

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA  
E DE MATERIAIS - PPGE3M

RAFAEL BRUFATTO VAGLIATTI

DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO DE EXTRUSÃO E  
PRENSAGEM DE REBITES DE AÇO INOX

Porto Alegre  
2017

RAFAEL BRUFATTO VAGLIATTI

DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO DE EXTRUSÃO E  
PRENSAGEM DE REBITES DE AÇO INOX

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Lício Schaeffer

Porto Alegre  
2017

RAFAEL BRUFATTO VAGLIATTI

DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO DE EXTRUSÃO E  
PRENSAGEM DE REBITES DE AÇO INOX

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

---

Prof. Dr. Lírío Schaeffer

---

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGE3M

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Cristiano Milke – IFSUL \_\_\_\_\_.

Dr. Alberto Moreira Guerreiro Britto - PPGE3M/UFRGS \_\_\_\_\_.

Prof. Dr. Diego Rodolfo Simões de Lima - IFC \_\_\_\_\_.

Dedico esta dissertação à minha esposa, mãe, amigos, colegas e professores, assim como todos que me ajudaram e apoiaram ao longo desta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar à minha família por me guiar ao longo da minha vida e por me transformar na pessoa que eu sou.

Também à empresa TRAMONTINA que me deu oportunidade de desenvolver todo o trabalho. Todos os colegas que me auxiliaram, em especial ao Diretor Técnico Osvaldo Steffani e ao Coordenador Técnico André Galant.

Além destas pessoas fundamentais, agradeço a todos professores, incluindo o meu orientador e professor Dr. Lírio Schaeffer.

Aos meus colegas e amigos de profissão, pois me ajudaram e me ensinaram muito ao longo da minha vida.

## RESUMO

Este trabalho analisou as diferenças entre o processo de conformação de rebites de Alumínio da liga AA 5052 e de aço inoxidável das ligas ABNT 420, ABNT 430 e ABNT 302, os quais são utilizados em grande escala na indústria couteleira. Levando em conta as particularidades de cada material em estudo, foram analisadas as forças de conformação, tensões, deformações e temperaturas. A partir delas buscou-se chegar a um modelo de processo viável para se obter rebites de Aço inoxidável. Apesar da fabricação do rebite de Alumínio ser menos crítica, no que diz respeito a força necessária para conformação, a qualidade do produto é inferior, quando se compara com o Aço inoxidável. Este confere maior resistência mecânica e resistência à corrosão. Para modelamento do processo desenvolvido com o Alumínio AA5052 e com as ligas de Aço inoxidável utilizadas utilizou-se o software de simulação por elementos finitos SIMUFACT 11.0. Os resultados das simulações com o aço inoxidável com temperaturas a morno demonstraram grande dependência da temperatura para obtenção de tensões e forças suportadas pelo ferramental. Alguns resultados alcançados com o aço inoxidável aquecido, quando se variaram as temperaturas de 25°C até 500°C, geraram o grau de tensões e esforços no ferramental menor ou igual à condição onde o Alumínio é conformado a frio. Também, critérios como resistência à corrosão foram determinantes para a aprovação das ligas de aço inoxidável 302 e 430 estudadas. Esse resultado confirmou o que é indicado na bibliografia, onde são recomendadas ligas austeníticas e ferríticas, ao invés de martensíticas, para a fabricação de produtos de aço inoxidável que exigem alta resistência à corrosão, como é o caso dos rebites.

**Palavras-chave:** Extrusão indireta. Prensagem. Rebites. Aço inoxidável. Método de elementos finitos.

## ABSTRACT

This study analyzed the differences between the rivet manufacturing process made by Aluminum of alloy AA5052 and Stainless Steel of alloys AISI 420, AISI 430 and AISI 302, which are widely used in the cutlery industry. Taking into account the particularities of both materials, it was analyzed forming forces, stresses, strains and temperatures in order to find a viable process to manufacture stainless steel rivets. Even the manufacturing of Aluminum rivets is less critical, regarding the forming forces, the quality of the product is inferior than the stainless steel, which provides more mechanical and corrosion resistance. The study of the process of forming Aluminum AA5052 and Stainless Steel rivets was developed using the finite elements software SIMUFACT 11.0. The simulation results of the Stainless Steel with warm temperatures showed big influence of the temperature to obtain lower stresses and forces, which are supported by the tools. Some results with heated Stainless steel, considering temperatures from 25°C to 500°C, resulted in lower stress and tool forces than in the Aluminum with cold temperatures. Also, criteria like corrosion resistance was very important to the approval of the Stainless Steel AISI 302 and AISI 430. Those results confirm the information available in the bibliography, where it is preferential austenitic and ferritic alloys of stainless steel instead of martensitic alloys, when used to manufacture stainless steel rivets, which require high corrosion resistance.

**Keywords:** Backward extrusion. Pressing. Rivets. Stainless steel. Finite Elements Method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de cabeças e hastes dos rebites .....	21
Figura 2.2 - Representação do rebite semi tubular ou fêmea (a) e maciço (b).....	21
Figura 2.3 - Representação da montagem do rebite semi tubular (inf.) e maciço (sup.) ....	22
Figura 2.4 - Rebites tipo semi tubular .....	22
Figura 2.5 - Variáveis utilizadas para a determinação da deformação verdadeira .....	24
Figura 2.6 - Processo de extrusão direta .....	25
Figura 2.7 - Processo de extrusão indireta .....	25
Figura 2.8 - Curvas de pressão de extrusão conforme o percurso do êmbolo (punção) ocorre .....	26
Figura 2.9 - Dimensões $h_0$ e $h_{1p}$ no processo de extrusão indireta .....	27
Figura 2.10 - Estágios do processo de prensagem .....	28
Figura 2.11 - Dimensões utilizadas para os cálculos de deformação da prensagem e na construção da curva de escoamento .....	28
Figura 2.12 - Fluxograma de fabricação e utilização dos rebites .....	30
Figura 2.13 - Região onde ocorre a conformação (esq.) e prensa de 4 golpes (dir.) .....	30
Figura 2.14 – Etapa inicial (sup.) e final (inf.) do primeiro estágio .....	31
Figura 2.15 – Etapa inicial (sup.) e final (inf.) do segundo estágio .....	32
Figura 2.16 - Representação gráfica dos parâmetros utilizados em simulações numéricas do processo de forjamento .....	33
Figura 2.17 - Condutividade térmica de alguns materiais sólidos .....	34
Figura 2.18 - Microestrutura característica do Aço inoxidável martensítico temperado ...	41
Figura 2. 19 - Microestrutura ferrítica do aço inoxidável 430 (esq.) e microestrutura austenítica com grãos homogêneos(dir.) .....	42
Figura 2.20 - Dois modelos de camadas passivas para o aço inoxidável .....	43
Figura 2.21 – Curva de escoamento do Alumínio AA5052 para temperaturas ambiente e inferiores .....	45
Figura 2.22 - Curva escoamento da liga de Aço inoxidável 430 .....	45
Figura 2.23 - Curvas de escoamento para o aço inoxidável ABNT 430, sob diferentes temperaturas e velocidades de deformação .....	46
Figura 2.24 - Alteração de propriedades mecânicas relacionados com o trabalho a frio ...	47

Figura 2.25- Microestrutura do Alumínio AA5052 sem deformação (esq.) e com 75% de deformação relativa(dir.) .....	50
Figura 2.26 - Corpos de prova utilizados para a realização do ensaio de compressão; antes do ensaio (esquerda) e depois do ensaio (direita) .....	53
Figura 2.27 - Comportamento de corpos de prova submetidos a ensaios com coeficientes de atrito diferentes .....	54
Figura 2.28 – Curva teórica de calibração .....	54
Figura 2.29 - Parâmetros utilizados em simulações .....	57
Figura 2.30 - Malha triangular (a) e retangular (b) .....	58
Figura 2.31 - Malha de elementos finitos de um processo de recalque .....	58
Figura 3.1 - Termovisor do modelo Ti125 da marca Fluke .....	59
Figura 3.2 - Perfil de temperaturas do ferramental obtidas pelo termovisor em estado equilíbrio, com filtro IR (esquerda) e imagem real (direita) .....	60
Figura 3.3 - Distribuição de temperaturas para o coeficiente convectivo, $\alpha$ , de 7500 W/(m <sup>2</sup> .K) .....	61
Figura 3.4 - Corpo de prova durante o ensaio de compressão .....	62
Figura 3.5 - Curvas de escoamento, obtidas no ensaio de compressão do Alumínio AA5052 a frio .....	63
Figura 3.6 - Corpo de prova cilíndrico com suas medidas, antes e depois do ensaio de compressão .....	64
Figura 3.7 – Curva de escoamento em escala logarítmica para o Alumínio 5052 .....	64
Figura 3.8 - Curva de escoamento do arame de aço inoxidável da liga ABNT 302 (750 a 1050°C) .....	65
Figura 3.9 - Curva de escoamento do arame de aço inoxidável da liga ABNT 430 (800 a 1100°C) .....	66
Figura 3.10 - Curva de escoamento do arame de aço inoxidável da liga ABNT 420 (0 a 600°C) .....	66
Figura 3.11 - Representação do corpo de prova utilizado para o ensaio do anel .....	67
Figura 3.12 - Rugosidade do corpo de prova utilizado no ensaio do anel .....	68
Figura 3.13 - Rugosidade do arame utilizado em processo, da liga Al 5052 .....	68
Figura 3.14 - Rugosidade do corpo de prova lixado e adequado ao Ensaio do anel .....	69
Figura 3.15 - Corpos de prova para o ensaio do anel com diferentes reduções .....	69

Figura 3.16 - Curva de calibração e pontos obtidos através da simulação e ensaio do anel para o Alumínio 5052 .....	70
Figura 3.17 - Curva de calibração e pontos obtidos através da simulação e ensaio do anel para o Inox 302 a frio .....	70
Figura 3.18 - Curva de calibração e pontos obtidos através da simulação e ensaio do anel para o Inox 420 a frio .....	71
Figura 3.19 - Micrografia da amostra de Alumínio AA5052. Ataque químico: Keller .....	73
Figura 3.20 - Micrografia da amostra de aço inoxidável ABNT 302. Ataque químico: Kalling's nº2 .....	73
Figura 3.21 - Micrografia da amostra de aço inoxidável ABNT 420. Ataque químico: Picral 2% .....	74
Figura 3.22 - Micrografia da amostra de aço inoxidável ABNT 430. Ataque químico: Picral 2% .....	75
Figura 3.23 - Amostras ensaiadas de Inox 420 (esq.) e 430 (dir.) .....	76
Figura 3.24 - Amostras ensaiadas de 410 (esq.) e 302 (dir.) .....	76
Figura 4.1 - Montagem do sistema punção e ferramenta do rebite .....	79
Figura 4.2 - Dimensões do rebite estudado .....	80
Figura 4.3 - Malha tetraédrica do rebite .....	80
Figura 5.1 - Deformações plásticas no fim do processo em ângulos diferentes a frio.....	82
Figura 5.2 - Distribuição de tensões num corte transversal do rebite a frio.....	83
Figura 5.3 - Distribuição de temperaturas no rebite .....	83
Figura 5.4 - Força exercida pela prensa .....	84
Figura 5.5 - Perfil de temperaturas para o arame à temperatura ambiente (25°C) .....	85
Figura 5.6 - Perfil de temperatura para o arame 420 aquecido à temperatura de 500°C ....	85
Figura 5.7 - Perfil de deformações no aço inoxidável com arame aquecido a 400°C .....	87
Figura 5.8 - Tensões durante a conformação do 302 preaquecido (400°C) .....	88
Figura 6.1 - Bilete do rebite dividido nos processos de extrusão indireta e prensagem .....	90
Figura 6.2 - Bilete utilizado para prensagem (esq.) e da cabeça (dir.) .....	91
Figura 6.3 - Dimensões da porção do bilete utilizado para extrusão indireta (esq.) e o corpo do rebite (dir.) .....	92
Figura 7.1 - Indutor instalado na entrada da prensa .....	96
Figura 7.2 - Alimentação do arame aquecido, na entrada da prensa .....	96
Figura 7.3 - Rebite conformado com depósito de material entre o corpo e a cabeça .....	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Condutividade térmica das ligas em estudo .....	34
Tabela 2.2 - Composição das Ligas de Alumínio utilizadas .....	36
Tabela 2.3 - Principais elementos de liga por classe de Alumínio .....	37
Tabela 2.4 - Composição química de aços inoxidáveis .....	40
Tabela 2.5 - Tensão de escoamento a frio inicial dos materiais utilizados no trabalho .....	48
Tabela 2.6 - Índice e constante de encruabilidade para o Al5052, Al1100 e os Aços Inoxidáveis ABNT 302, 304, 420 e 430 a 25°C .....	49
Tabela 2.7 - Propriedades do Al 1050 recozido e encruado .....	50
Tabela 2.8 - Aços inoxidáveis e seus alongamentos .....	51
Tabela 3.1 - Simulação de diferentes coeficientes de troca de calor entre a peça e o ambiente .....	61
Tabela 3.2 - Dados para obtenção da curva de escoamento por compressão da liga de Alumínio AA5052.....	62
Tabela 3.3 - Resultados obtidos no ensaio do anel para o Alumínio Al5052 .....	71
Tabela 3.4 - Resultados obtidos no ensaio do anel para o aço inoxidável ABNT 302.....	71
Tabela 3.5 - Resultados obtidos no ensaio do anel para o aço inoxidável ABNT 420 .....	72
Tabela 3.6 – Simulações realizadas com Aço inoxidável .....	77
Tabela 4.1 - Propriedades do Alumínio 5052 e das ligas de aço inoxidável 302, 420 e 430 .....	80
Tabela 5.1 – Forças do ferramental simuladas para o rebite de Alumínio AA5052.....	84
Tabela 5.2 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 420 com temperatura inicial de 25°C.....	86
Tabela 5.3 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 420 com temperatura inicial de 200°C.....	86
Tabela 5.4 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 420 com temperatura inicial de 400°C .....	86
Tabela 5.5 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 420 com temperatura inicial de 500°C.....	86
Tabela 5.6 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 430 com temperatura inicial de 25°C.....	87

Tabela 5.7 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 430 com temperatura inicial de 200°C .....	87
Tabela 5.8 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 430 com temperatura inicial de 400°C .....	87
Tabela 5.9 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 430 com temperatura inicial de 500°C .....	88
Tabela 5.10 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 302 com temperatura inicial de 25°C .....	89
Tabela 5.11 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 302 com temperatura inicial de 200°C .....	89
Tabela 5.12 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 302 com temperatura inicial de 400°C .....	89
Tabela 5.13 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 302 com temperatura inicial de 500°C .....	89
Tabela 6.1 - Força necessária para conformar rebite segundo cálculo analítico e simulação computacional a 25°C.....	95

## LISTA DE ABREVIATURAS

AA	Aluminium Alloy (liga de Alumínio)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCC	Cúbica de corpo centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
DIN	Deutsches Institut für Normung – Instituto Alemão de Normatização
HV	Método de dureza Vickers
IADS	International Alloy Designation System
IFI	Industrial Fasteners Institute
ISO	Organização Internacional para Padronização
NBR	Norma Brasileira
Simufact	Software utilizado para realização da simulação
HB	Método de dureza Brinell
HRC	Método de dureza Rockwell C
HRB	Método de dureza Rockwell B

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Alongamento (%)
$A_0$	Área inicial ( $\text{mm}^2$ )
$A_f$	Área final ( $\text{mm}^2$ )
$A_i$	Área instantânea ( $\text{mm}^2$ )
$A_{1p}$	Área da cabeça do rebite ( $\text{mm}^2$ )
$C$	Constante do material na curva de escoamento (-)
$c_p$	Calor específico ( $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ )
$D$	Diâmetro (mm)
do	Diâmetro inicial do bilette (mm)
d1	Diâmetro final do bilette (mm)
d1p	Diâmetro final da porção prensada do bilette (mm)
d1e	Diâmetro final da porção extrudada do bilette (mm)
d1i	Diâmetro interno da porção extrudada do bilette (mm)
$E$	Módulo de Young ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
$F_p$	Força de prensagem (N)
$F_e$	Força de extrusão indireta (N)
$F_T$	Força total (N)
$F_Z$	Força no sentido da conformação da prensa (kN)
$h$	Altura (mm)
$h_0$	Altura inicial (mm)
hop	Altura inicial da porção do bilette prensada (mm)
hoe	Altura inicial da porção do bilette extrudada (mm)
hot	Altura inicial do bilette total (mm)
h1p	Altura não extrudada (mm)
h1e	Altura final da porção do bilette extrudada (mm)
h1t	Altura total do rebite (mm)
$h_1$	Altura final (mm)
$K$	Fator de intensidade de tensão
$k_f$	Tensão de escoamento ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
$k_{f0}$	Tensão inicial de escoamento ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$k_{f1}$	Tensão final de escoamento (N/mm <sup>2</sup> )
$k_{fm}$	Tensão de escoamento média (N/mm <sup>2</sup> )
$L$	Comprimento do corpo de prova (mm)
$r$	Raio (mm)
$r_0$	Raio inicial (mm)
$R_m$	Resistência mecânica (MPa)
$S$	Curso do punção (mm)
$t$	Tempo (s)
$T$	Temperatura (K)
$V_t$	Velocidade tangencial (mm/s)
$w$	Velocidade angular (rad/s)

### **Símbolos gregos**

$\alpha$	Coefficiente de troca de calor entre peça e ferramenta (W/m <sup>2</sup> .K)
$\vartheta$	Temperatura (°C)
$\vartheta_f$	Temperatura da ferramenta (°C)
$\vartheta_M$	Temperatura do material (°C)
$\varepsilon$	Emissividade da superfície da amostra (-)
$\varepsilon_{DI}$	Redução do diâmetro interno
$\varepsilon_H$	Redução da altura
$\varepsilon_x$	Deformação relativa em x (%)
$\varepsilon_h$	Deformação relativa na altura (%)
$\lambda$	Condutividade térmica do material (W/m.K)
$\mu$	Coefficiente de atrito (-)
$n$	Índice de encruamento (-)
$\eta_F$	Rendimento da extrusão indireta (-)
$\rho$	Densidade (g/mm <sup>3</sup> )
$\sigma$	Tensão verdadeira (N/mm <sup>2</sup> )
$\sigma_{rup}$	Tensão de ruptura (MPa)
$\sigma_e$	Tensão de escoamento (MPa)
$\sigma_x$	Tensão de escoamento (N/mm <sup>2</sup> )
$\varphi$	Deformação verdadeira (-) $\varphi$

$\varphi_h$	Deformação verdadeira na altura (-)
$\varphi_r$	Deformação verdadeira no raio(-)
$\varphi_p$	Deformação verdadeira no perímetro (-)
$\dot{\varphi}$	Velocidade de deformação (1/s)
$\Delta h$	Deformação absoluta na altura (mm)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
2.1 A INDÚSTRIA DOS REBITES E SEUS TIPOS .....	22
2.2 PROCESSO DE Prensagem e EXTRUSÃO .....	25
<b>2.2.1 Deformações verdadeiras.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.2 Extrusão direta e indireta de pequenas peças .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.3 Prensagem .....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.4 Velocidade de deformação .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.5 Processo de Fabricação de Rebites .....</b>	<b>31</b>
2.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS QUE AFETAM A DEFORMABILIDADE .....	34
<b>2.3.1 Influência da temperatura de conformação .....</b>	<b>34</b>
<b>2.3.2 Parâmetros térmicos .....</b>	<b>35</b>
<b>2.3.3 Aspectos químicos e metalúrgicos do Alumínio.....</b>	<b>37</b>
<b>2.3.4 Aspectos químicos e metalúrgicos do aço inoxidável .....</b>	<b>41</b>
<b>2.3.5 Curvas de escoamento .....</b>	<b>46</b>
<b>2.3.6 Ductibilidade.....</b>	<b>51</b>
<b>2.3.7 Atrito .....</b>	<b>53</b>
2.4 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA CONFORMABILIDADE.....	54
<b>2.4.1 Teste de tração e compressão para a determinação da curva de escoamento</b>	<b>54</b>
<b>2.4.2 Ensaio do anel.....</b>	<b>55</b>
<b>2.4.3 Ensaio metalográfico.....</b>	<b>57</b>
<b>2.4.4 Ensaio para avaliação da resistência à corrosão .....</b>	<b>57</b>
2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO.....	58
<b>2.5.1 Método dos Elementos Finitos .....</b>	<b>59</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>61</b>
3.1 DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DO PROCESSO COM ALUMÍNIO .....	61
3.2 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE ESCOAMENTO DO ALUMÍNIO E AÇO INOXIDÁVEL.....	63
<b>3.2.1 Curva de escoamento da Liga de Alumínio AA5052 .....</b>	<b>63</b>
<b>3.2.2 Curva de escoamento das ligas de aço inoxidável 302, 420 e 430 .....</b>	<b>67</b>
3.3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO .....	68
3.4 ENSAIOS METALOGRÁFICOS .....	74
3.5 ENSAIOS DE CORROSÃO .....	77
3.6 DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO DE REBITES DE AÇO INOXIDÁVEL ....	78
<b>4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE REBITES.....</b>	<b>80</b>

4.1 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO .....	80
<b>4.1.1 Tipo de simulação .....</b>	<b>81</b>
<b>4.1.2 Definição da malha e geometria .....</b>	<b>81</b>
<b>4.1.3 Definição do material .....</b>	<b>82</b>
<b>4.1.4 Definição do tipo de prensa.....</b>	<b>83</b>
<b>4.1.5 Definição das propriedades de atrito .....</b>	<b>83</b>
<b>4.1.6 Definição das propriedades térmicas .....</b>	<b>83</b>
<b>5 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ...</b>	<b>84</b>
5.1 PROCESSO CONVENCIONAL .....	84
5.2 AÇO INOXIDÁVEL ABNT 420 .....	87
5.3 AÇO INOXIDÁVEL ABNT 430 .....	88
5.4 AÇO INOX ABNT 302 .....	90
<b>6 CÁLCULO ANALÍTICO DA FORÇA DE CONFORMAÇÃO A FRIO.....</b>	<b>92</b>
6.1 CONFORMAÇÃO DO ALUMÍNIO AA5052.....	92
6.2 CONFORMAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL ABNT 302 .....	95
6.3 CONFORMAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL ABNT 420 .....	95
6.4 CONFORMAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL ABNT 430 .....	96
6.5 COMPARAÇÃO DO RESULTADO DE FORÇAS DO CÁLCULO ANALÍTICO X SIMULAÇÃO.....	97
<b>7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS NA INDÚSTRIA .....</b>	<b>98</b>
<b>8 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>100</b>
<b>9 CONCLUSÕES.....</b>	<b>101</b>
<b>10 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>102</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>103</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde sua popularização no mercado, os rebites vêm desempenhando papel fundamental na indústria metal mecânica, que é a fixação por meio de uma forma versátil, econômica e rápida. Encontrados em diversos formatos, geometrias e materiais, os rebites são utilizados normalmente com intuito estrutural e, muitas vezes, necessitam de resistência elevada e um grande cuidado nesse aspecto. Caso falhem, os componentes que estão unidos pelo rebite podem se desprender.

Na indústria de cutelaria, são vistos rebites para fixação dos cabos dos talheres e também em outros utensílios domésticos. Nestes casos, o esforço mecânico não é elevado e serve, principalmente, para manter o cabo bem unido à lâmina. Muitas vezes o intuito do rebite é mais estético do que estrutural. Por isso se torna importante o fato dele ter uma superfície com bom aspecto visual, além de um baixo custo de produção. Usualmente, os rebites costumam ser utilizados na configuração com duas partes unidas, que são o maciço, ou “macho”, e o semi tubular, ou a “fêmea”. Para o seu estudo é necessário observar o a liga utilizada no arame, analisando os impactos da variação dos parâmetros do processo e seus tratamentos térmicos.

O processo desenvolvido na indústria é um misto de prensagem com extrusão indireta realizado sobre o Alumínio. Nele são obtidos rebites com boa estabilidade dimensional e durabilidade das ferramentas. Este trabalho propõe um estudo com diversos tipos de materiais, buscando desenvolver um rebite fabricado em aço inoxidável, com maior resistência mecânica e à corrosão. Além do material, estudou-se alternativas de processo, de modo que o custo produtivo seja minimizado, ou então que sejam minimizados os esforços do ferramental. Entre as alterações possíveis, avaliaram-se ligas de aço inoxidável 302, 420 e 430, com diferentes temperaturas de conformação, comparando com o processo atual, onde é utilizado o Alumínio AA5052 conformado a frio.

Para minimizar o investimento em ferramentas, materiais e horas de máquina parada, optou-se por iniciar o estudo através da simulação computacional do processo de conformação dos rebites pelo método de elementos finitos. Desta forma, a fase de testes é reduzida, ao passo que o projeto, avalia maior número de variáveis e encurta o desenvolvimento [1].

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A INDÚSTRIA DOS REBITES E SEUS TIPOS

De acordo com resultado da economia americana divulgado sobre 2014, segundo a IFI, estima-se que o mercado de rebites e fixadores movimentou aproximadamente 17 bilhões de dólares anuais nos EUA, que é o maior mercado atualmente segundo a Industrial Rivet & Fastener CO. – Technical data [2]. Para o mercado global, valores na casa dos 75 bilhões de dólares foram atingidos. Num mercado emergente e onde há uma certa falta de mão de obra capacitada, calcula-se uma oferta de 600 mil vagas de emprego no setor [3]. Já no mercado brasileiro de Alumínio, onde foi estimado um consumo de 1,48 milhão de toneladas em 2013, esperou-se um crescimento aproximado de 3% no setor.

