



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL



Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais

PPGE3M

**MICROEXTRUSÃO DE PEÇAS APLICADAS A MATERIAIS
FERROSOS E NÃO FERROSOS**

ALEXANDRE MILANEZ

Mestre em Engenharia Mecânica

Tese para a obtenção do título de Doutor
em Engenharia

Porto Alegre,

2012



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL



Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais
PPGE3M

MICROEXTRUSÃO DE PEÇAS APLICADAS A MATERIAIS FERROSOS E NÃO FERROSOS

ALEXANDRE MILANEZ
Mestre em Engenharia Mecânica

Tese realizada 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 Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2012

Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutorado em Engenharia, área de concentração de processos de fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

- 1 – Prof. Dr. Eng. Oscar Balancin (Depto. de Engenharia de Materiais / UFSCar)
- 2 – Prof. Dr. Eng. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler (Depto. de Eng. Mecânica / Faculdade SATC)
- 3 – Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito (Depto de Metalurgia / UFRGS)

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

Dedico este trabalho a minha esposa
Gisele que sempre esteve ao meu lado
me incentivando e apoiando e a minha
filha Ana Clara por ser minha inspiração.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Gisele e a minha filha Ana Clara pela compreensão e paciência.

Ao meu irmão Mateus Milanez pela ajuda nos trabalhos de caracterização dos materiais empregados neste trabalho.

Ao colega e amigo Anderson Daleffe por me ajudar na confecção das matrizes de extrusão.

A SATC pelo apoio quanto a utilização dos equipamentos da instituição no desenvolvimento deste trabalho.

A UNESC, onde foram feitos parte dos experimentos.

Ao prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer pela orientação nos trabalhos, tanto de mestrado como de doutorado.

Ao Eng. Dr. Alberto Brito que me ajudou no desenvolvimento dos trabalhos de atrito.

Aos meus pais Aldo e Antonia por acreditarem no meu sonho desde os tempos da graduação na UFSC.

RESUMO

Esta tese apresenta o estudo sobre microconformação, no caso microextrusão de quatro materiais diferentes, um aço SAE 1020, um aço inoxidável AISI 304, um alumínio AA6531 e um latão ASTM C34000. Para avaliar o efeito do tamanho da peça sobre o processo de microextrusão, dois tamanhos de corpos de prova foram utilizados, um com $\varnothing$ 4 mm e outro com $\varnothing$ 1 mm. Para cada tamanho de corpo de prova, três ângulos de extrusão foram utilizados, 30°, 45° e 60°. A primeira parte do trabalho se resume a caracterização dos materiais, com análise química e metalográfica. Após a caracterização dos materiais, as curvas de escoamento através do ensaio de compressão utilizando dois tamanhos de corpos de prova foram feitos em todos os materiais. O atrito foi determinado utilizando o ensaio de anel de atrito com três tamanhos diferentes de corpos de prova. As curvas de calibração foram feitas utilizando o software SIMUFACT®. Os ensaios de extrusão foram feitos em uma máquina de ensaio universal com capacidade de captura de dados como força e deslocamento. Um modelo matemático foi utilizado para comparar a força de extrusão calculada com o medido no processo. Os resultados indicam que as curvas de escoamento de tamanho macro podem ser aplicadas a peças de tamanho meso. O atrito medido pelo ensaio de anel de atrito mostrou que os valores de atrito de tamanho micro tem um pequeno valor maior que para tamanho macro. Os valores de força de extrusão calculada e medido no ensaio para peças de tamanho meso tem boa aproximação com diferença de 3,2% para o aço inoxidável. Para peça de tamanho micro, a diferença entre o valor medido e o calculado aumenta chegando a diferença de 995% para o corpos de prova de aço comum.

Palavras chaves: Microconformação, microextrusão, curvas de escoamento, atrito, ensaio de anel de atrito, força de extrusão, aço SAE 1020, Aço inoxidável AISI 304, Alumínio AA6531, Latão C34000.

ABSTRACT

This thesis presents the study about microforming, in this case microextrusion of the four different materials, an SAE 1020 steel, an AISI 304 stainless steel, an AA6531 aluminum and a C34000 brass. To evaluate the size effect about microextrusion process, two sizes of specimens were used, with a $\varnothing$ 4 mm and another with $\varnothing$ 1 mm. For each size of specimen, three extrusion angles were used, 30 °, 45 ° and 60 °. The first part of the work was to materials characterizations with chemical and metallographic analysis. Following the materials characterization, the flow stress curves was made using the compression test with two sizes of specimens. The friction was determined using the friction ring test with the three different size. Calibration curves were performed using the software SIMUFACT ®. The extrusion tests were performed in a universal testing machine capable of capturing such as force and displacement data. A mathematical model was used to compare the extrusion force it was calculated and the force measured in microextrusion. The results indicate that the flow stress curves of macro size can be applied to meso sizes. The ring friction test indicate that the friction values of the micro size has a small value greater than macro size. The extrusion force calculated and measured in the test to meso size has good approximation with a difference of 3.2% in the stainless steel. To pieces of the micro size, the difference between the measured and calculated force increases 995% for the samples of SAE 1020 steel.

Keywords: Microforming, microextrusion, flow stress curves, friction, friction ring test, extrusion force, SAE 1020 steel, AISI 304 stainless steel, AA6531 aluminum, C34000 brass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caracterização do atrito por Extrusão em Duplo Copo.....	23
Figura 2 – Corpo de prova pequeno utilizado no ensaio de tração.....	24
Figura 3 – Microextrusão lateral.....	25
Figura 4 - Extrusão direta (a) e indireta (b).....	25
Figura 5 - Pino fabricado por microextrusão.....	26
Figura 6 - Processo de forjamento em três estágios.....	27
Figura 7 - Curva $\sigma \times \epsilon$ para o aço SAE 1020.....	28
Figura 8 - Curva de escoamento para o aço inoxidável AISI 304.....	29
Figura 9 - Rugosímetro digital e o resultado da medição.....	32
Figura 10 - Desenho de um modelo utilizado em teste de compressão.....	35
Figura 11 – Anéis comprimidos em teste de atrito: (a) anel padrão, (b) anel comprimido com baixo atrito ($m \approx 0,04$) e (c) anel comprimido com alto atrito ($m \approx 0,34$).....	36
Figura 12 – Influência do atrito sobre o teste do anel: (a) o filme de lubrificante não foi rompido com o ensaio e (b) o filme de lubrificante foi rompido durante o ensaio.....	36
Figura 13 - Efeito do lubrificante sobre os anéis de compressão: (a) baixo atrito e (b) alto atrito.....	37
Figura 14 - Resultado de um teste de anel de compressão para um aço SAE 1020.....	37
Figura 15 – Modelo para elementos finitos do teste do anel de compressão.....	38
Figura 16 – Deformação do anel de compressão feita por elementos finitos, variando o coeficiente de atrito.....	38
Figura 17 – Geometria para o teste do anel de compressão para modelo de calibração de curvas para baixas tensões normais aplicadas.....	39
Figura 18 – Perfil extrudado com os parâmetros das equações 08 e 09.....	41
Figura 19 – Microreator. (a) esquema de montagem e (b) microreator montado.....	45
Figura 20 - Célula de combustível cilíndrica.....	45
Figura 21 - Microcélula de combustível em formato tubular.....	46
Figura 22 – Micropeça extrudada para micro motores.....	46
Figura 23 - Micropinos para componentes de circuitos integrados.....	47
Figura 24 - Corpo de prova ensaio de compressão.....	53
Figura 25 - Medição dos corpos de prova.....	53

Figura 26 - Esquema de montagem para ensaio de compressão.....	54
Figura 27 - Máquina de ensaios universais.	54
Figura 28 – Anel de atrito de tamanho maior e intermediário.....	57
Figura 29 - Esquema da extrusão com pino, montagem antes da extrusão.	59
Figura 30 - Dimensões da ferramenta inferior para microextrusão.	59
Figura 31 - Dimensões de uma das ferramentas para mesoextrusão.	60
Figura 32 – Matriz de extrusão desmontada para a colocação do punção de extrusão.....	61
Figura 33 – Matriz montada para extrusão de corpo de prova de diâmetro 1 mm.	61
Figura 34 – Dispositivo montado na máquina de ensaio.....	62
Figura 35 - Pino extrudado visto no projetor de perfil.	63
Figura 36 - Detalhes dos corpos de prova ensaiados.	65
Figura 37 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira para os corpos de prova de $\varnothing$ 5 mm e $\varnothing$ 4 mm.	67
Figura 38 - Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira para os corpos de prova de $\varnothing$ 5 mm e $\varnothing$ 4 mm.	68
Figura 39 - Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira para os corpos de prova de $\varnothing$ 6 mm e $\varnothing$ 4 mm.	69
Figura 40 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira para os corpos de prova de $\varnothing$ 6 mm e $\varnothing$ 4 mm.	70
Figura 41 - Seção transversal do aço SAE 1020, ataque Nital 3%.	74
Figura 42 - Seção transversal do aço inoxidável AISI 304, ataque Villela.	75
Figura 43 - Seção transversal do Alumínio AA6531, ataque reagente de Keller.	76
Figura 44 - Seção transversal do Latão C34000, ataque Persulfato de Amônia.....	77
Figura 45 - Simulação do software Simufact para determinar as curvas de calibração.....	78
Figura 46 – Anéis de atrito após a compressão com régua milimetrada.	78
Figura 47 - Curvas de calibração aço SAE 1020.	79
Figura 48 – Curvas de calibração do aço 1020.....	80
Figura 49 – Curvas de calibração do aço SAE 1020.....	80
Figura 50 – Valores para o atrito para o aço SAE 1020.....	81
Figura 51 – Valores de atrito para o Alumínio AA6531, todos os anéis.	82
Figura 52 - Valores de atrito para o Latão C34000, todos os anéis.	83
Figura 53 - Valores de atrito para o aço inoxidável AISI 304, todos os anéis.	84
Figura 54 - Curva de força de extrusão para o aço SAE 1020 com $\varnothing$ 4 mm.	88

Figura 55 – Aço SAE 1020, ângulo de extrusão de 60°. Ataque Nital 2%.....	89
Figura 56 – Região analisada no ensaio de metalografia.	89
Figura 57 – Aço SAE 1020, ângulo de extrusão de 45°. Ataque Nital 2%.....	90
Figura 58 - Aço SAE 1020, ângulo de extrusão de 30°. Ataque Nital 2%.....	90
Figura 59 – Regiões de leitura da microdureza do aço SAE 1020, Ø 4 mm.	91
Figura 60 - Curva de força de extrusão para o aço SAE 1020 com diâmetro de 1 mm.....	92
Figura 61 – Aço SAE 1020, ângulo de extrusão de 30°. Ataque Nital 2%.....	93
Figura 62 – Região de análise metalográfica para os pinos extrudados de Ø 1 mm.	93
Figura 63 – Aço SAE 1020, ângulo de extrusão de 45°. Ataque Nital 2%.....	94
Figura 64 – Regiões de leitura da microdureza do aço SAE 1020, Ø 1 mm.	95
Figura 65 - Curva de força de extrusão para o aço AISI 304 com Ø 4 mm.....	96
Figura 66 - Curva de força de extrusão para o aço AISI 304 com Ø 1 mm.....	97
Figura 67 - Curva de força de extrusão para o alumínio com Ø 4 mm.	98
Figura 68 – Curva de força de extrusão para o alumínio com Ø 1 mm.....	98
Figura 69 - Curva de força de extrusão para o latão com Ø 4 mm.....	99
Figura 70 - Curva de força de extrusão para o latão com diâmetro de 1 mm.....	100
Figura 71 – Desenho do pino extrudado com as incógnitas das equações utilizadas nos cálculos.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do SAE 1020.....	48
Tabela 2 - Composição química do aço AISI 304.	49
Tabela 3 - Composição química do alumínio AA6531.....	49
Tabela 4 - Composição química do latão C34000.	50
Tabela 5 - Dimensões dos corpos de prova.	52
Tabela 6 – Número de corpos de prova utilizados nos ensaios para cada perfil e tamanho. ...	60
Tabela 7 - Valores de C e n para corpos de prova do aço SAE 1020.	71
Tabela 8 – Valores de C e n para corpos de prova do aço SAE AISI 304.	71
Tabela 9 - Valores de C e n para corpos de prova do Alumínio AA6531.....	72
Tabela 10 - Valores de C e n para corpos de prova do Latão C34000.....	72
Tabela 11 - Microdureza do aço SAE 1020, seção transversal.	85
Tabela 12 - Microdureza do aço AISI 304, seção transversal.	86
Tabela 13 - Microdureza do alumínio AA6531, seção transversal.....	86
Tabela 14 - Microdureza do latão C34000, seção transversal.	87
Tabela 15 – Valores de dureza Vickers para diferentes regiões do corpo de prova de Ø 4 mm.	91
Tabela 16 – Valores de dureza Vickers para diferentes regiões do corpo de prova de Ø 1 mm.	95
Tabela 17 – Valores para força calculada para o aço SAE 1020, Ø 4 mm de corpo de prova.	102
Tabela 18 – Valores para a força de extrusão calculada separadamente para o aço SAE 1020.	103
Tabela 19 – Valores para força calculada para o aço AISI, Ø 4 mm de corpo de prova.....	104
Tabela 20 – Valores para a força calculada para o aço AISI 304, Ø 1 mm de corpo de prova.	105
Tabela 21 – Valores para a força de extrusão calculada separadamente para o aço AISI 304.	105
Tabela 22 – Valores para a força de extrusão calculada separadamente para o aço AISI 304.	106
Tabela 23 – Valores para força calculada para o alumínio, Ø 4 mm de corpo de prova.....	106

Tabela 24 – Valores para a força calculada para o alumínio, Ø 1 mm de corpo de prova.	106
Tabela 25 – Valores para a força de extrusão calculada separadamente para o alumínio.	107
Tabela 26 – Valores para a força de extrusão calculada separadamente para o alumínio.	107
Tabela 27 – Valores para força calculada para o latão, Ø 4 mm de corpo de prova.	108
Tabela 28 – Valores para a força calculada para o latão, Ø 1 mm de corpo de prova.....	108
Tabela 29 – Valores para a força de extrusão calculada separadamente para o latão, Ø 4 mm.	109
Tabela 30 – Valores para a força de extrusão calculada separadamente para o latão, Ø 1 mm.	109
Tabela 31 – Comparativo entre coeficiente de encruamento e diferença de força calculada e medida para corpos de prova de Ø 4 mm.....	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al [%] = Alumínio;

Comp. [mm] = Comprimento do corpo de prova.

C [%] = Carbono;

Cr [%] = Cromo;

Cu [%] = Cobre;

Ceq [%] = Carbono equivalente;

Fe [%] = Ferro;

HV [V] = Dureza Vickers;

Mg [%] = Magnésio;

Mn [%] = Manganês;

Ni [%] = Níquel;

P [%] = Fosforo;

Pb [%] = Chumbo;

S [%] = Enxofre;

Si [%] = Silício;

Sn [%] = Estanho;

TXT [-] = Extensão de arquivo de informática em formato de texto;

Zn [%] = Zinco;

LISTA DE SIMBOLOS

A_0 [mm²] = Área inicial;

A_1 [mm²] = Área final.

A_{inst} [mm²] = Área instantânea do corpo de prova.

b_0 [mm] = Largura inicial;

b_1 [mm] = Largura final;

C [MPa] = Constante para $\phi = 1$;

D [mm] = Altura do anel de compressão.

d_0 [mm] = Diâmetro inicial do corpo de prova e da geratriz;

d_1 [mm] = Diâmetro final da peça extrudada;

F [N] = Força de extrusão;

h_0 [mm] = Altura inicial do corpo de prova;

h_f [mm] = Altura final do corpo de prova;

h_i [mm] = Altura extrudada punção fixo ensaio DCE;

h_k [mm] = Altura não extrusada;

H_o [mm] = Comprimento total extrudado ensaio DCE;

h_u [mm] = Altura extrudada punção fixo ensaio DCE;

k [MPa] = Limite de elasticidade em cisalhamento puro;

k_f [MPa] = Tensão de escoamento;

k_{f0} [MPa] = Tensão de escoamento inicial;

k_{f1} [MPa] = Tensão de escoamento final.

k_{fm} [MPa] = Tensão de escoamento média;

l_0 [mm] = Comprimento inicial;

m [-] = Fator de atrito;

n [-] = Coeficiente de encruamento do material.

p [MPa] = Pressão normal de contato;

P [N] = Força aplicada na compressão;

T [K] = Temperatura;

V_0 [mm³] = Volume inicial;

V_1 [mm³] = Volume final;

α [rad] = Ângulo da matriz de extrusão em radianos;

α' [°] = Ângulo da matriz de extrusão em graus;

ε_p [-] = Deformação plástica;

ε_e [-] = Deformação elástica;

ε_T [-] = Deformação total;

η_F [-] = Rendimento em relação a deformação;

ϕ [-] = Deformação verdadeira;

$\dot{\phi}$ [s⁻¹] = Velocidade de deformação;

ϕ_A [-] = Deformação verdadeira na área do material;

ϕ_b [-] = Deformação verdadeira na largura;

ϕ_h [-] = Deformação verdadeira na altura;

ϕ_l [-] = Deformação verdadeira em comprimento;

ϕ_p [-] = Deformação verdadeira no perímetro;

ϕ_r [-] = Deformação verdadeira no raio;

μ [-] = Coeficiente de atrito;

π [-] = Pi;

σ_0 [MPa] = Tensão no início da deformação;

τ [MPa] = Fração da tensão limite de escoamento no cisalhamento;

$\varnothing$ [mm] = Diâmetro;

$\varnothing A$ [mm] = Diâmetro externo do anel de compressão;

$\varnothing B$ [mm] = Diâmetro mínimo do entalhe do anel de compressão;

$\varnothing C$ [mm] = Diâmetro interno do anel de compressão;

SUMARIO

RESUMO.....	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XII
LISTA DE SIMBOLOS	XIII
1 INTRODUÇÃO	18
OBJETIVOS	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 ESTADO DA ARTE EM MICROCONFORMAÇÃO	21
2.1.1 Influência do Tamanho da Peça.....	21
2.1.1.1 Efeito Físico.....	21
2.1.1.2 Efeito Estrutural.....	22
2.1.2 Propriedades Mecânicas.....	24
2.1.3 Microconformação de Peças Maciças.....	24
2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS	27
2.2.1 Curva de engenharia	27
2.2.2 Curvas de Escoamento	29
2.3 COEFICIENTE DE ATRITO	31
2.3.1 Rugosidade Superficial	32
2.3.2 Modelos Matemáticos para Determinar o Atrito.....	33
2.3.3 Teste do Anel de Compressão	35
2.4 TRATAMENTO TÉRMICO	39
2.4.1 Recozimento Pleno	40
2.4.2 Solubilização	40
2.5 FORÇA DE EXTRUSÃO.....	41
2.6 ALGUMAS APLICAÇÃO DE MICROPEÇAS	44
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	48
3.1 ANÁLISE QUÍMICA DA MATÉRIA-PRIMA	48
3.1.1 Composição Química do Aço SAE 1020.....	48
3.1.2 Composição Química do Aço Inox AISI 304	49

3.1.3 Composição Química do Alumínio AA6531	49
3.1.4 Composição Química do Latão C34000	50
3.2 TRATAMENTO TÉRMICO	50
3.2.1 Recozimento Pleno	50
3.2.2 Solubilização	51
3.3 CURVAS DE ESCOAMENTO	52
3.3.1 Preparação dos Corpos de Prova	52
3.3.2 Ensaio de Compressão	53
3.4 ENSAIO METALOGRÁFICO	55
3.5 ENSAIO DE MICRODUREZA	56
3.6 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO	56
3.6.1 Curvas de Calibração	58
3.7 FERRAMENTAL E GEOMETRIAS UTILIZADAS NO PROCESSO DE MICRO/MESOEXTRUSÃO	58
3.8 CÁLCULO DA FORÇA DE EXTRUSÃO	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1 CURVAS DE ESCOAMENTO	65
4.1.1 Curva de Escoamento do Aço SAE 1020	66
4.1.2 Curva de Escoamento do Aço inoxidável AISI 304	67
4.1.3 Curvas de Escoamento para o Alumínio AA6531	68
4.1.4 Curvas de Escoamento para o Latão C34000	69
4.1.5 Análise e Comparativo entre os Resultados Obtidos	70
4.2 METALOGRAFIA DOS MATERIAIS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS	73
4.2.1 Metalografia do Aço SAE 1020	74
4.2.2 Metalografia do Aço Inoxidável AISI 304	74
4.2.3 Metalografia do Alumínio AA6531	75
4.2.4 Metalografia do Latão C34000	76
4.3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO	77
4.4 MICRODUREZA	85
4.5 MICROEXTRUSÃO	87
4.5.1 Aço SAE 1020	88
4.5.2 Aço AISI 304	96
4.5.3 Alumínio AA6531	97
4.5.4 Latão C34000	99

4.6 RESULTADO DAS EQUAÇÕES MATEMÁTICAS.....	101
4.6.1 Aço SAE 1020	101
4.6.2 Aço AISI 304.....	104
4.6.3 Alumínio AA 6531	106
4.6.4 Latão C34000	108
4.6.5 Análise Comparativa dos Resultados	110
5 CONCLUSÃO	112
TRABALHOS FUTUROS	114
REFERÊNCIAS.....	115
APÊNDICE A – Microdureza dos Materiais Utilizados nos Experimentos Antes dos Ensaios	121
ANEXO A – Curvas de Tensão por Deformação Utilizadas no Trabalho.....	123

1 INTRODUÇÃO

A microconformação é uma técnica de manufatura de peças de tamanho reduzido em particular para a produção em massa. Segundo o Geiger (2001) da Universidade de Erlangen – Nuremberg, “a microconformação é o trabalho de deformação realizado sobre uma peça que tenha estruturas (mínimo duas dimensões) menores que 1 mm” (Krishnan et al, 2005). Os gastos com micropeças no mundo todo tiveram um crescimento de vendas entre os anos de 1997 a 2004 da ordem de 43% (Vollerten et al, 2004), sendo que a demanda não está apenas na indústria eletrônica, mas também para aplicação em equipamentos médicos, sensores entre outros produtos (Watanabe et al, 2001) (Qu et al, 1997) (Sanchez et al, 2005).

O aumento da demanda para componentes eletrônicos para sistemas micro eletromecânicos (MEMS) para telefones celulares, tocadores de música do formato MP3, câmeras digitais, equipamentos médicos (chamado de tecnologia de microsistemas), faz com que ocorra também um aumento da pesquisa aplicada sobre os produtos e processos produtivos. A pesquisa aplicada sobre processos de fabricação macros não podem ser aplicados inteiramente sobre microprocessos devido a efeitos decorrentes do tamanho das peças (Fleischer et al, 2006), onde a diferença entre dimensões de peças de tamanho macro e micro, número de grãos presentes na matriz metalográfica influenciam no resultado final do processo de conformação.

A manufatura de micropeças está muito avançada na técnica de impressão litográfica, contudo este método encontra dificuldades na aplicação de produtos que requeiram trabalhos em três dimensões (Jeong; Hata, 2003) (Liang, 2006). Outras técnicas de fabricação como a microusinagem de peças encontram dificuldade na obtenção de equipamentos que necessitam de grandes rotações no eixo árvore da máquina, ficando entre 100.000 a 160.000 rpm (Schmidt; Tritschler, 2004) (Luo et al, 2005), sendo que, problemas com vibração da ferramenta podem destruir a geometria e a qualidade superficial da micropeça (Miao et al, 2007).

Com o objetivo de ampliar os estudos sobre a microconformação dos metais utilizando técnicas diferenciadas de fabricação, a microextrusão de peças foi escolhida como processo de fabricação a ser estudado nesta tese, aplicado meso e microextrusão sobre quatro diferentes tipos de materiais, sendo dois materiais ferrosos e dois não ferrosos para determinar o comportamento de cada material sobre os meso e micro processos de fabricação.

Estes materiais foram escolhidos por representar uma grande faixa de trabalho, como o alumínio AA6351 que é uma liga Al – Mg - Si aplicado em vários equipamentos devido a sua leveza e resistência, o aço inoxidável AISI 304 pela sua resistência a corrosão, o latão C34000 pela resistência ao desgaste e o aço SAE 1020 por ser um dos aços mais comuns encontrados no mercado.

Este trabalho será apresentado em capítulos, onde inicialmente foi dedicado ao estado da arte em microconformação, seus efeitos sobre o processo. Após a revisão bibliográfica, será apresentado o procedimento experimental e os resultados obtidos. No final será feito uma análise conclusiva do trabalho.

OBJETIVOS

Geral:

- ✓ Compreender o processo de conformação mecânica por microextrusão e os efeitos de variáveis como geometria de ferramenta, atrito entre peça e ferramenta, lubrificante sólido e força de extrusão.

Específicos:

- ✓ Comparar o processo de mesoextrusão com o processo de microextrusão, verificando a influência do tamanho da peça no processo de extrusão;
- ✓ Medir a força na microextrusão e na macroextrusão, comparando com modelos matemáticos teóricos, verificando desvios de resultado teórico e os encontrados nos experimentos;
- ✓ Verificar a influência dos lubrificantes sobre a microextrusão, comparando com modelos de tamanho meso e medindo o atrito entre peça e ferramenta utilizando o modelo de atrito de Amontons – Coulomb;
- ✓ Analisar os diferentes ângulos de extrusão no processo de meso/micro fabricação, analisando a deformação dos grãos no processo de extrusão;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão tratados todos os fenômenos físicos que influenciam na microconformação de peças, e as variáveis utilizadas no trabalho.

2.1 ESTADO DA ARTE EM MICROCONFORMAÇÃO

O estado da arte, ou estado do conhecimento visa apresentar o que está sendo discutido no meio acadêmico sobre o tema de microconformação. Este capítulo será dividido em sub-capítulo para facilitar a compreensão do tema e quais os fenômenos que influenciam o processo.

2.1.1 Influência do Tamanho da Peça

Na fabricação de micropeças metálicas ocorre a influência do tamanho da peça no processo produtivo, sendo que os parâmetros produtivos de um processo em escala macro simplesmente não podem ser aplicados em escala micro devido à diferenças como a quantidade de grãos na matriz metalográfica, tamanho da peça na conformação entre outros problemas. Os efeitos de tamanho da peça podem ser divididos em efeitos físicos e estruturais (Vollertsen et al, 2006).

2.1.1.1 Efeito Físico

Existem algumas forças que atuam no processo em pequenas superfícies, como:

- Forças de Van-der-Waals;
- Tensões superficiais;
- Gravidade.

As forças citadas são muito pequenas e são desconsideradas para processos convencionais de fabricação de peças com tamanho macro. Mas para micropeças, estas forças influenciam em alguns casos no processo produtivo, interferindo na fabricação das peças e na

qualidade final destas. Dependendo do tamanho da peça, existe uma maior ou menor influência destes parâmetros, sendo que em alguns casos, deve-se fazer uma boa caracterização destes fenômenos atuantes na conformação (Qin, 2006).

2.1.1.2 Efeito Estrutural

a) Efeito do tamanho de grão:

O tamanho do grão afeta a deformabilidade da peça, sendo que o tamanho dos grãos afeta mais o processo de fabricação micro do que macro (Engel; Eckstein, 2002). Para micro peças, o número grãos presentes na peça é pequeno, ao contrário do que acontece com peças de tamanho macro, onde existe uma quantidade considerável de grãos em uma peça.

A orientação dos grãos e sua posição influencia em muito as características do material (Geißdörfer et al, 2006), como por exemplo, a dureza do material em peças micro extrudadas. O trabalho realizado por Krishan (2005) da Universidade de Northwestern indica que ao ser extrudado micropinos com tamanhos de grãos grandes, a dureza na parte central do pino vai ser maior que em comparação com micropinos extrudados com tamanho de grão menor da matéria prima, contrariando *Hall – Petch*.

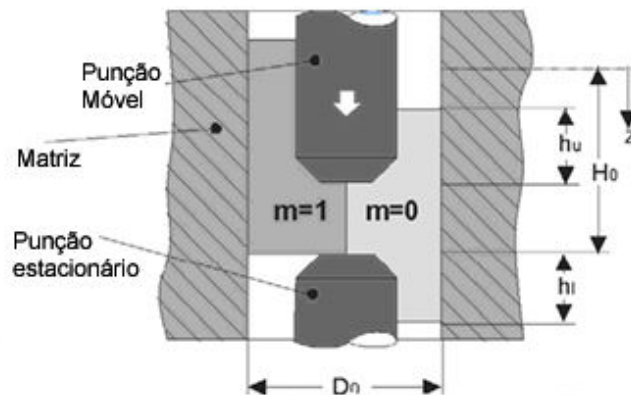
Esta variação do efeito de Hall – Petch foi encontrado por Parasiz (2011) que trabalhou a análise da microdureza na microextrusão com grão grosseiros e grãos finos e encontrou a mesma variação que Krishan (2005).

b) Efeito da microestrutura na superfície da peça:

A superfície da peça é resultado do histórico dos processos de fabricação ao qual esta peça foi trabalhada, como por exemplo, a rugosidade superficial da peça ser resultado do processo de usinagem.

A Figura 1 mostra um processo para determinar o atrito entre peça e ferramenta utilizando duplo copo para caracterização.

Figura 1 – Caracterização do atrito por Extrusão em Duplo Copo.



Fonte: Adaptado de Engel, 2006.

O processo de caracterização do atrito por DCE (Double Cup Extrusion = Extrusão por Duplo Copo) é um dos modelos para caracterizar o atrito entre peça e ferramenta. Neste método, uma barra redonda do mesmo material que se deseja conformar é colocada dentro de uma matriz com um furo de diâmetro ligeiramente maior que o diâmetro da barra redonda. Com a movimentação do punção móvel, a barra é forçada contra o punção fixo, deformando a barra por extrusão indireta.

