



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

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO ATRAVÉS DO ENSAIO DO ANEL  
COMPARADO COM A EXTRUSÃO POR DUPLO COPO

Luiz Ricardo Fiera

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

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO ATRAVÉS DO ENSAIO DO ANEL  
COMPARADO COM A EXTRUSÃO POR DUPLO COPO

LUIZ RICARDO FIERA  
Bacharel em Ciência da Computação

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 obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação.

Porto Alegre

2016

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Lírio Schaeffer

Coorientador: Prof. Dr. Ing. Alexandre Milanez

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ing. Alberto Moreira Guerreiro Brito (UFRGS)

Prof. Dr. Ing. Jovani Castelan (Faculdade SATC)

Prof. Dr. Vilson Gruber (UFSC)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

À minha esposa Angela que com seu carinho e dedicação tornou este sonho possível e as minhas filhas Beatriz e Gabriela por me inspirarem na busca do conhecimento.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ser a luz que ilumina o meu caminho e me presenteia todos os dias com o dom da vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Ing. Lírío Schaeffer por ter acreditado na minha capacidade para desenvolver este projeto, também pela sua paciência e disponibilidade para me atender nas dúvidas cotidianas, sendo fundamental para o êxito da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Alexandre Milanez por disponibilizar seu tempo no intuito de melhorar o conteúdo da pesquisa e solucionar impasses encontrados no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de mestrado Gustavo De Luca, bem como o Doutorando Lucas Boeira Michels, que dedicaram seu tempo a me auxiliar nas pesquisas, estando sempre disposto a colaborar com o desenvolvimento deste trabalho.

À SATC pelo apoio quanto à utilização dos equipamentos e ferramentas da instituição no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os colegas da SATC que colaboraram diretas e/ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os professores do PPG3M e LdTM, que através de sua disponibilidade, experiência e conhecimento, não mediram esforços para que este projeto fosse desenvolvido.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 JUSTIFICATIVA.....	18
1.2 OBJETIVO GERAL .....	18
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.4 METODOLOGIA .....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.1 ASPECTOS DO PROCESSO DE FORJAMENTO.....	21
<b>2.1.1 Parâmetros do Processo de Forjamento</b> .....	22
2.1.1.1 Material.....	22
2.1.1.2 Temperatura do Processo.....	23
2.1.1.3 Velocidade de Conformação .....	24
2.1.1.4 Lubrificação do Processo.....	24
<b>2.1.2 A Importância do Atrito no Processo de Forjamento a Frio</b> .....	24
2.1.2.1 Características de uma Superfície Metálica.....	26
2.1.2.2 A Interface Peça-Ferramenta .....	27
<b>2.1.3 Regimes de Lubrificação</b> .....	27
2.1.3.1 Lubrificação Hidrodinâmica.....	28
2.1.3.2 Lubrificação Fronteira .....	29
2.1.3.3 Lubrificação com Película Sólida.....	29
<b>2.1.4 Desgaste no Processo de Forjamento</b> .....	30
<b>2.1.5 Simulação Computacional no Processo de Forjamento</b> .....	31
2.1.5.1 Simulação por Elementos Finitos .....	32
2.2 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO ATRITO.....	32
<b>2.2.1 Determinação do Coeficiente de Atrito</b> .....	32
<b>2.2.2 Modelos de Atrito para Deformação Plástica</b> .....	33
<b>2.2.3 Ensaio do Anel</b> .....	33
<b>2.2.4 Ensaio de Extrusão do Duplo Copo</b> .....	35

2.3 LIGAS DE ALUMÍNIO .....	37
<b>2.3.1 Características do Alumínio</b> .....	37
<b>2.3.2 Forjamento do Alumínio</b> .....	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1 CORPOS DE PROVA .....	39
<b>3.1.1 Corpo de Prova para o Ensaio do Anel</b> .....	39
<b>3.1.2 Corpo de Prova para o Ensaio de Extrusão do Duplo Copo</b> .....	39
3.2 FERRAMENTAS PARA OS ENSAIOS.....	40
<b>3.2.1 Ferramenta para o Ensaio do Anel</b> .....	40
<b>3.2.2 Ferramenta para o Ensaio de Extrusão do Duplo Copo</b> .....	41
3.3 CONDIÇÕES DE LUBRIFICAÇÃO.....	44
3.4 PRENSA .....	44
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	46
4.1 ELABORAÇÕES DAS CURVAS DE ATRITO .....	46
<b>4.1.1 Ensaio do Anel</b> .....	46
<b>4.1.2 Ensaio de Extrusão do Duplo Copo</b> .....	47
4.2 MEDIÇÕES NOS CORPOS DE PROVA.....	48
<b>4.2.1 Ensaio do Anel</b> .....	48
<b>4.2.2 Ensaio de Extrusão do Duplo Copo</b> .....	51
5. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS .....	54
5.1 CURVAS DE CALIBRAÇÃO SIMULADAS PARA O ENSAIO DO ANEL .....	54
<b>5.1.1 Ensaio do Anel</b> .....	54
<b>5.1.2 Ensaio de Extrusão do Duplo Copo</b> .....	55
5.2 INFLUÊNCIA DO MODELO FERRAMENTAL PARA DCET .....	56
6. CONCLUSÕES .....	59
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Blocos do estudo experimental. ....	17
Figura 2 - Etapas para o desenvolvimento do trabalho. ....	20
Figura 3 - Curva tensão-deformação. ....	23
Figura 4 - Ilustração Transversal da Estrutura Superficial do Metal. (GEIER, 2007). ....	27
Figura 5 - Tipos de lubrificação. (GEIER, 2007).....	28
Figura 6 - Curvas de calibração para o teste do anel. (CAMACHO et al, 2013). ....	34
Figura 7 - Variação do diâmetro interno do anel com o efeito do atrito. (BUENO, 2010).....	35
Figura 8 - Esquema da extrusão por duplo copo. (SCHRADER; SHIRGAOKAR; ALTAN, 2006). ....	36
Figura 9 - Curvas de calibração para o DCET (ALTAN, 2004). ....	36
Figura 10 - Medidas para o corpo de prova após a extrusão por duplo copo (ALTAN, 2004). ....	37
Figura 11 - Curvas de escoamento para alumínio AA6351. (GEIER, 2007).....	38
Figura 12 - Projeto e corpo de prova fabricado para o ensaio do anel. ....	39
Figura 13 - Projeto e corpo de prova fabricado para o DCET ( <i>Double Cup Extrusion Test</i> ). ..	40
Figura 14 - Ferramenta superior e inferior para o ensaio do anel.....	41
Figura 15 - Ferramental e corpo de prova para o ensaio do anel.....	41
Figura 16 - Projeto e ferramental posicionado na prensa para o DCET.....	42
Figura 17 - Ferramental e corpo de prova para o DCET. ....	42
Figura 18 - Cilindro central DCET e ferramenta para encamisar cilindro. ....	43
Figura 19 – Anel de extração.....	43
Figura 20 - Conjunto ferramental para o ensaio do anel e DCET. ....	44
Figura 21 - Lubrificantes utilizados nos experimentos. ....	44
Figura 22 - Prensa utilizada nos experimentos.....	45
Figura 23 - Curvas de atrito para o ensaio do anel, obtidas por simulação computacional. ....	47

Figura 24 - Curvas de atrito para o DCET, obtidas por simulação computacional.....	47
Figura 25 - Corpos de prova após teste de anel, sem lubrificação. ....	48
Figura 26 - Corpos de prova após ensaio do anel, lubrificados com teflon. ....	49
Figura 27 - Corpos de prova após ensaio do anel, lubrificados com grafite. ....	50
Figura 28 - Atrito verificado pelo ensaio do anel. ....	50
Figura 29 - Corpos de prova após DCET, sem lubrificação.....	51
Figura 30 - Corpos de prova DCET, lubrificados com teflon. ....	52
Figura 31 - Corpos de prova após o DCET, lubrificados com grafite.....	52
Figura 32 - Atrito verificado pelo DCET. ....	53
Figura 33 - Curvas de calibração para o ensaio do anel, obtidas por simulação computacional no <i>Simufact</i> . ....	54
Figura 34 - Curvas de atrito para o DCET, obtidas por simulação computacional no <i>Simufact</i> . .....	55
Figura 355 - Modelo do punção superior utilizado no DCET.....	56
Figura 366 - Modelo do punção com menor área de atrito (LOWRIE; NGAILE, 2016). ....	56
Figura 377 - Cilindro principal da ferramenta DCET após o rompimento. ....	57
Figura 380 – Atrito verificado com ferramenta diferente.....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do ensaio do anel, sem lubrificante.....	48
Tabela 2 - Dados do ensaio do anel, lubrificante teflon.....	49
Tabela 3 - Dados do ensaio do anel, lubrificante grafite.....	49
Tabela 4 - Dados do ensaio de extrusão por duplo copo, sem lubrificante.....	51
Tabela 5 - Dados do ensaio de extrusão por duplo copo, lubrificante teflon.....	51
Tabela 6 - Dados do ensaio de extrusão por duplo copo, lubrificante grafite.....	52
Tabela 7 - Dados do ensaio de extrusão por duplo copo, lubrificante grafite.....	53
Tabela 8 - Dados do ensaio de extrusão por duplo copo, sem lubrificante.....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS

A.C	Antes de Cristo.
DCE	Extrusão por Duplo Copo ( <i>Double Cup Extrusion</i> ).
DCET	Extrusão por Duplo Copo ( <i>Double Cup Extrusion Test</i> ).
LACOMP	Laboratório de Conformação Mecânica e Processamentos de Polímeros.
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica.
PPGE3M	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.
SATC	Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina.

## LISTA DE SÍMBOLOS

De	Diâmetro externo do anel	[mm]
Di	Diâmetro interno do anel	[mm]
H	Altura final do corpo de prova para o DCET	[mm]
H0	Altura inicial do corpo de prova para o DCET	[mm]
H1	Altura extrusada pelo punção superior no DCET	[mm]
H2	Altura extrusada pelo punção inferior no DCET	[mm]
Hi	Altura inicial do anel	[mm]
Hf	Altura final do anel	[mm]
kt	Tensão de escoamento	[N/mm <sup>2</sup> ]
m	Fator de atrito	[-]
Rdi	Redução do diâmetro interno	[%]
Rhi	Redução da altura inicial	[%]
S	Deslocamento total dos punções no DCET	[mm]

## LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

$\varepsilon$	Deformação Relativa	[%]
$\varphi$	Deformação Verdadeira	[-]
$\sigma$	Tensão	[MPa]
$\sigma_n$	Tensão normal	[MPa]
$\tau$	Tensão de cisalhamento	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\mu$	Coefficiente de Atrito	[-]

$\Delta D_i$	Variação do diâmetro interno do anel	[%]
$\Delta H$	Variação da altura do anel	[%]

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o estudo dos coeficientes de atrito obtidos através do ensaio do anel, que é um dos métodos clássicos para verificação e a caracterização do atrito, comparado com a extrusão por duplo copo, DCE (*Double Cup Extrusion*). Foram feitos ensaios utilizando como material para confecção dos corpos de prova o alumínio AA6351 e variando três situações de lubrificação: teflon, grafite e ensaios sem lubrificação. Para o DCE foi desenvolvido o projeto e fabricação do ferramental, permitindo variar punções de duas dimensões diferentes. Os resultados obtidos nos experimentos com cada uma das técnicas foram comparados e apresentados, traçando-se um paralelo do atrito verificado, bem como o comportamento do material em relação às ferramentas utilizadas nos experimentos e as variações de lubrificação.

Palavras Chaves: Processo de Forjamento, Extrusão por Duplo Copo, Ensaio do Anel, Determinação do Atrito.

## **ABSTRACT**

This work aims to study the friction coefficients obtained by the ring test, which is one of the classic methods for verification and characterization of friction, compared with DCE (Double Cup Extrusion). The tests were made using as material for preparation of specimens, the aluminum AA6351 and varying three situations lubrication, Teflon, graphite and tests without lubrication. For DCE was developed the design and manufacture of tooling, allowing vary punctures in two differ dimensions. The results obtained in the experiments with each of the techniques have been compared and shown by drawing a parallel scanned the friction and the material behavior in relation to the tools used in the experiments and lubrication changes.

Keywords: Forging Processes, Double Cup Extrusion, Ring Test, Determination of Friction.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de forjamento, se comparado com a produção de peças através da fundição, apresenta vantagens como a construção de peças mais leves e mais resistentes, pois o processo de deformação a baixa temperatura alinha os cristais do material, o tornando mais flexível e resistente à fadiga, além de permitir peças com geometria mais complexa e de grande precisão com elevada produtividade. As peças fabricadas pelo processo de fundição requerem controle mais preciso dos processos de fusão e resfriamento, porque podem ocorrer segregações na liga. Já os Forjados respondem de forma mais previsível no tratamento térmico e oferece melhor estabilidade dimensional (SCHMITT, 2001).

O conhecimento dos parâmetros que influenciam no processo de forjamento, como resistência ao escoamento, velocidade de deformação, temperatura de trabalho e coeficiente de atrito, são de suma importância para garantir a segurança do processo, qualidade do produto final e a vida útil do ferramental.

Sendo o atrito um dos importantes parâmetros a ser conhecido, utilizam-se alguns processos para a determinação deste coeficiente. Um dos testes mais utilizados para a avaliação das condições da interface peça/ferramenta para os processos de forjamento é ensaio do anel, pois permite que o atrito possa ser avaliado a partir da deformação em detrimento de outras técnicas que necessitam de medidas de força ou mudanças dimensionais da amostra. Outro método utilizado é o processo de caracterização do atrito por extrusão por duplo copo (DCE), que também permite caracterizar o atrito entre a peça e ferramenta.

No presente trabalho optou-se por estudar as características técnicas de obtenção do coeficiente de atrito pela extrusão por duplo copo em comparação com o ensaio do anel, utilizando-se alumínio como material de análise.

Para avaliar a confiabilidade dos ensaio para determinar o coeficiente de atrito utilizou-se três situações de lubrificação: teflon, grafite e ensaios sem lubrificação.

Apresenta-se na Figura 1 um diagrama de blocos mostrando o modelo de estudo executado neste trabalho.

