

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
- PPGE3M

Desenvolvimento de Insertos Sinterizados  
Autolubrificantes para uso em Matrizes de Conformação a Frio

Marcelo Salvador Cóser

Dissertação para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre  
2016

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
- PPGE3M

Desenvolvimento de Insetos Sinterizados  
Autolubrificantes para uso em Matrizes de Conformação a Frio

Marcelo Salvador Cóser  
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre  
2016

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Eng. Cristiano Binder - UFSC

---

Prof. Dr. Eng. Jorge Luis Braz Medeiros - FURG

---

Prof. Dr. Eng. José Lesina César – ULBRA

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGE3M

Porto Alegre  
2016

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr.-Ing. Lirio Schaeffer pela orientação, dedicação, estímulo e esforço pessoal proporcionado;

Ao Prof. Dr. Eng. Jorge Luis Braz Medeiros por plantar a semente deste projeto de Mestrado e por atuar como Padrinho em sua realização;

Ao Tecg. MSc. Alex Fabiano Bueno pela irrestrita e entusiasta parceria demonstrada no planejamento e na execução de atividades realizadas no desenvolvimento deste Mestrado;

Aos colegas Vinicius Martins, Luiz Eduardo Pinow Ribas, pelas sugestões, auxílios em experimentos e observações valiosas;

A todos os colegas e demais pessoas que de alguma forma colaboraram ou incentivaram a realização deste trabalho faço menção do meu reconhecimento e gratidão.

A minha família por sempre ter incentivado esta trajetória.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABELAS .....	X
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
Símbolos Gregos.....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIII
RESUMO.....	XV
ABSTRACT .....	XVI
1. INTRODUÇÃO .....	17
1.1    Objetivos e justificativa .....	19
1.2    Macro etapas de desenvolvimento dos estudos .....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.1 Considerações sobre o atrito e seu efeito .....	21
2.2 Classificação e características dos Aços Ferramentas .....	23
2.3 Materiais de Baixo Coeficiente de Atrito.....	26
2.4 Determinação do coeficiente de atrito de Coulomb ( $\mu$ ) .....	29
2.5 Conceito da Metalurgia do Pó.....	32
2.6 Ligas de Alumínio.....	37
3. PROCEDIMENTOS E MÉTODOS .....	39
3.1 Considerações iniciais .....	39
3.2 Os pós selecionados para o desenvolvimento da proposta .....	40
3.3 Compactação das amostras de H13 com lubrificante sólido $\text{MoS}_2$ .....	40
3.4 Compactação das amostras das misturas de pó de H13 com $\text{MoS}_2$ para caracterização das densidades a verde e após sinterização.....	41
3.5 Construções das curvas de Compressibilidade.....	41
3.6 Sinterizações.....	44
3.7 Densidades Aparentes dos insertos .....	45
3.8 Densidades a Verde e Densidades Sinterizadas dos Insertos.....	45

3.9 Caracterização das amostras, Densidade Teórica e Porosidade Total .....	45
3.10 Ensaio Complementares .....	50
<b>4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>52</b>
4.1 Misturas compactadas .....	52
4.2 Sinterização das amostras e dos insertos finais.....	54
4.3 Seleções da mistura e da pressão de compactação .....	56
4.4 Análise metalográfica das amostras após sinterização.....	58
4.5 Difração de Raio X - DRX .....	59
4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Micro Análise Química Elementar (EDS).....	60
4.7 Ensaio Tribológicos para determinação do atrito de Coulomb ( $\mu$ ).....	63
4.8 Ensaio de Abrasão com Roda de Borracha.....	66
<b>5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>68</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
<b>7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>72</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Macro etapas do desenvolvimento.....	20
Figura 2 Condições de abrasão - a) Sulcamento; b) Formação de proa; c) Corte (Mendes, 2009) .....	22
Figura 3 - Modelo de mecanismo de desgaste por abrasão - obtido de Stachowiak e Batchelor (2014).....	23
Figura 4 Diagrama Temperatura de Tempera - Propriedades Mecânicas do aço AISI H13. Adaptado de Web site Metalravne .....	25
Figura 5 Agrupamento funcional dos lubrificantes sólidos. (adaptado de Ludema, 1996) .....	27
Figura 6 (a) Modelo de anel; (b) Razão 6:3:2 (BUENO 2010).....	30
Figura 7 Curvas de atrito geradas no Software de Elementos Finitos LARSTRAN (UT Aachen - Alemanha) – Adaptado de Oliveira, Koller e Schaeffer (2003).....	31
Figura 8 Resultados de atritos obtidos por Geier pelo ensaio do anel da liga AA6351 .....	32
Figura 9 Fluxograma do Processo de Metalurgia do Pó. (UNIEMP, 2014) .....	33
Figura 10 - Ciclo térmico de degradação da parafina em amostras sinterizadas. Martins (2014) .....	34
Figura 11- Curva de Compressibilidade de Fe sinterizado (Infomet) .....	36
Figura 12 Efeitos do trabalho a frio sobre ligas de Alumínio da série 3XXX. Obtido de ABAL, 2015 .....	38
Figura 13 Diagrama de Blocos para o desenvolvimento do trabalho. ....	39
Figura 14 (a) Conjunto ferramental para compactação das amostras - (b) Geometria da matriz de compactação (dimensões em mm).....	41
Figura 15 Misturador de Duplo Cone. Do autor.....	41
Figura 16 Curva de compressibilidade a verde para mistura de aço ferramenta H13 com 1% de MoS <sub>2</sub> .....	42
Figura 17 Curva de Compressibilidade a verde da mistura de pó de aço ferramenta H13 com adição de 2% MoS <sub>2</sub> .....	42
Figura 18 Curva de Compressibilidade a verde da mistura de pó de aço ferramenta H13 com adição de 3% MoS <sub>2</sub> .....	43

Figura 19 Curva de Compressibilidade a verde da mistura de pó de aço ferramenta H13 com adição de 4% MoS <sub>2</sub> .....	43
Figura 20 Curva de Compressibilidade a verde da mistura de pó de aço ferramenta H13 com adição de 5% MoS <sub>2</sub> .....	44
Figura 21 Representação esquemática do forno de sinterização.....	44
Figura 22 Microdurômetro Shimadzu .....	47
Figura 23 Microscópio metalúrgico invertido – GX-51 - OLYMPUS .....	47
Figura 24 Microscópio Eletrônico de Varredura - JEOL .....	48
Figura 25 Ferramental para ensaio tribológico do anel .....	48
Figura 26 Curvas de atrito simuladas para Alumínio no Software <i>Simufact Forming</i> .....	49
Figura 27 Equipamento de ensaio abrasivo "areia seca/disco de borracha" .....	50
Figura 28 Vista superior das misturas compactadas no formato de cilindros para obtenção das densidades a verde.....	52
Figura 29 Corpos de Prova Sinterizados em H13 com 1% a 5% MoS <sub>2</sub> , nomeados de F a J .....	54
Figura 30 Densidade dos corpos de prova H13 + 3% MoS <sub>2</sub> sinterizados .....	55
Figura 31 Perfil esquemático de dureza .....	56
Figura 32 Ataque químico na superfície com solução de Nital 3%.....	58
Figura 33 Amostra “X – H” (3% de MoS <sub>2</sub> a 1.000 MPa) - Sinterizada – Ampliação de 100X.....	58
Figura 34 Amostra “X – H” (3% de MoS <sub>2</sub> a 1.000 MPa) - Temperada e Revenida – Ampliação de 100X .....	59
Figura 35- Espectro apresentando a presença de fase Martensita .....	59
Figura 36 - Espectro apresentando a presença de Carboneto de Silício .....	60
Figura 37 Imagem MEV mostrando fases distintas propostas para o compósito sinterizado .....	61
Figura 38 Gráfico EDS – Microconstituintes da Área 1 da figura 32 .....	61
Figura 39 Gráfico EDS – Microconstituintes do Ponto 2 da figura 32.....	61
Figura 40 Gráfico EDS – Microconstituintes do Ponto 3 da figura 32.....	61
Figura 41 MEV - Imagem amostra “X – F” - Ampliação 20.000 X .....	62



Figura 42 Gráfico EDS – Microconstituintes do Ponto 3 da figura 36.....	62
Figura 43 A) anel inicial, B) deformação relativa ( $\epsilon$ ) de 20%, C) deformação relativa ( $\epsilon$ ) de 40%, e D) deformação relativa ( $\epsilon$ ) 60%.....	64
Figura 44 Dados do ensaio em curvas de atrito calibradas.....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Composição química de alguns aços ferramenta.....	24
Tabela 2 Coeficiente de atrito ( $\mu$ ) para misturas de C e MoS <sub>2</sub> . .....	31
Tabela 3 Propriedades de pós de Fe sinterizados .....	36
Tabela 4 Propriedades dos Aços AISI H13 .....	37
Tabela 6 Comparativo das propriedades do Alumínio, aço e Cobre .....	38
Tabela 6 Densidade a verde em Corpos de Prova H 13 + 1% MoS <sub>2</sub> .....	53
Tabela 7 Densidade a verde em Corpos de Prova H 13 + 2% MoS <sub>2</sub> .....	53
Tabela 8 Densidades a verde em Corpos de Prova H13 + 3% MoS <sub>2</sub> .....	53
Tabela 9 Densidades a verde em Corpos de Prova H13 + 4% MoS <sub>2</sub> .....	54
Tabela 10 Densidades a verde em Corpos de Prova H13 + 5% MoS <sub>2</sub> .....	54
Tabela 11 Valores de densidades das amostras sinterizadas com teor de 3% de MoS <sub>2</sub> .....	55
Tabela 12 Redução da microdureza HV em função do % de mistura do MoS <sub>2</sub> – Pressão de compactação 300 MPa.....	57
Tabela 13 Redução da microdureza em função do % de mistura do MoS <sub>2</sub> – Pressão de compactação 1.000 MPa.....	57
Tabela 14 Densidade dos corpos de prova de H13 + 3% MoS <sub>2</sub> sinterizados .....	57
Tabela 15 Micro análise química (EDS) da amostra “X – F” – ampliação 5.000 X..	62
Tabela 16 Micro análise química (EDS) da amostra “X – F” – ampliação 20.000 X	63
Tabela 17 Anéis de Alumínio ASTM AA 6351 ensaiados.....	64
Tabela 18 Dados do ensaio abrasivo com tempo de 15 minutos .....	66
Tabela 20 Estimativo de ganho de produção com acréscimo de 12% em vida de ferramental. ....	68

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Denominação</b>	<b>Unidade</b>
D	Diâmetro final	[mm]
$D_0$	Diâmetro inicial	[mm]
$D_i$	Diâmetro interno	[mm]
f	Modelo Geral de Atrito	[-]
h	Altura final	[mm]
$h_0$	Altura inicial	[mm]
i	Corrente elétrica:	[A]
$k_f$	Tensão de escoamento	[MPa]
l	Comprimento	[mm]
$m$	Fator de atrito Interfacial	[-]
m	Massa	[kg]
P	Pressão	[N/mm <sup>2</sup> ]
$p^t$	Porosidade Total Percentual	[%]
T	Temperatura	[°C]
t	Tempo	[s]
V	Volume	[cm <sup>3</sup> ]

## Símbolos Gregos

$\delta$	Alongamento	[%]
$\mu$	Coefficiente de atrito	[-]
$\sigma$	Resistência à tração	[MPa]
$\sigma_r$	Tensão de ruptura	[MPa]
$\rho$	Densidade	[g/cm <sup>3</sup> ]

$\rho_S$	Densidade do Sinterizado	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_T$	Densidade Teórica	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_{TA}$	Densidade Teórica do constituinte A	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_{TB}$	Densidade Teórica do constituinte B	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_{TC}$	Densidade Teórica do Composto	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\varepsilon$	Deformação relativa	[%]
$\Delta d_i$	Varição em diâmetro	[mm]
$\Delta h$	Varição em altura	[mm]
$\Delta l$	Alongamento percentual	[mm]

## LISTA DE ABREVIATURAS

- AISI: American Iron and Steel Institute
- ASTM: American Society for Testing and Materials
- C: Elemento Químico Carbono
- CIM: Moldagem de pós cerâmicos por injeção
- Cr: Elemento Químico Cromo
- EDS: Espectroscopia de energia dispersiva
- Fe: Elemento Químico Ferro
- GDER: Grupo de Energias Renováveis
- HB: Dureza Brinell
- HRc: Dureza Rockwell C
- HV: Dureza Vickers
- ISO: International Organization for Standardization
- LdTM: Laboratório de Transformação de Mecânica
- MEV: Microscopia eletrônica de varredura
- MIM: (Metal Injection Moulding) Moldagem de pós metálicos por injeção
- Mn: Elemento Químico Manganês
- Mo: Elemento Químico Molibdênio
- MO: Microscopia Ótica
- MP: Metalurgia do Pó
- MPI: Moldagem do Pó por injeção

- NBR: Norma Brasileira
- Ni: Elemento Químico Níquel
- P: Elemento Químico Fósforo
- PÇ/dia: Peça por dia
- PÇ/h: Peça por hora
- PÇ/mês: Peça por mês.
- PTFE: Politetrafluoretileno
- RPM: Rotações por minuto
- S: Elemento Químico Enxofre
- Si: Elemento Químico Silício
- UNIEMP – Instituto UNIEMP
- UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## RESUMO

Este trabalho avalia o uso de insertos autolubrificantes de pó de aço ferramenta sinterizado para aplicação em ferramentas dos processos de Conformação a Frio. São apresentadas a preparação e a análise de diferentes composições de misturas de pós de aço ferramenta H 13. A Metalurgia do Pó convencional foi utilizada como processo para a obtenção dos insertos do estudo. Foram compactadas e sinterizadas misturas de pó de aço H13 com a adição de percentuais variados do lubrificante sólido Bissulfeto de Molibdênio –  $\text{MoS}_2$ , também em pó, com o objetivo de atribuir propriedades de autolubrificação ao composto. O percentual de lubrificante sólido empregado nas amostras variou de 1% a 5%, com posterior sinterização. Os resultados obtidos no Ensaio de Atrito com anéis de Alumínio AA6351 recozido apresentaram nos insertos autolubrificantes do estudo coeficientes de atrito  $\mu$  entre 0,10 e 0,15, menores que os valores  $\mu$  entre 0,20 e 0,30 obtidos com aço H13 laminado convencional. Também o desgaste abrasivo do ferramental proposto avaliado no Ensaio de Abrasão com Roda de Borracha foi 12% menor quando comparado com o aço ferramenta H13 laminado exposto ao mesmo ensaio.

**Palavras chave:** Aço ferramenta sinterizado, ferramenta de conformação, inserto autolubrificante.

## ABSTRACT

This study evaluates the use of self-lubricating tool steel powder sintered inserts for use in tools of Cold Forming processes. Preparation and analysis of various compositions of H13 tool steel powder mixtures are presented. The conventional Powder Metallurgy was used as a process for obtaining the study inserts. Were compacted and sintered mixtures of H13 steel powder with the addition of varying percentages of the solid lubricant Molybdenum Disulphide -  $\text{MoS}_2$ , also in powder form, with the purpose of giving self-lubricating properties to the composite. The percentage of solid lubricant used in the samples varied from 1% to 5%, with subsequent sintering. The results of the friction test on AA6351 aluminum rings had friction coefficients  $\mu$  between 0.10 and 0.15 with self-lubricating inserts in study, smaller than  $\mu$  values between 0.20 and 0.30 obtained with the conventional steel H13 laminate. Also, the abrasive wear of the tooling proposed evaluated in the abrasion test with rubber wheel was 12% lower when compared to the H13 tool steel laminate exposed to the same test.

**Key words:** Sintered tool steel, forming tool, self-lubricating insert.



## 1. INTRODUÇÃO

Os efeitos resultantes de aspectos tribológicos tem sido foco de análise na literatura contemporânea na avaliação tanto sobre aspectos econômicos como ambientais. O relatório apresentado por H. Peter Jost (1966) para o Comitê do Departamento Inglês de Educação e Ciência representou um marco para o início destas análises, onde descreveu perdas por desgaste em ferramental e os correspondentes impactos.

Conforme Parucker (2008), baixas entre 2% e 5% no PIB mundial estão relacionadas com problemas de corrosão e desgaste dos ferramentais promovidos por lubrificação deficiente. Então, é muito importante que seja mantido um baixo coeficiente de atrito entre corpos em contato que tenham movimento relativo entre si na aplicação dos processos industriais, não apenas para redução do desgaste, como também para economia de energia e preservação ambiental.

A busca de sistemas com características tribológicas de alta performance tem sido alvo de muitas pesquisas do tema, mas o grande número de variáveis que afetam diretamente este desempenho faz com que este trabalho seja incessante. Na Conformação, entre as variáveis com influência direta estão o material da ferramenta e dos itens em processo, os lubrificantes utilizados, a temperatura das peças e das matrizes.

De acordo com Oliveira, Koller e Schaeffer (2004), deve-se estabelecer uma fina película de lubrificante entre as partes em contato no processo, e esta, por sua vez, deve ter boa resistência ao cisalhamento e facilitar o escoamento melhorando o desempenho durante os processos de conformação. O bom comportamento biodegradável é outra característica que deve ser considerada.

Parucker (2008) também salienta, que apesar da lubrificação hidrodinâmica ser a mais utilizada, deve-se ter alguns cuidados na sua aplicação, pois, em situações extremas de temperatura, muito altas ou muito baixas, o lubrificante pode ter reação química e agir como contaminante.

Recentemente a lubrificação sólida tem demonstrado resultados positivos e bastante consistentes, e conforme Juste (2012), muitas empresas da indústria automotiva, petroquímica, aeroespacial e de bens de consumo duráveis demonstram muito interesse nesta tecnologia com o objetivo de aumentar a durabilidade, melhorar a qualidade e o desempenho de componentes. Para Miyoshi, apud Straffelini (2015), os lubrificantes sólidos promovem lubrificação a seco de duas superfícies que estão em contato e com movimentação entre elas.

Ainda que pouco difundida, a lubrificação com partículas sólidas já dispõe de muitos materiais para sua aplicação, e conforme relatado por Rapoport et.al (2003), Donnet e Erdemir (2004), Deng, Can e Sun (2005), Juste (2012), os lubrificantes sólidos mais utilizados são: grafita,  $\text{MoS}_2$  (bissulfeto de Molibdênio),  $\text{WS}_2$  (bissulfeto de Tungstênio) e teflon, os quais são depositados nas superfícies que estão em contato ou adicionados no volume do material das regiões em contato.

Erdemir, apud Binder (2009) relata que os lubrificantes sólidos lamelares, como o  $\text{MoS}_2$ , por exemplo, apresentam baixa tensão de cisalhamento devido a sua estrutura cristalina, o que propicia alta resistência ao desgaste. Eles podem ser aplicados como filmes finos ou pulverizados na forma de pó sobre as superfícies.

Para o planejamento do uso das alternativas de aplicação de lubrificação sólida deve-se atentar que elas também apresentam inconvenientes. Binder (2009) relata que o uso de filmes ou de camadas pode acarretar prejuízos ao ferramental quando estes filmes ou camadas estiverem degenerados. Donnet e Erdemir (2004) referem que para possibilitar que se tenha aumento de vida útil das ferramentas, o lubrificante sólido pode ser incorporado no volume destas próprias ferramentas na forma de partículas dispersas ou precipitadas de segunda fase. Para realizar com eficiência esta incorporação pode-se utilizar das técnicas de Metalurgia do Pó (MP), na etapa de mistura dos pós, gerando assim um material compósito de baixo coeficiente de atrito ( $\mu$ ).

De acordo com Martins (2010), Binder (2013) e Parucker (2008), na MP pode ser utilizado o processo convencional, também conhecido por compactação em prensas, ou então o processo de Moldagem de Pós por Injeção (MIM – Metal

Injection Moulding), sendo este dependente de equipamentos mais sofisticados e ferramentais específicos para uso nas máquinas injetoras.