A medida da diferença entre as cotas h_i e h_u após extrusão do material dentro da matriz indica o atrito entre a peça e a ferramenta, sendo que quanto mais próximo os valores das cotas h_u e h_i , menor o atrito. Este teste pode ser aplicado com a utilização de lubrificante adequado que melhor reduz o coeficiente de atrito (Wang et al, 2007).

A rugosidade superficial da peça influencia no atrito entre a peça e a ferramenta nos processos de estampagem, extrusão, entre outros processos (Jeon; Bramley, 2007). O tamanho de grão também afeta o atrito, no caso do processo de extrusão quando usado materiais com pequenos tamanhos de grãos, ocorre um aumento no atrito entre peça e a ferramenta (Watanabe et al, 2001). Isso ocorre devido a pouca formação de áreas confinadas no contato entre peça e ferramenta. Estes espaços confinados mantêm em seu interior o lubrificante, impedindo o contato entre os metais da ferramenta e da peça. Quanto maior a quantidade desses espaços, maior a eficiência do lubrificante. Peças de pequeno volume tendem a ter menos espaços fechados e mais abertos.

2.1.2 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas dos materiais utilizados em microconformação podem ser obtidas com ensaios de tração, compressão e dobramento. Estes ensaios podem ser realizados diminuindo as dimensões do corpo de prova. A Figura 2 mostra um corpo de prova utilizado no ensaio de tração com tamanho reduzido.

Figura 2 – Corpo de prova pequeno utilizado no ensaio de tração.



Fonte: Gau et al, 2007.

A Figura 2 mostra que as dimensões (em polegada) dos corpos de prova utilizados são reduzidas.

Com a diminuição do corpo de prova, aumenta o efeito do tamanho da peça sobre os resultados obtidos com o ensaio. Este efeito causa uma diminuição da tensão de escoamento do material analisado. Esta diminuição foi encontrada por Chan (2011) realizando ensaio de tração em corpos de prova de cobre puro com diferentes espessuras de chapa e tamanho de grão.

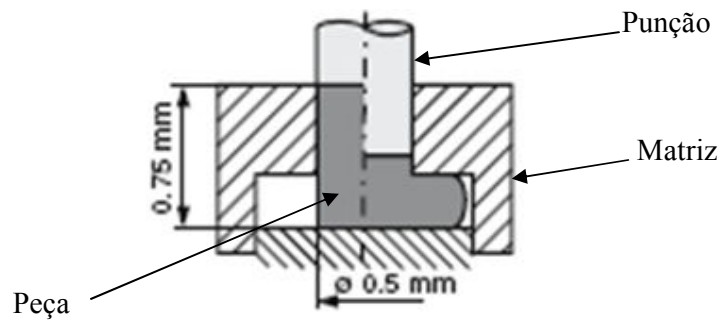
2.1.3 Microconformação de Peças Maciças

a) Microextrusão:

A microextrusão é um método para a obtenção de peças longas que possuem um aspecto de proporção de comprimento com forma complexa na seção transversal (Saotome; Iwazaki, 2000). O processo de microextrusão pode ser executado de formas variadas, como a

extrusão direta, indireta e lateral, dependendo do produto que se deseja. A Figura 3 mostra um processo de deformação para a lateral.

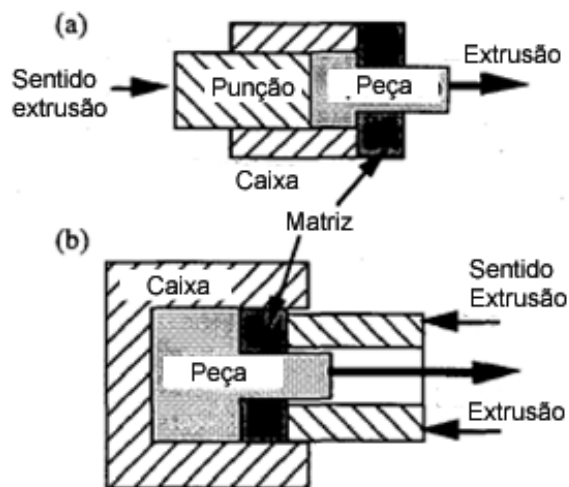
Figura 3 – Microextrusão lateral.



Fonte: Eichenhueller et al, 2007.

O formato do punção na Figura 3 está em escala cinza clara que conforma a peça em escala cinza escura para a abertura na matriz. O formato do punção força o material da peça a se deslocar para as laterais da matriz. A Figura 4 mostra o processo de extrusão direta e indireta.

Figura 4 - Extrusão direta (a) e indireta (b).



Fonte: Adaptado de Saotome; Inoue, 2000.

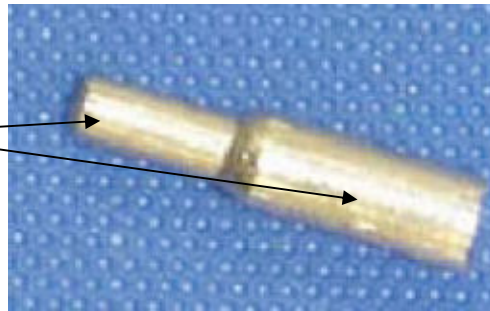
As setas na Figura 4 mostram o sentido de deslocamento do punção e o sentido de extrusão do material, sendo que para o processo de extrusão direta, o sentido do punção é o mesmo de extrusão e no indireto o sentido é oposto.

No processo de microextrusão, o atrito é um dos mais importantes fatores que influenciam no processo, sendo que a força necessária para vencer o atrito é maior no processo de microextrusão do que no processo macro (Cao et al, 2004).

A Figura 5 mostra um pino fabricado pelo processo de microextrusão onde é possível verificar marcas de usinagem no pino extrudado, que representam um grande atrito no processo de fabricação.

Figura 5 - Pino fabricado por microextrusão.

Riscos de
usinagem na
matriz.



Fonte: Cao et al, 2004.

O pino apresentado na Figura 5 tem no diâmetro extrudado de diâmetro 1 mm, partindo do diâmetro de 1,5 mm e ângulo de extrusão de 30°.

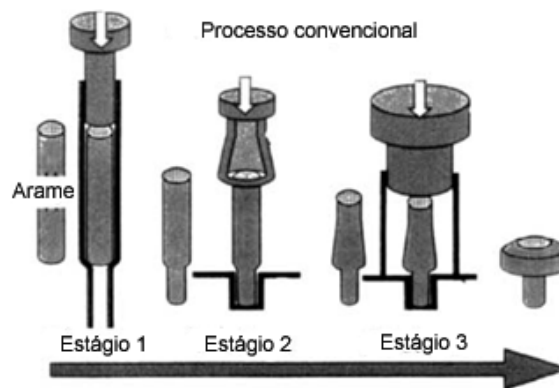
b) Micro forjamento:

O processo de micro forjamento possui muitas características peculiares encontrados no processo de microextrusão como o atrito entre peça e ferramenta, a influência do tamanho de grão no processo entre outros.

Mesmo não trabalhando com peças com dimensões menores ou iguais a 1 mm, como definido como micropeça, um processo de forjamento com peças em tamanho meso, mostra um forte indicativo dos problemas encontrados no processo de microconformação (Rosochowski et al, 2003).

A Figura 6 mostra o processo de forjamento por multi-estágio de um pino de relógio.

Figura 6 - Processo de forjamento em três estágios.



Fonte: Adaptado de Yoshida, 2003.

O arame que foi extrudado no 1º estágio do processo da Figura 6, ficou com 2 mm de diâmetro na ponta no final do estágio. O autor não informa o diâmetro inicial da matéria prima, mas para o autor do trabalho, uma peça que tenha um diâmetro de 2 mm é considerado micropeça.

2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

As propriedades mecânicas dos materiais influenciam no processo de conformação mecânica, na força aplicada pela máquina, limite de conformação do material e outras características. Neste capítulo será tratado as propriedades mecânicas dos materiais e métodos de medi-las.

2.2.1 Curva de engenharia

Determinar a resposta dos materiais durante o trabalho de conformação é importante tanto para engenheiros como para cientistas (Sheikh; Serajzadeh, 2008). Dentre todas as propriedades dos materiais, a curva de tensão por deformação do material é importante para determinar a resposta do material à deformação. Com a curva de tensão por deformação é possível avaliar a ductilidade e a tensão de escoamento do material, importantes informações

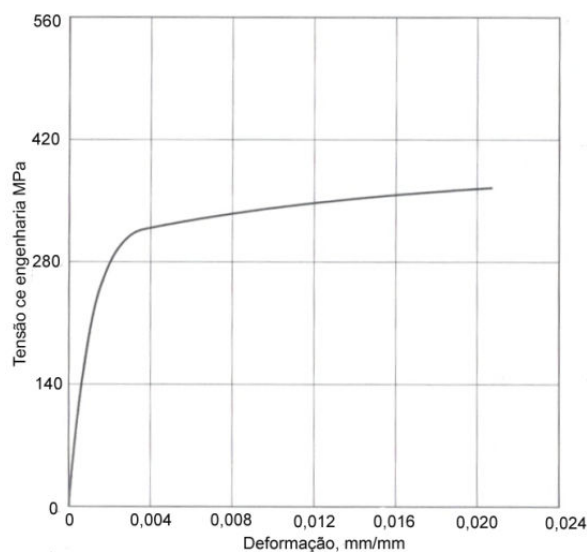
para a aplicação do material em elementos estruturais e no trabalho de conformação (He; Swain, 2007).

A velocidade com que ocorre o ensaio para determinação das curvas de deformação influencia na resposta do material, onde quanto maior a velocidade, maior o valor em tensão de engenharia do material (Sasso et al, 2007). A variação de temperatura do material fará com que a resistência do material a uma força de tração ou compressão altere, necessitando assim de controle rígido do processo de fabricação, para que não ocorram problemas nos processos de conformação mecânica (Wahabi et al, 2003) (Zhan et al, 2006).

As curvas de engenharia apresentam duas partes distintas, uma fase elástica do material e uma fase plástica do material. A lei de Hooke para cálculo de tensão é válida para a fase elástica, já na fase plástica o comportamento do material no gráfico de tensão de engenharia e deformação deixa de ser linear e passa para uma curva (Garcia, 1999). A curva de tensão de engenharia em relação a deformação relativa não pode ser aplicada diretamente sobre os processos de conformação por não dar indicação precisa sobre as características de deformação dos materiais. (Moosbrugger, 2002).

A Figura 7 mostra a curva de engenharia para um aço SAE 1020, em um ensaio de compressão. O aço SAE 102 foi um dos materiais analisados neste trabalho, as curvas de σ x ϵ dos outros materiais estão no Anexo A.

Figura 7 - Curva σ x ϵ para o aço SAE 1020.



Fonte: Adaptado de Moosbrugger, 2002.

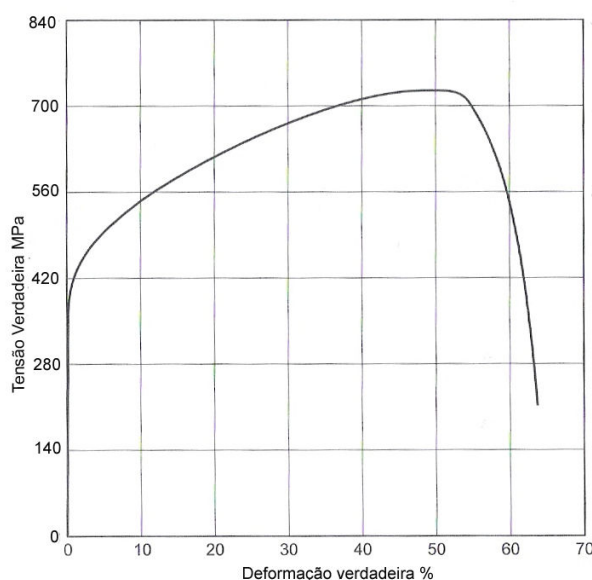
Para determinar as características de deformação dos materiais utilizados nas equações de força para extrusão, utiliza-se as curvas de escoamento dos materiais.

2.2.2 Curvas de Escoamento

Diferentemente do que acontece com a curva de tensão de engenharia onde a área é considerada constante, na curva de tensão verdadeira por deformação verdadeira é utilizada a área instantânea, no ensaio.

A Figura 8 mostra a curva de tensão verdadeira por deformação verdadeira do aço inoxidável AISI 304.

Figura 8 - Curva de escoamento para o aço inoxidável AISI 304



Fonte: Adaptado de Moosbrugger, 2002.

Na curva de tensão verdadeira por deformação verdadeira, desconsiderando a fase elástica e a estricção, onde o material começa a ruptura do material, tem-se a curva onde estão presentes valores para a tensão de escoamento (k_f) x ϕ .

A tensão de escoamento é influenciada pelo material utilizado, sua microestrutura, a temperatura do ensaio, a deformação verdadeira e a velocidade de deformação, ou seja:

$$k_f = f(\text{material, microestrutura, } T, \varphi, \dot{\varphi})$$

Cada material possui uma forma diferente de microestrutura, onde o tamanho de grão, orientação dos planos cristalinos, precipitados entre outros elementos influenciam nas características mecânicas dos materiais, como por exemplo, a ductilidade do material (Osman, 2004).

Com a confecção da curva tensão x deformação do material, é possível determinar uma equação para a curva tensão x deformação, através de modelos matemáticos, como o modelo de Ramberg e Osgood (Chen; Young, 2006). O modelo matemático de Ramberg e Osgood está representado pela equação 1 (Abdella, 2006).

$$\varepsilon_T = \varepsilon_p + \varepsilon_e \quad (01)$$

onde:

ε_T [%] = Deformação relativa total;

ε_p [%] = Deformação relativa plástica;

ε_e [%] = Deformação relativa elástica.

A equação de Ramberg e Osgood apresenta semelhante aproximação com os dados retirados nos experimentos na fase elástica do material, porém apresenta grande variação na fase plástica do material (muito importante para o processo de conformação) (Rasmussen, 2003).

Outros autores como Ludwik (Kim, 2007) modificaram as equações de Ramberg e Osgood para tentar uma melhor aproximação de resultados obtidos matematicamente a partir da equação Ramberg e Osgood e os valores obtidos experimentalmente, analisados na fase plástica.

Para a aplicação na fase uniforme da deformação plástica, pode ser utilizado também a equação de Hollomon, equação 2 que descreve a curva de deformação na fase plástica de muitos materiais metálicos com boa aproximação de valores entre o calculado e o medido experimentalmente (Moosbrugger, 2002).

$$k_f = C \times \varphi^n \quad (02)$$

Onde:

C [MPa] = Constante para $\varphi = 1$;

φ [-] = Deformação verdadeira do material;

k_f [MPa] = Tensão de escoamento;

n [-] = Coeficiente de encruamento do material.

A deformação verdadeira (φ) que é utilizada na equação 2 é calculada na equação 3.

$$\varphi = \ln \left(\frac{A_1}{A_0} \right) \quad (03)$$

Onde:

φ [-] = Deformação verdadeira.

A_1 [mm²] = Área instantânea do corpo de prova;

A_0 [mm²] = Área inicial do corpo de prova.

Para determinar os coeficientes C e n da equação 2, a fase elástica é descartada. Para efeito de cálculo somente são utilizados valores que representam valores de deformação verdadeira acima de 0,2 %. Com a parte plástica da curva de tensão deformação verdadeira do material, é feita a linearização da curva através da plotagem em escala log x log (Moosbrugger, 2002).

Os ensaios mais utilizados para a determinação da curva tensão deformação são os ensaios de tração e compressão, sendo que o resultado obtido com os ensaios são semelhantes entre si (Mccullonuhg et al, 1999). Sendo os resultados semelhantes, para a aplicação em trabalhos que envolvam conformação por compressão como a extrusão, o melhor método a se utilizar é o ensaio de compressão.

2.3 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 (Rudkins, 1996). A importância do atrito no processo de deformação pode ser enfatizado pela contribuição para o sucesso ou fracasso do processo em atingir seus objetivos.

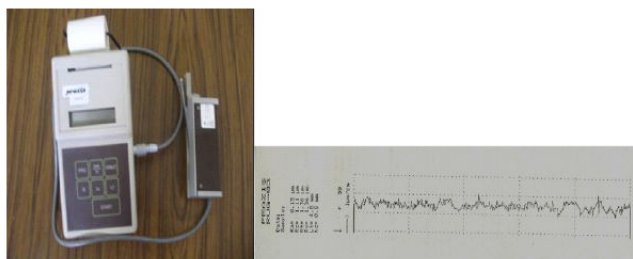
O atrito afeta a deformação dos materiais, qualidade superficial, a micro estrutura do material, entre outras características. Entender o fenômeno do atrito significa compreender o que ocorre entre a superfície da peça e a superfície da matriz de conformação entre diferentes condições do processo de conformação (Sofuoglu; Rasty, 1999). 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 (Petersen et al, 1998).

2.3.1 Rugosidade Superficial

Umas das premissas básicas do atrito é que superfícies aparentemente polidas apresentam imperfeições quando vistas na escala microscópica. Estas imperfeições são conhecidas como a rugosidade, que representa a aspereza da superfície do material. As matrizes, punções e ferramentas são caracterizadas pela rugosidade superficial que afetam o atrito entre ferramenta e peça, especialmente no começo do processo de conformação (Sahin et al, 2007).

A rugosidade é uma maneira de descrever a qualidade superficial das ferramentas de conformação, onde para obter o melhor resultado com as ferramentas e baixos custos é fundamental manter a qualidade da superfície das ferramentas sob controle. Para manter este controle, existem vários métodos para determinar a rugosidade superficial, como inspeções visuais com lupa até microscópio eletrônico de varredura. Entretanto na indústria, o método mais utilizado para medição da rugosidade é utilizando um equipamento eletrônico de varredura e traçado, chamado de rugosímetro. A Figura 9 mostra um rugosímetro digital.

Figura 9 - Rugosímetro digital e o resultado da medição.



Fonte: Sahin et al, 2007.

No início do processo de conformação, o atrito depende da rugosidade e dependendo da variação de rugosidade na ferramenta, esta pode alterar consideravelmente o atrito durante o processo de conformação.

2.3.2 Modelos Matemáticos para Determinar o Atrito

Em um processo de conformação mecânica, o atrito entre peça e ferramenta depende em muito da rugosidade superficial, mas outros fatores também influenciam no processo como a temperatura da peça, velocidade de deformação, pressão de contato, entre outros (Brito; Schaeffer, 2008).

Modelos matemáticos foram desenvolvidos para determinar o comportamento do atrito entre peças em movimento relativo entre si, como o modelo de Amontons – Coulomb que descreve o modelo de atrito para corpos rígidos (Linfa Peng et al, 2010). A equação 04 mostra o modelo de atrito de Amontons – Coulomb:

$$\tau = \mu \times p \quad (04)$$

Onde:

τ [MPa] = Tensão de cisalhamento;

P [MPa] = Tensão normal de contato entre as superfícies.

μ [-] = Coeficiente de atrito

Outro modelo de atrito trabalha com atrito interfacial, onde a tensão de cisalhamento é máxima na interface de contato entre o material e a ferramenta (Krishnan et al, 2005). Este modelo considera a tensão cisalhante de atrito com sendo uma fração da tensão limite de escoamento em cisalhamento, dado pela equação 05.

$$m = \frac{\tau}{k} \quad (05)$$

Onde:

τ [MPa] = Tensão de cisalhamento;

m [-] = Fator de atrito;

k [MPa] = Tensão limite de elasticidade em cisalhamento puro.

O valor de m varia entre $0 < m \leq 1$, sendo o valor máximo de atrito alcançado, a $\tau = k$. Assim aplicando o critério de Von Misses na equação 06, tem-se:

$$m = \frac{\tau \times \sqrt{3}}{\sigma_0} \quad (06)$$

Onde:

τ [MPa] = Tensão de cisalhamento;

m [-] = Fator de atrito;

σ_0 [MPa] = Tensão de escoamento inicial.

Assim tem-se uma relação entre os valores de μ e m agrupando as equações 04 e 06:

$$\mu = \frac{m \times \sigma_0}{\sqrt{3} \times p} \quad (07)$$

Onde:

τ [MPa] = Tensão de cisalhamento;

m [-] = Fator de atrito;

σ_0 [MPa] = Tensão de escoamento inicial.

μ [-] = Coeficiente de atrito

Através da modelagem numérica utilizando as equações de atrito, é possível determinar curvas de calibração, levando em consideração as curvas de escoamento do material e a geometria do anel de compressão.

Para este tipo de modelagem numérica existem dois eixos de simetria, um eixo que acompanha o sentido de compressão e um eixo que acompanha o plano perpendicular onde ocorre o contato entre placa de compressão e anel o corpo de prova.

Ajustando uma determinada velocidade de deformação, é possível fazer uma simulação da deformação do material, ajustando o programa para alguns coeficientes de atrito, começando com baixo atrito e elevando este a cada simulação.

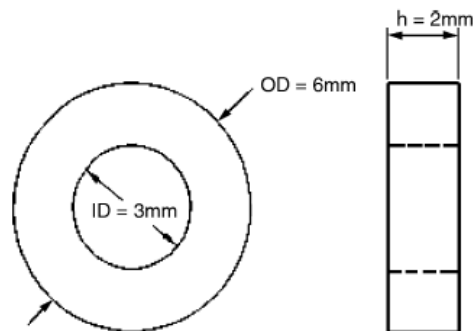
Cada uma das simulações irá gerar uma curva em um gráfico, esta curva é chamada então de curva de calibração e várias destas curvas representam as curvas de calibração.

2.3.3 Teste do Anel de Compressão

O teste do anel de compressão foi sugerido em primeiro plano há 50 anos por Kunogi e desenvolvido por Male e Cockcroft nos anos de 1960 começaram a utilizar o método para medir o atrito em um processo de forjamento (Anderson et al, 1996).

A Figura 10 mostra o desenho do anel de compressão utilizado em teste de atrito.

Figura 10 - Desenho de um modelo utilizado em teste de compressão.



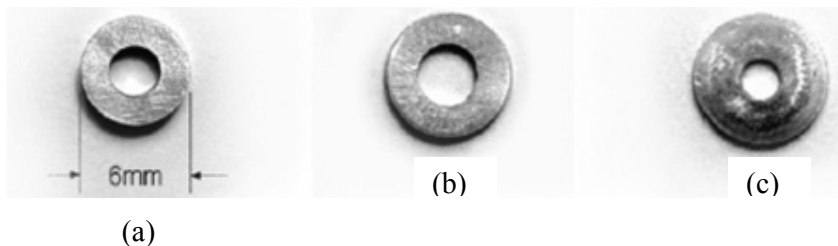
Fonte: Hartley et al, 2007.

O teste de anel de compressão consiste na utilização de um disco similar ao da Figura 10, com uma relação de tamanhos de 6:2:3, ou seja, se o diâmetro externo do anel for 24 mm, o diâmetro interno irá ser de 12 mm, a metade do diâmetro externo e altura do disco serão de um terço, 8 mm.

O anel é colocado entre duas placas de compressão e reduzido entre 20 % e 60% da altura inicial com velocidade constante (Dutton et al, 1999). Com a redução de altura, ocorre um aumento do diâmetro externo do disco. No caso seja influência do atrito entre placa e anel for igual a zero, ambos os diâmetros interno e externo aumentam radialmente com a mesma grandeza como se fosse um disco maciço.

Com o aumento do atrito, o aumento do diâmetro interno é menor, sendo que existe uma condição de atrito limite onde não ocorre aumento do diâmetro interno. Para atritos maiores, ocorre uma diminuição no diâmetro interno, como acontece no teste da Figura 11.

Figura 11 – Anéis comprimidos em teste de atrito: (a) anel padrão, (b) anel comprimido com baixo atrito ($\mu \approx 0,04$) e (c) anel comprimido com alto atrito ($\mu \approx 0,34$).

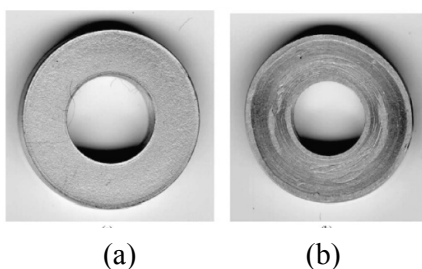


Fonte: Hartley et al, 1999.

As vantagens da utilização do teste do atrito com anel de compressão é que não é necessário saber a força necessária para comprimir o anel, e nem a tensão de escoamento do material, é utilizado somente a relação entre os diâmetros interno e externo.

Uma das grandes aplicações do teste do anel de compressão é analisar a influência do lubrificante sobre o material da peça a ser conformada, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Influência do atrito sobre o teste do anel: (a) o filme de lubrificante não foi rompido com o ensaio e (b) o filme de lubrificante foi rompido durante o ensaio.

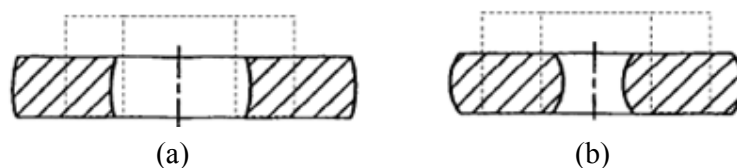


Fonte: Na et al, 2005.

A utilização de lubrificantes no teste de anel de compressão simula a utilização de lubrificante no processo de conformação que o material será submetido. A utilização de lubrificantes se torna imprescindível para alguns processos de conformação a frio como o embutimento, onde o atrito entre ferramenta e peça pode romper com a peça antes do termino do processo.

A Figura 13 mostra o efeito do lubrificante sobre um mesmo material comprimido.

Figura 13 - Efeito do lubrificante sobre os anéis de compressão: (a) baixo atrito e (b) alto atrito.



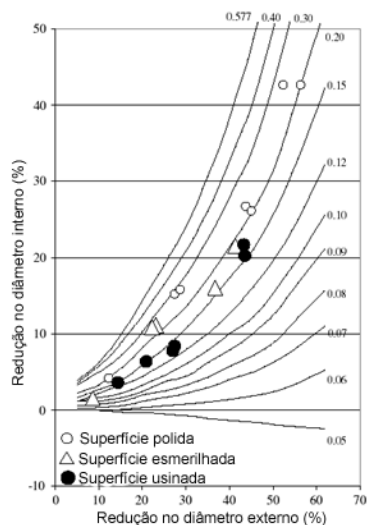
Fonte: Adaptado de Robinson; Armstrong, 2004.

Através da utilização de lubrificantes no teste de atrito, é possível determinar o efeito de cada tipo de lubrificante sobre o material conformado e determinar qual o tipo que mais reduz o atrito entre ferramenta e peça.

Com os valores de redução em percentual dos diâmetros internos e externos do anel, é possível determinar o coeficiente de atrito de cada material. Utilizando para este fim curvas de calibração construídas através da teoria de cálculo de atrito, como por exemplo modelo de atrito de Amontons – Coulomb, ou outra teoria que trata do atrito em superfícies em movimento.

A Figura 14 mostra uma curva de calibração para um aço SAE 1020, empregada no ensaio de anel de compressão.

Figura 14 - Resultado de um teste de anel de compressão para um aço SAE 1020.



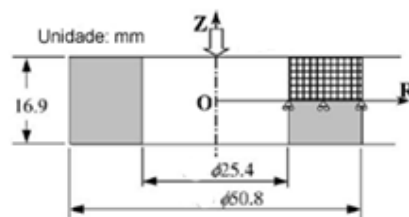
Fonte: Adaptado de Sahin et al, 2007.

As curvas no gráfico representam as curvas de calibração construídas utilizando

softwares de cálculos de elementos finitos, utilizando os modelos matemáticos de atrito.

Para a confecção das curvas de calibração, é necessária a obtenção das curvas de escoamento do material que irá ser ensaiado. As propriedades mecânicas dos materiais são informações inseridas no software que executa os elementos finitos, junto com a geometria do corpo de prova. A Figura 15 mostra uma modelagem para a aplicação em elementos finitos.

Figura 15 – Modelo para elementos finitos do teste do anel de compressão.

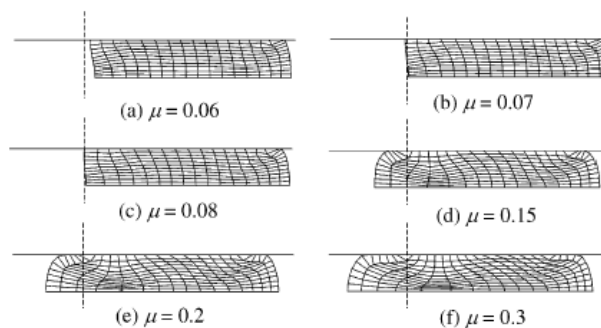


Fonte: Adaptado de Robinson; Armstrong, 2004.

Para este tipo de modelagem numérica da Figura 15, existem dois eixos de simetria, um eixo que acompanha o sentido de compressão indicado pela letra “Z” e um eixo que acompanha o plano perpendicular onde ocorre o contato entre placa de compressão e anel de compressão, indicado pela letra R.

Ajustando uma determinada velocidade de deformação, é possível fazer uma simulação da deformação do anel ajustando o programa para alguns coeficientes de atrito, começando com baixo atrito e elevando este a cada simulação. A Figura 16 mostra o efeito do atrito sobre o anel variando o atrito na simulação por elementos finitos.

Figura 16 – Deformação do anel de compressão feita por elementos finitos, variando o coeficiente de atrito.

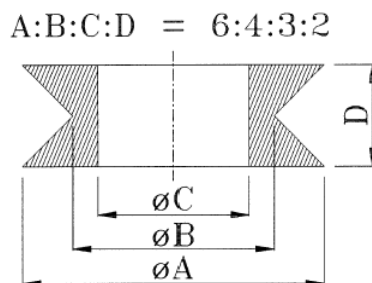


Fonte: Robinson; Armstrong, 2004.

Cada uma das simulações irá gerar uma curva em um gráfico, esta curva é chamada então de curva de calibração e várias destas curvas representam as curvas de calibração mostradas na Figura 14.

