterização.

Uma alternativa que possa ser explorada em trabalhos futuros é a limpeza das limalhas, sendo esta opção, algo possível para um único trabalho, devido à dificuldade de limpeza do material.

Em um trabalho futuro pode ser também explorada a possibilidade de se colocar as limalhas no forno antes da compactação a uma temperatura que o óleo do fluido de corte possa ser queimado. Posteriormente a essa queima, essas limalhas passariam por um processo breve de moagem e peneiramento, para que a fuligem possa ser retirada das limalhas por estes processos. Por final, as mesmas seriam compactadas e passaram pelos processos de sinterização e estudo dos resultados obtidos.

7.REFERENCIAS

1. CHIAVERINI, Vicente. **Metalurgia do Pó: Técnica e Produtos**. 4. ed. São Paulo: Abm, 2001.
2. PARUCKER, Moisés Luiz; COSTA, Cesar Edil da. **RECICLAGEM DE CAVACOS DE USINAGEM POR METALURGIA DO PÓ: UMA ABORDAGEM PARA DESENVOLVIMENTO DE PEÇAS ESTRUTURAIS**. 2013. 10 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário Católica de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, 2013.
3. GALVÃO, Alcione Olinto. **RECICLAGEM DE CAVACOS DE AÇO SAE 1020 VIA METALURGIA DO PÓ**. 2008. 33 f. Monografia (Especialização) - Curso de Tecnologia em Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
4. SIMIAO, Juliana. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais em uma Empresa de Usinagem sobre o enfoque de Produção mais limpa**. 2011. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
5. UNEP (2013) **Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel**. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C.
6. ZAPAROLLI, Domingos. **Brasil recicla 10 milhões de toneladas de aço por ano**. 2016. Disponível em: <<http://economia.ig.com.br/empresas/industria/arcelormittalbrasil/2014-10-15/brasil-recicla-10-milhoes-de-toneladas-de-aco-por-ano.html>>. Acesso em: 05 nov. 2016.

7. **MATERIAL AND ENERGYWASTES MINIMIZATION IN A MACHINING SYSTEM: A REVIEW.** Índia, 04 fev. 2013. Disponível em: <<http://www.jmaterenvirosci.com/>>. Acesso em: 05 nov. 2016.
8. FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** Sao Carlos: Edgard Blucher Ltda, 2011.
9. BROWN, James. **Advanced Machining Tecnology Handbook.** New York: Mc Graw Hill, 1998.
10. AMORIM, Heraldo Jose de. **Estudo da Relacao entre Velocidade de Corte, Desgaste de Ferramenta, Rugosidade e Forcas de Usinagem em Torneamento com Ferramenta de Metal Duro.** 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecanica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/3791>>. Acesso em: 05 nov. 2016.
11. DUARTE, Lauren da Cunha; JUCHEM, Pedro Luiz; PULZ, GÊNova Maria. **Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros.** 2003. 14 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/igeo/pesquisas/Sitenovo/3002/01-3002.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2016.
12. DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. **MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA Aplicações e preparação de amostras Aplicações e preparação de amostras:** Materiais Poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre: Edipucrs, 2007. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/edipucrs/online/microscopia.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2016.
13. INFOSOLDA. **ENSAIO MACROGRÁFICO.** Disponível em: <

- destrutivos-e-mecanicos/219-ensaio-macrografico.html>. Acesso em: 09 dez. 2016.
14. CIMM. **Cavaco? Entenda o que é e quais são suas formas.** 2007. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/2520-cavaco-entenda-o-que-e-e-quais-sao-suas-formas>. Acesso em: 12 maio 2018.
15. REGINALDO. **Usinagem: Cavacos.** 2011. Disponível em: <<http://superusinagem.blogspot.com.br/2011/03/cavacos.html>>. Acesso em: 12 maio 2018.
16. FERRAMENTAS, Cordeiro Maquinas e. **Prensa Hidráulica 30 Toneladas P 30000 c/ Manômetro - BOVENAU.** 2018. Disponível em: <https://www.cordeiromaquinas.com.br/loja/produto-219075-57188-prensa_hidraulica_30_toneladas_p_30000_c_manometro_bovenau>. Acesso em: 12 maio 2018.
17. FERRARI, Begona; MORENO, Rodrigo. **Microestrutura de um material sinterizado de Al₂O₃ obtido por EPD sobre grafito.** 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Microestrutura-de-un-material-sinterizado-de-Al-2-O-3-obtido-por-EPD-sobre-grafito_fig6_45192119>. Acesso em: 12 maio 2018.