Para se ter uma ideia da versatilidade dos rebites encontram-se aplicações nos mais variados setores da economia, como o setor automotivo, eletro/eletrônico, de máquinas industriais, metalúrgicas, aeroespacial, construção civil, entre outros. Um exemplo clássico da utilização dos rebites são as asas de aviões, as quais possuem toda chaparia fixada por eles. Também, encontram-se muitas aplicações que não são desejadas alterações na estrutura do material a ser fixado, ou seja, zona termicamente afetada. Tal fato que ocorre com a solda nos cabos das painelas, por exemplo, que são fixados por rebites.

Dentre os materiais possíveis para a fabricação do rebite, encontram-se o Alumínio e o aço inoxidável. Uma infinidade de ligas de cada tipo são definidas e sua utilização é estabelecida pela disponibilidade e características de cada material, que são determinadas pela composição química e microestrutura dos mesmos. Os rebites de Alumínio possuem grande utilização no mercado devido a algumas de suas características, como o baixo peso específico e boa resistência à corrosão. Além disso, têm um bom apelo ambiental, pois se tem grande facilidade para reciclar Alumínio. A escolha do material confere um baixo peso específico, atoxicidade, boa condutividade térmica, boa maleabilidade e resistência a corrosão. Já os rebites de aço inoxidável conferem resistência mecânica superior e ótima resistência à corrosão, que é um fato apreciável para a indústria de cutelaria.

Os rebites são considerados fixadores permanentes, pois uma vez que são aplicados não é possível reutilizá-los. Tradicionalmente os rebites surgiram para aplicações em barcos de madeira, sendo encontrados vestígios de seu uso desde a idade do bronze. Atualmente, são muito utilizados em aeronaves, fabricados com diversas configurações. Muitas variações são encontradas na cabeça, que podem ser escareadas, cilíndricas, redondas, entre outras

geometrias. O corpo também pode ter diferentes geometrias, como escareado, com chanfro ou cabeça “chata”, conforme mostrados na Figura 2.1. Para os materiais, são encontrados rebites de Alumínio, titânio e algumas ligas de níquel, quando utilizados em aviões. Para outras aplicações específicas encontram-se rebites de cobre, aço inoxidável e também de aço carbono.



Figura 2.1 - Tipos de cabeças e hastes dos rebites [2]

Dentre os tipos de rebites, destacam-se os mais conhecidos: o maciço e o semi tubular. Basicamente, estes dois tipos de rebites se unem, formando uma união entre duas chapas, ou outros materiais quaisquer. Outra forma de denominação destes tipos de rebites são os nomes macho, para o maciço, e fêmea para o semi tubular. A Figura 2.2 mostra estes rebites com suas principais dimensões indicadas.

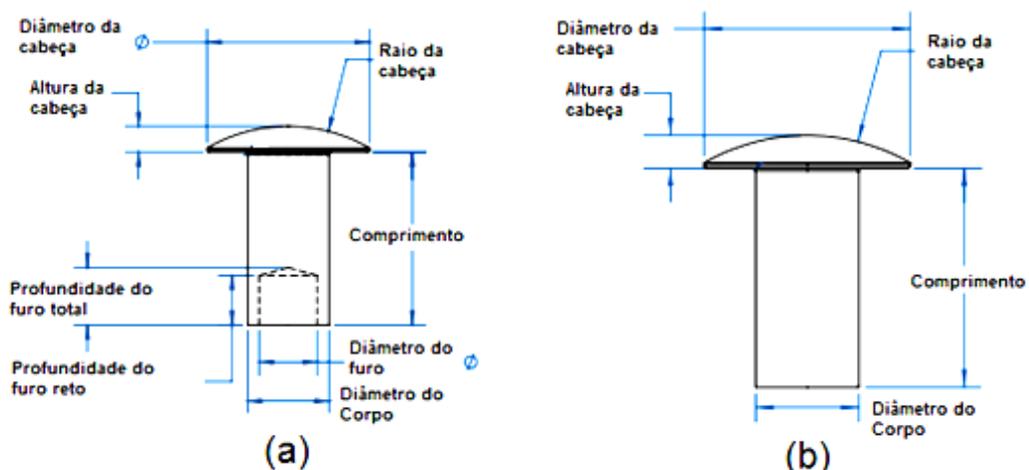


Figura 2.2 - Representação do rebite semi tubular ou fêmea (a) e maciço (b) [2]

Os rebites semi tubulares e maciços são utilizados em pares, pois são aplicados de forma conjunta realizando uma compressão pela sua cabeça. Este processo chamado de montagem é demonstrado na Figura 2.3.



Figura 2.3 - Representação da montagem do rebite semi tubular (inf.) e maciço (sup.)

Quando se analisam os esforços suportados pelo rebite, é possível notar que ele possui uma maior resistência ao cisalhamento do que a tração. Para casos onde o principal esforço é a tração, opta-se por uniões feitas por parafusos. Sobre a montagem dos rebites, justifica-se a configuração de rebites em duas partes (macho e fêmea), pelo fato de que este tipo diminui a força de aplicação quando se compara com a união apenas do rebite macho, sendo remanchado [2].

A fabricação dos rebites ocorre por meio de processos de prensagem ou com uma mescla de prensagem e extrusão. Para esses processos pode-se utilizar duas formas de matérias primas. A mais popular é através de arames, pois traz a melhor relação custo-benefício. Porém, já existem estudos para a fabricação de parafusos e porcas através de tubos[4].

Diversos fornecedores no mercado fabricam os mais variados tipos de rebites. Dentre eles, está destacado o semi tubular, mostrado na Figura 2.4.



Figura 2.4 - Rebites tipo semi tubular

## 2.2 PROCESSO DE PRENSAGEM E EXTRUSÃO

Diversos processos de conformação mecânica amplamente conhecidos são aplicados na indústria: forjamento, estampagem, extrusão, prensagem, laminação, entre outros. Apesar de serem considerados processos relativamente conhecidos, os processos continuam muito populares na indústria metal mecânica, onde evoluem e são mais produtivos. Sendo responsável pela fabricação de uma grande gama de materiais, através da prensagem e extrusão é possível fabricar peças pequenas, como parafusos, rebites, ou até tarugos e eixos de maior dimensão.

A prensagem e a extrusão tratam de processos de conformação mecânica onde os esforços são principalmente compressivos. Pelo perfil de esforços as peças conformadas possuem um alinhamento nas fibras que conferem melhor vida em fadiga. Também resultam em um aumento significativo na resistência à tração, quando os esforços são direcionados com fluxo de material do processo [5].

De forma geral, todos materiais que são deformáveis podem ser submetidos a prensagem ou extrusão. Entre os mais comuns estão os aços de baixa liga, ligas de Alumínio, aço inox austenítico e ferrítico, aços ferramenta, entre outros. A matéria prima normalmente é utilizada na forma laminada, trefilada ou fundida.

Os processos de prensagem e extrusão são classificados:

- a) Quanto à temperatura: a quente, frio ou morno;
- b) Quanto ao tipo de matriz: matriz aberta, matriz fechada, feira;
- c) Quanto ao equipamento: trefiladora ou prensa.

Para a fabricação dos rebites estudados parte-se de um processo semelhante à fabricação de parafusos. Então, realiza-se um processo a frio ou morno de extrusão indireta e prensagem. As ferramentas são de geometria fechada e os equipamentos são prensas de múltiplos estágios [6].

### 2.2.1 Deformações verdadeiras

De uma forma geral todos os materiais sofrem deformações em diversos pontos e em diversas direções, durante a conformação. Para projetos de engenharia se deve utilizar as deformações verdadeiras. Essas deformações são características para cada geometria de peça. Normalmente utilizam-se largura, altura e comprimento para barras ou materiais de simetria plana, ao passo que para os de simetria axi-simétrica utilizam-se comprimento, raio e

perímetro. No caso de rebites, a simetria axi-simétrica é aplicável e para fins de cálculos é representada pelas equações:

$$\varphi_h = \ln \frac{h}{h_0} \quad (1)$$

$$\varphi_r = \ln \frac{r}{r_0} \quad (2)$$

$$\varphi_p = \ln \frac{2\pi r}{2\pi r_0} \quad (3)$$

, onde as variáveis estão representadas na Figura 2.5.

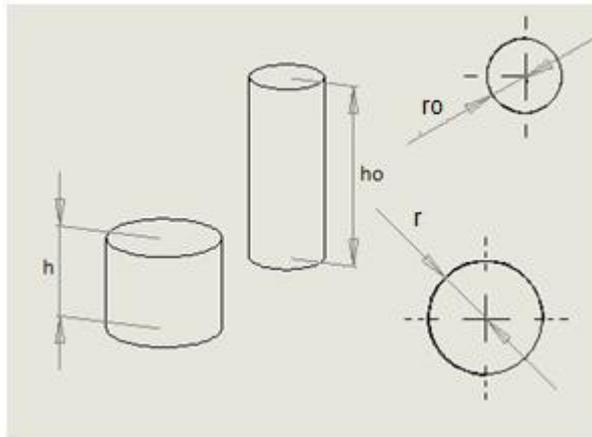


Figura 2.5 - Variáveis utilizadas para a determinação da deformação verdadeira

A teoria que valida o conceito das deformações principais é a Lei da Constância de Volumes. Em outras palavras, o volume inicial é igual ao volume final da peça, independente das deformações submetidas.

Aplicando-se a Lei da Constância de Volumes, define-se que a soma das deformações verdadeiras é igual a zero[1].

$$\varphi_h + \varphi_r + \varphi_p = 0 \quad (4)$$

Considerando que o volume inicial é igual ao volume final pode-se escrever, de maneira alternativa, a equação 5. Então, eleva-se toda equação à exponencial, obtendo-se a equação 6.

$$\ln \frac{h}{h_0} + \ln \frac{r}{r_0} + \ln \frac{2\pi r}{2\pi r_0} = 0 \quad (5)$$

$$h \cdot r \cdot 2\pi r = h_0 \cdot r_0 \cdot 2\pi r_0 \quad (6)$$

Substituindo a fórmula da área inicial ( $A_o$ ) ou final ( $A_f$ ), dadas pelas equações 7 e 8, na equação 6, obtém-se a relação de altura pela área, demonstrados pela equação 9. Esses dados podem ser utilizados no ensaio para determinação da curva de escoamento.

$$A_o = \pi r_o^2 = \frac{\pi r D_o^2}{4} \quad (7)$$

$$A_f = \pi r^2 \quad (8)$$

$$A_f = \frac{A_o \cdot h_o}{h} \quad (9)$$

### 2.2.2 Extrusão direta e indireta de pequenas peças

Definida por um processo de deformação plástica dos materiais, a extrusão representa o preenchimento de uma matriz por meio de um punção ou êmbolo [1]. Alguns materiais que são fabricados por meio deste processo são os tubos, alguns tipos de perfis e também os rebites, que são feitos através de uma variação do processo. A extrusão é dividida em dois tipos:

- a) Extrusão direta: neste tipo, o material é deformado seguindo o deslocamento do punção e vai de encontro à matriz ou fieira para o caso dos arames, afim de copiar a sua parede. A Figura 2.6 mostra como o processo é realizado.

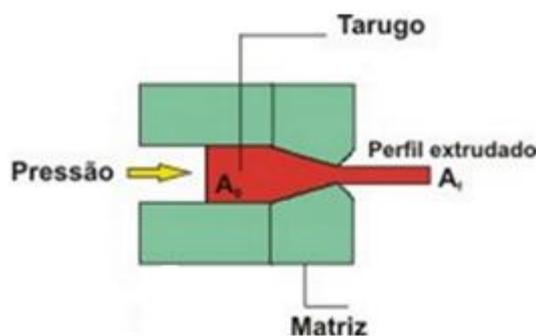


Figura 2.6 - Processo de extrusão direta

- b) Extrusão indireta: agora, ao contrário da direta, o material desloca-se no sentido oposto ao êmbolo, conforme mostrado pela Figura 2.7.

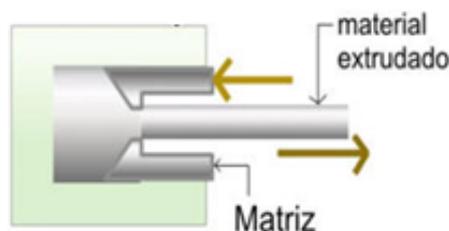


Figura 2.7 - Processo de extrusão indireta

Comparando os dois tipos de extrusão nota-se que a extrusão indireta implica em menores esforços ao longo do processo. A Figura 2.8 deixa clara essa diferença. Nota-se que a pressão nos primeiros momentos da extrusão é bem elevada devido à força necessária para

preencher a matriz de extrusão. Na primeira impressão, pode parecer então, que a extrusão indireta é um processo mais atrativo. Porém, por motivos de dificuldades de construção dos punções, torna-se mais viável a utilização da extrusão direta, em alguns casos.

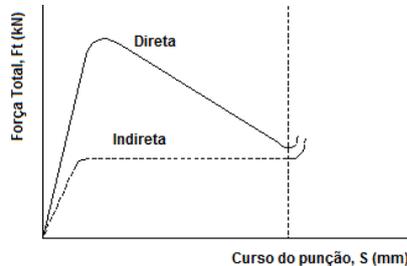


Figura 2.8 - Curvas de pressão de extrusão conforme o percurso do êmbolo (punção) ocorre [1]

Para os diversos tipos de extrusão, chega-se a deformações muito grandes, atingindo um grau de compressão de 400:1, para algumas ligas de Alumínio. Para estes casos, ou para onde não há máquina que suporte estes grandes esforços, opta-se pelo processo a quente, pois desta forma a tensão de escoamento do material é reduzida, permitindo velocidades maiores. Quando o processo é realizado a quente, há um risco de diminuição da precisão dimensional, seja pela formação de carepas ou pela rugosidade da peça.

Dentre as vantagens do processo de extrusão, tem-se uma boa economia de matéria prima, boas propriedades mecânicas, pois a fibragem do material é contínua, boa precisão dimensional, e uma possibilidade de alta produtividade, como em casos onde a alimentação da matéria prima é contínua.

A principal deformação na extrusão indireta é dada pela altura do bilette ( $h_0$ ) e pela altura não extrudada final ( $h_{1p}$ ), conforme representado na Figura 2.9. Na figura é mostrada a formação do corpo do rebite fêmea, o qual alonga-se em movimento oposto ao do punção, que desloca-se na vertical no sentido de baixo para cima.

O cálculo da deformação verdadeira é dado pela equação 10, mostrada abaixo.

$$\varphi h = \ln \frac{h_{1p}}{h_0} \quad (10)$$

A força na extrusão indireta é dada pela equação 11, mostrada abaixo [1].

$$F_e = \frac{A_0 \cdot k_f \cdot m \cdot \varphi}{\eta_F} \quad (11)$$

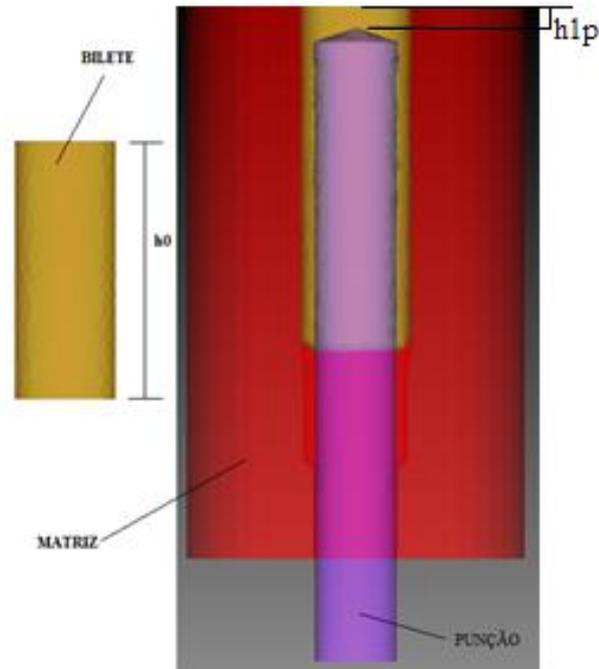


Figura 2.9 - Dimensões  $h_0$  e  $h_{1p}$  no processo de extrusão indireta

O valor de  $k_{fm}$  é dado pela média aritmética de  $k_{f0}$  e  $k_{f1}$ . O valor de  $\eta_F$ , que diz respeito ao rendimento, varia de 0,4 a 0,7, sendo mais próximo de 0,4 para geometrias complexas e pequenas deformações, de acordo com Schaeffer [1].

### 2.2.3 Prensagem

A prensagem é um processo onde se aplicam tensões na extremidade de um material, de modo a se obter uma seção transversal de dimensão maior. Além de ser responsável pela obtenção de peças acabadas, é utilizada com grande frequência como estágio intermediário no processo de forjamento. Como ocorre em outros tipos de processos, a prensagem exige algumas considerações para o projeto, como volume e peso da peça a deformar, número de estágios a serem utilizados, dimensões da rebarba no início e final do processo, energia e cargas necessárias para as operações [1].

Responsável por uma grande gama de produtos, a prensagem viabiliza a fabricação de parafusos, pregos, válvulas, esferas, rebites, entre outros. A Figura 2.10 mostra um exemplo deste processo, utilizando matriz fechada. Quando combinada com o processo de extrusão, a prensagem permite outras variações de produtos, como ocorre com o rebite fêmea.

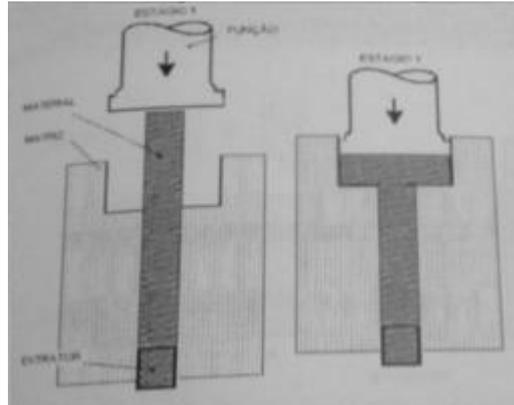


Figura 2.10 - Estágios do processo de prensagem [1]

São requeridas características de alta resistência à compressão e ao desgaste para as ferramentas utilizadas na prensagem. Por isso, uma das soluções mais indicadas para a construção das geratrizes é o metal duro, que se caracteriza pela boa resistência ao desgaste. Mesmo assim, maiores dados devem ser avaliados, como indicados nas normas DIN 7524 e 7526. Alguns dados de entrada, como deformações, geometria das peças envolvidas e tipos de aços utilizados, são essenciais para uma correta especificação dos materiais.

Como ocorre em outros processos de conformação, as três deformações dadas pela prensagem são definidas pelas direções principais, que são a altura ( $h$ ) e o diâmetro ( $D$ ). Essas deformações são a absoluta, a relativa e a verdadeira, conforme medidas mostradas na Figura 2.11 [1].

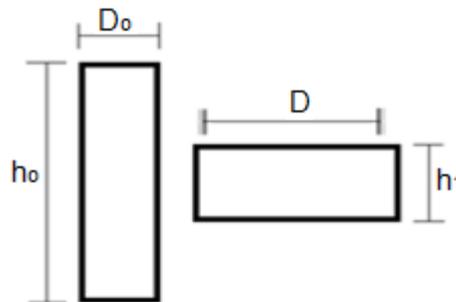


Figura 2.11 - Dimensões utilizadas para os cálculos de deformação da prensagem e na construção da curva de escoamento

Deformação absoluta:

$$\Delta h = h_1 - h_0 \quad (12)$$

Deformação relativa:

$$\varepsilon h = \frac{(h_0 - h_1)}{h_0} \quad (13)$$

Deformação verdadeira:

$$\varphi h = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (14)$$

Para o cálculo do comprimento da geratriz, utiliza-se a fórmula:

$$h_0 = h_1 \cdot e^{\phi h} \quad (15)$$

Um parâmetro muito importante para o processo de prensagem é a força necessária para desempenhar o processo. A fórmula para calculá-la em uma peça de simetria axial é dada pela equação 16 [1].

$$Fp = A_{1p} \cdot k_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \mu \cdot \frac{d_{1p}}{h_{1p}}\right) \quad (16)$$

#### 2.2.4 Velocidade de deformação

A velocidade de deformação, ou taxa de deformação,  $\dot{\phi}$ , é expressa pela equação 17. Para uma velocidade constante de avanço do êmbolo, a velocidade de deformação aumenta a medida que a prensa avança, aumentando assim a resistência mecânica do material deformado. Também há um aumento de temperatura devido ao aquecimento adiabático[5].

$$\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt} \quad (17)$$

Como se pode deduzir a velocidade de deformação é variável ao longo do volume e dependente da deformação. No caso de equipamentos com velocidade variável ao longo do curso utiliza-se uma velocidade de deformação média, dada pela razão entre a deformação principal e o tempo que ocorre a deformação pela altura final, representada na equação 18[1].

$$\dot{\phi} = \frac{V_M}{h} \quad (18)$$

Observando-se a variação dimensional em altura, que é a deformação principal para os processos em questão, define-se a velocidade de deformação pela equação 19, aplicável para prensas excêntricas, onde  $V_t$  é a velocidade tangencial, calculada por  $w \cdot r$  [1].

$$\dot{\phi} = \frac{V_t}{h} \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{h_0 - h}{r}\right)} \quad (19)$$

#### 2.2.5 Processo de Fabricação de Rebites

O processo de fabricação dos rebites se encaixa no fluxograma de produção dos talheres, de forma que o arame trefilado em bobina é transformado em rebite e após montado nos talheres. Durante sua conformação o arame passa por processos de prensagem e extrusão indireta, os quais ocorrem simultaneamente em matrizes fechadas, a altas velocidades e em prensas de múltiplos estágios. Para o trabalho utiliza-se uma prensa de quatro estágios. O fluxograma dos processos está representado na Figura 2.12.

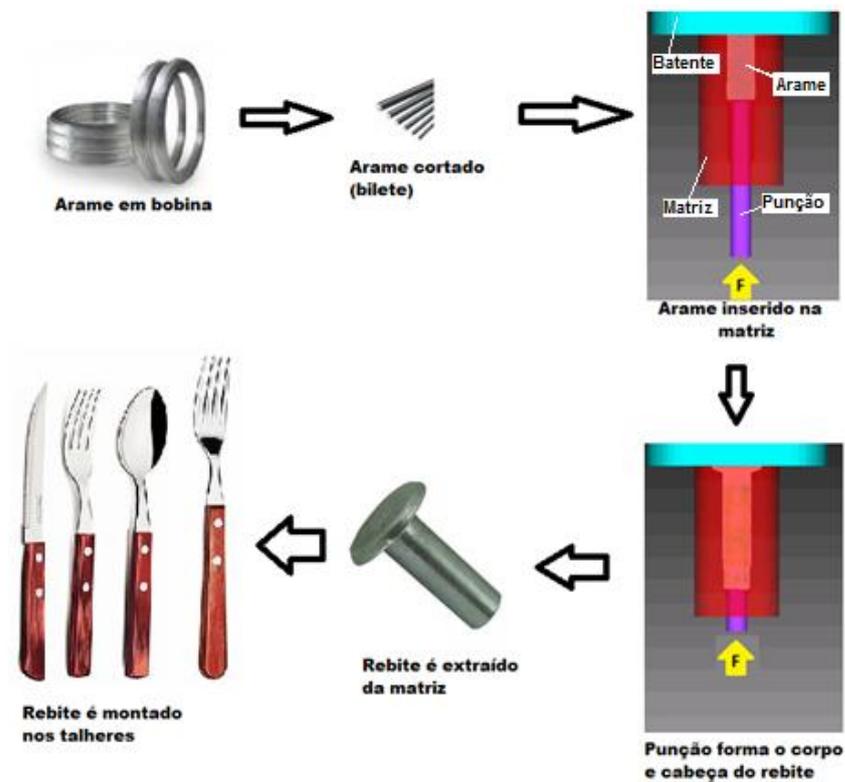


Figura 2.12 - Fluxograma de fabricação e utilização dos rebites

Uma vez que se tem o arame no seu diâmetro desejado, a bobina é inserida numa prensa específica para o processo, a qual será responsável pela fabricação do rebite de modo contínuo. É uma prensa progressiva chamada de prensa de quatro golpes, pois nela se tem quatro operações de prensagem. A primeira é responsável por inserir o arame dentro da matriz e calibrá-lo no diâmetro desejado, a segunda por prensar parte da cabeça, a terceira por iniciar o estágio de extrusão indireta e finalizar a conformação da cabeça do rebite e a quarta por finalizar a extrusão, deixando o rebite semi tubular acabado. O mecanismo da prensa é excêntrico, com uma manivela de comprimento de 30mm e a biela com 80mm. A velocidade utilizada na prensa é de 350 batidas por minuto. A Figura 2.13 mostra como é a região de conformação e a máquina propriamente dita.



Figura 2.13 - Região onde ocorre a conformação (esq.) e prensa de 4 golpes (dir.)