Para os ensaios de compressão em anel, a geometria do disco pode ser alterada dependendo das condições que se deseja simular, como por exemplo, para a simulação de uma extrusão direta com baixa deformação, é possível utilizar a geometria conforme a Figura 17.

Figura 17 – Geometria para o teste do anel de compressão para modelo de calibração de curvas para baixas tensões normais aplicadas.



Fonte: Petersen, 1998.

A alternativa de geometria tem o grande problema de perda da sensibilidade quando o processo é aplicado a baixos coeficientes de atrito entre placa e peça, restringindo a utilização deste modelo para alguns casos específicos.

2.4 TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico é utilizado nos materiais para alterar as características metalúrgicas destes, como a resistência a tração, dureza e alterar a deformabilidade dos materiais. Os processos de fabricação ao quais os materiais passam, alteram a sua microestrutura, deixando muitas vezes tensões residuais internas que afetam a resposta a estímulos externos. Para evitar que possíveis tensões internas, diferenças de tamanho de grão alterem os resultados do experimento, um tratamento térmico deve ser utilizado.

Para cada material existe um tratamento térmico que melhor se adapta, sendo assim alguns tratamentos para padronização dos materiais utilizados foram o recozimento a solubilização.

2.4.1 Recozimento Pleno

O recozimento de um material é a elevação deste acima da temperatura crítica, permanecendo nesta temperatura por um determinado período de tempo. Após o tempo de patamar elevado de temperatura, a peça é resfriada lentamente até a temperatura ambiente. Este resfriamento geralmente é feito dentro do próprio forno de tratamento térmico.

Este tipo de tratamento é utilizado para remoção de tensões internas devido a tratamentos mecânicos, diminuir a dureza, melhorar a usinabilidade, ajustar o tamanho de grão, produzir uma microestrutura definida entre outros (Bramfitt, 1991).

a) Recozimento do aço carbono:

Pelo percentual de carbono do aço SAE 1020, a temperatura de recozimento pleno varia entre 855 °C e 900 °C.

b) Recozimento do Alumínio:

Para o alumínio, a temperatura de recozimento fica em torno de 350 °C (Brooks, 1991).

c) Recozimento do Latão:

A temperatura de recozimento do latão C34000 utilizado neste trabalho oscila entre 425-650 °C (Cohen, 1991).

2.4.2 Solubilização

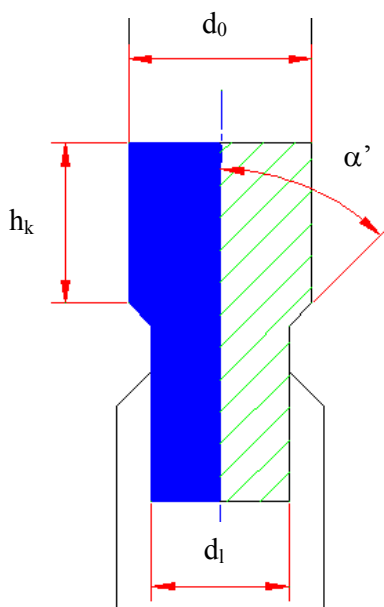
O tratamento térmico utilizado para os aços inoxidáveis é a solubilização, onde existe o aquecimento do material acima da temperatura crítica e depois um resfriamento rápido para evitar a sensibilização e manter em solução os elementos de liga.

A temperatura de solubilização para o aço inox AISI 304 fica em torno de 1100 °C. Para o resfriamento rápido, pode o material ser imerso em água ou salmoura.

2.5 FORÇA DE EXTRUSÃO

A força de extrusão é importante para determinar o tipo de equipamento necessário para executar o processo produtivo. Através do conhecimento da força de extrusão, é possível determinar o trabalho de deformação. Pode-se calcular a força de extrusão através de elementos finitos (Cerveira et al, 2004) ou através de equações empíricas (Tschätsch, 1990). As equações abaixo são definidas para extrusão direta do material. A Figura 18 mostra as incógnitas principais das equações abaixo relacionadas.

Figura 18 – Perfil extrudado com os parâmetros das equações 08 e 09.



Fonte: Arquivo pessoal.

As forças de extrusão direta e indireta são calculadas pela equação 08:

$$F = \frac{A_0 \times k_{fm} \times \varphi_A}{\eta_F} \quad (08)$$

Onde:

F [N] = Força de extrusão;

A_0 [mm²] = Área inicial da peça;
 K_{fm} [MPa] = Tensão de escoamento média;
 ϕ_A [-] = Deformação verdadeira na área do material;
 η_F [-] = Rendimento em relação a deformação.

Como a matriz apresenta ângulo de extrusão, a força de extrusão pode ser calculada pela seguinte equação:

$$F = A_0 \times k_{fm} \times \phi_A \times \left[1 + \frac{2 \times \mu}{\sin(2 \times \alpha')} + \frac{2}{3} \times \frac{\alpha}{\phi_A} \right] + \pi \times d_0 \times \mu \times k_{f0} \times h_k \quad (09)$$

Onde:

F [N] = Força de extrusão;
 A_0 [mm²] = Área inicial;
 k_{fm} [MPa] = Tensão de escoamento média;
 ϕ_A [-] = Deformação verdadeira em área;
 μ [-] = Coeficiente de atrito;
 α [rad] = Ângulo de extrusão em radianos;
 α' [°] = Ângulo de extrusão em graus;
 d_0 [mm] = Diâmetro da geratriz;
 k_{f0} [MPa] = Tensão de escoamento inicial;
 h_k [mm] = Altura não extrudada.

A deformação verdadeira do material no processo de extrusão pode ser calculada com a ajuda da lei de Constância de volume, equação 10.

$$V_0 = V_1 \quad (10)$$

Onde:

V_0 [mm³] = Volume inicial;
 V_1 [mm³] = Volume final.

Desenvolvendo a equação 10.

$$h_0 \times l_0 \times b_0 = h_1 \times l_1 \times b_1$$

$$\ln(h_0 \times l_0 \times b_0) = \ln(h_1 \times l_1 \times b_1)$$

$$\ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) + \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) + \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) = 0$$

$$\varphi_h + \varphi_l + \varphi_b = 0$$

Onde:

b_0 [mm] = Largura inicial;

l_0 [mm] = Comprimento inicial;

h_0 [mm] = Altura inicial;

b_1 [mm] = Largura final;

l_1 [mm] = Comprimento final;

h_1 [mm] = Altura final;

O processo de extrusão utilizado neste trabalho apresenta simetria axial na peça extrudada, então a lei da constância de volume pode ser descrita como:

$$\varphi_r + \varphi_p + \varphi_h = 0 \quad (11)$$

Onde:

φ_r [-] = Deformação verdadeira em raio;

φ_p [-] = Deformação verdadeira em perímetro;

φ_h [-] = Deformação verdadeira em altura;

O desenvolvimento da equação 10, mostra que a medida que se deforma o material em relação ao raio e no perímetro de um material, ocorre na mesma medida um aumento no comprimento do material, mantendo o volume de material constante. Desenvolvendo a equação 11 para deformação verdadeira em área, tem-se a equação 12.

$$\varphi_A = \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right) \quad (12)$$

Onde:

φ_A [-] = Deformação verdadeira em relação a área;

A_0 [mm²] = Área inicial do material;

A_1 [mm²] = Área final do material.

O ângulo de extrusão em unidade de graus não pode ser utilizado diretamente na equação 09, sendo convertido para radianos.

$$\alpha = \frac{\alpha' \times \pi}{180} \quad (13)$$

Onde:

α [rad] = Ângulo de extrusão em radianos;

α' [°] = Ângulo de extrusão em graus.

A tensão de escoamento média (k_{fm}) é calculada através da equação 14, sendo a média entre o valor da tensão de escoamento do material e a tensão de escoamento quando se aplica uma deformação verdadeira. O valor da tensão k_{f1} é retirado da equação da curva de escoamento quando se tem a deformação verdadeira em área que será feita sobre o material.

$$k_{fm} = \frac{k_{f0} + k_{f1}}{2} \quad (14)$$

Onde:

k_{fm} [MPa] = Tensão de escoamento média;

k_{f0} [MPa] = Tensão de escoamento inicial;

k_{f1} [MPa] = Tensão de escoamento na deformação verdadeira aplicada no material deformado.

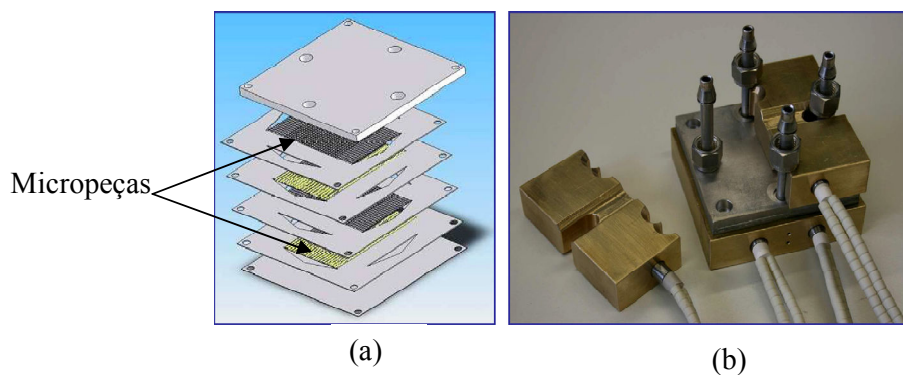
2.6 ALGUMAS APLICAÇÃO DE MICROPEÇAS

As micropeças são aplicadas em equipamentos médicos, dentários, químicos, eletrônicos entre outros.

Com o desenvolvimento de novos processos de microfabricação, aplicados na engenharia química, novos processos de transferência de calor e massa foram desenvolvidos (Vort, 2009). A tecnologia de microreação oferece um aumento da eficiência da reação

química em relação a processos com reatores químicos convencionais (Schwarz et al, 2009). A Figura 19 mostra um formato de microreator.

Figura 19 – Microreator. (a) esquema de montagem e (b) microreator montado.

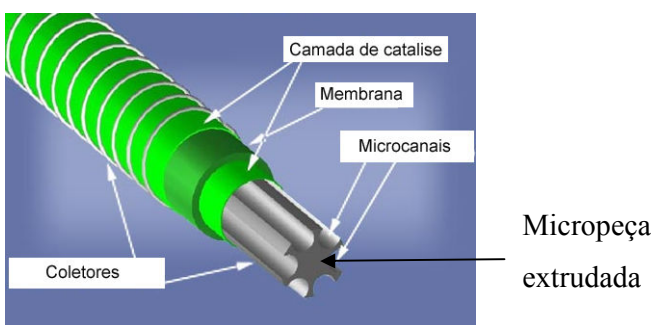


Fonte: Schwarz et al, 2009.

O princípio de funcionamento para a célula de combustível convencional para uma do tamanho micro é o mesmo, mas a eficiência do processo muda, com as células de tamanho menores mais eficientes.

Para a fabricação das placas para as microcélulas combustíveis, a microprensagem pode ser uma das soluções de manufatura. Para melhorar a eficiência do processo e diminuir o tamanho total da microcélula, o formato dos canais é alterado para melhorar o processo de geração elétrica. A Figura 20 mostra uma célula combustível de formato cilíndrico.

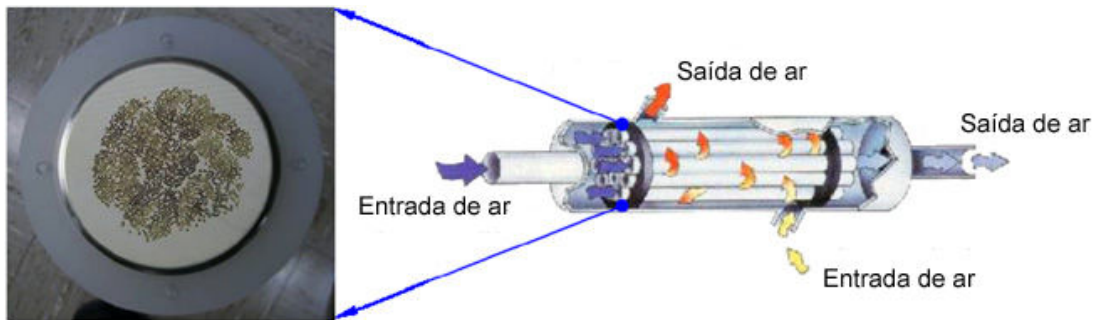
Figura 20 - Célula de combustível cilíndrica.



Fonte: Adaptado de Microcell, 2009.

A peça central que a empresa Microcell projetou é feita por microextrusão de uma fibra flexível que permite moldar a célula conforme necessário. A Figura 21 mostra outro formato de micro célula de combustível em formato de tubo.

Figura 21 - Microcélula de combustível em formato tubular.



Fonte: Adaptado de Parka et al, 2008.

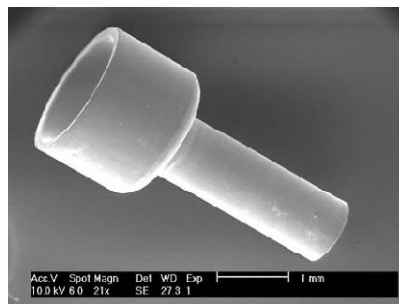
A fabricação dos microcomponentes das microcélulas de combustível, principalmente dos dutos onde passam os gases é a grande dificuldade do processo de manufatura dessas microcélulas de combustível e de outros equipamentos miniaturizados.

A miniaturização de componentes também aumentou a eficiência na geração de energia elétrica por micro turbinas com eficiência de 85 % - 90 % (Sanaye; Ardali, 2009). Essas microturbinas possuem um rendimento maior que os equipamentos convencionais pelo motivo de que componentes menores aumentam a eficiência da troca térmica e reduzem a emissão de gases poluentes (Zhenyu; Huier, 2008).

A geração de energia elétrica por reação química ou térmica por microcomponentes possui uma eficiência maior, mas os desafios de fabricação aumentam também. Por isso a importância do estudo e desenvolvimentos de novos processos de fabricação que permitam a diminuição de custos de produção para tornar os equipamentos viáveis economicamente.

Além da geração de energia, as micropeças extrudadas podem ser utilizadas em vários componentes, como peças para micromotores, mostrado na Figura 22.

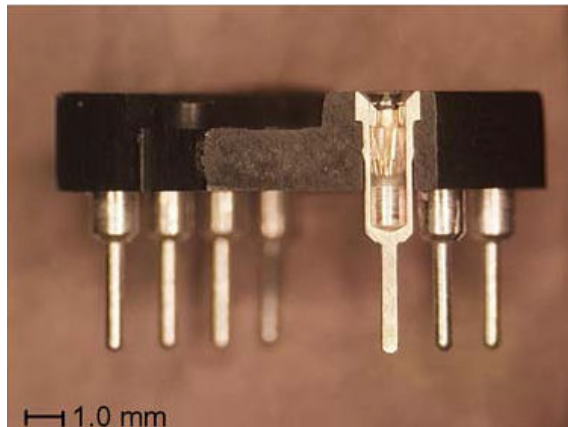
Figura 22 – Micropeça extrudada para micro motores.



Fonte: Geiger et al, 2001.

Além de micromotores, peças para circuitos integrados podem ser feitos pelo processo de microextrusão. A Figura 23 mostra micropinos de latão para componentes de circuitos integrados.

Figura 23 - Micropinos para componentes de circuitos integrados.



Fonte: Geiger et al, 2001.

O maior desafio para fabricar pinos para circuitos integrados por extrusão direta e indireta ao mesmo tempo, está no alinhamento do punção com a matriz, segundo Geiger (2001).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo será tratado os procedimentos experimentais utilizados neste trabalho, com os parâmetros utilizados, equipamentos utilizados nos ensaios e meios de análise dos resultados.

3.1 ANÁLISE QUÍMICA DA MATÉRIA-PRIMA

As análises químicas foram realizadas em duas empresas da região de Criciúma. Os materiais ferrosos foram analisados na empresa Siderúrgica Spillere Ltda, em um equipamento da Marca Spectro para materiais ferrosos. Os resultados apresentados a seguir representam a média de dois ensaios realizados na matéria prima.

A análise dos materiais não ferrosos foi feita na empresa Fundicril Fundição Criciúma Ltda, em um equipamento da Marca Spectro® para materiais ferrosos e não ferrosos. Os resultados apresentados a seguir representam a média de dois ensaios realizados na matéria prima.

3.1.1 Composição Química do Aço SAE 1020

O aço SAE 1020 foi analisado em um equipamento da marca Spectro®, na empresa Siderúrgica Spillere Ltda.

O resultado da composição química do SAE 1020 está disposto na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do SAE 1020.

Fe %	C %	Ceq %	Si %	Mn %	P %	S %
98,7	0,139	0,272	0,151	0,59	0,016	0,023

Fonte: Dados da pesquisa.

O carbono equivalente fornece um valor numérico da contribuição da composição química para a suscetibilidade de se formar trincas por hidrogênio no aço. Esse valor foi

determinado pelo próprio analisador.

Comparando os resultados da análise com a norma SAE J 403, o material acima descrito é um aço SAE 1020. Os demais elementos lidos pelo analisador tiveram concentração baixa, e são elementos residuais.

3.1.2 Composição Química do Aço Inox AISI 304

O aço inoxidável foi analisado em um analisador químico da marca Spectro[®], analisado na empresa Siderúrgica Spillere Ltda.

O resultado da composição química do inoxidável AISI 304 está disposto na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do aço AISI 304.

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Al %	Cu %	Fe %
0,056	0,415	1,76	0,029	0,045	18,15	7,74	0,142	0,218	71,2

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados indicam que o material analisado é um aço AISI 304, com relação $Cr_{eq}/Ni_{eq} = 1,83$.

3.1.3 Composição Química do Alumínio AA6531

O alumínio foi analisado em um equipamento de análise química da marca Spectro[®], analisado na empresa Fundicril Fundição Criciúma Ltda.

O resultado da composição química do alumínio AA6531 está disposto na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do alumínio AA6531.

Al %	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Cr %
97,41	0,9235	0,1853	0,0717	0,4876	0,7401	0,0	0,01

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados indicam que o material analisado é um alumínio AA6531, sendo que o equipamento detectou baixa concentração dos elementos ferro e cobre. Os demais elementos residuais apresentam baixa concentração.

3.1.4 Composição Química do Latão C34000

O latão foi analisado em um equipamento para análise química, da marca Spectro[®], analisado na empresa Fundicril Fundição Criciúma Ltda.

O resultado da composição química do latão C34000 está disposto na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição química do latão C34000.

Cu %	Sn %	Zn %	Pb %	Fe %	Ni %	Al %	Si %	P %
64,98	1,277	31,12	1,096	0,3842	0,0702	0,0332	0,004	0,001

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados indicam que o material analisado é um latão amarelo C34000 com média concentração de chumbo na composição química.

3.2 TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico foi realizado para que a matéria prima utilizada neste trabalho não estivesse no estado encruado. Como cada material tem seu próprio procedimento para normalização, este sub-capítulo está dividido para cada tipo de tratamento térmico utilizado.

3.2.1 Recozimento Pleno

Os três materiais, o Alumínio AA6531, o aço SAE 1020 e o Latão C34000 sofreram tratamento térmico de recozimento pleno a fim aliviar possíveis tensões internas e procurar uma homogeneização da microestrutura.

O forno utilizado é um forno da Marca Jung, modelo 2513, com capacidade de 220 kg de material.

a) Aço SAE 1020:

Foram cortadas quatro peças de $\varnothing$ 6,35 mm X 200 mm e colocadas dentro de um forno de tratamento térmico da marca Jung, sendo a taxa de aquecimento de 10 °C / minuto até uma temperatura de 880 °C. Depois o material ficou neste patamar de temperatura por um tempo de 3 horas e 20 minutos e ficou resfriando dentro do forno até uma temperatura de 30 °C.

b) Alumínio AA6531:

Foram cortadas quatro peças de $\varnothing$ 12,7 mm X 200 mm e colocadas dentro de um forno de tratamento térmico da marca Jung, sendo a taxa de aquecimento de 10 °C/minuto até uma temperatura de 350 °C. O material permaneceu dentro do forno de tratamento térmico por um tempo de 3 horas e 20 minutos e ficou resfriando dentro do forno até uma temperatura de 32 °C.

c) Latão C34000:

Foram cortadas três peças de $\varnothing$ 7,94 mm X 200 mm e colocados dentro do forno de tratamento térmico, com taxa de aquecimento de 10 °C/minuto até uma temperatura de 600 °C. O tempo de permanência no patamar de temperatura de recozimento foi de 3 horas e 20 minutos, sendo que o material resfriou dentro do forno até a temperatura de 25 °C.

3.2.2 Solubilização

Para o aço inoxidável AISI 304, foi feito o processo de solubilização. Foram cortadas quatro peças de $\varnothing$ 7,94 mm X 200 mm e colocados dentro do forno de tratamento térmico, com taxa de aquecimento de 10 °C/minuto até uma temperatura de 1100 °C. O tempo de permanência neste patamar de temperatura foi de 3 horas e 20 minutos. Logo após, o material foi retirado do forno e resfriado em uma cuba contendo água a temperatura ambiente.

3.3 CURVAS DE ESCOAMENTO

Este sub-capítulo trata da confecção dos corpos de prova para os ensaios de compressão para determinar as curvas de escoamento, utilizados neste trabalho.

3.3.1 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram usinados em um torno da Marca Nardini, modelo Mascote. A Tabela 5 mostra as medidas usinadas dos corpos de prova.

Tabela 5 - Dimensões dos corpos de prova.

Material	$\varnothing_1$ (mm)	Comp.1 (mm)	Quantidade	$\varnothing_2$ (mm)	Comp.2 (mm)	Quantidade
Aço SAE 1020	5	8	5	4	6	5
Alumínio AA 6531	6	9	5	4	6	5
Latão C34000	6	9	5	4	6	5
Aço AISI 304	5	8	5	4	6	5

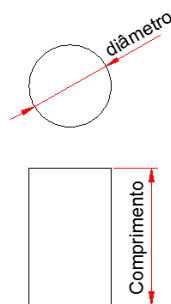
Fonte: Dados da pesquisa.

A quantidade de corpos de prova usinados foram de doze corpos de prova para cada tipo de material, cinco de cada modelo de “comprimento 1”, cinco com “comprimento 2” e dois com dimensões diâmetro 5 mm X 8 mm para análise metalográfica.

Nos corpos de prova de “comprimento 1” foi aproveitado o máximo de material possível que as barras redondas de matéria prima permitiam, com diâmetros de 6 mm. Com os aços, as barras de matéria prima utilizada eram de diâmetro menor, os corpos de prova ficaram com 1 mm de diâmetro a menos.

Para o “comprimento 2”, os diâmetros usinados eram os mesmos. A figura 24 mostra o perfil do corpo de prova utilizado.

Figura 24 - Corpo de prova ensaio de compressão.



Fonte: Arquivo pessoal.

As cotas de diâmetro e comprimento do corpo de prova utilizado estão descritos na tabela 5.

Para garantir um paralelismo entre faces dos corpos de prova, estes foram retificados em uma retífica de mesa, utilizando uma peça que garantia a fixação dos corpos de prova na mesa magnética da retifica.

3.3.2 Ensaio de Compressão

Para determinar as curvas de escoamento, foi utilizado ensaio de compressão, em uma máquina de ensaios universais da Marca EMIC modelo DL10000.

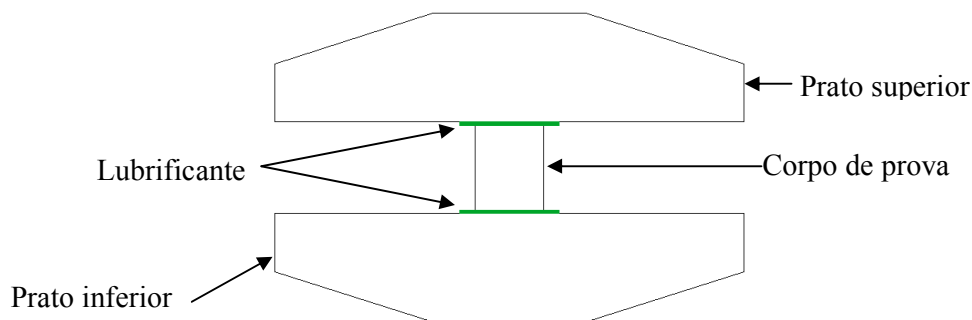
Os corpos de prova tiveram as dimensões verificadas com o auxílio de um micrômetro milesimal, como mostra a Figura 25.



Fonte: Arquivo pessoal.

A montagem dos corpos de prova no equipamento junto com o lubrificante será apresentada em formato de esquema na figura 26, abaixo.

Figura 26 - Esquema de montagem para ensaio de compressão.



Fonte: Arquivo Pessoal.

Como lubrificante entre placa e corpo de prova foi utilizado fita de Teflon[®]. A célula de carga utilizada tem capacidade de força de 100 kN e o extensômetro utilizado para medir o deslocamento das placas tem capacidade de 50 mm a 100 mm, sendo que este extensômetro funciona originalmente para ensaios de tração e para estes experimentos, foi adaptado para trabalhar em compressão..

A Figura 27 mostra a máquina de ensaios universais utilizada nos ensaios de compressão.

Figura 27 - Máquina de ensaios universais.



Fonte: Arquivo pessoal.

A velocidade de compressão do equipamento foi programada em 5 mm/minuto e a deformação aplicada nos corpos de prova girou em torno de 0,8 de deformação real no comprimento para os corpos de prova de diâmetro maior e 0,7 de deformação real no comprimento para os corpos de prova de diâmetro menores.

Os dados retirados do equipamento foram força e deslocamento da placa, que foram analisados no software Excel[®] da Microsoft, gerando as curvas de escoamento dos materiais analisados e as equações da curva, fazendo um ajuste linear dos pontos capturados no ensaio. A linearização foi feita utilizando escala log x log, ou seja, o logaritmo de base 10 da tensão verdadeira pelo logaritmo de base 10 da deformação absoluta. Este processo transforma uma curva em uma reta, podendo aplicar os recursos do software Excel[®], inserindo uma linha de tendência e obtendo a equação de reta e o valor de R^2 .

O R^2 é o coeficiente de determinação, mede a correlação entre os valores medidos e os estimados. Quanto mais próximo de 1, melhor é a equação estimada.

3.4 ENSAIO METALOGRAFICO

Os materiais foram analisados depois de tratados termicamente, para medir o tamanho de grão e depois de extrudados, para verificar o efeito do ângulo de extrusão sobre o material e analisar a deformação ocorrida no processo.

Para a realização das análises metalográficas, os corpos de prova foram embutidos em resina poliéster, com tempo de secagem de 24 horas.

As amostras embutidas em resina poliéster foram usinadas no torno convencional para retirar os cantos vivos e formar uma boa superfície para manusear. Após as peças passaram pelo processo de lixamento e polimento em uma máquina desta finalidade da marca Fortel, modelo PLF, com lixas de grana 80, 140, 340, 600, 1200, 2000, 2500 e 3000 mesh da marca 3M. A cada troca de lixa, a peça foi rotacionada em 90°, usando-se como lubrificante água.

O polimento foi feito em pano da marca Arotec, com paste de diamante de 1 μm . O lubrificante utilizado foi álcool etílico 95°.

O ataque químico foi feito com reagente apropriado para cada material, sendo:

- a) Aço SAE 1020: Solução de Nital 3%;
- b) Aço Inoxidável AISI 304: Solução de Villela;

- c) Latão C34000: Solução de Persulfato de Amônia;
- d) Alumínio AA6531: solução de Keller e ácido fluorídrico + nítrico.

Após o ataque os materiais foram analisados em um microscópio da Marca Leica, com ampliação de 200 X. As imagens foram capturadas utilizando uma câmera digital da Marca Canon, Modelo S50 acoplada ao microscópio.

3.5 ENSAIO DE MICRODUREZA

O ensaio de microdureza foi realizado nas amostras embutidas que não sofreram deformação após foram analisados os materiais deformados no sentido longitudinal a extrusão, medindo o aumento da dureza com a deformação e a variação da dureza com a variação do ângulo de deformação.

O método de ensaio utilizado foi dureza Vickers, onde o equipamento apresentava os resultado do ensaio em uma tela, convertendo automaticamente escala Vickers em Rockwell C. O equipamento utilizado é da marca Future-tech, modelo FM – 700.

Dependendo do material ensaiado, a carga aplicada variou para um melhor formato da pirâmide indentada. O tempo de ensaio programado no equipamento foi de 15 segundos por ensaio.

Para o aço SAE 1020, foram utilizados cargas de 10 N, 5 N e 2 N. Para o alumínio AA6531 foram utilizados cargas de 2 N, 1 N, 0,5 N e a menor carga de 0,25 N. Para o aço inoxidável AISI 304, as cargas foram 10 N, 5 N, 3 N, 2 N. O último material ensaiado foi o latão C34000, com cargas de 5 N, 3 N, 2 N e 1 N.

Os valores de microdureza encontrados nos materiais analisados estão no Apêndice A.

