

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CCET - CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA

LEONARDO MENEGHEL

**REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO INDUSTRIAL DO PROCESSO DE
JATEAMENTO PELO PROCESSO DE METALURGIA DO PÓ**

CAXIAS DO SUL

2014

LEONARDO MENEGHEL

**REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO INDUSTRIAL DO PROCESSO DE
JATEAMENTO PELO PROCESSO DE METALURGIA DO PÓ**

Monografia apresentada como parte dos requisitos para obtenção do diploma em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul.

Aprovado em: 4 de dezembro 2014.

Banca Examinadora



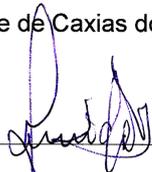
Prof. Dr. Eng. Sandro Tomaz Martins

Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Dr. Eng. Maria Cristina More Farias

Universidade de Caxias do Sul - UCS



Prof. Dr. Eng. Alexandre Fassini Michels

Universidade de Caxias do Sul - UCS

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CCET - CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA

LEONARDO MENEGHEL

**REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO INDUSTRIAL DO PROCESSO DE
JATEAMENTO PELO PROCESSO DE METALURGIA DO PÓ**

Monografia apresentada como parte dos requisitos para obtenção do diploma em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Sandro Tomaz Martins

CAXIAS DO SUL

2014

DEDICATÓRIA

Dedico este simplório estudo aos apaixonados pela engenharia que com sua dedicação continuem motivando futuras gerações.

AGRADECIMENTOS

De maneira nenhuma estaria envolvido neste estudo sem o apoio dos amigos, professores e do agradável ambiente familiar em que fez brotar em mim a dedicação aos estudos.

Agradeço a minha namorada Bruna por ter me transformado em um curioso pela leitura, agradeço também a todos eruditos músicos, em especial a Mozart, por incansáveis vezes “tocar” suas músicas em meus estudos e leituras.

If you can't explain it simply, you don't understand it well enough.

Albert Einstein

LEONARDO MENEGHEL

**REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO INDUSTRIAL DO PROCESSO DE
JATEAMENTO PELO PROCESSO DE METALURGIA DO PÓ**

Monografia apresentada como parte dos requisitos para obtenção do diploma em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul.

Aprovado em: _____.

Banca Examinadora

_____.

Prof. Dr. Eng. Sandro Tomaz Martins

Universidade de Caxias do Sul – UCS

_____.

Prof. Dr. Eng. Maria Cristina More Farias

Universidade de Caxias do Sul - UCS

_____.

Prof. Dr. Eng. Alexandre Fassini Michels

Universidade de Caxias do Sul - UCS

RESUMO

O presente estudo, com base nos conceitos inerentes à metalurgia do pó, mostrou viável a utilização do resíduo do processo de jateamento para a fabricação de briquetes. Abordaram-se as etapas de coleta do resíduo na empresa, seguido da classificação tecnológica e dos processos de compactação e sinterização. As características de resistência mecânica do briquete foram verificadas pelos métodos de densidade aparente, dureza e ensaio de compressão. Se comprova a formação do *neck* em análise metalográfica

Palavras chave: Metalurgia do pó. Reciclagem.

ABSTRACT

The present study, through the inherent concepts in powder metallurgy, has turned feasible to produce briquettes using the waste from the blasting process. The stages of collecting waste at the companies, followed by the technological and technical classification and the processes of compaction and sintering have been approached by this study. The characteristics of mechanical resistance of the briquette were verified by the methods of apparent density, hardness and compressive test. This method proves the formation of neck in a metallographic study

Keyword: Powder Metallurgy. Recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de produção pelo método de atomização ⁽¹⁴⁾	19
Figura 2 - Processo de produção de ferro esponja ⁽⁵⁾	20
Figura 3 - Formatos das partículas ⁽⁹⁾	21
Figura 4 - Mecanismos misturadores ⁽¹⁰⁾	24
Figura 5 - Enchimento da matriz ⁽¹⁰⁾	25
Figura 6 - Etapas da compactação ⁽¹⁰⁾	25
Figura 7 - Provável mecanismo de crescimento de <i>neck</i> ⁽⁵⁾	29
Figura 8 - Etapas do projeto	32
Figura 9 - Peneiras com sequência normalizada conforme SAE J-444	34
Figura 10 - Ensaio de microdureza.....	35
Figura 11 - Dimensões do funil <i>Hall</i> ⁽²²⁾	36
Figura 12 - Recipiente de enchimento da matriz.....	37
Figura 13 - Matriz uniaxial	37
Figura 14 - Misturador "Y" montado em furadeira	38
Figura 15 - Equipamento Emic DL20000.....	39
Figura 16 - Equipamento manual para compactação.....	39
Figura 17 - Câmara com atmosfera protetora	40
Figura 18 - Método para insuflar o gás protetor	40
Figura 19 - Microscopia da amostra n. 2 em baquelite sem ataque químico	44
Figura 20 - Distribuição de tamanho.....	45
Figura 21 - Amostra n.1 com ampliação de 63x.....	45
Figura 22 - Amostra n.2 com ampliação de 63x.....	46
Figura 23 - Amostras n.3 com ampliação de 63x	46
Figura 24 - Ensaio de Escoabilidade	49
Figura 25 - Amostra n. 1 , compactada sem lubrificante	49
Figura 26 - Amostra número 3, compactada com lubrificante	50
Figura 27 - Temperaturas do processo de alívio de tensões	50
Figura 28 - Amostras compactadas com alívio de tensões e lubrificante.....	51
Figura 29 - Compactação sem lubrificante	51
Figura 30 - Compactação com lubrificante	52
Figura 31 - Compactação com alívio de tensões e lubrificante	52

Figura 32 - Linha de densificação do corpo de prova.....	53
Figura 33 - Linha de compactação do corpo de prova	53
Figura 34 - Fusão precoce do lubrificante	54
Figura 35 - Combustão do lubrificante em contato com a atmosfera (~250°C)	54
Figura 36 - Temperaturas de sinterização.....	55
Figura 37 - Forno mufla Tecklabor	55
Figura 38 - Amostras sinterizadas	55
Figura 39 - Escape do lubrificante na temperatura de 500°C.....	56
Figura 40 - Temperaturas de sinterização com controle da remoção do lubrificante	56
Figura 41 - Amostras sinterizadas	56
Figura 42 - Porosidade da amostra n.1 no programa <i>ImageJ</i> (ampliação 50x)	61
Figura 43 - Porosidade da amostras n.3 no programa <i>ImageJ</i> (ampliação 50x).....	61
Figura 44 - Ensaio de compressão diametral.....	62
Figura 45 - Formação do <i>neck</i> na amostras sinterizada n.1 (Nital 5%).....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperaturas e tempos de sinterização ⁽⁸⁾	28
Tabela 2 - Expoentes de controle de crescimento de <i>neck</i> ⁽⁵⁾	30
Tabela 3 - Coleta das amostras.....	33
Tabela 4 - Distribuição de tamanho.....	44
Tabela 5 – Diâmetro médio da partícula.....	47
Tabela 6 - Microdureza da amostra n. 2.....	48
Tabela 7 - Velocidades de escoamento	48
Tabela 8 - Densidade aparente do corpo compactado verde de maior altura	57
Tabela 9 - Densidade aparente do compactado sinterizado de maior altura	58
Tabela 10 - Densidade aparente do corpo compactado verde de menor altura	59
Tabela 11 - Densidade aparente do compactado sinterizado de menor altura	60
Tabela 12 - Densidade aparente medido pelo programa <i>ImageJ</i>	62
Tabela 13 - Resistência a tração - compressão diametral da amostra n. 1	63
Tabela 14 - Resistência a tração - compressão diametral da amostra n. 3	63
Tabela 15 - Custo energético	64
Tabela 16 - Recebimento, sinterização e venda	65

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	JUSTIFICATIVA	14
1.2.	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	15
1.3.	OBJETIVOS	15
1.3.1.	Objetivo geral	15
1.3.2.	Objetivo específico	15
2.	METALURGIA DO PÓ	16
2.1.	OBTENÇÃO E PRODUÇÃO DE PÓS METÁLICOS.....	17
2.1.1.	Processos mecânicos.....	18
2.1.2.	Processos químicos	19
2.2.	CARACTERIZAÇÃO DO PÓ METÁLICO	20
2.2.1.	Amostragem	21
2.2.2.	Tamanho e forma da partícula	21
2.2.3.	Superfície livre.....	22
2.2.4.	Composição química	22
2.2.5.	Densidade batida.....	23
2.2.6.	Velocidade de escoamento (Vazão de Hall).....	23
2.2.7.	Compressibilidade	23
2.2.8.	Lubrificantes	23
2.2.9.	Métodos para misturas	24
2.3.	COMPACTAÇÃO	25
2.3.1.	Compactação a frio	26
2.3.1.1.	Compactação uniaxial	26
2.3.1.2.	Compactação isostática	26
2.3.1.3.	Laminação	27
2.3.2.	Compactação a quente	27
2.3.2.1.	Uniaxial.....	27
2.3.2.2.	Extrusão	27
2.4.	SINTERIZAÇÃO	27
2.4.1.	Teoria de sinterização.....	28
2.4.1.1.	Fenômenos e mecanismos para sinterização	28

2.4.1.2.	Etapas da sinterização	29
2.4.1.2.1.	<i>Formação dos contatos</i>	29
2.4.1.2.2.	<i>Crescimento do neck</i>	29
2.4.1.2.3.	<i>Coalescimento dos poros</i>	30
2.4.2.	Modelo matemático da sinterização	30
2.4.3.	Sinterização em fase líquida	31
2.4.4.	Atmosfera controlada	31
3.	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	32
3.1.	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	33
3.1.1.	Coleta das amostras de resíduo	33
3.1.2.	Formato do pó	33
3.1.3.	Tamanho e distribuição de tamanho	33
3.1.4.	Microdureza	34
3.1.5.	Velocidade de escoamento	35
3.1.6.	Compressibilidade	36
3.1.7.	Sinterização	39
3.2.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	41
3.2.1.	Densidade aparente	41
3.2.2.	Ensaio de compressão diametral	41
3.2.3.	Sinterabilidade	42
3.2.4.	Custo da transformação	42
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1.	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	43
4.1.1.	Coleta das amostras	43
4.1.2.	Formato do pó	43
4.1.3.	Tamanho e distribuição de tamanho	44
4.1.4.	Microdureza	47
4.1.5.	Escoabilidade	48
4.1.6.	Compressibilidade	49
4.1.6.1.	Segunda etapa de compactação.....	53
4.1.7.	Sinterização	54
4.1.7.1.	Segunda etapa da sinterização.....	56

4.1.8.	Densidade aparente	57
4.1.9.	Ensaio de compressão diametral	62
4.1.10.	Sinterabilidade.....	63
4.1.11.	Custos do processo	64
5.	CONCLUSÕES	66
5.1.	LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	66
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

1. INTRODUÇÃO

A busca por processos e produtos sustentáveis é um tema de grande importância; há registros dos antigos babilônios datadas de 1800 anos a.C. de leis contra abates de florestas e de proteção das margens dos rios ⁽¹⁾. O assunto, contudo, nunca esteve tão presente e influente no meio industrial e econômico como atualmente. No ano de 1987, o termo sustentabilidade foi definido pela primeira vez, sendo descrito como: Atender as necessidades presentes sem comprometer a possibilidade das futuras gerações de atenderem as suas necessidades ⁽²⁾.

As empresas, por consequência, estão mudando seus processos industriais com a finalidade de atender as novas exigências ambientais regulamentadas por leis. Essas, que restringem o mau uso dos recursos naturais, concedem benefícios a quem investir na melhoria dos processos produtivos com foco na redução dos resíduos sólidos gerados e no reaproveitamento energético ⁽³⁾.

Na indústria metal-mecânica, há dois processos principais de preparação de superfície de componentes metálicos para o recebimento de pintura, decapagem química e jateamento. O primeiro utiliza fortes ácidos para a remoção química das sujidades, pinturas, entre outros. Esse processo produz resíduos líquidos altamente tóxicos, de difícil manuseio e descarte ⁽⁴⁾. Por outro lado, o processo de jateamento ocorre mecanicamente e seus resíduos são a sujidade removida da peça processada e o abrasivo no final de sua vida útil.

Este trabalho analisa o processo da metalurgia do pó como uma possível rota de reaproveitamento do resíduo industrial proveniente do jateamento. Essa alternativa poderá reduzir os danos ambientais do jateamento tornando o processo ambientalmente amigável. Gerando oportunidades de desenvolvimento industrial do país no âmbito dos processos sustentáveis e negócios em áreas de maior tecnologia envolvida.

Este estudo foi realizado na LR Meneghel Metalúrgica Ltda., de porte familiar e localizado na cidade de Caxias do Sul, no estado do Rio Grande do Sul. Esta empresa iniciou suas atividades no ano de 2008, atua em manutenções corretivas e preventivas de jatos de granalha.

A abordagem principal deste estudo é verificar a possibilidade de

transformação deste resíduo proveniente do processo de jateamento, e na identificação das variáveis mais importantes para que a sinterização do pó metálico ocorra. Avaliar-se-á a resistência mecânica mínima para o seu manuseio e utilização como matéria-prima às empresas de fundidos convencionais.

1.1. JUSTIFICATIVA

No estado brasileiro do Rio Grande do Sul, são utilizadas anualmente cerca de 4.800 toneladas de abrasivo de granalha de aço carbono para o processo de limpeza por jateamento ou *shot peening*^{*}. O custo para a aquisição do abrasivo, incluindo transporte e a soma do valor para descarte, é de aproximadamente R\$ 3,20 por kg[†]. Após a sua utilização, praticamente a totalidade é destinada a aterros e apenas uma pequena parcela para o reaproveitamento pelo processo de compactação com a utilização de aglomerante químico[‡]. Quando esse briquete quimicamente unido é fundido, os aglomerantes são queimados e os gases liberados para a atmosfera, tornando-se, então, um processo poluente. Não existem fontes que informem a quantidade reaproveitada pelo método com aglomerante químico, nem a percentagem deste utilizada no processo. Fundições de atomização de abrasivo de granalha de aço carbono que adquirem esse briquete, pela semelhança química com o aço a ser produzido, reconhecem uma redução de cerca de 50% em massa do briquete depois de fundido, quando comparado com a quantidade adquirida[§].

Por essa razão este estudo é de grande importância para a sociedade no seu potencial tecnológico, econômico e no impacto ambiental positivo. Poder-se-á utilizar como referência e fonte de informação para as empresas da área, auxiliando a tomada de decisões e ao modo sustentável de industrialização.

* **Shot peening** - Processo de conformação à frio, no qual produz tensões residuais de compressão na superfície do metal modificando as propriedades mecânicas. Esse processo ocorre com o abrasivo esférico impactando a superfície com energia cinética suficiente para criar uma deformação plástica⁽⁶⁾.

† **IKK do Brasil** - Prospecção de vendas IKK, arquivo interno.

‡ **IKK do Brasil** - Valor médio do primeiro semestre de 2014.

§ **IKK do Brasil** - Segundo técnicos dessa empresa de granalha de aço carbono.

1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O reaproveitamento do resíduo metálico na fundição direta não é possível devido, pois, a grande área livre e ao seu tamanho reduzido. Quando despejados no forno de fundidos, este pó metálico acaba por queimar antes de fundir, o que produz grande quantidade de fumaça sem importante acréscimo de metal no forno.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo geral

Verificar a viabilidade técnica e econômica da utilização da metalurgia do pó como forma de reciclagem do resíduo do processo de jateamento, transformando-o em matéria-prima na fundição.

1.3.2. Objetivo específico

Caracterização de tamanho forma e distribuição de partícula de três resíduos de granalhas industriais. Avaliar as propriedades tecnológicas das frações de pós obtidas a partir dos resíduos. Determinação dos pós com melhores propriedades de resistência a verde. Estudar a sinterabilidade dos sistemas obtidos. Determinação de propriedades mecânicas dos compactados após sinterização. Comparação de custos referentes ao reaproveitamento do resíduo obtido.

2. METALURGIA DO PÓ

A Metalurgia do pó é o processo de combinar diferentes pós finos, sendo metálicos ou cerâmicos, compactá-los sob pressão em uma matriz ferramenta no formato desejado e em seguida aquecer em atmosfera controlada para “unir” os pós, principalmente pelo processo de difusão ⁽⁷⁾.

Essa técnica é considerada antiga devido à existência de objetos obtidos a partir do ferro pudlado**, datado de 3000 anos a.C.. No âmbito industrial, a sua popularização teve início apenas em 1930 com buchas autolubrificantes e com a grande demanda automobilística posterior a segunda guerra mundial ^{(8) (9)}.

Se comparada com processos convencionais tais como fundição, extrusão, forjamento entre outros, a metalurgia do pó (MP) se torna mais econômica quando são produzidos componentes em grande quantidade. Entre as principais vantagens econômicas estão o baixo consumo energético, baixo custo por componente - sobretudo nos mais complexos e de maior precisão, possibilidade de obter o produto já na sua forma definitiva e aproveitamento da matéria-prima acima de 95% ^{(5) (8) (9) (10)}.

Existem alguns fatores que tornam o processo da MP único no âmbito industrial como, por exemplo, o processamento de certos metais de alto ponto de fusão, cerâmicos, misturas insolúveis, obtenção de determinados produtos com microestrutura controlada e componentes porosos para filtragem ou lubrificação ⁽⁹⁾. Nesta seção serão apresentados os métodos de maior importância para este estudo.

Metais com alto ponto de fusão (acima de 2000°C) são de difícil obtenção pelos métodos convencionais, portanto é utilizada a MP ⁽⁵⁾.

Devido ao seu alto ponto de fusão, o W (3420°C) e Mo (2623°C) são manufaturados pela metalurgia do pó; como também, são produzidos filamentos de tungstênio para lâmpadas incandescentes, fios para alta temperatura, projéteis de penetração, anodos para equipamentos de raios X, elementos de aquecimento para fornos - quando sinterizados com fase líquida, ex. Fe, Ni, ou Cu (servem como

****PUDLADO** - é um produto siderúrgico obtido no estado pastoso com numerosas partículas de escória, agitado ao ar por meio de barras, para a redução do teor de carbono com conseqüente formação do aço.

escudo de proteção contra radiação e devido à alta densidade como contrapesos para equipamentos inerciais, ex. Giroscópios). Todos esses podem ser sinterizados pela passagem de altas correntes em baixas tensões, pela qual o pó do metal pode chegar a 3000°C ^{(8) (5)}.

Metal duro e aços rápidos sinterizados são produtos de grande importância na MP. Constituem-se principalmente de carbonetos de tungstênio, titânio, tântalo, nióbio e associados a metal aglomerante do grupo do ferro, tendo o cobalto como principal aglomerante para fornecer ao sinterizado maior tenacidade. São extensivamente utilizados na indústria da usinagem, incorporando também a usinagem em rochas, concreto e ferramentas de percussão. Sua elevada resistência ao desgaste confere boas propriedades para utilização em ferramentas de laminação e trefilação ^{(5) (8) (9)}.

Das mais antigas aplicações industriais da MP, provém os metais porosos que são peças com os poros interligados, metálicos ou cerâmicos, utilizados frequentemente para filtros e buchas auto lubrificantes ⁽¹⁰⁾.

Os filtros são obtidos com razoável resistência mecânica, química, ao impacto e de permeabilidade controlada. Aplicados extensamente para filtração de líquidos e gases, para separação da água do ar em sistemas pneumáticos devido às diferenças de tensão superficial, separação de sólidos na indústria nuclear, aplicações criogênicas, indústria de alimentos, entre outras. Produzidos geralmente em bronze, aço inoxidável e alumínio ^{(5) (8)}.

As buchas auto lubrificantes utilizam-se do efeito capilaridade, onde os poros interligados são previamente preenchidos com óleo lubrificante, amplamente utilizado como mancais de giro em pequenos motores na indústria de eletrodomésticos. Estes são produzidos com ligas de ferro-carbono, ferro-cobre e bronze ^{(8) (9)}.

2.1. OBTENÇÃO E PRODUÇÃO DE PÓS METÁLICOS

Pode-se separar a obtenção do pó metálico em dois métodos principais: o mecânico e o químico.

2.1.1. Processos mecânicos

Os processos mecânicos ocorrem na fase sólida, como o processo de moagem, ou na fase líquida, como o processo de atomização ⁽⁸⁾.

Em geral, o processo mecânico de moagem é o mais antigo. Nele, a energia de impacto é transferida para os grãos a serem reduzidos. Esse processo produz forças de compressão e cisalhamento, dos quais criam trincas no grão seguido pela propagação e fratura ^{(5) (8)}.