A prensa possui um controle de avanço para inserir a mesma quantidade de material na matriz. Antes de inserido o arame é cortado e transferido por meio de pinças para a matriz, no primeiro estágio (1), conforme Figura 2.14. No momento da inserção do arame, o batente, que é a peça azul nos dois primeiros estágios (1 e 2) e roxa nos dois estágios finais (3 e 4) das figuras abaixo, está afastado da matriz e este movimento é realizado para realizar a prensagem do arame no primeiro estágio (1). Após, o batente se afasta da matriz de modo com que o arame seja transferido para o segundo estágio (2). Novamente o batente se fecha para realizar a conformação parcial da cabeça, representado na Figura 2.15 (2). No terceiro estágio (3) o batente se fecha, sem que haja resistência por parte da matriz. Assim que o punção ou a haste pressiona o rebite contra o batente inicia-se o processo de extrusão indireta, além de finalizar a cabeça preenchendo o volume da matriz, conforme Figura 2.15 (3). Por fim, no quarto estágio (4) está representada a extrusão indireta por completo, e o rebite atinge suas dimensões finais. Da mesma forma que ocorre no terceiro estágio (3), a peça é inserida na matriz do quarto estágio (4) e o batente se fecha. Então o punção fura até a medida final o rebite, aumentando o seu comprimento finalizando-o.

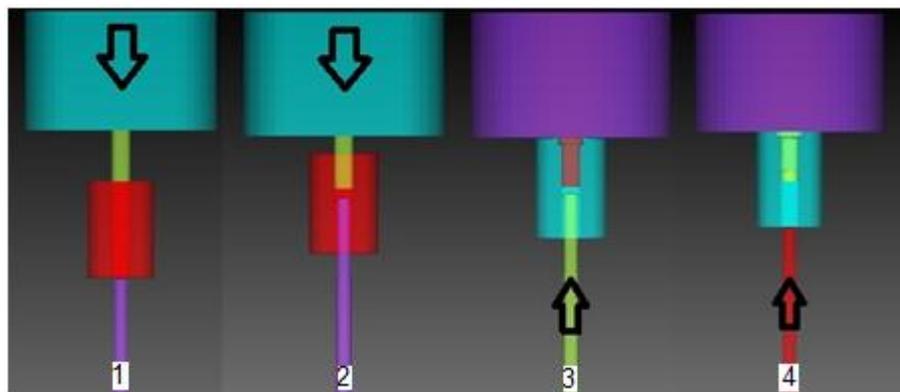


Figura 2.14 - Modelamento do processo na fase inicial de cada estágio

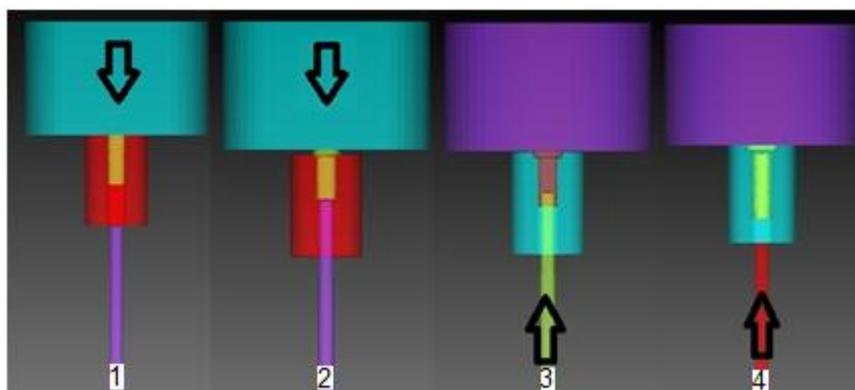


Figura 2.15 - Modelamento do processo na fase final de cada estágio

A velocidade de fabricação dos rebites é de aproximadamente 350 peças por minuto, sendo que o tipo de prensa utilizado equivale a uma prensa excêntrica. Nela, o movimento é definido por um sistema biela-manivela. Este tipo de informação é importante, pois para efeitos de simulação, o tipo de movimento e a variação de deslocamento e velocidades da prensa influenciam nas taxas de deformação, que definem o comportamento do material. Para o instante final da deformação, conforme demonstrado na Figura 2.5, tem-se que  $h = 1,65$  e  $h_0 = 10,86$ . Sabendo que o curso da prensa equivale ao raio,  $r$ , de 60 milímetros e o número de rotações é de 350 rotações por minuto, chega-se a um valor de  $w$  de 36,65 rad/s. Substituindo os valores na equação 19 chega-se ao resultado da velocidade de deformação máxima do processo, dado pela equação 24.

$$\dot{\phi} = \frac{36,65 \cdot 60}{1,65} \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{10,86 - 1,65}{60}\right)} = 522 \text{ s}^{-1} \quad (24)$$

## 2.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS QUE AFETAM A DEFORMABILIDADE

### 2.3.1 Influência da temperatura de conformação

A classificação do processo de conformação quanto à temperatura se dá basicamente em função da temperatura de recristalização. Então, para temperaturas abaixo da recristalização, chama-se de conformação a frio. Para temperaturas próximas a recristalização, conformação a morno, e para temperaturas acima da temperatura de recristalização, conformação a quente. A temperatura de recristalização fica na faixa de 0,3 a 0,6 da temperatura de fusão [7].

Para cada faixa de temperatura obtém-se diferentes características no material conformado. Basicamente, para processos a frio, atingem-se geometrias mais precisas, porém os esforços são bem mais elevados [1].

Nos processos a quente, as forças necessárias para ocorrer a deformação diminuem de maneira significativa, porém se tem menor precisão dimensional da forma final do produto. Normalmente é criada uma carepa sobre o material, o que faz necessárias operações de acabamento posteriores [5].

Já nos processos a morno, obtém-se características intermediárias dos processos a quente e a frio. Ao passo que não ocorrem tantas distorções quanto no processo a quente, no processo a morno se consegue uma boa relação de esforços e precisão [1].

### 2.3.2 Parâmetros térmicos

Diversos parâmetros relativos às trocas térmicas podem ter grande influência nos processos de conformação que englobam a extrusão e a prensagem. São eles:

- a) Calor específico do material da amostra -  $C_p$ ;
- b) Condutividade térmica do material da amostra -  $\lambda$ ;
- c) Emissividade da superfície da amostra -  $\varepsilon$ ;
- d) Coeficiente de transferência de calor por convecção da amostra para o ambiente -  $H$ ;
- e) Coeficiente de troca térmica de calor entre peça e ferramenta -  $\alpha$ .

Estes parâmetros definem o estado térmico da amostra e são usados como dados de entrada nas simulações computacionais. A Figura 2.16 define esquematicamente a utilização e os fenômenos representados pelos parâmetros térmicos [8].

Todos estes parâmetros são influenciados pelas temperaturas envolvidas e auxiliam na determinação da taxa de energia transferida da peça para ferramenta, ou vice versa, durante o contato entre ambas. Exemplificando um dos parâmetros, para um dado gradiente de temperatura, o fluxo térmico por condução aumenta com o aumento da condutividade térmica [9].

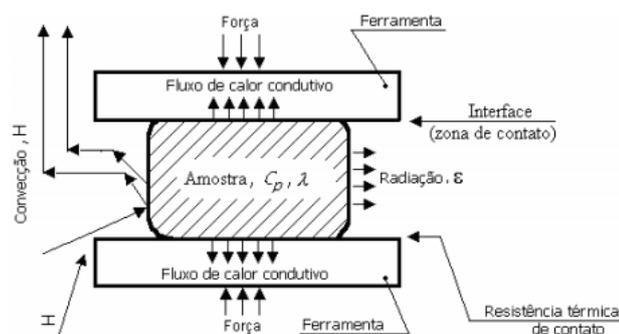


Figura 2.16 - Representação gráfica dos parâmetros utilizados em simulações numéricas do processo de forjamento [8]

Para se ter uma ideia de como são quantificadas as trocas térmicas por condução, a Figura 2.17 mostra a diferença das condutividades térmicas entre alguns materiais.

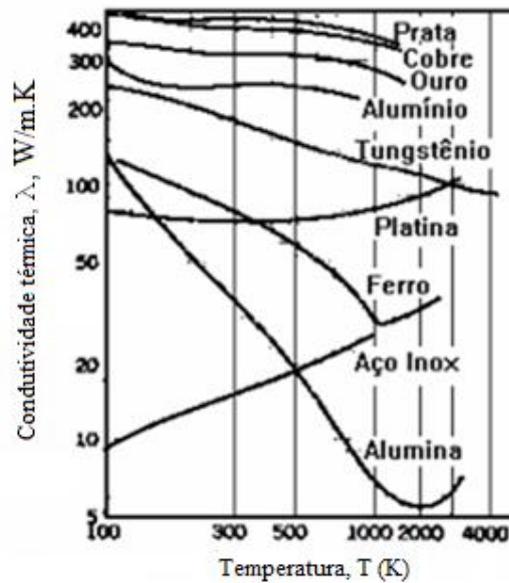


Figura 2.17 - Condutividade térmica de alguns materiais sólidos [9]

Para os materiais estudados no trabalho, as suas condutividades térmicas para baixas temperatura estão representadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Condutividade térmica das ligas em estudo [Banco de dados do Software Simufact]

Material	Condutividade térmica, $\lambda$ (W/m.K)
Alumínio AA 5052	137
Aço inoxidável ABNT 302	16,26
Aço inoxidável ABNT 420	26,7
Aço inoxidável ABNT 430	26,7

Além da velocidade com que o calor flui para determinado material, é necessário determinar o quanto de calor está contido na ferramenta ou peça. Isso é importante, pois uma vez que se tem tempos envolvidos, a taxa de transferência de calor pode ser variável ou quase que constante, para casos onde o tempo não foi capaz de transferir uma parcela significativa de calor a fim de atingir o equilíbrio. Uma dessas propriedades é o calor específico,  $c_p$  ( $J/(m^3 \cdot K)$ ).

Ao contrário da condutividade térmica elevada para sólidos com alta densidade, o calor específico normalmente é baixo para o Alumínio e Aço inoxidável. Desta forma, os materiais com maior calor específico são os líquidos ou determinados tipos de sólidos.

O coeficiente de troca térmica entre a ferramenta e o material,  $\alpha$ , pode ser determinado de diversas maneiras. O trabalho desenvolvido por Polozine [8] mostra como obtê-lo analiticamente e aborda alguns dos métodos alternativos disponíveis atualmente.

Entre as diversas maneiras de quantificar os fluxos de calor e as temperaturas envolvidas nos processos de forjamento destaca-se a termografia por infravermelho. Ela será utilizada para avaliação da temperatura da matriz no equilíbrio.

#### 2.3.2.1 Termografia por infravermelho

Caracterizada como uma medição de temperatura sem contato, a termografia infravermelha se utiliza do fenômeno de transferência de calor por radiação. Ao contrário da termografia por contato, onde a condução é utilizada como mecanismo de medição. Portanto, para medir a temperatura por infravermelho, se quantifica a radiação eletromagnética emitida pelo objeto desejado.

Qualquer corpo com temperatura acima do zero absoluto emite energia eletromagnética através de fótons. Maiores temperaturas podem ser observadas através da cor do material. De uma forma simplista, o olho humano pode perceber temperaturas apenas superiores a 500°C.

Os objetos emitem radiação parcial da emitida em um corpo negro. Essa parcela é chamada na prática de emissividade, adimensional, a qual depende não somente do material em questão, mas também da condição de sua superfície e do comprimento de onda em que a radiação é emitida. Por isso, para cada medidor de temperatura, uma tabela de emissividades é fornecida, de acordo com o comprimento de onda que se utiliza. A precisão dos termovisores é geralmente de 2°C ou 2% da temperatura medida [10].

#### 2.3.3 Aspectos químicos e metalúrgicos do Alumínio

Dentre as ligas do Alumínio nota-se a adição de alguns elementos que conferem as propriedades exigidas para cada aplicação. Entre os elementos mais utilizados, encontram-se o Mg, Si, Cu, Zn e Mn. Cada elemento pode ser utilizado separadamente ou em conjunto com os demais.

Para os rebites atuais, a liga utilizada é a AA5052, que é altamente resistente à corrosão, além de oferecer uma razoável resistência mecânica e ao calor. Por estes motivos, é fortemente usada na indústria naval, um ramo que requer características semelhantes. Outras ligas também poderiam ser aplicadas para a fabricação de rebites. Dentre elas, estão o Alumínio 1100, 3104, 5657, 7075 e o 6061. As composições químicas segundo fornecedor, são dadas pela Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Composição das Ligas de Alumínio utilizadas [11]

Liga Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
5052	0,25%	0,4%	0,1%	0,1%	2,2% 2,8%	0,15% 0,35%	-	0,1%	-
1100	0- 0,95%		0,05%	-	0,05%	-	-	0,1%	
3104	0,6%	0,8%	0,25%	0,8- 1,4%	0,8- 1,3%	-	-	0,25%	0,1%
5657	0,08	0,1	0,1	0,03	0,6 – 1,0%	-	-	0,05	-
6061	0,4- 0,8%	0,7%	0,15- 0,4%	0,15%	0,8- 1,2%	0,04- 0,35%	-	0,25%	0,15%
7075	0- 0,4%	0- 0,5%	1,2- 2%	0- 0,3%	2,1- 2,9%	0,18- 0,28%	-	5,1- 6,1%	0- 0,2%

As ligas de Alumínio oriundas do processo de conformação podem ser divididas em dois grupos: as tratáveis termicamente e as não tratáveis termicamente [12]. Para a liga 5052, que é uma liga não tratável termicamente, as propriedades mecânicas sofrem alterações pelo encruamento ou trabalho a frio. O mesmo acontece para as ligas 1100, 3104 e 5657. Já para as ligas 6061 e 7075, a composição química permite tratamentos térmicos para alterar sua microestrutura e propriedades mecânicas, como tensão de escoamento, alongamento.

Comercialmente, o Alumínio não costuma ser encontrado em sua composição pura. Por se tratar de um material com peso específico baixo e propriedades mecânicas de baixos valores, quando em seu estado puro, é comum encontrar diversas ligas de Alumínio, como a 5052. Para cada liga a composição química varia de modo a conferir as propriedades desejadas para cada aplicação.

Segundo Nascimento [13], 85% do Alumínio que é produzido, é destinado para operações de forjamento, enquanto que os 15% restantes são produzidos para serem utilizados fundidos. Para classificar a maior parcela do Alumínio fornecido, a IADS (International Alloy Designation System) criou um sistema de 4 dígitos. O primeiro corresponde ao principal elemento de liga, conforme mostrado na Tabela 2.3. O segundo dígito corresponde a alguma variação, possivelmente feita na liga, sendo que o 0 corresponde à composição química original da normatização. Já os dois últimos dígitos correspondem à pureza da liga. Por exemplo, um final 45 corresponde a 99,45% de Alumínio na composição.

Tabela 2.3 - Principais elementos de liga por classe de Alumínio [13]

Série	Elemento(s) de liga principal(is)	Outros elementos de liga
1xxx	Alumínio puro	-
2xxx	Cu	Mg, Li
3xxx	Mn	Mg
4xxx	Si	-
5xxx	Mg	-
6xxx	Mg, Si	-
7xxx	Zn	Cu, Mg, Cr, Zr
8xxx	Li, Sn, Fe, Cu e Mn	-
9xxx	Reservada para uso futuro	

O processamento do Alumínio também determina o resultado das propriedades mecânicas do material. As classes 6xxx e 7xxx são as consideradas tratáveis termicamente, enquanto que as 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx não são recomendadas para tratamento térmico. Juntamente com a numeração, o tratamento pode agregar alguma letra antes do número. Por exemplo, H18 1050 significa que o material desta liga foi deformado a frio, com redução da seção transversal de 75%. O processamento de ligas com nomenclatura Hxx, implica num aumento da tensão de escoamento, devido ao encruamento.

Para a liga H32 Al5052, que é uma aplicação onde o elemento principal de liga é o Magnésio, nota-se que a tensão de escoamento é 193 MPa, ao passo que a liga de Alumínio puro tem tensão de escoamento de 48 MPa. Isso mostra o impacto do processamento do Alumínio nas propriedades mecânicas, seja devido a um tratamento térmico, a trefilação, forjamento ou outro processo mecânico. Todos esses processos alteram a microestrutura do material, fazendo com que ele se comporte de forma diferenciada quando sofre a conformação mecânica.

Para cada classe do Alumínio diferentes características são obtidas, e a partir delas seleciona-se a liga mais adequada para cada aplicação, conforme citado pelo ASM Handbook [14]. São elas:

- a) Série 1: O Alumínio do primeiro grupo (Série 1xxx) possui elevado grau de pureza, ou seja, acima de 99% de Alumínio e é utilizado para aplicações elétricas e químicas. Possui excelente resistência à corrosão e boas propriedades térmicas e condutibilidade;

- b) Série 2: O Cobre é o principal elemento de liga, geralmente acompanhado com o Magnésio como segundo elemento de liga. Para obter suas melhores condições, ele requer um tratamento térmico, e feito isto, supera as propriedades do aço de baixo carbono. Como fator negativo, geralmente não possui boa resistência à corrosão, ficando propenso à corrosão intergranular;
- c) Série 3: O Manganês é o principal elemento de liga, resultando em uma liga não tratável termicamente, porém com tensão de escoamento superando em 20% o Alumínio da série 1. São utilizados com percentuais de até 1,5% de Manganês, sendo adequados para aplicações de resistência moderada. O ponto positivo é que tem boa formabilidade, sendo utilizado em utensílios para cozinha, latas de bebidas e trocadores de calor;
- d) Série 4: O Silício é o principal elemento de liga, sendo utilizado em quantidades até 12% na liga. Essas quantidades resultam em uma redução do ponto de fusão, adequados então para utilizações em soldas e junções. Também, o Silício confere uma boa resistência ao desgaste e baixa expansão térmica, justificando a aplicação em pistões automotivos forjados;
- e) Série 5: Contém o Magnésio como o principal elemento de liga, sendo utilizado juntamente com o Manganês, em algumas aplicações. Esse elemento tem comportamento endurecedor, também garantindo à liga uma boa resistência à corrosão e soldabilidade. Por isso é aplicado em componentes marítimos;
- f) Série 6: Liga com os elementos Silício e Magnésio fazem com que seja tratável termicamente. Apesar de não possuir a mesma resistência das séries 2 e 7, esta série possui ótima formabilidade, soldabilidade e usinabilidade. A resistência à corrosão também é elevada e isso faz com que seja utilizado em aplicações arquitetônicas, quadros de bicicletas, entre outras aplicações;
- g) Série 7: Com a presença de Zinco de 1% a 8% em conjunto com outros elementos, como Magnésio, Cobre e Cromo, esta série possui de moderada a muito elevada resistência mecânica, quando tratada termicamente. Por isso é utilizada em componentes aeronáuticos e outras aplicações que exigem esta resistência elevada.

### 2.3.3.1 Microestrutura

Além da composição química, a microestrutura tem grande influência na seleção e performance dos materiais. Os fatores da microestrutura que mais afetam as propriedades

mecânicas do Alumínio são o tamanho de grão e a sua forma, segundo o ASM Handbook [14].

A deformação mecânica, seja por laminação, trefilação ou extrusão, confere grande modificação para a microestrutura do alumínio. A liga 5052, por não ser tratável termicamente também é altamente influenciável por processos de recozimento e homogeneização. Bo Wang cita que para um refinamento de grão é possível se realizar uma laminação com posterior recozimento, por exemplo[15].

O refinamento dos grãos é buscado, pois normalmente, são relacionados com as melhores propriedades mecânicas, como tensão de escoamento e ductibilidade, melhorando significativamente a conformabilidade. O tipo e tamanho dos grãos sofrem influência dos elementos de liga, do encruamento e da taxa de solidificação e da adição de elementos refinadores, que contém partículas de fase intermetálica, que formam locais para nucleação heterogênea dos grãos.

#### 2.3.3.2 Resistência à oxidação do Alumínio

O Alumínio é um material que sofre corrosão, tanto em meios ácidos como básicos, tendo sua proteção alcançada para meios com pH entre 4 e 9. Suas camadas passivas tem dimensões aproximadas de 2 a 3 nm, para temperaturas ambientes, e podem chegar a 20 nm para temperaturas de 425°C.

Dentre os principais mecanismos de oxidação do Alumínio, pode-se citar a corrosão intragranular por pites, que trata de um local de corrosão ativo, com região catódica e anódica, em presença de um eletrólito.

O Alumínio de forma geral é um material resistente à corrosão. Porém, quando puro, possui baixas propriedades mecânicas. Por isso, entre as classes de Alumínio são adicionados elementos de liga capazes de garantir outras propriedades desejadas, além de conferir boa resistência à corrosão. O Alumínio da série 5 possui boa resistência mecânica aliada à ótima resistência à corrosão. Tais características são conferidas pela presença do Magnésio na sua composição química [16].

#### 2.3.4 Aspectos químicos e metalúrgicos do aço inoxidável

Dentre as ligas trefiladas de arame de aço inoxidável disponíveis e utilizadas no mercado, encontram-se as da classe ABNT 300 e 400, principalmente. Os aços inoxidáveis da

série 300 são os chamados austeníticos, enquanto que os da série 400 são classificados como ferríticos. Com determinadas combinações de teores de Carbono mais elevados e menos Cromo que a média dos aços ferríticos, o aço da série 400 passa ser considerado com estrutura martensítica [17].

Entre algumas aplicações comuns utilizam-se o Aço inoxidável 302, 304 e 316, que são austeníticos; 420, martensítico; e o 430, ferrítico. Devido à sua resistência à corrosão atmosférica e a outros meios, e a elevada resistência mecânica, o aço inoxidável tem grande vantagem com relação ao Alumínio com relação a essas características [11].

A Tabela 2.4 mostra a composição química de algumas das ligas de aço inoxidável mais encontradas do mercado.

Tabela 2.4 - Composição química de aços inoxidáveis [18]

Classificação (ABNT)	Composição química (%)							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Outros
302	0,15	2	1	17- 19	8 - 10	0,045	0,03	
304	0,08	2	1	18 - 20	8 – 10,5	0,045	0,03	
316	0,08	2	1	16 - 18	10 - 14	0,045	0,03	2 – 3 Mn
430	0,12	1	1	16 – 18	...	0,04	0,03	
420	0,15	1	1	12 - 14	...	0,04	0,03	

O aço inoxidável é caracterizado por uma liga de Ferro, Carbono e Cromo, com um teor mínimo de Cromo superior a 10,5%. Além destes três elementos encontram-se outros, porém o Cromo é de maior importância para o aço inoxidável. Também é o responsável por fornecer uma resistência à corrosão mais elevada [17].

Os aços austeníticos são os aços da classe 300, com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). Entre as ligas mais tradicionais encontram-se os aços ABNT 302, ABNT 304 e ABNT 316. Nele encontram-se quantidades relativamente altas de Cromo, com mais Níquel que nas demais classes. Um exemplo típico é o ABNT 302 ou 17-8, onde há 17% de cromo com 8% de níquel na liga. Elementos como Nitrogênio, Enxofre e Molibidênio podem ser adicionados para melhorar propriedades como resistência e usabilidade.

Os aços austeníticos da classe ABNT 200 contém um teor menor de níquel que os da classe 300, mas sofrem a adição de manganês. O aço inoxidável 201 faz parte dessa classificação. Nela, sua composição confere uma estampabilidade e resistência à corrosão similar aos 300, porém com maior resistência mecânica. De maneira geral os aços austeníticos tem resistência à corrosão superior que os aços ferríticos.

Os ferríticos, identificados pela classe 400, possuem cromo na sua composição na faixa de 11,2% a 19% e estrutura Cúbica de corpo centrado (CCC). Como característica, pode não ter adição de níquel ou taxas muito baixas deste elemento. Tal fato permite uma boa viabilidade financeira, pois o níquel tem custo elevado no mercado. Molibidênio e Nióbio são encontrados para elevar a resistência à corrosão em alguns casos. O aço 430 é um aço típico desta classe, com Cromo superior a 16% e ótima resistência à corrosão. Sua limitação ocorre devido à baixa soldabilidade. Além desta liga, encontram-se os aços inoxidáveis ferríticos 439, 441, 409 e 444. Ao contrário do 430, eles tem boa soldabilidade por terem sido estabilizados [19].

A terceira denominação dos aços inoxidáveis são os martensíticos, ou endurecíveis por precipitação. São caracterizados por uma maior quantidade de carbono na sua composição, quando comparada com as demais classes de aços inoxidáveis. Podem ter níquel em pequeno teor, ou nada, assim como molibidênio. Do mesmo modo que a ferrítica, a classe martensítica é magnética. O mais conhecido do aço inoxidável martensítico é o 420 ou o 410. A grande diferença na sua composição é o teor de Carbono numa faixa que permite que a Ferrita se transforme em Austenita em altas temperaturas, gerando a estrutura martensítica durante o resfriamento. Para ter sua resistência à corrosão, o aço inox 420 deve ser temperado, pois quando recozido ele se transforma em ferrítico, precipitando parte do seu Cromo e não resistindo ao ambiente [17]. A microestrutura característica dos Aços Inoxidáveis martensíticos apresenta um aspecto em forma de agulhas, obtido através de têmpera, como demonstrado na figura 2.18[20].

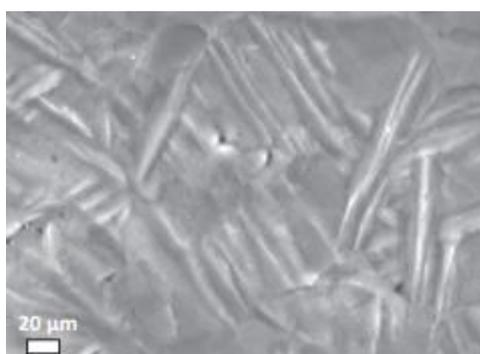


Figura 2.18: Microestrutura característica do Aço inoxidável martensítico temperado[20]

#### 2.3.4.1 Microestrutura

A microestrutura tem papel fundamental na obtenção das propriedades mecânicas bem como outras propriedades, como resistência à corrosão ou fragilização. Por esses e outros

motivos, é de grande interesse o controle e a análise da microestrutura, de modo a determinar o melhor parâmetro de trabalho e a liga a ser usada em alguns casos.