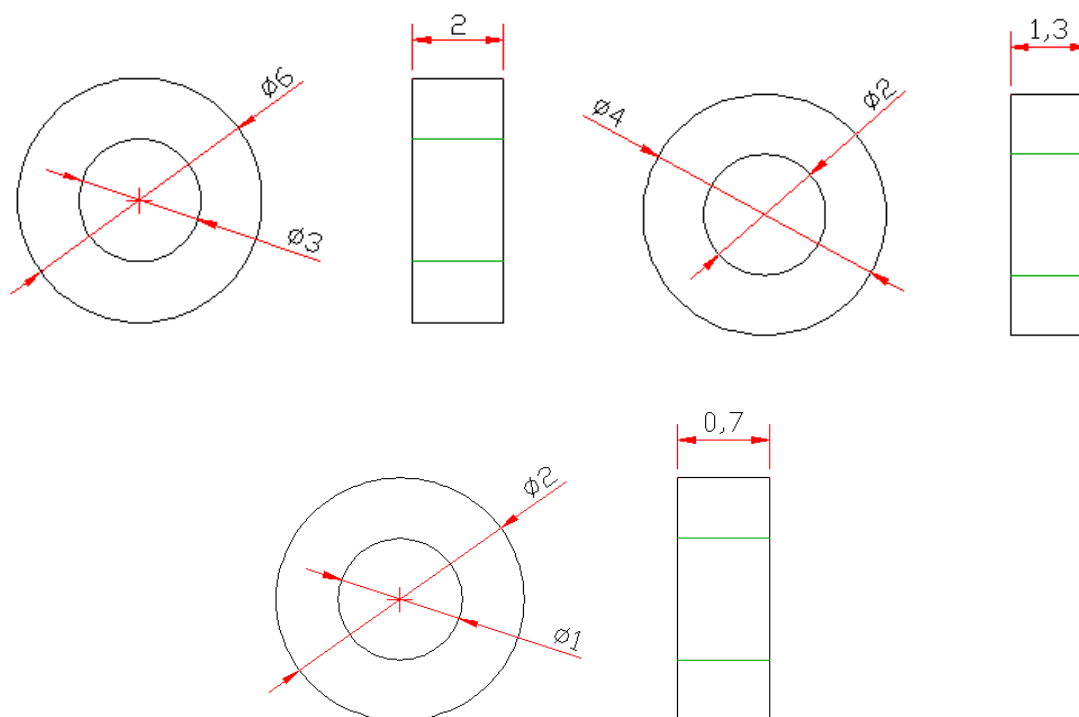
3.6 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO

Para determinar o atrito entre matriz de microextrusão e peça, foi realizado o ensaio de anel de compressão. O ensaio de anel de compressão foi realizado nos quatro materiais analisados neste trabalho, sendo que para a realização do ensaio de anel, para cada material, foram usinados anéis de diferentes tamanhos para medir a influência da redução de tamanho.

As peças foram usinadas utilizando um torno mecânico da Marca Nardini, modelo Mascote. Uma ferramenta intercambiável foi utilizada para a usinagem com refrigeração manual com fluido de corte indicado para todos os metais. Para a furação dos anéis, foram utilizados brocas de aço rápido para os diâmetros maiores e uma broca de centrar com diâmetro 1 mm e comprimento de corte 3 mm. O corte dos discos foi realizado com um sangrador feito de metal duro afiada conforme a necessidade.

A Figura 28 mostra o desenho esquemático dos anéis de compressão utilizados nos experimentos.

Figura 28 – Anel de atrito de tamanho maior e intermediário.



Fonte: Arquivo pessoal.

No total foram usinadas trinta peças para aço SAE 1020, trinta para o aço inoxidável 304, trinta para o alumínio AA6531 e trinta para o latão C34000. Dessas trinta peças de cada material, foram divididas em três grupos, sendo dez peças com medidas correspondentes a Figuras 28 e 29. Algumas peças não foram utilizadas nos experimentos para ficar como modelos de peça usinadas.

Cada peça foi medida antes e depois de comprimida em um projetor de perfil, marca Mitutoyo com resolução de 0,005 mm. Os resultados foram compilados no software Excel[®].

Além do projetor de perfil, foi utilizado na medição um micrometro externo milimesimal de 0 – 25 mm da Marca Mitutoyo.

O lubrificante utilizado no experimento foi a base de MoS_2 , fabricado pela Fuchs Lubritech, modelo Tribotec Dry Lube em Spray. Alguns anéis não foram lubrificados e outros foram para permitir analisar o efeito do lubrificante sobre os anéis de atrito.

Os anéis foram comprimidos em uma prensa com capacidade de 30 toneladas com graus de deformação variados, chegando a uma deformação de 60 % na altura.

3.6.1 Curvas de Calibração

As curvas de calibração foram feitas simulando a compressão dos anéis de compressão nos três tipos de anéis mostrados na Figuras 28. As curvas de calibração foram preparadas levando em consideração as curvas de escoamento de cada material, com a velocidade da prensa de 2 mm/s, e deformação a frio.

O *software* SIMUFACT foi utilizado para o modelo de atrito de Amonton – Coulomb (μ). Para cada material e tamanho de anel, foram feitas série de simulações com o atrito começando em 0 e sofrendo incremento de um décimo até valor de quatro décimos.

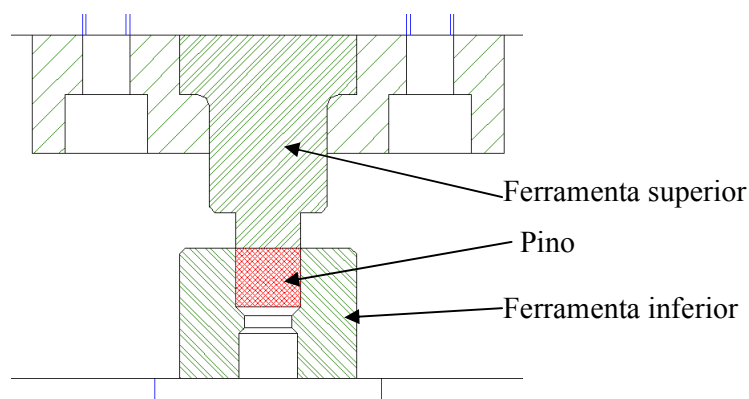
O registro de cada simulação de compressão dos anéis foi realizado em seis instantes ao longo do curso da prensa, medindo os valores para a altura e diâmetro interno dos anéis.

Foram analisados quatro materiais diferentes, com três tamanhos de anéis, com quatro valores para o atrito e seis leituras de deformação, ao todo foram feitos duzentos e oitenta e oito análises pelo software.

3.7 FERRAMENTAL E GEOMETRIAS UTILIZADAS NO PROCESSO DE MICRO/MESOEXTRUSÃO

Dois jogos de ferramentas foram fabricados especialmente para os experimentos, sendo os conjuntos com a matriz guiada por quatro colunas. As bases da matriz possuem furos roscados que fixam um punção na parte superior e a matriz de extrusão na parte inferior, conforme esquema de montagem da Figura 29.

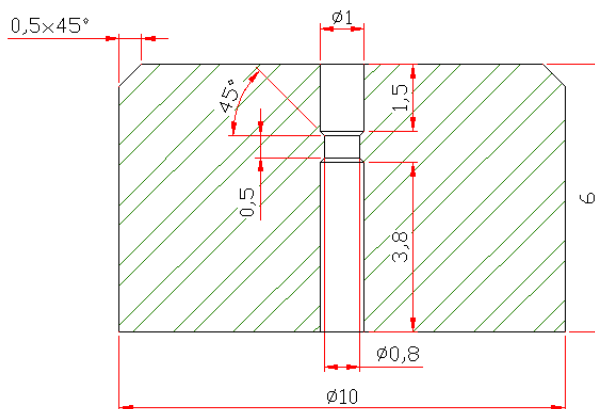
Figura 29 - Esquema da extrusão com pino, montagem antes da extrusão.



Fonte: Arquivo pessoal.

A matriz de microextrusão foi usinada com as dimensões conforme a Figura 30, sendo que três matrizes com ângulos de extrusão de 30°, 45° e 60° foram feitas.

Figura 30 - Dimensões da ferramenta inferior para microextrusão.

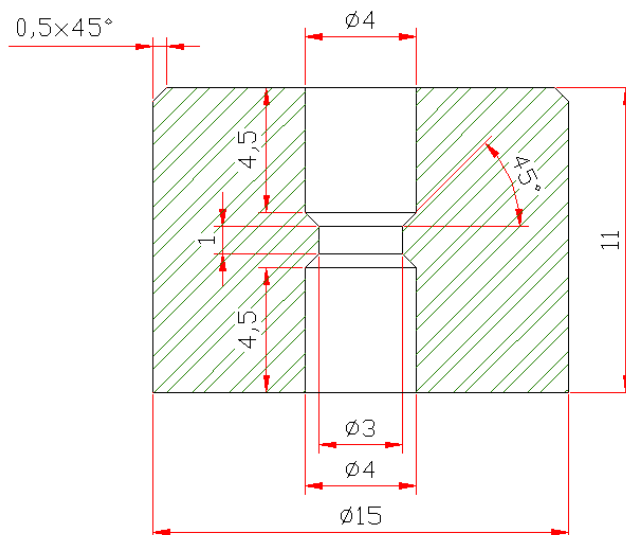


Fonte: Arquivo pessoal.

A redução em área da seção transversal antes e depois de extrudado será de aproximadamente de 36,4 % em área. O punção para comprimir o material através da matriz é uma peça única que serve para as três matrizes.

Para determinar os problemas relacionados com a miniaturização, matrizes para peças no tamanho de meso escala foram construídas e os resultados comparados com as peças em microescala. A Figura 31 mostra em detalhe a ferramenta inferior de diâmetro 4 mm.

Figura 31 - Dimensões de uma das ferramentas para mesoextrusão.



Fonte: Arquivo pessoal.

A redução em área da seção transversal antes e depois de extrudado será de aproximadamente de 43,8 % em área. Os ângulos de extrusão variarão de 30°, 45° e 60°, em um total de três ferramentas inferiores para uma superior. No total foram usinadas seis ferramentas inferiores, duas superiores e uma matriz para encaixe das ferramentas.

Foram realizados os ensaios para cada um dos quatro materiais, utilizando os três ângulos de extrusão para os tamanhos de pinos de diâmetros de 4 mm e comprimento de 6 mm, diâmetro de 1 mm e comprimento de 2 mm. A tabela 6 mostra a quantidade de corpos de prova utilizados para cada ensaio.

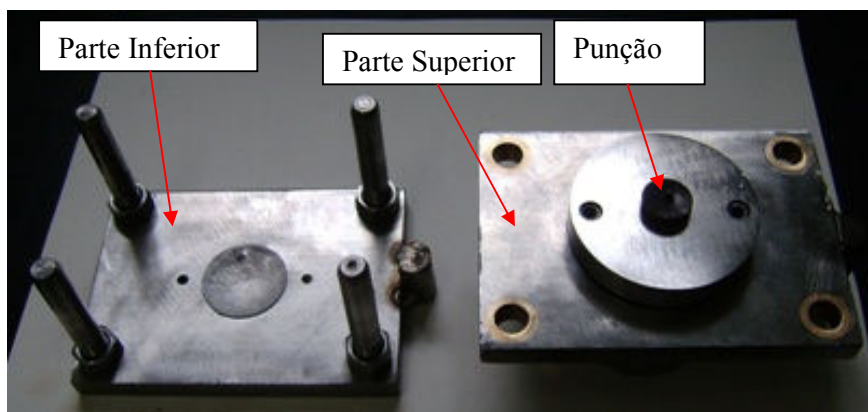
Tabela 6 – Número de corpos de prova utilizados nos ensaios para cada perfil e tamanho.

Material	Ø 4 mm	Ø 4 mm	Ø 4 mm	Ø 1 mm	Ø 1 mm	Ø 1 mm
	30 °	45 °	60 °	30 °	45 °	60 °
SAE 1020	3	3	3	2	2	2
C34000	3	3	3	2	2	2
AISI 304	3	3	3	2	2	2
AA 6531	3	3	3	2	2	2

Fonte: Arquivo pessoal.

Como lubrificante foi utilizado bissulfeto de molibdênio aplicado no corpo de prova antes dos ensaios. Para cada perfil e ângulo de extrusão, mais dois corpos de prova foram extrudados, mas sem o lubrificante. A Figura 32 mostra a matriz de extrusão montada com o punção.

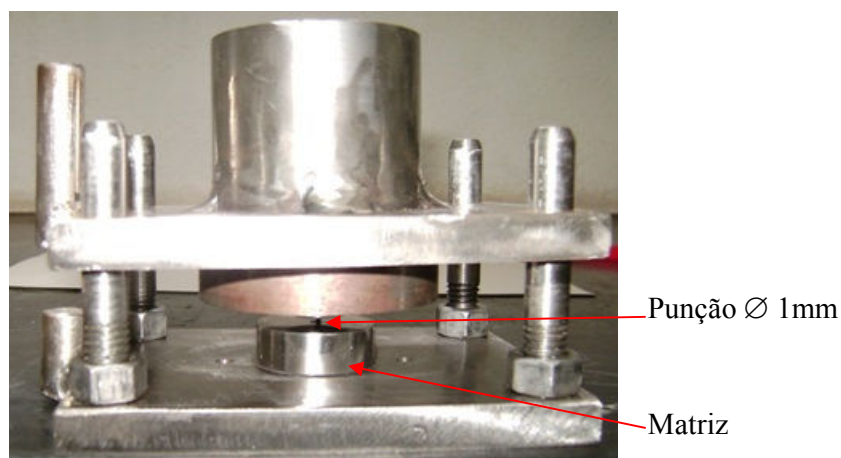
Figura 32 – Matriz de extrusão desmontada para a colocação do punção de extrusão.



Fonte: Arquivo pessoal.

O punção superior é preso através de um dispositivo com dois parafusos allen de $\varnothing 4$ mm com cabeça. A matriz é colunada com buchas de bronze para diminuir o atrito com as guias. A Figura 33 mostra a montagem da matriz com o corpo de prova e a matriz de extrusão no lugar.

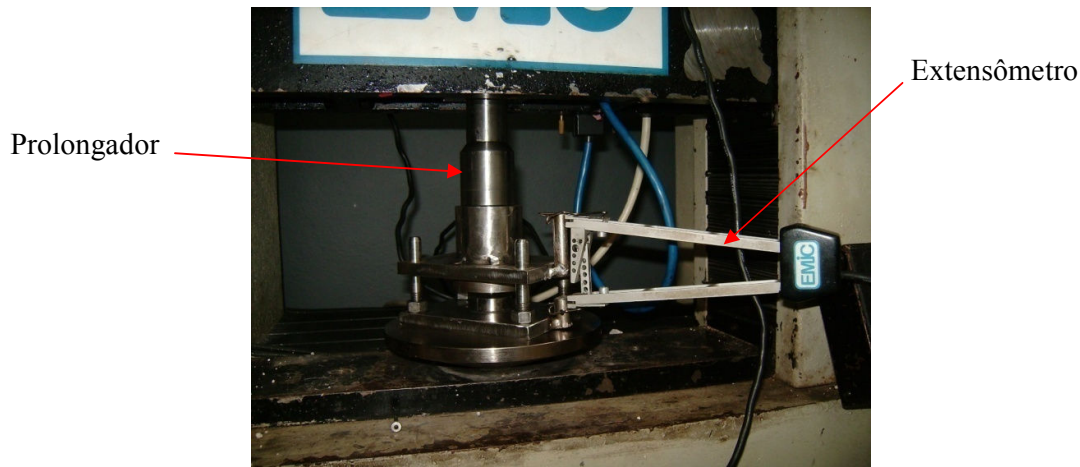
Figura 33 – Matriz montada para extrusão de corpo de prova de diâmetro 1 mm.



Fonte: Arquivo pessoal.

Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio universal da marca EMIC, modelo DL 10000, utilizando célula de carga de capacidade de 100 kN para os corpos de prova de $\varnothing$ 4 mm e uma célula de carga de capacidade de 10 kN para os corpos de prova com diâmetro 1 mm. A Figura 34 mostra o dispositivo montado na máquina de ensaio.

Figura 34 – Dispositivo montado na máquina de ensaio.



Fonte: Arquivo pessoal.

Com o dispositivo no local, foi zerada na máquina a força e posição do extensômetro. O prolongador foi utilizado, pois a célula de carga de 10 kN não conseguiu altura suficiente para tocar ao dispositivo. Assim o prolongador é aparafusado na célula de carga e encostado no dispositivo de extrusão.

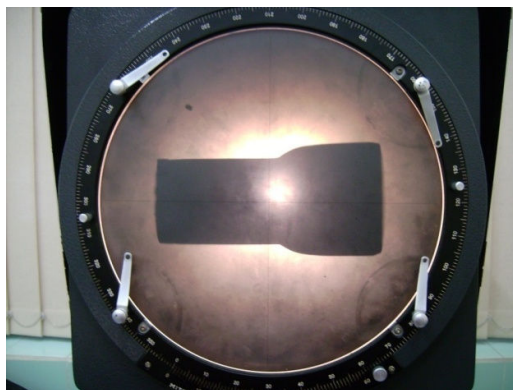
O deslocamento programado na máquina foi de 3 mm para os corpos de prova com diâmetro de 4 mm e deslocamento de 0,8 mm para corpos de prova com diâmetro de 1 mm. A medida que a máquina se deslocava em compressão, o corpo de prova era extrudado dentro da matriz, assim foi possível medir a força conforme o material se deslocava dentro da matriz.

Com o valor da força pela deformação medida, foi possível construir gráficos de força por deslocamento do punção, medindo o aumento da força, pico e queda, conforme o material passava pela matriz.

Com o material extrudado, foi possível medir as dimensões resultantes do corpo de prova foi utilizando o projetor de perfil, para determinar se o projeto da matriz conseguiria formar as peças com o diâmetro desejado e com o ângulo de extrusão conforme projeto inicial.

A Figura 35 mostra o pino extrudado de diâmetro 4 mm no projetor de perfil.

Figura 35 - Pino extrudado visto no projetor de perfil.



Fonte: Arquivo pessoal.

Devido a forma construtiva das matrizes de extrusão, somente depois das peças extrudadas é que foi possível verificar as dimensões internas das matrizes de extrusão, medir o ângulo de extrusão, diâmetro inicial e final.

3.8 CÁLCULO DA FORÇA DE EXTRUSÃO

Modelos matemáticos foram utilizados para determinar a força de extrusão, comparando com os resultados de medição de força obtidos na extrusão dos pinos. Os valores da tensão de escoamento do material veio do ensaio de compressão para determinar a curva de escoamento do material. Os valores de atrito vieram dos ensaios de anel de compressão. As equações utilizadas foram:

$$F = A_0 \times k_{fm} \times \varphi_A \times \left[1 + \frac{2 \times \mu}{\sin(2 \times \alpha)} + \frac{2}{3} \times \frac{\alpha}{\varphi_A} \right] + \pi \times d_0 \times \mu \times k_{f0} \times h_k \quad (09)$$

Onde:

F [N] = Força de extrusão;

A_0 [mm²] = Área inicial;

k_{fm} [MPa] = Tensão de escoamento média;

φ_A [-] = Deformação verdadeira em área;

μ [-] = Coeficiente de atrito;

α [rad] = Ângulo de extrusão em radianos;

α' [°] = Ângulo de extrusão em graus;

d_0 [mm] = Diâmetro da geratriz;

k_{f0} [MPa] = Tensão de escoamento inicial;

h_k [mm] = Altura não extrudada.

$$\varphi_A = \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right) \quad (12)$$

Onde:

φ_A [-] = Deformação verdadeira em relação a área;

A_0 [mm²] = Área inicial do material;

A_1 [mm²] = Área final do material.

$$\alpha = \frac{\alpha' \times \pi}{180} \quad (13)$$

α [rad] = Ângulo de extrusão em radianos;

α' [°] = Ângulo de extrusão em graus.

$$k_{fm} = \frac{k_{f0} + k_{f1}}{2} \quad (14)$$

k_{fm} [MPa] = Tensão de escoamento média;

k_{f0} [MPa] = Tensão de escoamento inicial;

k_{f1} [MPa] = Tensão de escoamento na deformação verdadeira aplicada no material deformado.

Os valores de k_{f0} e k_{f1} foram retirados das curvas de escoamento de cada material analisado.

Cada um dos parâmetros das equações 09, 12, 13 e 14 foram descritos no capítulo 2 que trata da revisão bibliográfica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CURVAS DE ESCOAMENTO

Os corpos de prova deformados foram separados, embalados e identificados conforme número e material a que foram identificados. A Figura 36 mostra detalhes do corpo de prova depois do ensaio.

Figura 36 - Detalhes dos corpos de prova ensaiados.



Fonte: Arquivo pessoal.

Um dos efeitos do ensaio sobre os corpos de prova utilizados foi que algumas amostras sofreram deslocamento lateral causado pelo pequeno não paralelismo entre placas da máquina de ensaio. Este efeito foi visto em maior intensidade para os corpos de prova de menor diâmetro. Os ensaios que tiveram esse problema foram descartados para fim de análise de dados. No ensaio de compressão é necessário que a força seja unidirecional, causando um único estado de forças, como ocorre um deslocamento lateral, este estado único de forças deixa de existir e o resultado final é alterado.

Os dados retirados dos ensaios de compressão dos corpos de prova foram a força e deslocamento da placa de compressão. Com os dados da força, foi calculada a tensão de escoamento (tensão verdadeira) em MPa a cada instante do ensaio, utilizando a equação 15.

$$k_f = \frac{P}{A_{inst}} \quad (15)$$

A área instantânea do corpo de prova foi calculada pela equação 16, levando em conta que o volume de material não altera durante o ensaio, conforme a lei da constância dos volumes.

$$A_{inst} = \frac{A_0 \times h_0}{h_1} \quad (16)$$

$$A_0 = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (17)$$

A deformação verdadeira que é utilizada para a construção do gráfico de tensão X deformação verdadeira foi calculada utilizando a equação 18.

$$\varphi_l = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \quad (18)$$

As curvas de escoamento foram feitas para os materiais analisados antes do tratamento térmico. Os resultados mostram que o material fornecido apresentava encruamento provenientes dos processos produtivos anteriores. As curvas de escoamento apresentadas na sequência foram retiradas de materiais já tratados termicamente.

Com os dados retirados dos ensaios foi possível construir as curvas de escoamento dos materiais e compará-los com a bibliografia.

As curvas de escoamento tratadas a seguir foram feitas com a média aritmética dos ensaios realizados com corpos de prova com diâmetro 5 mm e diâmetro 4 mm. Os valores para tensão de escoamento e índice de encruamento serão apresentados em média.

4.1.1 Curva de Escoamento do Aço SAE 1020

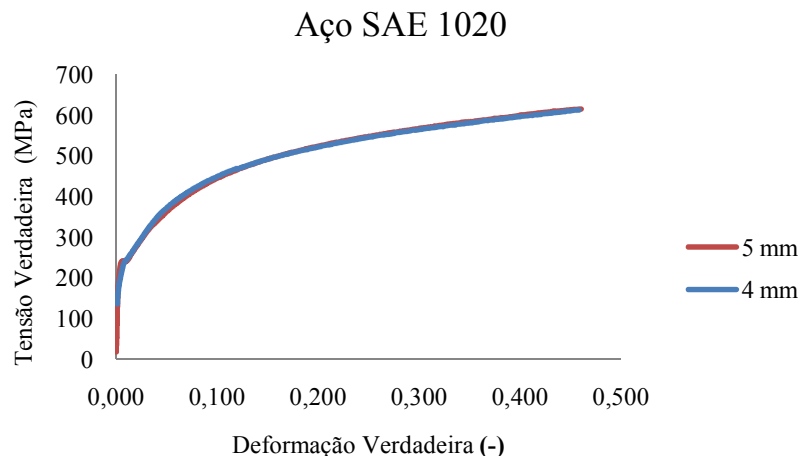
As curvas de escoamento foram feitas utilizando corpos de prova de $\varnothing$ 5 x 8 mm e $\varnothing$ 4 x 6 mm, com 5 amostras cada um, resultando em 10 ensaios para o aço SAE 1020. Os dados foram armazenados e compilados pelo software Excel[®], gerando as curvas de escoamento.

Alguns corpos de prova foram descartados após o ensaio devido ao deslocamento lateral que ocorreu em maior número com os corpos de prova de menor diâmetro.

Como a área diminuiu 36 %, qualquer diferença de paralelismo aumenta as chances que ocorra um tombamento do corpo de prova durante o ensaio de compressão, principalmente para corpos de prova com menor diâmetro.

A Figura 37 mostra o comparativo entre diferentes tamanhos de corpos de prova.

Figura 37 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira para os corpos de prova de Ø 5 mm e Ø 4 mm.



Com a curva de escoamento, linearizando a curva na parte plástica utilizando logaritmo de base 10, podemos retirar os valores de C e n para a curva de escoamento.

A equação matemática que representa a curva de escoamento do aço SAE 1020 para os corpos de prova de Ø 5 mm e de Ø 4 mm é:

$$k_f = 753,52 \cdot \varphi^{0,2429}$$

$$k_{f0} = 388 \text{ MPa}$$

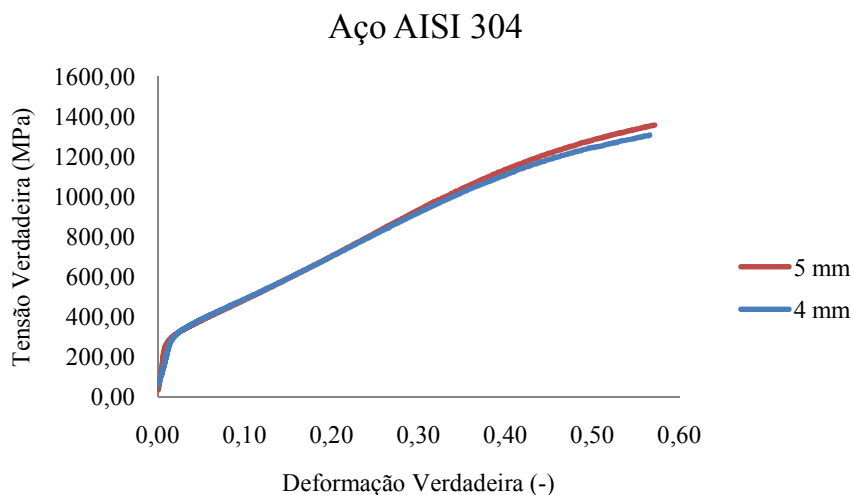
Os valores apresentados para C e n são as médias aritméticas entre os valores encontrados nos ensaios para todos os corpos de prova do aço SAE 1020.

4.1.2 Curva de Escoamento do Aço inoxidável AISI 304

As curvas de escoamento foram calculadas utilizando corpos de prova de Ø 5 x 8 mm e Ø 4 x 6 mm, com 5 amostras cada uma, dando 10 ensaios para o aço AISI 304. Os dados foram armazenados e compilados pelo software Excel[®], gerando as curvas de escoamento.

A Figura 38 mostra o comparativo entre as curvas obtidas com os diferentes tamanhos de corpos de prova.

Figura 38 - Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira para os corpos de prova de Ø 5 mm e Ø 4 mm.



Com a curva de escoamento, linearizou-se a curva na parte plástica utilizando logaritmo de base 10, podemos retirar os valores de C e n para a curva de escoamento.

A equação matemática que representa a curva de escoamento do aço Inoxidável AISI 304, para os corpos de prova de Ø 5 mm e de Ø 4 mm em média é:

$$k_f = 1580,92 \cdot \varphi^{0,4528}$$

$$k_{f0} = 700 \text{ MPa}$$

Os valores apresentados para C e n são as médias aritméticas entre os valores encontrados nos ensaios para todos os corpos de prova.

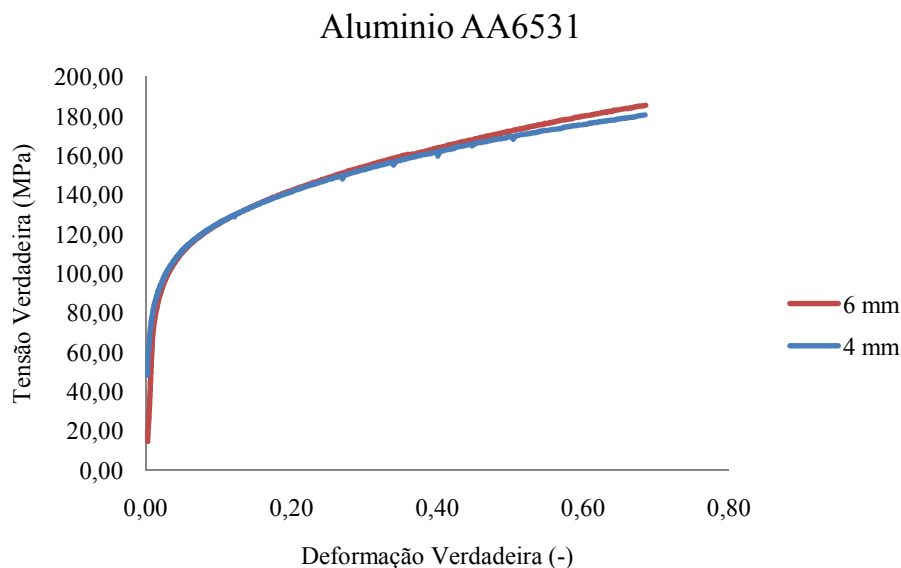
4.1.3 Curvas de Escoamento para o Alumínio AA6531

As curvas de escoamento foram realizadas utilizando corpos de prova de Ø 6 x 9 mm e Ø 4 x 6 mm, com 5 amostras cada uma, dando 10 ensaios para o alumínio AA6531.

Compilando os dados retirados, pode-se construir a curva de tensão verdadeira por deformação verdadeira do material.

A Figura 39 mostra o comparativo entre diferentes tamanhos de corpos de prova.

Figura 39 - Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira para os corpos de prova de Ø 6 mm e Ø 4 mm.



Com a curva de escoamento, linearizamos a curva na parte plástica utilizando logaritmo de base 10, podemos retirar os valores de C e n para a curva de escoamento. A equação matemática que representa a curva de escoamento do alumínio, para os corpos de prova de Ø 6 mm e de Ø 4 mm em média é:

$$k_f = 193,44 \cdot \varphi^{0,1883}$$

$$k_{f0} = 354 \text{ MPa}$$

Os valores apresentados para C e n são as médias aritméticas entre os valores encontrados nos ensaios para todos os corpos de prova.