A principal proposta deste trabalho é a de desenvolver ensaios com insertos sinterizados de aço ferramenta H13 com adição de lubrificante sólido MoS<sub>2</sub> em percentuais variados com vistas de ter a aplicação destes insertos nos processos de Conformação a Frio, particularmente na calibragem de peças de Alumínio. Os resultados obtidos com os insertos sinterizados são comparados com os alcançados em matrizes fabricadas com aço H13 de laminação convencional.

Diversos setores da indústria aplicam os processos de conformação e necessitam para tanto de ferramentais adequados com resultados de desempenho cada vez maiores e com custos cada vez menores.

### **1.1 Objetivos e justificativa**

A proposta deste trabalho é comparar os resultados de desempenho obtidos com insertos de pó de aço ferramenta que tenha lubrificante sólido adicionado em sua composição e sinterizados com os resultados tidos com ferramental de aço ferramenta comercialmente disponíveis. Espera-se que resultem em ganhos de produtividade por aumento de vida útil da ferramenta e por menor incidência de “setup” durante a operação. Estes ganhos se dão por redução da ocorrência de peças grudadas nas cavidades das matrizes das operações de Calibragem, que aumentam as paradas de processo e as peças refugadas.

Aspectos qualitativos da superfície dos produtos conformados com a redução do uso de lubrificantes líquidos ou graxos também são aspectos importantes no processo para os quais se espera resultados favoráveis, inclusive com reflexos benéficos de natureza ambiental.

Estes benefícios serão esperados nas práticas de Conformação a Frio como a Calibragem, considerando que as análises aqui desenvolvidas com Aço Ferramenta H13 sinterizado com adição de lubrificante sólido em sua composição também sejam favoráveis quando comparadas com os meios de fabricação de matrizes a partir de aços ferramentas laminados convencionais.

Pelos aspectos mencionados justificam-se os estudos.

## 1.2 Macro etapas de desenvolvimento dos estudos

A figura 1 apresenta as principais etapas utilizadas para o desenvolvimento dos estudos deste trabalho, as quais serão apresentadas com maiores detalhes nos capítulos seguintes.

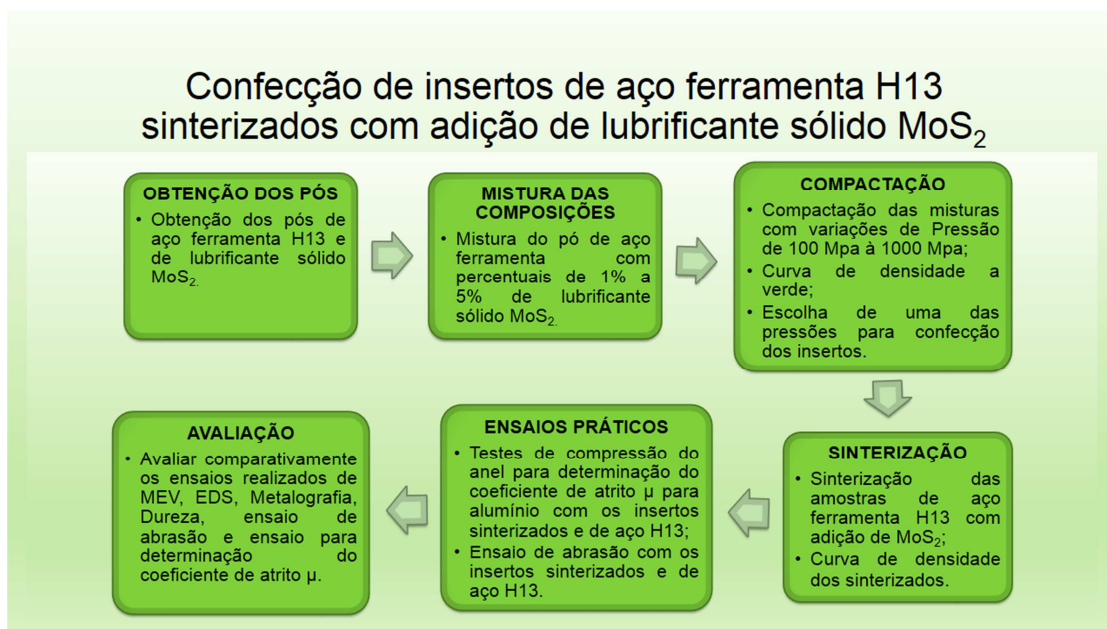


Figura 1 Macro etapas do desenvolvimento

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Considerações sobre o atrito e seu efeito

Atrito é a força que resiste ou se opõe ao movimento relativo entre duas superfícies. O efeito deste fenômeno é reconhecido como expressivo entre os principais fatores de desgaste de componentes, quer seja nos processos industriais como nas aplicações dos produtos resultantes deles.

Pesquisadores como Jost (1966), Schey (1984), Hutchings (1992), Petersen, Martins e Bay (1997), Rao, Prasad e Xie (2011), Hammes et. al (2015) demonstram em suas pesquisas o mecanismo de desgaste por atrito.

Helman e Cetlin (1983) consideram o atrito como sendo um mecanismo pelo qual as forças de resistência ao deslizamento das superfícies se desenvolvem entre dois corpos em contato.

A resistência ao cisalhamento é um tipo de força de atrito que tem origem em um processo de agressão do metal mais duro sobre a superfície do metal mais dúctil.

Conforme Schey (1984), a pressão aplicada entre as matrizes quando se realiza uma deformação é transmitida ao material para conformá-lo, e tal deformação provoca movimento relativo entre o material e o ferramental, observando-se então o atrito na interface mencionada.

Nos processos de Conformação, o atrito tem influência direta na força aplicada na operação e na vida das matrizes, participando de forma significativa na qualidade superficial da peça, na microestrutura e no fluxo do material nas cavidades das matrizes.

Rooij (1998) apresenta formas de desgaste que normalmente ocorrem na conformação de metais como: desgaste por deslizamento e desgaste abrasivo. Para Hutchings (1992), não existe uma fronteira definida entre os dois tipos de desgaste, por deslizamento e abrasivo, podendo ocorrer com características compartilhadas ao mesmo tempo. Rooij afirma ainda que a abrasão se dá pela

penetração superficial de uma protuberância dura, devido à elevada rugosidade de uma ferramenta, ou por alguma partícula dura, um óxido, por exemplo, que eventualmente se interponha entre as regiões em deslizamento.

Hokkirigawa et al. (1998) observa que uma partícula dura risca um material mais mole e que os danos gerados por ela podem ser de três formas, como apresentadas na figura 2, conforme forem as diferentes condições de abrasão.

*"Apesar de o desgaste abrasivo acontecer em superfícies que se encontra em movimento relativo, ele é diferenciado do desgaste por deslizamento, pois nesse último não há, ao menos inicialmente, uma partícula abrasiva entre as superfícies em contato (Mendes, 2009)."*

Mendes conclui ainda que só é possível validar desgaste abrasivo e desgaste por deslizamento no início do fenômeno de dano. Se o início do desgaste for devido à penetração de uma partícula dura, ele é dito abrasivo. Já se o dano iniciar com a adesão entre os materiais em contato será denominado desgaste por deslizamento.

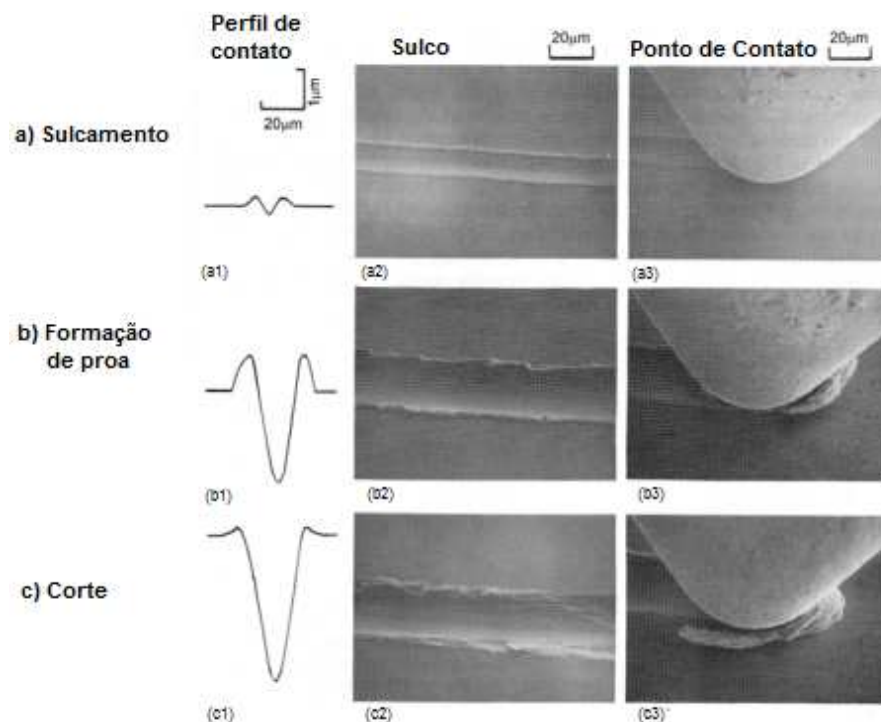


Figura 2 Condições de abrasão - a) Sulcamento; b) Formação de proa; c) Corte (Mendes, 2009)

Em 1981 Sasada apresentou um modelo no qual sugere o aparecimento de uma partícula de desgaste por deslizamento. Neste modelo pode ser identificado o primeiro contato entre as superfícies como sendo o dos picos das asperezas, quando o limite de resistência ao escorregamento destes é ultrapassado,

rompendo as junções. O material desprendido com a ruptura dos picos (junções entre asperezas) forma novos pontos de contato (junção entre os elementos de transferência). Apesar da formação das partículas ou de elementos de transferência, Sasada não apresenta em seu modelo a forma como estas podem causar danos ao ferramental, nem como a adesão pode levar à abrasão.

Pelo que foi exposto no modelo de Sasada, é possível supor que este processo ocorra simultaneamente em vários pontos, quando o desgaste prematuro da ferramenta será inevitável.

Stachowiak e Batchelor (2014) propõem em outro modelo a demonstração de como o desgaste por deslizamento evolui para abrasão. Para tal, demonstram neste modelo que o encruamento das partículas faz com que as mesmas apresentem-se entre as superfícies na forma de abrasivos que levam ao sulcamento das faces e à nucleação de trincas no entorno das mesmas. Este modelo está exemplificado na figura 3.

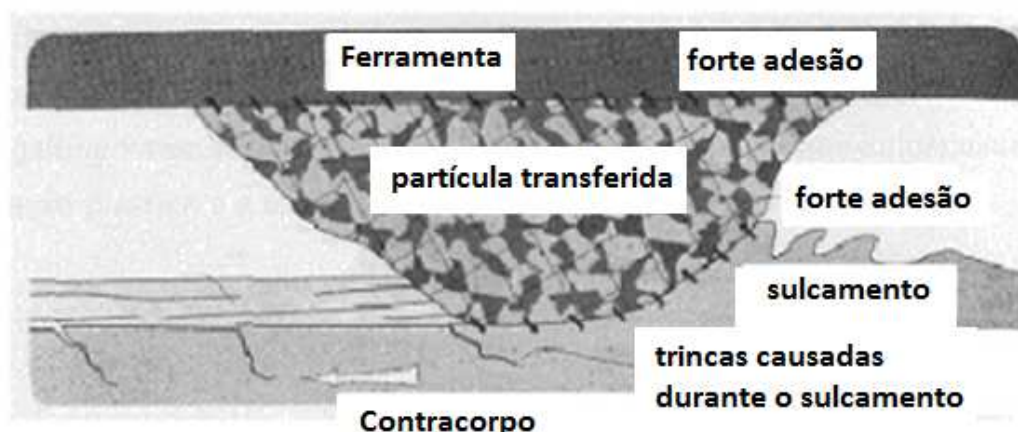


Figura 3 - Modelo de mecanismo de desgaste por abrasão - obtido de Stachowiak e Batchelor (2014)

## 2.2 Classificação e características dos Aços Ferramentas

Conforme apresentado no Metals Handbook (1991), os aços comumente utilizados na fabricação de ferramentas (punções e/ou matrizes) aplicadas nos processos de Estampagem e de Forjamento a Frio são parte da família de materiais denominada Aços Ferramenta.

Desde 1868 até os dias atuais estes materiais tiveram grande evolução de simples ligas de Ferro e Carbono para ligas complexas obtidas com a adição variada de outros elementos químicos em sua composição, conferindo propriedades específicas.

A tabela 1 apresenta a designação ou nome comercial de alguns destes aços e suas respectivas composições químicas.

Tabela 1 Composição química típica de alguns aços

Designação ou nome comercial	Composição <sup>(a)</sup> , %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Co
<b>Aços médio Carbono - Baixa liga</b>								
4130	0.28-0.33	0.40-0.60	0.20-0.35	0.80-1.10	...	0.15-0.25	...	...
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.20-0.35	0.80-1.10	...	0.15-0.25	...	...
4330 Mod (AMS 6411)	0.28-0.33	0.65-1.00	0.15-0.35	0.75-1.00	1.65-2.00	0.35-0.50	0.05-0.10	...
4340	0.38-0.43	0.60-0.80	0.20-0.35	0.70-0.90	1.65-2.00	0.20-0.30	...	...
300M	0.40-0.46	0.65-0.90	1.45-1.80	0.70-0.95	1.65-2.00	0.30-0.45	0.05 min	...
D-6A	0.42-0.48	0.60-0.90	0.15-0.30	0.90-1.20	0.40-0.70	0.90-1.10	0.05-0.10	...
6150	0.48-0.53	0.70-0.90	0.20-0.35	0.80-1.10	...	...	0.15-0.25	...
8640	0.38-0.43	0.75-1.00	0.20-0.35	0.40-0.60	0.40-0.70	0.15-0.25	...	...
<b>Aços endurecíveis ao ar - Média liga <sup>(b)</sup></b>								
H11 Mod	0.37-0.43	0.20-0.40	0.80-1.00	4.75-5.25	...	1.20-1.40	0.40-0.60	...
H13	0.32-0.45	0.20-0.50	0.80-1.20	4.75-5.50	...	1.10-1.75	0.80-1.20	...
<b>Aços de alta resistência à fratura</b>								
AF 1410	0.13-0.17	0.10 max	0.10 max	1.80-2.20	9.50-10.50	0.90-1.10	...	13.50-14.50
HP 9-4-20	0.16-0.23	0.20-0.40	0.20 max	0.65-0.85	8.50-9.50	0.90-1.10	0.06-0.12	4.25-4.75
HP 9-4-30	0.29-0.34	0.10-0.35	0.20 max	0.90-1.10	7.0-8.0	0.90-1.10	0.06-0.12	4.25-4.75

Fonte: Adaptado de Metals Handbook (1991)



Conforme a mesma fonte, além da adição dos elementos de liga também deve ser selecionado um adequado tratamento térmico para formar aços com diferentes propriedades mecânicas.

Mendes (2009) apresenta um comparativo de desgaste de punções de aço H13 utilizados na Calibragem a frio, e utilizou-se para efeito de comparação aços sem e com revestimento superficial obtido por processos termoquímicos.

Na comparação de Mendes, os aços com revestimento apresentaram melhor resistência ao desgaste aumentando muito a vida útil do ferramental. A figura 4 apresenta o Diagrama de Temperatura de Têmpera - Propriedades Mecânicas de aços ferramenta da classe "H" (H13). Visualiza-se neste diagrama que os aços H13 apresentam baixa resistência à tração, conseqüentemente elevada tenacidade.

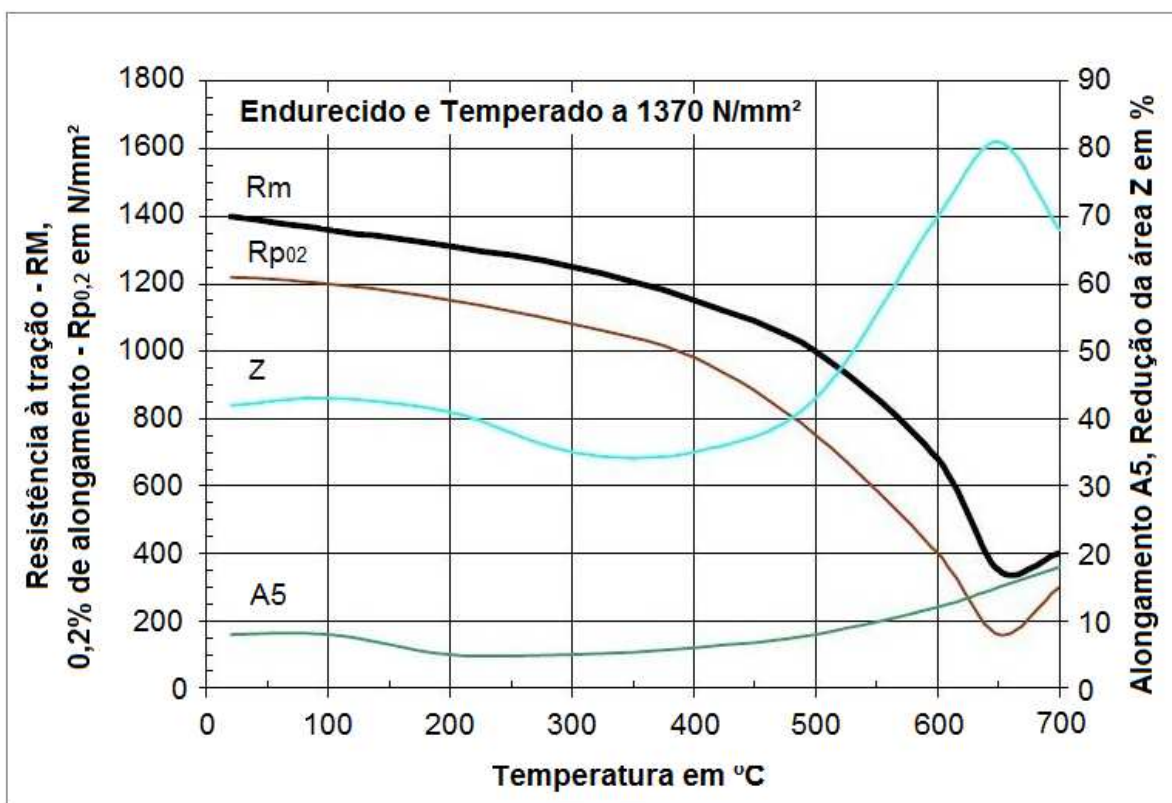


Figura 4 Diagrama Temperatura de Tempra - Propriedades Mecânicas do aço AISI H13. Adaptado de Web site Metalravne

Os Aços Ferramenta, por sua composição e processos diferenciados de obtenção, apresentam custo mais elevado se comparados com o custo de aços convencionais de baixa liga. Ao optar por este tipo de material na fabricação de ferramentas de conformação espera-se como resultado ter vida útil maior da ferramenta, que será conseguida através da maior resistência à fadiga, ao

desgaste e à fratura, o que, por consequência, diluirá a diferença de custo da matéria prima da ferramenta com o aumento de peças produzidas.

### 2.3 Materiais de Baixo Coeficiente de Atrito

Binder (2009) define material compósito como todo aquele que possui pelo menos duas fases quimicamente distintas e insolúveis, combinadas tridimensionalmente e com uma interface entre elas. Binder também ressalta que a prática de incorporar lubrificante sólido disperso em uma matriz metálica remete este compósito ao grupo denominado de “materiais de baixo coeficiente de atrito”.

O atrito e desgaste ocorrem quando houver contato entre corpos, justificando a formação de compósitos que tenham como objetivo a redução do atrito através da adição de lubrificantes sólidos a uma matriz metálica. O uso destes materiais autolubrificantes inicialmente se deu pela necessidade de fornecer lubrificação em componentes onde ela era requerida de forma permanente, porém a condição de trabalho não permitia que fossem aplicados óleos ou graxas.