A formação da microestrutura ocorre durante a solidificação do estado fundido do aço. As microestruturas possíveis podem ser ferrita (CCC) ou austenita (CFC), dependendo do tempo e também da composição química. Em outros casos é possível encontrar frações de austenita e ferrita. As classes dos aços inoxidáveis são determinadas de acordo com a microestrutura, conforme abordado anteriormente. A Figura 2.19 mostra as características básicas entre duas microestruturas características dos aços inoxidáveis.

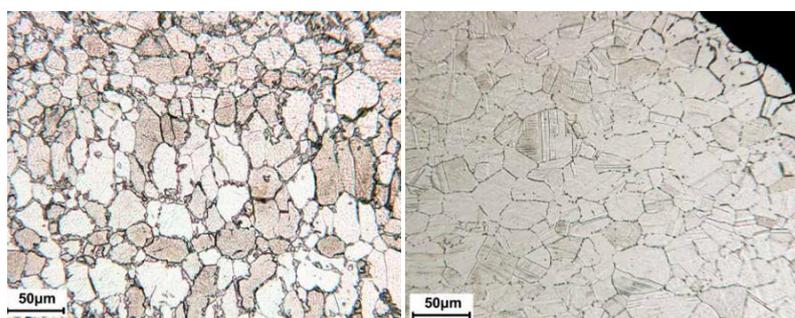


Figura 2.19 - Microestrutura ferrítica do aço inoxidável 430 (esq.) e microestrutura austenítica com grãos homogêneos (dir.) [21]

De maneira genérica, para terem uma estrutura ferrítica, os aços são recozidos a temperaturas inferiores que os austeníticos, na faixa de 750 a 1000°C. Esse parâmetro evita o crescimento de grão, que é um efeito indesejado [19].

Alguns efeitos são evidenciados nos aços inoxidáveis. Se utilizados ou submetidos a um tratamento de 300 a 500°C, alguns aços ferríticos, martensíticos ou duplex sofrem uma fragilização, aos 475°C. Essa fragilização ocorre devido a decomposição da microestrutura em duas fases do tipo cúbica de corpo centrada. Em outros aços, a precipitação de carbeto ou nitreto ocorre durante o resfriamento sob temperaturas iniciais de 550 a 800°C, gerando redução de resistência à corrosão e tenacidade.

#### 2.3.4.2 Resistência à corrosão dos aços inoxidáveis

Por se tratar da corrosão como uma degradação gradual do metal por uma reação química com o meio exposto, o material pode sofrer uma série de perdas com este efeito. Perda de resistência mecânica, aparência ou impermeabilização a líquidos e gases são exemplos de efeitos causados pela corrosão. No caso de um material para contato com

alimentos, os espaços criados pela oxidação podem também servir como local para alojamento de resíduos ou elementos contaminantes.

A corrosão pode ser dividida em duas ocasiões, seja a corrosão molhada ou a corrosão a altas temperaturas. A resistência à corrosão, em meios oxidantes, é dada pela formação de uma fina camada ou filme, que é chamada de camada passiva. Ela é formada basicamente por óxidos de Ferro e de Cromo. Na Figura 2.20, está representado o conceito de regeneração da camada passiva após sua remoção[21].

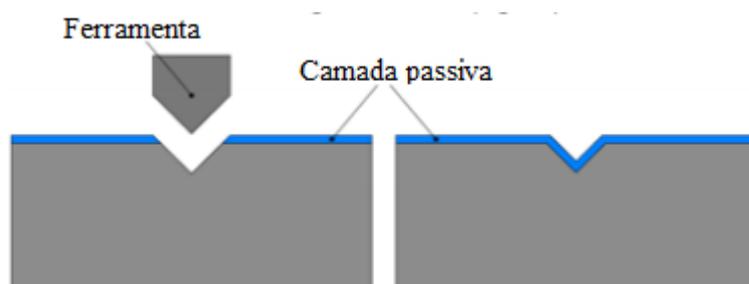


Figura 2.20 - Dois modelos de camadas passivas para o aço inoxidável [21]

Quando se fala da corrosão molhada, dentre os principais mecanismos, trata-se da corrosão por pites e por fenda, bem como da corrosão atmosférica, a qual pode ocorrer no aço inoxidável em meios com presença de sais, principalmente. Diversos níveis de corrosão atmosférica são classificados, de acordo com a norma ISO 9223, por exemplo.

As ocorrências de corrosão por pites ou fendas são causadas, em sua grande parte, pela presença de meios compostos por cloretos. Sulfetos também aumentam a agressividade do meio, enquanto os sulfatos reduzem a ocorrência de corrosão. A temperatura e o baixo pH também aumentam a probabilidade da ocorrência da corrosão.

A corrosão por alta temperatura de aços inoxidáveis ocorre quando o metal é exposto a uma atmosfera quente e com presença de oxigênio, enxofre, halogênios e outros compostos reativos com o material. Para que a corrosão não ocorra em altas temperaturas, é necessário que a camada passiva seja formada nesta condição. Em altas temperaturas pode acontecer a oxidação, sulfetação, carburação e nitretação. Na oxidação, por exemplo, o Cromo age como protetor, ajudando na formação da camada passiva. Assim, quanto maior o teor de Cromo, maior a temperatura resistente à corrosão do aço inoxidável [19].

### 2.3.5 Curvas de escoamento

#### 2.3.5.1 Expressões matemáticas que descrevem a tensão de escoamento

Para cálculos de processos de conformação, adotam-se considerações ideais sobre o comportamento dos materiais. Um dos parâmetros necessários é a Tensão verdadeira( $\sigma$ ), que é dada pela razão da Força( $F_T$ ) pela Área( $A_i$ ). Ela pode ser quantificada de acordo com as direções normais ou cisalhantes de um corpo elementar. Diversos estudos quantificam a tensão na qual o material irá se deformar plasticamente. Os critérios de Tresca e Von Mises são exemplos desses estudos. O ponto no qual a deformação se torna plástica é chamado de Tensão de escoamento,  $k_f$  [1].

No trabalho a frio, sabe-se que a tensão de escoamento varia ao passo que a deformação vai crescendo. Durante todos processos de conformação mecânica, espera-se que o material tenha uma deformação plástica, ou seja, ele precisa alterar sua forma inicial para justificar o processo. A facilidade ou existência de deformação permanente é dada pelas curvas de escoamento dos materiais. A curva de escoamento fornece em cada momento a tensão de escoamento, em função de algumas variáveis do processo. Dentre estas variáveis estão a velocidade de deformação, a temperatura de deformação, as características do material e o grau de deformação, que é também chamado de encruamento. Para curvas obtidas a frio a velocidade de deformação,  $\dot{\varphi}$ , oferece pouca influência para velocidades inferiores a  $1600s^{-1}$ , para o Alumínio, e  $1100s^{-1}$ , para o aço inoxidável. Ao passo que se aumentam as temperaturas, a velocidade de deformação passa a influenciar mais[22].

Atualmente, existem vários métodos para determinação da curva de escoamento. Dentre os mais conhecidos estão os ensaios de tração e compressão. Estes e outros métodos são apresentados por Schaeffer[23].

Os programas de simulação computacional fazem uso da curva de escoamento para determinar os resultados de cada problema analisado. Para um resultado que represente a realidade são determinadas experimentalmente as curvas, que alimentam o *software*. Existem vários modelos matemáticos os quais descrevem o comportamento para curvas de escoamento. Um dos mais utilizados, o qual pode ser aplicado para muitos materiais, na região de deformação plástica uniforme a frio, é expresso por uma relação potencial simples, desenvolvida por Hollomon-Ludwik e utilizada para processos a frio[24].

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (20)$$

Os coeficientes  $C$  e  $n$  da equação 20 podem ser obtidos pela linearização dos pontos obtidos na curva de escoamento plotada em escala logarítmica. Essa operação é chamada de “Power Law” e está representada pela equação 21, mostrada abaixo.

$$\log k_f = \log C + n \cdot \log \varphi \quad (21)$$

A curva de Tensão x Deformação é influenciada quando o material é submetido a temperaturas inferiores à ambiente. Um comportamento relativo a baixas temperaturas para o Alumínio AA5052 é exibido na figura 2.21. Nela também está descrita a curva característica para a temperatura ambiente[25].

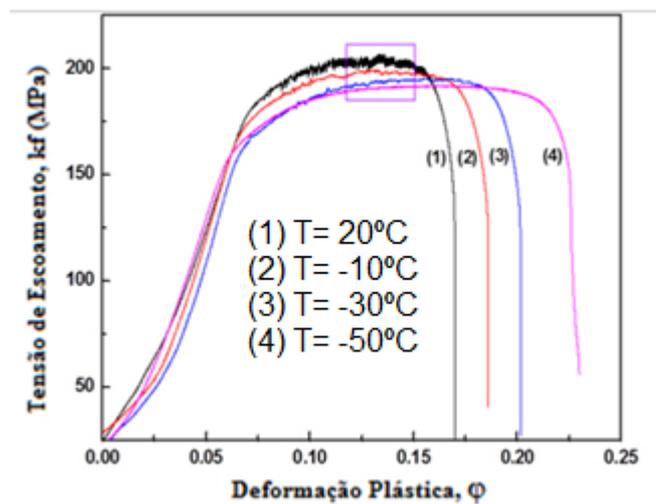


Figura 2.21 – Curva de escoamento do Alumínio AA5052 para temperaturas ambiente e inferiores[25]

A curva representada pela equação 20 tem formato como mostrado na Figura 2.22 e sua inclinação e curvatura são dependentes do valor da constante  $C$  e  $n$ . Na mesma figura podem ser observadas as três curvas de escoamento para as três direções de laminação de uma chapa de Inox 430, por exemplo, com suas respectivas equações.

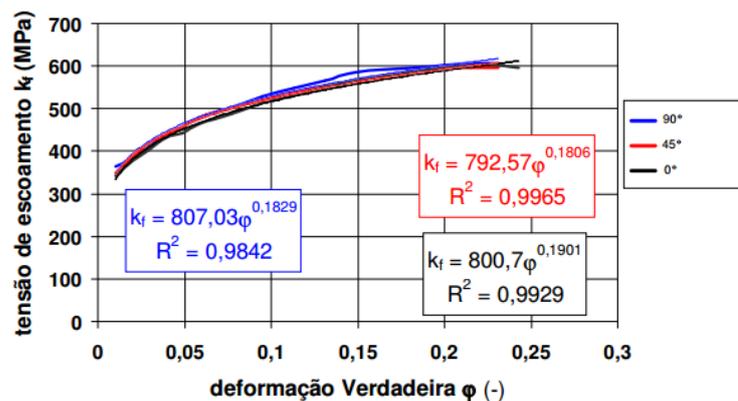


Figura 2.22 - Curva escoamento da liga de Aço inoxidável 430 [26]

Para trabalho a morno e a quente, outro comportamento é observado nas curvas de tensão-deformação. Outras variáveis além da deformação e da encruabilidade influenciam na tensão conforme se deformam os materiais. Entre elas citam-se a velocidade da deformação e a temperatura. Existem outras relações disponíveis na bibliografia para estes casos. A Figura 2.23 exemplifica o comportamento da liga de aço inoxidável ABNT 430, submetida a diferentes temperaturas de deformação. Sobrepostos aos gráficos, podem-se ver os comportamentos das curvas de escoamento[27].

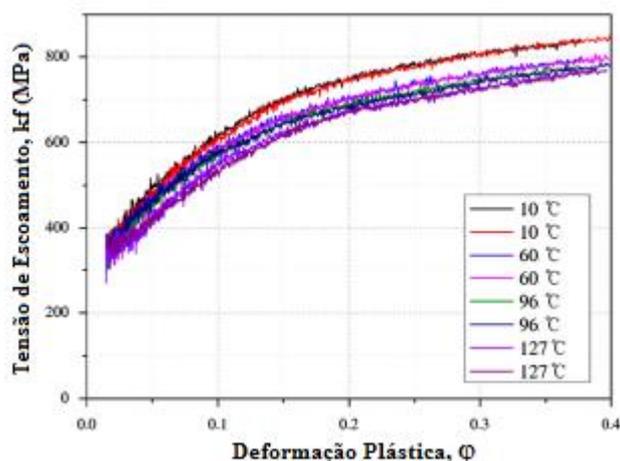


Figura 2.23 - Curvas de escoamento para o aço inoxidável ABNT 430, sob diferentes temperaturas e velocidades de deformação [27]

### 2.3.5.2 Aspectos da deformação relacionada ao encruamento

Muitos estudos foram realizados para a determinação de propriedades mecânicas de materiais após os processos de conformação. É visto que quando há ocorrência de deformação plástica a frio, os materiais elevam sua tensão de escoamento, causando o efeito chamado de “encruamento”. Porém, somente um ensaio de tração não explica exatamente o comportamento que se terá em um corpo de prova ou produto. Para detalhamento desta característica, deve-se também analisar fatores de projeto como a geometria, o atrito entre peça e ferramenta, a temperatura de processo e a velocidade de deformação ( $\dot{\phi}$ ). Com relação ao processo de fabricação e as operações envolvidas como o tratamento térmico, por exemplo, pode-se notar grande diferença nas propriedades mecânicas posteriores.

As alterações das propriedades após o encruamento ocorrem principalmente no âmbito mecânico. Sabe-se que algumas propriedades como as térmicas e condutividade elétrica também são influenciadas, porém em menor escala. O mecanismo que determina as alterações

se deve principalmente à redução da mobilidade média das discordâncias, ocasionada principalmente pelo deslizamento. A Figura 2.24 mostra o comportamento natural de um metal quando submetido ao trabalho a frio [28].

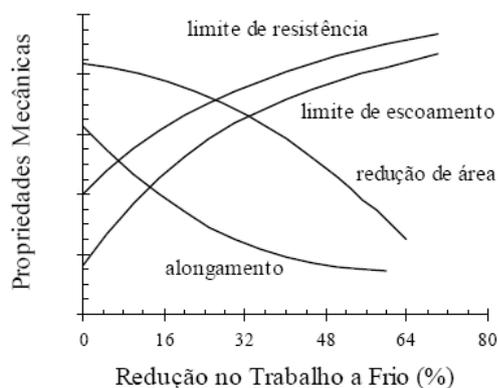


Figura 2.24 - Alteração de propriedades mecânicas relacionados com o trabalho a frio [28]

### 2.3.5.3 Tensão de escoamento nos processos industriais

Durante todos processos de conformação mecânica é necessário que o material tenha uma deformação plástica, ou seja, ele precisa alterar sua forma inicial para justificar o processo. A facilidade ou existência de deformação permanente é dada pelas curvas de escoamento dos materiais. A curva de escoamento fornece, para cada deformação ( $\varphi$ ), a tensão de escoamento, em função de algumas variáveis do processo. Dentre estas variáveis estão a velocidade de deformação, a temperatura de deformação, as características do material e o grau de deformação, que também pode ser chamado de encruamento.

Segundo Júnior [29], para processos que ocorrem a quente, ou seja, em temperaturas superiores a temperatura de recristalização do material, podem ser observados valores reduzidos de tensão de escoamento, além de uma influência da velocidade de deformação bem maior que os processos a baixa temperatura. Por outro lado, os processos que ocorrem a frio possuem características com grande dependência no grau de encruamento. Quando se deseja mesclar as características do processo a frio e a quente, utiliza-se o processo a morno, ou seja, na temperatura que ocorre recuperação não havendo recristalização.

Para a especificação ou projeto de um processo, pode-se também utilizar propriedades mecânicas existentes em tabelas. Nestes casos, é muito importante tomar cuidado com as condições em que foram feitos os ensaios e a adequação dos ensaios às respectivas normas.

Além destes dados é importante dispor dos dados de tensão de escoamento inicial, ou  $kf_0$ . A Tabela 2.5 demonstra o  $kf_0$  dos materiais utilizados no trabalho.

Tabela 2.5 - Tensão de escoamento a frio inicial dos materiais utilizados no trabalho [Simufact]

Material	Tensão de escoamento inicial, $kf_0$ (MPa)
Alumínio AA 5052	160
aço inoxidável ABNT 302	90
aço inoxidável ABNT 420	497
aço inoxidável ABNT 430	349

#### 2.3.5.4 Índice de encruabilidade

O Índice de Encruabilidade representa uma característica do material derivada do endurecimento relativo à deformação a frio. O encruamento se dá a medida que o material vai sendo deformado, e sua tensão de escoamento aumenta a medida que ocorrem interações entre as discordâncias dos grãos, dificultando assim o escorregamento dos planos cristalográficos. Conseqüentemente, quanto maior o encruamento do material, maior o seu índice de encruabilidade [30].

O Índice de Encruabilidade é representado pelo coeficiente  $n$  e é determinado empiricamente, através de uma relação entre tensão e deformação. A área que é aplicável para o encruamento ocorre na região da curva obtida após o ponto que há escoamento, até a região que inicia a estricção.

Conforme citado no estudo de Silva[31], o índice de encruabilidade tem relação com o tamanho de grão. Ao passo que o grão cresce, tem-se um menor índice de encruabilidade,  $n$ . Partindo da equação 20, utilizada no ensaio de tração ou compressão de um material a frio, pode-se dizer que os coeficientes  $C$  e  $n$  são constantes e específicos para cada material, enquanto o  $kf$  e o  $\varphi$  são variáveis com uma relação exponencial. Portanto, quanto maior for o  $n$ , podemos ver que a tensão de escoamento sofrerá maior incremento conforme a deformação aumenta. Desta forma, diz-se que o Índice de Encruabilidade do material é maior quando se tem um  $n$  maior. A Tabela 2.6 mostra o valor de  $C$  e  $n$  para a liga utilizada Al5052, para a liga Al1100 e para as ligas de aço inoxidável ABNT 430 e 302, 304 e 420.

Tabela 2.6 - Índice e constante de encruabilidade para o Al5052, Al1100 e os Aços Inoxidáveis ABNT 302, 304, 420 e 430 a 25°C[32, 29, Simufact]

Liga	Al 5052-H32	Al 1100	ABNT 302	ABNT 304	ABNT 420	ABNT 430
$C$ [MPa]	428,9	119,28	1.451	1.198	798	800,7
$n$ [-]	0,28	0,297	0.6	0,357	0,183	0,183

### 2.3.6 Ductibilidade

Por definição entende-se que a ductibilidade é a capacidade dos materiais de absorverem energia antes de fraturarem. De forma prática, a maneira de se avaliar a ductibilidade é por meio da medição do alongamento. Ele possui grande importância para os projetos e estudos, pois através deste critério se determina se o material irá falhar ou iniciará a propagação de trincas, por exemplo.

O tipo de fratura ocorrida no material não é propriedade dele, mas sim uma resultante do processo ao qual ele é submetido. Condições como temperatura, velocidade de deformação e carregamento têm influência no tipo de fratura. Sabe-se que quanto mais velocidade, maior a carga ou menor a temperatura, maiores são as chances da fratura ter natureza frágil, enquanto que o contrário se aplica para a probabilidade de ocorrência de fratura dúctil[33].

#### 2.3.6.1 Efeitos da composição e da microestrutura do Alumínio

O Alumínio possui algumas propriedades e características muito favoráveis aos processos de forjamento. Por ser um material dúctil, ele é comumente utilizado para a fabricação de fios, que são a matéria prima utilizada para a fabricação de rebites. O fio é obtido pelo processo de trefilação, o qual reduz a seção transversal do arame e faz com que o produto final tenha resistência mecânica maior que o fio inicial.

Após a trefilação, o arame está encruado, o que não é aconselhável para um posterior processo de forjamento com altas deformações. Então, para que o Alumínio volte a ser dúctil e permita as deformações necessárias, a dureza deve ser reduzida, através de um tratamento térmico que obtenha uma microestrutura mais adequada para um produto com melhor acabamento[12]. A diferença das propriedades após os tratamentos pode chegar a valores consideráveis, conforme mostra Wang [34] na Tabela 2.7. Nela, a liga de Alumínio AA5052 difere de forma considerável seja no alongamento, resistência à tração ou dureza, quando é submetida a processos térmicos, como o recozimento ou à deformação mecânica (encruamento).

Tabela 2.7 - Propriedades do Alumínio AA5052 recozido e encruado [34]

AA5052			
Estado	Recozido	Encruado (15%)	Encruado (87%)
Limite de resistência a tração (MPa)	200	220	325
Limite de escoamento (MPa)	100	210	320
Alongamento (%)	25,2	8	3
Dureza Vickers (HV)	57	75	100

Conforme descrito por Wang[34], através da metalografia é possível observar o quanto o material foi deformado. O contorno de grão representa bem o efeito do alongamento sofrido, seja num processo de laminação ou trefilação. A figura 2.25 exemplifica a diferença entre uma amostra pouco e muito deformada.

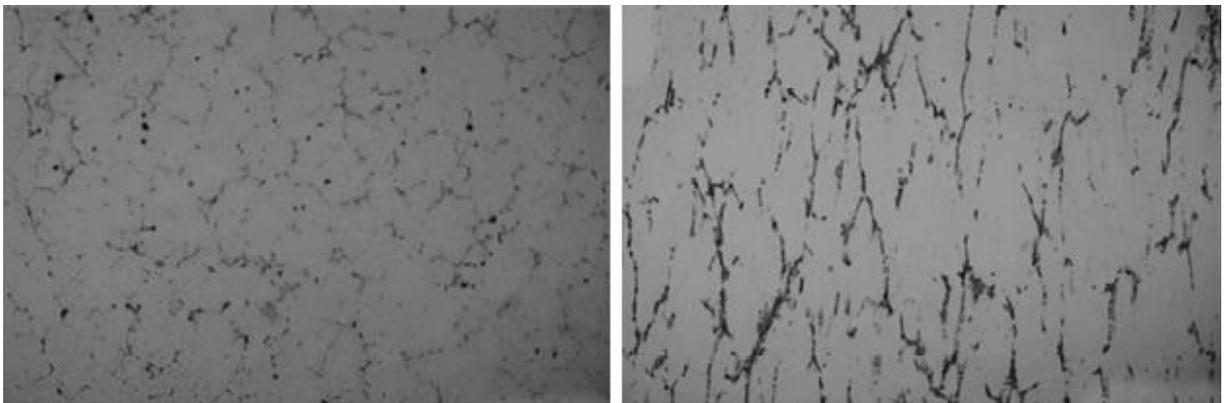


Figura 2.25: Microestrutura do Alumínio AA5052 sem deformação (esq.) e com 75% de deformação relativa (dir.) [34]

### 2.3.6.2 Efeitos da composição e da microestrutura do aço inoxidável

Assim como demonstrado no Capítulo 2.3.4, os principais tipos de aços inoxidáveis apresentam comportamentos diferentes e característicos, em função da sua microestrutura e composição química. Quando relacionados à ductilidade, alguns elementos de liga favorecem esta propriedade do inox.

O níquel, por exemplo, é responsável por permitir um bom alongamento no aço e também uma boa tenacidade. Apesar de ter um custo muito elevado, o níquel é utilizado quando se deseja obter aços tenazes. Outros elementos de liga que favorecem a ductilidade e a tenacidade são o Manganês e o Vanádio, quando utilizados para trabalho a quente. Por outro lado o Carbono e o Nitrogênio desfavorecem a ductilidade e tenacidade.

Uma vez que a composição química influencia na ductilidade, também é possível fazer uma relação desta propriedade com a microestrutura do aço inoxidável. O aço inox austenítico, ou da série 300, de maneira geral, favorece a ductilidade. Nele estão os aços do

tipo 304, 302 ou 316. Os aços inoxidáveis martensíticos, pelo contrário, reduzem a tenacidade do material. Nele são encontradas maiores quantidades de elementos de liga, como o Carbono e o Nitrogênio. Na faixa intermediária encontram-se os aços inoxidáveis ferríticos. Nesta classe podem ser encontrados os aços 430, 409 e 439. A Tabela 2.8 mostra o alongamento de alguns tipos de aços de acordo com sua microestrutura [19].

Tabela 2.8 - Aços inoxidáveis e seus alongamentos [19]

Liga de aço inoxidável (ABNT)	Tipo de microestrutura	Alongamento (%)
302	Austenítica	50
304	Austenítica	55
316	Austenítica	55
430	Ferrítica	26
409	Ferrítica	33
416	Martensítica	20
420	Martensítica	20

### 2.3.7 Atrito

Entende-se por atrito o mecanismo pelo qual se apresentam forças na superfície de contato entre dois corpos em contato, que se traduzem numa resistência ao deslizamento de um corpo sobre o outro [35].

As forças de atrito consideradas durante a conformação são determinantes no trabalho mecânico dos metais, sendo definidas como indesejadas. Entre os impactos relativos ao atrito na conformação destacam-se:

- a) Alteração dos estados de tensão necessários para realizar a deformação;
- b) Geração de fluxos irregulares de metal durante a conformação;
- c) Tensões residuais no material deformado;
- d) Influência sobre o acabamento superficial;
- e) Elevação das temperaturas superficiais;
- f) Desgaste de ferramentas;
- g) Aumento do consumo de energia.