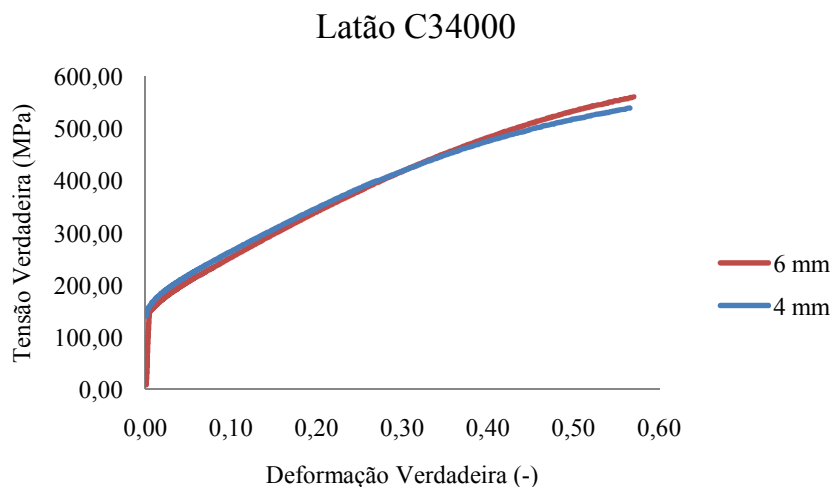
4.1.4 Curvas de Escoamento para o Latão C34000

As curvas de escoamento foram feitas utilizando corpos de prova de Ø 6 x 9 mm e Ø 4 x 6 mm, com 5 amostras cada uma, dando 10 ensaios para o latão C34000.

Compilando os dados retirados, pode-se construir a curva de tensão verdadeira por deformação verdadeira do material.

A Figura 40 mostra o comparativo entre diferentes tamanhos de corpos de prova.

Figura 40 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira para os corpos de prova de $\varnothing$ 6 mm e $\varnothing$ 4 mm.



Com a curva de escoamento, linearizamos a curva na parte plástica utilizando logaritmo de base 10, podemos retirar os valores de C e n para a curva de escoamento.

A equação matemática que representa a curva de escoamento do alumínio, para os corpos de prova de $\varnothing$ 6 mm e de $\varnothing$ 4 mm em média é:

$$k_f = 633,14 \cdot \varphi^{0,3596}$$

$$k_{f0} = 404 \text{ MPa}$$

Os valores apresentados para C e n são as médias aritméticas entre os valores encontrados nos ensaios para todos os corpos de prova.

4.1.5 Análise e Comparativo entre os Resultados Obtidos

Utilizando ensaio de compressão é possível verificar um aumento nos erros agregados ao processo, como uma facilidade muito maior no tombamento do corpo de prova durante o ensaio, causando uma deformação não somente no sentido axial do corpo de prova, mas também no sentido radial induzindo a um estado de forças não uniaxial, fazendo com que o ensaio para estes corpos de prova fossem descartados.

Outro erro associado ao processo está relacionado com a célula de carga, onde quanto menor a força necessária para comprimir o corpo de prova, maior o erro agregado a captura

desses pontos. A Tabela 7 mostra os resultados C e n para os ensaios realizados com o aço SAE 1020.

Tabela 7 - Valores de C e n para corpos de prova do aço SAE 1020.

Corpo de Prova	Ø CP (mm)	C (MPa)	n	Corpo de Prova	Ø CP (mm)	C (MPa)	n
1	Ø 5	771,26	0,2518	1	Ø 4	769,13	0,2466
2	Ø 5	732,48	0,2443	4	Ø 4	734,17	0,2260
3	Ø 5	736,20	0,2377				
4	Ø 5	781,63	0,2645				
Média		755,39	0,2496			751,65	0,2363
Desvio Padrão		24,72	0,0115			24,72	0,0146

Fonte: Dados da pesquisa.

O corpo de prova de número 5 com Ø 5 mm e os corpos de prova de número 2, 3 e 5 com Ø 4 mm foram descartados por problemas de tombamento do corpo de prova durante o ensaio. A diferença entre os valores da constante C para os corpos de prova de Ø 4 e 5 mm foram de 0,49 % e para o valor de n de 5,33%. A Tabela 8 mostra os resultados C e n para os ensaios realizados com o aço AISI 304.

Tabela 8 – Valores de C e n para corpos de prova do aço SAE AISI 304.

Corpo de Prova	Ø CP (mm)	C (Mpa)	n	Corpo de Prova	Ø CP (mm)	C (Mpa)	n
3	Ø 5	1587,81	0,4518	1	Ø 4	1578,34	0,4436
4	Ø 5	1531,44	0,4456	3	Ø 4	1605,83	0,4683
5	Ø 5	1614,73	0,4591	4	Ø 4	1564,58	0,4484
Média		1577,99	0,4522			1582,92	0,4534
Desvio Padrão		42,50	0,0068			21,00	0,0131

Fonte: Dados da pesquisa.

O corpo de prova de número 1 e 2 com Ø 5 mm e os corpos de prova de número 2, e 5 com Ø 4 mm foram descartados por problemas de tombamento do corpo de prova durante o ensaio. A diferença entre os valores da constante C para os corpos de prova de Ø 4 e 5 mm foi de 0,3 % e para o valor de n de 0,26 %. A Tabela 9 mostra os resultados C e n para os ensaios realizados com o Alumínio AA6531.

Tabela 9 - Valores de C e n para corpos de prova do Alumínio AA6531.

Corpo de Prova	Ø CP (mm)	C (MPa)	n	Corpo de Prova	Ø CP (mm)	C (MPa)	n
1	Ø 5	197,79	0,1994	1	Ø 4	184,63	0,1743
2	Ø 5	199,89	0,2000	2	Ø 4	185,44	0,1764
4	Ø 5	198,79	0,1948	3	Ø 4	190,28	0,1759
				4	Ø 4	191,42	0,1834
				5	Ø 4	188,49	0,1819
Média		198,82	0,1981			188,05	0,1784
Desvio Padrão		1,05	0,0028			2,96	0,0040

Fonte: Dados da pesquisa.

O corpo de prova de número 3 e 5 com Ø 5 mm foram descartados por problemas de tombamento do corpo de prova durante o ensaio. A diferença entre os valores da constante C para os corpos de prova de Ø 4 e 5 mm foram de 5,58 % e para o valor de n de 9,94 %. A Tabela 10 mostra os resultados C e n para os ensaios realizados com o Latão C34000.

Tabela 10 - Valores de C e n para corpos de prova do Latão C34000.

Corpo de Prova	Ø CP (mm)	C (MPa)	n	Corpo de Prova	Ø CP (mm)	C (Mpa)	n
1	Ø 5	635,77	0,3564	1	Ø 4	643,72	0,3456
2	Ø 5	634,45	0,3853	2	Ø 4	641,50	0,3582
3	Ø 5	606,04	0,3658	3	Ø 4	632,84	0,3569
4	Ø 5	633,28	0,3775	5	Ø 4	605,06	0,3374
5	Ø 5	668,04	0,3636				
Média		635,52	0,3697			630,78	0,3495
Desvio Padrão		21,98	0,0115			17,78	0,0099

Fonte: Dados da pesquisa.

O corpo de prova de número 4 com Ø 4 mm foi descartado por problema de tombamento do corpo de prova durante o ensaio. A diferença entre os valores da constante C para os corpos de prova de Ø 4 e 5 mm foram de 0,75 % e para o valor de n de 5,46 %.

A diferença entre os valores retirados dos ensaios para corpos de prova de Ø 4 e 5 mm ficou pequena para materiais que necessitaram de maior força para deformar. O material que

mais necessitou de força para deformar foi o aço inoxidável, apresentou a menor diferença entre os valores de C e n para os corpos de prova com diferentes diâmetros. A maior diferença ficou com o alumínio que necessitou de menos força para deformar.

Para deformar o aço inoxidável foi necessário aplicar uma força máximo de aproximadamente 34 kN e para deformar o alumínio 5 kN, sendo que a célula tem capacidade de 100 kN. Para deformar os corpos de prova de diâmetro maior, foi necessário maior força, ainda assim a força utilizada foi baixa, em comparação com processos macros. Esta pequena força de compressão explica o aumento da diferença entre as leituras para o alumínio, o aço de baixo teor de carbono e o latão.

Para diminuir a diferença dos valores da constante C e n , uma célula de carga com menor capacidade deveria ser utilizada. No momento dos ensaios, não se possuía esta célula de carga.

Os equipamentos disponíveis são projetados para forças de maior magnitude, no caso a máquina de ensaio mecânico tem capacidade de 100 kN. Utilizando menos de 10 % da capacidade da máquina, os erros de leitura aumentam, as folgas do equipamento começam a influenciar de maneira significativa, erros de paralelismo entre placas influenciam nos ensaios aumentando a tendência ao tombamento do corpo de prova durante o ensaio, entre outros problemas não relacionados neste trabalho. A grande influência do efeito de tamanho da peça para as curvas de escoamento está relacionada com os problemas com os equipamentos e não com a diferença entre um material com volume comparado ao deformar um material de volume semelhante.

Materiais com maior volume, necessitam de mais força para deformar e a influência de pequenos problemas com os equipamentos podem muitas vezes ser ignoradas, porém, para peças de volume pequeno, peças de tamanho meso e micro tendem a ser influenciados por esses problemas de equipamento, aumentando o erro associado ao processo.

4.2 METALOGRAFIA DOS MATERIAIS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS

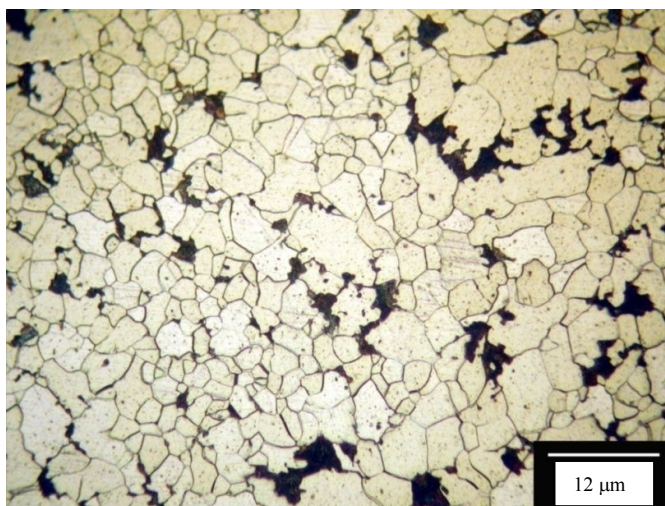
Foram analisadas a seção transversal e longitudinal de cada material antes dos ensaios e depois dos ensaios de extrusão. Nos ensaios realizados nos corpos de prova antes do ensaio, foram analisados o tamanho de grão e o tipo de microestrutura. Após os ensaios de microextrusão, o ensaio de metalografia foi utilizado para determinar a deformação do grão, analisando o efeito do ângulo de extrusão sobre a deformação dos grãos. Neste sub-capítulo

será analisado somente a metalografia dos materiais antes dos ensaios. A metalografia após o ensaio será analisado junto com os resultados obtidos com o ensaio de microextrusão.

4.2.1 Metalografia do Aço SAE 1020

O aço SAE 1020 foi o material que apresentou o melhor resultado no ensaio metalográfico, tanto na facilidade de apresentar, quanto na nitidez da imagem. A Figura 41 mostra a seção transversal dos corpos de prova.

Figura 41 - Seção transversal do aço SAE 1020, ataque Nital 3%.



Fonte: Dados da pesquisa.

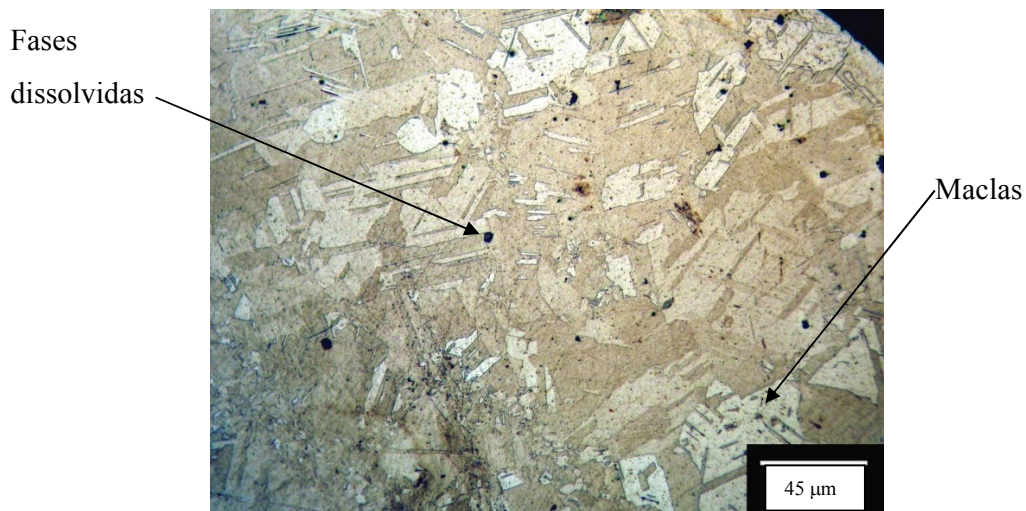
A metalografia da seção transversal mostra presença de ferrita e perlita na matriz metalográfica, com grãos uniformes sem deformação.

4.2.2 Metalografia do Aço Inoxidável AISI 304

O aço inoxidável foi o material que apresentou maior dificuldade entre os materiais analisados para ser atacado quimicamente, onde várias tentativas foram feitas para acertar o tempo de ataque e o tipo de reagente. O ataque com Glyceregia mostrou-se mais lento que o com o reagente Villela, pois este último apresentou dificuldade no tempo de ataque demorado, queimando a amostra muito facilmente, diferente do ataque com Glyceregia.

A Figura 42 mostra a seção transversal do corpo de prova antes do ensaio de compressão.

Figura 42 - Seção transversal do aço inoxidável AISI 304, ataque Villela.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os aços inoxidáveis possuem estrutura cristalina formada por grãos e defeitos de maclas que prejudicam a visualização dos contornos de grão.

4.2.3 Metalografia do Alumínio AA6531

O ataque químico do alumínio apresentou certa dificuldade em praticamente dois pontos. O primeiro ponto foi no tipo de reagente utilizado no ataque, para evitar que este atacasse a superfície do material e não somente o contorno de grão. O segundo ponto ficou na análise das imagens, onde o pequeno tamanho de grão mesmo depois do tratamento térmico impossibilitou a visualização dos grãos na matriz metalográfica, mesmo utilizando a máxima resolução do equipamento que era de 500 X. A Figura 43 mostra a seção transversal do alumínio AA6531 antes do ensaio de microextrusão.

Figura 43 - Seção transversal do Alumínio AA6531, ataque reagente de Keller.



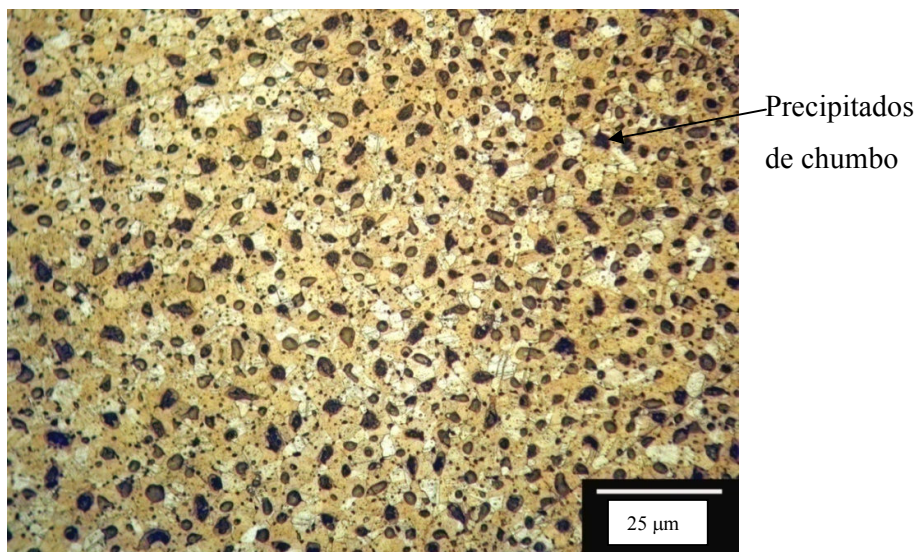
Fonte: Dados da pesquisa.

A imagem metalográfica da Figura 43 indica tamanho de grão muito pequeno e de tamanho semelhante, proveniente do processo produtivo de extrusão. Com o pequeno tamanho de grão e o equipamento disponível para análise não foi possível determinar o tamanho dos grãos. Uma solução para este caso seria a utilização de um microscópio de maior capacidade como o MEV (microscópio eletrônico de varredura), porém este equipamento é restrito em alguns lugares, bem como o custo de utilização dele é alto. Como a finalidade do trabalho é outro, a utilização do MEV fora descartado para esta análise.

4.2.4 Metalografia do Latão C34000

A metalografia do latão apresentou formação de precipitados de chumbo distribuídos ao longo da matriz metalográfica. O ataque químico com persulfato de amônia mostrou-se eficiente na detecção do contorno de grão das amostras. A Figura 44 mostra a seção transversal do Latão C34000 antes do ensaio de compressão.

Figura 44 - Seção transversal do Latão C34000, ataque Persulfato de Amônia.

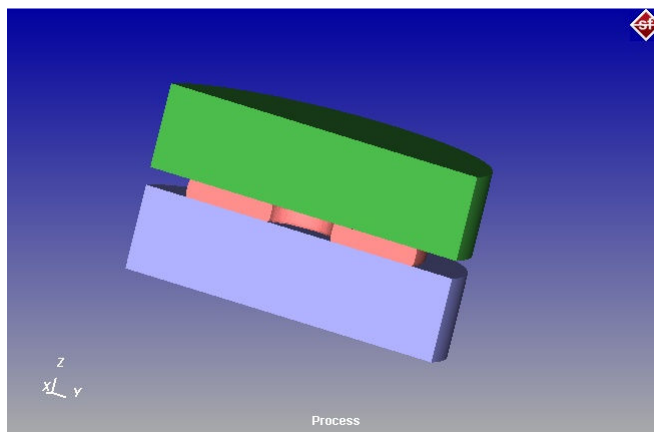


O ensaio de metalografia do latão mostrou a distribuição dos precipitados de chumbo na matriz metalográfica. A função do chumbo é aumentar a soldabilidade do latão, mas prejudica a deformabilidade do material. A presença de chumbo explica as fraturas do tipo frágil dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão para determinar as curvas de escoamento.

4.3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO

Os resultados dos ensaios de anel de atrito foram colocados nos gráficos com as curvas de calibração realizados no *software* SIMUFACT®. A Figura 45 mostra o modelo de *software* simulando a deformação nos anéis, sendo que para a confecção das curvas de calibração, foram utilizadas as curvas de escoamento determinadas nos experimentos para cada material.

Figura 45 - Simulação do software Simufact para determinar as curvas de calibração.



Fonte: Arquivo pessoal.

Com a confecção das curvas de calibração, o ensaio de anel de atrito foi realizado, utilizando os três tamanhos de corpos de prova usinados para cada tipo de material analisado. Alguns dos corpos de prova utilizados nos ensaios não foram lubrificados para verificar a eficácia do lubrificante utilizado. A Figura 46 mostra os corpos de prova utilizados nos ensaios depois de deformados.

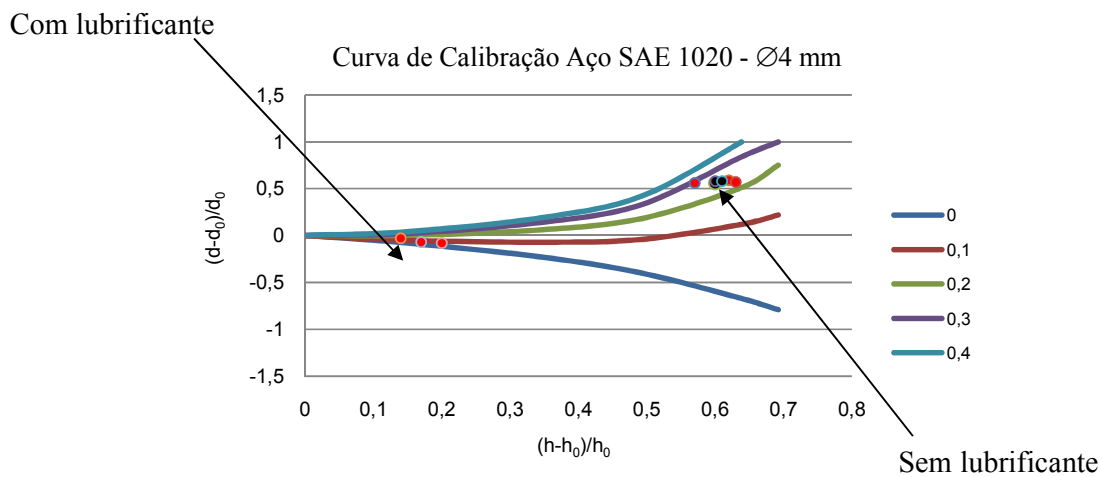
Figura 46 – Anéis de atrito após a compressão com régua milimetrada.



Fonte: Arquivo pessoal.

Após a compressão dos anéis, cada anel foi medido nos diâmetros interno externo e na altura do disco. Com os valores de variação de altura por variação de diâmetro, os dados foram inseridos nas curvas de calibração para determinar o atrito do material com a ferramenta. Para simular a ferramenta, os anéis foram comprimidos utilizando discos de aço

Figura 48 – Curvas de calibração do aço 1020.

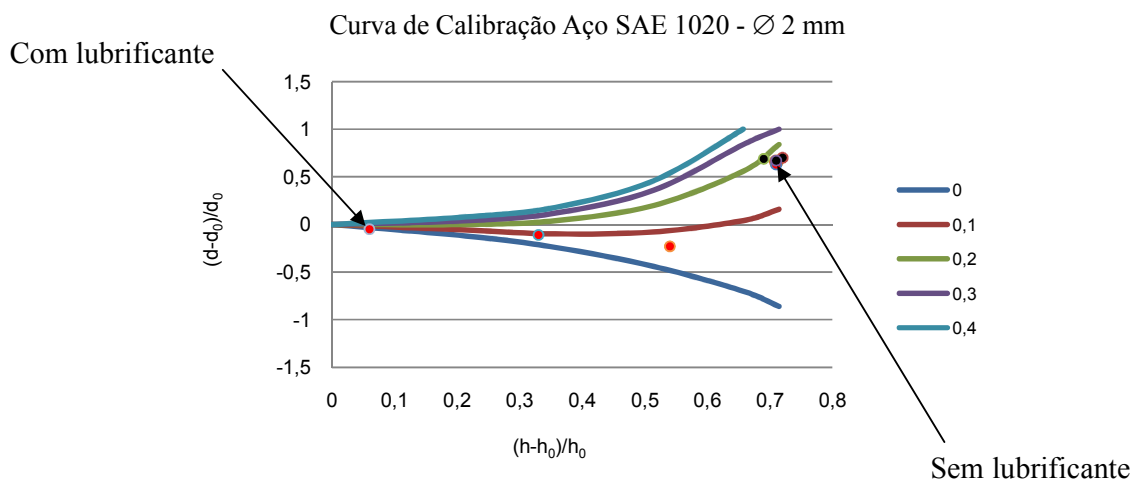


Fonte: Dados da pesquisa.

Os pontos pretos indicados no gráfico da Figura 48 indicam os anéis que não receberam lubrificação e os pontos em vermelho indicados no gráfico, os anéis que receberam o lubrificante.

A Figura 49 mostra as curvas de calibração e os valores de atrito para anéis com e sem lubrificação para o aço SAE 1020, com diâmetro externo do anel de compressão de diâmetro externo de 2 mm.

Figura 49 – Curvas de calibração do aço SAE 1020.



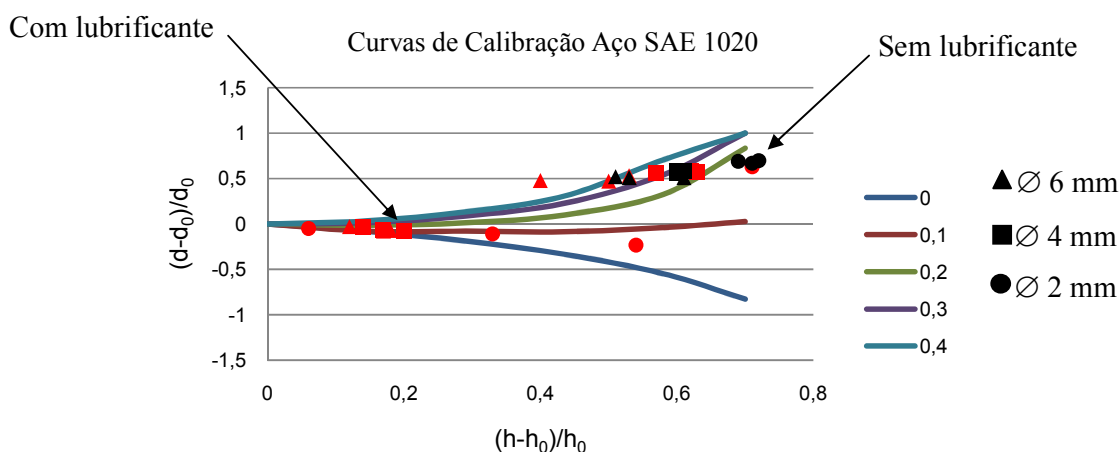
Fonte: Dados da pesquisa.

Os pontos pretos indicados no gráfico da Figura 49 indicam os anéis que não receberam lubrificação e os pontos em vermelho indicados no gráfico, os anéis que receberam o lubrificante.

Os pontos no gráfico foram os valores retirados dos experimentos com a compressão dos anéis, medindo a variação do diâmetro interno pela variação da altura do anel. As curvas de calibração foram feitas com valores de atrito μ entre 0 e 0,4.

Como os valores dos gráficos de calibração para os três tamanhos de anéis utilizados apresentaram resultados semelhantes, os valores foram montados em um único gráfico para melhor visualização. A Figura 50 mostra os valores em apenas um gráfico consolidado com todos os valores dos ensaios, nos três tamanhos de corpos de prova analisados.

Figura 50 – Valores para o atrito para o aço SAE 1020.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os pontos pretos indicados no gráfico da Figura 50 indicam os anéis que não receberam lubrificação e os pontos em vermelho indicados no gráfico, os anéis que receberam o lubrificante.

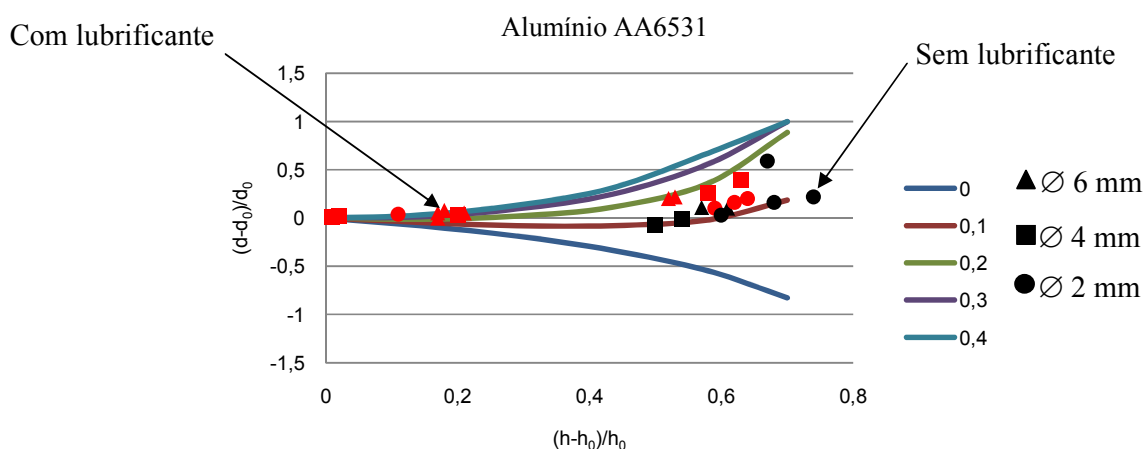
Os valores de atrito ficaram baixos somente para anéis que sofreram pouca deformação. Para os anéis que deformaram mais, a camada de lubrificante se rompeu e os valores ficaram similares aos anéis que não receberam lubrificação.

À medida que os tamanhos dos anéis foram diminuindo, existiu uma leve tendência a diminuição do atrito. Esta tendência já havia sido observada em trabalhos de Linfa Peng (2010) que trabalhou com o efeito do tamanho da peça, operando com elementos finitos para determinar o atrito com a força de atrito radial.

b) Alumínio AA 6531:

O mesmo processo de análise do aço SAE 1020 foi feito com o alumínio AA 6531. Devido a semelhança de curvas de calibração, somente os valores de atrito em um único gráfico serão mostrados. A Figura 51 mostra as curvas de calibração e os valores de atrito para o Alumínio.

Figura 51 – Valores de atrito para o Alumínio AA6531, todos os anéis.



Fonte: Dados da pesquisa.