Parucker (2008) menciona que os primeiros compósitos autolubrificantes utilizavam matriz estrutural de Bronze, Cobre, Prata e Ferro puro. Para lubrificação dispersa na matriz utiliza-se: bissulfeto de Molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ), Prata (Ag), Teflon e bissulfeto de Tungstênio ( $\text{WS}_2$ ). Ressalta ainda que há muitos anos são produzidas buchas para diversas aplicações de engenharia com estes tipos de materiais autolubrificantes, feitas predominantemente com matriz de Bronze e de Cobre, utilizando como partículas de lubrificante sólido o pó de grafita, o bissulfeto de Molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ) e bissulfeto de Tungstênio ( $\text{WS}_2$ ) e metais de baixo ponto de fusão.

Um agrupamento de lubrificantes sugerido por Ludema (1996) dividido em quatro grupos é demonstrado na figura 5. Os grupos A e B são considerados alternativos para utilização onde a lubrificação líquida é ineficiente ou inadequada. Ainda, os dos grupos B e C apresentam baixo coeficiente de atrito quando submetidos às altas cargas, e os do grupo D representam os materiais abrasivos, mas com alto coeficiente de atrito.

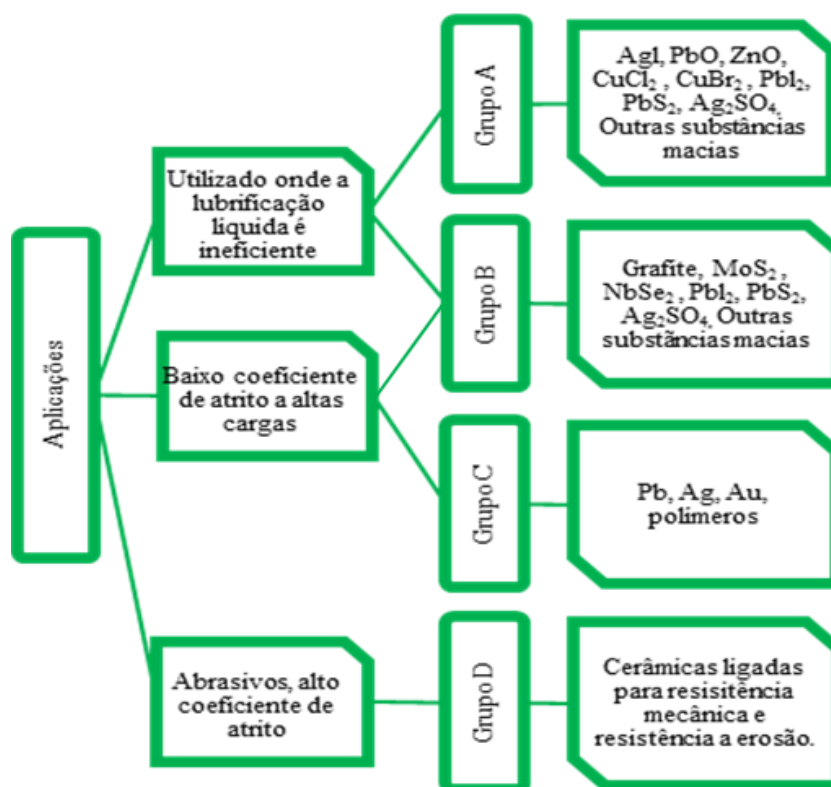


Figura 5 Agrupamento funcional dos lubrificantes sólidos. (adaptado de Ludema, 1996)

Conforme verificado na literatura, diversos autores como Binder, Parucker, et.al (2014) tem apresentado estudos relacionando a utilização do MoS<sub>2</sub> como alternativa eficiente para lubrificação sólida, o que também pode ser constatado no grupo "B" da figura 5 exposta por Ludema (1996).

### 2.3.1 Atuação do bissulfeto de Molibdênio como lubrificante

Geier (2007) registra que uma explicação muito antiga sugerida para atribuir ao grafite boas propriedades para atenuar os efeitos do atrito é que a resistência ao cisalhamento paralelo às camadas de átomos é muito pequena. Isto permite que estas camadas de átomos deslizem umas sobre as outras como cartas em um baralho, e faz com que o grafite atue como um lubrificante.

Essa explicação foi bem aceita até os anos 50, quando foi observado que os carvões de grafite dos geradores elétricos usados em aviões de guerra desgastavam-se muito rapidamente. A investigação sobre esse efeito identificou que o grafite tem propriedades tribológicas muito pobres quando estiver na ausência de vapores condensáveis.

Esta condição é muito expressiva, e foi obtida efetiva lubrificação, por exemplo, quando o grafite seco foi exposto a uma pressão de  $400\text{N/mm}^2$  de vapor d'água, o que diminuiu o volume desgastado em três ordens de grandeza.

Segundo Stachowiak e Batchelor (2014), filmes lubrificantes de grafite e de bissulfeto de Molibdênio têm características tribológicas muito semelhantes. Isto em parte é devido a sua considerável semelhança na estrutura cristalina. As camadas de bissulfeto de Molibdênio são bastante flexíveis e podem deslizar umas sobre as outras repetidamente, sem danos.

### **2.3.2 Objetivos para lubrificar na Conformação Mecânica**

Como é apresentada por Mang (1983), a grande variedade de condições que envolvem os processos de Conformação Mecânica requer que os lubrificantes tenham efetivo desempenho possibilitando o bom funcionamento destes processos.

Vários aspectos devem ser considerados para a seleção adequada de lubrificantes, mas alguns atributos geralmente desejáveis são a separação da ferramenta do material de trabalho, o controle da variável atrito, a prevenção de soldagem fria, permitir que o acabamento superficial desejado seja obtido, boa estabilidade, facilidade de aplicação e de remoção, segurança e custo adequado.

#### **2.3.2.1 Separação do material da ferramenta**

Conforme Geier (2007), sempre é desejado que o desgaste do ferramental em processo fosse reduzido. Para isto, não é necessário que a lubrificação seja um filme contínuo com espessura constante, mas deve proteger a superfície de matrizes. Isto ocorre em muitas situações porque várias partículas abrasivas oriundas do desgaste acabam saindo da interface das superfícies e são levadas pelo filme de lubrificante, promovendo para que não haja contato abrasivo delas com o ferramental.

#### **2.3.2.2 Atrito controlado**

Ainda segundo Mang (1983), o atrito deve ser controlado e na maioria das vezes se procurará obter o menor valor possível para o mesmo. Mas para alguns processos que dependam de tração para assegurar o movimento do metal, um valor mínimo de atrito é necessário e condicional, mostrando que a existência do

atrito também é desejada para execução de determinados processos de Conformação. Mesmo existente, este atrito também deve ter a possibilidade de ser controlado visando minimizar o desgaste das ferramentas de Conformação e o custo de processo. Um dos pontos chaves de controle do atrito é o acabamento superficial da ferramenta, que deve ser uniforme por toda a superfície do material de trabalho.

De acordo com Schaeffer (2005), a alta reatividade durante sua passagem ao longo da zona de deformação geralmente é desejável, particularmente se as reações ocorrerem no material de trabalho. Se este for basicamente reativo, o material da ferramenta deve apresentar filmes de proteção para as tais reações, pois, qualquer dano causado aos filmes deve ser rapidamente reparado.

O lubrificante deve ser anticorrosivo para as ferramentas, para o equipamento e para o produto acabado.

#### **2.4 Determinação do coeficiente de atrito de Coulomb ( $\mu$ )**

De acordo com Brito (2006) e Geier (2007), muitos métodos para conhecer o coeficiente de atrito de Coulomb ( $\mu$ ) durante o forjamento já foram estudados, sendo o Ensaio de Compressão do Anel um dos mais pesquisado e bastante aplicado.

Conforme apresentado por Bueno (2010), este ensaio é feito pela compressão de corpos de prova com o formato de anel entre placas (matrizes planas). Estes anéis são construídos em obediência a uma determinada geometria, que conserva determinada razão geométrica, para que se possa reproduzir com diferentes valores.

A razão 6:3:2 para o diâmetro externo, diâmetro interno e altura respectivamente, é a mais utilizada no meio acadêmico pela facilidade de ser reproduzida.

A figura 6 (a) apresenta o modelo de anel utilizado por Bueno e a figura 6 (b) apresenta a razão nas dimensões 24, 12 e 8 mm respectivamente.

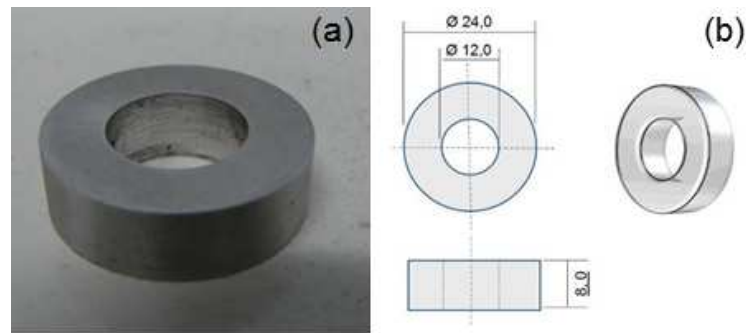


Figura 6 (a) Modelo de anel; (b) Razão 6:3:2 (Bueno 2010)

O procedimento não requer a utilização de sistema eletrônico de aquisição de dados (célula de carga e sensor de deslocamento linear), o que simplifica a sua realização. Nos corpos de prova são coletadas as medidas iniciais e finais da altura e do diâmetro interno, antes e após respectivamente de terem sido aplicadas as cargas definidas para avaliar as alterações ocorridas.

Para minimizar a possibilidade de erro, os corpos de prova conformados são medidos em duas direções, uma perpendicular à outra, para obter as dimensões do diâmetro interno. Da mesma forma se coletam as medidas da altura.

Após a obtenção destes valores, calcula-se a média das medições. Estas variações de altura ( $h$ ) e de diâmetro interno ( $d_i$ ) são obtidas através das equações (1) e (2). Para verificar a variação do diâmetro interno, utiliza-se a eq. (1).

$$\Delta d_i = -100 \cdot \left( \frac{d - d_0}{d_0} \right) \quad \text{eq. (1)}$$

Onde  $\Delta d_i$ ,  $d$ ,  $d_0$  correspondem, respectivamente à variação do diâmetro interno, ao diâmetro final e ao diâmetro inicial. Para a verificação da variação da altura ( $h$ ), utiliza-se a eq. (2).

$$\Delta h = -100 \cdot \left( \frac{h - h_0}{h_0} \right) \quad \text{eq. (2)}$$

Onde  $\Delta h$ ,  $h$  e  $h_0$  correspondem respectivamente à variação da altura, à altura final e à altura inicial.

Utilizando o Software Simufact Forming é construído um gráfico com curvas geradas por dados simulados de diferentes coeficientes de atrito relacionados com o mesmo material em análise. Um exemplo destas curvas é exposto na figura 7.

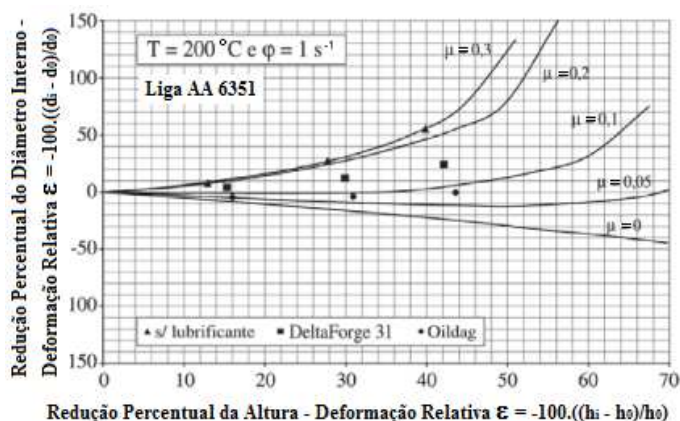


Figura 7 Curvas de atrito geradas no Software de Elementos Finitos LARSTRAN (UT Aachen - Alemanha) – Adaptado de Oliveira, Koller e Schaeffer (2003)

Com os dados medidos são efetuados os cálculos das variações obtidas no experimento, são feitas novas curvas e são inseridas no mesmo gráfico que fora obtido com as curvas de calibração simuladas. A análise do enquadramento destas curvas do ensaio no gráfico determina a faixa de coeficiente de atrito para o sistema avaliado.

Apesar de existirem outros métodos para a obtenção do coeficiente de atrito, Campbel, apud Parucker (2008), dispõe em seu trabalho uma tabela na qual ilustra o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) para diversos lubrificantes sólidos. Também outra tabela, aqui mostrada como Tabela 2, apresenta o coeficiente de atrito para o Carbono - C (grafite), para  $\text{MoS}_2$  e algumas misturas entre os mesmos. Cabe salientar que Parucker não explica qual método foi utilizado por Campbel para obtenção de tais coeficientes.

Tabela 2 Coeficiente de atrito ( $\mu$ ) para misturas de C e  $\text{MoS}_2$ .

Material	Carga (g)	Coeficiente de atrito ( $\mu$ )		
		27 °C	260 °C	538 °C
C	326	0,14 - 0,30	0,06 - 0,12	0,20 - 0,27
$\text{MoS}_2$ + 7%C	128	0,20 - 0,25	0,11	0,22 - 0,56
PbS (III)	-	0,55 - 0,70	0,30 - 0,70	-
$\text{MoS}_2$ + 31%C	128	0,16 - 0,21	0,12 - 0,14	0,13 - 0,16
$\text{MoS}_2$ + 73%C	128	0,15 - 0,21	0,08 - 0,11	0,11 - 0,17
$\text{MoS}_2$	326	0,34	0,1	-

Condições de teste: Carga = 326 g, Velocidade = 600 ft/min.

Fonte: Parucker, 2008

Geier (2007) apresenta em seu trabalho curvas simuladas de atrito para Alumínio, onde foram plotados os resultados práticos obtidos pelo ensaio do anel nas condições a seco e com  $\text{MoS}_2$ . Geier apresenta valores para – a) o coeficiente de atrito de Coulomb –  $\mu$ ; b) o fator de atrito interfacial –  $m$ ; e c) o modelo geral de atrito –  $f$ . Estes resultados podem ser visualizados na figura 8.

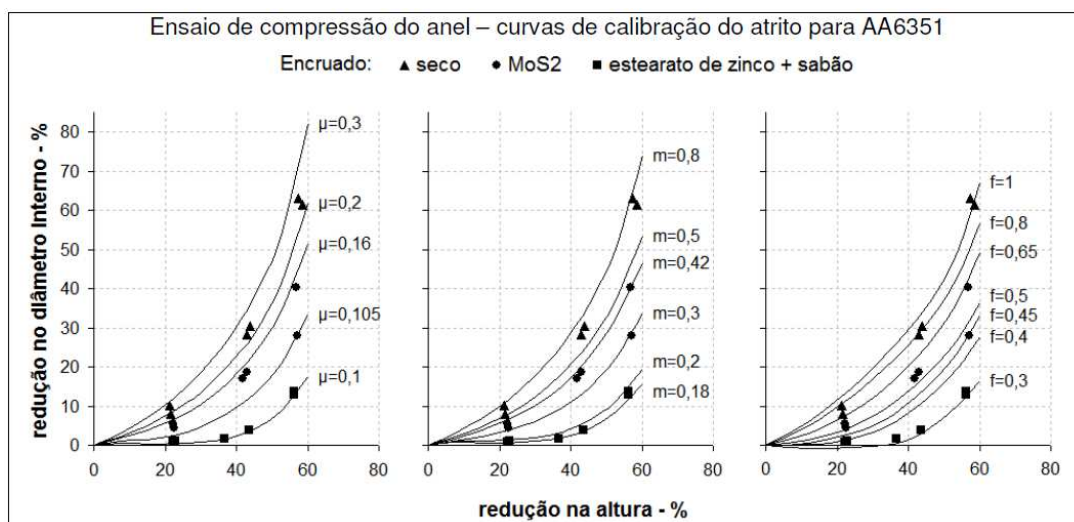


Figura 8 Resultados de atritos obtidos por Geier pelo ensaio do anel da liga AA6351

Geier obtém valores para atrito ( $\mu$ ) na condição a seco entre 0,20 e 0,30, enquanto que para a condição com adição de lubrificação na matriz (pó adicionado por pulverização na superfície), os valores ficam na faixa entre 0,105 e 0,16. Ainda verificou que seus resultados eram similares aos de outras literaturas pesquisadas na época.

## 2.5 Conceito da Metalurgia do Pó

Diversos autores como Brito, Medeiros e Lourenço (2007) e Martins (2010) descrevem a Metalurgia do Pó como sendo um processo que se propõe à conformação de materiais na forma de pós, de ligas de metálicas, não metálicas e de cerâmicas para obtenção de peças com boa resistência mecânica. É feita a compressão dos pós entre as ferramentas com o perfil / formato da peça desejada. Na primeira etapa do processo é obtida a peça denominada como "peça a verde". Posteriormente estas peças são sinterizadas em fornos específicos, geralmente com controle de atmosfera, ou até em vácuo. Após a sinterização algumas peças podem vir a necessitar calibragem e ou de acabamento /usinagem, mas com



intensidade muito menor que os processos de conformação convencionais. A figura 9 apresenta o fluxograma do processo de Metalurgia do Pó.

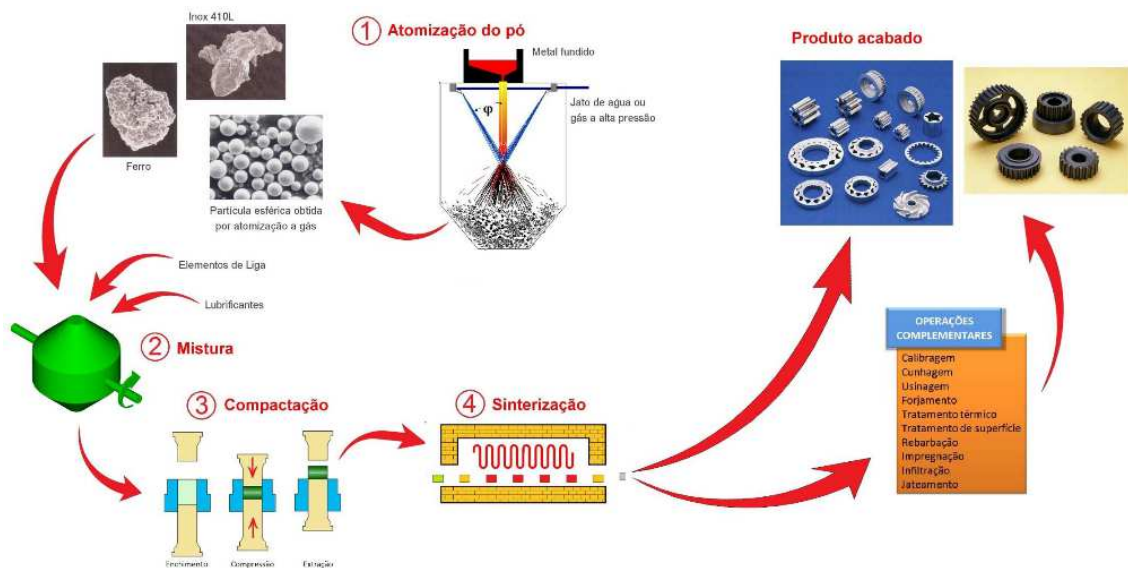


Figura 9 Fluxograma do Processo de Metalurgia do Pó. (UNIEMP, 2014)

Para autores como Thümmler, Oberacker (1993), Binder (2009), o processo de Metalurgia do Pó é desenvolvido nas seguintes principais etapas:

- Produção dos pós para matéria prima;
- Mistura de pós e aditivos;
- Compactação / Moldagem (conformação / obtenção da forma);
- Sinterização
- Calibragem

Segundo estes autores, a microestrutura obtida no material vai depender da realização destas etapas. Cada uma delas contribuirá para que se obtenha uma peça com a geometria do componente desejado, assim como com suas respectivas microestrutura e propriedades mecânicas. Citam ainda que a composição da liga e os parâmetros de processo também são fundamentais no resultado alcançado, para o que terão muita influência o tipo e tamanho de pó que será compactado, a pressão de compactação, a seleção da temperatura e do tempo de sinterização, bem como a atmosfera dos fornos que serão utilizados. Com atenção a estes principais critérios, a Metalurgia do Pó apresenta resultados muito satisfatórios na

produção de peças que até pouco tempo só eram produzidas com processos como forjamento, fundição e / ou usinagem.