A formulação mais conhecida do atrito é chamada de atrito de Coulomb ou atrito seco, que é frequentemente usada em cálculos de conformação devido à sua simplicidade. Esta lei considera a força de atrito proporcional à força normal. Outra forma análoga de visualizar a lei de atrito de Coulomb é considerando a tensão proveniente da força de atrito como proporcional à tensão da força normal [35]. As equações 22 e 23 mostram essas relações.

$$F_{at} = \mu \cdot F_N \quad (22)$$

$$\tau_{at} = \mu \cdot \sigma_N \quad (23)$$

No que diz respeito ao atrito nos processos de extrusão e aplicáveis também para a prensagem, Caminaga et Al. estudou a influência de diferentes tipos de óleos, da fosfatização, das formas de aplicação e pressões. No seu estudo pôde identificar a influência do acabamento superficial, tratamento térmico, tipo de óleo e o processo de lubrificação. Demonstrou a viabilidade da utilização de óleos na extrusão [20].

## 2.4 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA CONFORMABILIDADE

### 2.4.1 Teste de tração e compressão para a determinação da curva de escoamento

Para a determinação das curvas de escoamento, encontram-se basicamente dois tipos de ensaios utilizados: o ensaio de tração e o ensaio de compressão. Cada um possui suas particularidades e são indicados de acordo com sua aplicação. De forma geral, costuma-se utilizar o ensaio de compressão para aplicações de forjamento, onde se tem mais tensões compressivas do que trativas. O ensaio de tração, por sua vez, é amplamente utilizado pela sua facilidade de realização.

Basicamente, o ensaio de compressão consiste na aplicação de uma carga compressiva uniaxial em um corpo de prova cilíndrico. É muito utilizado na indústria de construção civil, por utilizar materiais muito mais resistentes à compressão do que à tração. Já na indústria metal mecânica, é utilizado para processos de conformação como laminação, forjamento e extrusão, por ter esforços que se assemelham mais do que ao ensaio de tração [36]. Além dessa característica o ensaio de compressão permite deformações maiores após a fase elástica. Como o corpo de prova é cilíndrico, tem-se uma maior facilidade em confeccioná-lo com relação ao corpo de prova do ensaio de tração.

Apesar de todas vantagens listadas durante a execução do ensaio de compressão, é preciso ter alguns cuidados com relação ao embarrilamento que é causado pelo atrito, devido à restrição ao movimento radial. A Figura 2.26 mostra este efeito após a realização do ensaio. O resultado do ensaio de compressão implica em alguns cálculos matemáticos de modo a se transformar os valores de força e deformação absoluta em tensão e deformação verdadeiras.

Isso se obtém através do princípio da constância de volumes e dos cálculos de deformações verdadeiras [23].



Figura 2.26 - Corpos de prova utilizados para a realização do ensaio de compressão; antes do ensaio (esquerda) e depois do ensaio (direita)

Para a obtenção da curva de escoamento por compressão deve-se instrumentar o ensaio de modo com que se obtenham os valores da tensão real ( $\sigma$ ) e da deformação verdadeira na altura ( $\varphi_h$ ). As máquinas de ensaios convencionais fornecem os valores de força axiais e a deformação absoluta na altura ( $\Delta h$ ). Com esses valores podem ser determinadas a área instantânea, deformações verdadeiras ( $\varphi$ ) e tensões verdadeiras ( $\sigma$ ) [37].

O ensaio de tração, por sua vez, é o ensaio onde se consegue a condição de tensões mais próxima do estado uniaxial. Isso acontece devido ao atrito não estar influenciando na região de interesse, que é a região plástica do corpo de prova [16].

Assim como no ensaio de tração, a curva de compressão é influenciada pela microestrutura do material, temperatura, velocidade de deformação e condições ambientais. A curva é elástica até atingir a tensão de escoamento, iniciando a região de deformação plástica. A deformação plástica ocorre juntamente com o encruamento do material. A influência da temperatura e da velocidade são cada vez mais impactantes, ao passo que a temperatura de processo é elevada, conforme citado por Martello [38].

#### 2.4.2 Ensaio do anel

Um dos métodos mais utilizados para a medição do coeficiente de atrito é o ensaio do anel. O conceito deste teste é avaliar o coeficiente de atrito a partir de variações dimensionais de uma amostra que sofre compressão. Basicamente, um corpo cilíndrico e vazado no centro é prensado entre duas chapas planas, simulando um esforço similar ao do processo de forjamento. Conforme o atrito existente entre as superfícies, o corpo cilindro é deformado de forma característica. A Figura 2.27 mostra duas situações com coeficientes de atrito diferentes. É possível se observar que para um teste realizado com alto coeficiente de atrito as bordas laterais apresentam abaulamento, prejudicando assim o resultado final [36].

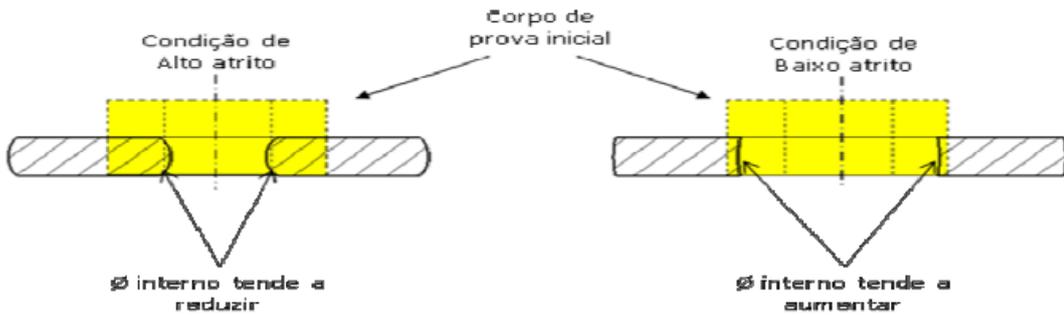


Figura 2.27 - Comportamento de corpos de prova submetidos a ensaios com coeficientes de atrito diferentes [39]

Para determinação do coeficiente de atrito é realizada uma simulação computacional onde se determinam curvas de calibração para diferentes reduções de diâmetros internos e espessuras, para diferentes coeficientes de atrito. A curva testada é plotada sobre as curvas teóricas onde se define por proximidade o coeficiente de atrito real. A curva de calibração teórica está mostrada na figura 2.28[39].

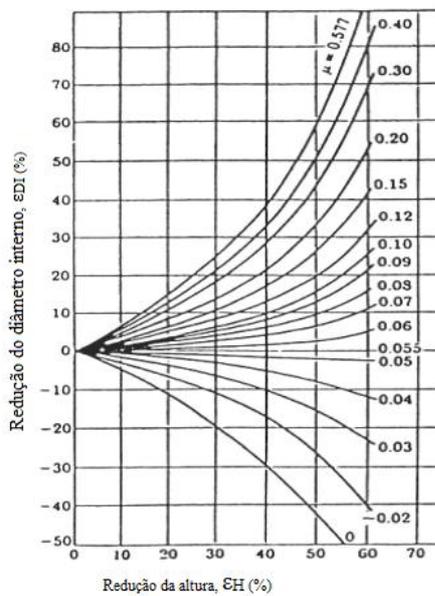


Figura 2.28 – Curva teórica de calibração [39]

### 2.4.3 Ensaio metalográfico

A metalografia, ou micrografia, estuda os produtos metalúrgicos com o auxílio do microscópio. Essa análise permite que sejam determinados alguns constituintes e a textura da amostra. As superfícies estudadas necessitam de uma preparação, onde são polidas e atacadas por um reagente específico.

Os materiais puros, que não tem elementos de liga, possuem uma composição química uniforme, enquanto que os materiais ligados podem apresentar variações ao longo da área de observação. Para visualização destas características observam-se os grãos dos materiais de interesse fazendo uso de técnicas específicas de preparação das amostras. A textura e a característica da amostra são determinadas através da composição química, do trabalho mecânico ao qual o material foi submetido, além do tratamento térmico utilizado [40].

De acordo com Colpaert [40], a técnica metalográfica é dividida em algumas fases. São elas:

- a) Escolha da seção a ser estudada;
- b) Obtenção de uma superfície plana e polida no local escolhido;
- c) Exame ao microscópio para observação de ocorrência sem ataque;
- d) Ataque da superfície por um reagente químico adequado;
- e) Exame no microscópio para averiguar a textura;
- f) Aquisição de imagens para reproduzir o que foi observado.

### 2.4.4 Ensaio para avaliação da resistência à corrosão

Como a resistência à corrosão é um fator determinante para qualquer produto que entra em contato com alimentos, ensaios são normatizados e determinados para cada tipo de aplicação. Os ensaios são utilizados para selecionar e avaliar a performance dos materiais metálicos ou não metálicos [41].

Os ensaios de corrosão são classificados como acelerados e não acelerados. Os não acelerados são os testes realizados ao intemperismo natural e por isso, demandam um grande tempo de teste, comprometendo os prazos de desenvolvimento. Os ensaios acelerados, por sua vez, são realizados em laboratório e são selecionados de acordo com as condições de uso do produto a ser analisado.

Dentre os métodos acelerados mais utilizados pode-se citar o ensaio de névoa salina, o ensaio de imersão e os ensaios cíclicos. Informações mais detalhadas podem ser esclarecidas

no estudo de Tridapalli [41] ou nas normas aplicadas para cada caso. O ensaio de névoa salina é descrito pela norma ASTM B-117 e nele são simuladas condições encontradas em atmosferas marítimas. Ensaio de imersão é o mais popular dos desenvolvidos e também descrito por diversas normas, como a ISO 8442-2. Nele, podem ser simuladas várias condições com diferentes soluções. Para cada solução são recomendados parâmetros distintos para o ensaio. Ensaio cíclicos são ensaios que simulam uma condição próxima à realidade exposta, intercalando diferentes condições. Nele pode-se submeter o corpo de prova ao ensaio de imersão, de névoa salina, de umidade baixa ou alta, entre outras condições previstas.

## 2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO

Apesar de vários processos de conformação estarem bem desenvolvidos e conhecidos nas indústrias do ramo, ainda são vistos muitos projetos surgindo pelo método da “tentativa e erro”. As características das peças conformadas, como bom aproveitamento de material, boas propriedades mecânicas e precisão dimensional, conferem ao produto uma viabilidade econômica mesmo com métodos não tão assertivos de desenvolvimento. Os métodos disponíveis funcionam como ferramentas de solução numérica aplicada a diversos segmentos da engenharia, como análise estrutural, processos de transporte de calor e massa, assim como na conformação mecânica.

Dentre os métodos que surgiram para auxiliar nos cálculos e especificações de projetos encontram-se o Método dos Elementos Finitos, o Método dos Volumes Finitos e o Método dos Volumes de Contorno. De forma geral, estes métodos exigem um investimento significativo inicial, porém com o domínio dos *softwares*, os projetos passam a ser cada vez menos erráticos. Através destes métodos se tornam possíveis os cálculos de deformação, tensões efetivas e temperatura em cada instante do processo e em cada ponto do processo. Desta forma a análise dos pontos críticos é otimizada, permitindo uma boa tomada de decisões com relação a projeto e custos. Toda uma abordagem de processo também está se tornando cada vez mais corriqueira. Um exemplo prático é mostrado no estudo de Qin, Balendra e Chodnikiewicz [42], onde a temperatura de uma matriz de extrusão é determinada para diversos ciclos com o auxílio de uma abordagem de simulação computacional por elementos finitos e com o apoio das teorias de transferência de calor. Os diversos parâmetros utilizados nas simulações computacionais são descritos na Figura 2.29.

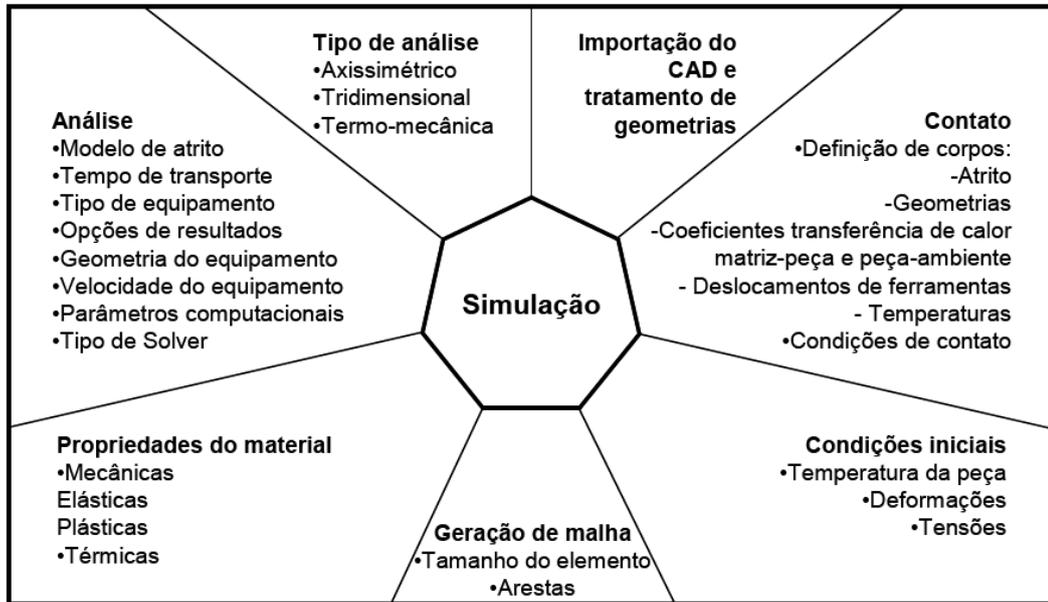


Figura 2.29 - Parâmetros utilizados em simulações [29]

### 2.5.1 Método dos Elementos Finitos

Diversos tipos de problemas de engenharia são descritos matematicamente na forma de equações diferenciais ordinárias e parciais. A solução exata usualmente é fruto de um método analítico encontrado através de métodos algébricos e diferenciais aplicados a geometrias e condições de contorno particulares. A aplicação generalizada dos métodos analíticos para diferentes geometrias e condições de contorno é difícil e trabalhosa. O Método dos Elementos Finitos consiste em diferentes métodos numéricos que aproximam a solução de problemas de valor de fronteira descritos, tanto por equações diferenciais ordinárias quanto por equações diferenciais parciais, através da subdivisão da geometria do problema em elementos menores, chamados elementos finitos, nos quais a aproximação da solução exata pode ser obtida por interpolação de uma solução aproximada.

O conjunto de elementos representados no método é chamado de malha e, devido à evolução do mesmo, não precisa ser estruturado, ou em outras palavras, com tamanhos uniformes. A Figura 2.30 mostra uma malha não estruturada utilizada para auxiliar na convergência do resultado do método.

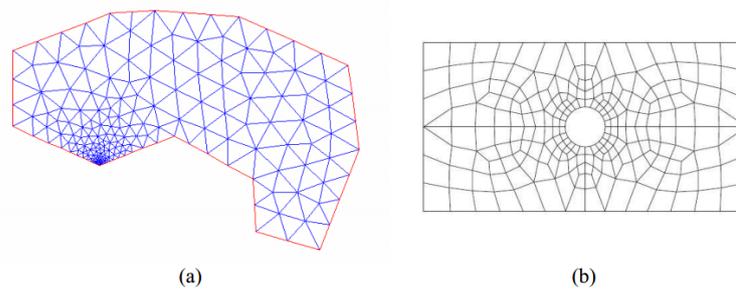


Figura 2.30 - Malha triangular (a) e retangular (b)

De maneira mais sucinta, no Método dos Elementos Finitos, uma geometria pré-determinada é dividida em pequenos elementos dando origem à malha. Através de funções polinomiais e operações matriciais, os elementos são caracterizados de forma independente. São nessas conexões dos elementos vizinhos que as condições de contorno e as características de cada elemento são determinadas e as reações aplicadas. A Figura 2.31 esboça uma malha de elementos finitos para um processo de matriz aberta [43].

O processo de solução por elementos finitos segue 3 estágios:

- a) Pré-processamento;
- b) Processamento;
- c) Pós-processamento.

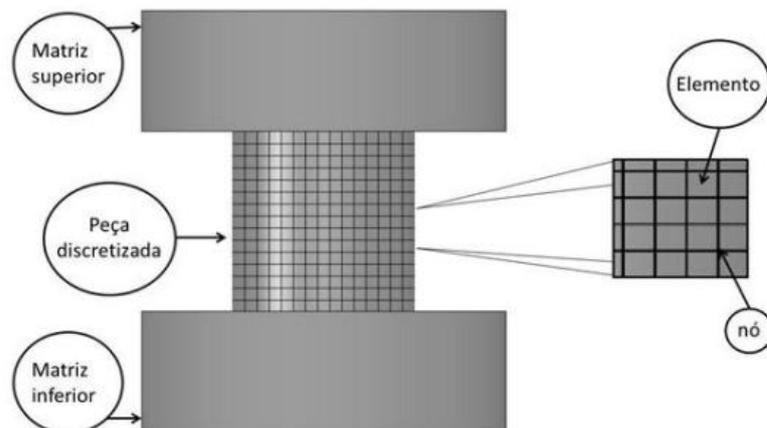


Figura 2.31 - Malha de elementos finitos de um processo de reclaque [43]

O pré-processamento corresponde ao modelamento matemático e geométrico, englobando todos os dados de entrada e condições de contorno. O processamento em si é responsável pela solução das equações determinadas no pré-processamento. Por fim, o pós-processamento é responsável por plotar os resultados obtidos no processamento, fornecendo dados como deformações, temperaturas e tensões, por exemplo. Os três estágios em conjunto formam uma análise completa por elementos finitos [43].

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DO PROCESSO COM ALUMÍNIO

Apesar de todos os estudos desenvolvidos e citados nas referências para a determinação do coeficiente de troca térmica entre ferramenta e material, o foco do trabalho não é a determinação deste coeficiente. O objetivo é o uso de uma metodologia empírica, uma vez que já se tem o processo de conformação de rebites de Alumínio desenvolvido e aplicado. Para a determinação dos coeficientes de transferência de calor e das temperaturas envolvidas, foi preciso efetuar algumas medições no processo. Ao longo do processo é possível notar que a temperatura sofre uma elevação a medida que as peças são conformadas, até chegar ao seu estado estacionário, ou de equilíbrio. Sabe-se que o arame de Alumínio é inserido na matriz a temperatura ambiente. A ferramenta inicia seu processo a temperatura ambiente, porém, ao longo do tempo, o processo tem um acréscimo de energia e, conseqüentemente, um acréscimo de temperatura é observado na matriz.

As temperaturas envolvidas no processo de fabricação do rebite de alumínio foram levantadas experimentalmente. Para a medição da temperatura da ferramenta durante o processo foi utilizada uma câmera termográfica, ou termovisor, da marca Fluke e modelo Ti125. A Figura 3.1 demonstra o modelo do termovisor utilizado.



Figura 3.1 - Termovisor do modelo Ti125 da marca Fluke

Ao passo que a temperatura do arame, que era ambiente no início do processo e considerada de 20°C, a temperatura medida da matriz variou até que atingiu a temperatura de equilíbrio. Nota-se que, a partir do tempo de equilíbrio, a temperatura segue o perfil representado na Figura 3.2. A emissividade foi calibrada com o auxílio de um termômetro de

contato. Desta forma, utilizou-se a emissividade que igualou a temperatura no termovisor ao termômetro de contato. O valor utilizado foi de 0,80. Esta calibração foi necessária devido à presença de uma fina película de óleo na parede do ferramental. Portanto, não são encontrados valores de emissividade específicos para esta condição de processo.

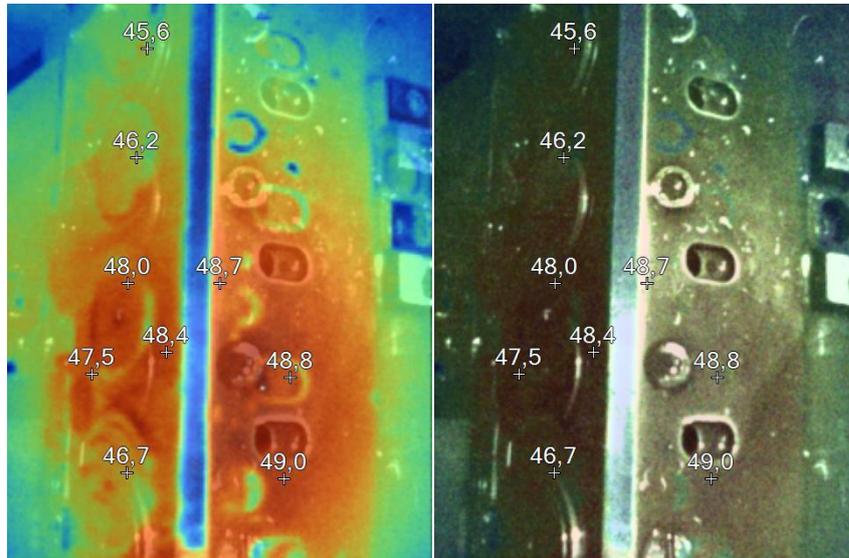


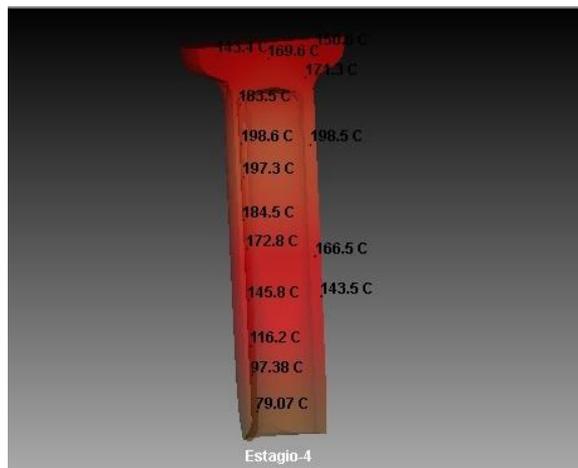
Figura 3.2 - Perfil de temperaturas do ferramental obtidas pelo termovisor em estado equilíbrio, com filtro IR (esquerda) e imagem real (direita)

Para a determinação do coeficiente de troca de calor entre a peça e o ambiente, mediu-se a temperatura da peça exatamente após sair da matriz, comparando-se o resultado obtido pela simulação com diversos coeficientes. Assim que o coeficiente simulado resultou na mesma temperatura final da peça, considerou-se obtido o coeficiente de troca de calor entre peça e o ambiente correto. O objetivo do trabalho não é calcular este coeficiente de calor teoricamente, mas obtê-lo via simulação computacional para poder utilizá-lo para otimizações do processo e para a simulação do processo com aço inoxidável. Entende-se que é necessária a utilização desta metodologia em função da dificuldade de se estimar a quantidade de óleo presente no processo, pois ela é variável em função da temperatura e sua temperatura de difícil determinação. O fluxo de calor condutivo, ou coeficiente de troca entre a peça e a ferramenta,  $\alpha$ , foi considerado igual a  $1000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e as temperaturas finais dos rebites para cada coeficiente de troca de calor entre peça e ambiente simulados está demonstrada na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Simulação de diferentes coeficientes de troca de calor entre a peça e o ambiente

Coeficiente de troca de calor entre peça e ambiente simulado, $\alpha$ , (W/(m <sup>2</sup> .K))	Temperatura da peça final, $\vartheta$ (°C)
1000	300
1750	240
2500	220
5000	200
<b>7500</b>	<b>170</b>
10000	150
50000	60
100000	40

Para determinação do coeficiente de troca de calor entre a peça e a ferramenta, calculou-se a média das temperaturas do rebite para cada simulação realizada. Para medição, utilizou-se um termômetro digital de contato. A temperatura média da peça obtida experimentalmente após o processo foi de 170°C. Pela Tabela 3.2 é possível estabelecer um coeficiente de 7500 W/(m<sup>2</sup>.K). A Figura 3.3 mostra o perfil de temperatura para um  $\alpha$  de 7500 W/(m<sup>2</sup>.K).

Figura 3.3 - Distribuição de temperaturas para o coeficiente convectivo,  $\alpha$ , de 7500 W/(m<sup>2</sup>.K)

## 3.2 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE ESCOAMENTO DO ALUMÍNIO E AÇO INOXIDÁVEL

### 3.2.1 Curva de escoamento da Liga de Alumínio AA5052

A curva de escoamento do arame de liga AA5052 foi determinada através do ensaio de compressão, conforme representada na Figura 3.4.

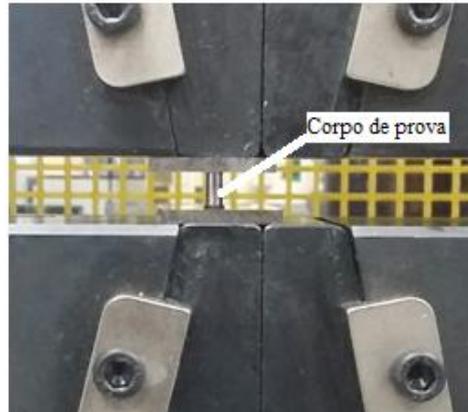


Figura 3.4 - Corpo de prova durante o ensaio de compressão

Nele foram obtidas as forças ( $F_T$ ) correspondentes às deformações absolutas. Através do cálculo da área instantânea se obtém a tensão verdadeira de escoamento, que é plotada em função da deformação verdadeira ( $\varphi$ ). A área instantânea,  $A_f$ , é obtida pelo princípio da conservação do volume aplicado ao corpo de prova cilíndrico de 7,52 mm de altura ( $h_o$ ) e 3,76 mm de diâmetro ( $d_o$ ). A equação 25 demonstra o cálculo matemático para determinação da área final.

$$A_f = \frac{A_o \cdot h_o}{h} \quad (25)$$

Através da divisão da Força,  $F_T$ , pela área final,  $A_f$ , obtém-se a tensão verdadeira,  $\sigma$ . Já a deformação verdadeira na altura,  $\varphi_h$ , é calculada de acordo com a equação (1). A Tabela 3.2 mostra alguns valores obtidos durante o ensaio de compressão da liga de Alumínio em questão.