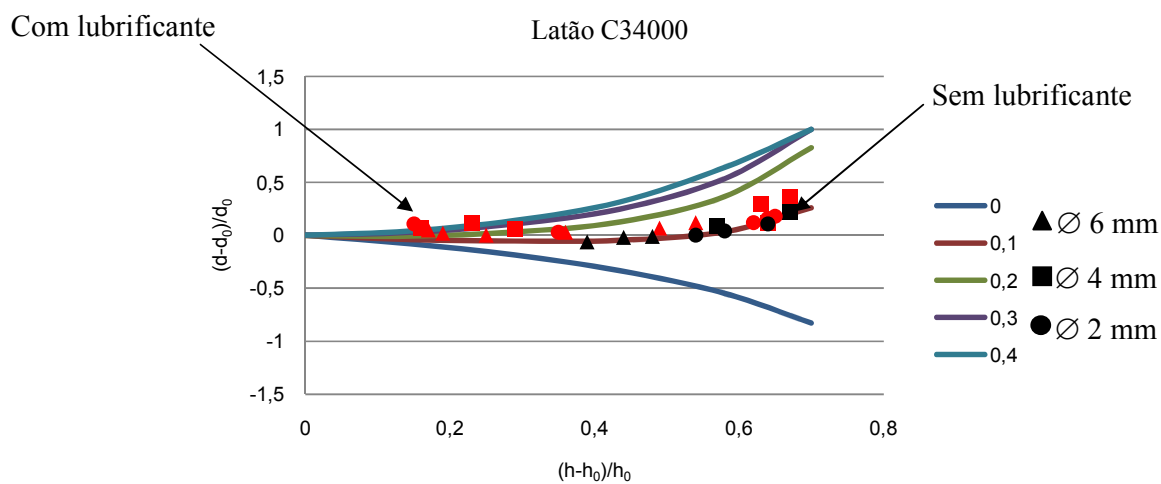
Os pontos pretos indicados no gráfico da Figura 51 indicam os anéis que não receberam lubrificação e os pontos em vermelho indicados no gráfico, os anéis que receberam o lubrificante.

Com o alumínio, a aplicação do lubrificante a base de bissulfeto de molibdênio aumentou o atrito no experimento. A causa mais provável para este fenômeno é que o lubrificante é aplicado em spray sobre a superfície e o bissulfeto de molibdênio trabalha como lubrificante sólido. A força para deformar o alumínio é baixa, como visto nos ensaios de compressão para as curvas de escoamento, então a força para fazer o lubrificante deslizar é maior do que sem ele. Isto aconteceu somente para o alumínio, com o aço SAE 1020 e o aço inoxidável não ocorreu.

c) Latão C34000:

O mesmo processo de análise do aço SAE 1020 foi feito com o latão. Devido a semelhança de curvas de calibração, somente os valores de atrito em um único gráfico serão mostrados. A Figura 52 mostra as curvas de calibração e os valores de atrito para o Latão.

Figura 52 - Valores de atrito para o Latão C34000, todos os anéis.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os pontos pretos indicados no gráfico da Figura 52 indicam os anéis que não receberam lubrificação e os pontos em vermelho indicados no gráfico, os anéis que receberam o lubrificante.

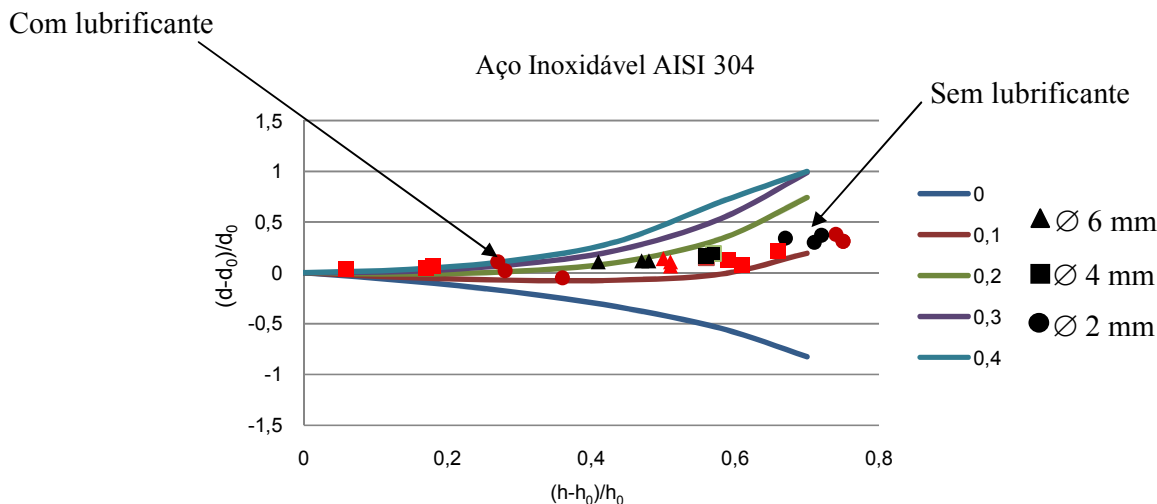
Como o latão é uma liga de cobre e zinco, o cobre tem baixo coeficiente de atrito, sendo que o cobre ligado ao estanho cria o bronze, muito utilizado em mancais de deslizamento por seu baixo coeficiente de atrito e sua resistência ao desgaste. Esta característica faz com que o atrito seja baixo mesmo sem o lubrificante.

d) Aço Inoxidável AISI 304:

O aço inoxidável foi o material que apresentou maior dificuldade para a preparação das amostras, tanto na usinagem como nos ensaios realizados. Sua capacidade de encruamento aumentou as dificuldades tanto na quebra de ferramentas de usinagem como quebras de algumas placas polidas feitas de aço ASTM D-2 que ficavam entre os corpos de

prova e a base da prensa. A Figura 53 mostra as curvas de calibração e os valores de atrito para o aço inoxidável.

Figura 53 - Valores de atrito para o aço inoxidável AISI 304, todos os anéis.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os pontos pretos indicados no gráfico da Figura 53 indicam os anéis que não receberam lubrificação e os pontos em vermelho indicados no gráfico, os anéis que receberam o lubrificante.

O aço inoxidável foi o que apresentou maior diminuição de atrito pela ação do lubrificante. Isso se deve ao fato de que a força para deformar o aço inoxidável foi maior que os outros materiais. Como o atrito está muito ligado a força normal que age sobre um material, quanto maior a força necessária para deformar, maior o atrito entre as peças. Neste caso o lubrificante ajudou um pouco a reduzir o atrito.

De um modo geral, o procedimento de lubrificação utilizado nos experimentos se mostrou ineficiente, com a aplicação de uma camada de bissulfeto de molibdênio apenas na peça, chegando às mesmas conclusões de outros trabalhos relacionados com ensaio de anel de atrito que apresentaram o mesmo resultado com relação à lubrificação apenas nos anéis (Brito; Schaeffer, 2008). Essa tendência para o alumínio e o latão já era esperada, somente o efeito do processo de lubrificação sobre os aços é que era uma incógnita, mostrando alguma eficiência somente para o aço inoxidável.

A tendência a diminuição do atrito μ ao diminuir o tamanho dos anéis de atrito, aconteceu não somente com o alumínio, estudado por Linfa Peng (2010), mas também para os

outros materiais, com maior efeito sobre os aços analisados que para o próprio latão em si. Sendo assim, o efeito de diminuição do atrito em meso e micropeças em relação a matérias de tamanho macro se deve mais pelo efeito do tamanho, diminuição da área de contato entre peça e ferramenta, que pelo tipo de material empregado.

4.4 MICRODUREZA

O ensaio de microdureza foi realizado antes e depois do ensaio de microextrusão. Os resultados mostrados neste capítulo se referem aos valores de microdureza antes do ensaio. Os valores de microdureza depois do ensaio serão analisados junto com os ensaios de microextrusão. Os resultados apresentados de microdureza foram realizados com 5 leituras para cada material com carga fixa na escala Vickers.

A Tabela 11 mostra o resultado do ensaio de microdureza para o aço SAE 1020, na seção transversal do corpo de prova antes do ensaio de microextrusão.

Tabela 11 - Microdureza do aço SAE 1020, seção transversal.

Leituras	HV	Carga
1	114,7	10 N
2	114,9	10 N
3	112,9	10 N
4	118,6	10 N
5	117,9	10 N
Média	115,8	
Desvio Padrão	2,4	

Fonte: Dados da pesquisa.

Para o aço inoxidável AISI 304, o resultado do ensaio de microdureza na seção transversal antes do ensaio de microextrusão está descrito na Tabela 12.

Tabela 12 - Microdureza do aço AISI 304, seção transversal.

Leituras	HV	Carga
1	176,2	2 N
2	170,1	2 N
3	164,7	2 N
4	174,6	3 N
5	175,0	3 N
6	152,1	3 N
Média	168,7	
Desvio Padrão	9,2	

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 13 mostra a microdureza do alumínio AA6531 para a seção transversal antes do ensaio de microextrusão.

Tabela 13 - Microdureza do alumínio AA6531, seção transversal.

Leituras	HV	Carga
1	35,8	2 N
2	35,6	2 N
3	39,2	2 N
4	36,6	1 N
5	36,8	1 N
6	37,9	1 N
Média	37,0	
Desvio Padrão	1,4	

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 14 mostra a microdureza da seção transversal do latão antes do ensaio de compressão.

Tabela 14 - Microdureza do latão C34000, seção transversal.

Leituras	HV	Carga
1	82,7	3 N
2	81,6	3 N
3	78,8	3 N
4	78,3	2 N
5	84,6	1 N
6	82,8	3 N
7	80,3	5 N
Média	81,3	
Desvio Padrão	2,3	

Fonte: Dados da pesquisa.

Para alguns materiais a carga aplicada ao ensaio de microdureza foi alterada para verificar se com a alteração da carga, os valores seriam muito diferentes. Como o desvio padrão ficou abaixo de 6 % da média, considerou-se que o valor da carga não alterou o resultado final do ensaio.

4.5 MICROEXTRUSÃO

Para cada material ensaiado no equipamento, a máquina de ensaio universal apresentou uma curva de força por deslocamento na máquina. Os dados que geraram estas curvas foram retirados da máquina de ensaio universal em formato de arquivo *.TXT. O *software* Excel[®] foi utilizado para trabalhar com os pontos, gerar as curvas e verificar os pontos de deformação.

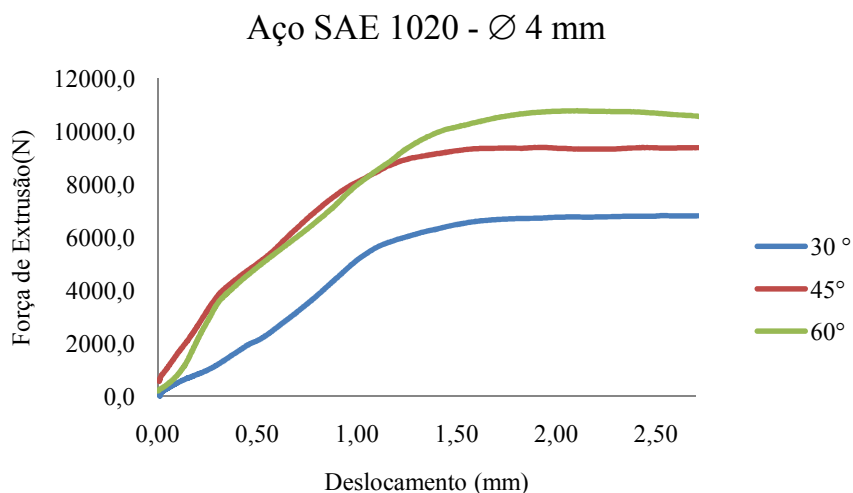
Para cada diâmetro de corpo de prova existiam três tipos de ferramentas com ângulos diferentes, sendo ensaiados no mínimo dois corpos de prova por perfil de ferramenta. Isto gerou 12 ensaios no mínimo para cada tamanho de corpo de prova, como eram dois tipos, foram realizados 24 ensaios por material. Assim foram analisados somando os quatro tipos diferentes de materiais 96 amostras. Alguns perfis foram ensaiados mais de 2 vezes, aumentando o número de ensaios realizados, ficando a análise de ensaio por ensaio neste trabalho impossibilitado pelo tamanho que ficaria. Com isso, será analisado o conjunto e as curvas obtidas com o ensaio agrupadas em um único gráfico.

Para facilitar o entendimento, cada material será analisado em separado.

4.5.1 Aço SAE 1020

Os dados com os corpos de prova de diâmetro de 4 mm geraram curvas de força por deslocamento dentro da matriz. A Figura 54 mostra o gráfico de força para extrusão dos corpos de prova de $\varnothing$ 4 mm.

Figura 54 - Curva de força de extrusão para o aço SAE 1020 com $\varnothing$ 4 mm.



Fonte: dados da pesquisa.

Os ângulos indicados na Figura 54 são os ângulos de extrusão da matriz. A força cresce a medida que o material entra em deformação até o valor máximo quando o material do corpo de prova começa a terminar a deformação. Como cada perfil de matriz possui uma cota diferente devido ao ângulo de extrusão, os pontos onde ocorre o valor de máxima força não são coincidentes.

Quanto maior o ângulo de extrusão, maior a força necessária para extrudar o material. Este aumento pode ter vários motivos, aumento da influência do atrito no processo devido a força normal maior sobre a face do cone de redução da matriz, aumento devido ao maior encruamento do material, maior ineficiência do lubrificante. A figura 55 mostra a imagem metalográfica do aço SAE 1020, ângulo de extrusão de 60°.

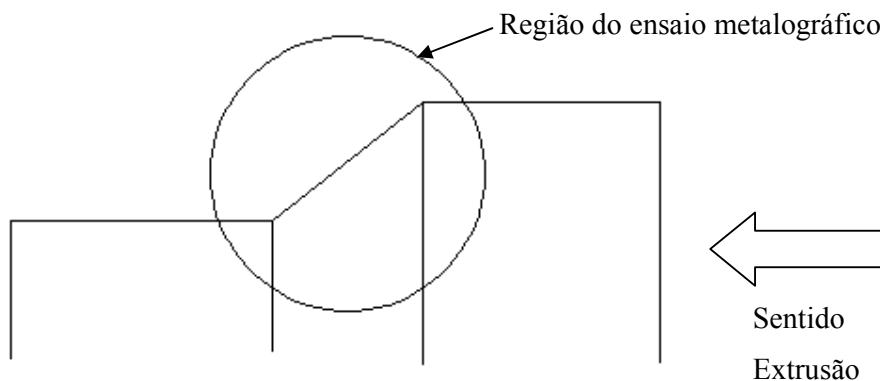
Figura 55 – Aço SAE 1020, ângulo de extrusão de 60°. Ataque Nital 2%.



Fonte: Dados da pesquisa.

O material ao entrar na matriz de extrusão sofre deformação nos grãos que tendem a se deformar no sentido da extrusão. Com ângulo de extrusão menor, faz com que os grãos sofram deformação mais no centro do material que na periferia de contato com a ferramenta, deformação redundante. A figura 56 mostra a região do pino extrudado onde foi realizado o ensaio de metalografia.

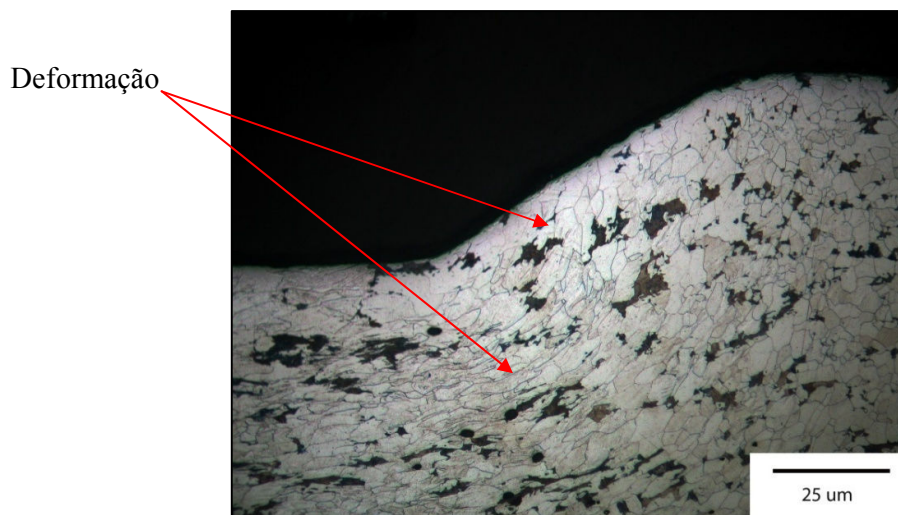
Figura 56 – Região analisada no ensaio de metalografia.



Fonte: Arquivo pessoal.

A figura 57 mostra a imagem metalográfica da seção longitudinal do pino extrudado, com ângulo de extrusão de 45°.

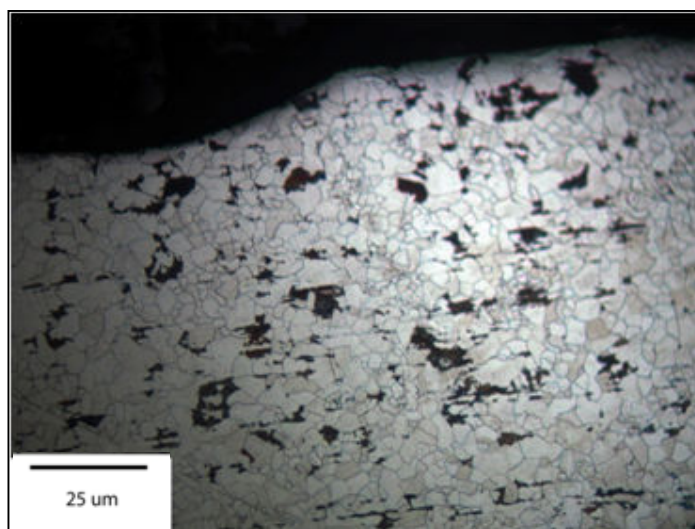
Figura 57 – Aço SAE 1020, ângulo de extrusão de 45°. Ataque Nital 2%.



Fonte: Dados da pesquisa.

Com a diminuição do ângulo de extrusão, o material tem uma região maior deformada dentro do material. Esse aumento da região deformada dentro do material faz com que uma área maior de material sofra encruamento, aumentando a força necessária para deformar. Com um valor menor para o ângulo de extrusão, aumenta a área de contato e aumenta a força normal aplicada ao atrito. A figura 58 mostra a imagem metalográfica do ângulo de extrusão de 30° com ampliação menor.

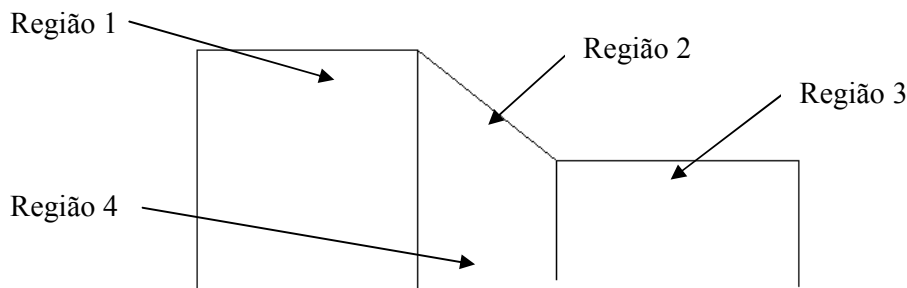
Figura 58 - Aço SAE 1020, ângulo de extrusão de 30°. Ataque Nital 2%.



Fonte: Dados da pesquisa.

Com uma ampliação menor foi possível verificar a diferença entre os grãos na periferia e no centro do material que deformou menos. Esse aumento de encruamento também foi observado medindo a microdureza em várias regiões do corpo de prova. A figura 59 mostra a região onde foram feitas as leituras de microdureza.

Figura 59 – Regiões de leitura da microdureza do aço SAE 1020, $\varnothing$ 4 mm.



Fonte: Arquivo pessoal.

A carga aplicada no ensaio de microdureza, método Vickers foi de 2,94 N (300 gf) e os resultados estão na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores de dureza Vickers para diferentes regiões do corpo de prova de $\varnothing$ 4 mm.

Perfil	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4
30°	182,6 HV	213,5 HV	227,1 HV	144,7 HV
45°	163,5 HV	180,7 HV	236,3 HV	172,5 HV
60°	204,4 HV	228,9 HV	259,0 HV	192,9 HV

Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores que constam na tabela 15 são médias aritméticas de 3 leituras feitas por região estudada.

A medida que o material deforma dentro da matriz, aumenta o encruamento e a dureza tende a aumentar. Mas, com a diminuição do ângulo de extrusão, o material sofre um aumento da dureza em escala maior, como mostra as leituras da microdureza.

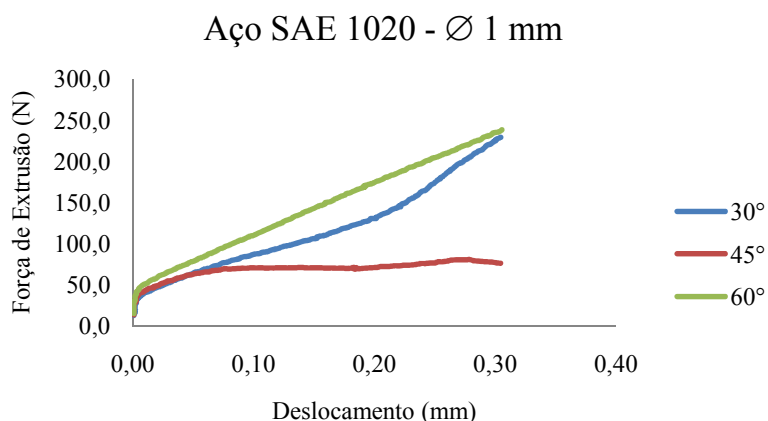
Os pontos positivos em utilizar um ferramental com ângulo de extrusão menor seria uma menor força de extrusão, menor dureza em comparação aos resultados obtidos com ângulos maiores e melhores características do grão deformado. Os pontos negativos seriam o processo de fabricação do ferramental, mais complicado, com ferramentas de usinagem

sofrendo maiores solicitações, necessitando também de uma matriz de comprimento maior para acomodar um maior comprimento.

A análise dos corpos de prova de diâmetro 1 mm foram de maior dificuldade. Os resultados mostram que quando se trabalha com materiais muito pequenos, a faixa de erro de medição dos equipamentos utilizados nos ensaios influencia no resultado obtido, junto com o ferramental desenvolvido que se mostrou eficiente para leitura e análise dos corpos de prova de $\varnothing$ 4 mm.

A figura 60 mostra as curvas de força e deslocamento para os corpos de prova de $\varnothing$ 1 mm para o aço SAE 1020.

Figura 60 - Curva de força de extrusão para o aço SAE 1020 com diâmetro de 1 mm.



As curvas de extrusão para os corpos de prova de $\varnothing$ 1 mm foram inconclusivas para os ângulos de 30 e 60° e chegou-se a valores para o ângulo de 45°. Este problema está relacionado com as matrizes de microextrusão de $\varnothing$ 1 mm. No processo de fabricação, ao se afiar as brocas, estas perderam comprimento efetivo, assim sendo para poder ter a profundidade de usinagem, um cone na entrada da matriz acabou sendo usinado.

Para materiais como o aço SAE 1020 e o aço AISI 304 que extrudam com maior força, o pino de extrusão acabava ficando deslocado em relação ao centro na matriz, sendo assim quando o corpo de prova era extrudado, parte da energia era utilizada para centralizar o pino dentro da matriz, aumentando a força e fazendo com que a curva da força fosse sempre crescente.

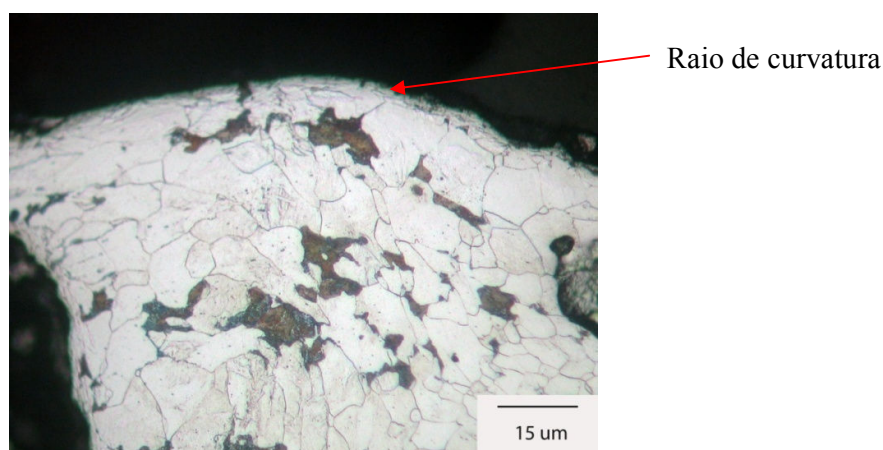
Várias tentativas foram feitas para alinhar o pino com o furo da matriz sem sucesso. Esse desalinhamento causou a perda dos dois pinos de extrusão que foram usinados. Para

resolver este problema, somente reprojetoando a matriz e encomendando com fabricantes de ferramentas, brocas especiais sob medida. Mas, para fim de estudo da dureza e encruamento do material, os corpos de prova extrudados puderam ser utilizados.

Abaixo as imagens metalográficas dos pinos extrudados com ângulo de extrusão de 30° e 45° para comparar o tamanho de grão e o raio de fundo da matriz de extrusão.

A figura 61 mostra a imagem metalográfica do corpo de prova de $\varnothing$ 1 mm, com o ângulo de extrusão de 30°.

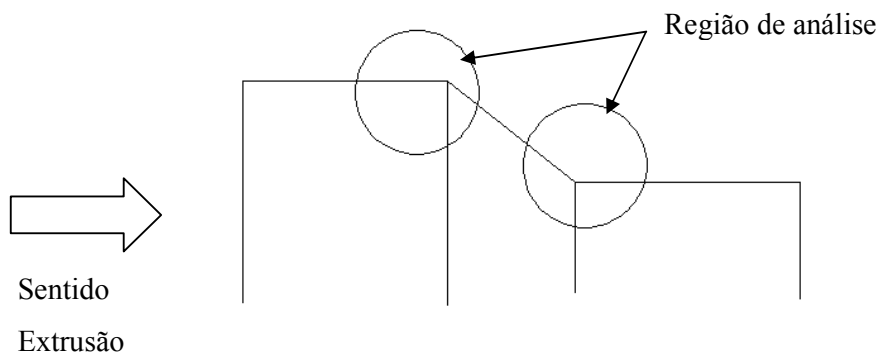
Figura 61 – Aço SAE 1020, ângulo de extrusão de 30°. Ataque Nital 2%.



Fonte: Dados da pesquisa.

Quando se trabalha com conformação de materiais de tamanho macro, a deformação ocorre com uma grande quantidade de grãos. Até mesmo para os corpos de prova de $\varnothing$ 4 mm, a quantidade de grãos deformados é bem maior do que para os corpos de prova de $\varnothing$ 1 mm.

Figura 62 – Região de análise metalográfica para os pinos extrudados de $\varnothing$ 1 mm.

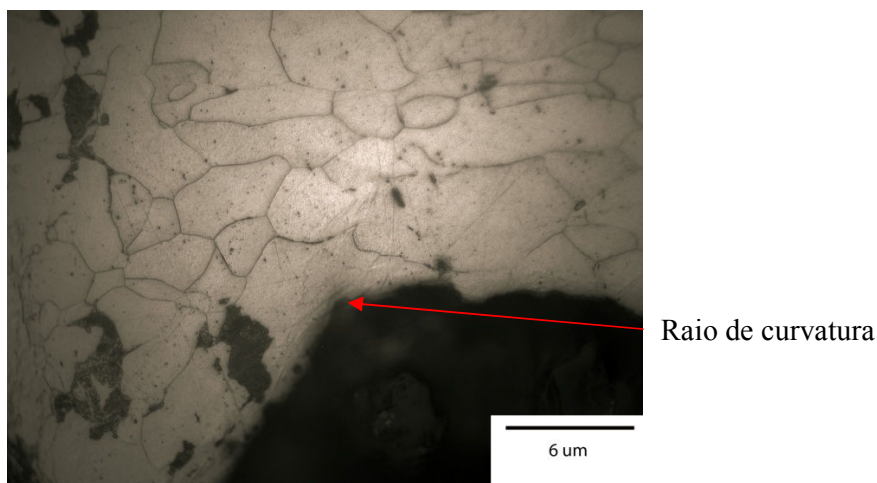


Fonte: Arquivo pessoal.

Com a deformação aplicada praticamente a cada grão, a deformação dos grãos dentro da matriz se resume praticamente nos grãos da periferia em contato com a matriz, sendo que os grãos que estão localizados dentro do material sofrem pouco ou nenhuma deformação.

A figura 63 mostra a imagem metalográfica do corpo de prova de $\varnothing$ 1 mm, com ângulo de extrusão de 45° .

Figura 63 – Aço SAE 1020, ângulo de extrusão de 45° . Ataque Nital 2%.



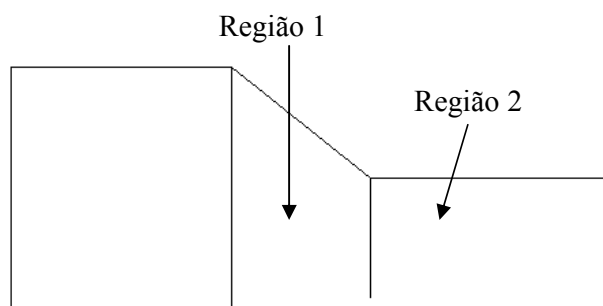
Fonte: Dados da pesquisa.

Com um ângulo maior, a deformação tende a ser mais acentuada e afetar um maior número de grãos. No caso do ângulo de extrusão de 45° , uma pequena quantidade de grãos sofre deformação, sendo o final da deformação o raio de curvatura na saída da ferramenta de extrusão ocupa praticamente meio grão.

Os equipamentos utilizados para captura da força aplicada sobre a peça não consegue captar esta força de deformação no grão, acumulando erros de leitura com as forças de atrito entre as colunas da matriz, atrito entre pino e ferramenta entre outros esforços.

Para determinar o aumento da dureza do material, o ensaio de dureza utilizando micro indentador na escala Vickers foi utilizado, sendo duas zonas de leitura feitas, uma antes da deformação na matriz e outra na saída da ferramenta. A figura 64 mostra o local de realização dos ensaios de microdureza.

Figura 64 – Regiões de leitura da microdureza do aço SAE 1020, $\varnothing$ 1 mm.



Fonte: Arquivo pessoal.

A carga aplicada no ensaio de microdureza, método Vickers foi de 2,94 N (300 gf) e os resultados estão na tabela 16.