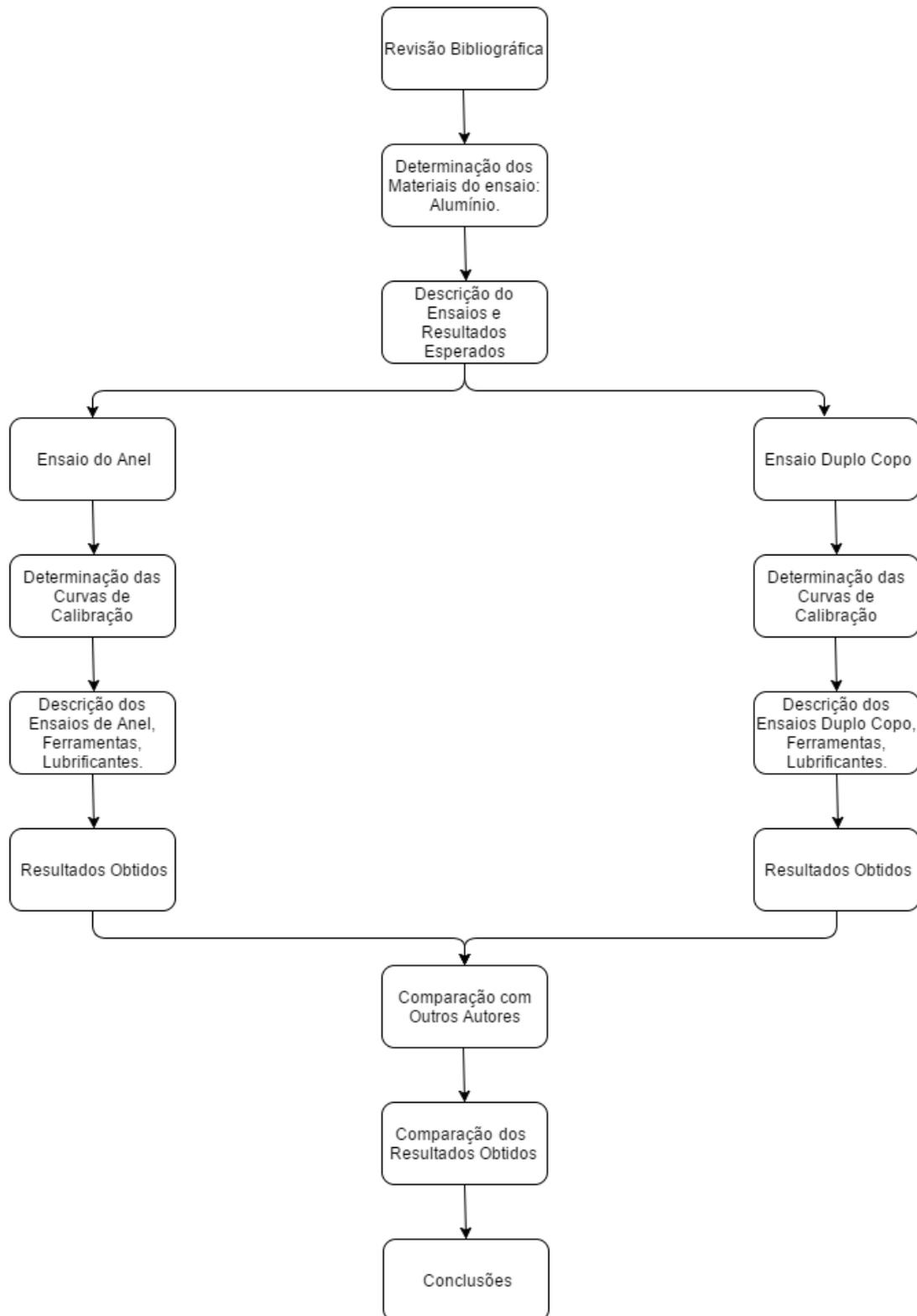


Figura 1 - Diagrama de Blocos do estudo experimental.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Para tornar mais competitivo e eficiente o processo de forjamento, é de suma importância o conhecimento do coeficiente de atrito, que é utilizado como um dos principais parâmetros na simulação de forjamento, obtendo resultados mais precisos e próximos à realidade. O coeficiente de atrito também é utilizado na comparação da eficiência entre lubrificantes e também para avaliação do atrito entre peça e ferramenta (MARTINS; SCHAEFFER, 2009).

Foram desenvolvidos ao longo do tempo métodos para a determinação do coeficiente de atrito, sendo que o ensaio de anel é o mais utilizado. Neste trabalho irá se estudar este ensaio em comparação com o DCE para determinação do coeficiente de atrito, suas características e resultados de acordo com o lubrificante utilizado. Embora as técnicas já estejam difundidas no mercado, acredita-se que seja relevante um estudo comparativo entre estas duas técnicas no sentido de se obter um parecer com vantagens e desvantagens entre as duas técnicas.

Com a evolução do forjamento surgiram necessidades impostas ao processo, como por exemplo, produzir peças com maior precisão geométrica, custo mais baixo de produção e grandes deformações finais nos produtos. Desta forma, o controle sobre o processo precisou ser aumentado e com isso o conhecimento do coeficiente de atrito é peça chave para obtenção de êxito nestes novos requisitos (MARTINS; SCHAEFFER, 2009).

Considera-se também que o atrito é um fator importante por razões técnicas e econômicas. A primeira delas influencia as propriedades do produto final e a segunda o consumo de energia adicional, os custos associados a eventuais defeitos em peças e também devido ao desgaste de ferramentas (CAMACHO et al., 2013).

Apresenta-se a seguir os objetivos gerais e específicos deste trabalho baseados em dois modelos de experimento para determinação do atrito.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Considerando a importância do conhecimento do coeficiente de atrito inerente ao processo de forjamento, este estudo visa conhecer o funcionamento dos modelos do anel e o teste de extrusão por duplo copo, e com isso avaliar o desempenho destes dois processos através da comparação dos resultados obtidos em ensaios utilizando três situações de lubrificação.

### 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O trabalho terá característica experimental e prática com os seguintes objetivos específicos:

- Conhecer o funcionamento do ensaio do anel e da caracterização do atrito através da extrusão por duplo copo;
- Construir um experimento, para dar suporte a uma análise comparativa entre os dois processos;
- Apresentar uma análise comparativa dos resultados obtidos através do ensaio do anel e da caracterização do atrito através da extrusão por duplo copo;

### 1.4 METODOLOGIA

A metodologia para desenvolvimento do trabalho consiste das etapas ilustradas na figura 2, onde a princípio foi realizada uma revisão bibliográfica referente ao tema, tendo como objetivo compreender os fundamentos dos dois modelos de testes envolvidos na pesquisa, bem como o entendimento coeficiente obtido nos mesmos.

Após a etapa de revisão bibliográfica, iniciou-se o desenvolvimento do ferramental para a execução dos ensaios e na sequência, caracterizou-se o material que foi utilizado no experimento.

A partir da caracterização do material foi então feita a usinagem dos corpos de prova que foram utilizados no experimento, após esta etapa foram feitos os ensaios variando situações de lubrificação dos processos.

A partir das medições feitas nos corpos de prova e baseado nas curvas de calibração e coeficientes de atrito, de acordo com cada um dos processos utilizados, compararam-se os resultados das medições com as curvas, obtendo-se assim o coeficiente de atrito para cada situação de lubrificação aplicada nos ensaios.

A etapa seguinte consistiu em comparar os resultados obtidos em laboratório traçando-se um paralelo entre as duas técnicas, com o mesmo material e lubrificante utilizado.

Por fim será feita a validação do experimento e emitida uma conclusão acerca do mesmo.

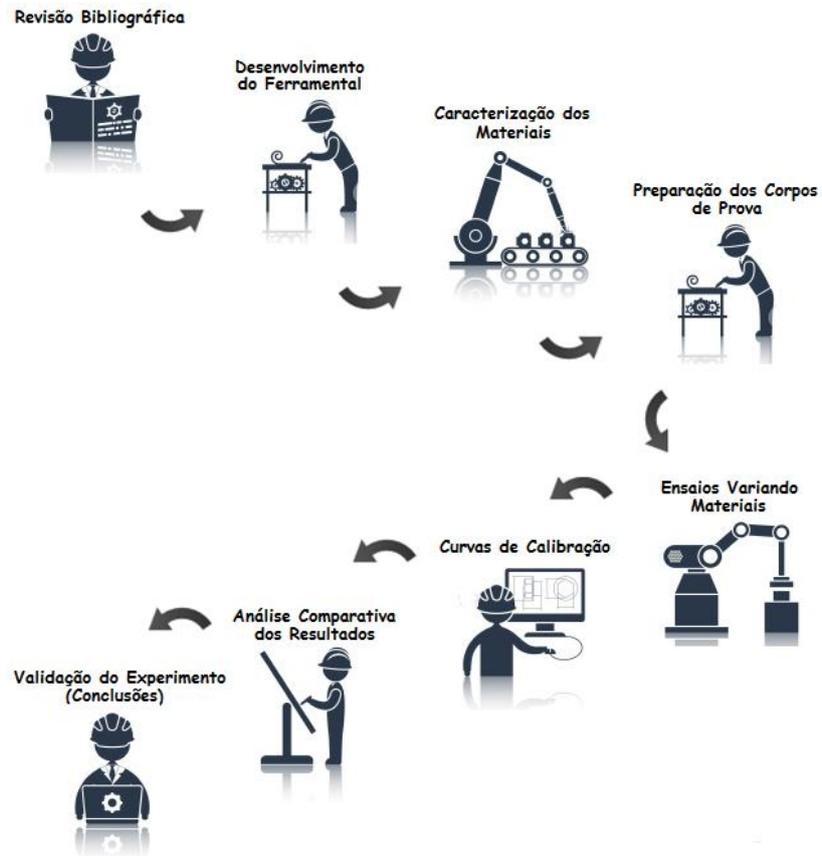


Figura 2 - Etapas para o desenvolvimento do trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ASPECTOS DO PROCESSO DE FORJAMENTO

A conformação mecânica é talvez uma das técnicas mais antigas utilizadas na fabricação de produtos metálicos, sendo impulsionada inicialmente por motivações bélicas e também pela necessidade de se obter ferramentas para o trabalho no campo (ASM INTERNATIONAL, 2005). O surgimento do processo de forjamento deu-se na Ásia e África no período que remonta desde 4000 A.C e dentre os materiais utilizados inicialmente no processo pode se destacar o bronze, sendo que a evolução dos processos utilizados até meados do século XIX permitiu a utilização de outros materiais com ferro e aço (GEIER, 2007).

Outro aspecto importante na evolução da indústria de forjamento foi o surgimento, a partir de 1920, dos primeiros estudos científicos a cerca de novos processos de conformação, bem como estudos a cerca do comportamento dos materiais e desenvolvimento da teoria de plasticidade. Desde então a pesquisa científica tem sido uma grande aliada no desenvolvimento da indústria de forjamento, tanto no sentido de desenvolvimento de novos processos, como na caracterização e combinação de novos materiais ferrosos (LANGE, 1997).

O aperfeiçoamento do processo de forjamento através da pesquisa científica e da evolução tecnológica da indústria permitiu que hoje fosse possível a produção de peças forjadas com dimensões variadas, com alto grau de produtividade e qualidade e com baixo custo para as mais variadas aplicações, sem limitar-se somente a indústria bélica e ferramental, mas atendendo demandas que vão desde a indústria médica até aplicações em nano tecnologia, pois permite combinar materiais ferrosos e não ferrosos (GEIER, 2007).

O processo de forjamento pode ser dividido em duas classificações, a primeira diz respeito à temperatura de trabalho, onde o material a ser conformado pode ou não ser aquecido previamente, e a segunda com relação ao método de aplicação de carga (GEIER, 2007).

Com relação à temperatura de trabalho o processo de forjamento pode ser dividido entre a frio e a quente. As características principais do forjamento a quente é que ele permite grandes transformações no material aplicado, com menores valores de força e permitindo uma boa precisão dimensional. No processo a frio as deformações são limitadas e exigem maior força mecânica, mas em contra partida permite uma ótima precisão dimensional (GEIER, 2007).

Para o classificação do método de forjamento relacionada à aplicação de carga existem basicamente duas divisões: por impacto e por pressão. O método por impacto tem se mostrado o mais adequado para forjamento individual, onde a forja da peça é feita através da aplicação

de uma pressão instantânea sobre uma determinada área do material. O equipamento mais comum empregado neste método é o martelo de forja que permite rápidos golpes de impacto na superfície do material. Este processo pode produzir uma gama enorme de variedades de peças, pois permite um alto grau de refinamento dos grãos ao mesmo tempo. Uma das desvantagens do forjamento por impacto é a necessidade de usinagem após o impacto.

Ainda com relação à classificação do forjamento por aplicação de carga, pode-se destacar o método por pressão, onde uma pressão contínua e lenta é aplicada na área a ser forjada e utiliza-se normalmente com equipamento para aplicação da carga uma prensa hidráulica.

Para o sucesso de um processo de forjamento, além de se levar em consideração a temperatura do material e o método de aplicação de carga, deve se estar atento a todos os parâmetros relacionados ao processo.

### **2.1.1 Parâmetros do Processo de Forjamento**

Para o sucesso de um processo de forjamento é necessário que ele seja tratado como um sistema onde fatores como material a ser forjado, temperatura do processo, lubrificante a ser utilizado e a interface entre ferramenta e material, sejam analisados de modo a obter-se um produto final com qualidade e durabilidade.

#### **2.1.1.1 Material**

O conhecimento das características de deformação do material permitirá determinar como se dará o escoamento durante o processo de forjamento. O comportamento deste escoamento será determinado pela curva de escoamento do material, que é definida pela variação de tensão em função da temperatura, da deformação verdadeira, micro estrutura e da velocidade de deformação (SCHAEFFER, 2004). Para a determinação das curvas de escoamento, são utilizados ensaios mecânicos, de tração ou compressão, que relacionam as tensões com as deformações verificadas nos corpos de prova (SCHAEFFER, 2004). Utiliza-se então uma expressão matemática adequada a cada modelo de ensaio, aplicada às medidas iniciais e finais dos corpos de prova para obtenção do gráfico da curva de escoamento do material, onde a abscissa representa a deformação do corpo de prova, e o eixo das ordenadas à tensão exercida sobre o material, como se pode observar na figura 3, o gráfico ainda permite visualizar a região de deformação elástica, que vai até o ponto a, onde o corpo retornaria a sua

forma inicial caso fosse cessado a tensão exercida, do ponto a em diante inicia a parte mais importante para conformação mecânica, pois representa a deformação plástica, onde o material não retorna mais a seu estado original (SCHAEFFER, 2004).

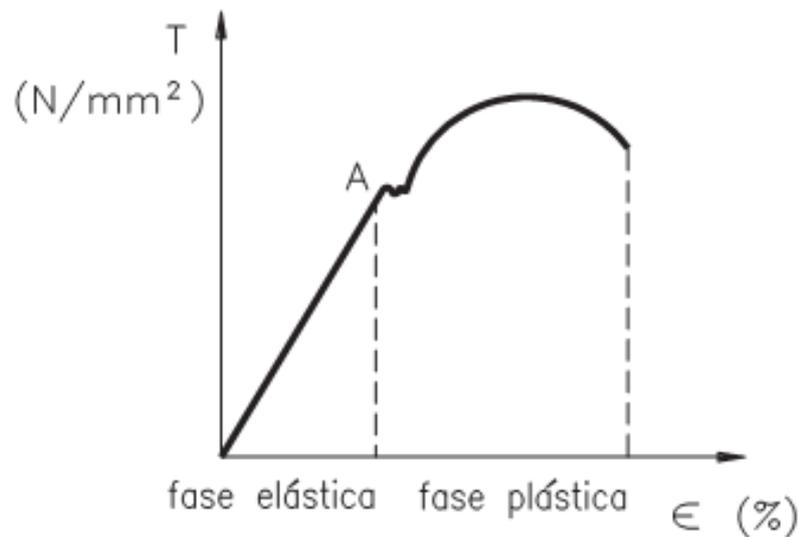


Figura 3 - Curva tensão-deformação.

#### 2.1.1.2 Temperatura do Processo

A temperatura do processo de conformação pode ser classificada em trabalho a frio e a quente. Quando a temperatura do processo é maior do que a temperatura que provoca a recristalização do metal, classifica-se este processo como de trabalho a quente, abaixo desta temperatura é chamado de trabalho a frio (BRESCIANI FILHO, 1997).

Quando a temperatura do processo é a frio, ocorre o aparecimento do chamado efeito de encruamento no metal, isto é, aumento da resistência com a deformação plástica. Este processo permite aumentar a resistência mecânica de metais ferrosos e não ferrosos que não são susceptíveis ao aumento da resistência por tratamentos térmicos (BRESCIANI FILHO, 1997).

No processo a quente, a deformação plástica é realizada numa faixa de temperatura, em que o encruamento é eliminado pela recristalização do metal, pois se aumentando a temperatura, o material tende a retornar condição mais estável onde sua energia interna é menor, além da recuperação da estrutura cristalina do metal, este processo eleva a ductilidade do material e diminui sua resistência mecânica (BRESCIANI FILHO, 1997).

### 2.1.1.3 Velocidade de Conformação

Na deformação de um metal, a grande parte da energia cedida ao material é transformada em calor, portanto quanto maior a velocidade de deformação, menos tempo estará o material exposto a dissipação deste calor, sendo assim, maior será a temperatura da peça a ser conformada, no processo de conformação a quente, este problema se evidencia à medida que o aumento da temperatura pode causar a fusão do material (HELMAN; CETLIN, 2013).

Em especial as ligas de alumínio, segundo Lima e Schaeffer (2007), a velocidade de deformação é importante devido a alta condutividade térmica deste material, em altas velocidades de deformação pode originar um aumento de temperatura em alguns pontos da peça. Por outro lado quando maior a condutibilidade térmica mais favorável o resultado, pois ela contribui para uma maior homogeneização da temperatura.