Martins (2014) apresenta em seu trabalho dados referente à utilização de ligantes adicionados na mistura, como a parafina, cera de carnaúba, cera de abelha e polietileno linear de baixa densidade (PELBD). A figura 10 apresenta o ciclo térmico desde o início da fusão até a degradação total da parafina em peças sinterizadas.

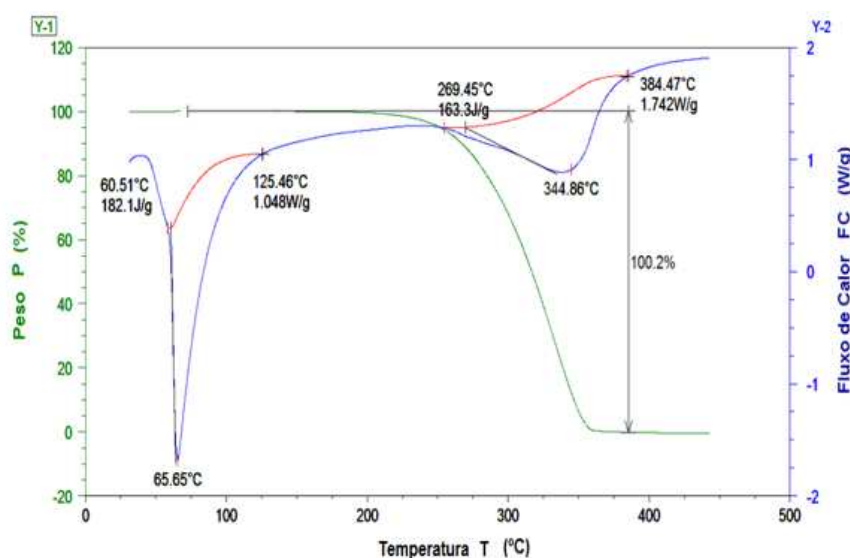


Figura 10 - Ciclo térmico de degradação da parafina em amostras sinterizadas. Martins (2014)

De acordo com Binder (2009), os avanços tecnológicos fizeram com que a Metalurgia do Pó tivesse uma significativa evolução no que se refere à qualidade dos pós e nas técnicas de moldagem e de sinterização, permitindo obter produtos cada vez mais complexos em geometria e no seu acabamento. Binder comenta também que o aumento do número de produtos fabricados com este processo e que a redução de custos que vem sendo alcançada estão promovendo em conjunto um crescimento contínuo da Metalurgia do Pó.

Dunkley (2000) apresenta o tamanho da demanda de produtos comercializados pela Metalurgia do Pó até o ano 2000 e faz uma perspectiva projetada para 2010. Refere que em 1986 o valor comercializado de produtos da Metalurgia do Pó foi na ordem de 10 milhões de dólares americanos, passando em três anos para 40 milhões, 400 milhões em 1997 e chegando a 700 milhões de dólares americanos em 2000. Na mesma análise ele estimou que os produtos

comercializados pela Metalurgia do Pó superariam a casa dos dois bilhões em 2010.

Devido à crise mundial que assolou o mercado de forma global entre os anos de 2008 e 2010, esta demanda não atingiu os patamares estimados, mas mesmo assim houve um aumento considerável pela adoção de novos métodos de obtenção de peças pela Metalurgia do Pó, entre eles os processos de Metal Injection Moulding – MIM.

Em 2014, o Instituto UNIEMP apresenta um relatório onde consta que 70% das peças produzidas pela metalurgia do pó são para o mercado automotivo, 26% para utilidades domésticas, 1,5% em ferramentas elétricas, 1% em motocicletas e 1,5% em outros. Neste relatório cita que de 1994 até 2014 houve crescimento na utilização de peças sinterizadas nos setores automotivos dos EUA, Brasil, Europa, China e do Japão.

Segundo o relatório do UNIEMP, em 2012 o Brasil utilizava apenas 55% do que era utilizado na Europa e no Japão e 39% do que era utilizado nos EUA.

É ressaltado no relatório do UNIEMP que o mercado da Metalurgia do Pó pode crescer ainda mais se atacar o mercado dos carros híbridos e elétricos, onde o peso de componentes pela metalurgia do pó é de 13 kg para o caso dos híbridos e 15 kg para os elétricos. Isso representa 2 e 2,3 vezes, respectivamente, a quantidade utilizada atualmente em carros no Brasil.

### **2.5.1 – Densidade Aparente**

A relação entre uma massa sólida e um volume conhecido representa a característica física de densidade. Já a mesma massa quando fragmentada terá uma massa menor, incluindo a porosidade, para ocupar o mesmo volume, representando agora a sua densidade aparente. No caso da Metalurgia do Pó, a densidade aparente pode ser definida como relação entre a massa (g) de uma quantidade de pó solto para certo volume, tida em  $\text{g/cm}^3$ . É de fundamental importância o conhecimento desta unidade, pois ela vai auxiliar na determinação do volume necessário de pó para que possa ser confeccionada uma peça com a geometria definida, e por consequência, para determinar o curso a ser utilizado na prensa.

## 2.5.2 – Densidade de aços sinterizados em função da pressão de compactação

A densidade real do Ferro puro está posicionada na parte superior do gráfico apresentado na figura 11 como sendo  $7,85 \text{ g/cm}^3$ .

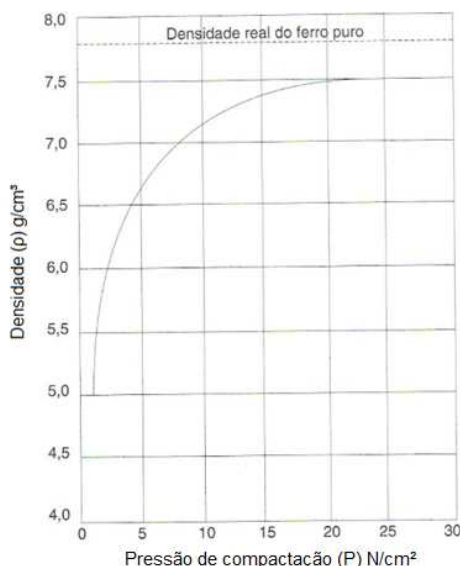


Figura 11- Curva de Compressibilidade de Fe sinterizado (Infomet)

Também é demonstrada a curva de densidades obtidas com pós atomizados de Ferro sinterizados e suas correspondências com as diferentes pressões de compactação aplicadas, onde é identificada tendência de aumento de densidade em função da pressão de compressão para pós de Ferro.

Igualmente, a pressão de compressão do pó tem influência sobre os valores de densidade e de resistência à tração para pó de Ferro compactado e sinterizado. Na Tabela 3 estão listados valores de densidade alcançados após a sinterização de pó de Ferro atomizado, que resultaram entre  $6,7$  e  $7,3 \text{ g/cm}^3$  com diferentes pressões de compactação.

Tabela 3 Propriedades de pós de Fe sinterizados

Tipo de pó	Densidade (ρ) g/cm³	Condição física do pó de Fe	Alongamento (δ) %	Dureza Rockwell F
Reduzido (esponja)	5,8	Sinterizado	1,5	54
	6,2	Sinterizado	1,5	66
	6,6	Sinterizado	2,0	71
Eletrolítico	6,9	Sinterizado	10,0	...
	7,3	Recomprimido	15,0	...
	7,5	Recomprimido	25,0	...
Atomizado	6,7	Sinterizado	4,0	61
	7,3	Sinterizado	7,0	78

Fonte: <http://www.infomet.com.br>. Acesso em 28 fev. 2014

### 2.5.3 Densidade de Aços Laminados

Os aços laminados, de médio ou alto Carbono, de baixa ou alta liga, apresentam propriedades físicas muito similares, entre elas a densidade. Na tabela 4 pode ser verificada a densidade do aço laminado AISI H13.

Tabela 4 Propriedades dos Aços AISI H13

↓ Propriedades ↓	20 °C	-	350 °C	-	-	700 °C	
Densidade - $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> )	7,85	-	-	-	-	-	
Condutividade Térmica (W/mK)	24	-	28,3	-	-	29,3	
Gradiente de Temperatura °C	20 °C - 100 °C	20 °C - 200 °C	20 °C - 300 °C	20 °C - 400 °C	20 °C - 500 °C	20 °C - 600 °C	20 °C - 700 °C
Coef. Exp. Térmica (10 <sup>6</sup> m/mk)	11,5	12	12,2	12,5	12,9	13	*

\*(Não verificado)

Fonte: Adaptado de <http://www.serrametal.com.br>. Acesso 10 ago. 2015

### 2.6 Ligas de Alumínio

Conforme Davies, apud Bouquerel et. al (2014), a procura e utilização de componentes de ligas leve, como o Alumínio, por exemplo, no setor de transporte tem-se tornado um desafio cada vez maior. Um dos motivos para utilização das ligas de Alumínio, segundo Davies, é para obter veículos mais leves e conseqüentemente, mais econômicos e seguros para o condutor, pois tendo menos massa possuem menos inércia, e necessitam para frenagem de um espaço menor do que os veículos mais pesados.

De acordo com ABAL – Associação Brasileira do Alumínio, as características químicas do Alumínio, como seu peso específico de 2,7 g/cm<sup>3</sup> é cerca de 35% do peso específico do aço e 30% do Cobre, e o seu ponto de fusão que é de 660 °C, o que conferem a este material, versatilidade e alta aplicabilidade na indústria. O Alumínio possui ligas de alta resistência mecânica quando tratadas termicamente, como as ligas das séries 2XXX (ligadas ao Cobre – ex.:ASTM AA 2024-T361), 6XXX (ligadas ao Mg e Si – ex.: ASTM AA 6351 – T6) e 7XXX (ligadas ao Zn – ex.: ASTM AA 7075 – T6).

Apesar de não serem tratadas termicamente as séries 3XXX (ligadas ao Mn – ex.: ASTM AA3003 – Recozido (O)) e 5XXX (ligadas ao Mg – ex.: ASTM AA 5052 - Def. a frio (H32)), são amplamente utilizadas, sendo a série 5XXX a mais

resistente, principalmente quando sofre trabalho a frio. A figura 12 apresenta os efeitos do trabalho a frio sobre ligas da série 3XXX.

Ao analisar o gráfico da figura 12 percebe-se que o limite de resistência à tração para esta liga é de aproximadamente 185 MPa com deformações em torno de 60%, e que seu limite de escoamento fica próximo 170 MPa para o mesmo valor de deformação.

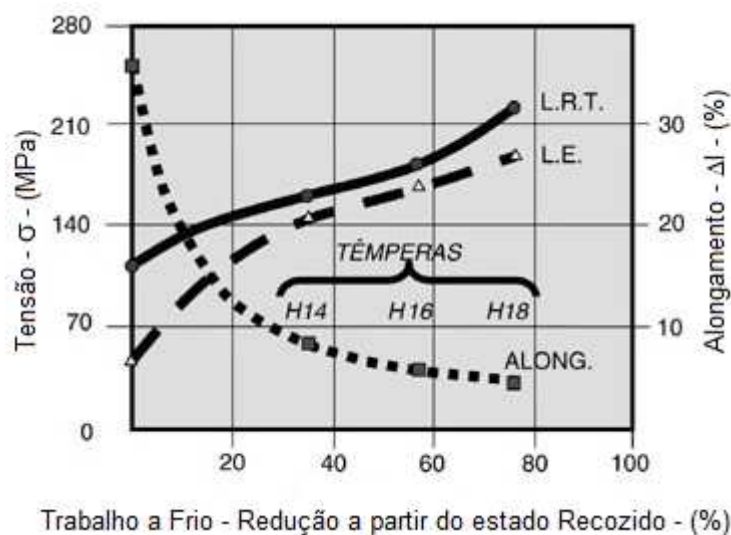


Figura 12 Efeitos do trabalho a frio sobre ligas de Alumínio da série 3XXX. Obtido de ABAL, 2015

A tabela 6 apresenta um comparativo entre as propriedades físicas típicas do Alumínio, aço e Cobre. Nesta tabela é possível verificar que o coeficiente de dilatação térmica do Alumínio é cerca de 50% maior que o do aço e 28,5% maior do que o do Cobre.

Tabela 2 Comparativo das propriedades do Alumínio, aço e Cobre

Propriedades físicas típicas	Alumínio	Aço	Cobre
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,70	7,86	8,96
Temperatura de fusão (°C) - Aproximado	660	1500	1083
Módulo de elasticidade (MPa)	70000	205000	110000
Coefficiente de dilatação térmica (L/°C);	23.10-6	11,7.10-6	16,5.10-6
Condutibilidade térmica a 25°C (Cal/cm/°C)	0,53	0,12	0,94
Condutibilidade elétrica (%IACS)	61	14,5	100

Fonte: <http://www.abal.org.br>. Acesso em 09 ago. 2015.

### 3. PROCEDIMENTOS E MÉTODOS

#### 3.1 Considerações iniciais

O desenvolvimento das atividades de avaliação deste trabalho utilizará como referência os aços para trabalho a quente muito comumente utilizados em operações de Calibragem a frio, na forma como são classificados pelos autores já descritos. A busca será por obter um aço ferramenta com propriedades mecânicas equivalentes a dos aços da classe "H" (para trabalho a quente), adicionando partículas de lubrificante sólido ao pó de aço H13 pelo processo de Metalurgia do Pó convencional. Com isto, se espera reduzir o atrito durante sua aplicação e obter melhor desempenho no processo de Calibração a Frio.

O Diagrama de Blocos da figura 13 representa as etapas estabelecidas para o desenvolvimento do trabalho em questão.

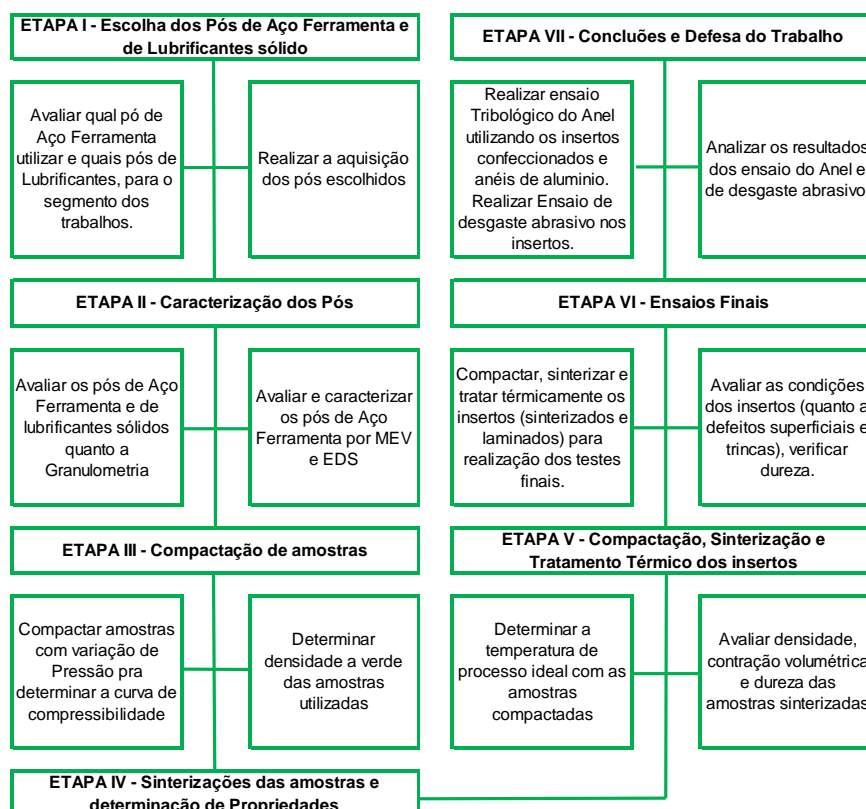


Figura 13 Diagrama de Blocos para o desenvolvimento do trabalho.

Como mencionado, o material selecionado para o desenvolvimento do estudo proposto foi o aço ferramenta em pó H13, classe H para trabalho a quente,

ligado ao Cromo-Molibdênio-Vanádio, temperável em óleo ou ao ar, o qual apresenta excelente tenacidade, alta resistência mecânica e boa resistência ao desgaste em temperaturas elevadas. Também apresenta boa resistência à fadiga térmica, ótima resistência ao choque térmico e ao amolecimento pelo calor.

### **3.2 Os pós selecionados para o desenvolvimento da proposta**

Os materiais base utilizados na forma de pó para o desenvolvimento dos conceitos doravante apresentados foram o pó de aço H13 e o lubrificante sólido bissulfeto de Molibdênio -  $\text{MoS}_2$ . O pó do aço ferramenta teve sua obtenção industrial pelo processo de atomização com tamanho de partícula média menor que  $45 \mu\text{m}$ . O mesmo foi obtido através da empresa ERAMET que faz a importação de pós metálicos atomizados da França para o Brasil. Para realização dos diversos corpos de prova aplicados na avaliação de desempenho neste trabalho foi feita a aquisição de 5 kg deste pó.

Foi utilizado 1 kg do pó de  $\text{MoS}_2$  proveniente da empresa JET LUB. De acordo com o fabricante, o tamanho de partícula média é de  $<45 \mu\text{m}$ , a densidade é de  $0,4 \text{ g/cm}^3$  e apresenta um grau de pureza de 98%.

### **3.3 Compactação das amostras de H13 com lubrificante sólido $\text{MoS}_2$**

Para a produção dos corpos de prova por compactação e sinterização foram adicionados ao H13 os percentuais de 1 a 5% de pó de lubrificante sólido bissulfeto de Molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ).

Utilizando uma prensa hidráulica foram realizadas as compactações para obter as curvas de compressibilidade das amostras. De posse destes dados foram confeccionados corpos de prova com a pressão de compactação variando em 10 passos de 100 MPa até atingir a pressão máxima de 1.000 Mpa. Esta sistemática foi repetida para cada percentual de 1% a 5% de lubrificante sólido  $\text{MoS}_2$ .

Para realização da etapa de compactação dos diversos corpos de prova que foram produzidos foi utilizado como matriz o conjunto de ferramenta de Aço D6 com a geometria que pode ser visualizada na figura 14 (a e b).



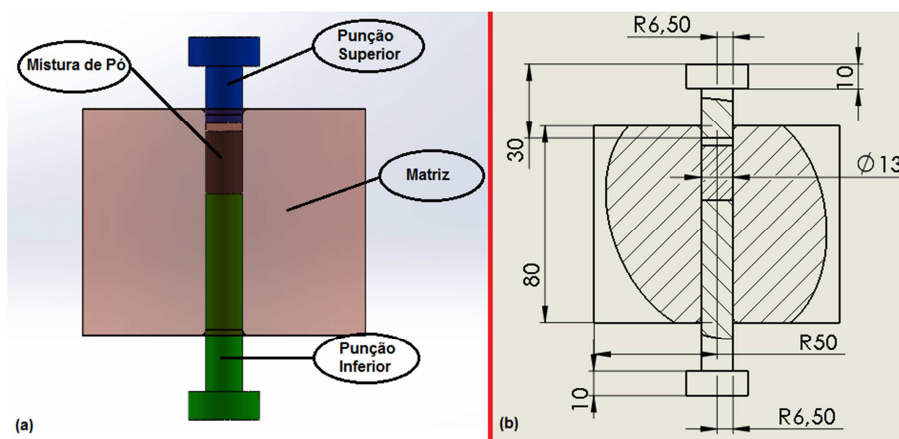


Figura 14 (a) Conjunto ferramental para compactação das amostras - (b) Geometria da matriz de compactação (dimensões em mm).

### 3.4 Compactação das amostras das misturas de pó de H13 com $\text{MoS}_2$ para caracterização das densidades a verde e após a sinterização.

As misturas foram realizadas no misturador de duplo cone (fig. 15) existente no LdTM / GDER (Laboratório de Transformação Mecânica / Grupo de Energias Renováveis). As cargas foram misturadas durante 120 minutos cada uma para alcançarem total homogeneidade. Como método progressivo de obtenção das misturas, foi feita a primeira com 1% de  $\text{MoS}_2$  adicionado ao pó de H13, avançando até o total de 5% do valor em peso. Também se adicionou à mistura um percentual em peso de 1,5% de parafina, que serviu como ligante dos pós durante a compactação.