Tabela 16 – Valores de dureza Vickers para diferentes regiões do corpo de prova de $\varnothing$ 1 mm.

Perfil	Região 1	Região 2
30°	191,5 HV	187,5 HV
45°	203,1 HV	243,7 HV
60°	226,0 HV	240,3 HV

Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores que constam na tabela 16 são médias aritméticas de 3 leituras feitas por região estudada.

No caso da deformação dos corpos de prova de diâmetro maior, mais grãos foram deformados e o próprio identador do durômetro conseguir analisar uma gama de grãos para fazer a leitura da dureza.

Com os corpos de prova com diâmetro de 1 mm, poucos grãos sofreram uma deformação maior, neste caso, o identador marcou os grãos deformados e os não deformados. Uma solução para isso seria utilizar um identador de tamanho adequado para medir a dureza do grão afetado, mas o laboratório onde foi feito estas leituras não possui equipamento para esta finalidade.

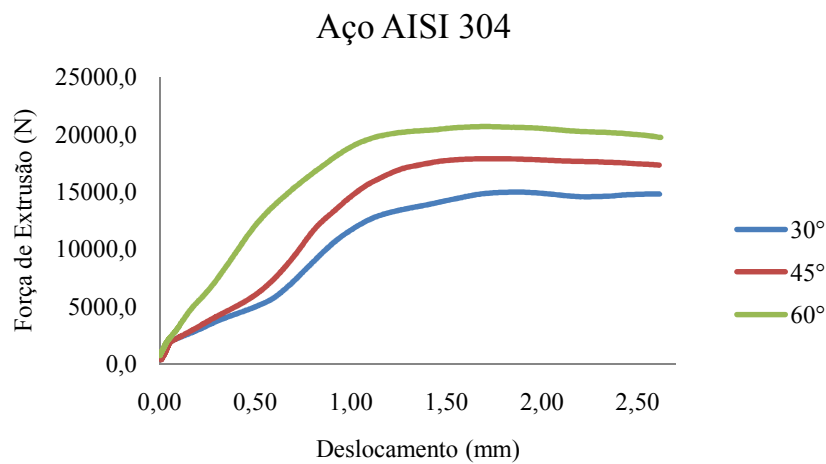
Este estudo detalhado da deformação nos grãos e o comportamento da microdureza na deformação foram analisados somente para o aço SAE 1020. Para os demais materiais,

somente as curvas de força por deslocamento dentro da matriz foram construídas devido ao excesso de informações no trabalho, onde o objetivo principal é estudar o processo de microextrusão e não o que acontece com cada material no processo. O estudo mais aprofundado para cada material pode ser feito em outro trabalho aproveitando os valores e corpos de prova trabalhados.

4.5.2 Aço AISI 304

O mesmo processo de conformação com as mesmas ferramentas de extrusão foram utilizados para aço inoxidável. Os corpos de prova de $\varnothing 4$ mm geraram curvas de força por deslocamento na matriz mostrado na figura 65.

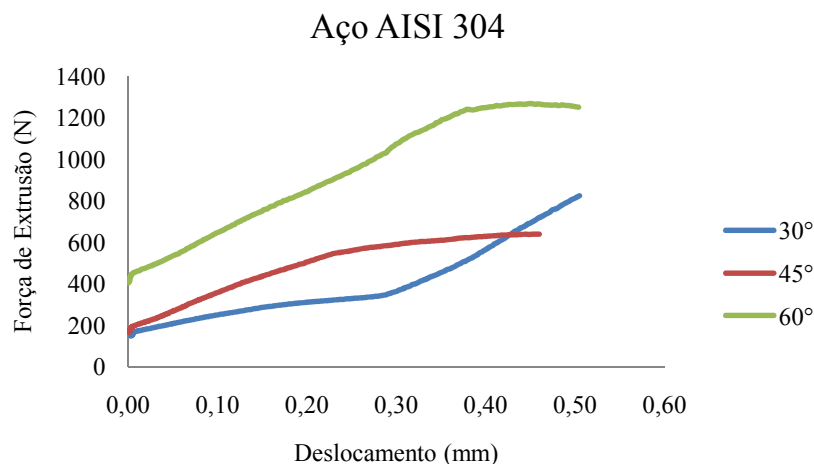
Figura 65 - Curva de força de extrusão para o aço AISI 304 com $\varnothing 4$ mm.



Fonte: Dados da pesquisa.

O aço inoxidável por sua natureza é um material que encrua com facilidade, aumentando a força necessária para deformar o material. A diferença entre os ângulos de extrusão mostra bem este fato, tendo uma boa diferença entre os valores medidos. A figura 66 mostra as curvas de força por deformação para os corpos de prova de $\varnothing 1$ mm.

Figura 66 - Curva de força de extrusão para o aço AISI 304 com $\varnothing$ 1 mm.



Fonte: Dados da pesquisa.

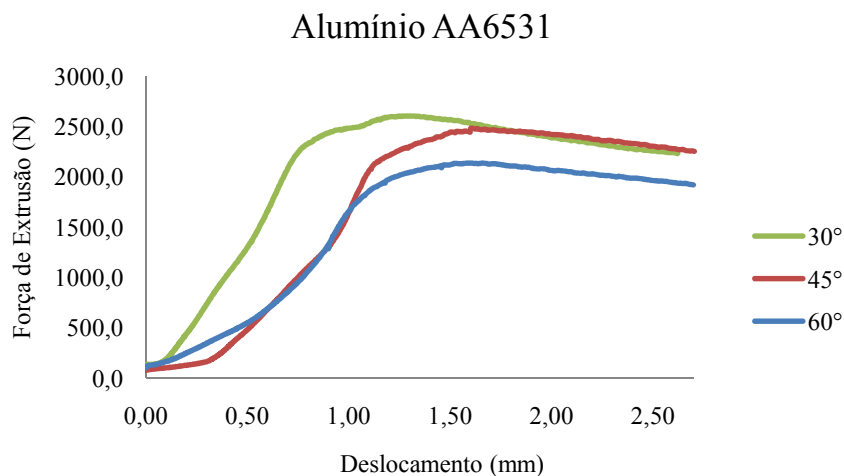
A extrusão com pino de $\varnothing$ 1 mm para o aço inoxidável apresentou melhor resultado do que o alcançado com o aço SAE 1020. Somente a curva com o ângulo de 30° ficou com um problema no processo de extrusão que resultou em sobre metal quando o corpo já estava sendo extrudado por 0,3 mm dentro da matriz. Outros ensaios para verificar este problema e colocar novo corpo de prova não foram possíveis, devido aos pinos de extrusão terem quebrado quando se fazia o experimento com o aço inoxidável.

Para os ângulos de 45 e 60° dos ensaios em pino de $\varnothing$ 1 mm, foi possível determinar a curva de força e a força máxima de extrusão, que ficou com uma diferença entre as forças de aproximadamente o dobro da força.

4.5.3 Alumínio AA6531

O mesmo processo de conformação com as mesmas ferramentas de extrusão foram utilizados para o alumínio. Os corpos de prova de $\varnothing$ 4 mm geraram curvas de força por deslocamento na matriz mostrada na figura 67.

Figura 67 - Curva de força de extrusão para o alumínio com $\varnothing$ 4 mm.

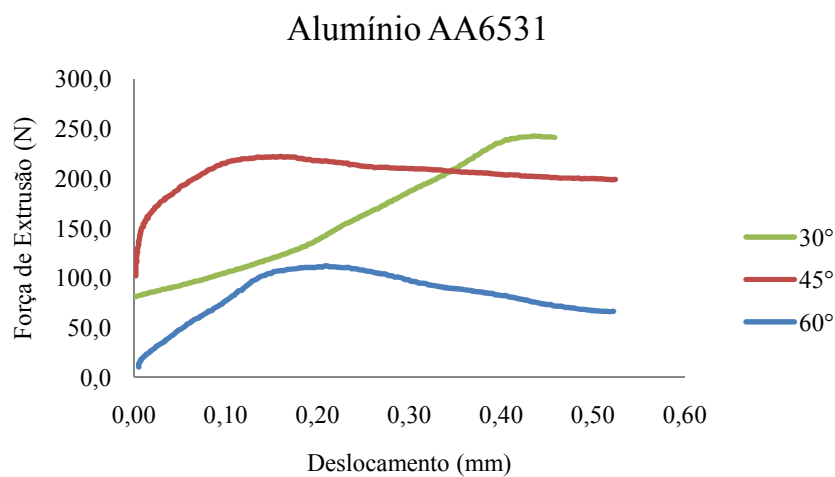


Fonte: Dados pessoais.

O ensaio para o alumínio mostrou aumento da força de extrusão a medida que o material entra na matriz e a diminuição após atingir um valor máximo.

A figura 68 mostra as curvas de força por deslocamento dentro da matriz com diâmetro de corpo de prova de $\varnothing$ 1 mm para o alumínio.

Figura 68 – Curva de força de extrusão para o alumínio com $\varnothing$ 1 mm.



Fonte: Dados da pesquisa.

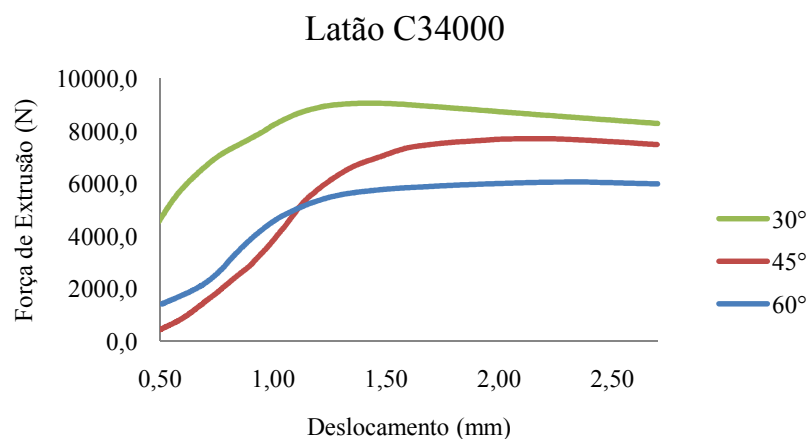
Como aconteceu com os ensaios realizados com o $\varnothing$ 4 mm, os corpos de prova de $\varnothing$ 1 mm também apresentaram picos de força e depois diminuição de força. Esta disposição da força de extrusão acontece devido a peça ao entrar na matriz, tocar o cone de redução até a primeira parte do material, terminar a redução e sair da matriz, esta força começa a cair. Este efeito está ligado diretamente ao atrito entre a peça e a ferramenta, que sofre variação ao longo do processo.

Esta variação de força pelo que comprova os experimentos ocorre quando o material possui baixa tensão de escoamento. Comparando com os valores obtidos para o aço inoxidável que manteve a força de extrusão constante. No caso do aço inoxidável, o encruamento mantém a força de extrusão constante.

4.5.4 Latão C34000

O mesmo processo de conformação com as mesmas ferramentas de extrusão foram utilizados para o latão. Os corpos de prova de $\varnothing$ 4 mm geraram curvas de força por deslocamento na matriz mostrada na figura 69.

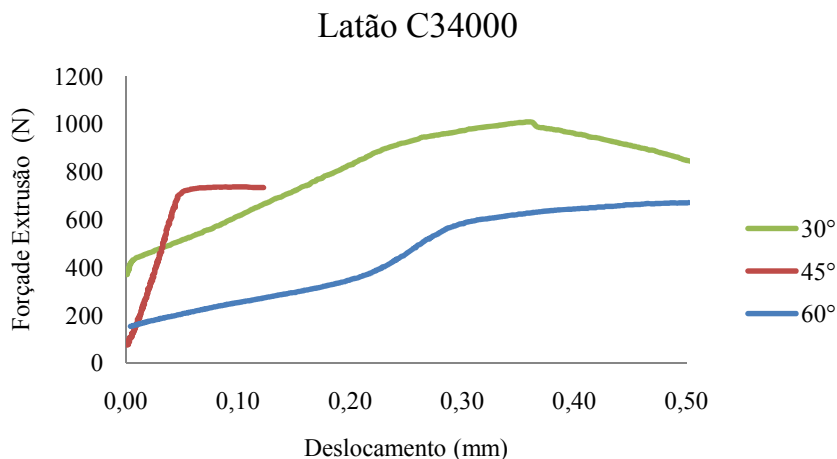
Figura 69 - Curva de força de extrusão para o latão com $\varnothing$ 4 mm.



Fonte: Dados da pesquisa.

Em um dos ensaios, o corpo de prova foi colocado com força para dentro da matriz, o que fez o material partir com carga de mais de 4000 N. Mas este não influenciou no resultado do ensaio. A figura 70 mostra as curvas retiradas com os corpos de prova de $\varnothing$ 1 mm.

Figura 70 - Curva de força de extrusão para o latão com diâmetro de 1 mm.



Fonte: Dados da pesquisa.

A grande dificuldade de trabalhar com corpos de prova muito pequenos é que com o processo escolhido para deformar, não é possível verificar se o corpo de prova está alocado sempre no mesmo ponto. A usinagem também é problemática, pois os equipamentos disponíveis são para peças de grande porte, com tornos de comprimento de barramento de 1 m no mínimo, não sendo ideal para este tipo de trabalho.

Os corpos de prova com $\varnothing$ 4 mm comportaram-se bem nos ensaios, com resultados confiáveis e poucos desvios de resultado. Os corpos de prova com $\varnothing$ 1 mm apresentaram mais desvios nos resultados dos ensaios. Estes erros são ocasionados pelo posicionamento da matriz, pino, lubrificante entre outros que influenciam na força exercida.

Os resultados alcançados indicam que quanto maior o ângulo de extrusão, menor a força de extrusão tanto para corpos de prova de tamanho meso como no caso dos corpos de prova de $\varnothing$ 4 mm e corpos de prova com $\varnothing$ 1 mm.

Os resultados de força máxima de extrusão foram utilizados para comparar com os resultados das equações de força de extrusão descritas no Capítulo 3.9 que estão colocados no próximo capítulo.

4.6 RESULTADO DAS EQUAÇÕES MATEMÁTICAS

Neste sub-capítulo será tratado os resultados de força de extrusão obtidos pelo método matemático e comparado com os valores medidos experimentalmente.

4.6.1 Aço SAE 1020

Utilizando as equações do capítulo 3.9 e com os dados retirados dos ensaios, os valores alimentados e obtidos com as equações 09, 12, 13 e 14.

$d_0 =$	4	mm
$d_f =$	3	mm
$h_k =$	2	mm
$k_{f0} =$	388	MPa
$k_f =$	629	MPa
$\alpha' =$	60	graus
$\mu =$	0,3	

$A_0 =$	12,57	mm ²
$A_1 =$	7,07	mm ²

$\varphi_A =$	0,575
$\alpha =$	1,0472 rad

$k_{fm} =$	508,5	MPa
------------	-------	-----

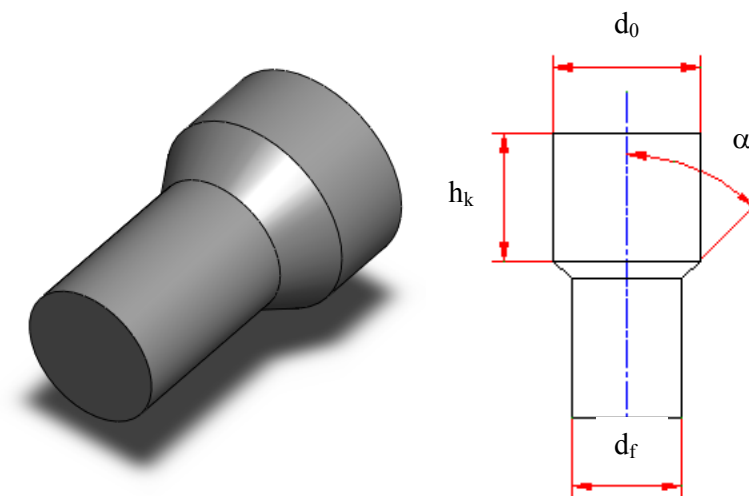
$F =$	13610,2	N
-------	---------	---

Os valores de k_f , k_{f0} foram retirados dos dados da curva de escoamento do material. Os valores de d_0 , d , ângulo e h_k do projeto da matriz e o valor de atrito μ , retirados das tabelas de calibração junto com o ensaio de anel de atrito.

Os valores de k_{fm} , φ_A e α foram calculados com as equações 14, 12 e 13 respectivamente. As áreas A_0 , A_1 , foram calculadas a partir do diâmetro inicial e do diâmetro final do pino, respectivamente.

A figura 71 mostra as incógnitas dos cálculos retirados do projeto da matriz e do experimento.

Figura 71 – Desenho do pino extrudado com as incógnitas das equações utilizadas nos cálculos.



Fonte: Arquivo pessoal.

Para uma melhor visualização dos resultados, a Tabela 17 mostra os valores para a força de extrusão calculada e medida no ensaio para os pinos de $\varnothing 4$ mm.

Tabela 17 – Valores para força calculada para o aço SAE 1020, $\varnothing 4$ mm de corpo de prova.

Perfil	Valor Calculado (N)	Valor Experimental (N)	Diferença
30°	11.379	6.815	66,9 %
45°	12.153	9.396	29,3 %
60°	13.610	10.781	26,2 %

Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores da tabela 17 indicam uma diferença entre os valores de força alta para o ângulo de extrusão de 30°. A medida que cresce o ângulo de extrusão, diminui esta diferença. Ao analisar a equação 09 para a força de extrusão, tem-se:

Força de extrusão = Força ideal + Força para vencer o atrito + Força de trabalho redundante + Força de atrito nas paredes da matriz.

$$F = A_0 \times k_{fm} \times \varphi_A \times \left[1 + \frac{2 \times \mu}{\text{sen}(2 \times \alpha')} + \frac{2}{3} \times \frac{\alpha}{\varphi_A} \right] + \pi \times d_0 \times \mu \times k_{f0} \times h_k$$

$$F = A_0 \times k_{fm} \times \varphi_A \times 1 \quad \text{Força ideal.} \quad (17)$$

$$F = A_0 \times k_{fm} \times \varphi_A \times \left(\frac{2 \times \mu}{\text{sen}(2 \times \alpha')} \right) \quad \text{Força de atrito.} \quad (18)$$

$$F = A_0 \times k_{fm} \times \varphi_A \times \left(\frac{2}{3} \times \frac{\mu}{\varphi_A} \right) \quad \text{Força de trabalho redundante.} \quad (19)$$

$$F = \pi \times d_0 \times \mu \times k_{f0} \times h_k \quad \text{Força de atrito na parede.} \quad (20)$$

A força redundante é a força necessária para deformar internamente os materiais, e esta deformação redundante depende do ângulo de extrusão e da redução de material dentro da matriz de extrusão. Para avaliar o efeito de cada um destes componentes sobre o resultado final dos cálculos, cada uma das equações descritas acima será calculada e comparada com a sua importância com o resultado final do cálculo.

A tabela 18 mostra o resultado destes valores calculados das equações 18, 19 e 20.

Tabela 18 – Valores para a força de extrusão calculada separadamente para o aço SAE 1020.

Perfil	Força ideal (N)	Força de atrito (N)	Força redundante (N)	Força atrito parede (N)	Força Total (N)
30°	3675	2546	2233	2925	11379
45°	3675	2205	3348	2925	12153
60°	3675	2546	4434	2925	13610

Fonte: Dados da pesquisa.

A força ideal trabalha com a energia necessária para deformar um material, como a redução nos três casos foi igual, a força também resultou em valores iguais. A força de atrito, ou o trabalho para vencer o atrito interno do material apresenta resultados iguais para os

ângulos de extrusão de 30° e 60°. A medida que aumenta o ângulo de extrusão, a força para vencer o atrito é menor, devido ao caminho percorrido pelo material na matriz ser menor. Os resultados dos cálculos indicam que o atrito é igual nos ângulos de 30° e 60° e menor para o ângulo de 45°. Somando com o valor de atrito na parede, que pela equação 09 permanece constante, o valor total de atrito não representa o que acontece realmente no processo de extrusão.

O valor para a força redundante aumenta, em paralelo ao ângulo de deformação. A deformação redundante ocorre na parte interna do material que não sofreu redução, podendo ser vista nas imagens metalográficas do centro do material, onde os grãos aparentemente não sofreram deformação. Com o aumento do ângulo de extrusão, o trabalho de deformação redundante deve aumentar, o que mostra os valores calculados na equação 09.

As diferenças entre os valores calculados e os medidos no experimento estão relacionadas com o atrito e a força redundante.

Os valores de cálculo para os pinos de $\varnothing$ 1 mm não serão apresentados, devido a problemas nos experimentos para o aço SAE 1020, não se conseguiu medir valores para a força de extrusão. Sem estes valores fica impossível fazer uma comparação entre os valores calculados de força e os valores medidos experimentalmente.

4.6.2 Aço AISI 304

O mesmo processo de cálculo foi utilizado para o aço inoxidável, e os resultados estão descrito na tabela 19.

Tabela 19 – Valores para força calculada para o aço AISI, $\varnothing$ 4 mm de corpo de prova.

Perfil	Valor Calculado (N)	Valor Experimental (N)	Diferença
30°	17.330	14.959	13,7 %
45°	18.942	17.892	5,5 %
60°	21.381	20.701	3,2%

Fonte: Dados da pesquisa.

Para os valores dos corpos de prova de $\varnothing$ 1 mm, o modelo de cálculo foi o mesmo utilizado para os valores dos corpos de prova de $\varnothing$ 4 mm. A tabela 20 mostra os valores para a força de extrusão calculada e medida para os corpos de prova de $\varnothing$ 1 mm do aço AISI 304.

Tabela 20 – Valores para a força calculada para o aço AISI 304, $\varnothing$ 1 mm de corpo de prova.

Perfil	Valor Calculado (N)	Valor Experimental (N)	Diferença
30°			
45°	1.220	649	46,8 %
60°	1.363	1.267	7 %

Fonte: Dados da pesquisa.

Para os valores do aço inoxidável, a diferença calculada ficou baixa para o ângulo de 60° nos dois casos, onde a força para deformar é maior. A medida que cai a força necessária, o erro em relação as equações aumenta chegando a aproximadamente 47 % para o ângulo de 45° dos corpos de prova de $\varnothing$ 1 mm.

A tabela 21 mostra os valores de força calculadas separadamente para os corpos de prova de diâmetro 4 mm.

Tabela 21 – Valores para a força de extrusão calculada separadamente para o aço AISI 304.

Perfil	Força ideal (N)	Força de atrito (N)	Força redundante (N)	Força atrito parede (N)	Força Total (N)
30°	6676	3083	4052	3519	17330
45°	6676	2670	6077	3519	18942
60°	6676	3083	8103	3519	21381

Fonte: Dados da pesquisa.

Apesar dos erros conceituais para a força de atrito, os valores para o cálculo de força para os corpos de prova de $\varnothing$ 4 mm apresentaram valores muito bons em comparação com os valores obtidos experimentalmente. Isso ocorre devido ao aço inoxidável apresentar um encruamento alto a medida que o material deforma, fazendo que o valor da força redundante sege muito próximo do valor no experimento.

A tabela 22 mostra os valores para a força de extrusão, calculadas separadamente para os corpos de prova de $\varnothing$ 1 mm.

Tabela 22 – Valores para a força de extrusão calculada separadamente para o aço AISI 304.

Perfil	Força ideal (N)	Força de atrito (N)	Força redundante (N)	Força atrito parede (N)	Força Total (N)
30°					
45°	520	104	25	220	649
60°	520	120	407	220	1267

Fonte: Dados da pesquisa.

O valor de força redundante para o ensaio com ângulo de extrusão de 45° é muito baixo em comparação com os resultados obtidos para o ensaio com diâmetro maior. Isso mostra que o ensaio realizado para estes corpos de prova apresentaram problema durante o ensaio.

4.6.3 Alumínio AA 6531

Foi aplicado ao alumínio o mesmo processo de cálculo utilizado nos materiais anteriores, os resultados estão descritos nas tabelas 23 e 24.

Tabela 23 – Valores para força calculada para o alumínio, Ø 4 mm de corpo de prova.

Perfil	Valor Calculado (N)	Valor Experimental (N)	Diferença
30°	7.401	2.140	245 %
45°	8.186	2.483	229 %
60°	9.050	2.600	248 %

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 24 – Valores para a força calculada para o alumínio, Ø 1 mm de corpo de prova.

Perfil	Valor Calculado (N)	Valor Experimental (N)	Diferença
30°	473	112	322 %
45°	518	221	134 %
60°	576	242	138 %

Fonte: Dados da pesquisa.

Para os valores relacionados com o alumínio que tem baixo valor de força de extrusão, o erro relacionado com as equações ficou alto, com erro em alguns casos de mais de 300 %. Diferente dos aços, nenhum valor se aproximou dos valores calculados.

A tabela 25 mostra os valores de força calculadas separadamente para os corpos de prova de diâmetro 4 mm para o alumínio.

Tabela 25 – Valores para a força de extrusão calculada separadamente para o alumínio.

Perfil	Força ideal (N)	Força de atrito (N)	Força redundante (N)	Força atrito parede (N)	Força Total (N)
30°	2718	1255	1649	1779	7401
45°	2718	1087	3202	1779	8786
60°	2718	1255	3298	1779	9050

Fonte: Dados da pesquisa.

As diferenças entre os valores calculados e os medidos na tabela 23, estão relacionadas com dois fatores, a força de atrito calculada e a força redundante. Se forem somados os valores da força de atrito e atrito na parede, o valor é maior que o da força ideal para deformar, e isso não tem como acontecer, mostrando um erro no modelamento da equação para este item.

A tabela 26 mostra os valores de força calculadas separadamente para os corpos de prova de diâmetro 1 mm para o alumínio.

Tabela 26 – Valores para a força de extrusão calculada separadamente para o alumínio.

Perfil	Força ideal (N)	Força de atrito (N)	Força redundante (N)	Força atrito parede (N)	Força Total (N)
30°	212	49	101	111	473
45°	212	42	153	111	518
60°	212	49	204	111	576

Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores calculados e os medidos nos experimentos mostrados na tabela 24 mostram uma melhor aproximação com os resultados em comparação com os valores para os corpos de

prova de $\varnothing$ 4 mm, mas mesmo assim, a diferença entre ultrapassa o 100 %. A diferença é maior que se for somado os valores de força de atrito e redundante, mostrando que o fator preponderante no processo em comparação com os valores calculados é o encruamento do material. As maiores diferenças entre os valores calculados e os medidos foram exatamente com o alumínio que apresenta o menor coeficiente de encruamento.

4.6.4 Latão C34000

O mesmo processo de cálculo foi utilizado para o latão, e os resultados estão descritos nas tabelas 27 e 28.

Tabela 27 – Valores para força calculada para o latão, $\varnothing$ 4 mm de corpo de prova.

Perfil	Valor Calculado (N)	Valor Experimental (N)	Diferença
30°	7.489	6.070	18,9 %
45°	8.449	7.717	8,7 %
60°	9.626	9.066	5,8 %

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 28 – Valores para a força calculada para o latão, $\varnothing$ 1 mm de corpo de prova.

Perfil	Valor Calculado (N)	Valor Experimental (N)	Diferença
30°	913	671	26,5 %
45°	964	737	23,5 %
60°	1047	1009	3,6 %

Fonte: Dados da pesquisa.

Os erros associados às equações com os valores obtidos nos experimentos ficaram próximos dos valores calculados para o ângulo de 60° e o erro aumenta conforme nos demais ângulos utilizados.

A tabela 29 mostra os valores de força calculadas separadamente para os corpos de prova de diâmetro 4 mm para o latão.

Tabela 29 – Valores para a força de extrusão calculada separadamente para o latão, Ø 4 mm.

Perfil	Força ideal (N)	Força de atrito (N)	Força redundante (N)	Força atrito parede (N)	Força Total (N)
30°	3521	813	2140	1015	7489
45°	3521	704	3209	1015	8449
60°	3521	813	4277	1015	9626

Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores para a tabela 17 apresentam valores significativos entre os valores calculados e os medidos nos experimentos. Ao analisar os valores de força de atrito e força redundante para a equação 09 aplicada ao latão, nota-se que a força ideal e a força redundante são os fatores que mais influenciam e depois o atrito. Como o latão apresentou um coeficiente de encruamento alto, os valores de força calculada e medida nos ensaios apresentam menor diferença.

A tabela 30 mostra os valores de força calculadas separadamente para os corpos de prova de diâmetro 1 mm para o latão.

Tabela 30 – Valores para a força de extrusão calculada separadamente para o latão, Ø 1 mm.

Perfil	Força ideal (N)	Força de atrito (N)	Força redundante (N)	Força atrito parede (N)	Força Total (N)
30°	274	63	449	127	913
45°	274	54	509	127	964
60°	274	63	583	127	1047

Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores calculados e medidos apresentados na tabela 28 mostram bons resultados, em comparação com os demais materiais analisados neste trabalho. Ao analisar as forças presentes no processo de deformação, a tabela 30 mostra que para o modelo de cálculo os valores de maior impacto são os de força redundante, que no caso do latão que apresenta valores de encruamento alto, fazem sentido com os valores medidos na prática.

4.6.5 Análise Comparativa dos Resultados

Os erros associados com os valores para os corpos de microextrusão podem estar relacionados com algumas situações: A primeira está ligada ao processo utilizado que dificulta o posicionamento dos pinos dentro da matriz e não garantindo o seu posicionamento. As curvas de escoamento, apesar de apresentarem valores similares para os ensaios diminuindo o diâmetro do corpo de prova, não foi possível determinar a curva de escoamento utilizando corpos de prova de $\varnothing$ 1 mm pelo motivo de instabilidade no ensaio, tombando todos os corpos de prova.

Outro elemento para a diferença de valores é a precisão dimensional entre a matriz e o pino de extrusão. Uma diferença de 0,1 mm em uma matriz e 1 mm representa 10% do tamanho. Os modelos matemáticos utilizam o valor inteiro sem levar em consideração a diferença de medida. Esse problema dimensional foi também verificado no trabalho de Liu (2012) que aplicou simulação numérica para determinar a tensão de um pino extrudado através da tensão de Von Misses.