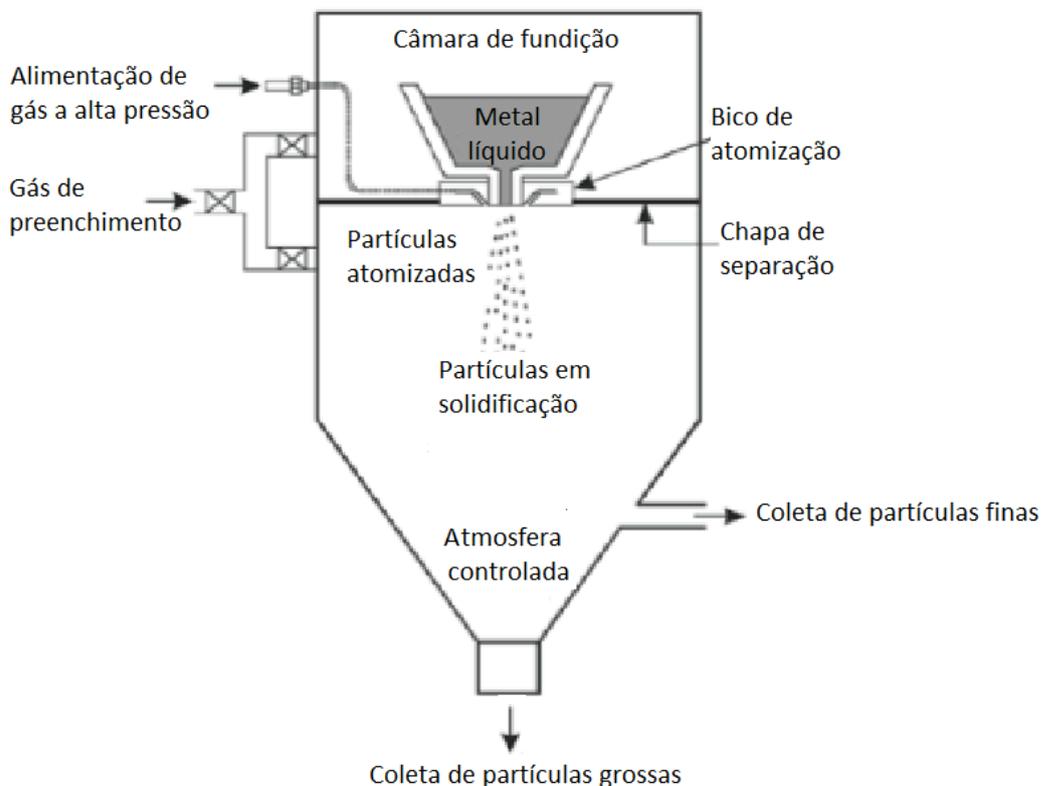
Nos moinhos de bolas, geralmente fabricadas de Al_2O_3 material similar ou não reagente, as bolas rolam em baixas velocidades de rotação ou caem livremente, quando em rotações mais altas ⁽⁹⁾.

O processo de atomização consiste em desintegrar um fluxo de metal líquido em pequenas gotas. Para isso, jatos de água ou outro fluido colide com o fluxo de metal, no qual é simultaneamente esfriado e solidificado, formando o pó metálico ⁽¹³⁾. O processo de atomização é extensivamente empregado para a produção do pó de ferro, sendo o de maior consumo dentro da MP. Com esse processo podem ser produzidos pós dos mais diversos metais ou ligas metálicas, ex. ferro, aço, cobre, alumínio e suas ligas, tais como superligas etc. ⁽⁵⁾.

Na atomização líquida, utiliza-se geralmente jato de água para sua atomização e, em alguns casos, óleos sintéticos devido à reação do oxigênio presente na água com o metal fundido. Na atomização, são produzidas grandes quantidades de pó metálico ($10 - 100 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$), mesmo com a eficiência do processo $\leq 1\%$ ⁽⁵⁾.

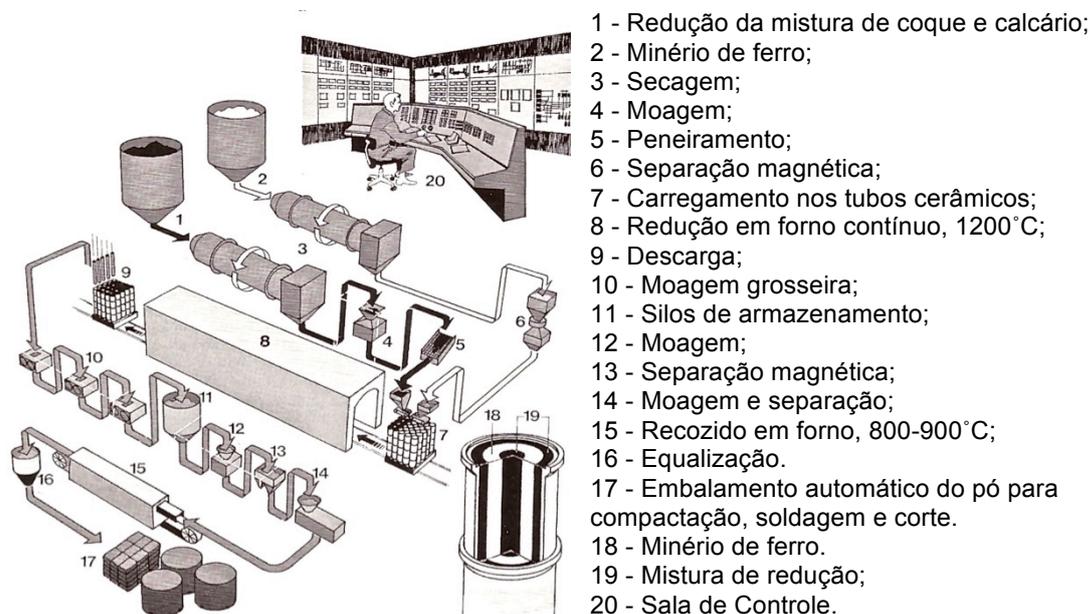
A atomização gasosa é um método similar à atomização por líquido, neste caso, são utilizados geralmente gases como ar, hélio, nitrogênio ou argônio. Devido ao alto custo dos gases e do seu grande consumo, técnicas têm sido desenvolvidas para o reaproveitamento desses gases no processo ⁽¹²⁾. Os pós atomizados a gás apresentam propriedades mecânicas superiores. Isso ocorre devido à rápida solidificação do material e o controlado ambiente com gases inertes, obtendo características favoráveis em sua microestrutura e homogeneidade química, quando comparados com a atomização líquida. Estas qualidades tornam a atomização por gases uma área de grande interesse industrial ⁽¹³⁾.

Figura 1 - Processo de produção pelo método de atomização ⁽¹⁴⁾



2.1.2. Processos químicos

A redução direta de Fe_3O_4 (Processo Höganäs) utiliza a mistura de coque e calcário moído como agente redutor e dessulfurante. Posteriormente seco, monta-se junto com o ferro magnetita moído e se coloca em tubos cerâmicos sem misturá-los por completo. Organizam-se conforme os itens 18 e 19 do esquema da Figura 2. A temperaturas próximas de 1250°C , aquece-se por dois a três dias em forno com atmosfera controlada, após é resfriado e novamente moído e separado. Em seguida é aquecido em ambiente com atmosfera controlada em torno de 650°C , podendo ser de amônia, onde o carbono é praticamente todo removido. O oxigênio se reduz para proporções próximas a 0,3% e o material é recozido, removendo-se a dureza obtida pelo encruamento no processo de moagem ^{(5) (8) (10)}.

Figura 2 - Processo de produção de ferro esponja ⁽⁵⁾

O método de deposição eletrolítica é um método de alto custo e baixa produtividade; sua vantagem é obter um pó de metal de pureza superior a 99% com boa compressibilidade e resistência a verde⁽⁸⁾ ⁽¹⁰⁾. Resistência a verde é a resistência obtida pelo compactado após a etapa de conformação dos pós ⁽⁵⁾. O processo de redução se inicia com a dissolução de um anodo de ferro em um eletrólito composto por solução de sulfato ferroso. Durante a passagem de corrente os íons de ferro são transferidos para o catodo onde periodicamente os depósitos são removidos e moídos em atmosfera controlada para evitar oxidação ⁽¹⁰⁾.

O processo de redução de carepa utiliza como matéria-prima a carepa de aço, proveniente da laminação. Essa carepa é limpa magneticamente eliminando a maioria das impurezas e é processada em moinho de bolas. Posteriormente, oxida-se a uma temperatura de aproximadamente 1000°C e o óxido é reduzido por hidrogênio. O pó resultante tem boas características de resistência a verde ⁽¹⁰⁾.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DO PÓ METÁLICO

As propriedades dos pós metálicos são de grande importância para a sua correta aplicação ⁽⁸⁾. O objetivo da caracterização se deve ao domínio dos aspectos de influência direta na compactação e sinterização que serão abordados nos itens 2.3, 2.4 e sua reprodutividade ⁽⁵⁾.

2.2.1. Amostragem

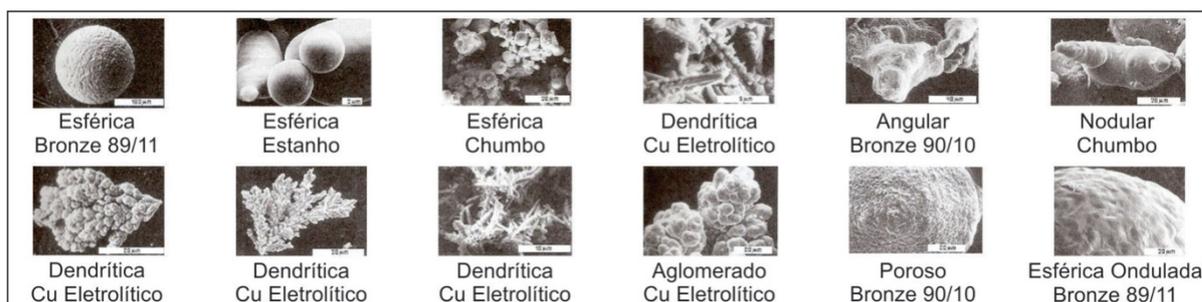
A amostragem é a atividade inicial para a determinação das características dos pós. Pode influenciar na qualidade das análises de caracterização, portanto cuidados especiais devem ser tomados na obtenção dessas amostras.

Um dos problemas mais comuns é o efeito de segregação inerente ao transporte, onde partículas maiores se separam das menores. Para prevenir isso, recomenda-se misturar o lote antes das coletas, ou misturar-las⁽⁸⁾. Matematicamente, erros de medição podem reduzir-se com amostras contendo maiores quantidades de particulados, uma amostra com 10.000 partículas induzem a um erro estatístico de 1% ⁽⁵⁾.

2.2.2. Tamanho e forma da partícula

As formas das partículas estão fortemente ligadas com o seu método de obtenção. Seus materiais base têm grande influência no formato e podem ser classificadas conforme Figura 3. Sua caracterização é visual, por microscopia óptica ou eletrônica ⁽⁸⁾. Outras características atribuem-se, tal como diâmetro da esfera de mesmo volume, diâmetro da esfera de mesma superfície, diâmetro da esfera de mesmo perímetro projetado; Essas determinam melhor as características de particulados não esféricos.

Figura 3 - Formatos das partículas ⁽⁹⁾



Para determinar o tamanho da partícula, um dos métodos de baixo custo e amplamente utilizado é o peneiramento, pelo qual peneiras de diferentes aberturas são empilhadas e, após vibração, é medida a massa da parcela de pó retida em cada peneira. As peneiras têm aberturas padronizadas, seguem padrões industriais ou série de Taylor ⁽⁸⁾. Peneiramento de partículas menores prolonga o tempo de

vibração, devido às peneiras terem uma área de abertura reduzida. Uma peneira com aberturas 1 mm tem área aberta proporcional a 41% da área da peneira, sendo que uma peneira com aberturas de 5 μm a área aberta reduz para apenas 2,4% ⁽⁵⁾.

A microscopia também é utilizada para determinação do tamanho da partícula, nesse a medição e a contagem de partículas é manual. Procedimentos mais avançados utilizam a refração e difração da luz projetada na partícula, especialmente para particulados de dimensões menores que 0,8 μm ⁽⁵⁾⁽⁸⁾.

2.2.3. Superfície livre

A superfície livre se define pela área superficial da partícula e pela sua massa, é expressa em unidade de área por massa. A rugosidade superficial e a forma da partícula afetam a área e essa interfere no processo de sinterização. Quanto maior for a superfície livre, mais elevada será a atividade de consolidação durante o processo de sinterização ⁽⁵⁾⁽⁹⁾.

A superfície livre é analisada pela sua permeabilidade; mede-se a perda de pressão ao passar um fluido viscoso através de uma parede compactada com o pó a ser medido ⁽⁹⁾.

Para o processo de medição por absorção de gás, o pó é exposto a um determinado gás e as superfícies absorvem parte desse gás. O fenômeno é similar à condensação de vapores. O método calcula a superfície que uma molécula de certo gás, geralmente nitrogênio, ocupa para formar uma camada sobre a partícula de pó na temperatura de vaporização. Primeiramente, o gás é mantido junto ao pó em ambiente controlado; posteriormente, é evacuado para um recipiente onde realiza-se a verificação da massa perdida no processo ⁽⁵⁾.

2.2.4. Composição química

Considerando que a amostra do pó tenha a composição química apresentada pelo seu fabricante, o objetivo dessa caracterização é avaliar o grau de impurezas metálicas e não metálicas que estão presentes neste pó. Estas impurezas podem afetar as condições de compactação e sinterização ⁽⁸⁾.

2.2.5. Densidade batida

Densidade batida é definida como a densidade aparente do pó compactada verticalmente por vibração. Essa vibração pode ser obtida manualmente ou automatizada com vibrações de 1,7 a 5 Hz na amplitude de 3 mm. As características tecnológicas que podem ser avaliadas nesse processo são; distribuição de tamanho, formato, massa, fricção entre partículas, parâmetros de deposição (analisando a vibração e o tempo, otimizando-os para aumentar a densidade) e essas características são úteis para o dimensionamento da matriz ⁽⁵⁾.

2.2.6. Velocidade de escoamento (Vazão de Hall)

A velocidade de escoamento se aplica para pós não adesivos, nesse ensaio é possível verificar o tempo em que uma massa de 50 g de pó escoar pelo funil de *Hall*, com faces inclinadas a 60° e uma abertura inferior de Ø 2,5 mm x 5 mm (segundo ISO 4490 e ISO 3932). São fatores de maior influência na velocidade de escoamento: o atrito entre as partículas, a superfície do funil, a densidade e tamanho do pó ⁽⁵⁾.

2.2.7. Compressibilidade

Compressibilidade é um método que informa a densidade do compactado, a densidade antes da sinterização, a curva característica de pressão e de densidade e também a força para ejeção. A norma ISO 3927 recomenda as dimensões para o corpo de prova em que este é compactado com diferentes tensões para projetar o gráfico da densidade ⁽⁵⁾.

2.2.8. Lubrificantes

Apenas em alguns casos os pós são compactados diretamente, pois, geralmente, combinam-se com lubrificantes em uma mistura homogênea ⁽⁵⁾.

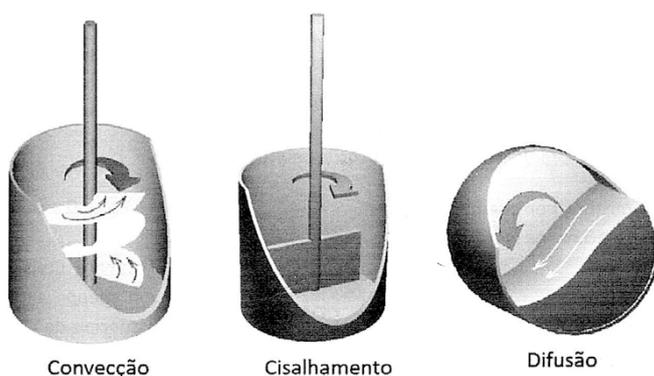
As principais funções dos lubrificantes são reduzir o atrito entre os particulados de pó e entre as paredes da matriz e facilitar a extração do compactado das cavidades da matriz, favorecendo assim a compactabilidade do pó e propiciando maior durabilidade à ferramenta. Os lubrificantes sólidos mais utilizados são a base

de estearatos de cálcio, estearato de zinco, estearato de lítio, ácido esteárico, parafina, cera e o bissulfeto de molibdênio que são acrescentados geralmente entre 0,5% a 1,0% sobre a porcentagem da massa total para compactação ⁽⁹⁾.

2.2.9. Métodos para misturas

Os pós e o lubrificante precisam estar misturados homogeneamente para garantir as mesmas características em todo o componente produzido. Os misturadores dividem-se em três métodos físicos mostrados na Figura 4, podendo também estar combinados ⁽¹⁰⁾.

Figura 4 - Mecanismos misturadores ⁽¹⁰⁾



A mistura por convecção se deve pela transferência de grupos adjacentes de partículas de uma posição a outra. A pá no formato de hélice ou similar transfere as partículas das posições inferiores para as superiores ⁽¹⁰⁾.

O processo de mistura por cisalhamento ocorre pela contínua divisão e escoamento do pó sobre os planos inclinados, esses arrastados para outras posições do lote de pó ⁽¹⁰⁾.

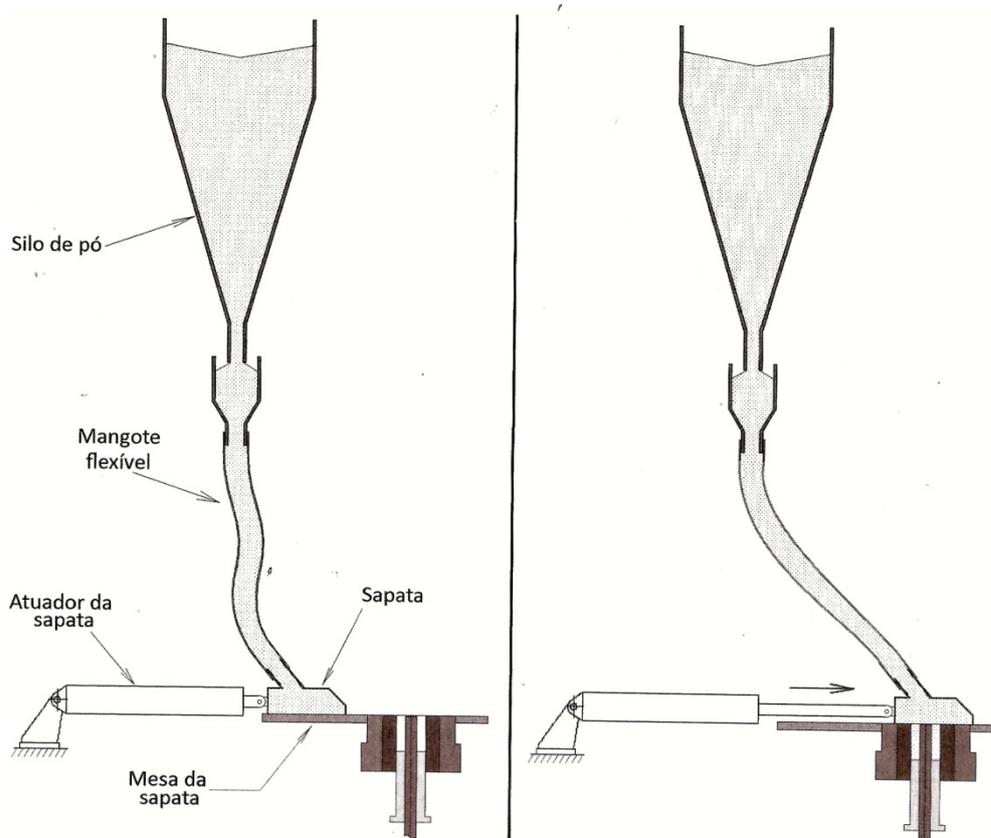
A mistura por difusão ocorre pela movimentação individual das partículas dentro do lote de pó. Um plano inclinado da camada superior de pós induz o escoamento pela superfície, essa que constantemente é reposta pela rotação do misturador ⁽¹⁰⁾.

O tempo de mistura e o preenchimento do misturador devem ser controlados, pois o excesso ou falta de ambos irá afetar negativamente o resultado final ⁽¹⁰⁾.