### 2.1.1.4 Lubrificação do Processo

Condições adequadas de lubrificação permitem diminuir o desgaste da interface ferramenta-peça, diminuir a possibilidade de peças com defeito, ocasionadas por falta de preenchimento total da matriz, que tem como consequência a obtenção de peças incompletas ou até mesmo com dobras. (MARTINS; SCHAEFFER, 2009)

Outro fator importante do processo de lubrificação é a diminuição das cargas de forjamento e com isso obtenção de um melhor aproveitamento energético e também de um aumento da vida útil da ferramenta (SCHNEIDER, et al, 2010).

A criação de um filme lubrificante na interface matriz-ferramenta, ameniza os efeitos do atrito, pois possibilita uma melhor condição para a deformação, principalmente durante o forjamento de peças complexas, de novas ligas metálicas ou, ainda, durante o forjamento de precisão ou forjamento experimental (MARTINS; SCHAEFFER, 2009).

## 2.1.2 A Importância do Atrito no Processo de Forjamento a Frio

A partir de um estudo feito para comitê do departamento inglês de educação e ciência em 1966 por H. Peter Jost, o termo tribologia passou a ser utilizado oficialmente. Tribologia que vem do grego Τριβο (Tribo - esfregar) e Λογος (Logos - estudo), foi definido então como a “ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados”. Este estudo é considerado um marco da criação da tribologia, pois foi o

primeiro a estudar os impactos econômicos através da utilização dos conhecimentos de tribologia (RADI et al, 2007). No processo de forjamento, como em outros processos de fabricação, a interação entre estas superfícies podem sofrer desgaste em função do atrito entre as mesmas (SCHNEIDER et al., 2010).

O atrito “é a resistência ao movimento de um corpo sobre o outro”, expressado através do coeficiente de atrito, que expressa a oposição atuante entre as superfícies de dois corpos em contato, oposta ao movimento de deslizar de um em relação ao outro (ASM INTERNATIONAL, 2005).

No processo de forjamento o conhecimento do coeficiente de atrito é importante para tornar o processo mais competitivo e proporcionar um menor custo final ao produto, pois se pode com isso obter uma redução do desgaste na interface ferramenta-peça, reduzir a carga de forjamento para obter um melhor acabamento superficial da peça e até mesmo reduzir a possibilidade de peças defeituosas.

Com o conhecimento do coeficiente de atrito pode se ter um controle do processo através de uma lubrificação apropriada e melhor indicada para cada material (WANG, 2008).

O atrito é um mecanismo pelo qual dois corpos desenvolvem forças na sua superfície gerando uma resistência ao deslizamento de um corpo sobre o outro. O motivo fundamental da existência destas forças está em forças de atração chamadas de “Forças de Adesão”, que existem nas pequenas regiões de contato entre as superfícies deslizantes (HELMAN; CETLIN, 2013).

As superfícies dos materiais a serem forjados possuem pequenas deformações superficiais que devido a deformação plástica localizada chegam a formar uma espécie de solda, que é formada pela ação de um material com maior dureza sobre um material mais maleável (HELMAN; CETLIN, 2013).

O movimento relativo entre uma ferramenta e o material que está sendo deformado gera o atrito que leva a um consumo de energia, pois esta força de trabalho necessária para vencer esta força de atrito deve ser definida em função do coeficiente de atrito (HELMAN; CETLIN, 2013).

O atrito está presente em todos os processos de conformação mecânica dos metais, e mesmo sendo considerado positivo em alguns processos como a laminação, que depende da existência do atrito para que tenha êxito, na maioria dos processos o desconhecimento ou desconsideração do coeficiente de atrito pode ser prejudicial, pois permitem gerar alterações geralmente desfavoráveis dos estados necessários para a deformação (HELMAN; CETLIN, 2013).

A importância da busca do coeficiente de atrito está na necessidade de utilização deste valor em métodos de simulação computacional de processos de forjamento e também de sua aplicação em modelos matemáticos como a teoria de tiras e do limite superior para obtenção de resultados mais precisos e coerentes com a realidade (MARTINS; SCHAEFFER, 2009).

Dentre as desvantagens que o desconhecimento do coeficiente de atrito pode trazer, pode-se citar alteração dos estados de tensão necessários para a deformação; aparecimento de tensões residuais no produto devido a produção de fluxos irregulares de metal durante o processo de deformação aumento do consumo de energia; desgaste prematura da ferramenta; aumento da temperatura do material, podendo comprometer suas propriedades mecânicas e influência sobre a qualidade superficial do produto (HELMAN; CETLIN, 2013).

Para o entendimento do processo de determinação do coeficiente de atrito, é necessário que ter-se um melhor entendimento acerca das características de uma superfície metálica e do que acontece na interface entre peça e ferramenta.

#### 2.1.2.1 Características de uma Superfície Metálica

A superfície de um metal pode parecer plana e sem imperfeições, entretanto através de uma observação microscópica pode-se observar que ela é constituída de picos e vales que definem sua rugosidade, que é formada devido a fatores relacionados à sua fabricação, como temperatura e formação de óxidos (MARTINS; SCHAEFFER, 2009).

Basicamente a camada mais externa é formada por vapor d'água e hidrocarbonetos provenientes do ambiente e absorvidos para a superfície. Abaixo desta camada há uma camada de óxidos formada por mecanismos de oxidação devido ao oxigênio presente no ambiente. Dependendo do processo de fabricação, uma camada encruada se forma abaixo da camada oxidada, este encruamento irá recobrir o substrato metálico que complementa a última camada da superfície metálica, como mostrado na figura 4, onde a espessura individual das camadas depende das condições do processo e do ambiente (GEIER, 2007).

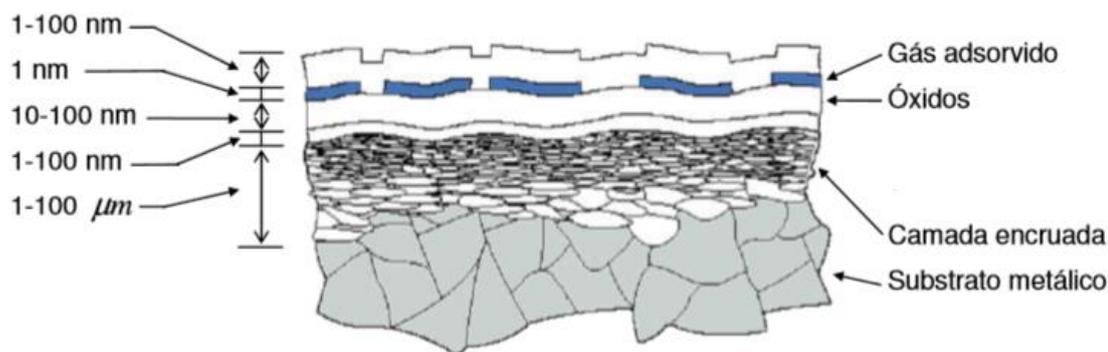


Figura 4 - Ilustração Transversal da Estrutura Superficial do Metal. (GEIER, 2007).

Conforme observado por Helman e Cetlin (2013), na interface de contato entre duas superfícies de dois corpos se desenvolvem forças gerando uma resistência ao deslizamento de um corpo sobre o outro. No processo de forjamento este contato é conhecido como interface peça-ferramenta.

#### 2.1.2.2 A Interface Peça-Ferramenta

No contato entre peça e ferramenta, conforme referido anteriormente, as rugosidades das superfícies acabam por deformar plasticamente, promovendo com isso a ligação entre elas. Esta ligação é complexa, envolvendo interações de natureza atômica e fenômenos de solubilidade e difusão. Estas ligações possuem uma resistência que varia de acordo com as propriedades físicas e mecânicas dos materiais, da espessura dos óxidos ou de outros contaminantes presentes na superfície, bem como da temperatura do processo. (GEIER, 2007).

A resistência destas ligações é que determina o atrito entre as superfícies, que por sua vez é fundamental para que haja a deformação de um dos materiais, forçando-o a escoar através de uma ferramenta ou matriz. As condições do atrito determinam o comportamento do escoamento do material, bem como a carga necessária para deformação, a qualidade final do produto, e também outros pontos importantes no processo de forjamento, como o desgaste prematuro de ferramentas e o consumo de energia. Para isso é importante a determinação do coeficiente de atrito inerente a cada processo (GEIER, 2007).

#### 2.1.3 Regimes de Lubrificação

Para uma boa lubrificação durante o processo, os lubrificantes, de maneira geral, devem apresentar características especiais que ajudam na melhora e evolução do processo, pois para obter uma melhor qualidade da superfície de peça forjada deve-se pensar em diminuir o atrito

e por consequência o desgaste do ferramental. Por isso faz-se necessário a avaliação dos lubrificantes pela quantificação do atrito, avaliando se o mesmo é adequado a um material e às temperaturas do processo onde será submetido (MARTINS; SCHAEFFER, 2009).

Além disso, diversos regimes podem coexistir em diferentes localizações na interface peça-ferramenta ou se sucederem em certa região na medida em que o processo ocorre, dentre eles pode-se destacar: a) Lubrificação hidrodinâmica; b) Lubrificação Fronteira e c) Lubrificação com película sólida, conforme ilustrado na figura 5.

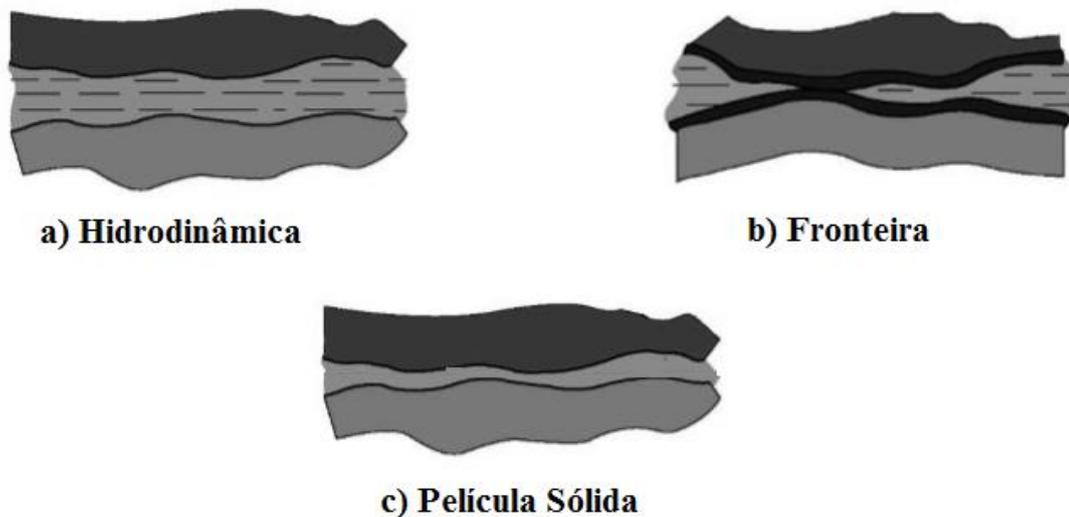


Figura 5 - Tipos de lubrificação. (GEIER, 2007)

Estes três tipos básicos de regime de lubrificação regem as condições de atrito na conformação de metais, em cada regime diferentes fatores físico-químicos controlam a lubrificação. Pequenas mudanças nas propriedades do lubrificante e do material de trabalho, além da velocidade do processo, temperatura, geometria e rugosidade superficial podem resultar em regimes diferentes de lubrificação (GEIER, 2007).

### 2.1.3.1 Lubrificação Hidrodinâmica

Este regime de lubrificação é caracterizado pela presença de fluidos viscosos e pela formação de uma película suficientemente espessa, com uma ordem de grandeza, cerca de dez vezes superior à rugosidade das superfícies, de modo a eliminar totalmente o contato entre ambas. No regime de camada espessa, o atrito é decidido pelas propriedades físicas do lubrificante de acordo com as condições da interface. A carga normal aplicada no contato das

duas superfícies é suportada em sua totalidade pelo filme de lubrificante, pelo qual o desgaste é quase eliminado, sendo o coeficiente de atrito baixo ( $\mu \leq 0,05$ ), é determinado pela viscosidade do lubrificante. O eventual desgaste que venha a ocorrer será devido à corrosão ou erosão por cavitação ou por partículas sólidas disseminadas no lubrificante. Esse tipo de lubrificação é pouco frequente em processos de conformação mecânica, restringindo-se a casos de extrusão hidrostática e estampagem hidrodinâmica (GEIER, 2007).

### 2.1.3.2 Lubrificação Fronteira

Este regime de lubrificação caracteriza-se quando existem zonas com um filme de espessura molecular separando as superfícies e zonas onde há contato das rugosidades. Dependendo da espessura e da resistência relativa da película de lubrificante, o desgaste pode ser mais ou menos acentuado, e o valor do coeficiente de atrito maior ou menor, podendo variar entre  $0,1 \leq \mu \leq 0,4$ . (GEIER, 2007).

Essa situação é estreitamente correlacionada com os lubrificantes orgânicos ou os de extrema pressão. Os lubrificantes de origem orgânica (óleos minerais e vegetais, gorduras e sabões) atacam instantaneamente o material ou óxidos das superfícies, originando uma película protetora estável. Porém é pouco estável a temperaturas elevadas (não recomendados para temperaturas superiores a 200-300° C) e muito sensíveis a velocidade de deslizamento relativo e à pressão de contato entre as duas superfícies.

Os lubrificantes de extrema pressão foram precisamente desenvolvidos para ultrapassar os problemas decorrentes da falta de eficiência dos lubrificantes orgânicos em regimes de elevadas pressões e temperaturas. Contêm compostos de enxofre, cloro e fósforo numa base de, por exemplo, óleo mineral e estão preparados para reagir quimicamente com as superfícies dos metais a elevadas temperaturas, formando substâncias ou compostos que as protegem e que se caracterizam por terem uma baixa resistência a esforços cisalhantes. Atualmente não é bem conhecida a dependência da tensão de corte dos filmes formados com relação à pressão, entretanto, o comportamento destes filmes organometálicos se assemelha muito ao do bissulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ) (GEIER, 2007).

### 2.1.3.3 Lubrificação com Película Sólida

O mecanismo de lubrificação é caracterizado pela separação completa das duas superfícies através de uma película sólida com baixa resistência aos esforços de corte, decorrentes do movimento relativo entre as duas superfícies. Os principais lubrificantes correlacionados a este mecanismo de lubrificação são as massas a base de grafite ou de bissulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ) e certos tipos de materiais poliméricos, dos quais se destacam o teflon e o polietileno.

Ainda relacionado com os regimes de lubrificação discutidos, convém salientar que nem sempre se consegue garantir uma boa aderência do lubrificante à superfície das peças a lubrificar, ainda mais em condições de alta pressão e velocidade. Os processos de conformação a frio são particularmente sensíveis a esse tipo de problema devido as elevadas tensões normais e de corte que neles se desenvolvem.

Para minimizar essas dificuldades é aconselhável um procedimento mais complexo de lubrificação, o qual se inicia pela remoção prévia de gordura da superfície da peça, seguindo-se com um ataque ácido na superfície com a deposição de um substrato de conversão, antes da lubrificação propriamente dita (BAY, 1994).

No caso da lubrificação por sabão, geralmente usada em operações a frio, o ataque por ácido visa tornar a superfície mais rugosa e esponjosa, para facilitar a deposição do substrato de conversão (por exemplo, fosfato de zinco, muito utilizado para aços carbono e de baixa liga). A presença do substrato aumenta consideravelmente a aderência do lubrificante, na medida em que se formam reações químicas entre ambos (RODRIGUES, J. 2005).

#### **2.1.4 Desgaste no Processo de Forjamento**

O desgaste pode ser definido como um dano à superfície de um corpo provocado pela interação mecânica com outra superfície, corpo ou fluido. Os mecanismos de desgaste que atuam nestas interações dependem de uma série de fenômenos físicos e químicos. À medida que se observa que estes danos podem interferir no funcionamento adequado do conjunto para forjamento, começa a surgir a necessidade de conhecer o atrito inerente ao processo (MARU, 2003).