O principal fator de diferença entre os valores calculados e medidos, tanto para o processo meso como para o processo micro está relacionado com duas forças presentes no processo, o trabalho para vencer o atrito e o trabalho redundante. Dentre estes dois esforços, o que diferencia o trabalho redundante é o coeficiente de encruamento. A tabela 31 mostra um comparativo entre os coeficientes de encruamento e os valores médios de diferença de força para os corpos de prova de $\varnothing$ 4 mm.

Tabela 31 – Comparativo entre coeficiente de encruamento e diferença de força calculada e medida para corpos de prova de $\varnothing$ 4 mm.

Material Analisado	Coeficiente de encruamento	Diferença de força calculada e medida nos ensaios
Aço SAE 1020	0,2496	40,8 %
Aço AISI 304	0,4522	7,5 %
Alumínio AA6531	0,1981	240,7 %
Latão ASTM C34000	0,3697	11,1 %

Fonte: Dados da pesquisa.

Analisando a tabela 31, quanto maior o coeficiente de encruamento, menor a diferença entre os valores calculados e os medidos no experimento. O coeficiente de encruamento está

diretamente ligado a tensão de escoamento do material, afetando os cálculos na equação 09. O coeficiente de encruamento afeta os valores da força de trabalho redundante, onde nos cálculos parece estar sendo superestimada, principalmente para o alumínio.

Além do coeficiente de encruamento, o valor da força de atrito tratada na equação 09 apresenta problemas de grandeza. Por geometria, quanto menor o ângulo de extrusão, maior o comprimento de contato na redução do material, sendo assim maior deveria que ser o atrito. Mas, analisando a força de atrito com a variação do ângulo, nota-se que para valores de ângulo de 30° e 60° , os valores de força de atrito é o mesmo e para o ângulo de 45° entre os valores.

O coeficiente de encruamento somado com o erro de definição da equação é o maior responsável pelas diferenças entre os valores de força calculada e medida nos experimentos. No caso do aço inoxidável que apresenta valores muito bons, o encruamento excessivo deste material acaba compensado os erros de definição de atrito, dando resultados satisfatórios.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa realizada sobre quatro materiais diferentes, dois ferrosos e dois não ferrosos se mostra eficaz na comparação de resultados, pois os materiais escolhidos mostram características diferentes quando aplicados a esforços de conformação.

Aplicando os quatro materiais escolhidos em ensaios variados foi possível verificar a influência do tamanho da peça nos resultados obtidos. Após aplicar os ensaios de compressão para determinar: as curvas de escoamento, o coeficiente de atrito e a força através do ensaio de microextrusão, comparando com valores obtidos através de equações matemáticas, algumas conclusões foram identificadas nos experimentos.

O ensaio de compressão para determinar as curvas de escoamento pode ser aplicado sem problemas para corpos de prova para tamanho macro, meso, onde o resultado do ensaio se comporta da mesma forma para tamanhos macros e mesos, sendo considerado tamanho macro, peças com duas ou mais dimensões maiores que 10 mm e meso, peças com duas dimensões que variam entre 1 mm e 10 mm.

Os resultados para o atrito entre peça e ferramenta utilizando o ensaio de anel de atrito mostra que a medida que se diminui o tamanho de uma peça, o atrito tende a ser menor quando aplicamos o modelo de Amontons – Coulomb. Apesar de esta diferença não ser grande, mas o valor do atrito cai. O lubrificante utilizado a base de bissulfeto de molibdênio não é eficiente para ser aplicado para micropeças.

A microextrusão de peças com diâmetro de 1 mm se mostra difícil, desde a fabricação do ferramental, polimento da matriz e extrusão. Os equipamentos utilizados para a usinagem dos ferramentais e corpos de prova são eficientes para os corpos de prova de diâmetro 4 mm. Para os corpos de prova com diâmetro de 1 mm, estes equipamentos são demasiados grandes, difíceis de trabalhar com peças pequenas. O polimento aplicado as peças se mostrou eficiente com os corpos de prova depois de extrudados não apresentando marcas de risco provenientes das matrizes de extrusão.

O ensaio de microextrusão utilizando a máquina de ensaios universal se mostra eficiente para captura dos valores de força e deslocamento para os materiais analisados. O problema está na matriz, onde o atrito entre as colunas guias interfere nos resultados de força, forçando no caso do experimento a dar uma folga exagerada para diminuir este efeito. Outros dados sobre a extrusão das peças com $\varnothing$ 1 mm poderiam ter sido tirados se o pino que

empurrava o corpo de prova para dentro da matriz não tivesse sido quebrado. O pino utilizado para este fim também tinha o diâmetro de 1 mm. A quebra dos dois pinos foi causada por desalinhamento na hora do ensaio. Entretanto, os resultados indicam que trabalhando com valores pequenos de dimensão, está se deformando praticamente poucos grãos, onde o raio de curvatura na entrada do cone de extrusão e de saída praticamente deforma meio grão, dependendo do tamanho deste, visto em detalhe no ensaio metalográfico do aço SAE 1020.

Comparando os valores de força calculados com os valores retirados do experimento, a conclusão é que as equações dão bons resultados quando a força de extrusão é grande e o ângulo de extrusão é de 60° na equação. Saindo fora destes valores, o erro aumenta e com a força de extrusão baixa, também. Dois fatores contribuem para este fato, o trabalho de atrito e o trabalho de deformação redundante. A força de atrito para vencer a resistência do material deve ser melhor analisada e a equação de força para extrusão deve ser corrigida, para uso na meso e microextrusão. A deformação redundante está muito relacionada com o coeficiente de encruamento.

O que se pode perceber é que na equação de força utilizada, quanto maior o coeficiente de encruamento, menor a diferença entre os valores de força calculada e medida no experimento. O pior caso para este trabalho foi a análise do alumínio, que apresentou erros de mais de 100 %, na comparação entre os valores de força calculada e medida.

No geral, no trabalho de microextrusão de peças, o material se comporta de maneira diferente do que para peças de tamanho macro devido a alguns fatores que são desprezados no processo macro, mas no processo micro influenciam no resultado final. A primeira delas é com o equipamento de usinagem, onde uma diferença de 0,1 mm é razoável para peça de tamanho macro, mas para peça de tamanho micro é mais de 10 % do tamanho dela. Outro fator é a lubrificação que para o processo macro é eficiente, para o processo micro se torna completamente ineficiente, necessitando de lubrificantes específicos para esta finalidade. As peças pequenas são difíceis de manipular e qualquer erro pode danificar e inutilizar as peças.

Para se analisar a conformação de peças de tamanho micro, pode se utilizar como guia o processo de conformação macro, porém o conhecimento deve ser agregado com efeitos que influenciam no processo, principalmente o atrito e a influência do ângulo de extrusão.

TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, outros aspectos do processo de conformação micro devem ser estudados, como:

- Análise do tamanho de partículas nos lubrificantes para determinar o tamanho ideal para o trabalho de conformação;
- Utilizar outra estratégia de extrusão como a extrusão indireta e comparar com os resultados obtidos com a extrusão direta em relação ao atrito e deformação dos grãos.
- Redesenhar a matriz de extrusão, utilizando processo de usinagem com ferramental feito sob medida para um comprimento extrudado maior, principalmente para corpos de prova de tamanho $\varnothing$ 1 mm ou menores.
- Quantificar o atrito utilizando processo de duplo copo e comparar com os valores encontrados nos ensaios de anel de atrito.
- Revisar a equação de força utilizada, dando ênfase ao atrito e o ângulo de extrusão.

REFERÊNCIAS

Abdella, K.: **Inversion of full range stress strain relation for stainless steel alloys.** International Journal of Non – Linear Mechanics. Elsevier, 2006. Volume 41, pg. 456 – 463.

An, Y. G.; Vegter, H.: **Analytical and experimental study of frictional behavior in through thickness compression test.** Journal of Materials Processing Technology. Elsevier, 2005. Volume 160, pg. 148 – 155.

Anderson, K.; Kivivuori, S.; Korhonen, A. S.: **Effect of the heat transfer coefficient in ring compression tests.** Journal of Materials Processing Technology. Elsevier, 1996. Volume 62, pg. 10 – 13.

Bramfitt, B. L.: **Annealing of Steel.** In: ASM Handbook – Heat Treating. Volume 4, ASM International. pg 102 – 135, 1991.

Brito, A. M. G.; Schaeffer, L.: **Utilização de Diferentes Modelos de Atrito na Simulação Numérica do Forjamento a Frio de Ligas de Alumínio.** 12º Conferência Internacional de Forjamento – 28º Senafor. Gráfica Metropole, 2008. Pg 141 – 157. ISBN: 978-85-89401-77-7

Brito, A. M. G.; Schaeffer, L.: **Utilização de Diferentes Modelos de Atrito na Simulação Numérica do Forjamento a Frio de Ligas de Alumínio.** 12º Conferência Internacional de Forjamento – 28º Senafor. Gráfica Metropole, 2008. Pg 141 – 157. ISBN: 978-85-89401-77-7

Brooks, R.: **Heat Treating of Aluminum Alloys.** In: ASM Handbook – Heat Treating. Volume 4, ASM International. pg 1861 – 1960, 1991.

Cao, J. et al: **Microforming: Experimental investigation of extrusion process for micropins and its numerical simulation using RKEM.** Journal of Manufacturing Science and Engineering: ASME, 2004. Volume 126, pg 642 – 652.

Cerveira, R. L. L. P.; Silva, F. R. D. A.; Batalha, G. F.: **Simulação de Processos de Fabricação: Influência do Efeito da Escala.** I Workshop de Processo de Fabricação – EPUSP – ITBA – AHK, 2004.

Chang, W. L.; Fu, M. W.: **Experimental studies and numerical modeling of the specimen and grain size effects on the flow stress of sheet metal in microforming.** Materials Science and Engineering: A. Elsevier, 2011 edições 25 -26, pg 7674 – 7683.

Chen, J.; Young, B.: **Stress Strain curve for stainless steel at elevated temperatures.** Engineering Structures. Elsevier, 2006 Volume 28, pg 229 – 239.

Cohen, A.: **Heat Treating of Copper Alloys.** In: ASM Handbook – Heat Treating. Volume 4, ASM International. pg 1960 – 2010, 1991.

Dutton, R. E. et al: **Effect of flow softening on ring test calibration curve.** Materials Science and Engineering. Elsevier, 1999. Volume A270, pg. 249 – 253.

Eichenhueller, B.; Egerer, E.; Engel, U.: **Microforming at elevated temperature – forming and material behavior.** International Journal advanced Manufacture Technology: Springer – Verlag, 2007. Volume 33, pg 119 – 124.

Engel, U.: **Tribology in microforming.** Wear: Elsevier, 2006. Volume 260, pg 265 – 273.

Engel, U.; Eckstein, R.: **Microforming – from basic research to its realization.** Journal of Material Processing Technology: Elsevier, 2002. Volume 125 – 126, pg 35 – 44.

Fleischer, J. et all: **Quality assurance in micro production.** Microsystem Technologies: Springer – Verlag, 2006. Volume 12, pg 707 – 712.

Garcia, A. ; Spim, J. A.; Santos, C, A.: **Ensaio dos Materiais.** Livros Técnicos e Científicos. 1º Edição, 1999.

Gau, J. T.; Principe, C.; Wang, J.: **An experimental study on size effects on flow stress and formability of aluminum and brass for microforming.** Journal of Material Processing Technology: Elsevier, 2007. Volume 184, pg 42 – 46.

Geiger, M.; et all.: **Microforming.** Anais do CIRP, 2001. Pg 445 – 462.

Geißdörfer, S.; Engel, U.; Geiger, M.: **FE – simulation of microforming processes applying a mesoscopic model.** International Journal of Machine Tools & Manufacture: Elsevier, 2006. Volume 46, pg 1222 – 1226.

Hartley, R. S.; Cloete, T. J.; Nurick, G. N.: **An experimental assessment of friction effects in the split Hopkinson pressure bar using the ring compression test.** International Journal of Impact Engineering. Elsevier, 2007. Volume 34, pg. 1705 – 1728.

He, L. H.; Swain, M. V.: **Nanoindentation derived stress – strain properties of dental materials.** Dental Materials. Elsevier, 2007. Volume 23, pg 814 – 821.

Jeon, J.; Bramley, A. N.: **A friction model for microforming.** International Journal Advance Manufacture Technology: Springer – Verlag, 2007. Volume 33, pg 125 – 129.

Jeong, H. W.; Hata, S.: **Microforming of three – dimensional microstructures from thin – film metallic glass.** Journal of Microelectromechanical System: IEEE, 2003. Volume 12, pg 42 – 52.

Kim, Y. S.; Nam, S. M.; Kim, S. J.: **Strain rate dependence of deformation behavior of high nitrogen austenitic steels.** Journal of Materials Processing Technology. Elsevier, 2007. Volume 187 – 188, pg 575 – 577.

Krishnan, N. et all: **Investigation of deformation characteristics of micropins fabricated using microextrusion.** Orlando: International Mechanical Engineering Conference and Exposition: ASME, 2005.

Krishnan, N.; Cao, J.; Dohda, K.: **Microforming: Study of friction conditions and the impact of low friction / high – strength die coatings on the extrusion of micropins.** Orlando: International Mechanical Engineering Conference and Exposition: ASME, 2005.

Liang, Y. et al: **Study on micromachine tools in fabrication of microparts.** China: 1st International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems: IEEE. 2006.

Linfa Peng, L. et al: **Friction Behavior Modeling and Analysis in Micro/Meso Scale Metal Forming Process.** Materials and Design. Elsevier, 2010. Volume 31, pg 1953–1961.

Linfa Peng, L. et al: **Friction Behavior Modeling and Analysis in Micro/Meso Scale Metal Forming Process.** Materials and Design, Elsevier, 2010. Volume 31, pg 1953–1961.

Liu J.G. et al: **A constitutive model for modeling of the deformation behavior in microforming with a consideration of grain boundary strengthening.** Computational Materials Science. Elsevier, 2012 pg 85 – 94.

Luo, X. et al: **Design of ultraprecision machine tools with applications to manufacture of miniature and micro components.** Journal of Material Processing Technology: Elsevier, 2005. Volume 167, pg 515 – 528.

Mccullough, K. Y. G.; Fleck, N. A.; Ashby, M. F.: **Uniaxial Stress Strain Behavior of Aluminum Alloy Foams.** Acta Materialia. Pergamon, 1999. Volume 47, pg 2323 – 2330.

Miao, J. C. et al: **Review of dynamic issues in micro end milling.** Journal Advance Manufacture Technology: Springer – Verlag, 2007. Volume 31, pg 897 – 904.

Microcell: **Case Study of Renewable Energy Manufacturing in North Caroline.** Disponível em: <<http://www.microcell.com.br>> Acesso no dia 22/01/2009.

Moosbrugger, C.: **Atlas of Stress Strain Curves.** ASM International. 2^o Edição, 2002.

Osman, T. M.: **Introduction to the Mechanical Behavior of Metals.** In: ASM Handbook - Mechanical Testing and Evaluation. Volume 8, ASM International. pg. 20 – 41, 2004.

Parazit S. A. et al: **Effect of specimen size and grain size on deformation in microextrusion.** Journal of Manufacturing Processes. Elsevier, 2011. Volume 13 edição 2, pg 153-159.

Parka, S. K.; Choea, S. Y.; Choib, S. H.: **Dynamic Modeling and Analysis of a Shell-and-Tube Type Gas-to-Gas Membrane Humidifier for PEM Fuel Cell Applications.** International Journal of Hydrogen Energy. Elsevier, 2008. Volume 33, pg 2273 – 2282.

Petersen, S. B.; Martins, P. A. F.; Bay, N.: **An alternative ring test geometry for the evaluation friction under low normal pressure.** Journal of Materials Processing Technology. Elsevier, 1998. Volume 79, pg 14 – 24.

- Qin, Y.: **Micro – forming and miniature manufacturing system – development needs and perspectives.** Journal of Material Processing Technology: Elsevier, 2006. Volume 177, pg 8 – 18.
- Qu, W.; Wenzel, C.; Drescher, K.: **Fabrication of low-cost capacitive accelerometers by 3D microforming.** Canberra: Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and devices Proceedings: IEEE, 1997.
- Rajurkar, K.; Madou M.: **Processes.** Micromanufacturing, International Research and Development. Springer Verlag, 2007.
- Rasmussen, K. J. R.: **Full range stress strain curves for stainless steel alloys.** Journal of Constructional Steel Research. Elsevier, 2003. Volume 59, pg 47 – 61.
- Robinson, T.; Ou, H.; Armstrong, C. G.: **Study on ring compression test using physical modeling and FE simulation.** Journal of Materials Processing Technology. Elsevier, 2004. Volume 153 – 54, pg. 54 – 59.
- Rosochowski, A. et al: **Micro – extrusion of ultra – fine grained aluminum.** International Journal advanced Manufacture Technology: Springer – Verlag, 2007. Volume 33, pg 137 – 146.
- Rudkins, N. T. et al: **Friction modeling and experimental observations in hot ring compression tests.** Journal of Materials Processing Technology. Elsevier, 1996. Volume 60, pg 349 – 353.
- Sanaye, S.; Ardali, M. R.: **Estimating the Power and Number of Microturbines in Small - Scale Combined Heat and Power Systems.** Applied Energy. Elsevier, 2009. Volume 86 edição 6, pg 895 - 903.
- Sanchez – Salmeron, A. J. et al: **Recent development in micro – handling systems for micro – manufacturing.** Journal of Material Processing Technology: Elsevier, 2005. Volume 167, pg 499 – 507.
- Saotome, Y.; Iwazaki, H.: **Superplastic extrusion of microgear shat of 10 μm in module.** Microsystem Technologies: Springer – Verlag, 2000. Volume 6, pg 126 – 129.
- Sahin, M.; Cetinarslan, C. S.; Akata, H. E.: **Effect of surface roughness on friction coefficient during upsetting processes for different materials.** Materials and Design. Elsevier, 2007. Volume 28, pg. 633 – 640.
- Saotome, Y.; Inoue, A.: **New amorphous alloys as micromaterials and the processing technologies.** Miyazaki: The Thirteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems: IEEE, 2000.
- Sasso, M.; Newaz, G.; Amodio, D.: **Material characterization at high strain rate by Hopkinson bar test and finite element optimization.** Material Science and Engineering A. Elsevier, 2007. Volume 487, pg 289 – 300.

Schwarz, O. et al: **Development of a Microstructured Reactor for Heterogeneously Catalyzed Gas Phase Reactions: Part I. Reactor Fabrication and Catalytic Coatings.** Chemical Engineering Journal. Elsevier, 2009. Volume 145, pg 420 – 428.

Schwarz, O. et al: **Development of a Microstructured Reactor for Heterogeneously Catalyzed Gas Phase Reactions: Part II. Reactor Characterization and Kinetic Investigations** Chemical Engineering Journal. Elsevier, 2009. Volume 145, pg 429 – 435.

Schaeffer, L.: **Conformação mecânica.** Editora Imprensa Livre. 2º Edição, 2004.

Schaeffer, L.: **Forjamento, Introdução ao Processo.** Editora Imprensa Livre. 2º Edição, 2006.

Schmidt, J.; Tritschler, H.: **Micro cutting of steel.** Microsystem Technologies: Springer – Verlag, 2004. Volume 10, pg 167 – 174.

Sheikh, H.; Serajzadeh, S.: **Estimulation of flow stress behavior of AA 5083 using artificial neural networks with regard to dynamic strain ageing effect.** Journal of Materials Processing Technology. Elsevier, 2008. Volume 196, pg 115 – 119.

Sofuoglu, H.; Rasty, J.: **On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test.** Tribology International. Elsevier, 1999. Volume 32, pg. 327 – 335.

Tschätsch, H.: **Hanbuch Umformtechnik: Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge.** 3 Auflage. Darmstadt: Hoppenstedt TTV, 1990.

Vollerten, F. et al: **State of art in micro forming and investigations into micro deep drawing.** Journal of Material Processing Technology: Elsevier, 2004. Volume 151, pg 70 – 79.

Vollertsen, F.; Niehoff, H. S.; Hu, Z.: **State of the art in micro forming.** International Journal of Machine Tools & Manufacture: Elsevier, 2006. Volume 46 pg 1172 – 1179.

Voort, G. F. V.: **Microindentation Hardness Testing.** In ASM Handbook – Mechanical Testing and Evaluation. Volume 8, ASM International. pg 469 – 495, 2000.

Yoshida, K.; Kuboki, I.; Norasethasopon, S.: **Surface quality improvement of multistage forged microparts for wristwatches.** Journal of Material Processing Technology: Elsevier, 2003. Volume 143 – 144, pg 362 – 366.

Wahabi, M. E.; Cabrera, J. M.; Prado, J. M.: **Hot working of two AISI 304 steels: a comparative study.** Materials Science and Engineering A. Elsevier, 2003. Volume 343, pg 116 – 125.

Wang, C. J. et al: **Size effects of cavity dimension on the microforming ability during coining process.** Journal of Material Processing Technology: Elsevier, 2007. Volume 187 – 188, pg 256 – 259.

Watanabe, N. et al: **Fabrication of micro parts using only electrochemical process.** Interlaken: 14th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems: IEEE, 2001.

Zhan, M. Y., et al: **Flow stress behavior of porous FVS0812 aluminum alloy during hot compression.** Mechanics Research Communication. Elsevier, 2006. Volume 33, pg 508 – 514.

Zhenyu, L.; Huier, C.: **Multi - Objective Optimization Design Analysis of Primary Surface Recuperator for Microturbines.** Applied Thermal Engineering. Elsevier, 2008. Volume 28, pg 601 – 610.

APÊNDICE A – Microdureza dos Materiais Utilizados nos Experimentos Antes dos Ensaios

O ensaio de microdureza realizado nos materiais mostrou que com a deformação, a microdureza se elevou dos materiais, tanto na seção transversal como na seção longitudinal. A Tabela 32 mostra o resultado do ensaio de microdureza para o aço SAE 1020, seção transversal antes do ensaio de microextrusão.

Tabela 32 - Microdureza do aço SAE 1020, seção transversal.

Leituras	HV	Carga
1	114,7	10 N
2	114,9	10 N
3	112,9	10 N
4	118,6	10 N
5	117,9	10 N
Media	115,8	
DP	2,4	

Fonte: Dados da pesquisa.

Para o aço inox AISI 304, o resultado do ensaio de microdureza na seção transversal antes do ensaio de compressão está descrito na Tabela 33.

Tabela 33 - Microdureza do aço AISI 304, seção transversal.

Leituras	HV	Carga
1	176,2	2 N
2	170,1	2 N
3	164,7	2 N
4	174,6	3 N
5	175	3 N
6	152,1	3 N
Média	168,8	
DP	9,2	

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 34 mostra a microdureza do alumínio AA6531 para a seção transversal antes do ensaio de microextrusão.

Tabela 34 - Microdureza do alumínio AA6531, seção transversal.

Leituras	HV	Carga
1	35,8	2 N
2	35,6	2 N
3	39,2	2 N
4	36,6	1 N
5	36,8	1 N
6	37,9	1 N
Média	37,0	
DP	1,4	

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 35 mostra a microdureza da seção transversal do latão antes do ensaio de microextrusão.

Tabela 35 - Microdureza do latão C34000, seção transversal.

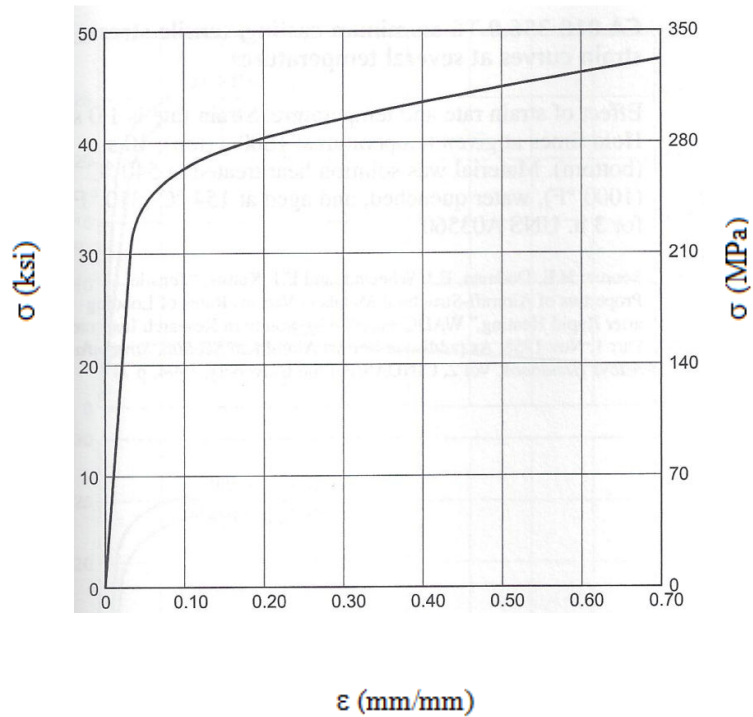
Leituras	HV	Carga
1	82,7	3 N
2	81,6	3 N
3	78,8	3 N
4	78,3	2 N
5	84,6	1 N
6	82,8	3 N
7	80,3	5 N
Média	81,3	
DP	2,3	

Fonte: Dados da pesquisa.

ANEXO A – Curvas de Tensão por Deformação Utilizadas no Trabalho.

A figura 72 mostra a curva de tensão de engenharia por deformação para o alumínio AA6531.

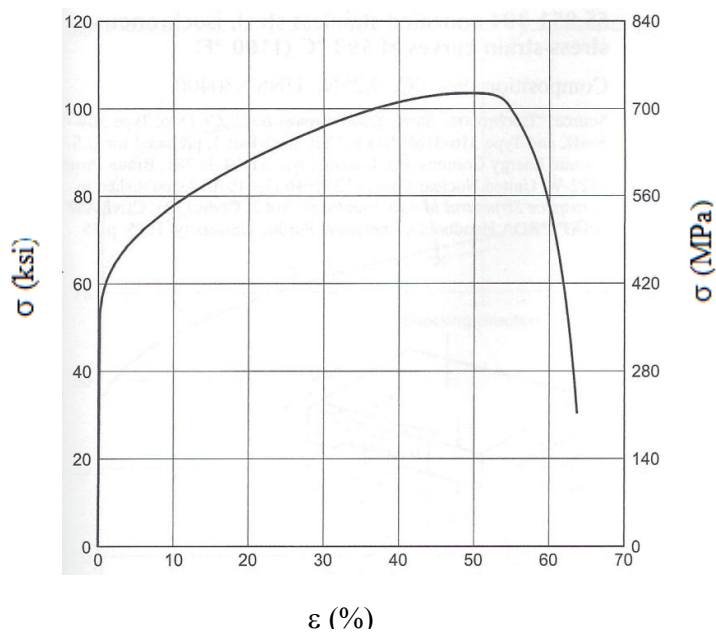
Figura 72 – Curva σ x ϵ para o alumínio AA 6531.



Fonte: Adaptado de Moosbrugger, 2002.

A figura 73 mostra a curva de tensão de engenharia por deformação para o aço AISI 304.

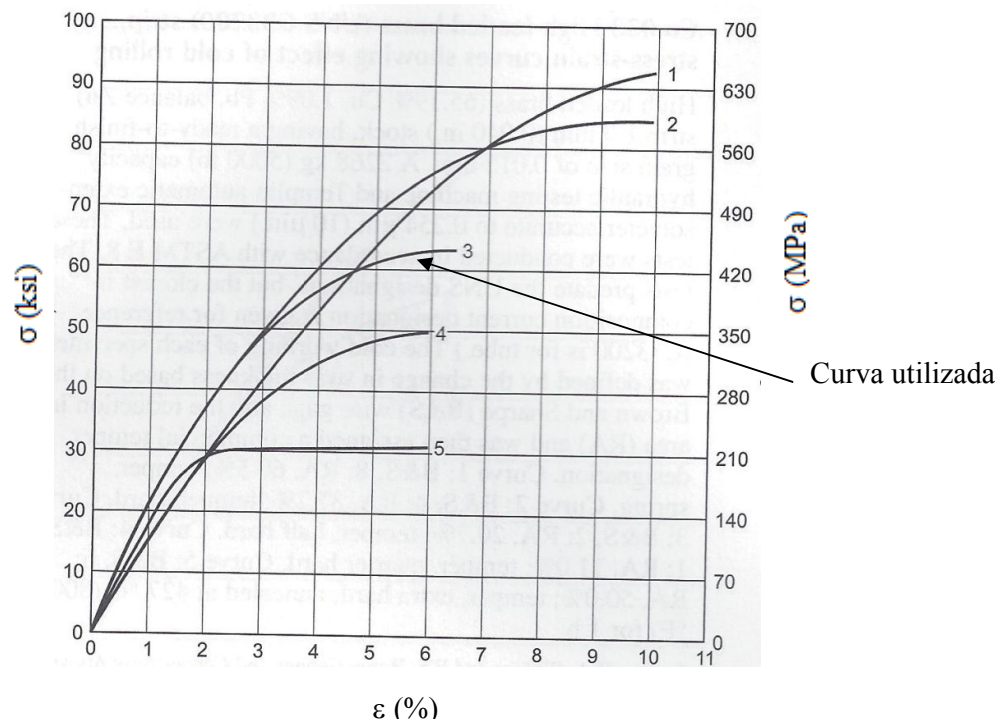
Figura 73 – Curva $\sigma \times \varepsilon$ para o Aço Inoxidável AISI 304.



Fonte: Adaptado de Moosbrugger, 2002.

A figura 74 mostra a curva de tensão de engenharia por deformação para o latão ASTM C34000.

Figura 74 – Curva $\sigma \times \epsilon$ para o Latão C34000.



Fonte: Adaptado de Moosbrugger, 2002.