Tabela 3.2 - Dados para obtenção da curva de escoamento por compressão da liga de Alumínio AA5052

Força, $F_T$ (N)	Deformação absoluta, $\Delta h$ (mm)	Altura final, $h_1$ (mm)	Área final, $A_f$ (mm <sup>2</sup> )	Tensão verdadeira, $k_f$ (MPa)	Deformação verdadeira na altura, $\varphi_h$ (-)
1800	0.87	7.43	11.29	159	0.01
2000	0.93	7.36	11.30	177	0.02
2300	1.09	7.14	11.34	203	0.05
2800	1.55	6.66	11.46	244	0.12
3200	2.18	5.96	11.63	275	0.23

Na Figura 3.10 são mostradas as curvas de escoamento originadas pelo ensaio de compressão. Quando se olham os resultados demonstrados na revisão bibliográfica, as tensões atingiram módulos semelhantes para as deformações verdadeiras até 0,17. Após estes valores,

na revisão, pode-se observar a falha do ensaio, ou fratura da amostra. Esse fato não foi observado na figura 3.5, pois no ensaio de compressão são suportadas maiores deformações no material do que as obtidas pelo ensaio de tração. As deformações verdadeiras diferem das absolutas devido as folgas do equipamento. Inicialmente, as folgas são reduzidas e, quando eliminadas, o material absorve a deformação por inteiro.

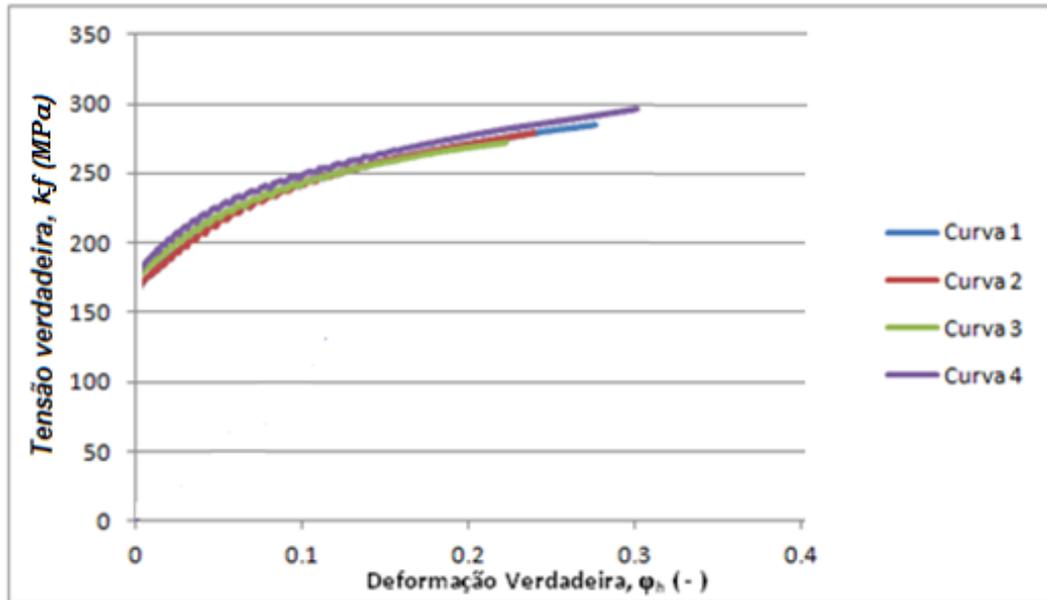


Figura 3.5 - Curvas de escoamento, obtidas no ensaio de compressão do Alumínio AA5052 a frio

O ensaio de compressão no Alumínio foi realizado com a máquina de ensaios universal da marca EMIC, modelo “23-100”. O lubrificante utilizado foi grafite na forma de pó. A velocidade de realização do ensaio foi de 0,4mm/s e o ensaio de compressão foi realizado de acordo com a norma ASTM E9-09. Substituindo os valores ensaiados na equação 18 tem-se a Velocidade de deformação,  $\dot{\phi}$ , representada pela equação 26.

$$\dot{\phi} = \frac{V_M}{h} = \frac{0,4}{5,96} = 0,067 \text{ s}^{-1} \quad (26)$$

O corpo de prova utilizado é cilíndrico, com 7,52 mm de comprimento e 3,76mm de diâmetro (D). Para a obtenção do corpo de prova foi cortado o arame com um comprimento um pouco superior ao tamanho final de 7,52mm. Então o mesmo foi faceado de modo a se obter uma geometria plana e sem desalinhamentos transversais na seção.

O corpo de prova está representado na Figura 3.6, com suas respectivas medidas, antes e depois do ensaio de compressão.

As medidas do corpo de prova utilizadas foram um comprimento total ( $h_0$ ) de 7,52 mm e um diâmetro ( $D_0$ ) de 3,76 mm. Conforme citado na revisão bibliográfica, utiliza-se o

método de Hollomon-Ludwik para se determinar a linearização da curva de escoamento, mostrada na figura 3.7. Essa curva representa o comportamento para o trecho de interesse da curva da figura 3.5, compreendendo a deformação verdadeira,  $\phi$ , de 0,02 a 0,30. Também, através da curva obtida é possível se observar uma tensão de escoamento de aproximadamente 190MPa, valor condizente com a referência bibliográfica.

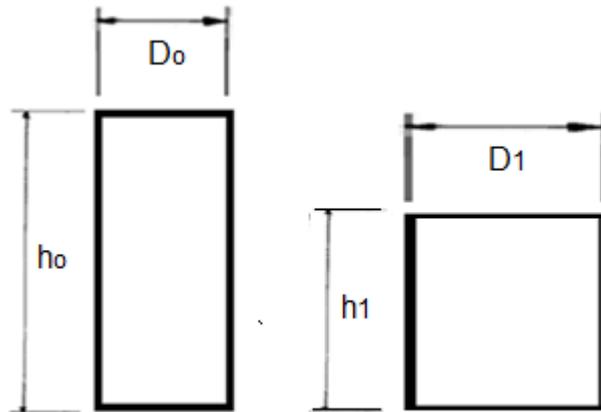


Figura 3.6 - Corpo de prova cilíndrico com suas medidas, antes e depois do ensaio de compressão.

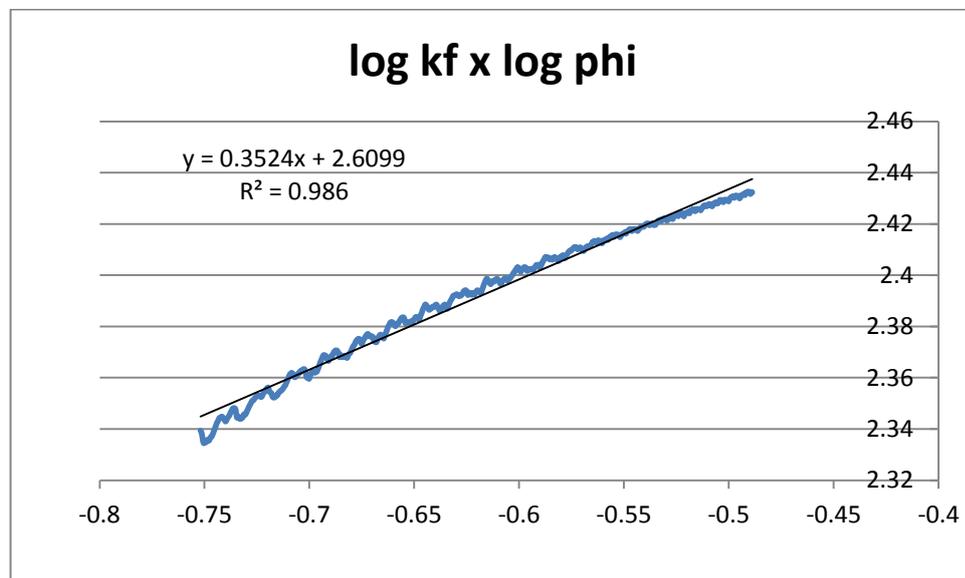


Figura 3.7 – Curva de escoamento em escala logarítmica para o Alumínio 5052

Através da equação da reta, mostrada na figura 3.13, se obtém a equação de Hollomon-Ludwik. Partindo da equação 21, chegam-se aos cálculos matemáticos

demonstrados nas equações 27 e 28. Com os valores se obtém a curva de escoamento,  $k_f$ , demonstrada na equação 29, e válida para o intervalo de 0.02 até 0.30.

$$\log(k_f) = 2,6099 + 0,3524 \cdot \log \varphi \quad (27)$$

$$\log C = 2,6099 \quad (28)$$

$$k_f = 407,28 \cdot \varphi^{0.3524} \quad (29)$$

A curva de compressão para o Alumínio foi ensaiada a frio e para temperaturas mais elevadas a curva sofre alteração. Já o índice de encruabilidade,  $n$ , se aproximou do resultado demonstrado na revisão.

### 3.2.2 Curva de escoamento das ligas de aço inoxidável 302, 420 e 430

Após determinação da curva do Alumínio, é necessário se ter as curvas dos arames de aço inoxidável. Para os materiais determinados foram utilizadas as curvas existentes na biblioteca do Simufact 11.0, mostrados nas Figuras abaixo. Sabe-se que o aço inoxidável tem maior resistência mecânica que o Alumínio e para não sobrecarregar as ferramentas e o maquinário, é conveniente que seja conformado a morno ou a quente, afim de reduzir os esforços e viabilizar o processo. As Figuras 3.8, 3.9 e 3.10 mostram as curvas de tração das ligas de Inox 302, 430 e 420, respectivamente. Pode-se notar a redução da tensão de escoamento em função do aumento de temperatura e da diminuição da velocidade de deformação.

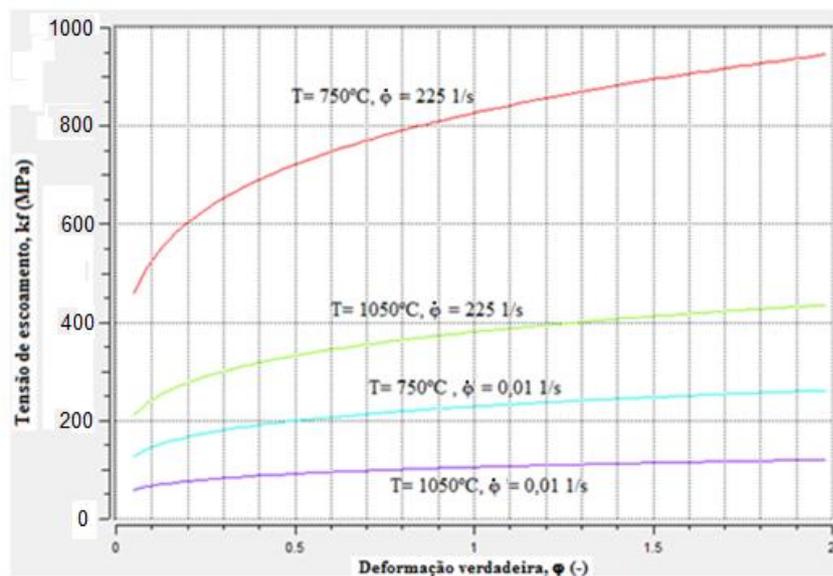


Figura 3.8 - Curva de escoamento do arame de aço inoxidável da liga ABNT 302 (750 a 1050°C) [Simufact]

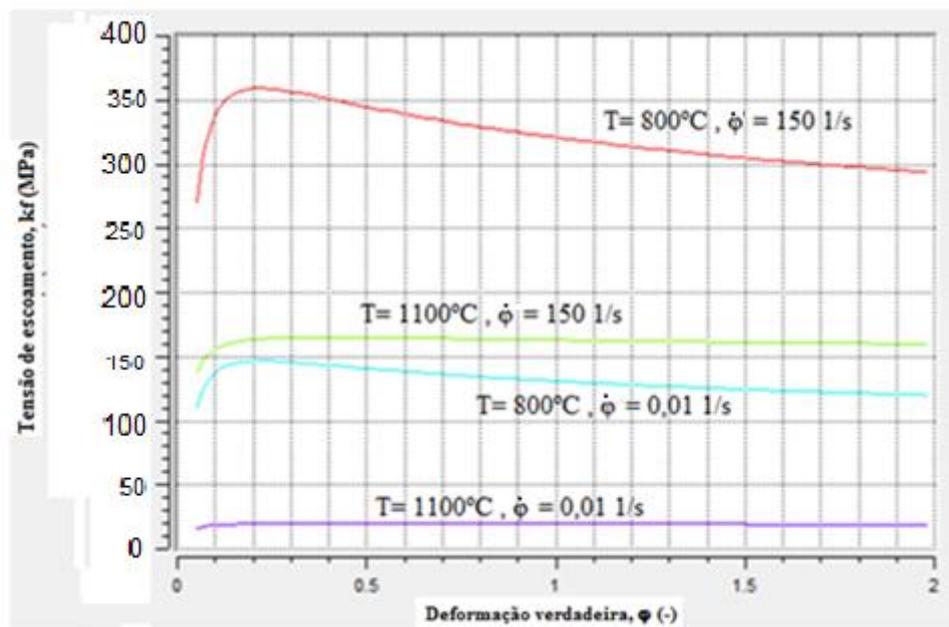


Figura 3.9 - Curva de escoamento do arame de aço inoxidável da liga ABNT 430 (800 a 1100°C) [Simufact]

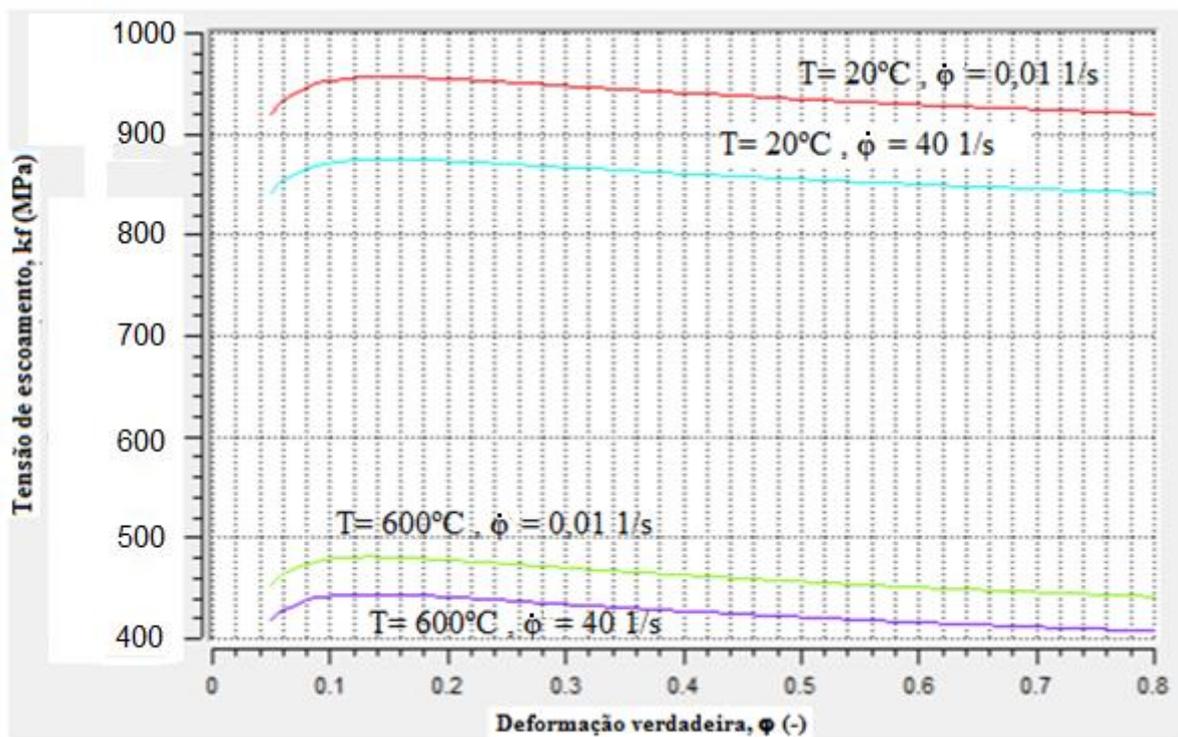


Figura 3.10 - Curva de escoamento do arame de aço inoxidável da liga ABNT 420 (20 a 600°C) [Simufact]

### 3.3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO

Para a determinação do coeficiente de atrito existente entre o arame e a ferramenta, foi utilizado o Ensaio do Anel [36]. Por se tratar de um ensaio convencional para esforços

compressivos, onde um corpo de prova em formato de anel é comprimido, pode-se notar uma redução do diâmetro interno e aumento do externo para qualquer corpo com atrito não nulo. Sendo assim, foi possível observar o comportamento do material com o metal da ferramenta. Alguns parâmetros, como acabamento superficial e o tipo de lubrificante utilizado são de extrema importância e devem ser reproduzidos de forma mais semelhante possível à realidade. A influência de parâmetros, como acabamento superficial e temperatura, são comprovados pelo estudo de Qin, Balendra e Chodnikiewicz [42], onde foram feitos experimentos com corpos de provas com diferentes rugosidades superficiais, lubrificantes e temperaturas no contato entre ferramenta e bilette.

Para confecção dos corpos de prova, usinaram-se anéis com dimensões especificadas na Figura 3.11 e de mesmo material do arame, da liga Al 5052. Afim de se testar o coeficiente para os diferentes tipos de aço inoxidável, usinou-se corpos de prova de aço 302 e 420. Para o contato do material com a ferramenta, utilizou-se a própria matriz, de metal duro WC-Co sinterizado, fornecido pela DURIT (GD50). A utilização do mesmo material garante com que o ensaio reproduza uma condição semelhante à que acontece na prática.

A rugosidade e o acabamento superficial do arame também devem representar a condição encontrada no processo. Para isso serão avaliadas as rugosidades do arame e do acabamento usinado do corpo de prova.

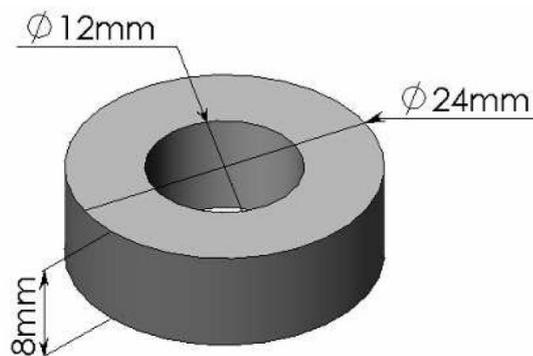
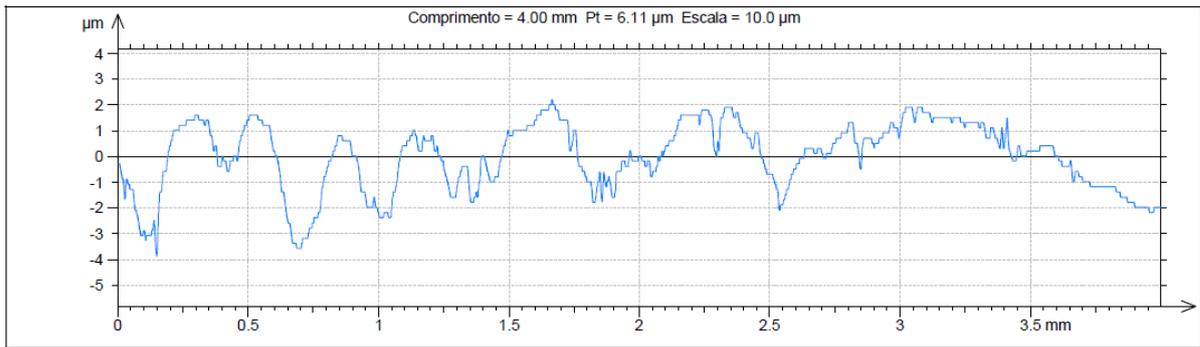


Figura 3.11 - Representação do corpo de prova utilizado para o ensaio do anel [36]

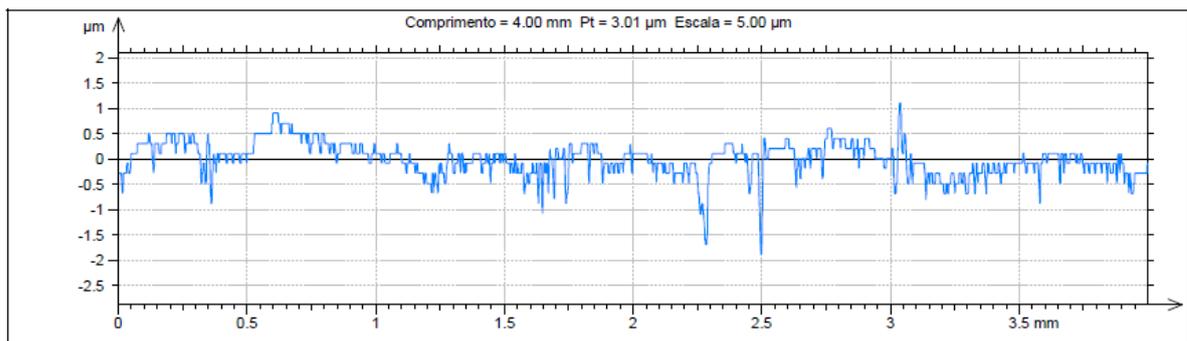
Para validação do ensaio, buscou-se igualar a rugosidade do anel com a do arame utilizado no processo. Foram avaliadas as rugosidades do anel após processo de usinagem, assim como a rugosidade do arame. Os testes foram conduzidos conforme a norma ISO 4287. O equipamento utilizado foi o rugosímetro Surtronic-S25, da marca Taylor Hobson.

As Figuras 3.12 e 3.13 mostram a rugosidade do corpo de prova e do arame ensaiado.



ISO 4287			
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza			
<b>Rt</b>	4.51	μm	Filtro gaussiano, 0.8 mm
<b>Rp</b>	1.38	μm	Filtro gaussiano, 0.8 mm
<b>Rv</b>	1.97	μm	Filtro gaussiano, 0.8 mm
<b>Ra</b>	0.697	μm	Filtro gaussiano, 0.8 mm
Parâmetros de espaçamento - Perfil de aspereza			
<b>RSm</b>	0.181	mm	Filtro gaussiano, 0.8 mm
Parâmetros de pico - Perfil de aspereza			
<b>RPc</b>	2.50	1/mm	+/-0.5 μm, Filtro gaussiano, 0.8 mm

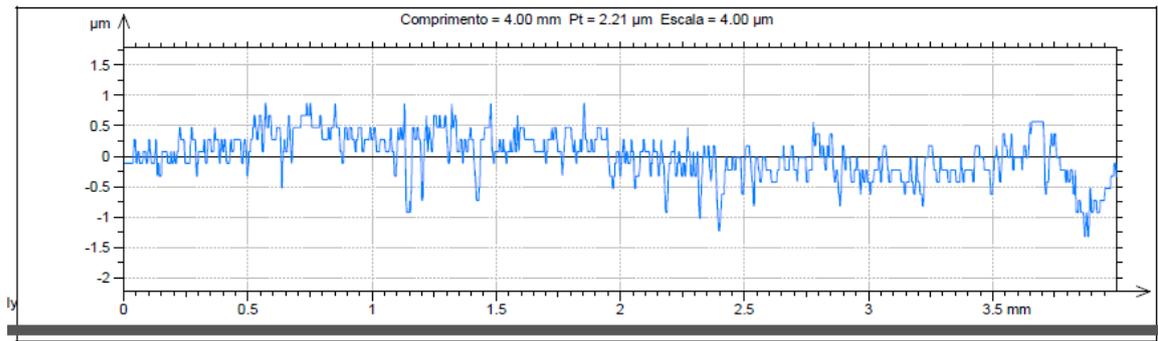
Figura 3.12 - Rugosidade do corpo de prova utilizado no ensaio do anel



ISO 4287			
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza			
<b>Rt</b>	3.04	μm	Filtro gaussiano, 0.8 mm
<b>Rp</b>	0.644	μm	Filtro gaussiano, 0.8 mm
<b>Rv</b>	1.00	μm	Filtro gaussiano, 0.8 mm
<b>Ra</b>	0.181	μm	Filtro gaussiano, 0.8 mm
Parâmetros de espaçamento - Perfil de aspereza			
<b>RSm</b>	0.0508	mm	Filtro gaussiano, 0.8 mm
Parâmetros de pico - Perfil de aspereza			
<b>RPc</b>	0.625	1/mm	+/-0.5 μm, Filtro gaussiano, 0.8 mm

Figura 3.13 - Rugosidade do arame utilizado em processo, da liga Al 5052

Após 5 medições do corpo de prova do anel e do arame, as médias do Ra obtidas foram de 0,65 e 0,22 μm, respectivamente. Afim de se igualar as rugosidades, foi lixada a superfície do anel com diferentes granulometrias de lixa. Como mostrado na Figura 3.14, conseguiu-se igualar a rugosidade com uma lixa P1000, obtendo-se um valor muito próximo de 0,19 μm.