Existem muitas propriedades e características superficiais que podem afetar o processo devido ao desgaste. Podem-se citar as características geométricas (formato do corpo ou distribuição das asperezas), propriedades mecânicas como dureza e módulo de elasticidade, características físicas, como encruamento e difusão, e por fim características químicas como composição e polaridade da superfície (MARU, 2003).

Os processos de forjamento sofrem sérios problemas de desgaste da ferramenta, especialmente no caso de forjamento a frio. O desgaste é causado por deslizamento da ferramenta sobre a peça, causando abrasão e até adesão, ou ainda podem ter como causa micro trincas existentes na superfície da ferramenta (HAN, 2011).

O desgaste influencia diretamente no custo final da peça, visto que o ferramental desenvolvido para o forjamento, normalmente é específico para cada modelo de, e compões um dos principais investimentos em um novo projeto de forjamento. O desgaste prematuro da ferramenta ocasiona uma vida útil menor a ferramenta e com isso um número menor de peças produzidas pelo conjunto ferramental, sem contar paradas no processo de produção para troca ou manutenção de ferramentas ou até mesmo má qualidade em termos de acabamento superficial e precisão geométrica (HAN, 2011).

A análise do mecanismo de desgaste da ferramenta é de difícil interpretação, pois existem muitos fenômenos que ocorrem simultaneamente, mas uma observação geral é a de que na conformação a frio, o principal motivo de desgaste é a fadiga da ferramenta, enquanto no forjamento a quente os principais motivos são o desgaste abrasivo e o fluxo interno do material que compõe a ferramenta (ZBIGNIEW, 2016).

De modo geral observa-se que as ferramentas para conformação a frio devem suportar pressões muito altas, enquanto que para o forjamento a quente, a ferramenta deve ser resistente à alta temperatura. No entanto, esta é uma análise simplificada, uma vez que o principal mecanismo de falha depende principalmente da matriz, seu projeto, fabricação e tratamento térmico, e das condições do processo na qual ela atua, principalmente no que tange as condições do atrito entre peça e ferramenta (ZBIGNIEW, 2016).

### **2.1.5 Simulação Computacional no Processo de Forjamento**

O projeto de uma sequencia de produção no processo de forjamento requer muitos testes de ajustes até que se tenha um resultado satisfatório que permita uma condição de colocá-lo em prática (GEIER, 2007).

Os métodos convencionais utilizados pelas empresas consistem de muitas tentativas e ajustes no processo, e com isso elevam de forma significativa os custos para finalizar o projeto de produção (GEIER, 2007).

Nos dias atuais os programas de simulação computacional vêm ganhando espaço no sentido de que são de certa forma, confiáveis e permitem uma drástica redução de custos para se projetar ferramental e processos para a produção de peças forjadas (GEIER, 2007).

Estes sistemas permitem que sejam simuladas situações que permitem observar os problemas mais frequentes no processo de forjamento, que são: preenchimento, atrito, geração de calor, trocas térmicas entre o processo e o ambiente, bem como mudanças de propriedades mecânicas do material e também analisar processos que exigem grandes deformações (GEIER, 2007).

#### 2.1.5.1 Simulação por Elementos Finitos

O método de elemento finito modela o processo industrial do forjamento e avalia as condições e dos parâmetros de projeto, permitindo que os resultados sejam utilizados para uma melhor decisão da engenharia, possibilitando ainda ser testados e analisados para diversas situações quantas vezes for necessária num curto espaço de tempo, gerando economia por se tratar de testes computacionais BUENO (2010).

Neste método as peças são divididas em volumes elementares formando uma malha. Da mesma forma a simulação do deslocamento da ferramenta é dividida em pequenos incrementos de aplicação de carga. Este processo é repetido até o final da simulação, e em cada repetição o simulador, baseado em um banco de dados com as características dos materiais envolvidos na simulação, calcula as deformações do corpos de prova de acordo com o coeficiente de atrito analisado, gerando valores que são marcados em um gráfico gerando uma curva chamada curva de calibração (GEIER, 2007).

## 2.2 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO ATRITO

Existem vários modelos na literatura para a determinação do atrito, e neles existe grande dificuldade para estabelecer um modelo válido para todos os tipos de operações de conformação mecânica, haja vista as diferentes condições de temperatura, condições de processo e geometria da peça a ser produzida.

### 2.2.1 Determinação do Coeficiente de Atrito

O atrito é um dos mais importantes fenômenos que influenciam na conformação dos metais, junto com a composição química do material, coeficiente de transferência de calor e as propriedades mecânicas. A importância do atrito no processo de deformação pode ser enfatizada pela contribuição para o sucesso ou fracasso do processo em atingir seus objetivos.

O atrito afeta a deformação dos materiais, qualidade superficial, a micro estrutura do material, entre outras características. Entender o fenômeno do atrito significa compreender o que ocorre entre a superfície da peça e a superfície da matriz de conformação entre diferentes condições do processo de conformação. O atrito ocorre na superfície de contato entre matriz de conformação e peça e tem um papel importante no fluxo de material na matriz, influenciando diretamente na qualidade superficial da peça e na força exigida para conformar a peça (GEIER, 2007).

### **2.2.2 Modelos de Atrito para Deformação Plástica**

Na conformação mecânica o atrito depende de vários fatores como materiais de confecção das ferramentas e do corpo a ser forjado, rugosidade superficial, bem como a temperatura do processo, velocidade de deformação e pressão de contato. Para os processos de deformação existem modelos e leis para verificação do atrito.

Conforme Bueno (2010), para o forjamento de ligas de alumínio, os fabricantes recomendam lubrificantes constituídos de uma solução à base de grafite e água ou grafite e óleo, que são diluídos em proporções adequadas para facilitar a sua aplicação. Para Schaeffer (2004), o atrito interfacial entre dois materiais pode ser quantificado na forma de um fator ou coeficiente. A Lei do Atrito de Coulomb utiliza tensão de cisalhamento ao invés de força de atrito e tensão normal em lugar de força normal, ficando então expressa ela equação 1.

$$\mu = \tau / \sigma_n \quad (Eq 1)$$

Na equação 1,  $\mu$  é o coeficiente de atrito,  $\tau$  a tensão de cisalhamento e  $\sigma_n$  a tensão normal, e percebe-se que  $\tau$  é proporcional a  $\sigma_n$ , na interface matriz/peça em relação ao "coeficiente" de atrito ( $\mu$ ).

### **2.2.3 Ensaio do Anel**

De acordo com Martello (2007), o estudo do comportamento do atrito através do teste de compressão do anel é a combinação de experimentos físicos com o método dos elementos finitos fornecendo uma medida aproximada. O ensaio é a compressão de um corpo de prova em forma de anel entre matrizes planas, enquanto sua variação percentual da altura e o diâmetro interno são controlados. A variação do diâmetro interno do anel verificado após o ensaio é determinada pelo atrito interfacial. A condição ideal seria o atrito for nulo, onde o anel deformaria como um disco sólido, com cada ponto superficial fluindo radialmente para fora em

uma velocidade proporcional a sua distância ao centro. Se o atrito for maior que zero, o anel sofre um “efeito de barril” em suas paredes, isto se deve pela resistência ao escorregamento interfacial da relação peça-matriz. Concluído o ensaio utiliza-se a simulação numérica da conformação do anel com as mesmas condições utilizadas experimentalmente para gerar as curvas conhecidas como “curvas teóricas de calibração” BUENO (2010).

O resultado do percentual de redução do diâmetro interno do anel ( $R_{di}$ ) versus redução percentual da altura ( $R_{hi}$ ), obtidos pelas medições de alturas inicial e final; e diâmetro interno inicial e final, feitas nos corpos de prova de acordo com a figura 7 e aplicados na Equação 2 e Equação 3, são comparados nas curvas de calibração observadas na figura 6.

$$R_{di} = (D_i - D_f) / D_f * 100 \quad (Eq 2)$$

$$R_{hi} = (H_i - H_f) / H_f * 100 \quad (Eq 3)$$

Os pontos experimentais que mais se aproximarem das curvas simuladas indicam o valor do coeficiente de atrito do processo (BUENO, 2010).

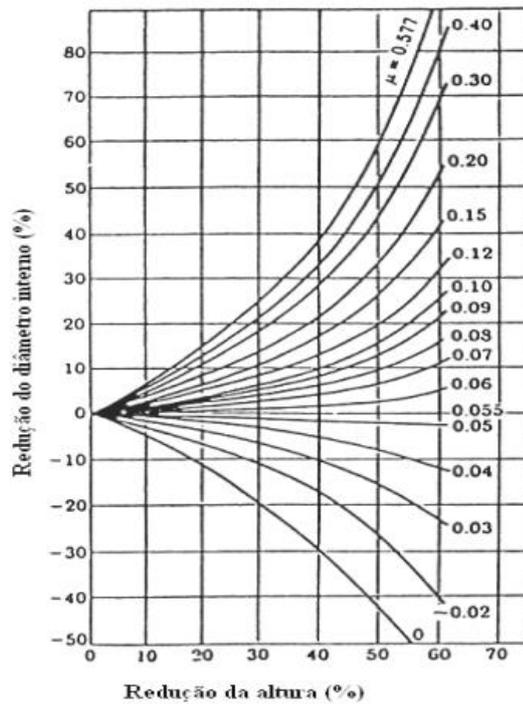


Figura 6 - Curvas de calibração para o teste do anel. (CAMACHO et al, 2013).

As dimensões do anel devem respeitar uma relação, que dentre outras, encontra-se a 6:3:2 para: diâmetro externo, diâmetro interno e altura respectivamente (BUENO, 2010).

Segundo Geier (2007), cada geometria de anel tem seu conjunto específico de curvas de calibração. A geometria mais usual é a que respeita a proporção 6:3:2. Em temperatura ambiente

as dimensões do anel não são relevantes, entretanto, quando se faz necessário um maior controle de temperatura, recomenda-se utilizar anéis maiores para evitar perdas térmicas.

A grande escala de deformação do material de trabalho somando não haver necessidade das medições de força são vantagens do ensaio do anel, que serve também para classificar diferentes tipos de lubrificantes para o processo de forjamento. Para isto é de costume a construção das curvas de calibração do atrito num gráfico obtido com auxílio de cálculos teóricos para diferentes valores de atrito. O método foi desenvolvido posteriormente por Male e Cockroft que introduziram uma calibração experimental para determinar o coeficiente de atrito ( $\mu$ ). A utilização do método do limite superior foi usada por Male e Depierre como tratamento matemático para determinação do fator de atrito  $m$  no ensaio do anel. Avitzur foi o primeiro que apresentou de maneira satisfatória análise do problema em 1968 do ensaio do anel (CAMACHO et al., 2013).

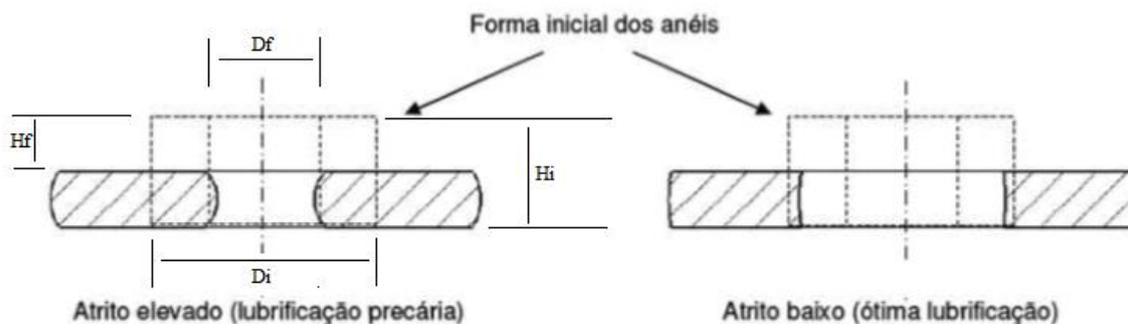


Figura 7 - Variação do diâmetro interno do anel com o efeito do atrito. (BUENO, 2010)

## 2.2.4 Ensaio de Extrusão do Duplo Copo

Um dos ensaios para caracterizar o atrito entre peça e ferramenta é o processo DCE, que consiste em utilizar uma barra redonda de mesma composição da peça que servirá como corpo de prova. Utiliza-se então uma matriz com um furo de diâmetro maior que o da barra redonda que servirá como corpo de prova, onde o corpo de prova será colocado e fixado. Com a utilização de dois punções, um fixo e outro móvel forçam-se a barra contra o punção fixo, deformando a mesma por extrusão indireta (SCHRADER; SHIRGAOKAR; ALTAN, 2006).

Para medir o atrito entre a peça e a ferramenta, utiliza-se a medida da diferença entre as cotas  $H1$  e  $H2$  dentro da matriz, após a extrusão do material, pois quanto mais próximo os valores das cotas  $H1$  e  $H2$ , menor será o atrito (SCHRADER; SHIRGAOKAR; ALTAN, 2006).

Na Figura 8 pode-se observar o modelo de processo para determinar o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) entre peça e ferramenta utilizando-se a extrusão por duplo copo.

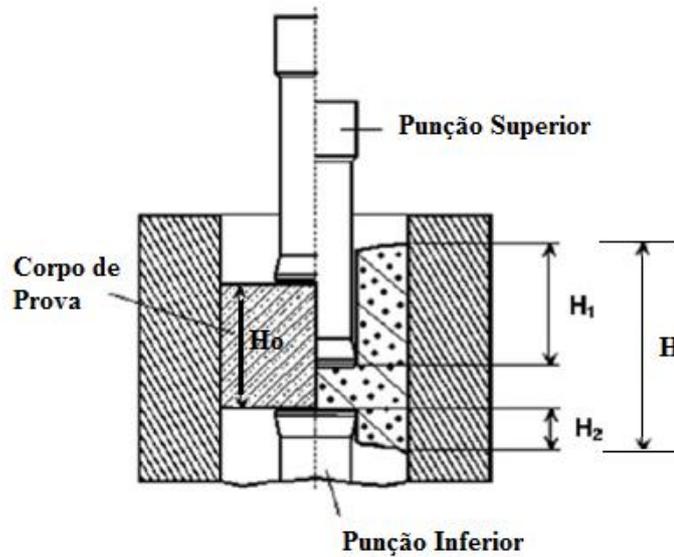


Figura 8 - Esquema da extrusão por duplo copo. (SCHRADER; SHIRGAOKAR; ALTAN, 2006).

Os resultados obtidos experimentalmente são comparados nas curvas de calibração observados na figura 9, que descreve a variação da relação entre H1 e H2 em função do deslocamento total dos punções representados em S. As curvas simuladas que mais se aproximarem dos pontos experimentais indicam o valor do coeficiente de atrito do processo (ALTAN, 2004).

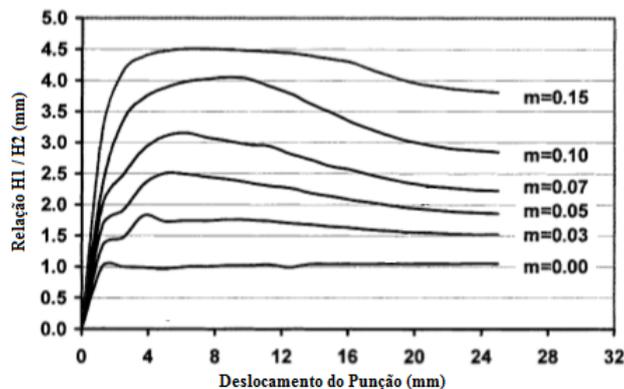


Figura 9 - Curvas de calibração para o DCET (ALTAN, 2004).