Figura 15 Misturador de Duplo Cone. Do autor

### 3.5 Construção das curvas de Compressibilidade

A partir das peças compactadas em diferentes condições de mistura de pó de aço ferramenta e de lubrificante sólido com diferentes pressões, foram

constituídas as curvas de compressibilidade que são apresentadas nas figuras 16 até 20.

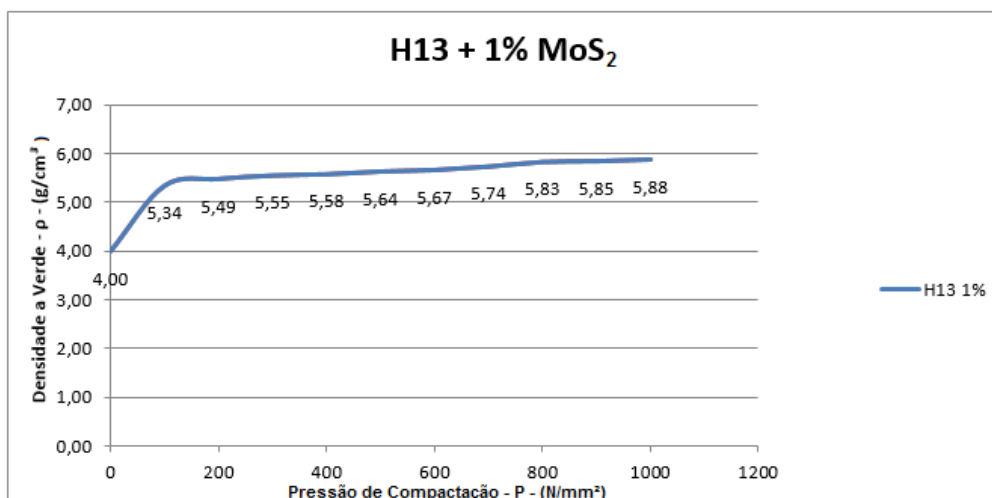


Figura 16 Curva de compressibilidade a verde para mistura de aço ferramenta H13 com 1% de MoS<sub>2</sub>

Com a variação de pressões entre 100 MPa e 1000 MPa foram obtidas densidades entre 5,34 g/cm<sup>3</sup> e 5,88 g/cm<sup>3</sup> para os corpos de prova com pressão de compactação de 100 MPa e 1000 MPa respectivamente, nas amostras compactadas da mistura de aço ferramenta H13 com 1% de MoS<sub>2</sub>.

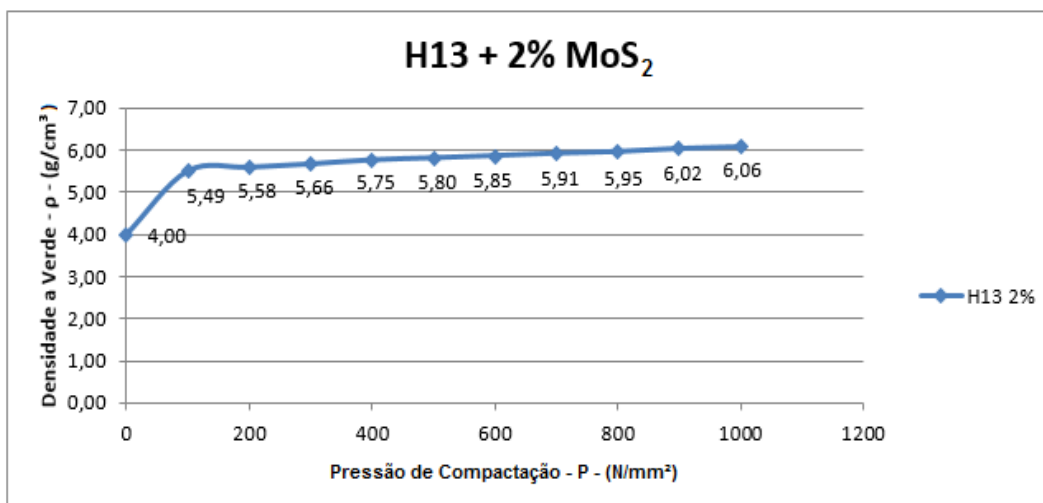


Figura 17 Curva de Compressibilidade a verde da mistura de pó de aço ferramenta H13 com adição de 2% MoS<sub>2</sub>

Para a mistura de pó de aço ferramenta H13 com adição de 2% de MoS<sub>2</sub> foram obtidas densidades entre 5,49 g/cm<sup>3</sup> e 6,06 g/cm<sup>3</sup>, para os corpos de prova com pressão de compactação de 100 MPa e 1000 MPa respectivamente.

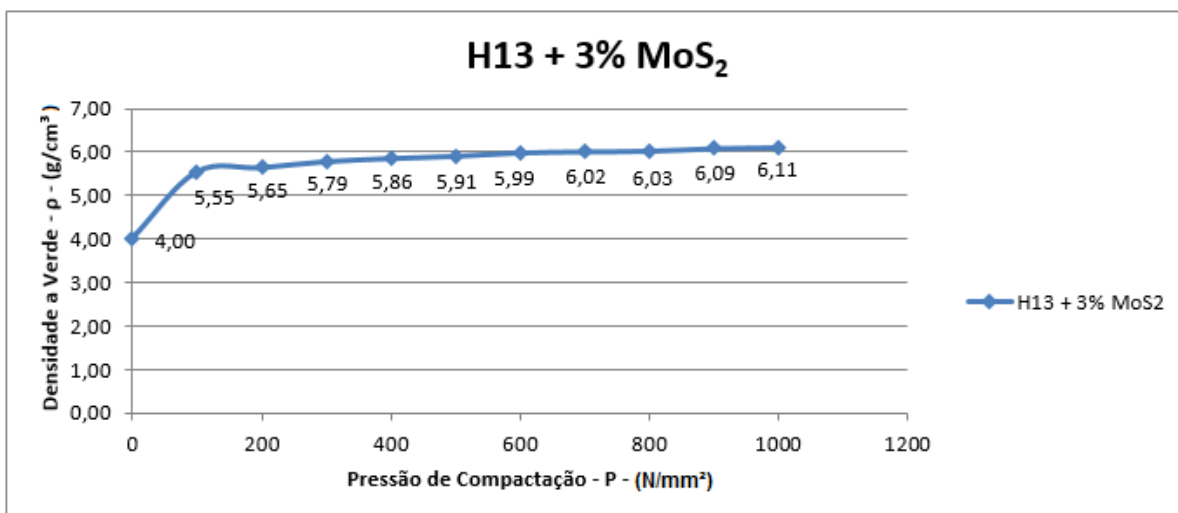


Figura 18 Curva de Compressibilidade a verde da mistura de pó de aço ferramenta H13 com adição de 3% MoS<sub>2</sub>

Para a mistura de pó de aço ferramenta H13 com adição de 3% de MoS<sub>2</sub> foram obtidas densidades entre 5,55 g/cm<sup>3</sup> e 6,11 g/cm<sup>3</sup>, para os corpos de prova com pressão de compactação de 100 MPa e 1000 MPa respectivamente. .

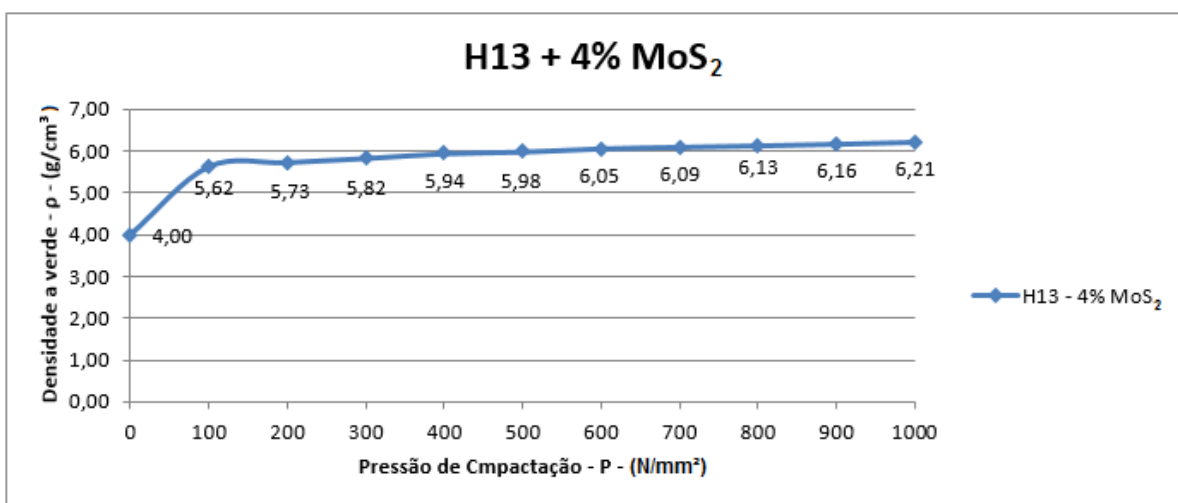


Figura 19 Curva de Compressibilidade a verde da mistura de pó de aço ferramenta H13 com adição de 4% MoS<sub>2</sub>

Para a mistura de pó de aço ferramenta H13 com adição de 4% de MoS<sub>2</sub> foram obtidas densidades entre 5,62 g/cm<sup>3</sup> e 6,21 g/cm<sup>3</sup>, para os corpos de prova com pressão de compactação de 100 MPa e 1000 MPa respectivamente.

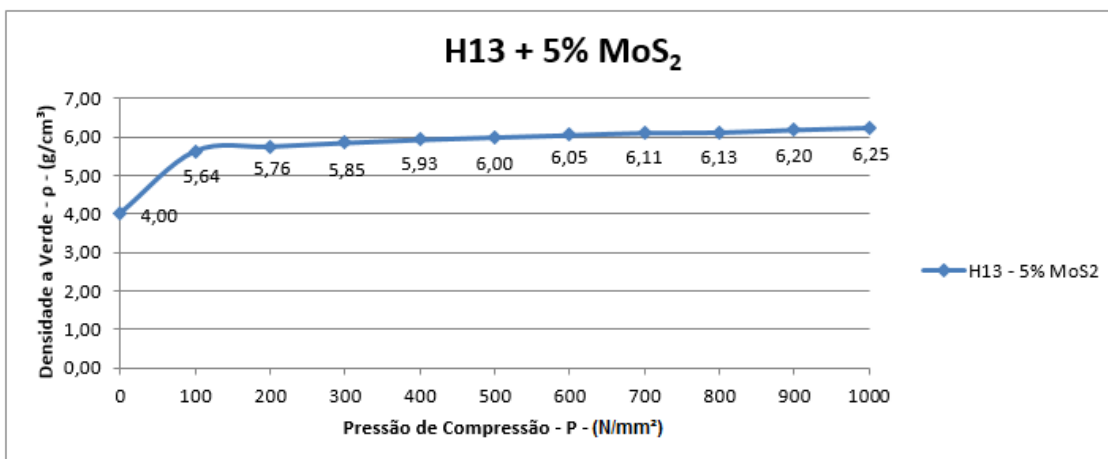


Figura 20 Curva de Compressibilidade a verde da mistura de pó de aço ferramenta H13 com adição de 5% MoS<sub>2</sub>

Para a mistura de pó de aço ferramenta H13 com adição de 5% de MoS<sub>2</sub> foram obtidas densidades entre 5,64 g/cm<sup>3</sup> e 6,25 g/cm<sup>3</sup>, para os corpos de prova com pressão de compactação de 100 MPa e 1000 MPa respectivamente.

### 3.6 Sinterizações

A sinterização foi realizada em forno contínuo com atmosfera controlada de Nitrogênio à temperatura de 1260 °C. A figura 21 é uma representação do forno utilizado.

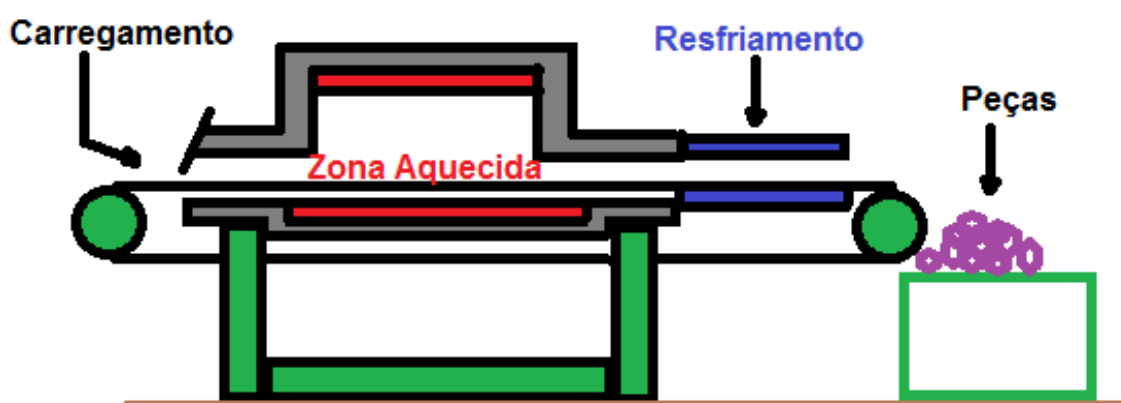


Figura 21 Representação esquemática do forno de sinterização

Realizadas as sinterizações, os corpos de provas foram analisados e verificou-se que a temperatura escolhida foi adequada, não apresentando nenhum defeito visual. Também foi ao encontro do que é referido na literatura quanto à faixa de temperatura na sinterização, que fica entre 2/3 e 3/4 do ponto de fusão do elemento principal da liga (o de maior volume).

### **3.7 Densidades Aparentes dos insertos**

O valor de densidade aparente obtido através da utilização do já referido conjunto de ferramentas de aço D6, onde a cavidade interna apresenta 50,0 mm de altura (h) e diâmetro de 13,0 mm, equivalente ao volume fixo 6,63 cm<sup>3</sup> com a mistura de pó solto inserido no formato cilíndrico.

### **3.8 Densidades a Verde e Densidades Sinterizadas dos Insertos**

Foram medidas as massas dos diversos corpos de prova compactados em uma balança de precisão e, com auxílio de um paquímetro digital, foram feitas as leituras dimensionais dos respectivos diâmetros e alturas com o objetivo de calcular os respectivos volumes. Utilizando a fórmula da densidade, que relaciona a massa e o volume, foi calculada a densidade a verde destes produtos compactados. O mesmo procedimento foi feito para as amostras também na condição de sinterizadas, calculando-se os valores para a densidade sinterizada dos corpos de prova.

### **3.9 Caracterização das amostras, Densidade Teórica e Porosidade Total**

Para melhor caracterização dos insertos usados como corpos de prova foram realizados testes e avaliações tais como a densidade teórica, porosidade total, microdureza e dureza, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, assim como os ensaios tribológicos e de abrasão com roda de borracha.

#### **3.9.1 Densidade Teórica**

Para a caracterização das amostras quanto à densidade teórica, primeiramente foram medidas as massas dos corpos de provas sinterizados na mesma balança analítica utilizada anteriormente para as verificações de densidade a verde.

Posteriormente, a densidade teórica ( $\rho_T$ ) foi obtida pela equação 3, a qual relaciona a soma das massas dos constituintes A e B com soma das massas ( $m$ ) de cada constituinte dividida por sua densidade teórica ( $\rho_T$ ).

$$\rho_T = m_A + m_B / ((m_A / \rho_{TA}) + (m_B / \rho_{TB})) \quad (\text{eq. 3})$$

Onde:

$\rho_T$  = densidade teórica (g/cm<sup>3</sup>)

$m_A$  = massa do constituinte A (g)

$m_B$  = massa do constituinte B (g)

$\rho_{TA}$  = densidade teórica do constituinte A (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_{TB}$  = densidade teórica do constituinte B (g/cm<sup>3</sup>)

### 3.9.2 Porosidade Total

Para avaliação da porosidade total percentual ( $p^t$ ) foi utilizada a equação 4.

$$p^t = (1 - (\rho_s / \rho_{TC})) \cdot 100 \quad (\text{eq. 4})$$

Onde:

$p^t$  = porosidade total (%)

$\rho_s$  = densidade do sinterizado (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_{TC}$  = densidade teórica do composto (g/cm<sup>3</sup>)

### 3.9.3 Microdureza Vickers

Segundo a norma ASTM E 384 – *Standard Test Method for Microhardness of Materials*, foi realizado o ensaio de microdureza Vickers. O ensaio foi realizado em um microdurômetro ISH TDV 1.000 INSIDE (fig. 22). Foram utilizadas cargas de 1.000 gf sobre a superfície de ensaio do material para se medir as dimensões das diagonais das indentações.

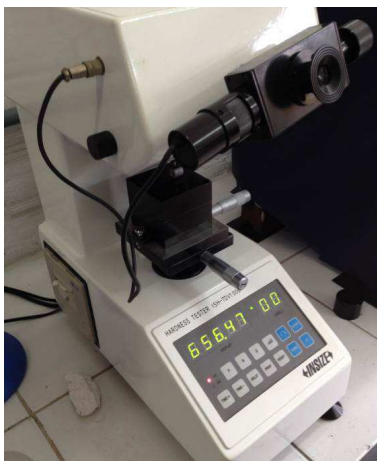


Figura 22 Microdurômetro Shimadzu

### 3.9.4 Ensaio Metalográficos e Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

Para avaliação das fases presentes nas amostras sinterizadas utilizou-se um Microscópio metalúrgico invertido – GX-51 (fig. 23). Aumentos de 5x, 10x, 20x, 50x, 100x Iluminação: Campo claro, campo escuro, luz polarizada simples, DIC. Captura de imagem, OLYMPUS DP e analySIS. Para realização dos procedimentos dos ensaios metalográficos foram utilizadas as seguintes normas:

- Ensaio metalográfico para a análise de microestrutura.

ASTM E 407/2007

ASTM E 3/2001 (2007)



Figura 23 Microscópio metalúrgico invertido – GX-51 - OLYMPUS

A figura 24 apresenta o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do Centro de Microscopia da UFRGS, de marca JEOL modelo 5800, que foi utilizado para a determinação da microcomposição química dos elementos constituintes, das fases e para ampliação das imagens de interesse nas amostras.



Figura 24 Microscópio Eletrônico de Varredura - JEOL

### 3.9.5 Ensaios tribológicos e teste de compressão do anel

Para realização dos testes de compressão do anel foram utilizados insertos na forma de placas confeccionados por sinterização da mistura de pó de aço H13 + 3% de  $\text{MoS}_2$ , e também blocos de aço ferramenta H13 comercial laminado, redondo, a quente.

A partir de uma barra de Alumínio ASTM AA6351 foram confeccionados anéis com geometria definida por uma razão 6:3:2 entre o diâmetro externo, o diâmetro interno e a altura, conforme descritos por Bueno (2010).

Os anéis foram posicionados para prensagem entre o conjunto de ferramentas planas no qual está alojado o inserto conforme figura 25. O conjunto ferramental foi montado em uma prensa hidráulica da Marca EKA de 40 toneladas.

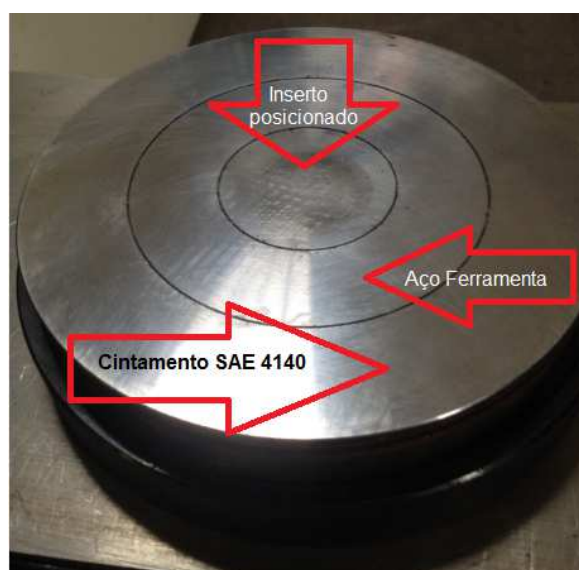


Figura 25 Ferramental para ensaio tribológico do anel



Foram aplicadas individualmente forças para a redução de altura destes anéis de Alumínio em aproximadamente 20%, 40% e 60%. Na tabela 18 estão as medições do diâmetro interno e da espessura dos anéis, antes e depois da aplicação das cargas conhecidas, de onde se obtiveram os valores dos ensaios práticos que serão apresentados no capítulo 4. Os mesmos estarão inseridos no gráfico para comparação com curvas simuladas apresentadas na fig.26.