ISO 4287			
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza			
<b>Rt</b>	1.85	μm	Filtro gaussiano, 0.8 mm
<b>Rp</b>	0.652	μm	Filtro gaussiano, 0.8 mm
<b>Rv</b>	0.928	μm	Filtro gaussiano, 0.8 mm
<b>Ra</b>	0.195	μm	Filtro gaussiano, 0.8 mm
Parâmetros de espaçamento - Perfil de aspereza			
<b>RSm</b>	0.0432	mm	Filtro gaussiano, 0.8 mm
Parâmetros de pico - Perfil de aspereza			
<b>RPc</b>	2.19	1/mm	+/-0.5 μm, Filtro gaussiano, 0.8 mm

Figura 3.14 - Rugosidade do corpo de prova lixado e adequado ao Ensaio do anel

O lubrificante utilizado no processo foi o Óleo Hidráulico da marca Ipiranga, de referência IPITUR AW 68 [44]. Ele foi aplicado sob e sobre o corpo de prova, de modo que, ao longo da compressão, a interface entre anel e ferramenta ficasse completamente lubrificada. O ensaio foi realizado a frio, uma vez que o contato entre ferramenta e arame é extremamente rápido e o arame é inserido a temperatura ambiente. O contato entre arame e ferramenta dura aproximadamente 0,15 segundos, uma vez que a velocidade de processo é de 350 peças por minuto.

Para poder estimar o coeficiente de atrito são necessárias sucessivas compressões com deformações diferentes. Para isso, utilizaram-se três corpos de prova para o Alumínio, inox 302 e 420. Não se encontrou material disponível no mercado para o ensaio do Aço inoxidável 430. Neles foram exercidas deformações diferentes, de modo com que ficassem com alturas variadas. A Figura 3.15 mostra à esquerda um corpo de prova não deformado e na sua direita, três corpos de prova com deformações diferentes. Para comprovação dos resultados, fez-se três ensaios para cada deformação.



Figura 3.15 – Corpos de prova de Alumínio AA5052 para o ensaio do anel com diferentes reduções

Com as alturas finais dos corpos de prova, sendo respectivamente de 8, 7, 5 e 4mm, simulou-se no *software Simufact* as reduções do diâmetro interno em função da redução de altura para diversos coeficientes de atrito a frio, para o Alumínio 5052, Inox 302 e Inox 420. Desta forma, é possível traçar uma curva de calibração para os resultados experimentais de cada material, conforme exibido nas Figuras 3.16, 3.17 e 3.18. Os resultados experimentais estão descritos como “Ensaio1”, “Ensaio2” e “Ensaio3”, enquanto as curvas de calibração estão demonstradas pelos coeficientes de atrito de 0,1 até 0,35.

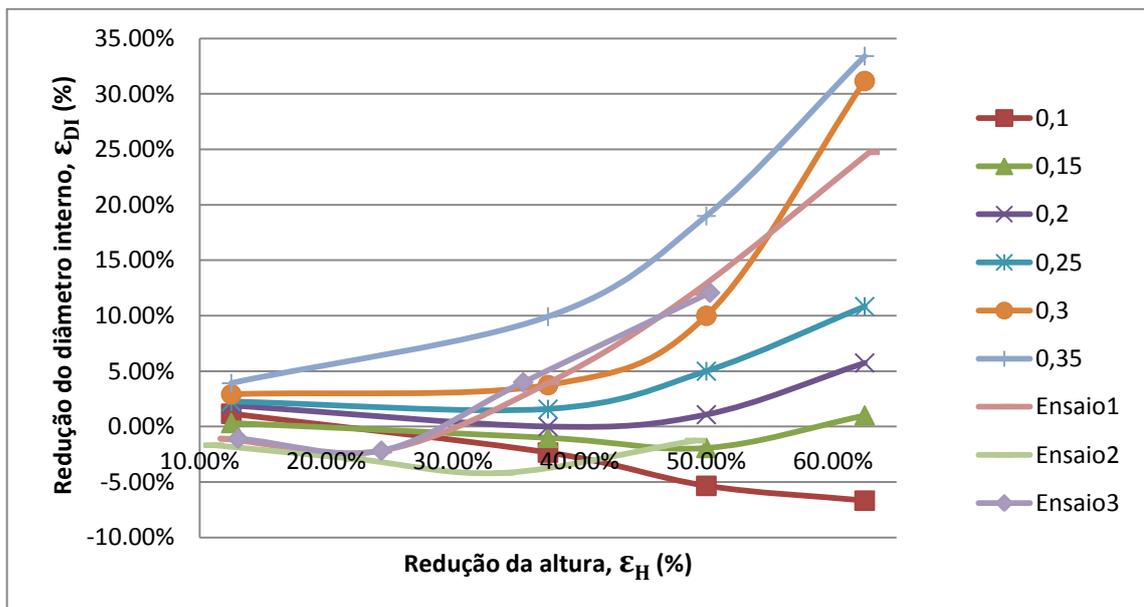


Figura 3.16 - Curva de calibração e pontos obtidos através da simulação e ensaio do anel para o Alumínio 5052

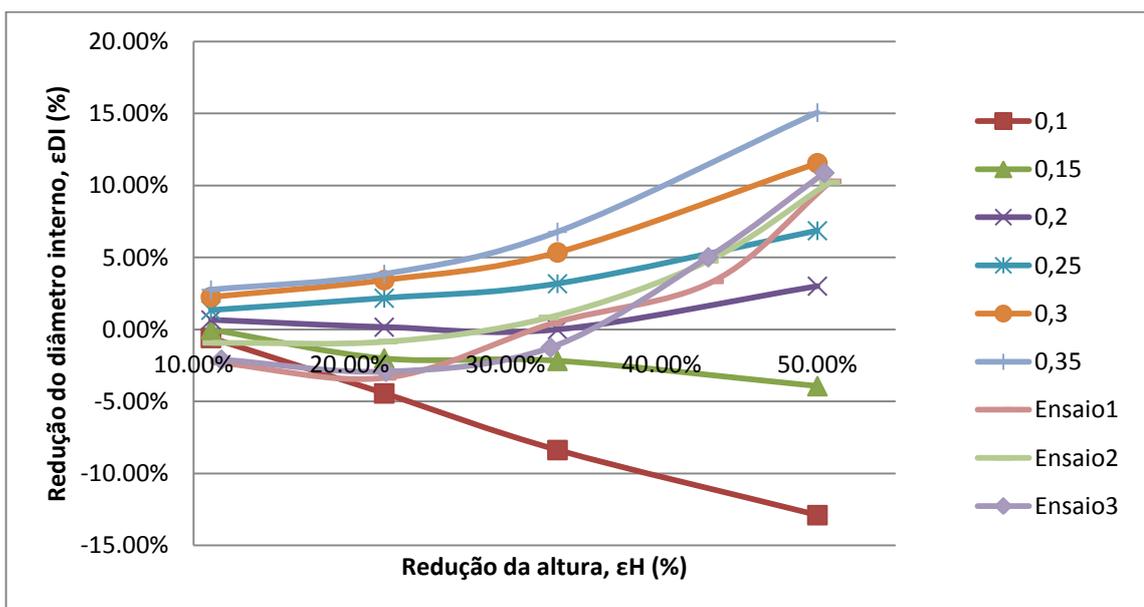


Figura 3.17 - Curva de calibração e pontos obtidos através da simulação e ensaio do anel para o Inox 302 a frio

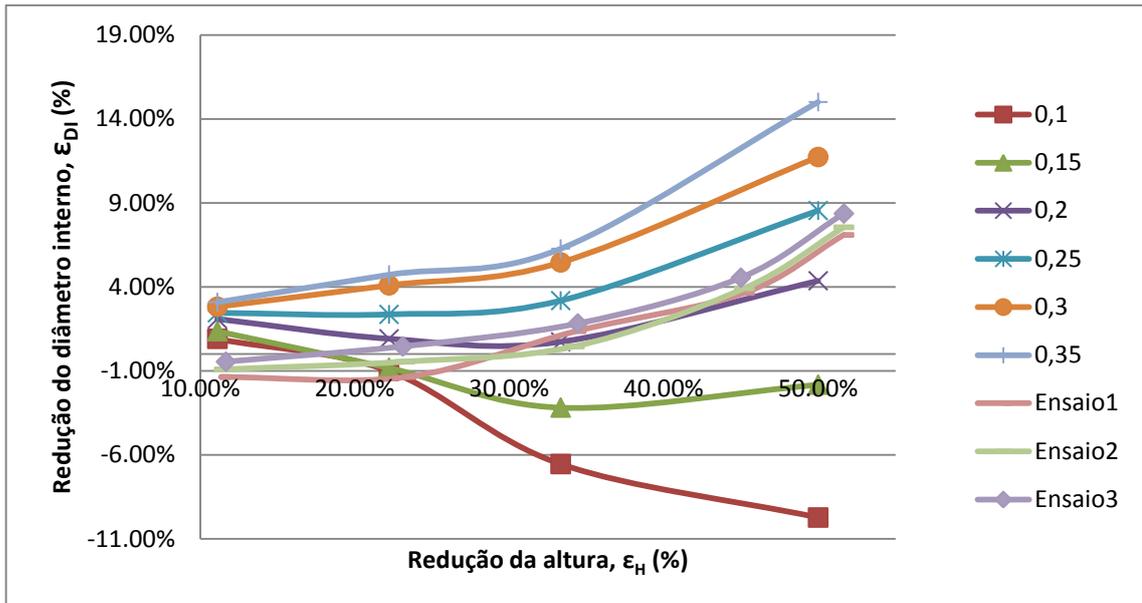


Figura 3.18 - Curva de calibração e pontos obtidos através da simulação e ensaio do anel para o Inox 420 a frio

Após a realização do ensaio de compressão, determinou-se os valores de redução do diâmetro interno, assim como a redução de altura. Com estes valores, que estão mostrados na Tabela 3.3, além da curva de calibração, adota-se um coeficiente de atrito de processo de 0,30 para o Alumínio 5052. Apesar deste valor não ser constante, utilizou-se uma média, sendo que para deformações pequenas o material apresentou um coeficiente de atrito muito baixo. Já para deformações mais elevadas, o coeficiente de atrito se manteve perto de 0,30. Para as ligas de aço inoxidável, por sua vez, utilizou-se um coeficiente de atrito médio igual a 0,20. As Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 nos permitem fazer um comparativo entre os diferentes tipos de materiais.

Tabela 3.3 - Resultados obtidos no ensaio do anel para o Alumínio Al5052

Altura	8	7,07	6,05	4,99	4,08	2,97
Diâmetro Interno	12	12,13	12,26	11,52	10,55	9,03
Redução do diâmetro interno	0,00%	-1,08%	-2,17%	4,00%	12,08%	24,75%
Redução da altura	0,00%	11,63%	24,38%	37,63%	49,00%	62,88%

Tabela 3.4 - Resultados obtidos no ensaio do anel para o aço inoxidável ABNT 302

Altura	9	7.94	6.99	6.04	5.13	4.46
Diâmetro Interno	11.95	12.2	12.3	12.1	11.35	10.65
Redução do diâmetro interno	0.00%	-2.09%	-2.93%	-1.26%	5.02%	10.88%
Redução da altura	0.00%	11.78%	22.33%	32.89%	43.00%	50.44%

Tabela 3.5 - Resultados obtidos no ensaio do anel para o aço inoxidável ABNT 420

Altura	9.05	7.96	6.91	5.92	4.93	4.35
Diâmetro Interno	11	11.1	11.05	10.95	10.57	10.17
Redução do diâmetro interno	0.00%	-0.91%	-0.45%	0.45%	3.91%	7.55%
Redução da altura	-0.56%	11.56%	23.22%	34.22%	45.22%	51.67%

### 3.4 ENSAIOS METALOGRAFICOS

Os ensaios metalográficos foram realizados para as amostras dos materiais utilizados no trabalho. Para isso utilizaram-se amostras das ligas AA 5052, além das ligas de aço inoxidável 302, 420 e 430. O método foi seguido conforme bibliografia citada, acompanhando os passos de corte, embutimento, lixamento, polimento, ataque químico e análise metalográfica no microscópio.

A região escolhida para avaliação foi o corte transversal do arame, pois como o arame é processado pela trefilação, ele pode apresentar microestrutura irregular ao longo da seção transversal e conseqüentemente propriedades mecânicas que variam ao longo da seção.

Para facilitar os processos de lixamento e polimento, foi realizado um embutimento em baquelite. A temperatura que o baquelite submete os corpos de prova a aproximadamente 150°C não altera as características dos materiais. Para o Alumínio, que possui menores temperaturas de trabalho, também não serão gerados problemas segundo a bibliografia [45].

O ataque químico foi realizado com soluções aquosas de ácidos conforme recomendação da bibliografia [45, 40]. Para as ligas 420 e 430 o ataque foi realizado com Picral 2%, para o 302, com o Kalling's nº 2, e para o AA5052, com o reagente Keller. As normas que descrevem a metodologia da metalografia são a ASTM E3-01[46] e ASTM E407-07 [47].

Após a análise metalográfica em microscópio ótico, obtiveram-se as imagens para o AA 5052 e para os aços inoxidáveis AISI 302, AISI 420 e AISI 430, mostradas nas Figuras 3.19, 3.20, 3.21 e 3.22.

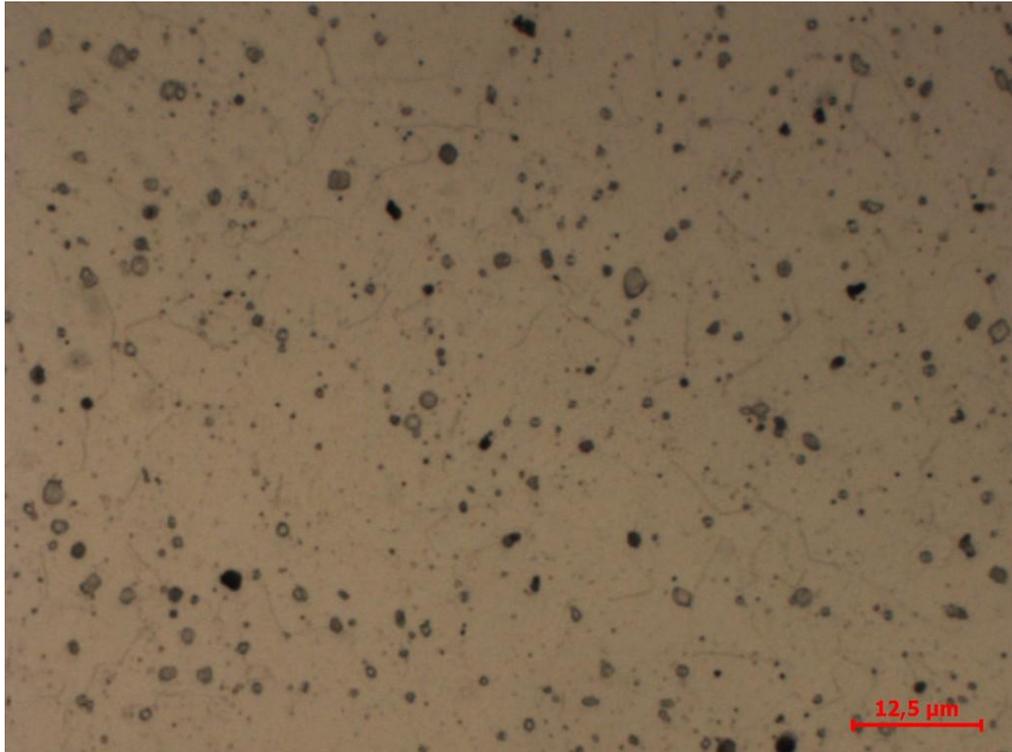


Figura 3.19 - Micrografia da amostra de Alumínio AA5052. Ataque químico: Keller

A análise micrográfica do Alumínio AA5052 mostrou uma matriz formada por grãos de Alumínio  $\alpha$  com precipitados de magnésio ao longo dos contornos de grão. Também, algumas inclusões. De acordo com a revisão bibliográfica, no subcapítulo 2.3.6, se evidencia encruamento leve, ou seja, há uma leve distorção nos grãos, confirmando a redução de área inicial de 25% do material.

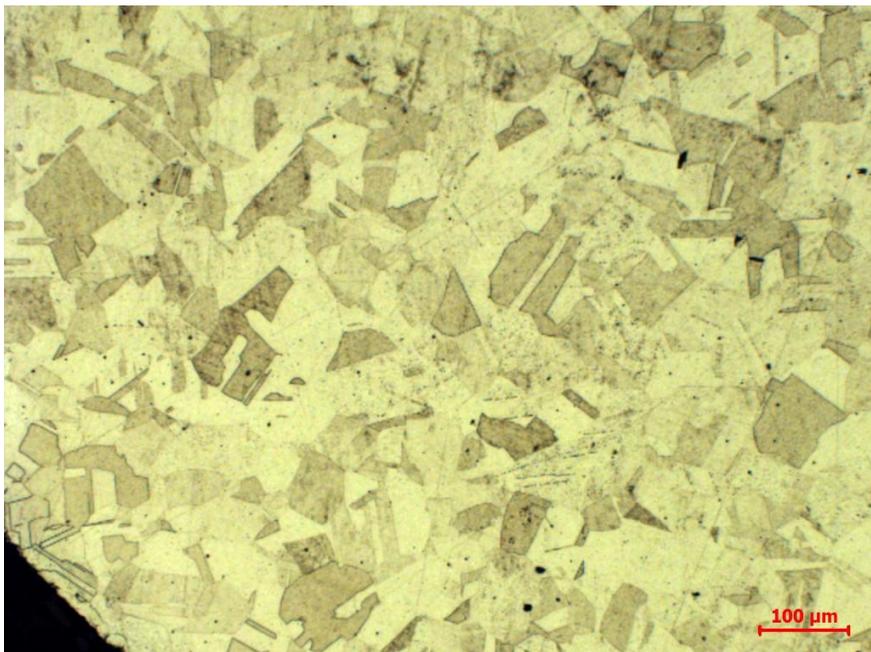


Figura 3.20 - Micrografia da amostra de aço inoxidável ABNT 302. Ataque químico: Kalling's nº2

Nas imagens da liga 302 fica evidente a estrutura austenítica do aço pela presença dos grãos equiaxiais. Não se observa a ocorrência de encruamento, pois os grãos aparentam uniformidade entre a superfície e o núcleo da amostra.

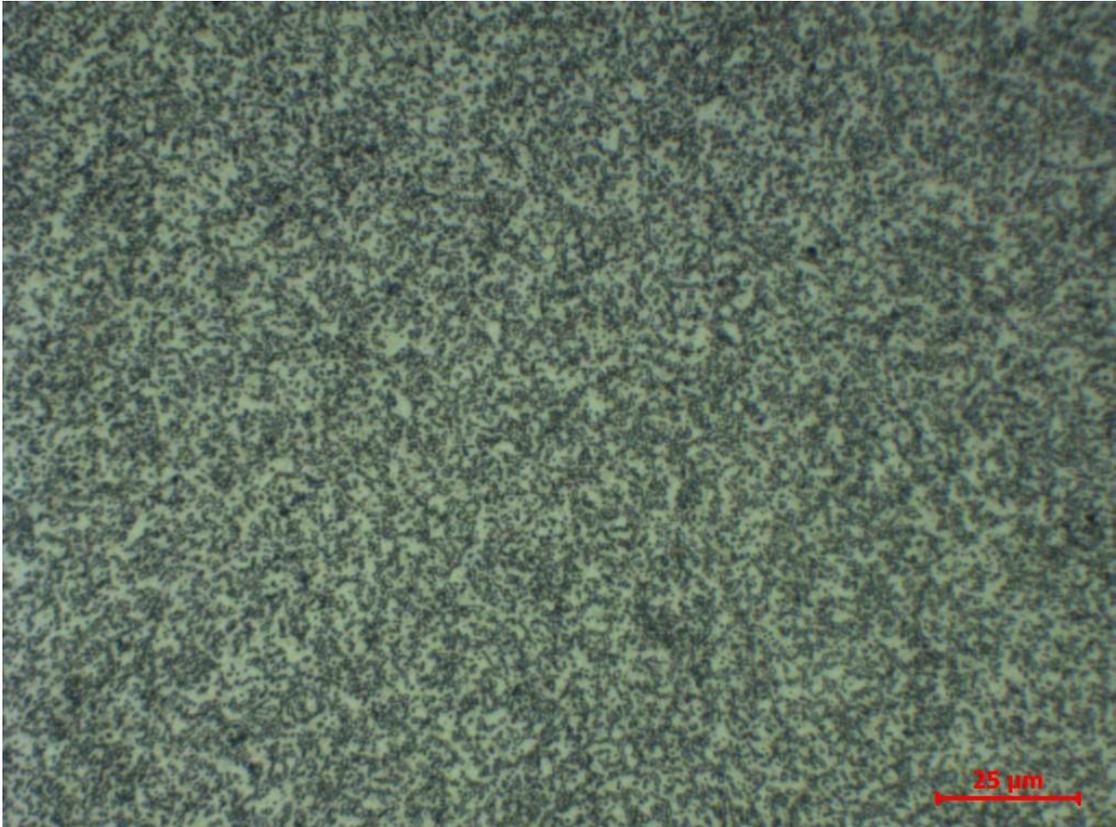


Figura 3.21 - Micrografia da amostra de aço inoxidável ABNT 420. Ataque químico: Picral 2%

A estrutura martensítica do aço 420 não está aparente devido ao estado recozido aparente da amostra. O que se pode ver são grãos muito refinados, que representam a estrutura ferrítica com os carbonetos de cromo. Após tratamento térmico, a estrutura martensítica ficará evidente. Este fato não é desejado para o processo, pois dificulta a conformação, ou seja, a microestrutura resultará em um material menos dúctil e mais resistente à deformação.

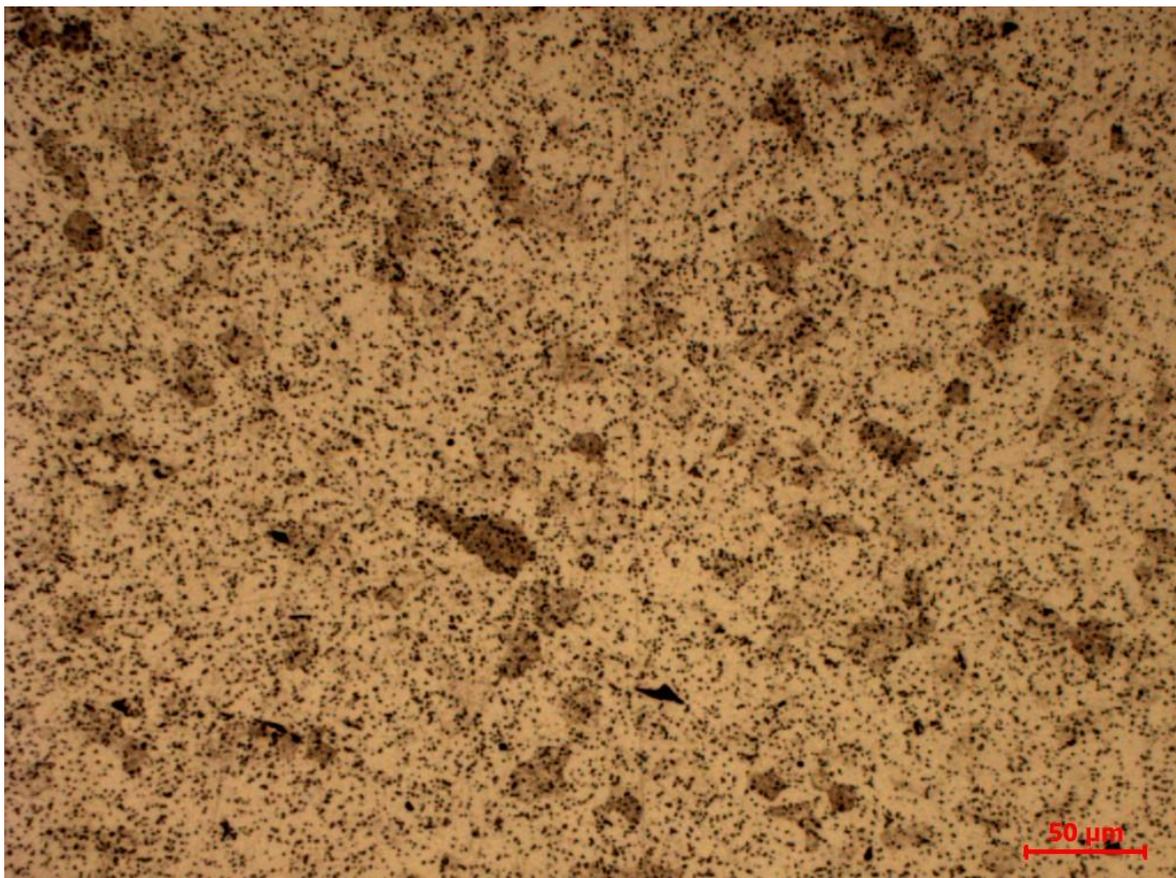


Figura 3.22 - Micrografia da amostra de aço inoxidável ABNT 430. Ataque químico: Picral 2%

Como esperado a estrutura observada para o aço 430 é predominantemente ferrítica. Pelo que se pode observar, o estado é recozido e os grãos apresentam uniformidade ao longo da seção.

### 3.5 ENSAIOS DE CORROSÃO

O ensaio foi realizado de acordo com a norma ISO 8442-2, que trata de materiais metálicos para contato com alimentos. De acordo com a norma, os materiais devem ser imersos em solução salina por um período de 6 horas. Após este período, avaliaram-se as peças e os resultados estão demonstrados nas Figuras 3.23 e 3.24.



Figura 3.23 - Amostras ensaiadas de Inox 420 (superior) e 430 (inferior)

Após o ensaio, nota-se a ocorrência de pites nas amostras de 410 e 420. O aspecto de coloração mais clara do 302 é característico da liga. Também, por sua composição química, contendo níquel e cromo em quantidades significativas, explica o bom desempenho quando se fala de corrosão. O 430 também não apresentou pites, fato influenciado, em grande parte, pelo percentual de Cromo superior ao 420 e 410. Também o teor de carbono do 430 é levemente inferior ao do 420 e 410.