2.3. COMPACTAÇÃO

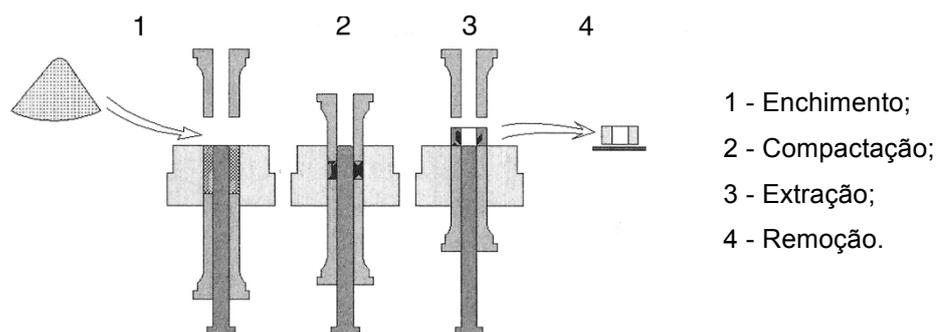
Compactação é a primeira etapa para a consolidação dos pós, unindo esses com a aplicação de pressão ou não, no formato da matriz, chamado peça verde. A peça verde possui baixa resistência mecânica e deve ser manuseada com cuidado para não danificar, pois pode ocasionar trincas ou fraturas internas ⁽⁵⁾ ⁽⁸⁾.

Figura 5 - Enchimento da matriz ⁽¹⁰⁾



O processo de compactação pode ser dividido em quatro movimentos básicos: o enchimento, a compactação, a extração e a remoção ⁽¹⁰⁾.

Figura 6 - Etapas da compactação ⁽¹⁰⁾



A ferramenta é preenchida com pó, para isso se utiliza sapatas de enchimento com a parte inferior aberta e conectada ao silo por mangueiras flexíveis. A sapata desliza sobre a superfície plana do ferramental até a cavidade da matriz, por gravidade ou por sucção com o deslocamento da ferramenta, o pó desce abastecendo-a e posteriormente retorna a posição inicial ⁽¹⁰⁾.

No processo de extração da peça compactada, esta é removida da matriz com cuidado para não danificá-la, pois apresenta baixa resistência mecânica. A peça, geralmente é removida pela ação do embolo inferior e com o contra apoio do embolo superior para prevenir danos ⁽¹⁰⁾.

Ao final, é realizado o processo de remoção. Nessa etapa a peça se encontra no lado externo das cavidades da matriz e é então movimentado pela própria sapada de abastecimento ou por manipuladores, assim o processo se repete sucessivamente ⁽¹⁰⁾.

2.3.1. Compactação a frio

Compactação a frio ocorre na temperatura ambiente sem adição de calor, há apenas o aquecimento inerente ao processo de compactação. Utilizam-se tipicamente pressões de 100 a 1000 MPa para os pós ferrosos ⁽⁵⁾.

2.3.1.1. Compactação uniaxial

Na compactação uniaxial, utiliza-se uma prensa para induzir pressões no pó. Na compactação simples ação, apenas a parte superior da ferramenta se move e é utilizada para componentes simples e de baixa altura. Em compactados de dupla ação, há também o deslocamento da ferramenta inferior, esse processo desloca a linha neutra, de menor densidade, para o centro da peça, resultando em um compactado de maior densidade e melhores propriedades mecânicas ⁽¹⁰⁾.

2.3.1.2. Compactação isostática

Neste processo de compactação isostática, o pó é colocado dentro de um receptáculo flexível vedado e retira-se o ar interno por sucção, após mergulha-se dentro do vaso de pressão em banho de água ou óleo e é submetido a altas

pressões. As vantagens desse processo estão na capacidade de produzir grandes peças, maior uniformidade na resistência mecânica e densidade, maior resistência verde e possibilidade de compactar materiais duros. Por outro lado, não é um processo de alta produtividade ⁽⁸⁾.

2.3.1.3. Laminação

A laminação foi patenteada pela Siemens em 1902 para a fabricação de tiras de tântalo. Funciona com um par de cilindros posicionados paralelamente, que rotacionam enquanto são abastecidos continuamente por pós. O pó é pressionado contra as paredes dos cilindros, moldando uma tira compactada ⁽⁵⁾.

2.3.2. Compactação a quente

Compactação a quente é o processo que as partes da ferramenta, o pó, as tubulações e todas as partes em contato com o pó são aquecidas. Entretanto chumbo é uma exceção, pois pode atingir a temperatura de fase líquida na compactação a frio ⁽⁵⁾.

2.3.2.1. Uniaxial

Compactação uniaxial a quente é similar ao processo de compactação a frio, contudo o molde é aquecido. As pressões são menores e os moldes fabricados em materiais que suportam maiores temperaturas ^{(5) (8)}.

2.3.2.2. Extrusão

Consiste em extrudar o pó dentro de um recipiente metálico por uma matriz de extrusão. Uma alternativa é a extrusão direta do pó pela matriz, podendo este ter sido pré-sinterizado e compactado previamente ⁽⁸⁾.

2.4. SINTERIZAÇÃO

Considera-se sinterização a operação final de consolidação dos pós. A sinterização pode ser definida como o aquecimento do compactado verde a temperaturas na ordem de $\frac{2}{3}$ a $\frac{3}{4}$ da

temperatura de fusão do metal, que se mantém aquecido por tempo determinado em atmosfera controlada. Observa-se na

Tabela 1 as temperaturas e tempos típicos de sinterização para vários materiais ⁽⁸⁾.

Tabela 1 - Temperaturas e tempos de sinterização ⁽⁸⁾

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
Imãs Anico	1205 - 1300	120 - 150
Ferrites	1205 - 1480	10 - 600
90W-6Ni-4Cu	1345 - 1595	10 - 120
Carboneto de Tungstênio	1425 - 1480	20 - 30
Molibdênio	2055	~120
Tungstênio	2345	~480
Tântalo	~2400	~480

2.4.1. Teoria de sinterização

Os fenômenos que ocorrem no processo de sinterização estão sendo extensivamente estudados já há alguns anos. Há muitas teorias disponíveis a respeito, contudo algumas são conflitantes. É um processo complexo e atualmente não há definição que englobe o teórico e o real ⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾.

A sinterização, em sua base, é considerada um processo de difusão de material no estado sólido ativado termicamente, o que reduz a sua superfície livre pelo crescimento dos contatos das partículas, pela redução dimensional e redução nos poros do componente ⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾.

2.4.1.1. Fenômenos e mecanismos para sinterização

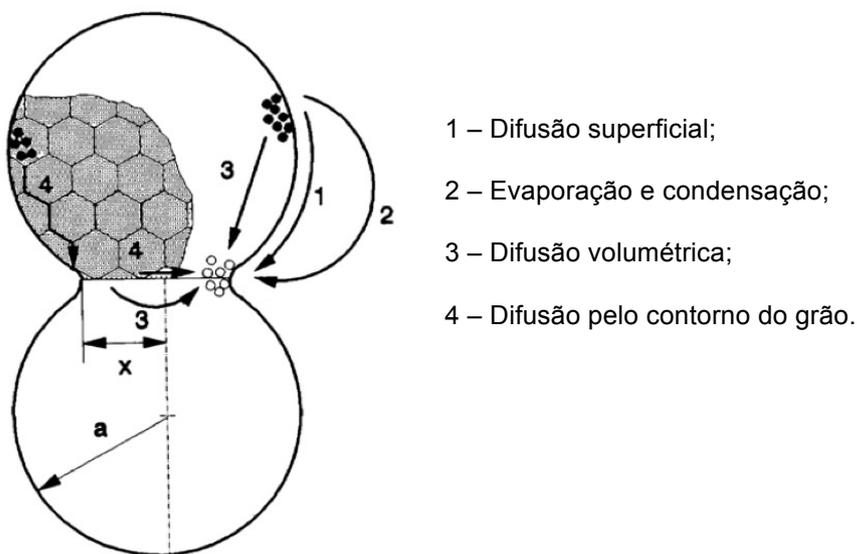
As principais forças motrizes da sinterização são devidas aos processos de redução da energia livre do sistema, entre eles podem-se destacar:

- (a) Redução da superfície livre com a criação de “*necks*” (pescoço de ligação entre uma partícula e a próxima em contato);

- (b) Redução do volume de poros;
- (c) Eliminação das concentrações de defeitos de estrutura em não equilíbrio, provenientes da manufatura do pó;
- (d) Em multicomponentes, a eliminação dos estados de não equilíbrio devido ao gradiente de solubilidade do sólido.

Essas energias produzem quatro efeitos principais de transporte de massa, os quais se observa na Figura 7 ⁽⁵⁾ ⁽⁸⁾.

Figura 7 - Provável mecanismo de crescimento de *neck* ⁽⁵⁾



2.4.1.2. Etapas da sinterização

As etapas de sinterização se separam em três estágios principais: formação de contatos, crescimento do “*neck*” e coalescimento dos poros ⁽⁵⁾.

2.4.1.2.1. Formação dos contatos

Formação dos contatos são as partes das partículas em contato umas com as outras que se transformam em pontes sinterizadas chamadas de *necks*. A distância entre o centro das esferas é levemente reduzida ⁽⁵⁾.

2.4.1.2.2. Crescimento do neck

O crescimento do *neck* em determinada relação de meia largura desse em relação ao diâmetro, a partícula começa a perder seu formato geométrico inicial. Com isso o grão cresce e resulta em nova microestrutura; a maior parte da retração ocorre neste estágio ⁽⁵⁾;

2.4.1.2.3. Coalescimento dos poros

Coalescimento dos poros ocorre com o isolamento dos poros se tornando espaços esféricos. Caso os gases possam se difundir com o metal ocorrerá a densificação, caso contrário, os gases ficarão retidos nos poros ⁽⁵⁾.

2.4.2. Modelo matemático da sinterização

Frenkel, Kuczynski entre outros apresentaram uma teoria com apreciável aproximação experimental. Sobre o modelo matemático da sinterização. Como base, foi considerada uma partícula esférica em contato pontual com outra superfície esférica ou plana. Tal formulação matemática leva em conta as principais etapas de sinterização conforme a Tabela 2 e os seus fatores de correção ⁽⁵⁾.

Tabela 2 - Expoentes de controle de crescimento de *neck* ⁽⁵⁾

Mecanismo	n	m
Fluxo Viscoso ou Plástico	2	1
Evaporação e Condensação	3	1
Difusão Volumétrica	4-5	2
Difusão de Contorno de Grão	6	2
Difusão Superficial	6-7	3

Em metais, o principal método de difusão é o volumétrico, pelo qual a equação pode ser representada:

$$\frac{x^5}{a^2} = k \cdot \frac{\gamma \cdot \delta^3 \cdot D_v \cdot t}{k \cdot T} \quad (1)$$

Crescimento do *neck* em relação ao tempo ⁽⁵⁾

x - Meia distância da largura do *neck*; **a** - Diâmetro da partícula de pó; **K**- Constante relacionada com a geometria da partícula de pó; γ - Tensão superficial do metal líquido; δ - Distância atômica; **d_v** - Coeficiente de difusão volumétrica do metal; **t** – Tempo; **k**- Constante de Boltzman; **T**- Temperatura

2.4.3. Sinterização em fase líquida

No processo de sinterização de fase líquida, ao menos um dos metais entra em fase líquida durante a sinterização, o que promove maior densidade final e menor tempo de sinterização, mesmo com a utilização de pequenas quantidades ⁽⁵⁾.

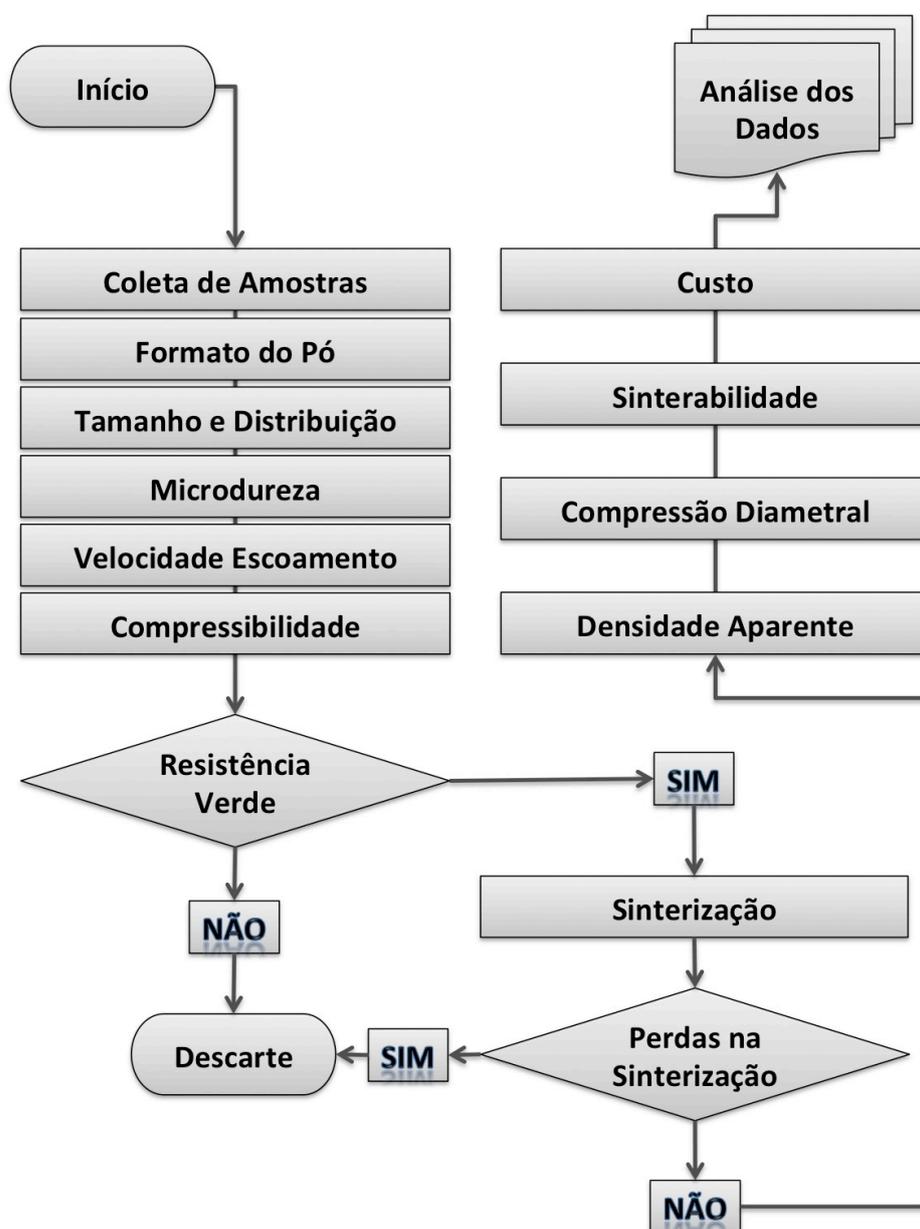
2.4.4. Atmosfera controlada

O controle da atmosfera de sinterização se deve a manutenção das propriedades químicas do material. Essa manutenção remove impurezas e fornece elementos químicos para o material compactado caso seja necessário. Atmosferas de hidrogênio, nitrogênio, amônia dissociada, gás endotérmico, gás exotérmico, hélio, argônio ou vácuo podem ser utilizadas de acordo com cada material ⁽⁸⁾.

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Na Figura 8 mostram-se as sequências das etapas de processamento e caracterização desenvolvidas para atender os objetivos deste trabalho. Com a finalidade de obter resultados prévios, alguns itens da primeira etapa do projeto foram repetidos mais de uma vez. Os resultados preliminares foram importantes para a validação das propostas do estudo e incorporar os ensaios necessários em equipamentos de maior precisão.

Figura 8 - Etapas do projeto



3.1. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

3.1.1. Coleta das amostras de resíduo

Definiu-se a escolha de três empresas que utilizam o mesmo modelo de abrasivo do mesmo fabricante. As amostras foram coletadas em datas diferentes e as empresas diferem na sua atividade principal, sendo jateamento para limpeza ou *shot peening*. Dessa forma obtiveram-se maior variedade dos modelos de resíduos e ampliadas as possibilidades de análises desse trabalho. As amostras foram limpas com a utilização de imã, removendo as sujidades não magnéticas, obtendo uma amostra com maior proporção de metálicos.

Tabela 3 - Coleta das amostras

Amostra	Empresa	Atividade	Data da coleta
1	Guerra	Limpeza e preparação de superfície para pintura	Abril 2011
2	Eaton	Jateamento de <i>Shot Peening</i> de engrenagens	Novembro 2010
3	Endosul	Limpeza e preparação de superfície para pintura	Novembro 2014

3.1.2. Formato do pó

As análises foram realizadas com imagens digitais obtidas a partir de microscopia óptica. Foi utilizado o microscópio LA GE5 do fabricante Yago. Para este procedimento, as amostras de pó foram embutidas em uma prensa com baquelite e curadas à quente. A pressão de embutimento foi mantida em aproximadamente 14,7 MPa pelo período de 15 min. Posteriormente a amostra foi polida. Não foi realizado ataque químico no corpo de prova.

3.1.3. Tamanho e distribuição de tamanho

O diâmetro esperado das amostras de resíduo é $\frac{1}{4}$ do diâmetro do abrasivo novo para o processo de preparação de superfície, e $\frac{1}{3}$, para o processo de jateamento por *shot peening*. O modelo de abrasivo desse estudo é o esférico S-280 de dureza H (40 ~ 51HRC) do fabricante IKK do Brasil, produzido dentro das normas SAE J-827⁽¹⁶⁾, SAE J-1993⁽¹⁶⁾ e SAE J-444⁽¹⁷⁾ que conforme as normas, encontra-se com 85% das partículas com diâmetro entre 0,7 a 1,0 mm quando novo.⁽¹⁸⁾

Caracterizaram-se as amostras em relação ao tamanho e distribuição de tamanho por peneiramento manual. As peneiras utilizadas atendem a norma SAE J-444, nos tamanhos 1400, 1180, 850, 630, 425, 300, 212, 150, 106, 53 μm . Para avaliação da massa retida por cada peneira foi utilizado balança com 0,1 grama de fundo de escala. Peneiraram-se as amostras manualmente pelo período de 5 min. Os valores foram transferidos para tabelas computacionais e construídos gráficos. Utilizou-se de cálculo da média aritmética para determinação do tamanho médio de partícula.

Figura 9 - Peneiras com sequência normalizada conforme SAE J-444



Para a análise por imagem, utilizaram-se as imagens digitais obtidas a partir de microscopia óptica do microscópio do fabricante Nikon, disponível no laboratório LAMEC da UCS. Determinou-se a distribuição de tamanho com a utilização do programa de computador *ImageJ* de código aberto fornecido pela imagej.net. Utilizou-se a medida do diâmetro médio de *Feret*, esta sendo definida e calculada pelo programa como a maior distância paralela entre lados opostos de uma partícula⁽²⁹⁾.

3.1.4. Microdureza

Devido ao particulado apresentar tamanho reduzido, a dureza foi determinada na escala micro (microdureza), utilizando o equipamento microdurômetro do fabricante Shimadzu, modelo HMV-2T disponibilizado no LAMEC da UCS. Equipado com penetrador de diamante de base quadrada com ângulo entre faces de 136 °, com carga de 100 g pelo período de 15 s, conforme recomendações ISO 6507⁽¹⁹⁾. Posteriormente a área de impressão foi medida em microscópio e a dureza calculada segundo abaixo:

$$HV = \frac{1,8544 \cdot F}{d^2} \quad (2)$$

Dureza Vickers⁽²⁰⁾.

HV–Dureza Vickers;**1,8544**–Constante de correlação; **F**–Força aplicada (kgf); **d**–Distância entre os vértices diagonais da impressão (mm).

Utilizou-se a relação de dureza e limite de resistência à tração típica de aços para compreender os efeitos da alta dureza da amostra na compactação.

$$LRT = 3,45 \cdot HB \quad (3)$$

LRT–Limite de resistência mecânica à tração;**3,45**–Constante de conversão; **HB**–Dureza Brinell

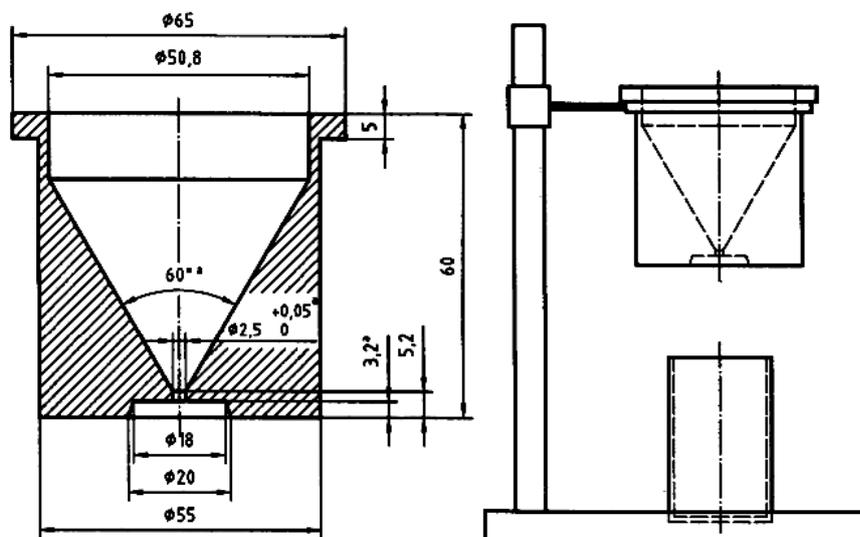
As medidas das diagonais da impressão de dureza foram analisadas pelo próprio equipamento e convertidas em dureza *Vickers*.