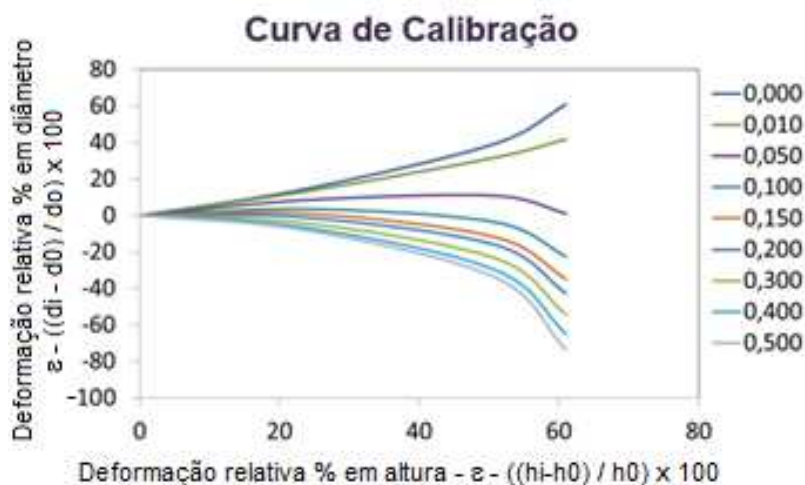


Figura 26 Curvas de atrito simuladas para Alumínio no Software *Simufact Forming*

O gráfico da figura 26 foi feito com auxílios do computador e do software *Simufact Forming* e apresenta os coeficientes teóricos de atrito do ferramental de aço H13. São feitas para permitir comparação entre os resultados dos ensaios práticos com as curvas simuladas.

Os resultados obtidos com os anéis de Alumínio da liga ASTM AA 6351 prensados nas placas sinterizadas com a mistura dos pós de aço e de lubrificante sólido são comparados com os resultados dos anéis de Alumínio da mesma liga prensados nos blocos de aço ferramenta H13 laminado comercial.

### 3.9.6 Ensaio Abrasivo

O ensaio abrasivo foi realizado em uma máquina de “areia seca / disco de borracha”, como é mostrada na figura 27. O teste foi desenvolvido com base na norma ASTM G 65 que descreve os procedimentos e parâmetros para sua realização.



Figura 27 Equipamento de ensaio abrasivo "areia seca/disco de borracha"

De acordo com a norma ASTM G 65 os corpos de prova são pesados antes e após a realização do ensaio com o propósito de avaliar a perda de massa havida durante o ensaio.

A faixa de dureza dos corpos de prova de aço H13 convencional utilizados nos ensaios encontravam-se na faixa de 50 – 52 HRc e os corpos de prova de aço H13 sinterizados com adição de  $\text{MoS}_2$  estavam na faixa de 50 – 54 HRc. Tais valores de dureza foram verificados após os processos de tratamento térmico e de preparação superficial (polimento) das amostras.

Ainda em concordância com a ASTM G 65, o fluxo de areia para o ensaio deve estar entre 300 e 400 g/min. A medição deste valor de fluxo antes e após o ensaio ficou em 349 g/min, dentro da faixa especificada pela norma.

### **3.10 Ensaios Complementares**

Para melhor caracterização dos insertos foi realizado ensaio de difração de Raio X – (DRX), visando verificar as fases presentes no inserto.

#### **3.10.1 Difração de Raio X – DRX**

A difração de Raio X foi realizada no Laboratório de Física da UFRGS. Os parâmetros utilizados no equipamento foram:

- Fonte – Cu;
- kV/mA – 40/17.5;

- Fendas – 1/1/1/.15/s;
- Ângulo Inicial – 10.0;
- Ângulo Final – 100.0;
- Incremento – 0.05.

Para analisar os valores obtidos na difração de Raio X, foi utilizado o software X'Pert High Score 2.0.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Misturas compactadas

As misturas foram compactadas na forma de cilindros (fig. 28), considerando cinco variações de percentual de  $\text{MoS}_2$  (de 1% - denominada "F" até 5% - denominada "J"), e dez diferentes pressões de compactação utilizadas na prensa (de 100 MPa – denominada "I" até 1.000 MPa – denominada "X").



Figura 28 Vista superior das misturas compactadas no formato de cilindros para obtenção das densidades a verde.

Para estes corpos de prova foram calculadas as densidades a verde através da divisão das respectivas massas (pesadas após cada compactação) pelos volumes correspondentes (obtidos pela medição da altura e diâmetro após cada compactação).

Os valores das compactações para obtenção das densidades a verde estão apresentados nas tabelas de 6 a 10, que no caso representam os resultados das misturas de pó de aço ferramenta H13 com adição de 1% de  $\text{MoS}_2$  a 5% de  $\text{MoS}_2$ , identificados na primeira coluna pelas letras de "F" a "J", respectivamente. São precedidos com a numeração em alfabeto romana de "I" a "X", que significam as pressões utilizadas para compactação, de 100 a 1.000 Mpa.

Tabela 6 Densidade a verde em Corpos de Prova H 13 + 1% MoS<sub>2</sub>

Corpo de Prova	Pressão de Compressão - P (N/mm <sup>2</sup> )	Massa verde - m (g)	Altura verde - h (cm)	Diametro a verde - d (cm)	Volume a verde - V (Cm <sup>3</sup> )	Densidade a verde - ρ (g/Cm <sup>3</sup> )
	0	20,00	0,00	0,00	5,0000	4,00
I - F	100	9,725	13,73	12,99	1.819,61	5,34
II - F	200	9,764	13,41	13,00	1.779,94	5,49
III - F	300	9,939	13,48	13,00	1.789,23	5,55
IV - F	400	9,838	13,26	13,01	1.762,74	5,58
V - F	500	9,853	13,13	13,02	1.748,14	5,64
VI - F	600	9,849	13,07	13,01	1.737,48	5,67
VII - F	700	9,853	12,92	13,01	1.717,54	5,74
VIII - F	800	9,839	12,69	13,01	1686,965	5,83
IX - F	900	9,830	12,64	13,01	1680,318	5,85
X - F	1000	9,854	12,6	13,01	1675,001	5,88

Tabela 7 Densidade a verde em Corpos de Prova H 13 + 2% MoS<sub>2</sub>

Corpos de Prova	Pressão de Compressão - P (N/mm <sup>2</sup> )	Massa verde - m (g)	Altura verde - h (cm)	Diametro a verde - d (cm)	Volume a verde - V (Cm <sup>3</sup> )	Densidade a verde - ρ (g/Cm <sup>3</sup> )
	0	20,00	0,00	0,00	5,0000	4,00
I - G	100	9,899	13,61	12,99	1.803,71	5,49
II - G	200	9,967	13,46	13,00	1.786,58	5,58
III - G	300	9,904	13,19	13,00	1.750,74	5,66
IV - G	400	9,883	12,96	12,99	1.717,57	5,75
V - G	500	9,932	12,90	13,00	1.712,25	5,80
VI - G	600	9,897	12,74	13,00	1.691,01	5,85
VII - G	700	9,912	12,62	13,01	1.677,66	5,91
VIII - G	800	9,908	12,55	13,00	1665,7902	5,95
IX - G	900	9,792	12,26	13,00	1627,2979	6,02
X - G	1000	9,885	12,29	13,00	1631,2798	6,06

Tabela 8 Densidades a verde em Corpos de Prova H13 + 3% MoS<sub>2</sub>

Corpos de Prova	Pressão de Compressão - P (N/mm <sup>2</sup> )	Massa verde - m (g)	Altura verde - h (cm)	Diametro a verde - d (cm)	Volume a verde - V (Cm <sup>3</sup> )	Densidade a verde - ρ (g/Cm <sup>3</sup> )
	0	20,000	0,00	0,00	5,0000	4,00
I - H	100	9,964	13,52	13,00	1.794,54	5,55
II - H	200	9,919	13,25	12,99	1.756,00	5,65
III - H	300	9,914	12,90	13,00	1.712,25	5,79
IV - H	400	9,902	12,75	12,99	1.689,73	5,86
V - H	500	9,945	12,67	13,00	1.681,72	5,91
VI - H	600	9,926	12,50	12,99	1.656,60	5,99
VII - H	700	9,910	12,41	13,00	1.647,21	6,02
VIII - H	800	9,984	12,47	13,00	1.655,17	6,03
IX - H	900	9,932	12,29	13,00	1.631,28	6,09
X - H	1000	10,005	12,31	13,01	1.636,45	6,11

Tabela 9 Densidades a verde em Corpos de Prova H13 + 4% MoS<sub>2</sub>

Corpos de Prova	Pressão de Compressão - P (N/mm <sup>2</sup> )	Massa verde - m (g)	Altura verde - h (cm)	Diametro a verde - d (cm)	Volume a verde - V (Cm <sup>3</sup> )	Densidade a verde - ρ (g/Cm <sup>3</sup> )
	0	20,00	0,00	0,00	5,0000	4,00
I - I	100	10,003	13,42	12,99	1.778,53	5,62
II - I	200	9,957	13,10	13,00	1.738,79	5,73
III - I	300	7,543	9,76	13,00	1.295,47	5,82
IV - I	400	8,920	11,34	12,99	1.502,87	5,94
V - I	500	9,971	12,57	13,00	1.668,44	5,98
VI - I	600	9,997	12,44	13,00	1.651,19	6,05
VII - I	700	9,970	12,33	13,00	1.636,59	6,09
VIII - I	800	9,942	12,21	13,01	1.623,16	6,13
IX - I	900	9,936	12,11	13,02	1.612,34	6,16
X - I	1000	9,948	12,03	13,02	1.601,69	6,21

Tabela 30 Densidades a verde em Corpos de Prova H13 + 5% MoS<sub>2</sub>

Corpos de Prova	Pressão de Compressão - P (N/mm <sup>2</sup> )	Massa verde - m (g)	Altura verde - h (cm)	Diametro a verde - d (cm)	Volume a verde - V (Cm <sup>3</sup> )	Densidade a verde - ρ (g/Cm <sup>3</sup> )
	0	20,00	0,00	0,00	5,0000	4,00
I - J	100	10,018	13,39	13,00	1.777,29	5,64
II - J	200	10,147	13,28	13,00	1.762,68	5,76
III - J	300	9,974	12,82	13,01	1.704,25	5,85
IV - J	400	9,976	12,65	13,01	1.681,65	5,93
V - J	500	10,013	12,56	13,01	1.669,68	6,00
VI - J	600	10,042	12,48	13,01	1.659,05	6,05
VII - J	700	9,966	12,28	13,00	1.629,95	6,11
VIII - J	800	10,007	12,29	13,01	1.633,79	6,13
IX - J	900	10,138	12,31	13,01	1.636,45	6,20
X - J	1000	10,103	12,16	13,01	1.616,51	6,25

## 4.2 Sinterização das amostras e dos insertos finais

Os corpos de prova sinterizados podem ser visualizados na figura 29.

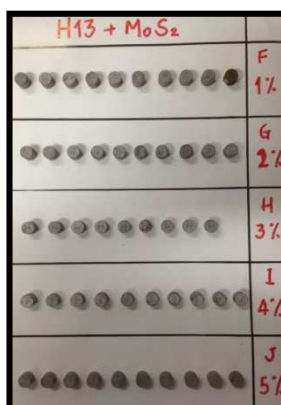


Figura 29 Corpos de Prova Sinterizados em H13 com 1% a 5% MoS<sub>2</sub>, nomeados de F a J



A identificação na coluna da direita se dá pelas letras de F à J, que representam sucessivamente o percentual de 1% a 5% de MoS<sub>2</sub> acrescido à mistura com o pó de H13.

Após a sinterização foi realizada a verificação de massa de cada corpo de prova. Fez-se uso de uma balança de precisão marca Dhaus – Adventurer, com capacidade de carga máxima de 4.100 g e precisão de 0,01 g. Posteriormente, foram medidas as amostras nas dimensões de altura e de diâmetro com auxílio de um paquímetro digital.

Com estes dados foram montadas as tabelas de cálculos que forneceram os valores de densidade sinterizada das peças com teor de 1% a 5% de MoS<sub>2</sub>.

A tabela 11 apresenta os valores para o teor de 3% de MoS<sub>2</sub>.

Tabela 41 Valores de densidades das amostras sinterizadas com teor de 3% de MoS<sub>2</sub>

Corpo de Prova	Pressão de compressão - P (N/mm <sup>2</sup> )	Massa Sinterizado - m (g)	Altura Sinterizado - h (cm)	Diâmetro Sinterizado - d (cm)	Volume sinterizado - V (cm <sup>3</sup> )	Densidade sinterizada (g/cm <sup>3</sup> )
I - H	100	9,77	12,81	12,26	1.512,24	6,46
II - H	200	9,73	12,47	12,25	1.469,70	6,62
III - H	300	9,73	12,19	12,29	1.445,50	6,73
IV - H	400	9,75	11,90	12,33	1.420,90	6,86
V - H	500	9,77	12,00	12,34	1.435,16	6,81
VI - H	600	9,75	11,87	12,35	1.420,77	6,86
VII - H	700	9,75	11,74	12,35	1.406,35	6,93
VIII - H	800	9,82	11,61	12,35	1.390,77	7,06
IX - H	900	9,77	11,48	12,34	1.372,97	7,12
X - H	1000	9,84	11,35	12,35	1.359,63	7,24

A figura 30 apresenta o gráfico de densidades obtidas com as amostras sinterizadas (H13 + 3% de MoS<sub>2</sub>).

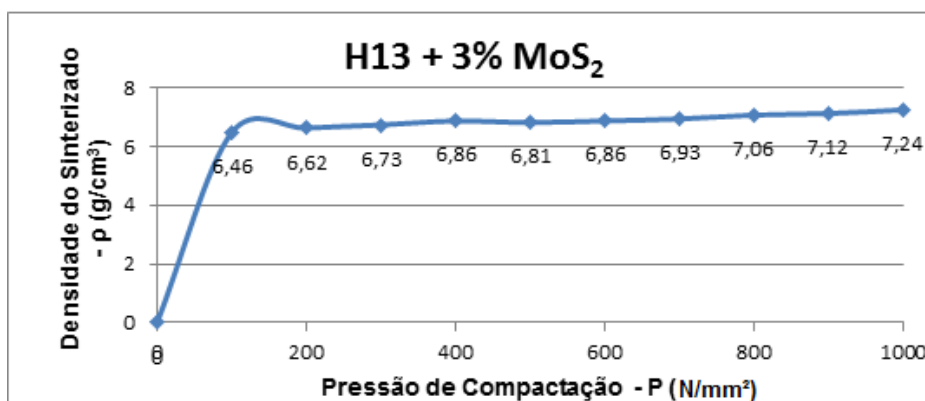


Figura 30 Densidade dos corpos de prova H13 + 3% MoS<sub>2</sub> sinterizados

### 4.3 Seleções da mistura e da pressão de compactação

Foram batidos 15 pontos de dureza que iniciaram a 1,5 mm da borda do inserto e com espaçamento de 1,5 mm entre os cinco primeiros (região da borda). Os cinco pontos batidos na região entre a borda e o centro do inserto iniciaram a 13,0 mm da borda, com o espaçamento de 1,0 mm entre cada ponto. Por fim, foram batidos os últimos cinco pontos, iniciando a 6,0 mm do centro com espaçamento de 1,0 mm entre cada ponto. Todos os pontos foram avaliados partindo da borda em direção ao centro, conforme esquema da figura 31.

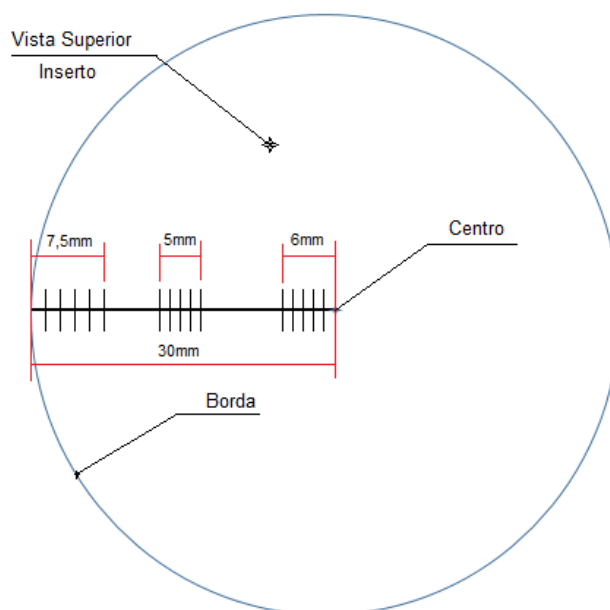


Figura 31 Perfil esquemático de dureza

As tabelas 12 e 13 apresentam os dados de microdureza Vickers obtidos nos corpos de prova após sinterização (compactados com 300 MPa e 1.000 MPa, respectivamente).

Observou-se que o valor de microdureza obtido nas amostras diminuía à medida que aumentava o percentual de lubrificante adicionado na mistura.

Para evitar o uso de uma mistura pouco lubrificante se a composição com 1% fosse selecionada e também para evitar a queda acentuada da microdureza demonstrada na mistura com 5% de  $\text{MoS}_2$ , foi feita a escolha do valor intermediário de 3% para representar a defesa dos conceitos pretendidos ao longo deste trabalho.



Tabela 52 Redução da microdureza HV em função do % de mistura do MoS<sub>2</sub> – Pressão de compactação 300 MPa

% MoS <sub>2</sub> dos Corpos de Prova	Corpos de Prova com 300 MPa (III) de pressão de compactação	Dureza HV região próxima à borda do CP	Dureza HV posição centro	Dureza HV posição entre centro e borda	Dureza HV média
1%	F III	673,44	623,48	598,55	<b>631,82</b>
2%	G III	620,15	602,09	624,50	<b>615,58</b>
<b>3%</b>	H III	593,21	583,75	641,00	<b>605,99</b>
4%	I III	610,07	615,28	580,42	<b>601,92</b>
5%	J III	411,43	475,32	458,28	<b>448,34</b>

Tabela 63 Redução da microdureza em função do % de mistura do MoS<sub>2</sub> – Pressão de compactação 1.000 MPa

% MoS <sub>2</sub> nos Corpos de Prova	Corpos de Prova com 1.000 MPa (X) de compactação	Dureza HV região próxima à borda do CP	Dureza HV posição centro	Dureza HV posição entre centro e borda	Dureza HV média
1%	FX	847,16	933,85	829,78	<b>870,26</b>
2%	GX	723,57	767,28	690,92	<b>727,26</b>
<b>3%</b>	HX	631,30	661,45	665,17	<b>652,64</b>
4%	IX	667,77	644,27	590,02	<b>634,02</b>
5%	JX	635,94	611,95	597,47	<b>615,12</b>

Pode-se observar na análise da tabela 14 que existe pouca variação da densidade sinterizada considerando-se as diferentes pressões de compactação utilizadas.

Para a continuidade dos ensaios realizados neste trabalho, em conjunto com o percentual de 3% de lubrificante, também foi selecionada a pressão de 1.000 MPa para a compactação, pois apresentou o maior valor de densidade do sinterizado conforme é constatado nesta mesma tabela.