O deslocamento do punção (S) é calculado pela equação 4, onde  $H_0$  é a altura inicial do corpo de prova, H a altura final do corpo de prova, H1 é a altura extrusada pelo punção superior e H2 a altura extrusada pelo punção inferior.

$$S = H_0 - (H - H_1 - H_2) \quad (Eq 4)$$

Na figura 10 pode se observar as indicações das medidas H, H1 e H2 em um corpo de prova após o processo de extrusão por duplo copo:

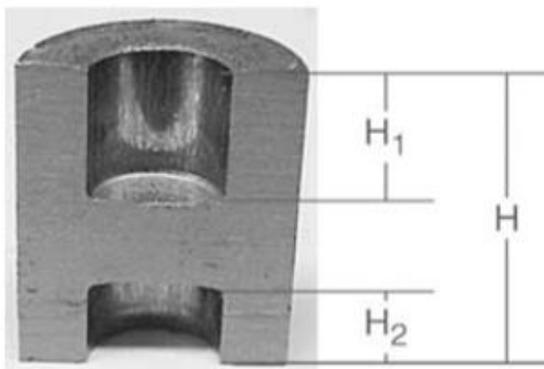


Figura 10 - Medidas para o corpo de prova após a extrusão por duplo copo (ALTAN, 2004).

Nos processos de extrusão, a rugosidade superficial da peça influencia no atrito entre a mesma e a ferramenta, devido a pouca formação de áreas confinadas no contato entre peça e ferramenta. Por manter em seu interior o lubrificante, estes espaços impedem o contato entre peça e ferramenta, por isso a eficiência do lubrificante é diretamente proporcional a quantidade destes espaços (SCHRADER; SHIRGAOKAR; ALTAN, 2006).

## 2.3 LIGAS DE ALUMÍNIO

O alumínio é o terceiro metal mais abundante na crosta terrestre e por suas excelentes propriedades físico-químicas, entre as quais se destacam o baixo peso específico, a alta condutividade térmica e elétrica e a reciclagem, tornou-se o metal não ferroso mais consumido no mundo, sendo maleável, dúctil e apto para a mecanização e para a fundição (BALADI, 2016)

### 2.3.1 Características do Alumínio

O alumínio puro possui algumas propriedades atrativas como a baixa densidade, cerca de  $2,7\text{g/cm}^3$ , alta resistência à corrosão e ótima condutibilidade térmica e elétrica. Algumas ligas de alumínio podem superar a resistência de alguns aços estruturais, entretanto o alumínio puro e algumas ligas de alumínio exibem uma resistência mecânica relativamente baixa. Sua principal limitação é a baixa temperatura de fusão ( $660^\circ\text{C}$ ) o que restringe a sua aplicação a altas temperaturas (ASM INTERNATIONAL, 2005).

O alumínio, dentre os metais não ferrosos, é um dos mais utilizados no processo de forjamento, devido a as características citadas acima, fica somente atrás do ferro e das ligas ferrosas (BUENO, 2010).

As características das curvas de escoamento, bem como a tensão de escoamento foram retiradas da literatura, de Geier 2007 e serão utilizadas no software de simulação computacional para obtenção das curvas de calibração do alumínio AA6351, levando-se em consideração as características de ferramental de cada ensaio simulado.

As curvas de escoamento da liga de alumínio (figura 11) foram ajustadas matematicamente por Geier 2007 e comparadas experimentalmente.

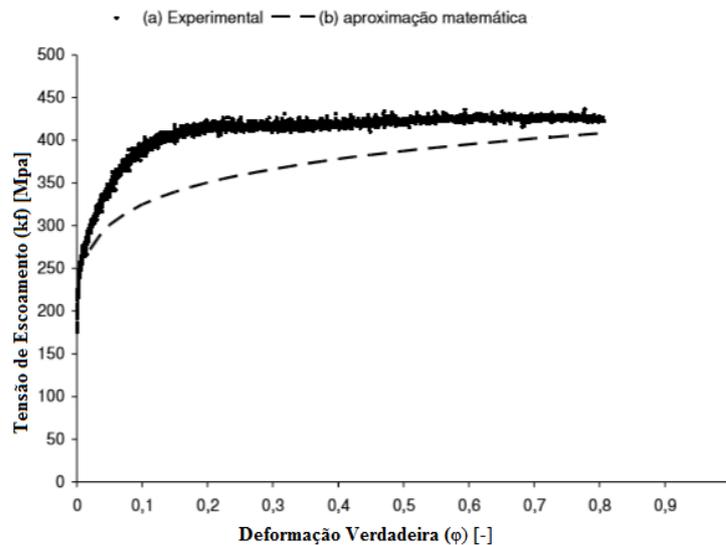


Figura 11 - Curvas de escoamento para alumínio AA6351. (GEIER, 2007)

Para o AA6351 no estado bruto de laminação (encruado) a tensão de escoamento está representada na equação 5:

$$kf = 334,8 * \varphi^{-0,005} \quad (Eq 5)$$

### 2.3.2 Forjamento do Alumínio

Depois das ligas ferrosas, o alumínio é o metal mais utilizado para forjamento, sendo utilizado principalmente nas indústrias aeronáutica, bélica, transportes, máquinas e equipamentos (BALADI, 2016).

Esta preferência se dá principalmente por algumas propriedades que lhe conferem baixo peso específico e em algumas ligas uma resistência mecânica igualada aos aços estruturais. Além disso o alumínio possui uma propriedade muito importante que é a resistência a corrosão, e após o processo de forjamento reage com o oxigênio do ambiente, formando uma película de óxido extremamente fina que protege contra a corrosão (BUENO, 2010).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os procedimentos feitos para os ensaios do anel e extrusão por duplo copo para o alumínio AA6351.

#### 3.1 CORPOS DE PROVA

Devido à característica de cada um dos testes para determinação do atrito, conforme visto anteriormente, os corpos de prova possuem geometria distinta, sendo assim desenvolveu-se o projeto para usinagem de cada tipo de corpo de prova conforme apresentado abaixo.

##### 3.1.1 Corpo de Prova para o Ensaio do Anel

A partir de barras comerciais da liga de alumínio AA6351, foram confeccionados corpos de prova em formato anelar com dimensões de 24 mm de diâmetro externo, 12 mm de diâmetro interno e 8 mm de altura, onde de acordo com o projeto apresentado na seção anterior, estabeleceu-se a relação diâmetro externo x diâmetro interno x altura em 6:3:2, conforme figura 12.

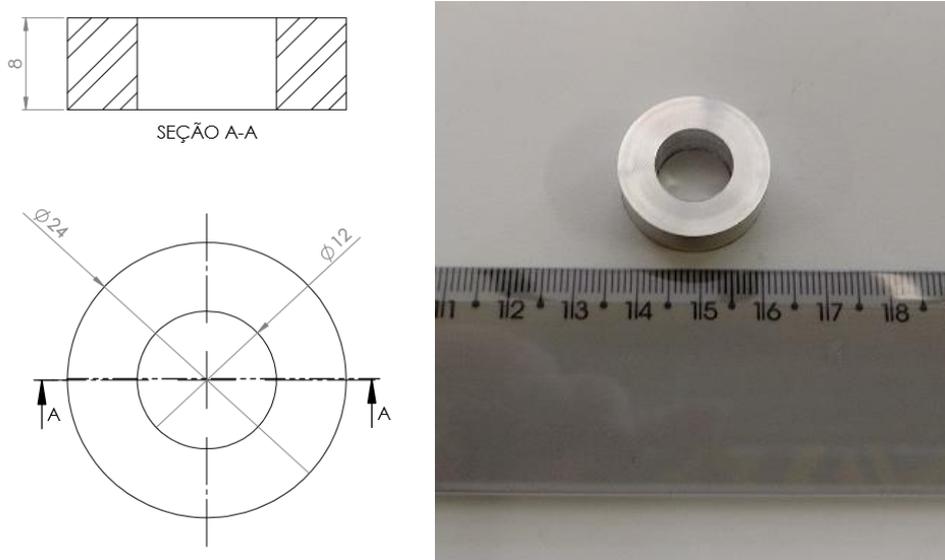


Figura 12 - Projeto e corpo de prova fabricado para o ensaio do anel.

##### 3.1.2 Corpo de Prova para o Ensaio de Extrusão do Duplo Copo

Os corpos de prova foram confeccionados com o mesmo material, liga de alumínio AA6351, em formato cilíndrico, sendo que suas dimensões são de 20 mm de altura e 20 mm de

diâmetro. Na figura 13 é possível observar o projeto e o corpo de prova usinado para o teste da extrusão por duplo copo.

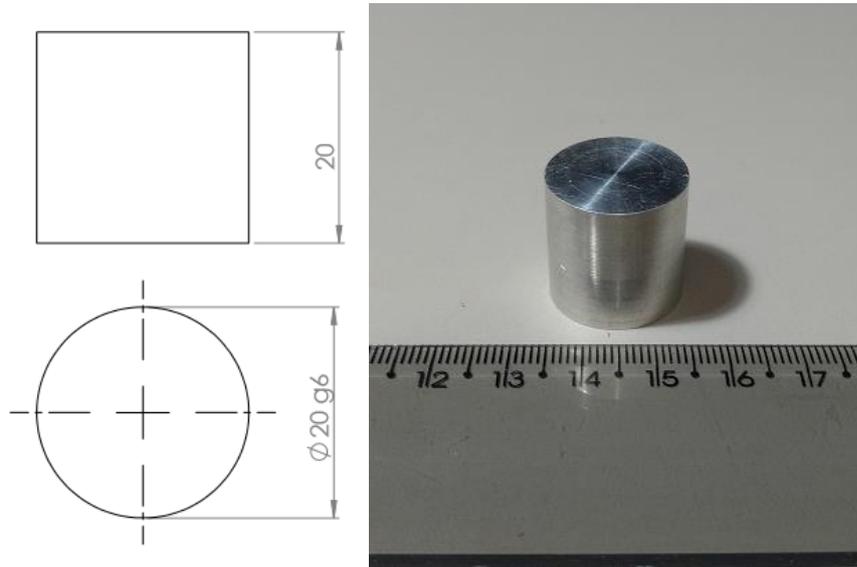


Figura 13 - Projeto e corpo de prova fabricado para o DCET (*Double Cup Extrusion Test*).

### 3.2 FERRAMENTAS PARA OS ENSAIOS

As ferramentas foram projetadas através do *software Solidworks*, sendo que como material para a confecção das ferramentas utilizou-se o aço ferramenta ASI D6, com exceção de um cilindro externo onde se produziu em aço SAE 4340, após o início dos ensaios, devido a quebra do cilindro principal do DCET, introduziu-se este cilindro ao experimento para encamisar o cilindro central do ensaio do duplo copo.

Para tratamento térmico das ferramentas aplicou-se a têmpera com temperatura de austenitização de 1020° C e triplo revenimento a 250° C, sendo feita pela empresa Têmpera Gaúcha de Porto Alegre. Apenas o anel de extração, que será detalhado ainda nesta seção, não foi submetido a tratamento térmico devido a sua função não exigir este processo.

#### 3.2.1 Ferramenta para o Ensaio do Anel

Na figura 14, pode-se observar a ferramenta para o ensaio do anel, constituída por 2 (dois) cilindros de contato de 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura.

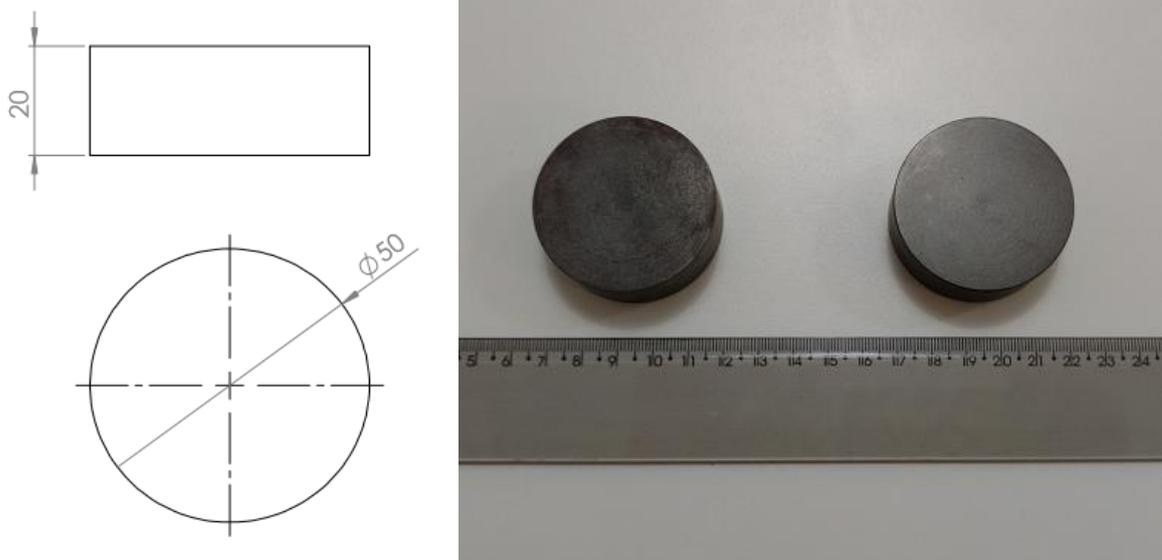


Figura 14 - Ferramenta superior e inferior para o ensaio do anel.

Na figura 15, tem-se o conjunto ferramental e o anel que serviu como corpo de prova, preparado para o início de um ensaio na prensa.

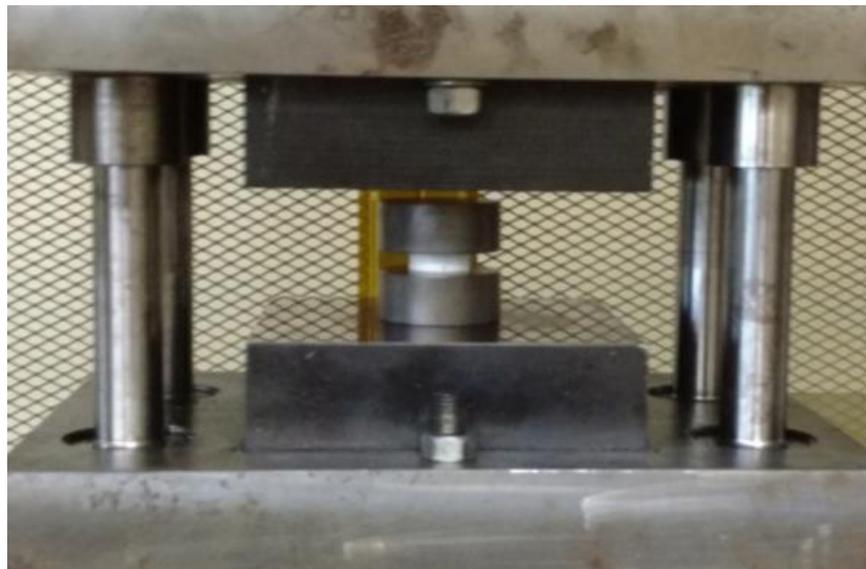


Figura 15 - Ferramental e corpo de prova para o ensaio do anel.

### 3.2.2 Ferramenta para o Ensaio de Extrusão do Duplo Copo

O projeto da ferramenta para a extrusão por duplo copo é apresentada na figura 16, onde a mesma é composta pelo cilindro principal, que vai abrigar o corpo de prova e os punções, inferior e superior.

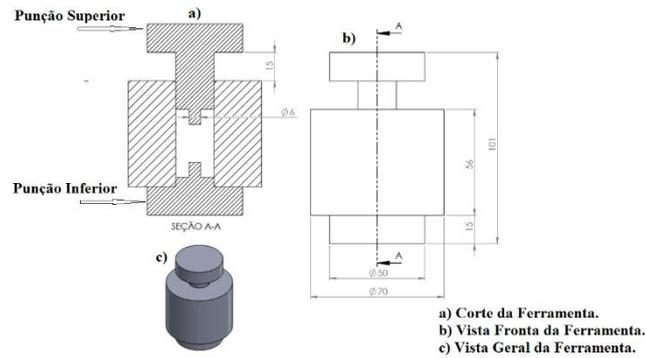


Figura 16 - Projeto e ferramental posicionado na prensa para o DCET

Abaixo na figura 17, apresenta-se o conjunto ferramental para o teste de extrusão por duplo copo. O conjunto está posicionado na prensa para o início do teste, com o corpo de prova já posicionado no cilindro.