Figura 10 - Ensaio de microdureza



3.1.5. Velocidade de escoamento

Para o ensaio de escoabilidade dos pós, utilizou-se o dispositivo baseado na norma ISO 4490⁽²¹⁾, denominado funil *Hall*. O mesmo foi produzido em alumínio usinado conforme as dimensões constadas na norma. As medições de tempo foram obtidas com cronômetro digital. Repetiu-se o ensaio três vezes com uma amostra de 50 g.

Figura 11 - Dimensões do funil Hall⁽²²⁾

3.1.6. Compressibilidade

O ensaio de compressibilidade foi realizado no equipamento Emic DL20000 com a célula Trd12 e os valores transferidos para planilhas computacionais. Para cada amostra de pó foram realizados três diferentes métodos de ensaio:

- I. Compactação sem a adição de lubrificante;
- II. Compactação com a adição de 0,4% de lubrificante em massa ⁽²⁴⁾;
- III. Compactação com tratamento térmico de alívio de tensões das amostras e adição de lubrificante.

Os procedimentos foram executados em duas etapas, com diferentes alturas de enchimento da matriz:

- Altura de enchimento de 28,8 mm;
- Altura de enchimento de 7,76 mm.

Com a repetição do ensaio em diferentes alturas, verificou as influências do atrito entre os pós e com as paredes da matriz;

A matriz utilizada na compactação tem característica uniaxial com diâmetro do êmbolo de 10,00 mm. Na primeira etapa, a montagem forneceu na uma cavidade com altura de 28,8 mm para enchimento. Todas as amostras de pó foram transferidas para a cavidade do êmbolo manualmente. Para isso, utilizou-se um recipiente de formato cilíndrico com furação passante, apropriado para simular a

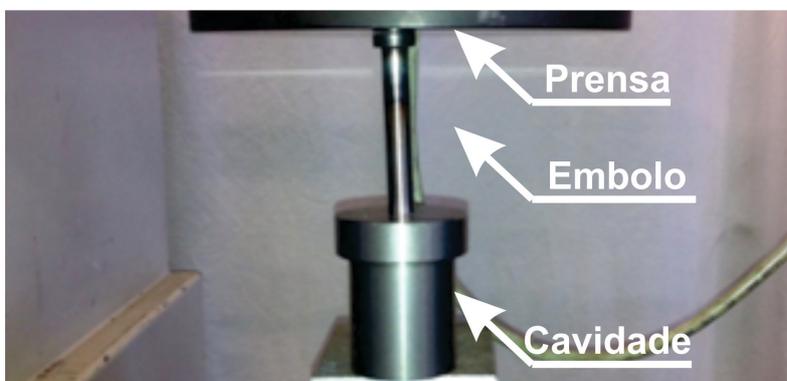
sapata de uma possível automatização desse processo conforme apresentado na Figura 12. Não utilizou-se o método de “batida” na matriz para densificar o compactado devido à dificuldade de garantir estabilidade na repetição desse ensaio.

Figura 12 - Recipiente de enchimento da matriz



O ensaio foi executado no equipamento Emic DL20000 com a célula Trd12 e 47.121 N de força gerando uma tensão de compactação de 600 MPa na amostra. A força foi aplicada com taxa de carregamento de 490,3 N/s na superfície superior do compactado.

Figura 13 - Matriz uniaxial



Realizou-se a compactação sem lubrificante objetivando-se a redução de custo e de etapas de processo. Nesse método não se utilizou lubrificante no pó nem nas paredes da matriz.

Na compactação com lubrificante, misturaram-se as amostras com lubrificante sólido de estearato de zinco. O lubrificante foi peneirado removendo partículas maiores que 150 μm e depois adicionado à mistura na proporção de 0,4% em massa. Homogeneizou-se a mistura em misturador tipo “Y”, com rotação aproximada de 80 rpm pelo período de 45 min. Para esse ensaio, foi confeccionado misturador com a utilização de tubos de PVC adquirido no mercado local e montado em furadeira

manual.

Figura 14 - Misturador "Y" montado em furadeira



No último método, os pós foram tratados termicamente com alívio de tensões para diminuir a dureza das partículas de pó.

Durante processo de jateamento a granalha é arremessada a altas velocidades, impactando na peça e nas partes internas do equipamento, ocorrendo o encruamento. Esse trabalho à frio aumenta a dureza das partículas de pó; devido a isso as amostras foram tratadas termicamente pelo processo de alívio de tensões com a finalidade de reduzir a sua dureza.

O alívio de tensões foi realizado na temperatura de 700°C, pelo período de 1 h e o resfriamento se procedeu em duas etapas. Resfriou-se com atmosfera controlada com os pós dentro do forno por 8 h até a temperatura de 200°C. Continuou o resfriamento sem atmosfera controlada com os pós dentro do forno por mais 7 h até atingir a temperatura de 60°C. Posteriormente as amostras foram resfriadas ao ar até a temperatura ambiente.

Realizaram-se três ensaios de compactação para cada amostra recozida no laboratório LAMEC da UCS no equipamento Emic DL20000 com a célula Trd12. Demais corpos de prova foram obtidos na compactação em prensa manual e a pressão foi controlada visualmente por relógio de pressão manométrica, esse com fundo de escala de 200 kgf.

Figura 15 - Equipamento Emic DL20000



Figura 16 - Equipamento manual para compactação



Em uma etapa final, repetiram-se os ensaios com a alteração da altura de enchimento da matriz para 7,76 mm. Utilizaram-se as amostras tratadas termicamente e demais condições foram mantidas conforme procedimento de compactação com altura de enchimento da matriz de 28,8 mm.

3.1.7. Sinterização

A empresa LR Meneghel disponibilizou o forno do fabricante Tecklabor modelo mufla digital microprocessado com uma rampa e um patamar com temperatura máxima 1200°C e mostrador digital sem atmosfera controlada. Devido ao forno mufla não possuir atmosfera controlada, construiu-se um tubo cilíndrico de aço

inoxidável ABNT 403 com um dos lados fechado e outro com tampa de acesso. Em uma das tampas contem tubulação para alimentação de gás inerte argônio com índice de pureza de 99,7%. Para garantir o fluxo positivo de gás para a câmara, foi instalado manômetro regulador de vazão e esta regulada para 5 L/min.

Figura 17 - Câmara com atmosfera protetora



Figura 18 - Método para insuflar o gás protetor



A sinterização ocorreu na temperatura de 1200°C pelo período de 60 min. O preaquecimento foi realizado com as amostras dentro da câmara de aço inoxidável e imediatamente postas dentro forno, esse que já se encontrava na temperatura de 1200°C. O resfriamento ocorreu com a retirada da câmara de dentro do forno e alimentação de gás argônio até atingir a temperatura de 80°C. Após as amostras foram removidas da câmara de atmosfera controlada.

Os corpos de prova de menor altura foram sinterizados em separado. Utilizou-se a taxa de aquecimento controlada de aproximadamente 18°C/min. Primeiramente, elevou-se a temperatura até 500°C para remover o lubrificante. Essa temperatura permaneceu estabilizada pelo período de 30 min e posteriormente prosseguiu o processo de aquecimento até 1200°C para a sinterização.

As temperaturas foram medidas com a utilização de pirômetro digital do

fabricante *Reytek*, com amplitude de medição de -50 até 380°C; com o medidor do controlador montado no forno mufla e as demais temperaturas não possíveis de medição foram estimadas conforme tendência e projeção em gráficos.

3.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

3.2.1. Densidade aparente

As amostras foram medidas antes e após sinterizadas, relacionadas sua densidade com densidade teórica de um corpo totalmente maciço. Verificando a efetividade dos processos de compactação e possíveis alterações de densidade durante a sinterização. As dimensões dos corpos de prova foram medidos com a utilização de paquímetro digital com fundo de escala de 0,01 mm e sua massa utilizando balança digital com fundo de escala de 0,01 g.

Analizou-se imagens digitais obtidas a partir de microscopia óptica de amostras embutidas e preparadas no laboratório de metalografia da UCS. Obtendo-se o valor de porosidade das amostras. Utilizou-se o programa de computador *ImageJ* sendo que as imagens foram convertidas dentro do programa e analisadas.

3.2.2. Ensaio de compressão diametral

Para a determinação da resistência do corpo de prova sinterizado, adotou-se o método de ensaio de compressão diametral. Este ensaio é realizado com a compressão de um corpo de prova sinterizado ou não, sendo este de formato cilíndrico maciço ou anelar. Para este ensaio foram utilizadas as recomendações conforme norma ANSI/ASTM D4123 – 87, que propõem a formulação matemática abaixo para transformar o resultado em tensão de tração.

$$S_{dc} = \frac{2.P}{(D).t} \quad (4)$$

Correção para tensão de tração ⁽²⁶⁾.

S_{dc}– Resistência à tração pelo método de compressão diametral (MPa) ;**P**–força aplicada (N); **D**– Diâmetro externo (mm).

Realizou-se esse ensaio nos laboratórios LAMEC da UCS no equipamento

Emic DL20000 com gravação em vídeo câmera de alta velocidade (240 *frames/s*), para posterior verificação das condições de propagação da trinca. A amostra foi posicionada do modo que a força é aplicada radialmente no sentido de compressão do corpo de prova.

3.2.3. Sinterabilidade

Com o objetivo de verificar os principais fenômenos sinterabilidade, utilizou-se de microscopia óptica e imagem digital. O corpo de prova foi embutido utilizando-se os mesmos métodos da etapa 3.1.2 com ataque químico por imersão. Empregou-se a solução química de Nital 5% pelo período aproximado de 8 s e posteriormente lavou-se com solução de álcool.

3.2.4. Custo da transformação

Na análise do custo deste processo foi calculado o consumo energético para a sinterização de 1kg de aço. Em adição, o valor que seria obtido no recebimento deste resíduo e somado com o valor estimado de venda de 1 kg de sucata de aço⁽²⁵⁾. Utilizaram-se dois métodos de cálculo de consumo energético para a sinterização. O primeiro método com o coeficiente de calor específico do aço à pressão constante e o segundo conforme recomendações de empresas fabricantes de fornos; esse último, simplificado com a utilização direta da energia térmica necessária para aquecer o aço a determinada temperatura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O principal objetivo deste estudo é determinar uma condição possível e economicamente viável para a transformação do resíduo do processo de jateamento, por granalha de aço-carbono, em um corpo com continuidade de matéria. Para este estudo, foram utilizadas as técnicas de metalurgia do pó e o corpo de prova obtido poderá ser utilizado como matéria-prima para o processo de fundição.

4.1. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

4.1.1. Coleta das amostras

As amostras coletadas foram tabuladas e as atividades principais do uso do abrasivo identificadas. As amostras apresentaram quantidade menor que 1% em massa de sujidades, essas foram removidas pelo imã e descartadas.

4.1.2. Formato do pó

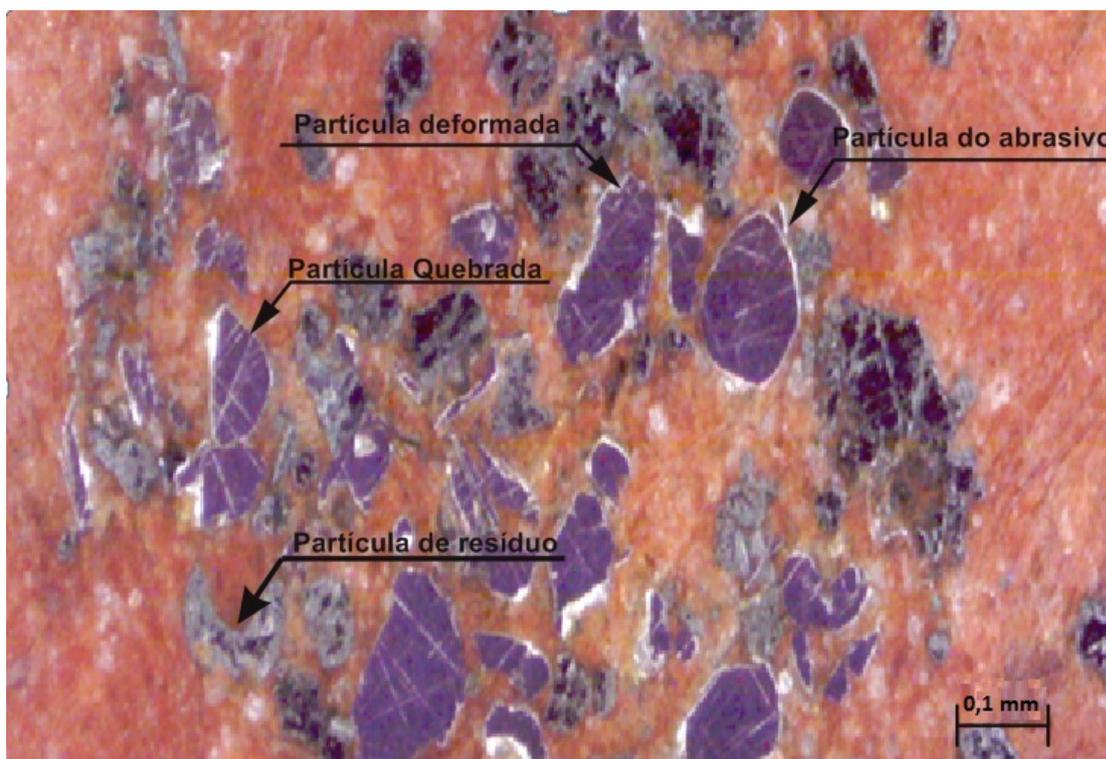
Na Figura 19 é possível verificar regiões sem geometria definida, que apresenta característica de partícula deformada, fraturada ou até mesmo sujidades metálicas. Características essas, da quebra das partículas de granalha durante o processo de jateamento.

Devido à variedade de formatos de partículas, verifica-se na imagem que não é possível definir um formato único do pó. Esse se situa entre a geometria quase totalmente esférica, passando por geometrias de esferas com partes deformadas e fraturadas. Observa-se também, partículas deformadas e partículas de resíduos.

Em adição, verifica-se na Figura 21, Figura 22 e na Figura 23 o formato irregular das partículas, essas de menor tamanho e de formato irregular, com grande presença de quebras.

Não foram possíveis analisar por este método, as amostras n.1 e n.3, devido a dificuldade de ancoramento das partículas no baquelite durante o manuseio nas operações de lixamento e polimento.

Figura 19 - Microscopia da amostra n. 2 em baquelite sem ataque químico



4.1.3. Tamanho e distribuição de tamanho

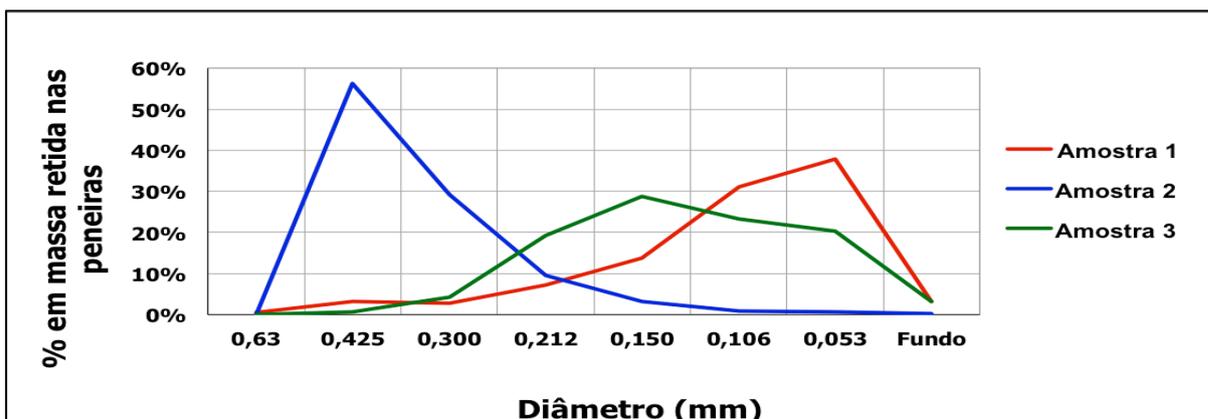
Observa-se que a amostra do resíduo n.2 da Tabela 4 tem maior o diâmetro médio comparado com as outras duas amostras. Devido ao fato da granalha ser utilizada para o processo de jateamento *shot peening* em que nesse processo, o abrasivo é descartado com maior diâmetro médio.

A Tabela 4 e a Figura 20 apresentam o resultado do peneiramento das três amostras.

Tabela 4 - Distribuição de tamanho

Abertura		Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
Mesh	(mm)	Massa [g]	%	Massa [g]	%	Massa [g]	%
30	0,63	0,5 g	0,5%				
40	0,425	3,2 g	3,2%	56,7 g	56%	0,6 g	1%
50	0,300	2,8 g	2,8%	29,4 g	29%	4,3 g	4%
70	0,212	7,1 g	7,2%	9,6 g	10%	19,3 g	19%
100	0,150	13,6 g	13,8%	3,3 g	3%	28,8 g	29%
140	0,106	30,7 g	31,2%	0,9 g	1%	23,3 g	23%
270	0,053	37,4 g	38,0%	0,7 g	1%	20,3 g	20%
Fundo	Fundo	3,2 g	3,2%	0,2 g	0%	3,2 g	3%
Total		98,5 g	100%	100,8 g	100%	99,8 g	100%
Tamanho médio		0,119 mm		0,354 mm		0,140 mm	

Figura 20 - Distribuição de tamanho



No procedimento de análise por imagem ampliada, verificou-se certa dificuldade devido à proximidade das partículas umas com as outras. A análise realizada pelo programa *ImageJ* compara a diferença de contraste entre a partícula e o fundo da imagem; contudo, as partículas em contato proporcionam a falsa projeção de uma única partícula ao programa, ocorrendo a medição de duas partículas ou aglomerados e contabilizando como uma partícula. Com o objetivo de reduzir essa interferência, configurou-se o programa para descartar os valores que pudessem apresentar partículas em contato. As imagens com alto contraste são apresentadas na Figura 21, Figura 22 e na Figura 23.