Tabela 74 Densidade dos corpos de prova de H13 + 3% MoS<sub>2</sub> sinterizados

Corpo de Prova	Pressão de compressão - P (N/mm <sup>2</sup> )	Massa Sinterizado - m (g)	Altura Sinterizado - h (cm)	Diametro Sinterizado - d (cm)	Volume sinterizado - V (cm <sup>3</sup> )	Densidade sinterizada (g/cm <sup>3</sup> )
I - H	100	9,77	12,81	12,26	1.512,24	6,46
II - H	200	9,73	12,47	12,25	1.469,70	6,62
III - H	300	9,73	12,19	12,29	1.445,50	6,73
IV - H	400	9,75	11,90	12,33	1.420,90	6,86
V - H	500	9,77	12,00	12,34	1.435,16	6,81
VI - H	600	9,75	11,87	12,35	1.420,77	6,86
VII - H	700	9,75	11,74	12,35	1.406,35	6,93
VIII - H	800	9,82	11,61	12,35	1.390,77	7,06
IX - H	900	9,77	11,48	12,34	1.372,97	7,12
X - H	1000	9,84	11,35	12,35	1.359,63	7,24

#### 4.4 Análise metalográfica das amostras após sinterização

As peças sinterizadas foram embutidas em baquelite para permitir o seu manuseio na preparação das superfícies em politriz. Foram utilizadas lixas com granulometria de 80 até 1500.

Para o acabamento foi feito polimento com pasta abrasiva em disco de feltro. As peças já polidas foram então atacadas em solução Nital, com 3% ácido nítrico e 97% álcool etílico (fig. 32). A oxidação controlada nesta condição permitiu contrastar as imagens conforme é visto na figura 33, onde ficou evidenciada a formação de matriz ferrítica, com perlita e carbonetos precipitados.



Figura 32 Ataque químico na superfície com solução de Nital 3%

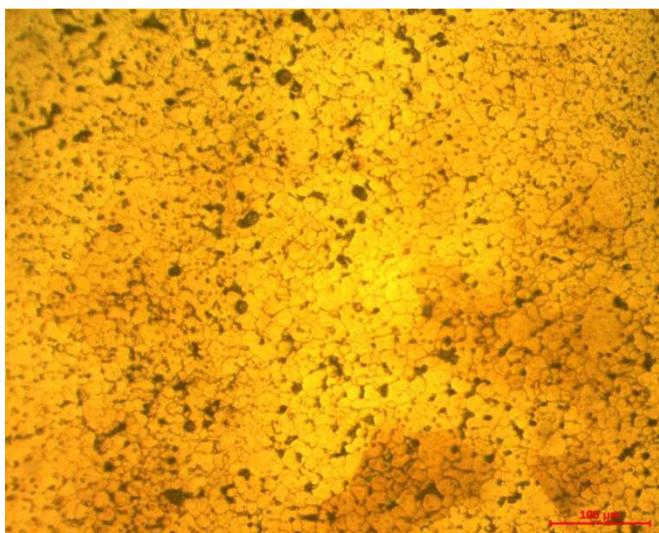


Figura 33 Amostra "X – H" (3% de  $\text{MoS}_2$  a 1.000 MPa) - Sinterizada – Ampliação de 100X

O corpo de prova representativo da seleção de mistura e pressão foi submetido aos tratamentos térmicos de Têmpera e Revenido usando os

parâmetros de tempo e de temperatura convencionais do aço ferramenta H13. Como resultado obteve-se a dureza de 46 – 48 HRC, compatível com a literatura, e a microestrutura martensítica com carbonetos precipitados, conforme a figura 34.

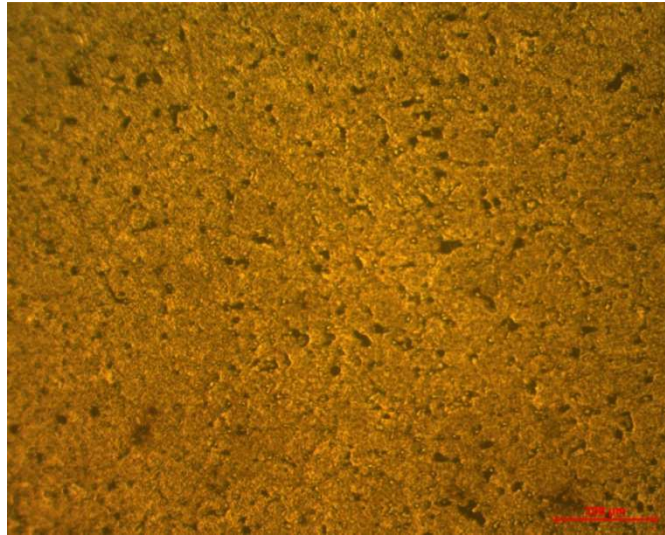


Figura 34 Amostra “X – H” (3% de MoS<sub>2</sub> a 1.000 MPa) - Temperada e Revenida – Ampliação de 100X

#### 4.5 Difração de Raio X - DRX

Foi realizada a difração de Raio X no inserto de aço ferramenta H13 com adição de 3% de MoS<sub>2</sub>, temperado e revenido. As figuras 35 e 36 apresentam o espectro obtido e as fases presentes no material.

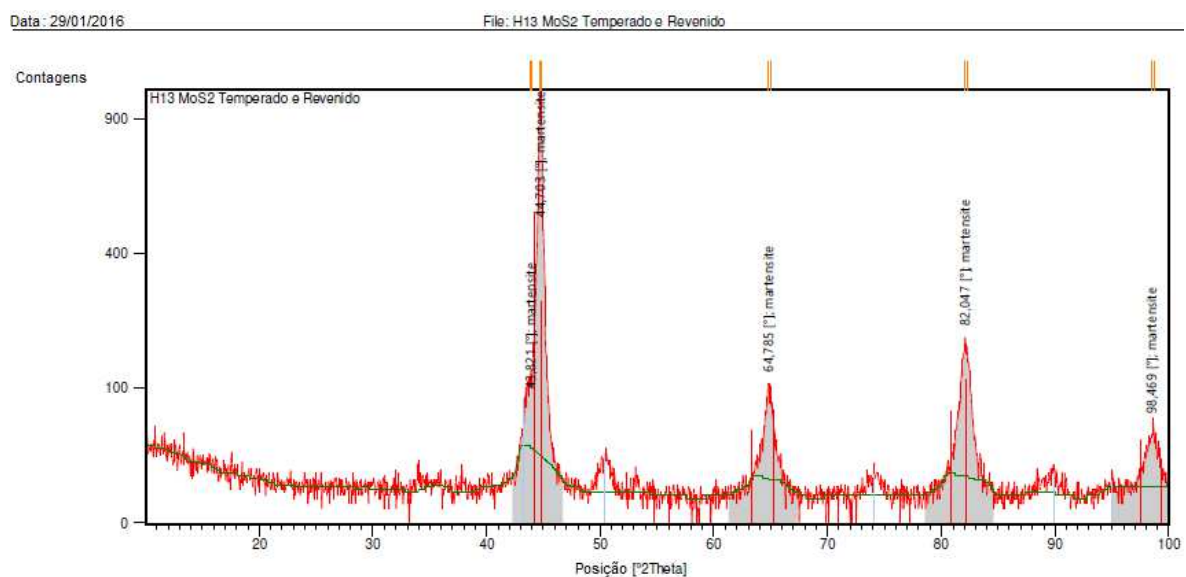


Figura 35- Espectro apresentando a presença de fase Martensita

O espectro da figura 35 apresenta a presença de fase martensita nos picos de maior intensidade, reforçando o que já fora apresentado anteriormente na figura 34.

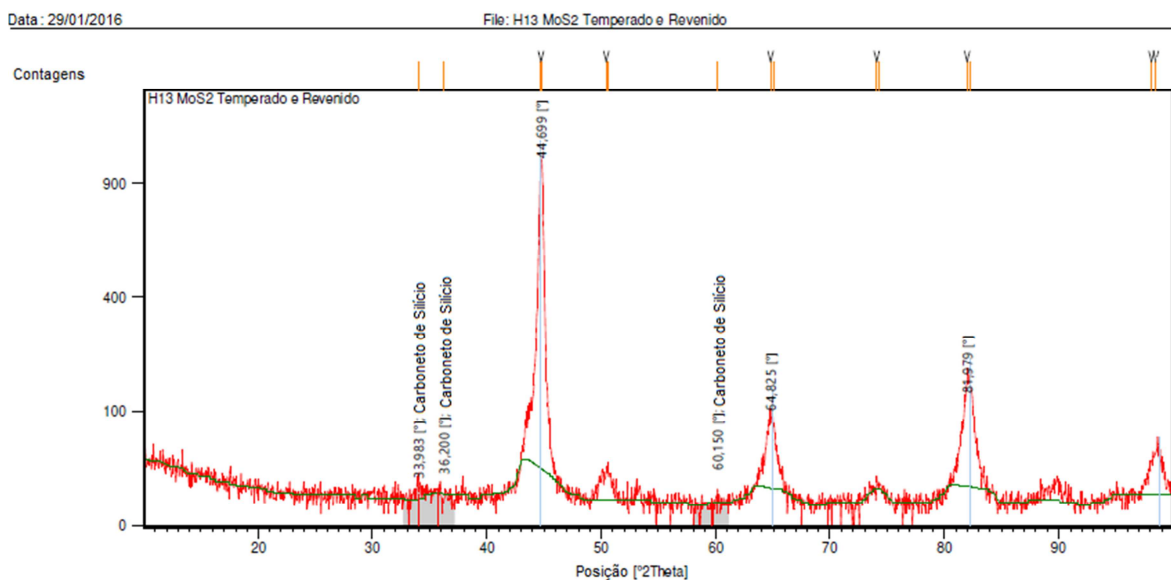


Figura 36 - Espectro apresentando a presença de Carboneto de Silício

A figura 36 expõe a presença de carboneto de Silício, em picos de menor intensidade, também reforçando a análise metalográfica.

#### 4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Micro Análise Química Elementar (EDS)

A finalidade da realização das análises no MEV foi a de demonstrar a presença dos elementos lubrificantes  $\text{MoS}_2$  inseridos na matriz ferrítica de aço ferramenta H13 como pretendido na proposta.

A figura 37 é uma ampliação em 5.000 X de uma região, onde podem ser evidenciadas fases distintas da mistura promovida.

No detalhe estão identificadas a Área 1, com mescla das fases presentes, o Ponto 2, predominantemente de  $\text{MoS}_2$ , e o Ponto 3 com predominância da matriz ferrítica do aço H13.

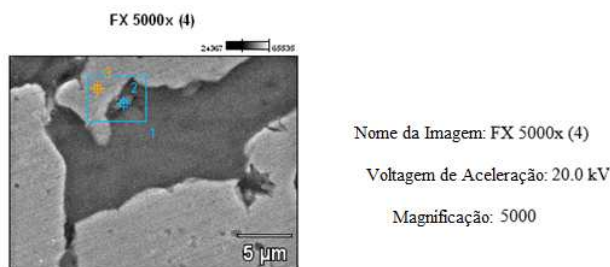


Figura 37 Imagem MEV mostrando fases distintas propostas para o compósito sinterizado

As figuras 38, 39 e 40 e a tabela 15 apresentam os elementos químicos da microcomposição da Área e dos Pontos mencionados, na forma comparativa e quantitativa respectivamente.

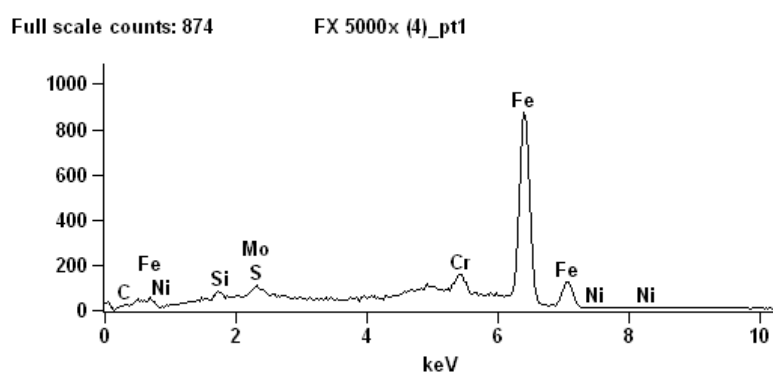


Figura 38 Gráfico EDS – Microconstituintes da Área 1 da figura 32

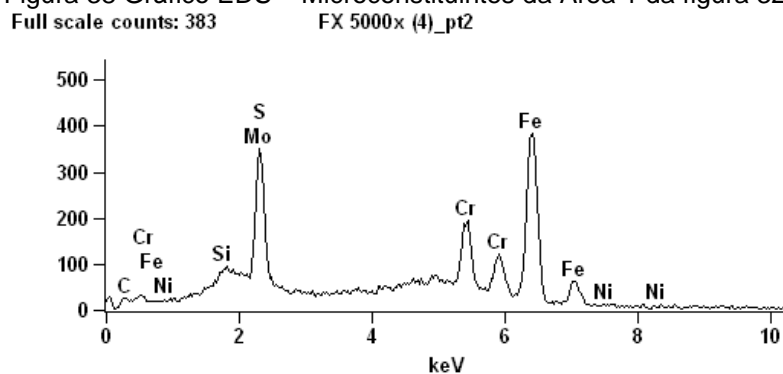


Figura 39 Gráfico EDS – Microconstituintes do Ponto 2 da figura 32

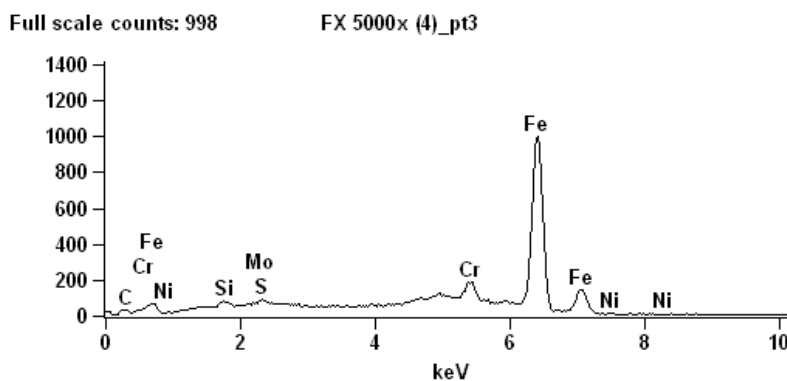


Figura 40 Gráfico EDS – Microconstituintes do Ponto 3 da figura 32

Tabela 85 Micro análise química (EDS) da amostra "X – F" – ampliação 5.000 X

	C	Si	S	Cr	Fe	Ni	Mo
FX 5000x (4) _ pt1	9.15	0.96	0.02	4.61	82.46	0.00	2.81
FX 5000x (4) _ pt2	20.27	0.34	8.23	12.66	50.71	0.00	7.78
FX 5000x (4) _ pt3	18.14	0.87	0.50	4.41	75.76	0.30	0.02

Percebe-se analisando a tabela 15, que os valores dos elementos Enxofre (S) e Molibdênio (Mo), no ponto 2, são elevados, o que está evidenciado no espectro da figura 39, onde apresenta um dos picos de maior intensidade com estes dois elementos.

Parte da Área 1 da figura 37 foi ampliada em 20.000 X e está apresentada na figura 41. Esta região foi submetida à nova avaliação da microcomposição, tentando desta forma uma melhor caracterização dos constituintes.

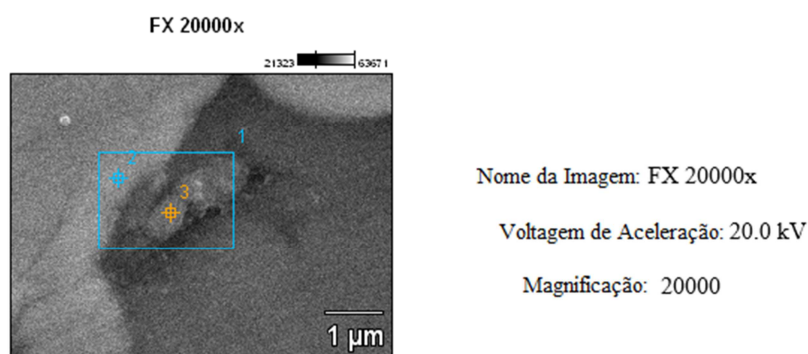


Figura 41 MEV - Imagem amostra "X – F" - Ampliação 20.000 X

A figura 42 e a tabela 16 evidenciam a presença do lubrificante MoS<sub>2</sub> na matriz ferrítica do aço ferramenta H13, demonstrando a forte possibilidade de alcançado o principal propósito da realização das misturas.

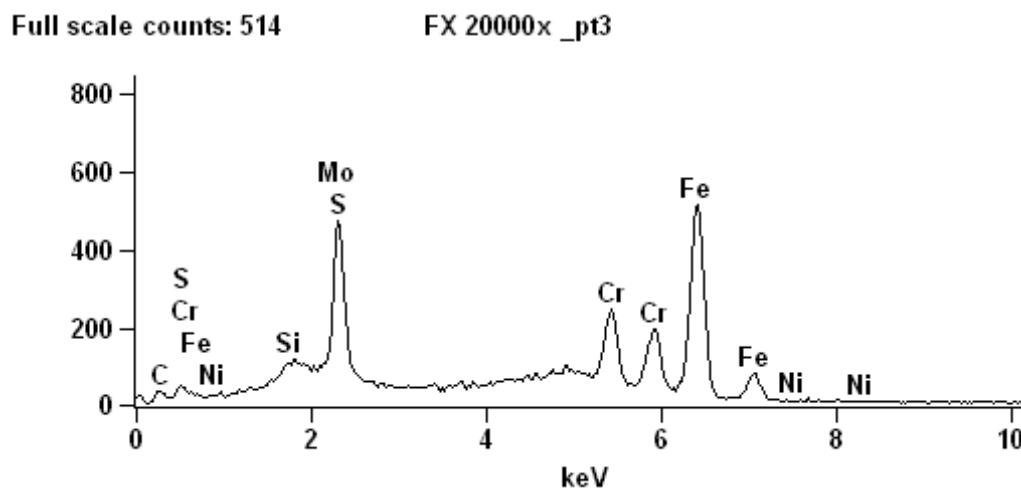


Figura 42 Gráfico EDS – Microconstituintes do Ponto 3 da figura 36



Tabela 96 Micro análise química (EDS) da amostra “X – F” – ampliação 20.000 X

	C	Si	S	Cr	Fe	Ni	Mo
FX 20000x_pt1	12.21	0.73	3.05	6.76	73.89	0.00	3.36
FX 20000x_pt2	17.18	0.53	0.02	4.09	75.69	0.15	2.34
FX 20000x_pt3	24.75	0.32	9.04	12.64	47.86	0.00	5.40

Torna-se evidente, que o ponto 3 da figura 42, é basicamente constituído dos elementos enxofre (S) e Molibdênio (Mo), caracterizando o que fora chamado anteriormente de “ilha de lubrificante”.

As demonstrações até aqui referidas caracterizam a obtenção bem sucedida do compósito de aço ferramenta e lubrificante como foi sugerido na proposta.

#### 4.7 Ensaios Tribológicos para determinação do atrito de Coulomb ( $\mu$ )

Utilizando uma prensa hidráulica EKA 40 kN foram prensados anéis de Alumínio da liga ASTM AA 6351, já identificados em duas condições de ferramentas diferentes: entre placas de insertos sinterizados com pó de aço H13 mais 3% de pó de MoS<sub>2</sub> e entre blocos feitos com aço H13 comercial laminado a quente.

O ensaio do anel para determinação do atrito de Coulomb foi realizado prensando individualmente estes anéis de Alumínio para reduzirem as respectivas dimensões de altura em aproximadamente 20, 40 e 60% em relação à altura inicial  $h_0$ . Para verificação do percentual correto de redução, após as medições os valores são inseridos nas equações 1 e 2 vistas anteriormente, que correspondem às deformações no diâmetro interno e na altura respectivamente.

Os anéis já deformados são vistos na figura 43 e as equações utilizadas para obtenção dos valores de deformação relativa estão dispostas no capítulo 2.4.

Para efeito de ensaio e, devido à capacidade limitada da prensa, foram confeccionados anéis de Alumínio ASTM AA 6351. Tais ensaios foram feitos para determinar qual o conjunto de ferramental (sistema tribológico) apresenta menor resistência ao escoamento, neste caso menor coeficiente de atrito, quando da aplicação de força axial sobre os corpos de prova de formato anelar.