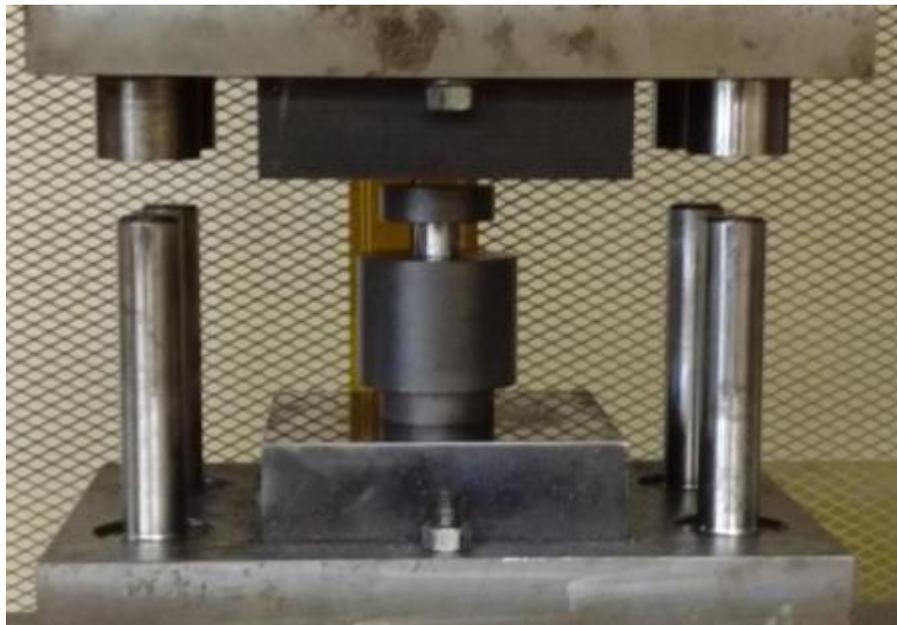


Figura 17 - Ferramental e corpo de prova para o DCET.

Observa-se na figura 18, o cilindro central, alterado em seu projeto original que possuía 50 mm de diâmetro, para uma ferramenta com maior massa, produzido com 100 mm de diâmetro e encamisado conforme mencionado anteriormente.

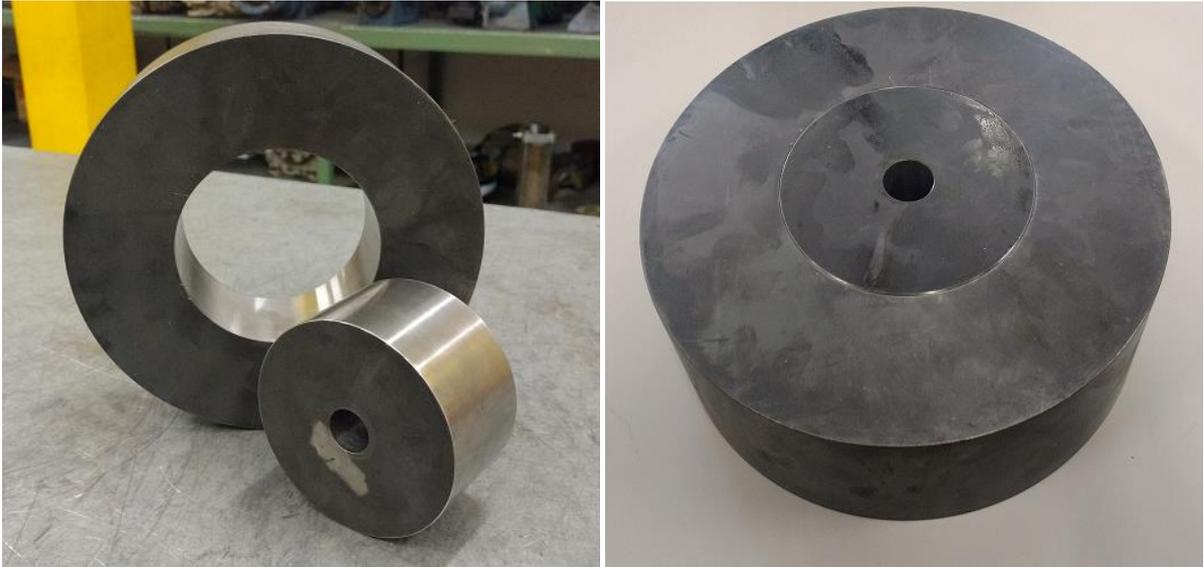


Figura 18 - Cilindro central DCET e ferramenta para encamisar cilindro.

Fabricou-se um anel de saque, mostrado na figura 19, em aço ferramenta ASI D6, sem tratamento térmico, que foi utilizado como facilitador do saque dos corpos de prova para o DCET.

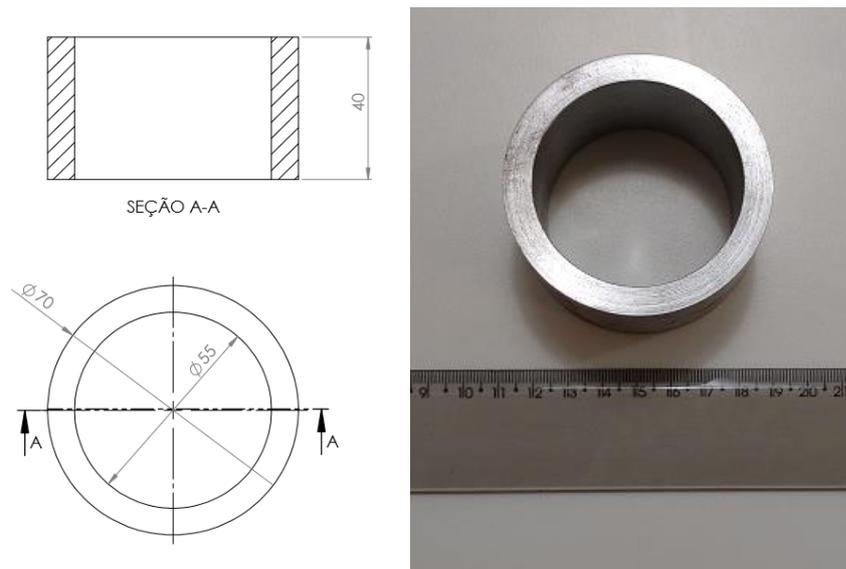


Figura 19 – Anel de extração.

Fabricou-se 3 (três) conjuntos de punções. Cada conjunto com punção superior e inferior, com 6mm, 10 mm e 13 mm de diâmetro na área de contato do punção com o corpo de prova, foi confeccionado um anel de extração para facilitar a retirada do corpo de prova do interior da ferramenta. Conjunto das ferramentas detalhado na figura 20.



Figura 20 - Conjunto ferramental para o ensaio do anel e DCET.

### 3.3 CONDIÇÕES DE LUBRIFICAÇÃO

Foram trabalhados dois tipos de lubrificantes (figura 21) com três condições de contato: (a) lubrificante grafitado; (b) lubrificante teflon; (c) sem lubrificação.

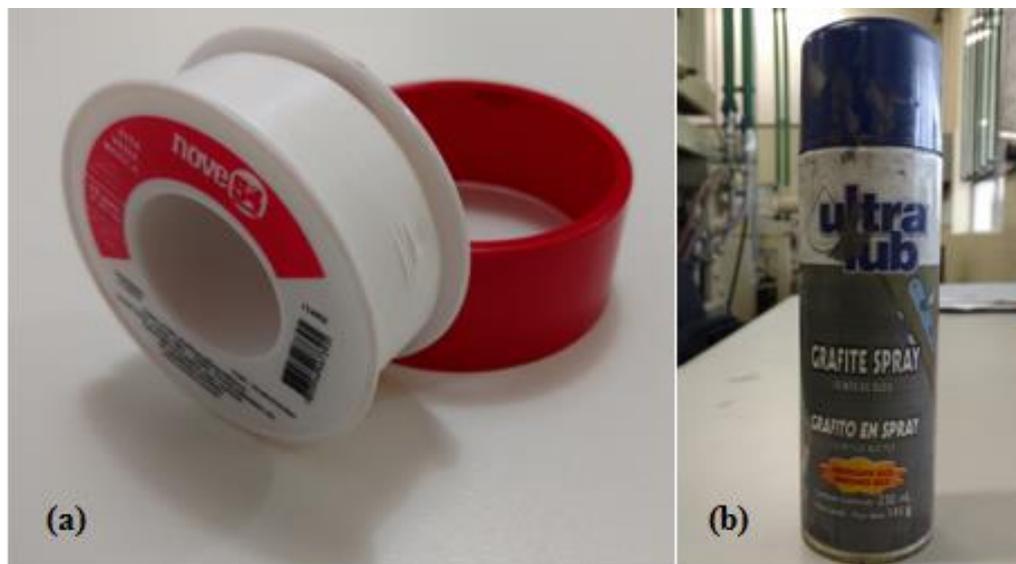


Figura 21 - Lubrificantes utilizados nos experimentos.

### 3.4 PRENSA

Os ensaios para o teste do anel e DCET foram realizados no LACOMP - SATC, utilizando-se uma prensa hidráulica FN150 da FKL Máquinas, conforme figura 22, com

capacidade de 150 toneladas, a temperatura ambiente. Para o teste do anel a prensa foi controlada por um limitador de curso para limitar a deformação ao percentuais calculados nas curvas de calibração.



Figura 22 - Prensa utilizada nos experimentos.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta os resultados experimentais baseados nas medições feitas nos corpos de prova e comparando-se os pontos obtidos com as curvas teóricas de calibração de cada teste.

### 4.1 ELABORAÇÕES DAS CURVAS DE ATRITO

As ferramentas desenvolvidas para o experimento de compressão e extrusão foram desenhadas no *software Solidworks* e importadas no *Simufact*, onde os processos de conformação foram simulados para os coeficientes de atrito necessários para análise comparativa dos dois modelos de ensaio, gerando as curvas de calibração para cada um deles.

Ambas as curvas foram simuladas para o mesmo material, a liga de alumínio AA6351 nas mesmas condições de temperatura 20° C.

No software de simulação por análise de elementos finitos é necessário definir-se os valores desejados de atrito e faz-se então a simulação que permite traçar as curvas de calibração para cada modelo de ensaio.

O objetivo dessas simulações foi gerar curvas de calibração, a fim de compará-las com a curva experimental. Foram realizadas, variando-se o coeficiente de atrito de Coulomb ( $\mu$ ) de 0,00 a 0,5.

#### 4.1.1 Ensaio do Anel

No ensaio de compressão do anel, a curva que define o coeficiente de atrito é apresentada no gráfico a partir dos percentuais de redução da altura do anel, representado no eixo das abscissas, e dos percentuais de redução do diâmetro interno representado no eixo das ordenadas, conforme figura 23.

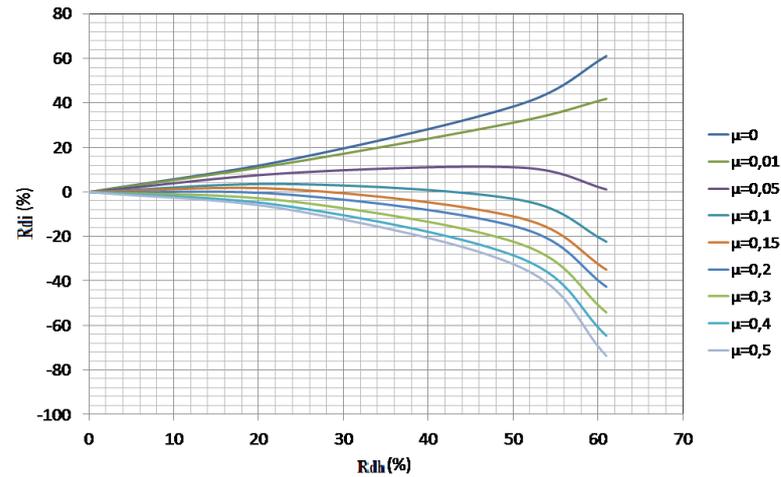


Figura 23 - Curvas de atrito para o ensaio do anel, obtidas por simulação computacional.

#### 4.1.2 Ensaio de Extrusão do Duplo Copo

Na extrusão por duplo copo, a curva que define o coeficiente de atrito é mostrada no gráfico, a partir do curso total do punção no corpo de prova, representado no das abscissas, lembrando que a altura do corpo de prova vai aumentar em função do escoamento do material, e a partir da razão entre  $H1$  e  $H2$  representado no eixo das ordenadas, conforme figura 24.

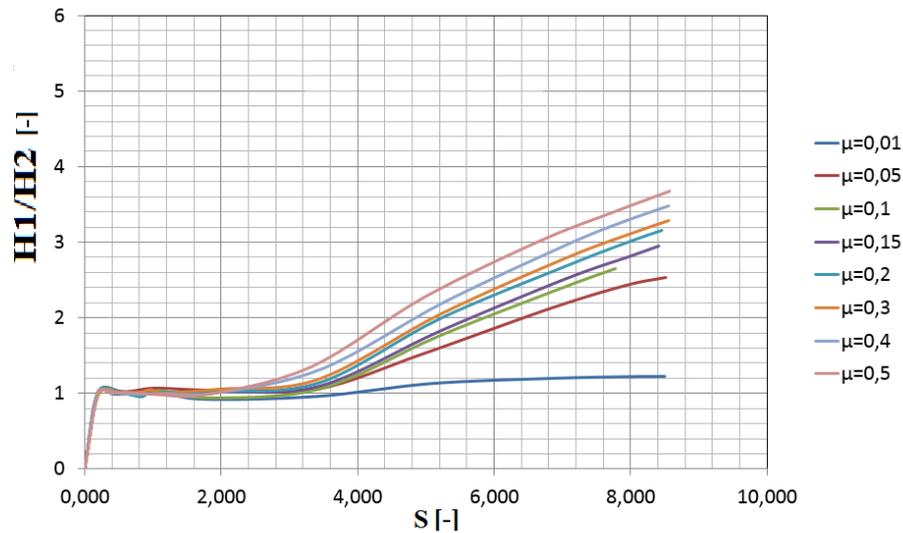


Figura 24 - Curvas de atrito para o DCET, obtidas por simulação computacional.

## 4.2 MEDIÇÕES NOS CORPOS DE PROVA

Para facilitar a discussão dos resultados bem como sua compreensão, serão apresentadas as medições feitas nos corpos de prova para o teste de compressão do anel e a extrusão por duplo copo, que serão marcados no gráfico das curvas de calibração os pontos obtidos a partir destas medições.

Nas medições utilizou-se um paquímetro com resolução de 0,02 mm, sendo que para o ensaio do anel, após cada ensaio a altura e o diâmetro interno foram medidos em três pontos e então um valor médio foi obtido. Para a extrusão por duplo copo foram feitas as medidas de altura da extrusão feita pelo punção superior, chamada de H1 e do punção inferior, chamada de H2.

### 4.2.1 Ensaio do Anel

As medições feitas nos corpos de prova antes e depois do experimento são apresentadas nas tabelas abaixo, calcularam-se os percentuais de redução da altura do anel e do diâmetro interno, em seguida de cada tabela pode-se observar a imagem dos respectivos corpos de prova. A tabela 1 apresenta os dados obtidos na condição de ensaio sem lubrificação.

Tabela 1 - Dados do ensaio do anel, sem lubrificante.

Ensaio	Hi	Hf	Rhi	Di	Df	Rdi	$\mu$
1	8	6,3	20	12	11,8	-2	0,50
2	8	4,5	40	12	11,3	-6	0,20
3	8	3,7	50	12	6,4	-46	0,50

Na figura 25 observam-se os corpos de prova apresentados na tabela 1, identificados pela numeração do ensaio.



Figura 25 - Corpos de prova após teste de anel, sem lubrificação.

A tabela 2 apresenta os dados obtidos na condição de ensaio com lubrificação em teflon, identificados pela numeração do ensaio.

Tabela 2 - Dados do ensaio do anel, lubrificante teflon.

Ensaio	H <sub>i</sub>	H <sub>f</sub>	R <sub>hi</sub>	D <sub>i</sub>	D <sub>f</sub>	R <sub>di</sub>	μ
4	8	6,6	20	12	11,5	-4	0,30
5	8	4,7	40	12	11,2	-6	0,30
6	8	3,3	60	12	6,2	-48	0,30

Na figura 26 observam-se os corpos de prova apresentados na tabela 2.