Figura 21 - Amostra n.1 com ampliação de 63x

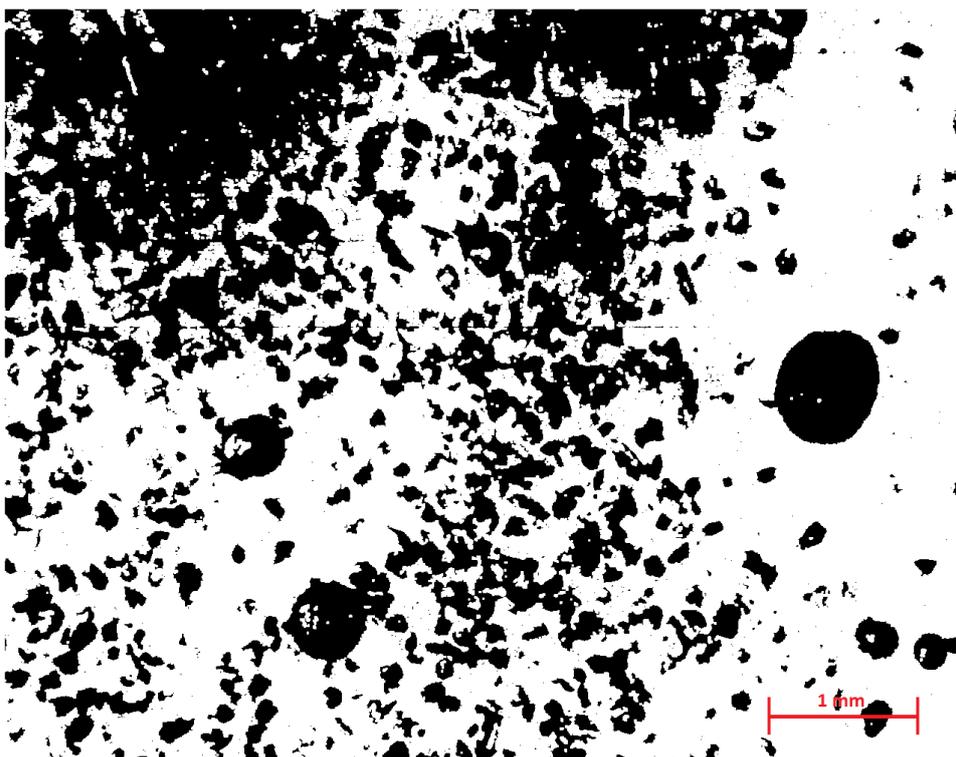


Figura 22 - Amostra n.2 com ampliação de 63x

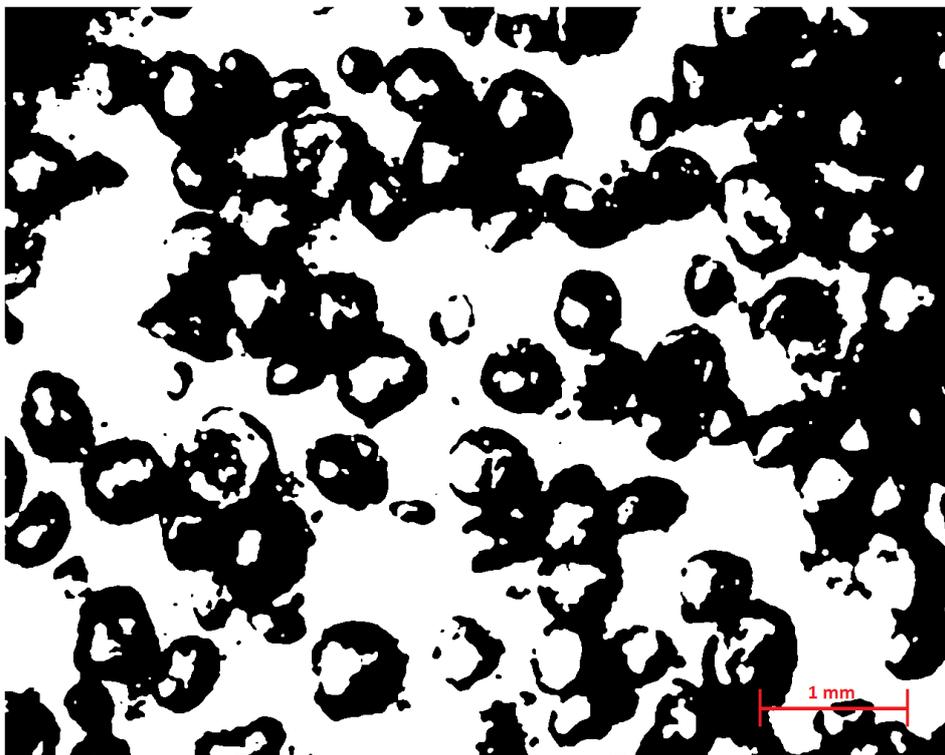
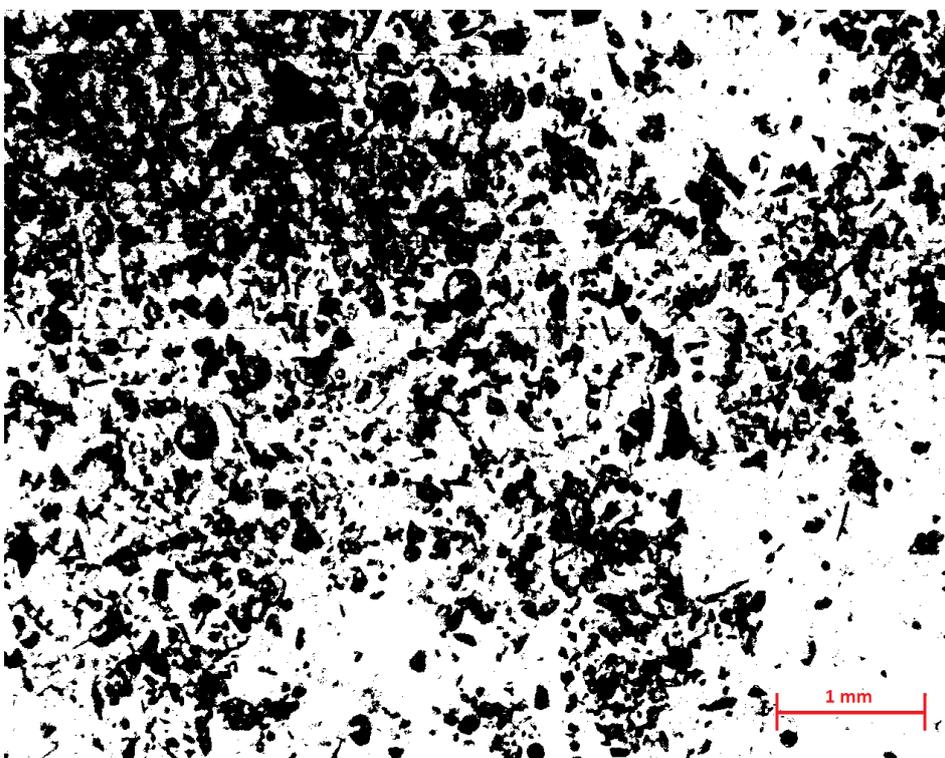


Figura 23 - Amostras n.3 com ampliação de 63x



Observam-se nas imagens aglomerados de partículas, essas foram removidas da contagem automatizada. Utilizou-se o diâmetro de *Feret* como forma de verificar

o tamanho médio da partícula. A amostra n.2 não pode ser analisada devido ao constante contato entre as partículas inviabilizando a contagem pelo *ImageJ*. Tabelaram-se os valores conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Diâmetro médio da partícula

Amostra	Quantidade de partículas analisadas	Diâmetro de <i>Feret</i>
1	520	0,114 mm
2	-	-
3	732	0,137 mm

É possível verificar a semelhança dos valores encontrados pela análise de imagem com os valores encontrados pelo peneiramento manual. Contudo, o método de análise de imagem pode resultar em valores muito aquém dos resultados reais. Isso se deve pelo efeito de aglomeração das partículas. Para a correção da imagem na existência desse efeito, demanda-se extensa intervenção por parte do laboratorista buscando atenuar os erros causados.

O método de análise por imagem apresentou-se como uma ótima ferramenta e forma de comparar o peneiramento manual. Sendo possível obter outras características da amostra dos pós, como o formato da partícula. Contudo a aplicação desse método demanda muita intervenção e capacitação do laboratorista, ampliando as chances de erro humano.

4.1.4. Microdureza

Verifica-se na Tabela 6 os valores das medidas do ensaio de microdureza da amostra n.1.

Observam-se altos valores de dureza, estes incomuns em pós de destinados à metalurgia do pó. Utilizou-se a relação de dureza e LRT típico para aços, obtendo valores de resistência à tração variando entre 1600 MPa à 1850 MPa.

Atribui-se esta maior dureza e resistência mecânica da amostra devido à propriedade intrínseca que a partícula de granalha deve ter para sua utilização como abrasivo. Em adição, as deformações plásticas obtidas durante o processo de jateamento aumentam a dureza da partícula.

Tabela 6 - Microdureza da amostra n. 2

		Dureza	
		HV	HRC
1º	Medida	540 HV	51,8 HRC
2º	Medida	546 HV	52,1 HRC
3º	Medida	474 HV	42,2 HRC
4º	Medida	498 HV	49,0 HRC
5º	Medida	602 HV	55,4 HRC
6º	Medida	564 HV	53,2 HRC
7º	Medida	570 HV	53,6 HRC
8º	Medida	552 HV	52,5 HRC
VALORES DESCARTADOS			
	MAIOR	602 HV	55,4 HRC
	MENOR	474 HV	42,2 HRC
MÉDIA		545 HV	52,0 HRC

4.1.5. Escoabilidade

A velocidade de escoamento das amostras n.1 e n.2 apresentaram valores estáveis e confiáveis. Contudo a amostra n.3 não obteve escoabilidade, essa permaneceu no funil mesmo com a excitação do mesmo por leves batidas vibratórias, apenas uma parcela escoava e logo em seguida parava. Utilizando-se desse ensaio pode ser verificado a dificuldade da automação com a utilização da amostra n.3, sendo que esta não escoará pelas tubulações do equipamento quando este concebido.

Tabela 7 - Velocidades de escoamento

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
1º Medida	38,5 s	27,9 s	
2º Medida	38,7 s	27,4 s	Não Escoou
3º Medida	38,1 s	27,5 s	
MÉDIA	38,5 g	27,5 g	0,0 g
DESVIO PADRÃO	0,2 s	0,2 s	0,0 s

Figura 24 - Ensaio de Escoabilidade



4.1.6. Compressibilidade

Dividiram-se os ensaios em duas etapas com diferentes alturas de enchimento da matriz.

O primeiro método de compactação sem adição de lubrificante foi ineficaz para este estudo. Durante compactação dos corpos de prova apenas a amostra n. 1 permaneceu com o formato da matriz após a sua retirada. As demais amostras apresentaram baixa resistência a verde para seu manuseio obtendo resultados menos satisfatórios. Essas perderam completamente seu formato geométrico ao serem retiradas da matriz.

Figura 25 - Amostra n. 1 , compactada sem lubrificante



Na compactação com lubrificante a amostra n. 1 apresentou características semelhantes ao método sem lubrificante, tendo resistência a verde moderadamente superior. A amostra n. 2 não obteve resistência a verde suficiente para poder ser manuseada. A amostra n. 3 demonstrou baixa resistência a verde com as partículas do pó se desprendendo facilmente do corpo, não permanecendo com estabilidade dimensional após sua retirada da cavidade conforme apresentado na Figura 26

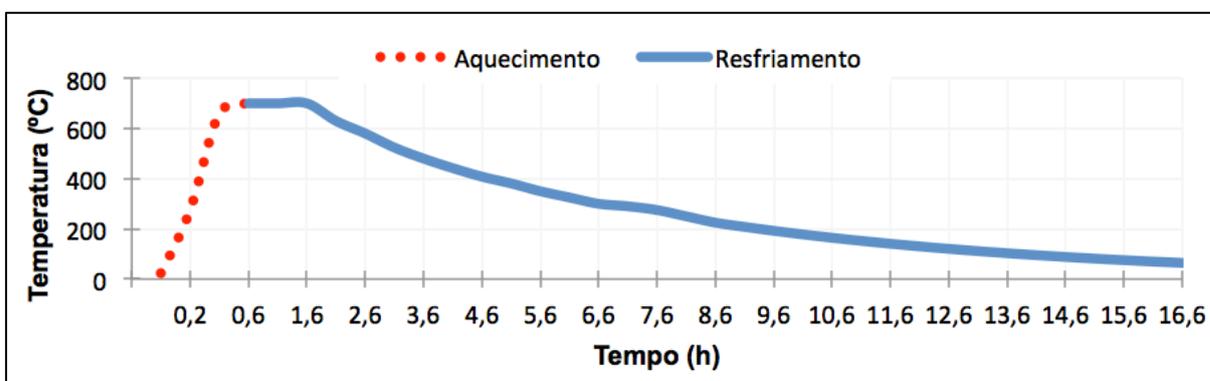
Figura 26 - Amostra número 3, compactada com lubrificante



Utilizou-se o tratamento térmico de alívio de tensões das amostras demonstrado na Figura 27 e posterior adição de lubrificante.

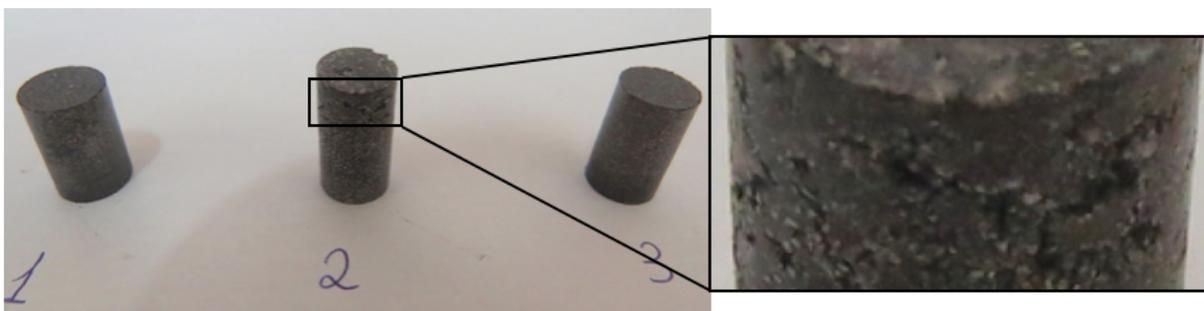
Este método apresentou resultados satisfatórios sendo possível manter o corpo compactado com maior resistência a verde e favorável ao seu manuseio. Os corpos compactados verde mantiveram estabilidade dimensional na retirada da matriz, conservando sua integridade no manuseio e transporte para posterior sinterização.

Figura 27 - Temperaturas do processo de alívio de tensões



As amostras n. 1 e n. 3 demonstraram razoáveis características de resistência a verde, indicando ser este o método mais promissor dentre os três ensaios realizados.

Figura 28 - Amostras compactadas com alívio de tensões e lubrificante



A amostra n. 2 apresentou a menor resistência a verde, sendo que apenas os primeiros corpos compactados mantiveram estabilidade dimensional de forma frágil. Trincas e crateras são visíveis pela superfície conforme apresentado na Figura 28. É possível visualizar que o lubrificante atuou como aglomerante no qual manteve a geometria do corpo de prova. Este excesso de lubrificante pode ser atribuído ao problema de segregação da mistura durante o processo manuseio e enchimento da matriz. Os resultados numéricos dos ensaios de compactação foram transferidos para planilhas e gráficos. Observa-se que durante a compactação não ocorreu a densificação por deformação plástica, podendo ser confirmado nos gráficos a seguir, onde as linhas pressão seguem uma trajetória linear após a reorganização dos pós nos primeiros 10 a 20 s do ensaio à pressões até 150 MPa.

Figura 29 - Compactação sem lubrificante

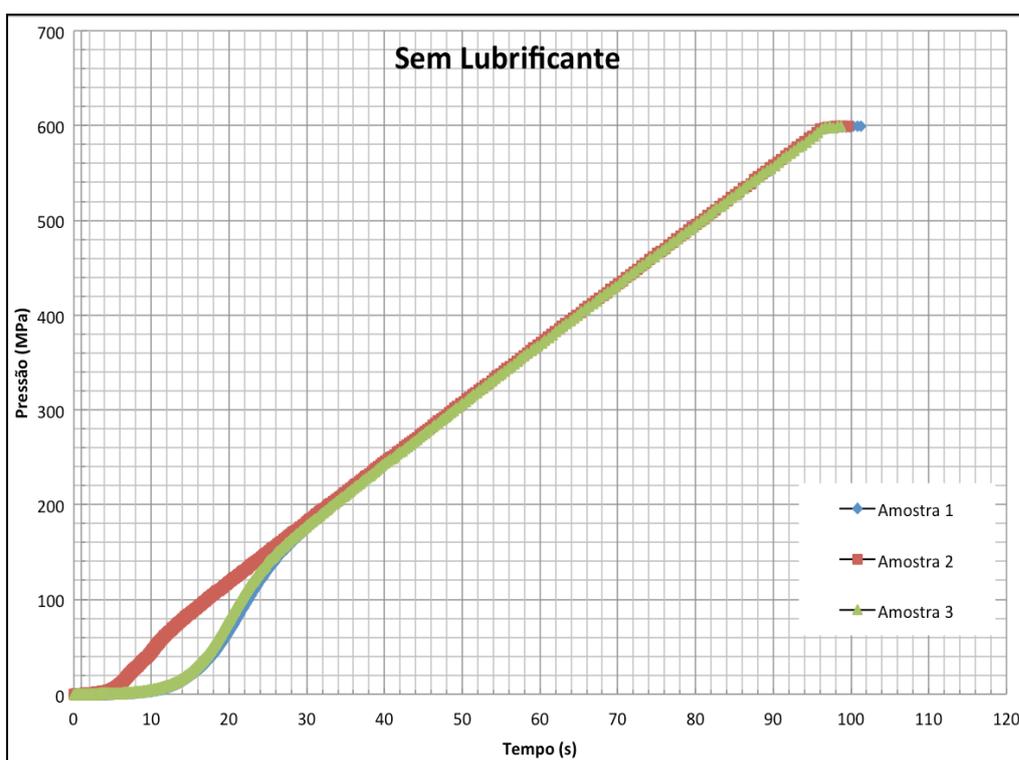


Figura 30 - Compactação com lubrificante

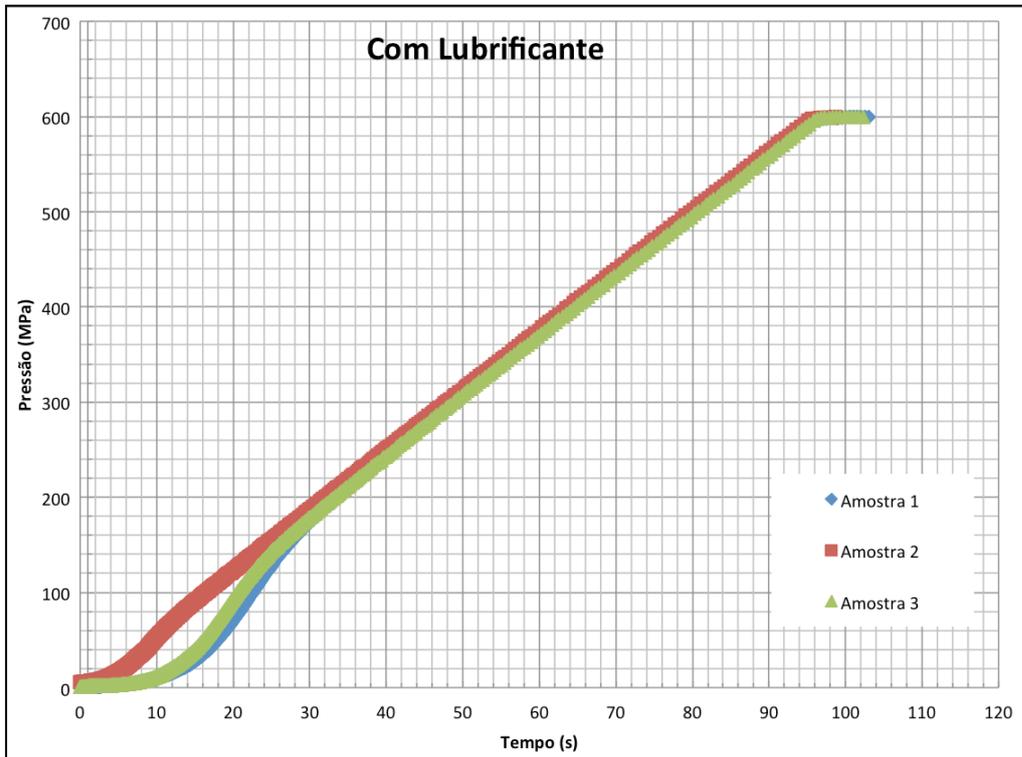
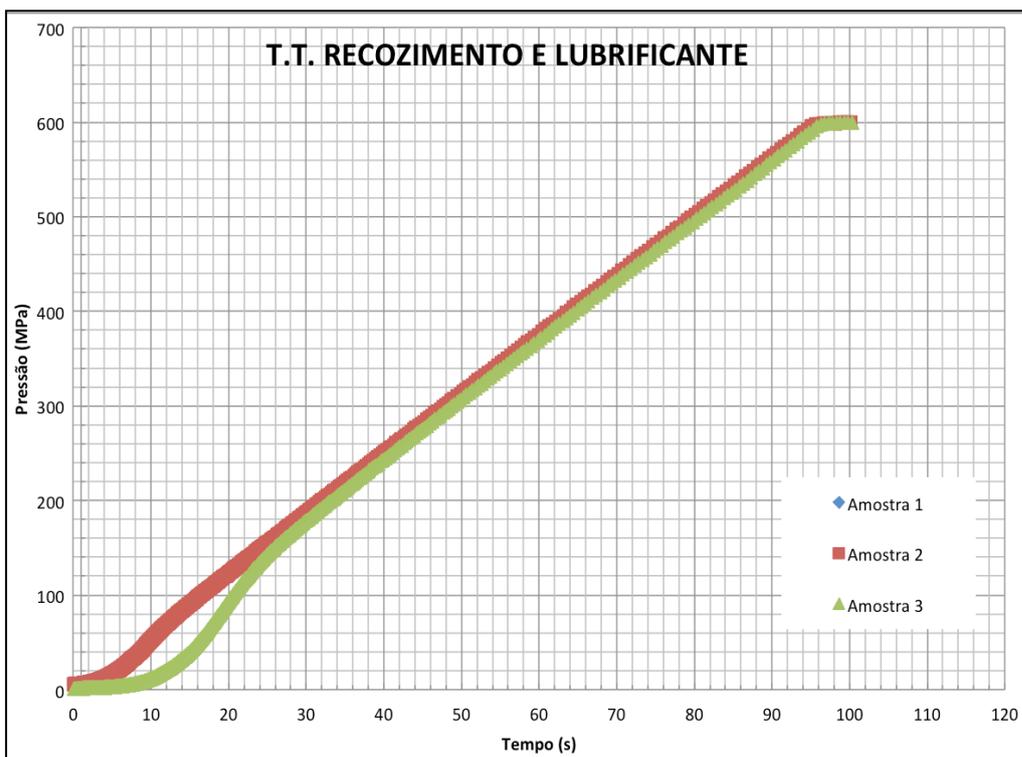
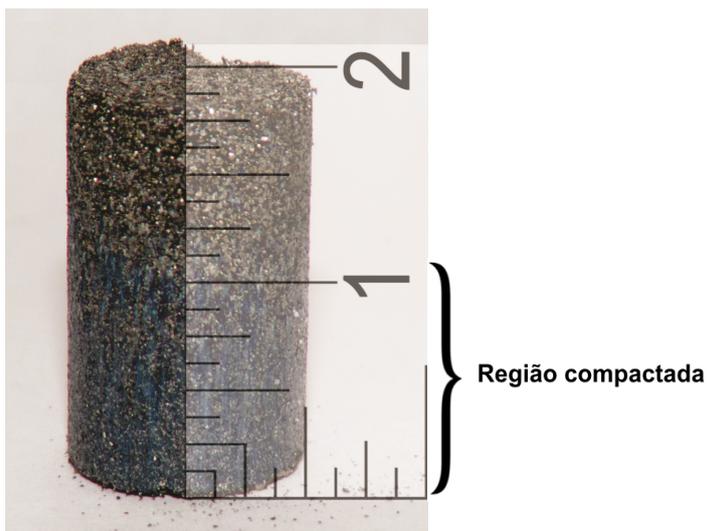


Figura 31 - Compactação com alívio de tensões e lubrificante



Durante a compactação das amostras foi possível verificar a linha divisória de compactação do corpo de prova, que sugere uma compactação não uniforme. A característica da matriz uniaxial, o tamanho dos corpos de prova e o material trabalhado têm fortes influências neste aspecto. A Figura 32 apresenta essa linha na altura de aproximadamente 10,1 mm do corpo verde.