Figura 43 A) anel inicial, B) deformação relativa ( $\epsilon$ ) de 20%, C) deformação relativa ( $\epsilon$ ) de 40%, e D) deformação relativa ( $\epsilon$ ) 60%.

Para cada percentual de deformação foram conformados quatro corpos de prova e repetidos os procedimentos para cada conjunto de matriz utilizado.

Os corpos de prova foram devidamente medidos e seus valores podem ser visualizados na tabela 17.

Tabela 107 Anéis de Alumínio ASTM AA 6351 ensaiados

Material	Corpos de Provas iniciais		Deformação relativa ( $\epsilon$ ) de 20%		Deformação relativa ( $\epsilon$ ) de 40%		Deformação relativa ( $\epsilon$ ) de 60%	
	Diâmetro interno ( $d_i$ )	Altura (h)	Diâmetro interno ( $d_i$ )	Altura (h)	Diâmetro interno ( $d_i$ )	Altura (h)	Diâmetro interno ( $d_i$ )	Altura (h)
H13 Convencional	11,87	7,85	11,45	6,00	11,00	4,91	9,00	3,80
	12,05	8,20	11,67	6,42	10,90	5,00	9,44	3,93
	12,35	8,23	12,34	6,42	11,25	4,90	9,45	3,73
	12,00	8,06	11,69	6,32	10,65	4,92	9,40	4,02
H13 + MoS <sub>2</sub>	12,29	8,14	12,35	6,50	12,11	4,90	11,16	3,51
	11,92	7,83	11,96	6,50	11,56	4,62	10,34	3,44
	11,82	8,09	11,84	6,10	11,35	4,15	10,43	3,36
	11,99	7,75	12,08	6,10	11,63	4,15	10,37	3,22

Pela análise dos dados de diâmetro e de altura apresentados para os dois materiais nesta tabela, verifica-se que o desempenho quanto à redução do atrito do material H13 + MoS<sub>2</sub> é relativamente superior ao do aço H13 convencional.

Tal desempenho é evidenciado na figura 44 que apresenta as curvas de calibração de atrito realizadas por simulação em Software de elementos finitos *Simufact Forming*. Também estão inseridas as curvas de atrito resultantes dos ensaios de compressão do anel realizados com o material H13 laminado a quente e com a mistura sinterizada de H13 e 3% de pó de MoS<sub>2</sub>.

Percebe-se analisando a figura 44 que o desempenho do material com adição de MoS<sub>2</sub> apresentou menor coeficiente de atrito que o do material convencional para os mesmos percentuais de deformação aplicados nos dois materiais.



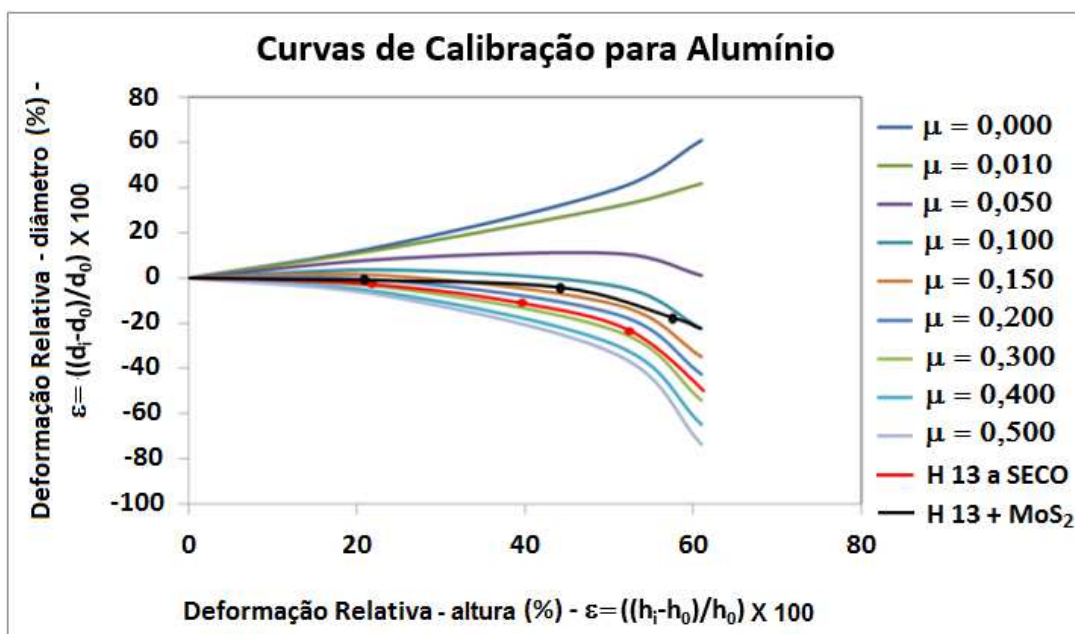


Figura 44 Dados do ensaio em curvas de atrito calibradas

Nas deformações de 20% percebe-se que começa a haver uma pequena redução do atrito para o material com adição de MoS<sub>2</sub>, fazendo com que o diâmetro interno do corpo de prova escoe quase que uniformemente ao diâmetro externo. Este fato é comprovado pelo aumento do diâmetro interno em relação ao valor do início do ensaio.

Também nesta faixa de deformação é observado que o material convencional apresenta pequena resistência ao escoamento, evidenciada pela redução do diâmetro interno dos corpos de prova quando comparados aos valores iniciais.

Estes comportamentos, tanto do material com MoS<sub>2</sub> quanto do H13 convencional, se repetem com deformações relativas superiores de aproximadamente 40 % e de 60 % a que os mesmos foram submetidos.

Os valores de coeficiente de atrito ( $\mu$ ) obtidos com as deformações empregadas nos ensaios ficaram em:

- $\mu$  entre 0,20 e 0,30 para os corpos de prova ensaiados com matrizes que utilizaram o material H13 convencional;
- $\mu$  entre 0,10 e 0,15 para os corpos de prova ensaiados com matrizes que utilizaram o material H13 + MoS<sub>2</sub>.

Para complementar a análise do desempenho do material proposto em estudo, também foi realizado o ensaio de Desgaste por Abrasão com roda de borracha, com o objetivo de validar a aplicação do inserto sinterizado autolubrificante em ferramentais para calibração a frio.

#### 4.8 Ensaio de Abrasão com Roda de Borracha

Os ensaios foram realizados pelo procedimento conforme a Norma G 65 já referida anteriormente, onde os corpos de prova de cada material ficaram expostos à ação abrasiva da areia durante 15 minutos medidos em contagem regressiva através de cronômetro regressivo do próprio equipamento.

A tabela 18 apresenta os resultados dos corpos de prova ensaiados no ensaio abrasivo durante estes 15 minutos.

Tabela 118 Dados do ensaio abrasivo com tempo de 15 minutos

Material	cp	Massa m (g)	Densidade ( $\rho$ ) g/cm <sup>3</sup>	Volume V (cm <sup>3</sup> )	Perda em massa -m (g)	Perda em volume -V (cm <sup>3</sup> )
H13+MoS <sub>2</sub>	1	94,15	7,24	13,004	0,100	0,014
	2	95,70	7,24	13,218	0,110	0,015
	3	95,20	7,24	13,149	0,105	0,015
H13	4	186,61	7,82	23,863	0,120	0,015
	5	186,67	7,82	23,871	0,140	0,018
	6	186,63	7,82	23,866	0,130	0,017

Percebe-se ao avaliar os resultados da tabela 18 que os corpos de prova ensaiados com o material composto sinterizado autolubrificante apresentaram valores absolutos de perdas de massa e de volume menores que os do material convencional de laminação a quente, o que evidencia seu melhor desempenho no teste de Abrasão. Este melhor desempenho também aconteceu no Ensaio do Anel para determinação do coeficiente de atrito.

Analisando a perda média em volume (V), exposta na tabela 18 para os dois tipos de material, e que foram de 0,01467 g/cm<sup>3</sup> no aço sinterizado com pó de MoS<sub>2</sub> e de 0,01667 g/cm<sup>3</sup> no aço H13 laminado a quente, pode-se interpretar que a resistência à abrasão do material para insertos proposto no estudo tem desempenho 12% melhor que o do aço H13 convencional laminado a quente.

Considerando que a indústria metal mecânica está cada vez mais competitiva e que busca constantemente por melhorias em processo e materiais para reduzir custos, o material proposto neste estudo demonstra qualidades superiores ao material convencional, podendo ser utilizado como alternativa para tal.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Observa-se que os coeficientes de atrito avaliados neste trabalho são muito semelhantes aos resultados de  $\mu$  obtidos em condições análogas por Geier (2007), tanto para o material a seco quanto para o caso de uso de lubrificação.

O coeficiente de atrito ( $\mu$ ) sem o uso de lubrificantes, a seco, foi avaliado por Geier com valores entre 0,20 e 0,30, e para a condição em que a matriz foi lubrificada com a pulverização de pó lubrificante na sua superfície, o coeficiente de atrito  $\mu$  melhorou para valores 0,10 e 0,16.

O sistema tribológico (matriz de aço ferramenta H13, anéis de Alumínio ASTM AA 6351 e lubrificante  $\text{MoS}_2$ ) usado por Geier em seus trabalhos foi o mesmo realizado neste trabalho, diferenciando apenas no método de aplicação do lubrificante, que foi depositado por Geier por pulverização sobre o ferramental, e aqui o lubrificante foi adicionado na composição química da matriz por metalurgia do pó. Ambos apresentaram o mesmo resultado na avaliação do coeficiente de atrito do sistema tribológico analisado.

Nos ensaios de abrasão, a diferença relativa de perda de massa entre os materiais ensaiados pode ser considerada significativa, ainda que pequena em valores absolutos. Esta significação pode ser constatada nos valores apresentados na tabela 20.

Tabela 12 Estimativo de ganho de produção com acréscimo de 12% em vida de ferramental.

Tempo estimado para produção de uma peça em segundos (s)	30	20	10
Peças produzidas por hora (PÇ/h)	120	180	360
Peças produzidas por dia (considerando 2 turnos de 8 horas) PÇ/dia	1920	2880	5760
Quantidade de peças produzidas com acréscimo de 12 % no uso do ferramental	2150,4	3225,6	6451,2
Diferença de peças produzidas por dia ( $\neq$ PÇ/dia)	230,4	345,6	691,2
Ganho estimado em horas por dia (h/dia)	1,92	1,92	1,92
Ganho estimado de horas em um mês (considerando 25 dias uteis) h/mês	48	48	48

## 6. CONCLUSÕES

Com os resultados das análises de dureza, MEV e EDS e Difração de Raio X chega-se às seguintes conclusões:

- Na condição de uso, o material proposto apresenta valores de dureza (50 - 54 HRc) compatíveis com os valores obtidos com aço ferramenta H13 laminado (50 – 52 HRc).
- Isto evidencia que o tratamento térmico empregado para o material com adição de 3% MoS<sub>2</sub> tem chance de não ser alterado, podendo ser realizado nas mesmas condições praticadas para o aço ferramenta H13 laminado.
- Existe forte possibilidade de o MoS<sub>2</sub> estar presente na mistura sinterizada conforme foi evidenciado nas análises de MEV e nos resultados dos EDS.

Analisando os resultados do ensaio para determinação do coeficiente de atrito ( $\mu$ ) pelo método do anel chega-se às seguintes conclusões:

- Na conformação a frio de Alumínio o coeficiente de atrito  $\mu$  reduziu de valores entre 0,20 e 0,30 obtidos com o material H13 laminado convencional para valores de  $\mu$  entre 0,10 e 0,15 com o material aço H13 + 3% de MoS<sub>2</sub>.
- Pode-se reduzir ou até eliminar a lubrificação externa (método tradicional de aplicação de lubrificante) e manter o mesmo nível de lubricidade no ferramental com a utilização do aço H13 + 3% de MoS<sub>2</sub>.

Analisando os resultados do ensaio de desgaste abrasivo chega-se às seguintes conclusões:

- O desgaste abrasivo do ferramental proposto avaliado no Ensaio de Abrasão com Roda de Borracha foi 12% menor quando comparado com o aço ferramenta H13 laminado exposto ao mesmo ensaio
- A redução do desgaste abrasivo no ferramental com  $\text{MoS}_2$  pode ser positivamente determinante para aumento da produção.

## 7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação de desempenho de corpos de prova do aço H13 + 3% MoS<sub>2</sub> para aplicação dos insertos sinterizados autolubrificantes em matrizes de Forjamento de aços a Quente;
- Reproduzir os corpos de prova de aço H13 sinterizado utilizando diferentes lubrificantes sólidos na composição da mistura para avaliação de suas propriedades de atrito e de desgaste abrasivo.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ASTM E 384 – ***Standard Test Method for Microhardness of Materials.***

ASTM G 65 – ***Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.***

BAY, N. **The state of the art in cold forging lubrication.** J. Mater. Process. Technol. n.46, p 19–40, 1994.

BINDER, C. **Desenvolvimento de novos tipos de aços sinterizados autolubrificantes a seco com elevada resistência mecânica aliada a baixo coeficiente de atrito via moldagem de pós por injeção.** Tese de Doutorado. UFSC. 2009.

BOUQUEREL, J.; DIAWARA, B.; DUBOIS, A.; DUBAR, M.; VOGT, J.-B.; NAJJAR, D. **Investigations of the microstructural response to a cold forging process of the 6082-T6 alloy.** J Mater Design (2014).

BRITO, A. M. G. **Análise Teórico-Experimental dos processos de expansão e inversão de extremidades de tubo de parede fina em matriz.** Tese para Obtenção de Título de Doutor. UFRGS – 2006.

BRITO, F. I. G.; MEDEIROS, K. F.; LOURENÇO, J. M. **Um estudo teórico sobre a sinterização na Metalurgia do Pó.** Holos, Ano 23, v. 3. 2007.

BUENO, A. F.. **Determinação do Coeficiente de Atrito para as Ligas de Alumínio AA 6351e de Titânio Ti6Al4V pelos Métodos do Anel e Tubo Cônico.** Dissertação para a obtenção do Título de Mestre. UFRGS – 2010.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: Características Gerais, Tratamentos Térmicos, Principais Tipos.** 7 ed. ampl. e rev. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2008. 600 pg.



DENG, J.; CAN, T.; SUN, J. **Microstructure and mechanical properties of hot-pressed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC ceramic composites with additions of solid lubricants.** Ceramic International, v. 22, n. 31, p. 249-256, 2005.

DONNET, C.; ERDEMIR, A. **Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant casting.** Surface and coatings technology. v. 180-181, p. 76-84, 2004.

DUNKLEY, J. **MIM – a global perspective.** Powder Metallurgy, v. 43, n. 4, 2000, p. 296–298.

GEIER, M. **Considerações sobre o Atrito para Processos de Forjamento a Frio através do Ensaio de Compressão do Anel.** Dissertação para Obtenção de Título de Mestre. UFRGS – 2007.

HAMMES, G.; SCHROEDER, R.; BINDER, C.; KLEIN, A. N.; MELLO, J. D. B.. **Effect of double pressing / double sintering on the sliding wear of self-lubricating sintered composites.** Tribology International, v 70, p. 119 – 127, 2015.

HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais.** Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1983.

HOKKIRIGAWA, K; KATO, K; LI, Z. Z. **The effect of hardness on the transition of the abrasive wear mechanism of steels.** Wear, v. 123, pp 241–251, 1998.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials.** Edward Arnold, London. 1992.

INFOMET INFORMAÇÕES, BRITADAS, FUNDIDAS E LAMINADAS, disponível em:<[http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod\\_tema=9&cod\\_secao=10&cod\\_assunto=83&cod\\_conteudo=130.>](http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=83&cod_conteudo=130.>)  
Acesso 28 fev. 2013.

JOST, H.P. Lubrication (Tribology) – **A Report of the Present Position and Industry's Needs**, Department of Education and Science, H. M Stationary Office, London.1966.

JUSTE, K. R.C. **Caracterização Tribológica da Lubrificação Sólida.** Tese para obtenção do título de Doutora. UFU – 2012.

LUDEMA, K. C. **Friction, Wear and Lubrication**. CRC Press: New York, p. 123-124, 1996.

MANG, T. **Die Schmierung in der Metallbearbeitung**, Vogel-Buchverlag Würzburg, Deutschland. 1983.

MARTINS, V. **Estudo das propriedades mecânicas dos compósitos WC-6Co, WC-10Co, WC-20Co, WC-6Co-6Ni, WC-6Co-12Ni obtidos por Metalurgia do Pó convencional para aplicação em anéis de selos mecânicos**. Dissertação para Obtenção de Título de Mestre. UFRGS – 2010.

MENDES, M. A. R. S. **Estudo do desgaste de ferramentas com e sem revestimentos de filmes finos utilizadas em operações de conformação a frio**. Dissertação para Obtenção de Título de Mestre. USP – 2009.

METALS HANDBOOK. **Introduction to Heat Treating of Tool Steels**, vol. 4. ASM International, Materials Park, OH. 1991.

OLIVEIRA, R. A.; KOLLER, L. A.; SCHAEFFER, L. **Evaluation of two commercially available lubricants by means of ring test to AA6061 F aluminum alloys**. Materials research, v. 6, n. 4, 2004, p. 591-597.

PARUCKER, M. L. **Desenvolvimento de materiais compósitos de baixo coeficiente de atrito com partículas de lubrificante sólido dispersas em matriz metálica a base de níquel**. Tese de Doutorado, UFSC, 2008.

PARUCKER, M. L., KLEIN, A. N.; BINDER, C.; JUNIOR, W. R.; BINDER, R.. **Development of Self-lubricating Composite Materials of Nickel with Molybdenum Disulfide, Graphite and Hexagonal Boron Nitride Processed by Powder Metallurgy: Preliminary Study**. Materials Research 2014; 17(Suppl. 1): 180-185.

PETERSEN, S. B.; MARTINS, P. A. F.; BAY, N. **Friction in Bulk Metal Forming: a General Friction Model vs. the Law of Constant Friction**. Journal of Materials Processing Technology, v. 66, p. 186–194, 1997.

RAO, K.P.; PRASAD, Y.V.R.K, XIE, C.L. **Further evaluation of boric acid vis-a-vis other lubricants for cold forming applications.** Tribology International, v. 44, p. 1118–1126. 2011.

RAPOPORT, L.; LESHCHINSKY, V.; LVOVSKY, M.; LAPSKER, I.; VOLOVIK, T.; FELDMAN, Y.; POPOVITZ-BIRO, R.; TENNE, R. **Superior tribological properties of powder materials with solid lubricant nanoparticles,** Wear, n. 255, p. 794-800, 2003.

ROOIJ, M. B. **Tribological aspects of unlubricated deep drawing process,** Ph.D. Thesis, University of Twente, 1998.

SASADA, T. **The behavior of adhered fragments interposed between sliding surfaces and formation process of wear particles.** Journal of Lubrication Technology v. 103, issue n.2, p.195-202, 1981.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica.** Editora Imprensa, Porto Alegre, 2005.

SCHEY, A.; J. **Tribology in metalworking: Friction, lubrication and wear.** Ohio: 2ª edição, 1984, p. 1-130.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology.** Publishing Butter worth Heinemann, 4ª ed., p.852. 2014.

STRAFFELINI, G. **Friction and Wear: Methodologies for Design and Control.** Springer International Publishing, 1ª ed., p. 283. 2015.

THÜMMLER, F; OBERACKER, R. **An Introduction to Powder Metallurgy,** The Institute of Materials, Cambridge, Great Britain, 1993, p. 280–285.

UNIEMP. **Relatório de Trabalho Programa Apóstolos da Inovação.** Grupo Iracema Setor Eletromecânico. Fortaleza – CE. 2014.

WEB SITE ABAL. Disponível em: <http://www.abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/temperas/>. Acesso em 09/08/2015.

WEB SITE SERRAMETAL. <http://www.serrametal.com.br/h-13-vh13.html>. Acesso em 10/08/2015.