Figura 26 - Corpos de prova após ensaio do anel, lubrificado com teflon.

A tabela 3 apresenta os dados obtidos na condição de ensaio utilizando lubrificação com grafite, identificados pela numeração do ensaio.

Tabela 3 - Dados do ensaio do anel, lubrificante grafite.

Ensaio	H <sub>i</sub>	H <sub>f</sub>	R <sub>hi</sub>	D <sub>i</sub>	D <sub>f</sub>	R <sub>di</sub>	μ
7	8	6,4	20	12	11,9	0	0,15
8	8	4,5	40	12	11,4	-5	0,15
9	8	3,8	50	12	10,8	-10	0,15

Na figura 27 observam-se os corpos de prova apresentados na tabela 3.



Figura 27 - Corpos de prova após ensaio do anel, lubrificados com grafite.

Com base nas medições de redução de altura e diâmetro interno, conforme apresentado na figura 7 da página 34, apresentou-se no gráfico o atrito verificado para cada condição de lubrificação e são apresentados na figura 28.

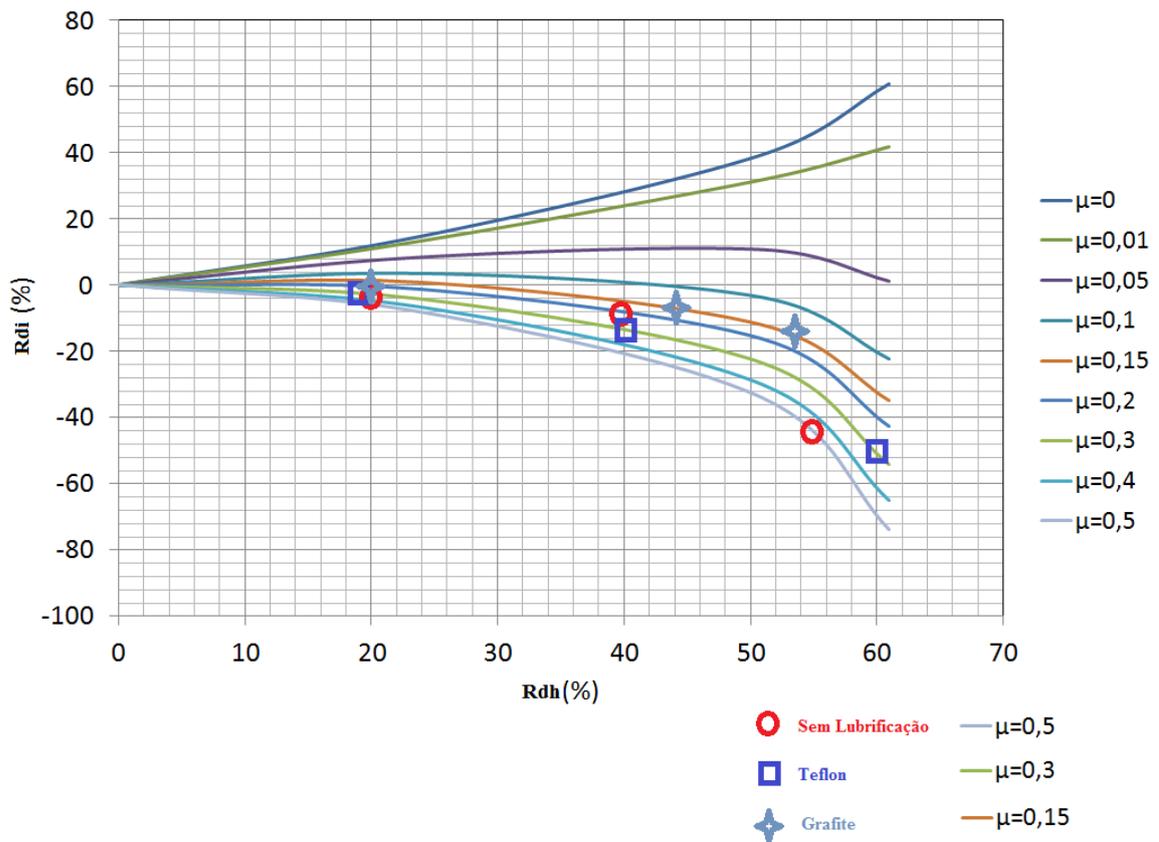


Figura 28 - Atrito verificado pelo ensaio do anel.

#### 4.2.2 Ensaio de Extrusão do Duplo Copo

As tabelas e figuras a seguir apresentam as medições feitas nos corpos de prova antes e depois do experimento para punção de 6 mm, sendo mantida as mesmas condições de lubrificação usadas no ensaio do anel.

Nas figuras seguintes a cada tabela são apresentados os corpos de prova para mesmas respectivas condições de lubrificação. A tabela 4 apresenta os dados obtidos na condição de ensaio sem lubrificação.

Tabela 4 - Dados do ensaio de extrusão por duplo copo, sem lubrificante.

Ensaio	H <sub>0</sub>	H	S	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>1</sub> /H <sub>2</sub>	μ
103	20,0	20,7	3,0	3,10	0,6	5,7	4,6
109	20,0	20,8	3,9	3,9	0,8	4,8	4,8
106	20,0	20,2	7,1	6,0	1,3	4,6	5,6

Na figura 29 observam-se os corpos de prova apresentados na tabela 4, identificados pela numeração do ensaio.



Figura 29 - Corpos de prova após DCET, sem lubrificação.

A tabela 5 apresenta os dados obtidos na condição de ensaio com lubrificação em teflon.

Tabela 5 - Dados do ensaio de extrusão por duplo copo, lubrificante teflon.

Ensaio	H <sub>0</sub>	H	S	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>1</sub> /H <sub>2</sub>	μ
101	20,0	20,4	2,7	2,5	0,6	4,17	3,2
107	20,0	21,0	2,9	3,2	0,7	4,57	4,3
104	20,0	20,4	5,0	3,4	2,0	1,70	0,30

Na figura 30 observam-se os corpos de prova apresentados na tabela 5, identificados pela numeração do ensaio.



Figura 30 - Corpos de prova DCET, lubrificados com teflon.

A tabela 3 apresenta os dados obtidos na condição de ensaio utilizando lubrificação com grafite.

Tabela 6 - Dados do ensaio de extrusão por duplo copo, lubrificante grafite.

Ensaio	$H_0$	H	S	$H_1$	$H_2$	$H_1/H_2$	$\mu$
108	20,0	20,8	3,1	3,6	0,6	5,50	5,2
102	20,0	20,6	3,4	3,4	0,6	5,67	5,6
105	20,0	21,0	6,5	6,3	1,2	5,25	5,8

Na figura 31 observam-se os corpos de prova apresentados na tabela 6, identificados pela numeração do ensaio.

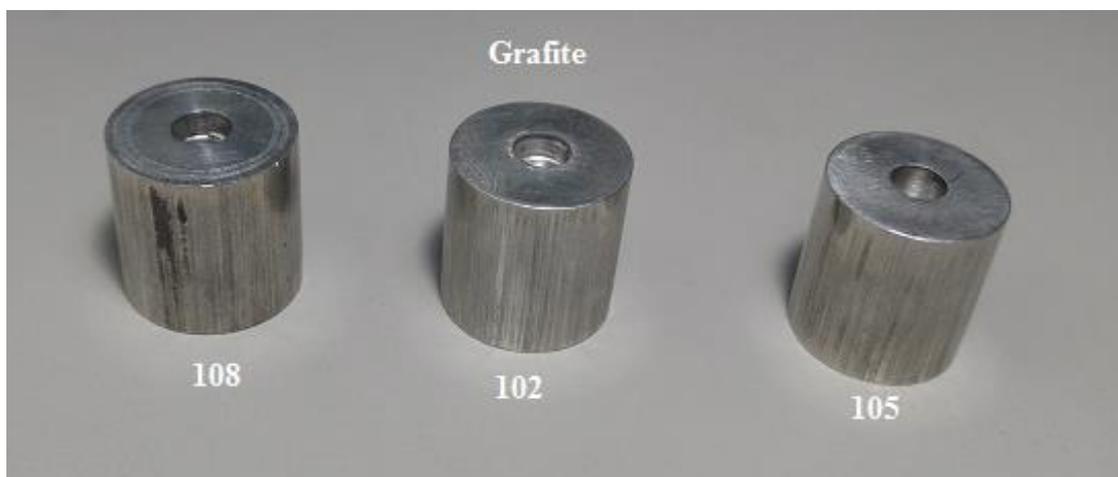


Figura 31 - Corpos de prova após o DCET, lubrificados com grafite.

Durante os ensaios foi feito um teste de extrusão com punção de 13mm, ocorrendo a quebra acidental da ferramenta após este teste, na tabela 7 é possível observar os resultados deste ensaio.

Tabela 7 - Dados do ensaio de extrusão por duplo copo, lubrificante grafite.

Ensaio	H <sub>0</sub>	H	S	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>1</sub> /H <sub>2</sub>	μ
34	20,0	23,9	2,7	4,4	4,0	1,1	0,01

Com base nas medições, apresentou-se no gráfico o atrito verificado para cada condição de lubrificação no ensaio de extrusão conforme figura 32.

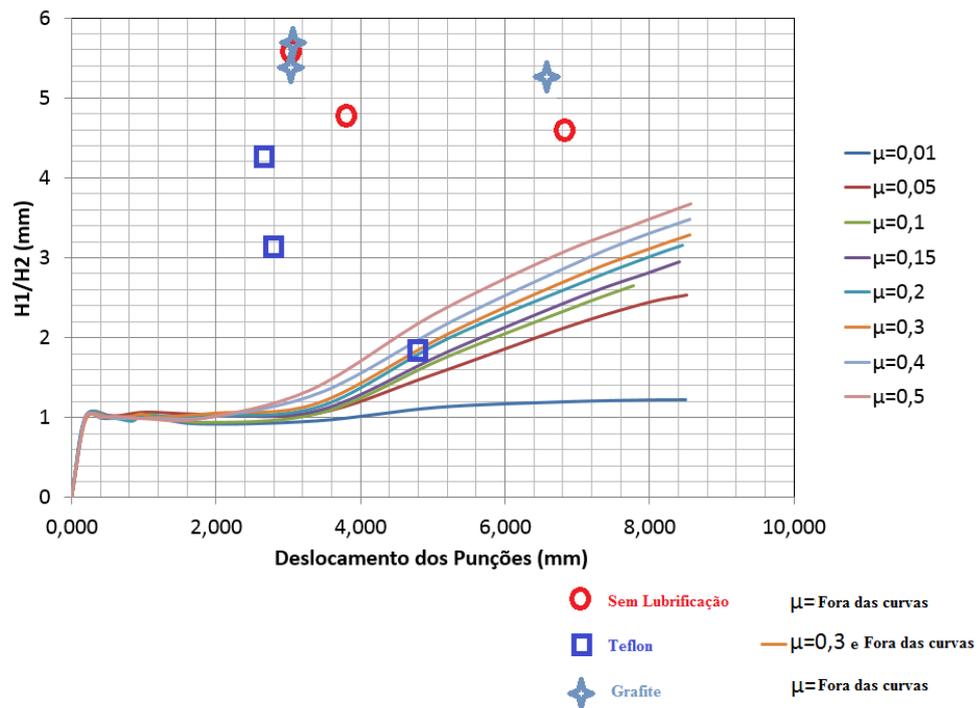


Figura 32 - Atrito verificado pelo DCET.

## 5. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Observando-se a correlação entre os resultados experimentais e as curvas teóricas de calibração, percebeu-se que no ensaio do anel os comportamentos dos valores do coeficiente de atrito se mantiveram dentro do esperado de acordo com a revisão bibliográfica, não podendo se dizer o mesmo em relação ao DCET, as próximas seções apresentam a análise e discussões levantadas pelos resultados obtidos.

### 5.1 CURVAS DE CALIBRAÇÃO SIMULADAS PARA O ENSAIO DO ANEL

As curvas de calibração obtidas na bibliografia, apresentadas na figura 6 da página 32, quando comparadas com as obtidas através do *software* de simulação apresentaram diferentes valores entre o ensaio do anel e do DCET.

#### 5.1.1 Ensaio do Anel

Na figura 33 observam-se as curvas obtidas através do *software* de simulação.

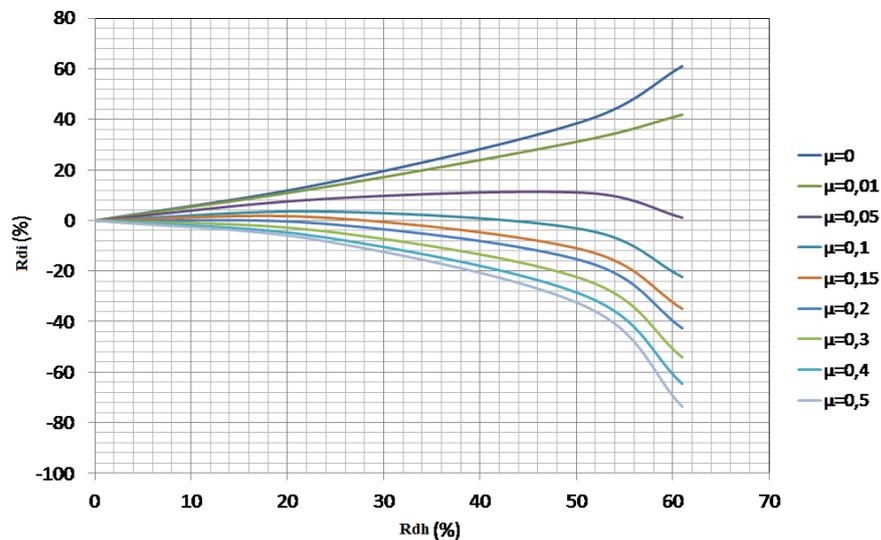


Figura 33 - Curvas de calibração para o ensaio do anel, obtidas por simulação computacional no *Simufact*.

Partindo-se da constatação que ambas foram baseadas no mesmo material o alumínio AA6351, é possível observar, excetuando-se a dimensão dos gráficos e os coeficientes de atrito simulado em cada uma delas, que ambas possuem os mesmos padrões de evolução do atrito se comparados com a variação do diâmetro interno do anel. Com isso pode-se perceber que as curvas têm o mesmo formato, mas os valores são diferentes, isto mostra que os valores do atrito

dependem fortemente de outros fatores além da relação altura, diâmetro interno e diâmetro externo.

### 5.1.2 Ensaio de Extrusão do Duplo Copo

Observam-se na figura 35 as curvas obtidas por simulação computacional para os experimentos realizados neste estudo.

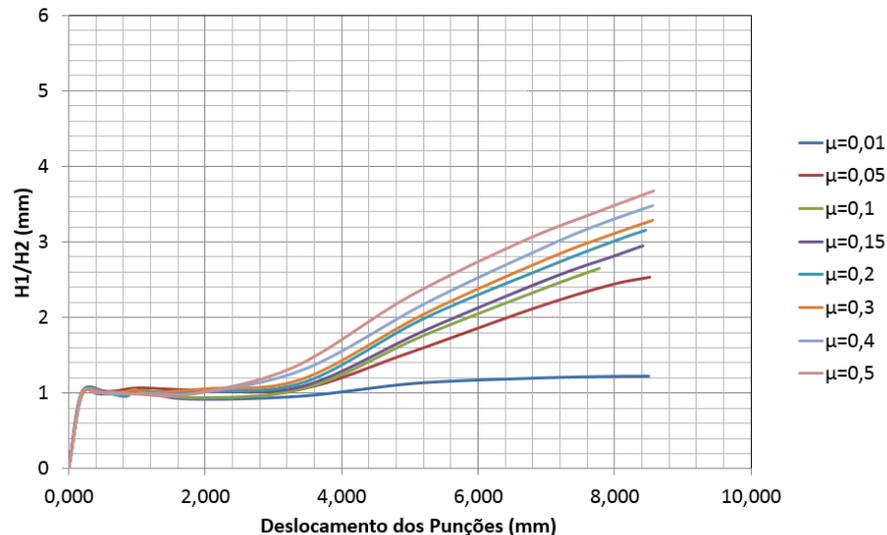


Figura 34 - Curvas de atrito para o DCET, obtidas por simulação computacional no *Simufact*.