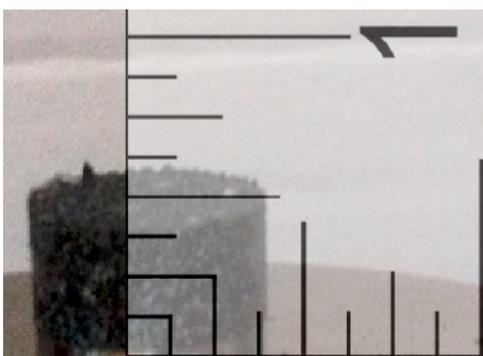
Figura 32 - Linha de densificação do corpo de prova



4.1.6.1. Segunda etapa de compactação

Buscando reduzir o atrito das partículas com as paredes da matriz, utilizou-se uma segunda etapa de compactação com a altura de enchimento de 7,76 mm. Essa nova condição foi repetida com o pó tratado termicamente devido apresentar os melhores resultados nos ensaios anteriores. Demais condições permaneceram constantes. A repetição deste ensaio forneceu resultados mais precisos, confiáveis e sem a ocorrência da linha divisória de densificação.

Figura 33 - Linha de compactação do corpo de prova



4.1.7. Sinterização

- **Primeira etapa de sinterização**

Uma chapa metálica serviu como base para conduzir as amostras para dentro da câmara protetora. Essa chapa encontrava-se na temperatura aproximada de 60°C e ao colocar as amostras sobre essa ocorreu a fusão antecipada do lubrificante. Este derretimento ocasionou a perda do dimensional de algumas amostras, conforme apresentado na Figura 34.

Figura 34 - Fusão precoce do lubrificante



No momento da colocação da base com as amostras dentro da câmara protetora, essa se encontrava na temperatura aproximada de 250°C houve um princípio de incêndio que só pode ser controlado após a insuflação de argônio dentro da câmara; essa posta dentro do forno e fechado.

Figura 35 - Combustão do lubrificante em contato com a atmosfera (~250°C)



A Figura 36 apresenta a rampa de aquecimento e resfriamento medida no controlador do próprio forno e por pirômetro digital.

Figura 36 - Temperaturas de sinterização

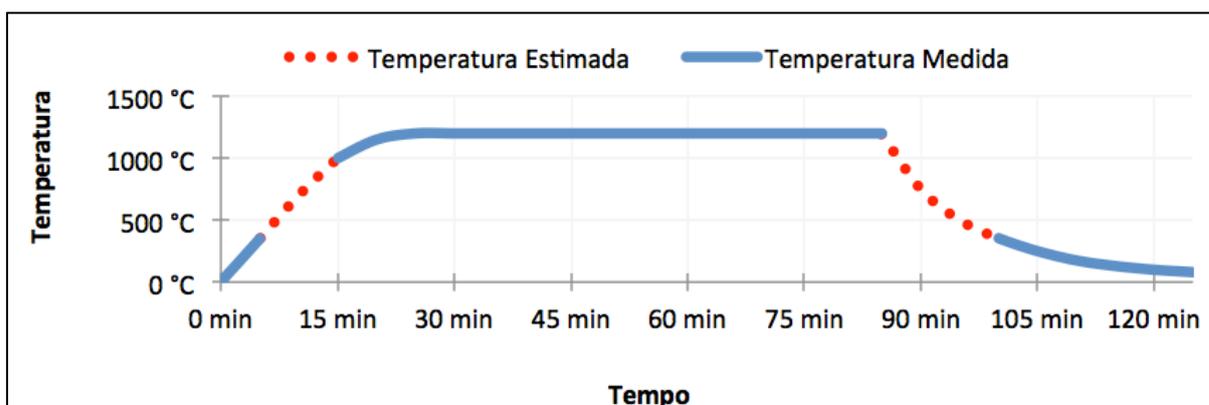


Figura 37 - Forno mufla Tecklabor



Verificou-se variação dimensional nas amostras sinterizadas, sendo as amostras n. 2 o caso mais desfavorável. Essas perderam totalmente seu formato dispersando-se sobre a chapa. A amostra n. 1 manteve seu formato verde com perdas dimensionais e trincas, o mesmo ocorreu com a amostra n. 3.

A Figura 38 apresenta o resultado da sinterização das amostras no qual se observa à completa descaracterização da amostra n. 2, que sugere baixa resistência à verde do compactado.

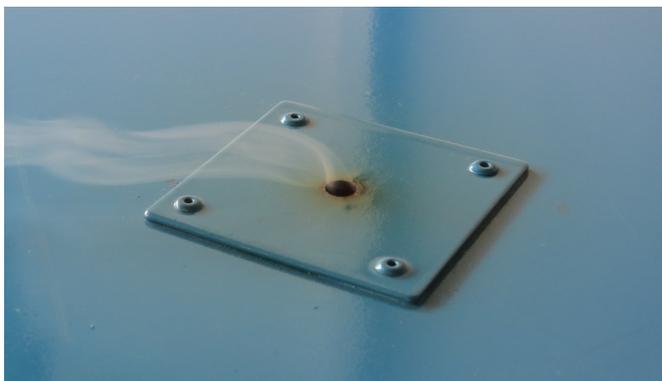
Figura 38 - Amostras sinterizadas



4.1.7.1. Segunda etapa da sinterização

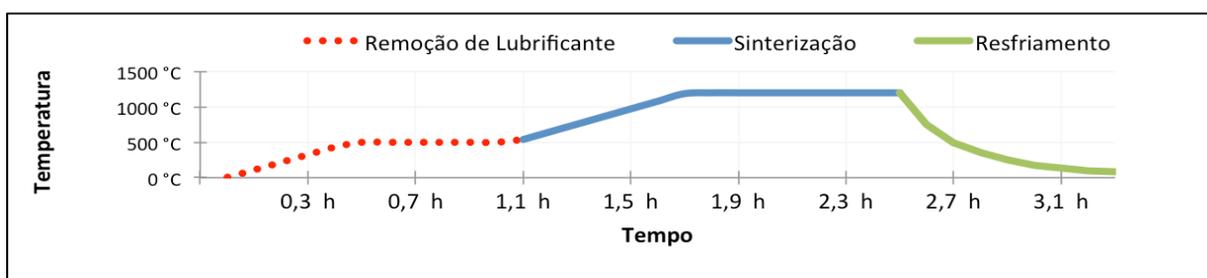
Durante o processo de remoção do lubrificante, verificou-se a saída desse pelas aberturas do forno.

Figura 39 - Escape do lubrificante na temperatura de 500°C.



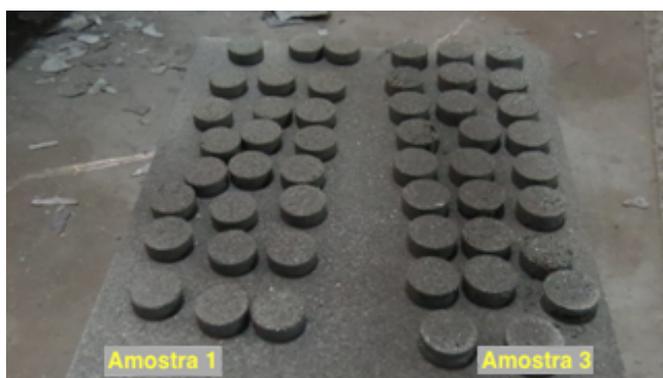
Após o término da ocorrência de fuga de fumaça, procedeu-se o aquecimento do forno até a temperatura de sinterização de 1200°C.

Figura 40 - Temperaturas de sinterização com controle da remoção do lubrificante



Devido à amostra do compactado n. 2 não apresentar as condições necessárias para a sinterização, essa foi descartada e as amostras n. 1 e n. 3 foram sinterizadas.

Figura 41 - Amostras sinterizadas



Observou-se sobre as amostras um resíduo de cor grafite escuro, no qual é atribuído as possíveis sujidades contidas nas amostras. A câmara de aço inoxidável não possui exaustão para remoção dos gases que possam ficar contidos ou criados durante o processo

4.1.8. Densidade aparente

Mediu-se a densidade verde e após a sinterização repetiu-se a análise para verificar a densidade aparente. A compactação das amostras ocorreu em duas etapas, à primeira dentro dos laboratórios da UCS com a finalidade de aquisição de dados, as demais compactações nas instalações da empresa LR Meneghel conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Densidade aparente do corpo compactado verde de maior altura

		Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		
		Altura	Massa	Altura	Massa	Altura	Massa	
UCS	1º	15,2 mm	3,9 g	17,7 mm	8,2 g	16,2 mm	5,3 g	
	2º	15,9 mm	5,8 g	17,8 mm	8,1 g	15,6 mm	4,8 g	
LR MENEGHEL	3º	15,7 mm	5,9 g	19,1 mm	9,1 g	17,0 mm	6,6 g	
	4º	16,1 mm	6,1 g	18,0 mm	8,7 g	16,1 mm	5,7 g	
	5º	15,4 mm	5,5 g	17,4 mm	8,0 g	15,9 mm	5,6 g	
	6º	16,0 mm	6,0 g	17,0 mm	7,4 g	16,1 mm	5,5 g	
	7º	15,8 mm	6,4 g	17,4 mm	7,8 g	16,4 mm	5,9 g	
	8º	14,7 mm	3,4 g	17,3 mm	7,4 g	16,1 mm	5,7 g	
	9º	16,1 mm	6,3 g	17,6 mm	7,9 g	16,8 mm	6,6 g	
	10º					16,6 mm	6,5 g	
	11º					15,9 mm	4,9 g	
	12º					17,0 mm	6,9 g	
	Valores descartados	MAIOR	16,1 mm	6,4 g	19,1 mm	9,1 g	17,0 mm	6,9 g
		MENOR	14,7 mm	3,4 g	17,0 mm	7,4 g	15,6 mm	4,8 g
	MÉDIA	15,7 mm	5,6 g	17,6 mm	8,0 g	16,3 mm	5,8 g	
	DESVIO PADRÃO	0,5 mm	1,0 g	0,6 mm	0,5 g	0,4 mm	0,7 g	
	VOLUME MÉDIO	1234,9 mm ³		1381,8 mm ³		1279,8 mm ³		
	DENSIDADE VERDE	4569,3 Kg/m ³		5799,8 Kg/m ³		4555,2 Kg/m ³		
	EM RELAÇÃO A TEÓRICA	58%		74%		58%		

Verifica-se durante a compactação que as amostras obtiveram densidades muito abaixo da densidade teórica de um corpo maciço de mesmo tamanho. Evidenciado nos gráficos de compressibilidade do item 4.1.6, as amostras de

resíduo possuem baixa compressibilidade, portanto conferem baixa a densidade do corpo verde.

Posterior a sinterização, os corpos de prova foram novamente mensurados e suas densidades verificadas. Devido à perda dimensional por trincas, quebras e a completa descaracterização de algumas amostras; essas foram descartadas e consideradas como perdas.

Tabela 9 - Densidade aparente do compactado sinterizado de maior altura

		Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
		Altura	Massa	Altura	Massa	Altura	Massa
LR MENEGHEL	1º	15,5 mm	5,6 g			16,6 mm	6,0 g
	2º	15,7 mm	6,0 g			16,4 mm	6,7 g
	3º	15,5 mm	6,0 g				
	4º	15,5 mm	5,7 g				
	5º						
	6º						
	7º						
	8º						
	9º						
	10º						
	11º						
	12º						
MÉDIA		15,5 mm	5,9 g	0,0 mm	0,0 g	16,5 mm	6,4 g
DESVIO PADRÃO		0,1 mm	0,2 g	0,0 mm	0,0 g	0,1 mm	0,4 g
VOLUME MÉDIO		1217,7 mm ³		0,0 mm ³		1296,3 mm ³	
DENSIDADE VERDE		4804,0 Kg/m ³		0,0 Kg/m ³		4898,7 Kg/m ³	
EM RELAÇÃO A TEÓRICA		61%		0%		62%	
PERDAS NA SINTERIZAÇÃO		56%		100%		83%	

As perdas durante o processo de sinterização atingem a totalidade das amostras n. 2 devido à baixa resistência a verde. A amostra n. 1 obteve resultados satisfatórios durante este estudo e apresentou as menores perdas durante a sinterização, com 56% de amostras exibindo alguma perda dimensional. A amostra n. 3 apresentou 83% de perdas.

A densificação durante o processo de sinterização foi verificada nos dados da Tabela 9, tendo aumento relativamente alto, contudo não pode ser considerado confiável devido à grande quantidade de perdas de amostras durante a sinterização.

Realizou-se os ensaios com compactação de corpos de menor altura de

enchimento da matriz. Repetiram-se com uma quantidade maior de amostras proporcionando maior confiabilidade nos resultados. Demais condições acima mencionadas foram mantidas.

Tabela 10 - Densidade aparente do corpo compactado verde de menor altura

	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		
	Altura	Massa	Altura	Massa	Altura	Massa	
1º	4,09 mm	1,67 g			4,50 mm	1,89 g	
2º	3,88 mm	1,53 g			4,51 mm	1,93 g	
3º	4,02 mm	1,63 g			4,50 mm	1,84 g	
4º	4,15 mm	1,74 g			4,45 mm	1,87 g	
5º	4,00 mm	1,68 g			4,81 mm	2,01 g	
6º	3,93 mm	1,60 g			4,32 mm	1,74 g	
7º	4,03 mm	1,68 g			4,39 mm	1,79 g	
8º	3,74 mm	1,49 g			4,47 mm	1,93 g	
9º	3,81 mm	1,59 g			4,61 mm	1,86 g	
10º	3,98 mm	1,65 g			4,24 mm	1,51 g	
11º	3,80 mm	1,55 g			4,41 mm	1,90 g	
12º	4,04 mm	1,64 g			4,42 mm	1,72 g	
13º	3,96 mm	1,63 g			4,43 mm	1,78 g	
14º	4,02 mm	1,64 g			4,52 mm	1,83 g	
15º	3,96 mm	1,59 g			4,48 mm	1,86 g	
16º	4,25 mm	1,77 g			4,52 mm	1,93 g	
17º	4,08 mm	1,70 g			4,25 mm	1,60 g	
18º	3,58 mm	1,39 g			4,47 mm	1,90 g	
19º	3,92 mm	1,62 g			4,53 mm	1,92 g	
20º	3,86 mm	1,57 g			4,35 mm	1,77 g	
21º	4,01 mm	1,64 g			4,28 mm	1,69 g	
22º	4,04 mm	1,69 g			4,38 mm	1,82 g	
23º	4,00 mm	1,64 g			4,51 mm	1,89 g	
24º	3,99 mm	1,57 g			4,29 mm	1,52 g	
25º					4,62 mm	1,95 g	
26º					4,58 mm	1,93 g	
Valores descartados	MAIOR	4,25 mm	1,77 g	0,00 mm	0,00 g	4,81 mm	2,01 g
	MENOR	3,58 mm	1,39 g	0,00 mm	0,00 g	4,24 mm	1,51 g
	MÉDIA	3,97 mm	1,62 g	0,00 mm	0,00 g	4,45 mm	1,83 g
	DESVIO PADRÃO	0,14 mm	0,08 g	0,00 mm	0,00 g	0,13 mm	0,13 g
	DIÂMETRO MÉDIO	10,19 mm		0,00 mm		10,12 mm	
	VOLUME MÉDIO	323,6 mm ³		0,0 mm ³		357,9 mm ³	
	DENSIDADE VERDE	5019,6 Kg/m ³		0,0 Kg/m ³		5106,2 Kg/m ³	
	EM RELAÇÃO A TEÓRICA	64%		0%		65%	
	PERDAS NA COMPACTAÇÃO	0%		100%		0%	

Posterior a sinterização, as amostras foram novamente mensuradas.

Tabela 11 - Densidade aparente do compactado sinterizado de menor altura

	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		
	Altura	Massa	Altura	Massa	Altura	Massa	
1º	3,65 mm	1,46 g			4,46 mm	1,83 g	
2º	4,16 mm	1,81 g			4,65 mm	1,96 g	
3º	3,96 mm	1,59 g			4,38 mm	1,80 g	
4º	3,86 mm	1,63 g			4,62 mm	1,95 g	
5º	3,95 mm	1,70 g			4,51 mm	1,93 g	
6º	4,02 mm	1,75 g			4,50 mm	1,91 g	
7º	4,00 mm	1,79 g			4,43 mm	1,93 g	
8º	3,92 mm	1,68 g			4,32 mm	1,44 g	
9º	4,00 mm	1,78 g			4,34 mm	1,75 g	
10º	3,94 mm	1,75 g			4,43 mm	1,96 g	
11º	4,13 mm	1,86 g			4,28 mm	1,67 g	
12º	4,00 mm	1,73 g			4,45 mm	1,81 g	
13º	3,95 mm	1,77 g			4,21 mm	1,92 g	
14º	3,90 mm	1,77 g			4,55 mm	1,80 g	
15º	3,99 mm	1,80 g			4,43 mm	1,77 g	
16º	3,74 mm	1,76 g			4,59 mm	1,90 g	
17º	3,89 mm	1,81 g			4,22 mm	1,74 g	
18º	4,10 mm	1,92 g			4,23 mm	1,53 g	
19º	3,50 mm	1,61 g			4,50 mm	1,93 g	
20º	3,82 mm	1,82 g			4,46 mm	1,85 g	
21º	3,76 mm	1,47 g			4,50 mm	1,81 g	
22º	3,92 mm	1,61 g			4,61 mm	2,04 g	
23º	3,77 mm	1,50 g			4,36 mm	1,86 g	
24º	4,02 mm	1,63 g			4,54 mm	1,90 g	
25º					4,36 mm	1,91 g	
26º					4,20 mm	1,67 g	
Valores descartados	MAIOR	4,16 mm	1,92 g	0,00 mm	0,00 g	4,65 mm	2,04 g
	MENOR	3,50 mm	1,46 g	0,00 mm	0,00 g	4,20 mm	1,44 g
MÉDIA	3,95 mm	1,75 g	0,00 mm	0,00 g	4,44 mm	1,86 g	
DESVIO PADRÃO	0,15 mm	0,12 g	0,00 mm	0,00 g	0,13 mm	0,13 g	
DIÂMETRO MÉDIO	10,16 mm			10,09 mm			
VOLUME MÉDIO	319,8 mm ³			0,0 mm ³			
DENSIDADE VERDE	5471,8 Kg/m ³			0,0 Kg/m ³			
EM RELAÇÃO A TEÓRICA	70%			0%			
PERDAS NA SINTERIZAÇÃO	0%			0%			

As perdas durante o processo de sinterização foram nulas e o ganho de densidade foi de 6% e 1% das amostras n. 1 e n. 3 respectivamente.