Comparando-se os resultados das figuras 34 com a figura 9, observa-se nas curvas da bibliografia que com um deslocamento do punção próximo a 2 mm, já é possível perceber diferenças na verificação do atrito. Em contra partida nas curvas da figura 36, que com o mesmo deslocamento de 2 mm, ainda é muito difícil identificar-se o coeficiente de atrito, pois estão muito próximos.

Acredita-se que como os punções estão diretamente em contato com o material a ser extrusado, sua geometria influencia então também diretamente no atrito, observa-se que o punção superior (figura 36) utilizado neste experimento possui geometria 90° (figura 36) em relação ao material a ser extrusado, sendo assim, durante todo processo o punção está em contato com o material, sofrendo atrito do mesmo.

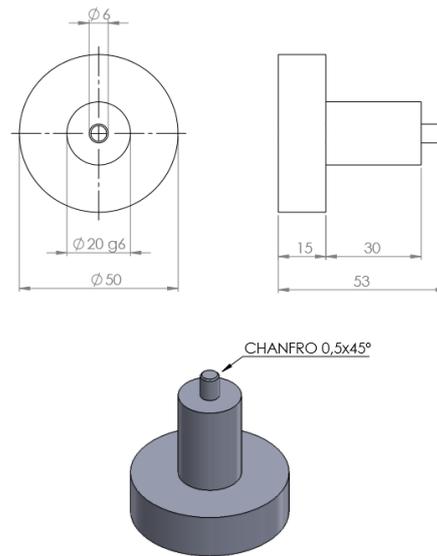


Figura 355 - Modelo do punção superior utilizado no DCET.

Na figura 37 é possível se observar outro modelo de punção que possui uma geometria onde o atrito entre o material e o punção fica restrito a pequena área definida pelo comprimento de 2 mm, onde neste caso força de atrito aumenta no início e após se mantém mais constante. Desta forma se obtém curvas mais aproximadas com as da literatura apresentadas no início desta seção.

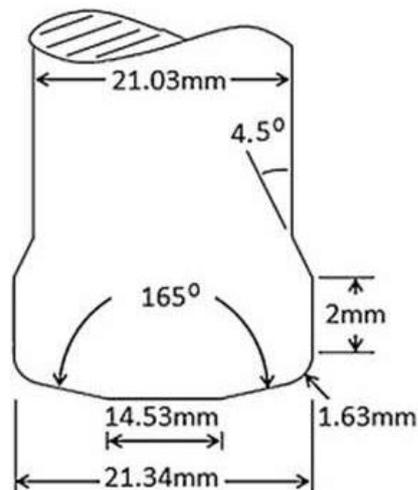


Figura 366 - Modelo do punção com menor área de atrito (LOWRIE; NGAILE, 2016).

## 5.2 INFLUÊNCIA DO MODELO FERRAMENTAL PARA DCET

Durante os ensaios para o DCET observou-se uma dificuldade em extrair os corpos de prova do interior da ferramenta, e durante os primeiros dias de ensaio houve um incidente que

causou o rompimento do cilindro principal da ferramenta do duplo copo, conforme se pode observar na figura 38.



Figura 377 - Cilindro principal da ferramenta DCET após o rompimento.

Neste momento os testes estavam sendo feitos com punção de 13 mm e a partir deste momento buscou-se confeccionar uma nova ferramenta para continuidade dos testes. Como mencionado no capítulo sobre materiais e métodos, produziu-se um novo cilindro, com maior massa, aumentando-se de 50 mm para 100 mm o diâmetro e encamisando este cilindro.

Neste novo ferramental não foram observadas as mesmas condições de polimento interno da ferramenta, e com isso durante os ensaios percebeu-se que o processo de extrusão causa um atrito maior que o verificado na ferramenta anterior, podendo ser observado inclusive na figura 39, que mostra a esquerda um corpo de prova extrusado na ferramenta original e outra na ferramenta feita na sequencia após o incidente.



Figura 38 - Corpos de prova extrudado com ferramentas diferentes.

Na figura anterior podem-se observar duas diferenças básicas entre os corpos de prova, o diâmetro do punção, onde o primeiro foi extrudado com punção de 13 mm e o segundo com 6 mm, e a outra diferença se vê na parede externa do corpo de prova, onde a segunda imagem

mostra ranhuras na vertical indicando que o corpo de prova prendia na parede interna da ferramenta durante o escoamento do material.

O corpo de prova extrusado com o punção de 13 mm e com a ferramenta polida foi o único ensaio feito antes da quebra do ferramental, mas durante as discussões dos resultados decidiu-se analisar as medidas deste único ensaio e nos permitiu observar que o coeficiente de atrito verificado no ensaio ficou dentro do esperado nas curvas simuladas, conforme apresentado na tabela 7 do capítulo de resultados.

Conforme se pode ver na figura 40, o valor do  $\mu$  para o experimento feito com o primeiro conjunto de ferramentas ficou em 0,01. Em contra partida, como se pode observar no capítulo de resultados experimentais, os ensaios feitos com o segundo ferramental apresentaram um atrito bem acima do previsto nas curvas de simulação.

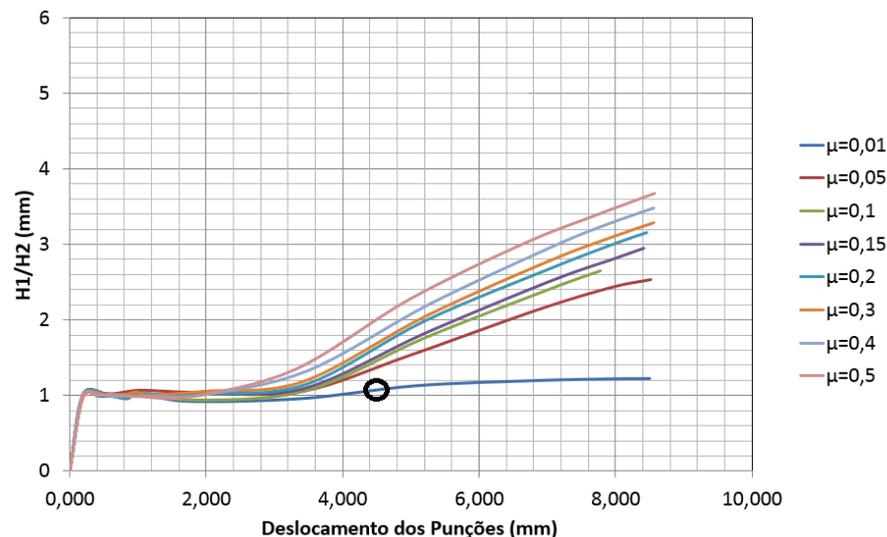


Figura 380 – Atrito verificado com ferramenta diferente.

A tabela 8 baseou-se nos resultados do coeficiente de atrito aferido em cada uma das condições de lubrificação aplicadas nos dois testes.

Tabela 8 - Dados do ensaio de extrusão por duplo copo, sem lubrificante.

Teste	Teflon	Grafite	Sem Lubrificação
Anel	0,3	0,15	0,4
DCET	2,6	5,5	5,0

Observa-se que no teste do anel, o grafite comportou-se melhor na condição de diminuição do atrito e que no DCET o melhor resultado foi obtido com lubrificação em teflon.

## 6. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi o de desenvolver um estudo para conhecer o funcionamento dos modelos do ensaio do anel e do teste de extrusão por duplo copo, e avaliar o desempenho destes dois modelos para a determinação do atrito, através da comparação dos resultados obtidos em ensaios utilizando três situações de lubrificação.

O estudo atingiu seu objetivo, a vista que foi possível executar os dois experimentos através do estudo e da criação das ferramentas e condições para o experimento.

Com relação aos lubrificantes observou-se em ambos os experimentos para o alumínio AA6351 que se mostram eficientes no processo, sendo que o grafite, como visto no capítulo de discussões dos resultados, apresenta melhores resultados na diminuição do atrito em relação ao teflon, e falando-se mais especificamente ao DCET, que dependendo do modelo de ferramenta o atrito é tão alto que não é possível perceber diferenças de eficiência entre os lubrificantes utilizados.

Diante dos resultados obtidos e discutidos neste trabalho pode-se concluir que o procedimento experimental do ensaio do anel se mostra válido para a determinação do coeficiente de atrito  $\mu$ , pois é um dos testes clássicos para a verificação do atrito e possui uma padronização observada na literatura e comprovada por diversos experimentos em condições de atrito encontradas no processo de forjamento. Mesmo utilizando-se a relação geométrica tradicionalmente encontrada na literatura, as curvas obtidas neste trabalho são diferentes das observadas na revisão bibliográfica, sendo assim conclui-se que os resultados dependem de outros fatores como composição química dos materiais e acabamento superficial das ferramentas. Com relação ao DCET executado nos procedimentos experimentais deste trabalho, observou-se que é possível a determinação do coeficiente de atrito, desde que para isso seja observada uma série de características que envolvem ferramental desenvolvido para o experimento.

Conclui-se que é necessário se trabalhar um tratamento superficial para polimento na ferramenta, dos pontos de contato com o corpo de prova, diminuindo rugosidades a fim de permitir um melhor escoamento do material e evitando que o atrito seja muito alto a ponto de prender o corpo de prova nas paredes internas e inviabilizando a retirada do corpo de prova do interior da ferramenta ou até mesmo a execução do experimento.

Outro ponto importante que se observa a partir do experimento e das discussões, é que a geometria do punção influencia diretamente nas curvas de calibração do DCET, aumentando com isso a dificuldade de se comparar as curvas encontradas na bibliografia com as geradas

pelo *software* de simulação, diferentemente do que acontece com o ensaio do anel, que possui um padrão com relação a dimensões do anel e um padrão com relação à ferramenta. Este padrão existente no anel assegura os resultados do atrito verificado, já para o DCET esta falta de padrão pode influenciar tanto nas curvas simuladas quanto no resultado efetivo dos ensaios.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No que tange a ferramenta utilizada neste estudo para o teste de extrusão por duplo copo, sugere-se desenvolver a mesma com uma geometria cônica bipartida e encamisada, mas mantendo as características de internas do furo para acomodação do corpo de prova, facilitando assim a retirada do corpo de prova após o ensaio.

Ainda sobre o DCE fazer um estudo a cerca do acabamento superficial interno da ferramenta bem como dos pontos de contato dos punções com o corpo de prova, evitando atrito excessivo entre o corpo de prova e as paredes internas e punções e permitindo a sua utilização para uma gama maior de materiais para corpos de prova.

Para o DCE, avaliar outros materiais para a confecção dos corpos de prova, bem como a utilização de uma gama maior de lubrificantes como óleos minerais derivados do petróleo; óleos naturais, massas e derivados de origem animal, vegetal e marinha; fluidos sintéticos; lubrificantes compostos melhorados com aditivos; lubrificantes aquosos e revestimentos como vidro, zinco e chumbo.

Fazer um estudo mantendo-se o mesmo conjunto de ferramenta, e trabalhando com punções de diâmetros e dimensões variadas a fim de estudar o comportamento dos mesmos em relação ao atrito.

Desenvolver um estudo experimental comparativo do DCE com o teste do atrito por copo cônico, variando uma gama maior de materiais e evidenciando qual mais indicado para cada tipo de material.

Desenvolver um estudo para criação de mais de um projeto de ferramenta para o DCE e evidenciar os resultados experimentais obtidos e qual o modelo de ferramenta mais indicado.

Estudar acerca dos padrões adotados para o ensaio do anel com o objetivo de identificar uma padronização para o DCET com relação à geometria e acabamento das partes do ferramental que entram em contato com o corpo de prova.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTAN, Taylan. **Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications**. Ohio: Asm International, 2004. 341 p.

ASM INTERNATIONAL. **Metalworking: Bulk Forming**. Asm International Handbook Committee. Ohio, 2005. 868 p.

BAY N. **The state of the art in cold forging lubrication**. Journal Of Materials Processing Technology. Denmark, Vol. 46, p. 19-40. 1994.

BALADI, Carina (São Paulo). Associação Brasileira do Alumínio. **Alumínio - Processos de Produção: Forjamento**. 2016. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/forjamento/>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

BUENO, Alex Fabiano. **Determinação do Coeficiente de Atrito para Ligas de Alumínio AA6351 e de Titânio Ti6Al4V pelos Métodos de Anel e Tubo Cônico**. 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Ufrgs, Porto Alegre, 2010.

BRESCIANI FILHO Ettore et al. **Conformação Plástica dos Materiais**. ed. Campinas: Unicamp, 1997. Edição 5, 383 p.

CAMACHO, Ana Maria et al. **Investigations on Friction Factors in Metal Forming of Industrial Alloys**. Procedia Engineering. Málaga, Vol. 63, p. 564-572. jun. 2013.

GEIER, Martin. **Considerações sobre o Atrito para Processos de Forjamento a Frio através do Ensaio de Compressão do Anel**. 2007. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Ufrgs, Porto Alegre, 2007.

HELMAN, Horácio; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2013. 260 p.

LANGE, Kurt. **Modern Metal Forming Technology for Industrial Production**. Journal Of Materials Processing Technology. Stuttgart, Vol. 71, p. 2-13. nov. 1997.

LOWRIE James; NGAILE Gracious. **New Punch Design for the Elimination of Punch Ejection Load Through Manipulation of The Elastic Strain Field in the Punch Nose**. Journal Of Manufacturing Processes. Norte Carolina, p. 49-59. 2016.

MARTELLO, Leonardo. **Desenvolvimento de Processo de Forjamento da Liga de Alumínio AA6351 com Auxílio de Computação Numérica**. 2007. 79 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

MARTINS, Vinícius; SCHAEFFER, Lírio. **Comparação entre lubrificantes pela verificação do atrito em alumínio e aço**. Revista Corte & Conformação de Metais, Porto Alegre, p.44-63, mar. 2009.

MILANEZ, Alexandre. **Microextrusão Aplicada a Materiais Ferrosos e Não Ferrosos**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Ufrgs, Porto Alegre, 2012.

SCHMITT Peter (São Paulo). Sindiforja - Sindicato Nacional da Indústria de Forjamento. **Comparando Processos**: Como os Forjados se comparam aos Fundidos. 2001. Material extraído do Site da Forging Industry Association - FIA - Associação das Industrias de Forjaria - EUA. - Tradução: Ylich Peter Schmitt - 26/12/2001. Disponível em: <<http://www.sindiforja.org.br/comparando.htm>>. Acesso em: 27 mar. 2016.

RADI, Polyana Alves et al. **TRIBOLOGIA, CONCEITOS E APLICAÇÕES**. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA – XIII ENCITA, 13, 2007, São José dos Campos. São José dos Campos: Ita, 2007.

RODRIGUES, Jorge; MARTINS, Paulo. **TECNOLOGIA MECANICA**: Tecnologia da Deformação Plástica. 2. ed. Lisboa: Escolar Editora, 2010. 694 p. (VOL. 1 - FUNDAMENTOS TEORICOS).

SCHAEFFER, Lirio. **Conformação Mecânica**. 2. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 163 p.

SCHNEIDER Eduardo L, et al. **DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE ATRITO ATRAVÉS DE TESTES DE COMPRESSÃO DE ANÉIS, DE AÇOS PARA CONSTRUÇÃO MECÂNICA**. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2010, Campina Grande.

SCHRADER, Timothy; SHIRGAOKAR, Manas; ALTAN, Taylan. **A critical evaluation of the double cup extrusion test for selection of cold forging lubricants**. Journal Of Materials Processing Technology. Columbus, p. 36-44. 20 nov. 2006.

WANG, Jang-ping et al. **A new experimental approach to evaluate friction in ring test**. Journal Of Materials Processing Technology. Taiwan, p. 68-76. Fev, 2008.

ZBIGNIEW Gronostajski et al. **The failure mechanisms of hot forging dies**. Materials Science & Engineering. Wrocław, Vol. 657, p. 147-160. nov. 2016.