A segunda etapa dos ensaios obteve melhores resultado, e as amostras de altura reduzida prosseguiram neste estudo. Os corpos de prova compactados com

maior altura foram descartados por não possuírem características satisfatórias e dados confiáveis.

Verificou-se a densidade aparente com as imagens a partir da microscopia óptica e confirma-se a grande quantidade de poros. Os poros estão apresentados na Figura 42 e Figura 43 pelas áreas escuras.

Figura 42 - Porosidade da amostra n.1 no programa *ImageJ* (ampliação 50x)

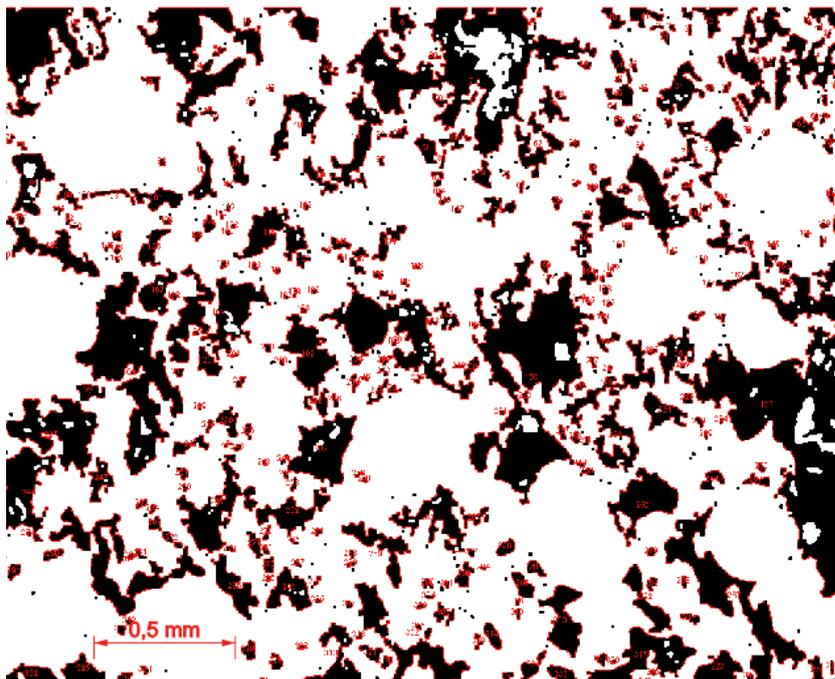
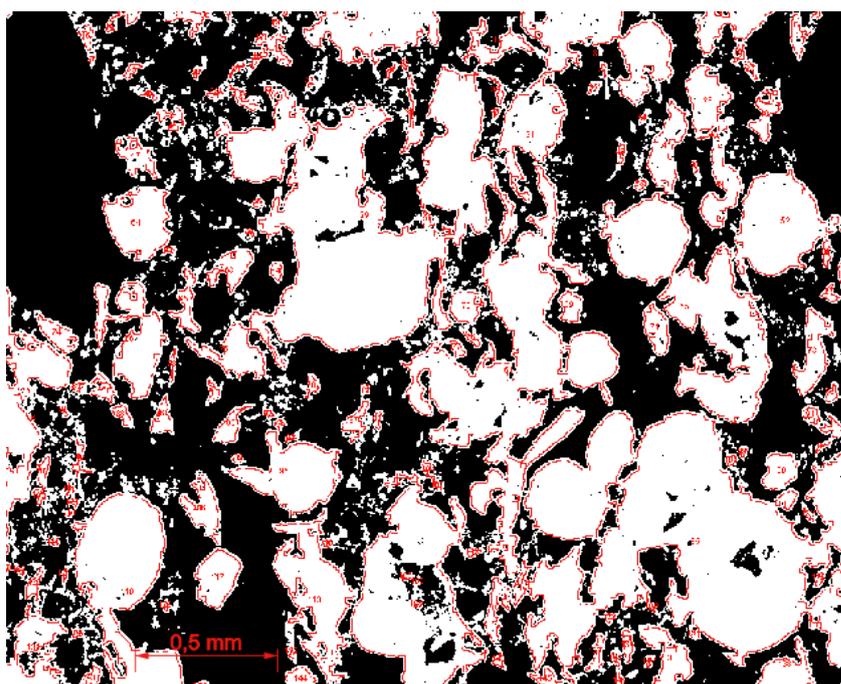


Figura 43 - Porosidade das amostras n.3 no programa *ImageJ* (ampliação 50x)



Tabelaram-se os valores e se verificou a grande similaridade com os valores medidos manualmente.

Tabela 12 - Densidade aparente medido pelo programa *ImageJ*

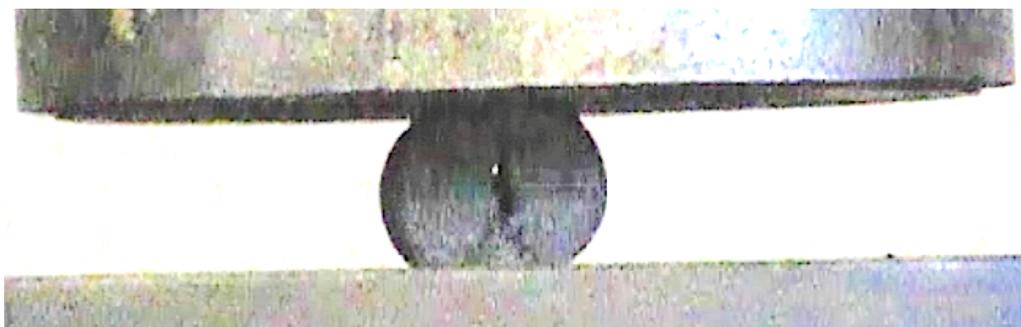
Imagem analisada	Contagem de áreas	Área total	% Porosidade	% Massa
Amostra 01 50X.jpg	340	2.310 mm ²	30%	70%
Amostra 03 50X.jpg	149	2.737 mm ²	36%	64%

Ambos os métodos podem ser considerados tecnologicamente aptos para determinar a porosidade dos corpos de prova. Caso exista uma necessidade de maior detalhamento, sugere-se aprofundar no método computacional

4.1.9. Ensaio de compressão diametral

A aquisição em vídeo de alta velocidade confirmou a propagação da trinca no sentido radial prosseguido pela trinca de forma triangular nas bases de aplicação de carga. Esses fatores são fundamentais na comprovação da correta aplicação do ensaio.

Figura 44 - Ensaio de compressão diametral



A maior carga suportada por cada corpo de prova foi tabelado e verificou-se a resistência dos corpos de prova sinterizados conforme apresentado na Tabela 13 e Tabela 14.

Verificam-se os baixos valores de resistência mecânica quando comparado à aços usuais do meio industrial. Isso se deve a baixa densidade aparente apresentada no item 4.1.8 e a baixa sinterabilidade com baixa transferência de massa durante a sinterização que será apresentada no item 4.1.10.

Tabela 13 - Resistência a tração - compressão diametral da amostra n. 1

CORPO DE PROVA n. 1			
P - Força aplicada	3090 N	2845 N	2354 N
D1 - Diâmetro externo	10,08 mm	10,07 mm	10,03 mm
t - Espessura	3,92 mm	3,92 mm	3,92 mm
K - Fator de correção	10	10	10
Sdc - Resistência à tração	50 MPa	46 MPa	38 MPa
MÉDIA			45 MPa
DESVIO PADRÃO			5 MPa

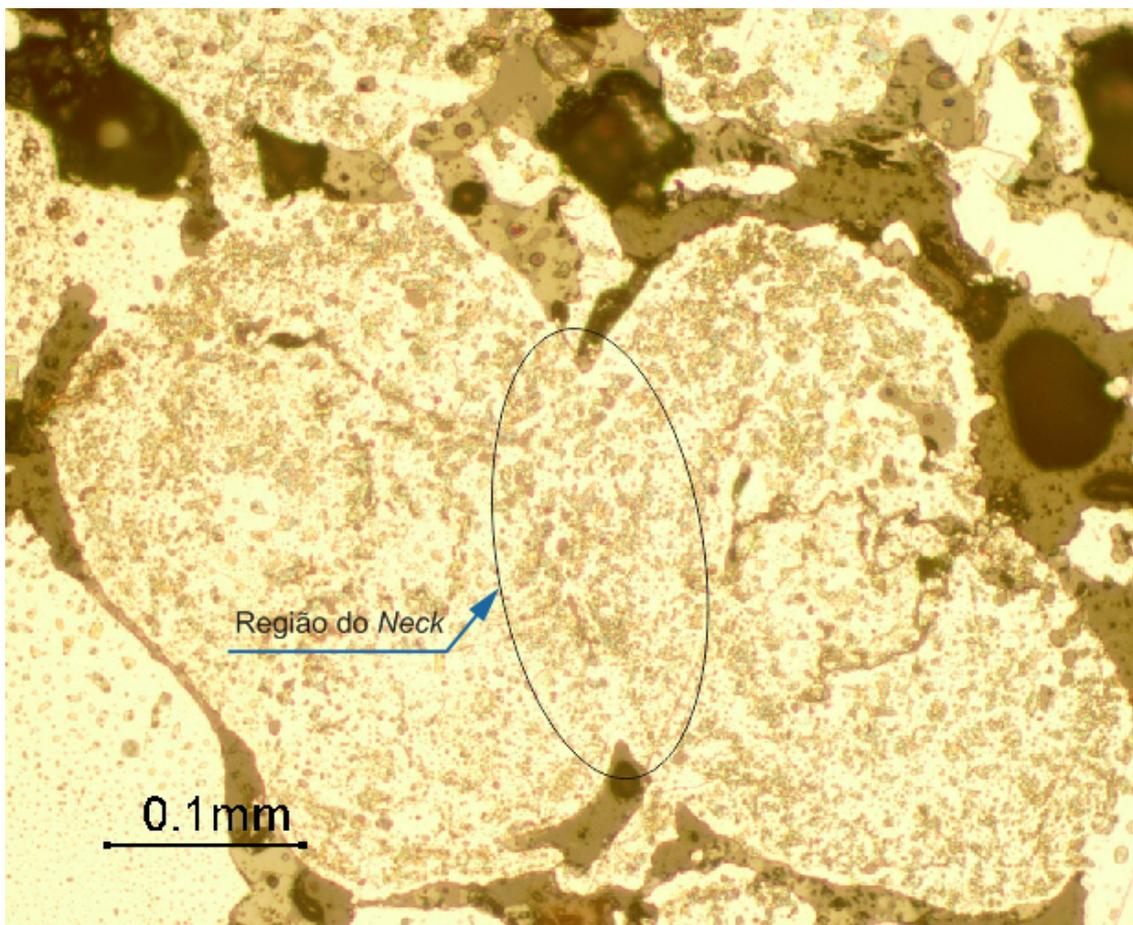
Tabela 14 - Resistência a tração - compressão diametral da amostra n. 3

CORPO DE PROVA n. 3			
P - Força aplicada	2060 N	1854 N	2325 N
D1 - Diâmetro externo	10,05 mm	10,10 mm	10,04 mm
t - Espessura	4,28 mm	4,50 mm	4,27 mm
K - Fator de correção	10	10	10
Sdc - Resistência à tração	31 MPa	26 MPa	35 MPa
MÉDIA			30 MPa
DESVIO PADRÃO			3 MPa

4.1.10. Sinterabilidade

Verifica-se a ocorrência da sinterização no corpo de prova da amostra n.1 conforme apresentado na Figura 45. Confirma-se a formação do *neck* entre duas partículas devido à presença da continuidade de material com a formação dos arredondamentos nas ligações do *neck*. A presença dessa forma de ligação indica que a transferência de massa durante o processo de sinterização ocorreu no primeiro estágio dos fenômenos de transporte desse processo. Esse estágio compreende pela redução da área superficial com a criação dos *necks*. Não foi possível comprovar a ocorrência dos demais estágios de sinterização nas imagens analisadas, contudo pode-se afirmar a difusão volumétrica e de contornos de grãos, uma vez que ocorreu a densificação dos corpos de prova, apresentados na Tabela 10 e Tabela 11.

Figura 45 - Formação do *neck* na amostras sinterizada n.1 (Nital 5%)



4.1.11. Custos do processo

O custo do processo de metalurgia do pó foi calculado de duas formas, o custo energético segundo o coeficiente de calor específico do aço, e posterior a verificação com o cálculo simplificado fornecido por empresas fabricantes de fornos de fundição. Obtendo um comparativo apresentado na Tabela 11.

Tabela 15 - Custo energético

Método de cálculo pelo Cp do Aço		
CUSTO ENERGÉTICO	Calor específico do aço	486 J/kg °C
	Massa	0,001 ton
	Varição da Temperatura	1185 °C
	Quantidade de calor necessária	0,58 KJ
	Eficiência térmica típica de um forno	63%
	Perda de metal na fusão	3%
	Valor do KW	R\$ 0,37/Kw
	Custo	-R\$ 0,35/Kg

Método de cálculo técnico com referência bibliografia	
Potência necessária para derreter aço	575 kW.h/ton
Massa	0,001 ton
Potência do forno	5,0 kW.h
Tempo de derretimento	11,5 min
Eficiência térmica típica de um forno	63%
Perda de metal na fusão	3%
Valor do KW	R\$ 0,37/Kw
Custo	-R\$ 0,35/Kg

É possível verificar a similaridade dos valores e a partir dos dados comparados na Tabela 15. Os valores foram somados ao valor de recebimento do material e o valor de venda conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Recebimento, sinterização e venda

	Custo energético	Custo	-R\$ 0,35/Kg
	Custo para sinterizar o material		
SOMA FINAL	Valor do descarte	Entrada	R\$ 0,35/Kg
	Recebido para coletar o resíduo		
	Valor de venda	venda	R\$ 0,47/Kg
	Venda da sucata ao mercado		
	TOTAL	Total	R\$ 0,47/Kg
	Excluindo logística, depreciação e demais itens		

Em adição à comprovação da viabilidade da rota técnica proposta nesse estudo, a Tabela 16 confirma a viabilidade econômica da utilização deste caminho tecnológico; para transformação do resíduo de granalha pelo método da metalurgia do pó em matéria prima ou sucata para fundições. Confirmando a possibilidade de utilização desse método e sua aplicação ambientalmente correta.

5. CONCLUSÕES

Constatou-se neste trabalho a viabilidade da rota tecnológica da metalurgia do pó como forma de transformação do resíduo do processo de jateamento em um corpo com matéria contínua. Confirmou-se a ocorrência da sinterização na imagem ampliada de duas partículas, nessa imagem observa-se a formação do *neck* e do raio de contato ente as partículas.

Verificou-se que as amostras n.1 e n. 3 com menores diâmetro médio obtiveram resistência a verde suficiente para a sinterização. Por outro lado, a amostra n. 2, de maior diâmetro médio, formato essencialmente esférico e com distribuição de partículas de menor intervalo, não obteve resistência a verde necessária para a sinterização. É possível atribuir que as características tecnológicas da amostra n. 2 não são indicadas para o processo de metalurgia do pó.

Em adição, verificou-se que a sinterização das amostras n.1 e n.3 ocorreram mesmo em condições não ideais; utilizando-se pós com sujidade e com composição química não confirmada; compactando-se os pós de alta dureza; sinterizando-se com a atmosfera controlada em argônio sendo essa insuficiente para remover as sujidades e gases produzidos durante a sinterização; limitações de ferramental e demais situações que poderiam interferir de forma negativa na aplicação do método.

A satisfatória obtenção do corpo contínuo sinterizado nesse trabalho fornece uma rota tecnológica sustentável e ambientalmente amigável. Proporciona-se um ciclo completo de reaproveitamento do aço, sendo economicamente viável e, mesmo com as implicações e dificuldades do estudo, esse é realizável.

5.1. LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Apesar da relevância deste estudo como meio de transformação de resíduo em matéria prima, esse é limitado pela vasta quantidade de variáveis e alterações possíveis no método.

- **Características metalúrgicas**

É relevante expor que somente posterior caracterização metalúrgica será confirmada o completo ciclo de reaproveitamento do resíduo proveniente do processo de jateamento.

- **Composição química**

Verificou-se a necessidade do estudo da composição química deste resíduo, visto que, as indústrias consumidoras de sucata necessitam desses dados para reduzir correções de componentes durante a fundição.

- **Densificação durante a compactação**

Verifica-se a necessidade de aprofundar os estudos de densificação para menores custos de processo e de ferramental na fabricação dos corpos verdes. Podendo ser estudado a densificação com a adição de pó de ferro obtido pelo processo Höganäs. Esse pela sua ótima qualidade de compactabilidade e seu formato irregular dos particulados, fornecendo maior resistência a verde.

- **Difração por raios-X**

Importante ensaio para verificação da estrutura cristalina dos pós, permitindo analisar as propriedades das amostras após sua utilização no processo de jateamento, em que o abrasivo é submetido a solicitações de impactos de alta velocidade e encruamentos.

- **Microscopia eletrônica de varredura - Espectroscopia de energia dispersiva**

A necessidade de analisar as composições químicas superficiais dos pós é essencial para o processo de metalurgia do pó. Devido o pós serem provenientes do resíduo do processo de jateamento, sua composição superficial está ligada diretamente com a utilização durante o jateamento e terá influência nas características tecnológicas e na sinterização.

Por fim, embora o referencial teórico apresentado nesse estudo tenha destacado os principais métodos da metalurgia do pó, abrangendo os aspectos pertinentes para a correta aplicação. Verificou-se que o referencial aborda e utiliza em seus estudos, matéria prima controlada com alto índice de confiabilidade em sua composição. Difere-se da abordagem deste trabalho, em que a matéria prima é um resíduo de processo industrial, englobando sujidades e uma vasta variedade de distribuição de tamanho e formato de partícula. Em vista dessa limitação, pesquisas futuras podem direcionar seu embasamento em maneiras de caracterização tecnológica do resíduo como matéria prima e, avaliar as mínimas condições para que este seja corretamente aplicado.

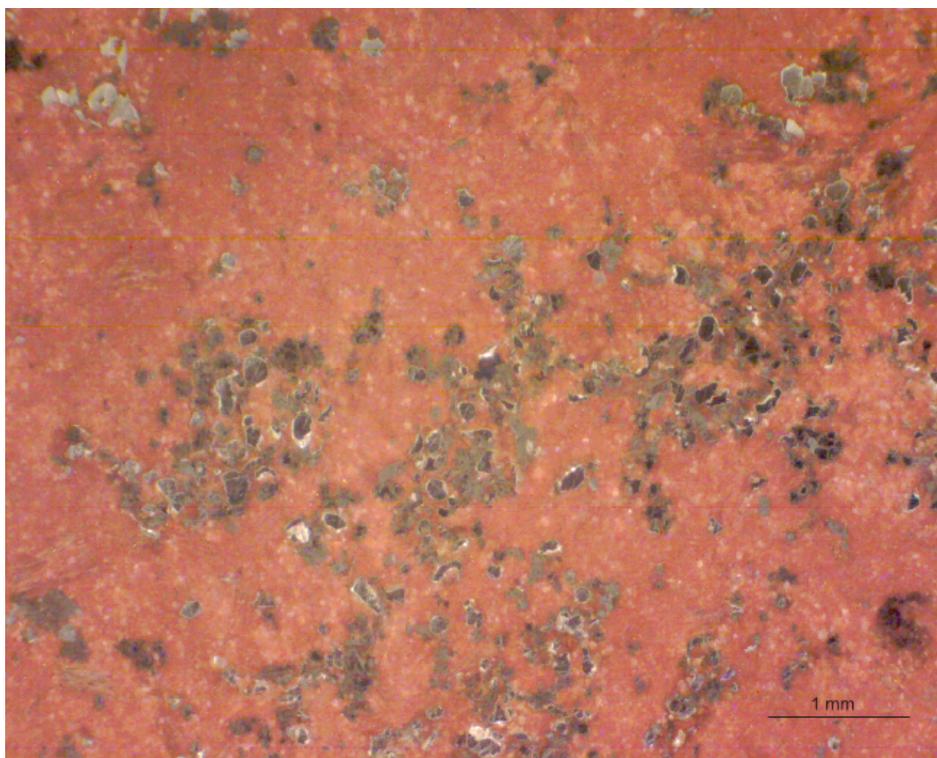
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) DEACON, Robert T. "Deforestation and Ownership: **Evidence for Historical Accounts and Contemporary data**". Land Economics, 1999;
- (2) Report of the World Commission on Environment and Development: **Our Common Future**, 1987, disponível em: <http://conspect.nl/pdf/Our_Common_Future-Brundtland_Report_1987.pdf>, acesso em 02 abril 2014;
- (3) BRASIL: Casa Cível, Sub Chefia de Assuntos Jurídicos: **Lei 12.305 de 2 de Agosto de 2010**, disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>, acesso em 03 abril 2014;
- (4) RAO, S. Ramachandra (2006), **Resource Recovery and Recycling From Metallurgical Wastes**, Elsevier, ISBN 978-0-08-045131-2.
- (5) THÜMMLER, F.; OBERACKER, R. **An introduction to powder metallurgy**. London: The institute of materials, 1993. xiv, 332 p. (The institute of materials series on powder metallurgy ; 490) ISBN 090171626X;
- (6) "Shot Peening," **Tool and Manufacturing Engineers Handbook (TMEH)**, Volume 3, Society of Manufacturing Engineers, 1985;
- (7) DEGARMO, E. Paul. **Materiales y Procesos de Fabricación**. Barcelona, ES: Reverté, 1975. 983 p. ISBN 8429148205;
- (8) CHIAVERINI, Vicente. **Metalurgia do Pó: Técnica e Produtos**. 4.ed. São Paulo: ABM, 2001. 343p., ISBN 8586778141;
- (9) FERREIRA, José M. G. de Carvalho. **Tecnologia da Pulverometalurgia**. Lisboa, PO: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002. 344p., ISBN 9723109743;
- (10) Grupo Setorial de Metalurgia do Pó; **A Metalurgia do Pó: Alternativa Econômica com Menor Impacto Ambiental**. 1.ed. São Paulo, 2001. 320p, ISBN 9788562404009;
- (11) MATES, S.P. e SETTES G.S., **A Study of Liquid Metal Atomization Using Close Coupled Nozzles**, part 1: Gas Dynamic Behavior, 2005;
- (12) KLAR E. and FESKO J.W., **Gas and Water Atomization**, ASM Handbook (Vol. 7 Powder metallurgy), ASM International, USA, 1984;
- (13) CHIANG MAI J.; **Gas Atomization of Low Melting-Point Metal Powders**, 2010;
- (14) A. J. Yule and J. J. Dunkley, **Atomization of Melts for Powder Production and Spray Deposition**, Oxford University Press, Oxford, UK, 1994;
- (15) GERMAN, Randall M. **Particle packing characteristics**. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1989.
- (16) SOCIEDADE DE ENGENHEIROS DA MOBILIDADE; SAE International, **Cast Shot and Grid Size Specifications**, SAE J-827 SAE J-1993; 2005;
- (17) SOCIEDADE DE ENGENHEIROS DA MOBILIDADE; SAE International, **Cast Shot and Grit Size Specification for Peening and Cleaning**, SAE J-444; 1993
- (18) IKK do Brasil; **Granalhas de Aço I.K.K. – Steel Shot & Steel Grit**, Catálogo do fabricante, produzido pela Total Design, impressão janeiro 1994, 300 unidades

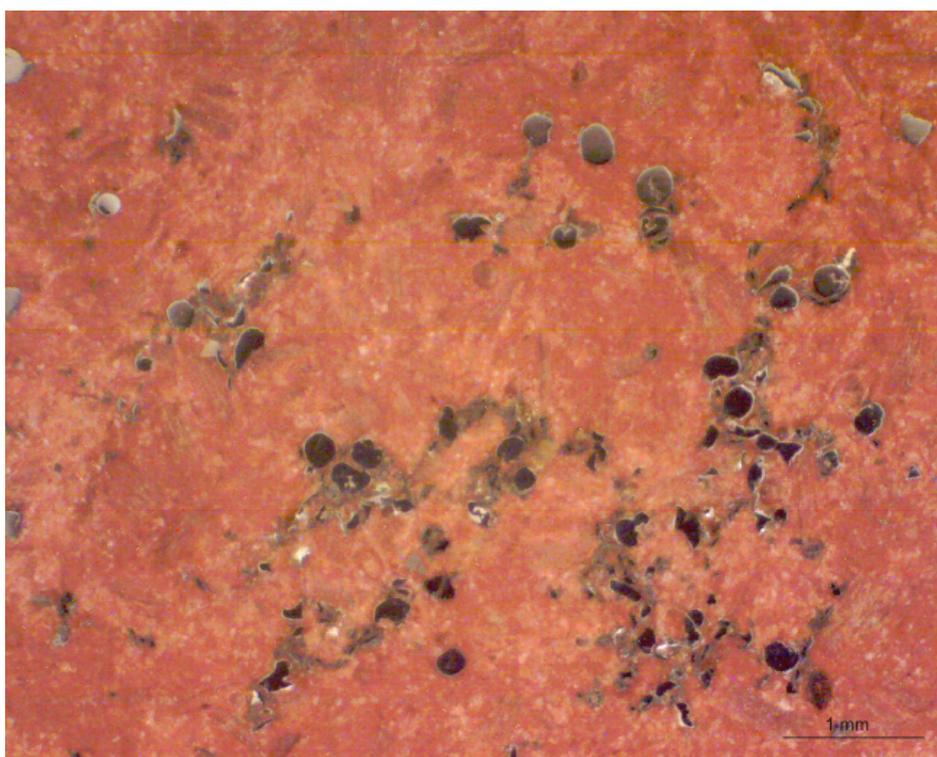
- (19) INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Metallic materials - Vickers hardness, Verification and calibration of testing machines.**: ISO 6507; 2005.
- (20) FUNDAÇÃO ROBERTO MARINHO - FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO; Centro das Indústrias do Estado de São Paulo; Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial; Serviço Nacional de Aprendizagem I. **Ensaio de materiais.** São Paulo: Globo, 1996.
- (21) INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Metallic materials - Vickers hardness, Verification and Calibration of Testing Machines**; ISO 3927; 2005.
- (22) INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Metallic Powders – Determination of Flow Time by Means of a Calibrated Funnel (Hall Flowmeter)**; ISO 4490; 2001.
- (23) INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Metallic Powders, Excluding Powders for Hardmetals -- Determination of Compressibility in Uniaxial Compression**); ISO 6508; 2011.
- (24) MARTINS, M.D.DAS NEVES. **Sinterização de Ligas de Pós de Ferros para Aplicações Automotivas**; IPEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear, Livro 26.217; 2005.
- (25) MENDONÇA, B. D. FILHO. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico - NT Metálicos para Aciarias Sucatas, Gusa, Ferro Esponja**; ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Metais; 2008.
- (26) AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures**; ANSI/ASTM B4123-82.
- (27) TRIBOLOGY: **Hardness conversion astm E 140 - 97**, disponível em: < fonte: <http://www.tribology-abc.com/calculators/hardness.htm>>, acesso em 15 outubro 2014;
- (28) CALLISTER, William D.,. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, c2008. xx, 705 p. ISBN 9788521615958.
- (29) Henk G. Merkus: **Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality.** Springer. ISBN 978-1-4020-9016-5. (2009)

ANEXOS

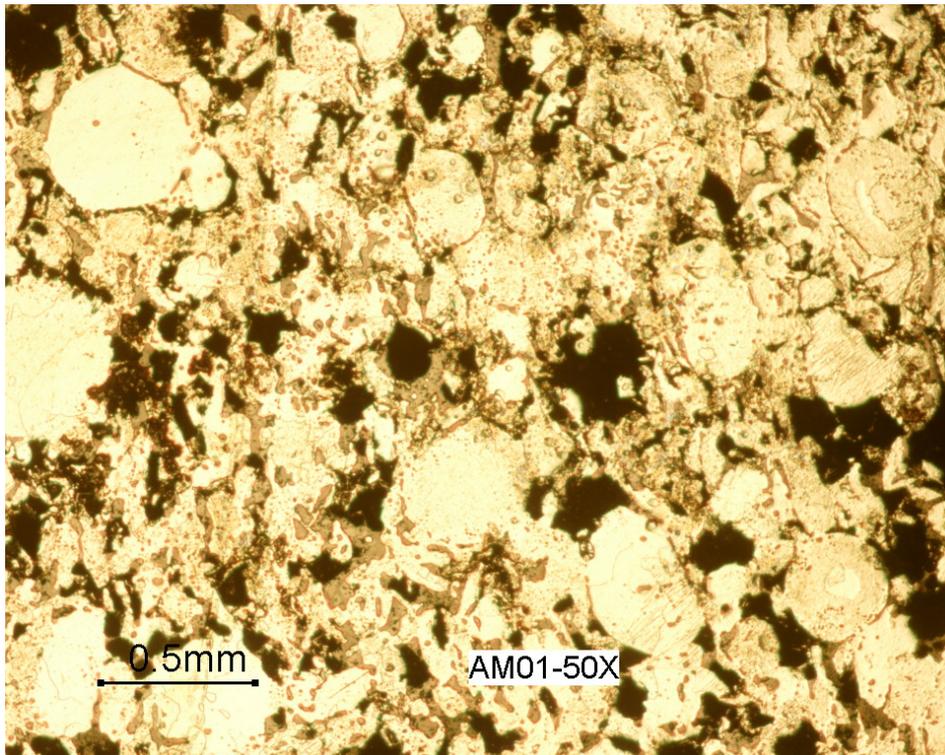
Amostra de pó n.1 dispersa em embutimento de bakelit.



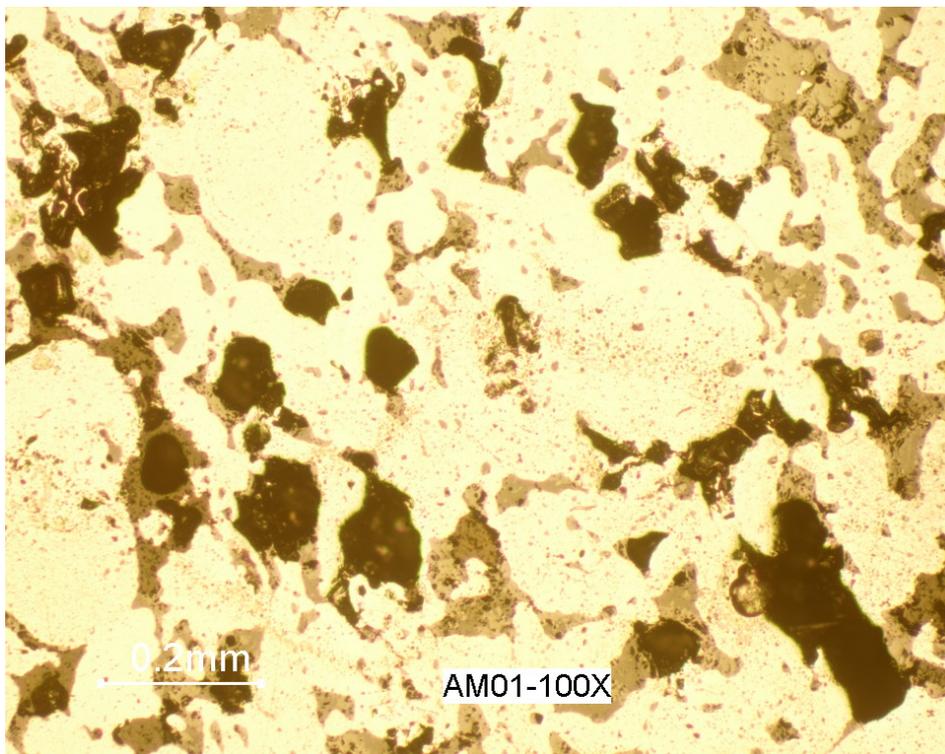
Amostra de pó n.3 dispersa em embutimento de bakelit.



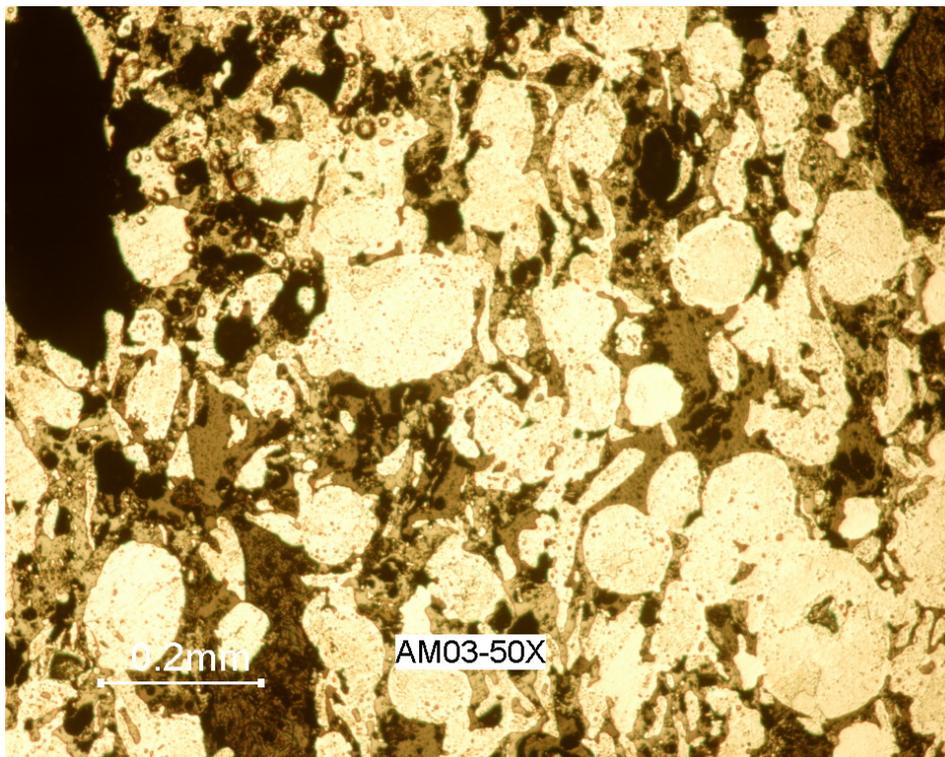
Amostra de pó n.1 sinterizada ampliação 50x



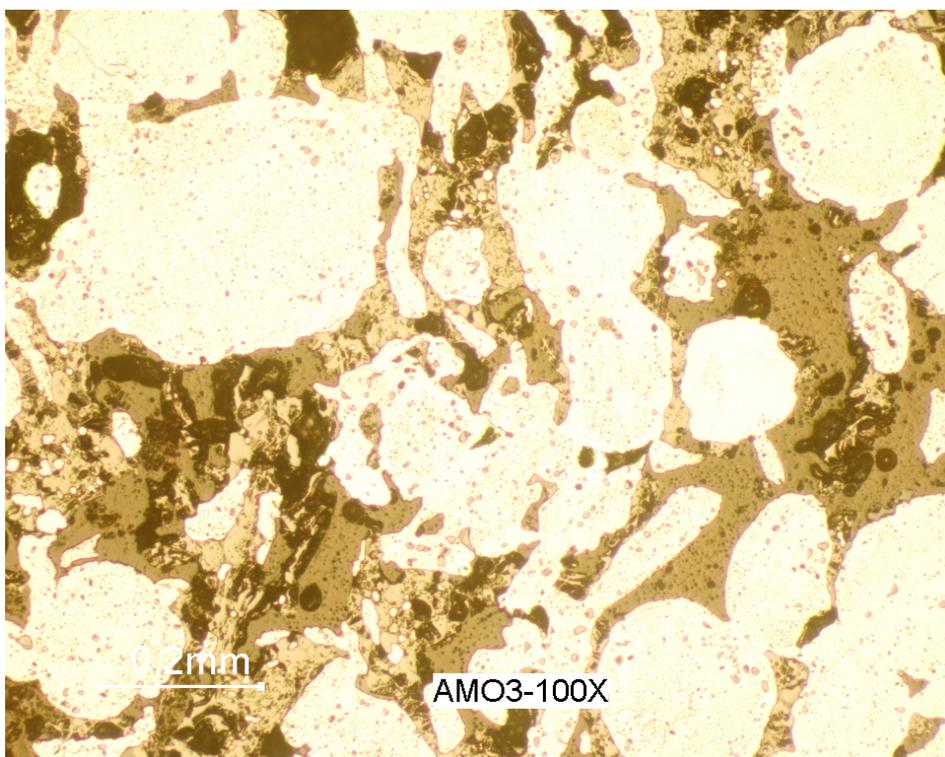
Amostra de pó n.1 sinterizada ampliação 100x



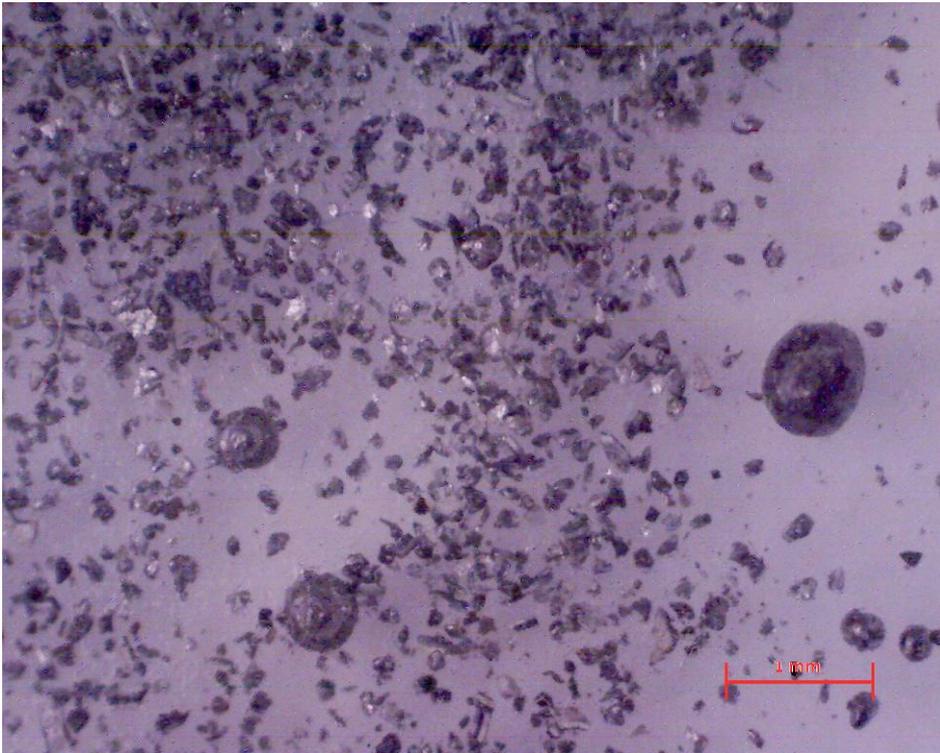
Amostra de pó n.3 sinterizada ampliação 50x



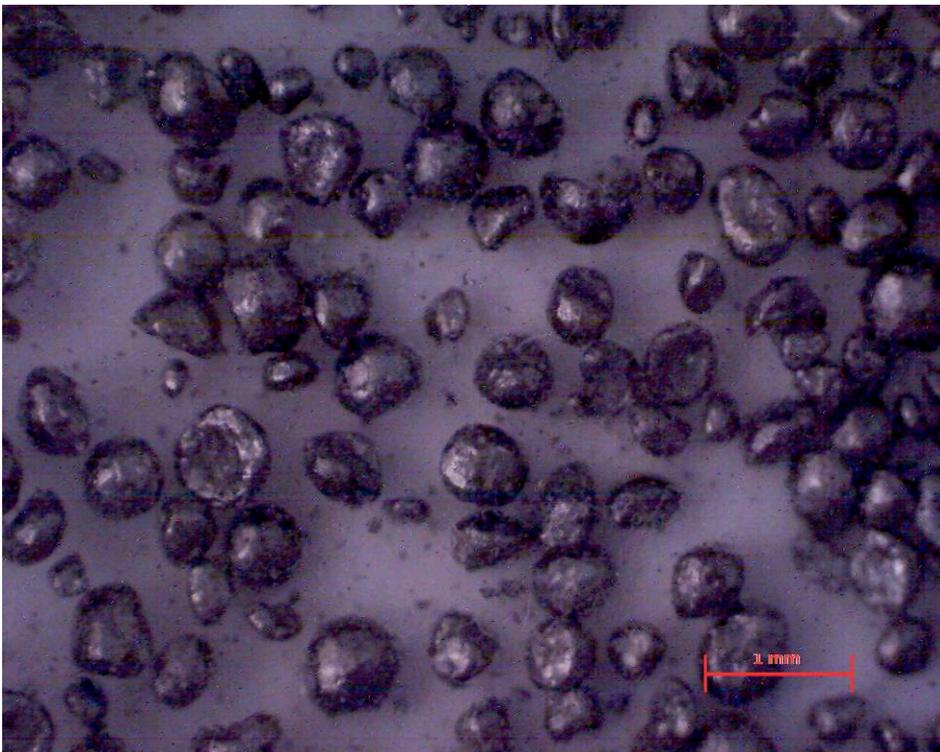
Amostra de pó n.3 sinterizada ampliação 100x



Amostra de pó n.1 com ampliação de 63x



Amostra de pó n.2 com ampliação de 63x



Amostra de pó n.3 com ampliação de 63x