Figura 3.24 - Amostras ensaiadas de 410 (esq.) e 302 (dir.)

### 3.6 DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO DE REBITES DE AÇO INOXIDÁVEL

Como foi observado nas propriedades de cada material na revisão bibliográfica e nos ensaios, sabe-se que o aço inoxidável tem maior resistência mecânica que o Alumínio. Por isso, entende-se que o esforço nas ferramentas será maior quanto maior a resistência do material a ser conformado. O trabalho busca atingir um nível menor ou igual de esforços nas ferramentas na fabricação de rebites de aço inoxidável através do aumento da temperatura do material a ser conformado. Portanto, para cada liga de aço inoxidável é simulada uma condição onde o arame será conformado à temperatura ambiente, a 200°C, a 400°C e a 500°C. Sabendo-se que são estudadas as ligas de aço inoxidável 302, 420 e 430. São efetuadas 12 simulações, conforme representado na Tabela 3.8.

Tabela 3.6 - Simulações realizadas com aço inoxidável

Simulação	Liga	Temperatura inicial do bilette
1	Inox 302	25°C
2	Inox 302	200°C
3	Inox 302	400°C
4	Inox 302	500°C
5	Inox 420	25°C
6	Inox 420	200°C
7	Inox 420	400°C
8	Inox 420	500°C
9	Inox 430	25°C
10	Inox 430	200°C
11	Inox 430	400°C
12	Inox 430	500°C

Entre todos os resultados, são avaliados os seguintes itens:

- a) A força máxima resultante na agulha ou punção;
- b) As temperaturas finais;
- c) As forças totais do ferramental (força da prensa);
- d) As deformações.

Para a temperatura considera-se a média dos valores do corte da seção transversal do rebite, enquanto que para as forças e deformações foram considerados os maiores módulos.

O resultado ideal ou esperado é um processo onde se consiga conformar o aço inoxidável com o menor grau de esforço e menor temperatura possível, pois isso significa maior vida útil das ferramentas e uma economia de energia. O esforço crítico é na agulha, ou punção, e então uma atenção especial é tomada para sua avaliação.

## 4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE REBITES

A simulação computacional da conformação do rebite buscou o entendimento do comportamento do material, analisando a quantidade utilizada; as tensões resultantes no ferramental e matéria prima; temperaturas envolvidas; deformações; energia utilizada para realização do trabalho; e alongamento máximo permitido. Ela nos traz resultados muito mais precisos que os métodos analíticos utilizados até então, além de dispender menos recurso para o projeto correto de ferramenta ou produto que se deseja obter.

O método numérico utilizado para realizar a simulação é o método dos elementos finitos. Este método nos traz resultados rápidos com um custo relativamente baixo. Ele pode ser aplicado para geometrias complexas e fornece muitas informações adicionais quando se compara com métodos analíticos [48].

Basicamente, o método é subdivido em três etapas, sendo elas:

- a) Pré-processamento: nela são inseridas as informações relativas ao material, geometria e processo;
- b) Processamento ou simulação: onde ocorre de fato a simulação, ou seja, é a etapa onde o cálculo é realizado, dividindo o problema em incrementos de deslocamento, os quais calculam valores que convergem até atingir o critério de aceitação;
- c) Pós-processamento ou análise: nesse estágio são avaliados os resultados obtidos no estágio de processamento.

O *software* utilizado no trabalho foi o Simufact 11.0, o qual é utilizado para processos de conformação como forjamento, extrusão, cunhagem, laminação e estampagem, além de processos como tratamentos térmicos. Para toda diversidade de processos podem-se avaliar tensões, deformações, temperaturas, desgaste de ferramenta, força de prensa, entre outros detalhes.

### 4.1 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Para realizar a simulação é necessária a inclusão de alguns parâmetros de processo, material e geometria. Todo esse modelamento é fundamental para a precisão da simulação e muitas vezes é fonte de erro para alguns resultados e projetos mal sucedidos. É evidente que em caso de uma avaliação incorreta da tensão de escoamento, por exemplo, o resultado da força da prensa será incorreto. Estes detalhes servem para todos outros parâmetros, os quais foram citados na revisão bibliográfica.

A seguir, maiores detalhes são abordados de modo com que a utilização e entendimento dos parâmetros nas simulações fiquem mais claros.

#### 4.1.1 Tipo de simulação

Como a geometria do rebite é do tipo “axisimétrica”, dispõe-se de dois tipos de simulações possíveis: simulação axial ou 3D. Devido ao rebite ter uma geometria não muito complexa, para ambos os casos a solução se tornou viável. Foi optado pela geometria 3D, considerando um processo a frio para o Alumínio, ou seja, temperaturas abaixo do ponto de recristalização. Para o estudo do aço inoxidável, utilizou-se de um processo a frio e a morno, ou seja, partiu-se para simulações a temperaturas mais altas.

O processo foi configurado de acordo com a Figura 4.1. São observados a matriz e o batente, em verde e cinza, respectivamente; e o punção ou agulha, em azul.

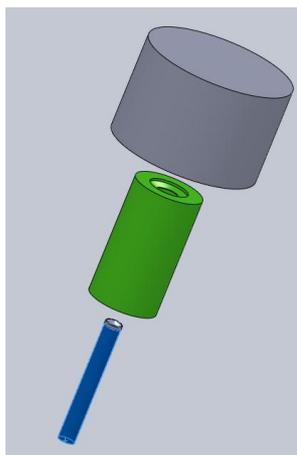


Figura 4.1 - Montagem do sistema punção e ferramenta do rebite

#### 4.1.2 Definição da malha e geometria

Após toda determinação de parâmetros, foi necessário definir uma discretização adequada para a geometria estudada, partindo do projeto do produto final estudado. As dimensões do rebite estão representadas na Figura 4.2.

A malha utilizada para a simulação do rebite foi do tipo tetraédrica, com 8045 elementos. Para uma geometria mais irregular o *software* permite que se faça um refinamento da malha no local desejado. A malha é representada na Figura 4.3.

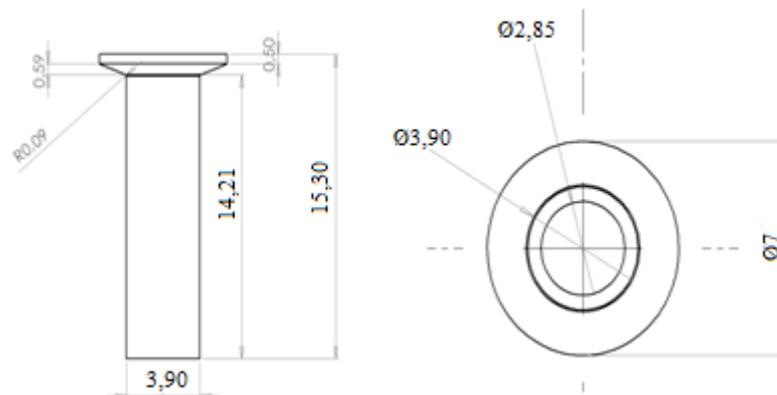


Figura 4.2 - Dimensões do rebite estudado

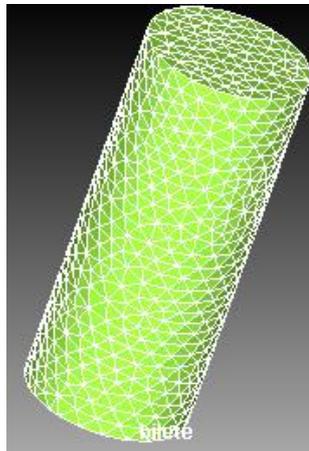


Figura 4.3 - Malha tetraédrica do rebite

#### 4.1.3 Definição do material

Os materiais utilizados para simulação foram o Al 5052, Inox 302, 420 e 430 e suas propriedades mecânicas para temperaturas ambientes são mostradas na Tabela 4.1. Os valores estão de acordo com as normas específicas para cada material. O valor da tensão de escoamento é dependente da deformação sofrida e do grau de encruamento.

Tabela 4.1 - Propriedades do Alumínio 5052 e das ligas de aço inoxidável 302, 420 e 430

Propriedade	Al 5052	Inox 302	Inox 420	Inox 430	Unidade
Módulo de Young	70	193	218	220	GPa
Densidade	2680	8027	7610	7613	kg/m <sup>3</sup>
Coef. Poisson	0,33	0,27	0,283	0,283	-
Condutibilidade térmica	137	16,26	26,6	26,6	J/m.s.K
Calor específico	880	502,4	501	501	J/kg.K
Coef. Expansão térmica	2,38.10 <sup>-5</sup>	1,73.10 <sup>-5</sup>	1,1.10 <sup>-5</sup>	1.10 <sup>-5</sup>	1/K

#### **4.1.4 Definição do tipo de prensa**

A prensa utilizada para a fabricação do rebite é do tipo excêntrica, ou seja, é construída e seu movimento se dá por meio de um conjunto biela-manivela. O raio do movimento, ou então o comprimento da manivela, é de 30mm, enquanto a biela tem 80mm de comprimento. O número de revoluções da prensa equivale ao número de peças produzidas por minuto, ou seja, 350 peças por minuto.

#### **4.1.5 Definição das propriedades de atrito**

Através do Ensaio do Anel, mostrado no subcapítulo 3.4, determinou-se o valor dos coeficientes de atrito a serem utilizados na simulação, de 0,30 para o Alumínio e de 0,20 para as ligas de aço inoxidável.

#### **4.1.6 Definição das propriedades térmicas**

A definição das propriedades térmicas e das temperaturas em cada parte do processo é de grande importância, pois alteram significativamente as propriedades mecânicas e de processo. Para fins de simulação, considerou-se apenas o valor da temperatura inicial da matriz e do punção, de 48°C, e do bilette de 25°C, antes do primeiro estágio. Para o coeficiente de troca de calor entre peça e ferramenta, “ $\alpha$ ”, adotou-se o valor igual a 1000 W/m<sup>2</sup>.K. Já para o coeficiente de troca térmica, entre o ambiente e a peça adotou-se 7500 W/m<sup>2</sup>.K, conforme simulação mostrada no subcapítulo 3.2. O valor do coeficiente elevado é explicado pelo contato com óleo pressurizado, o qual é responsável pela troca térmica e consequente redução da temperatura do rebite.

Devido ao fato do processo ocorrer em um equipamento enclausurado, mediu-se a temperatura final do rebite, igual a 170°C. A emissividade foi considerada 0,80, após certificação com termovisor e termômetro de contato.

## 5 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para efeitos de comparação os resultados do processo de fabricação de rebites convencionais são calculados e avaliados. Os critérios utilizados para tomada de decisões podem ser custo, qualidade ou produtividade. Para se obter uma destas vantagens pode-se avaliar o custo da matéria-prima (arame), sua composição química, além do esforço do maquinário para realizar a conformação.

### 5.1 PROCESSO CONVENCIONAL

No processo convencional, onde é conformado o rebite Alumínio, obtiveram-se resultados de deformação plástica conforme a Figura 5.1.

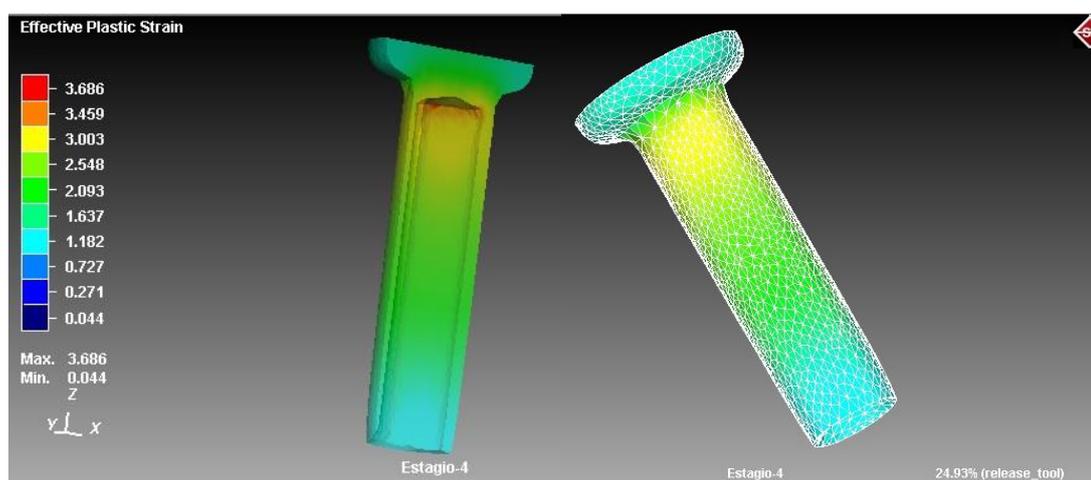


Figura 5.1 - Deformações plásticas no fim do processo do Alumínio em ângulos diferentes a frio

Na primeira imagem mostra-se o corte longitudinal, afim de poder observar a deformação na parte interna do furo. Já na segunda imagem, pode-se observar as deformações na parte externa do corpo. É possível notar que a maior deformação plástica ocorre na parte interna da furação, chegando a valores acima de 3. Um comportamento semelhante é visto para as tensões, pois têm seus pontos máximos na mesma região, conforme mostrado pela Figura 5.2. Além da parte interna do furo também ocorrem tensões elevadas na parte externa e nas regiões de raios pequenos na ferramenta, resultando em maiores esforços.

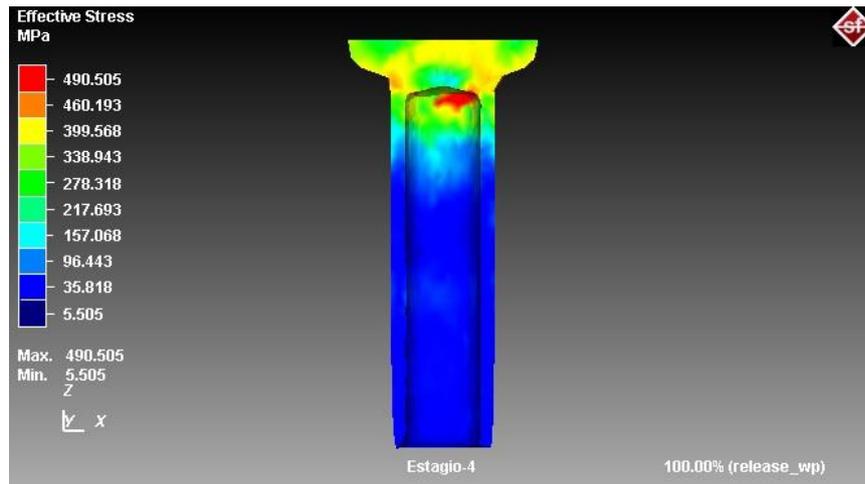


Figura 5.2 - Distribuição de tensões para o Alumínio num corte transversal do rebite a frio

A temperatura apresentou uma distribuição conforme representação na Figura 5.3, ao final do quarto estágio. Nela pode-se notar um aumento no seu resultado na região intermediária do corpo, causados pelo atrito do material e pela deformação, que ocorre na direção da extrusão indireta.

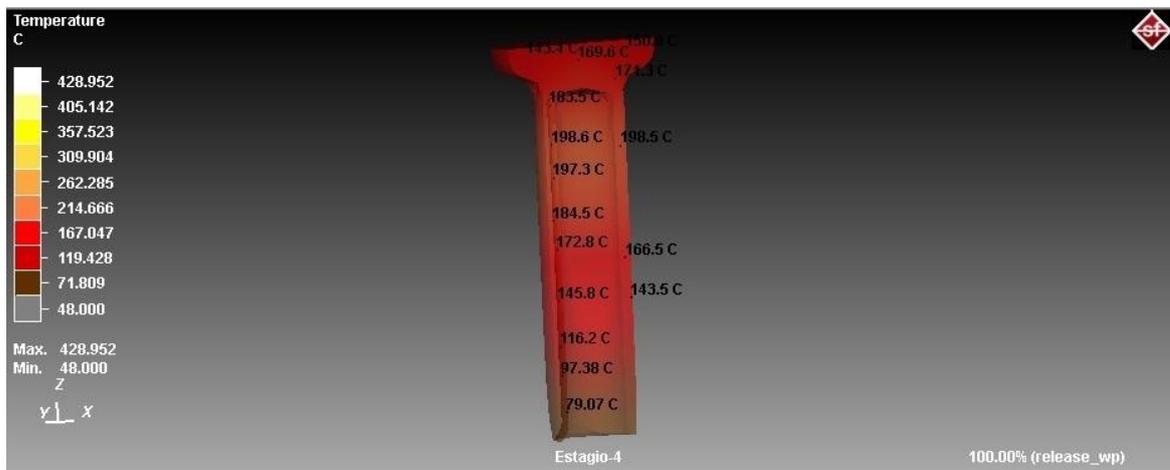


Figura 5.3 - Distribuição de temperaturas no rebite

Como representado na Figura 5.3, a média das temperaturas resulta num valor aproximado de 170°C, que é o valor mensurado na prática. Esse valor é obtido com o coeficiente convectivo de 7500 W/m<sup>2</sup>.K. Apesar de ser um valor considerado alto, ele é explicado pelo efeito da presença do óleo, que é bombeado constantemente na matriz, formando uma película ao redor do rebite.

A força da prensa representa a força do punção, da matriz e do batente através das quais é fornecida a energia para a conformação. A Figura 5.4 mostra o gráfico de força em função do tempo para o quarto estágio, que é o principal. Nota-se que a força máxima ficou em torno de 106 kN e pode ser representada pela força do batente ou pela soma das forças da

agulha (linha vermelha) e da matriz (linha roxa). O fenômeno físico pode ser observado nas Figuras 2.14 e 2.15, no último estágio de cada figura.

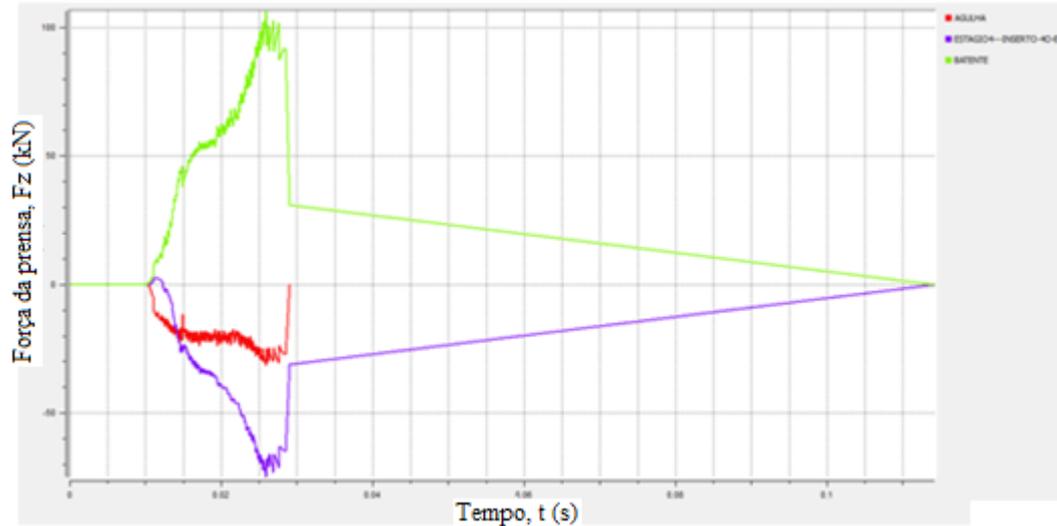


Figura 5.4 - Força exercida pela prensa

A força total da conformação do rebite de Alumínio é representada pela soma da força dos quatro estágios da prensa. Sabe-se que a força total não pode exceder a força máxima da prensa, que é de 50 toneladas. A Tabela 5.1 mostra detalhadamente as forças de cada estágio e de cada parte do ferramental.

Tabela 5.1 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de Alumínio AA5052

Estágio	Agulha (kN)	Batente (kN)	Matriz (kN)
1	0	1.01	-1.01
2	-1.88	7.1	-5.4
3	-6.35	7.6	-1.46
4	-31.68	106.34	-74.85

Através da Tabela 5.1 é possível observar que o maior esforço ocorre no quarto estágio, sendo que para sua realização são necessários 106 kN dos 122 kN utilizados para realizar os quatro estágios que ocorrem simultaneamente.

O esforço utilizado para realizar a conformação representa a soma do esforço do batente no primeiro e segundo estágios, e a força da agulha/punção no terceiro e quarto estágios. O entendimento destas forças está representado nas Figuras 3.5 e 3.6, onde se pode ver a situação inicial e final de cada estágio. Nota-se que nos estágios um e dois, a força é exercida pelo batente, enquanto que nos estágios três e quatro, a força é exercida pela agulha.

A força resultante para a conformação do rebite de Alumínio em quatro estágios é igual a 48,64 kN.

## 5.2 AÇO INOXIDÁVEL ABNT 420

O estudo com o aço inoxidável da liga 420 demonstrou um comportamento diferente de esforços, temperaturas e deformações do que o do Alumínio. As Figuras 5.5 e 5.6 mostram o perfil de temperatura obtido para as temperaturas iniciais do arame de 25°C e 500°C, respectivamente.

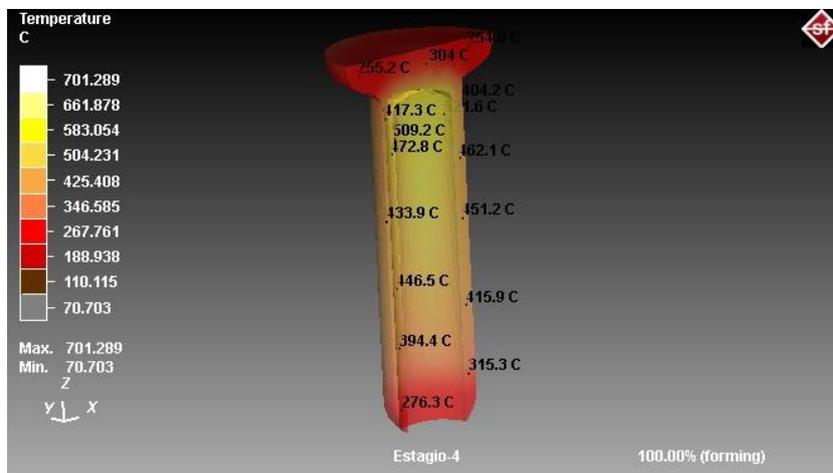


Figura 5.5 - Perfil de temperaturas para o arame à temperatura ambiente (25°C)

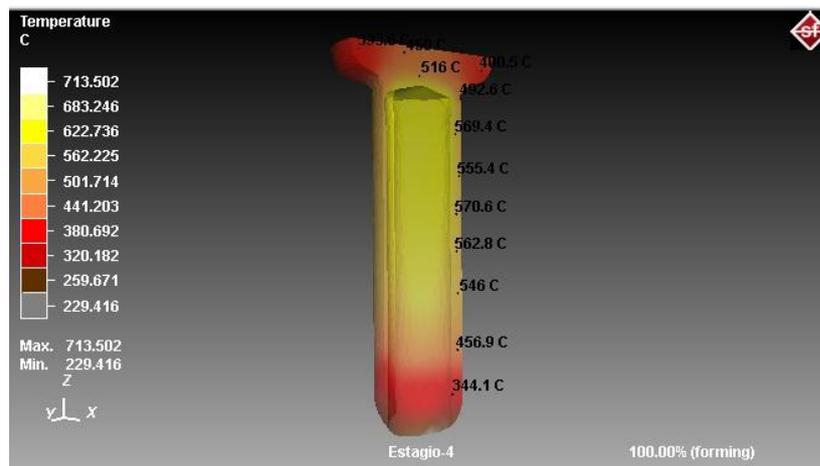


Figura 5.6 - Perfil de temperatura para o arame 420 aquecido à temperatura de 500°C

As Tabelas 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 mostram os resultados de tensão máxima, deformação máxima, temperatura e força da prensa.

Tabela 5.2 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 420 com temperatura inicial de 25°C

Estágio	Agulha (kN)	Batente (kN)	Matriz (kN)
1	0	1.16	-1.16
2	-2.86	8.08	-5.16
3	-7.92	8.65	-4.04
4	-58.77	163.86	-116.17

Tabela 5.3 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 420 com temperatura inicial de 200°C

Estágio	Agulha (kN)	Batente (kN)	Matriz (kN)
1	0	1.15	-1.15
2	-2.8	8.21	-5.45
3	-7.88	8.7	-4.22
4	-48.41	165.02	-115

Tabela 5.4 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 420 com temperatura inicial de 400°C

Estágio	Agulha (kN)	Batente (kN)	Matriz (kN)
1	0	1.16	-1.16
2	-2.82	8.14	-5.33
3	-7.82	8.6	-2.85
4	-47.83	175.9	-124.61

Tabela 5.5 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 420 com temperatura inicial de 500°C

Estágio	Agulha (kN)	Batente (kN)	Matriz (kN)
1	0	1.16	-1.16
2	-3.45	8.85	-5.02
3	-7.22	8.26	-3.48
4	-37.7	162.47	-115.16

Para todas as temperaturas é possível observar que o menor esforço na agulha foi na temperatura de 500°C, com carga de 38kN, conforme indicado na Tabela 5.5. Quando se compara com o Alumínio ainda pode-se notar uma sobrecarga, indicando possível dano do ferramental. A soma dos esforços, positivos ou negativos, também teve acréscimo, tendo seu menor valor na faixa dos 182 kN, representado pela soma das forças do Batente da Tabela 5.5. Isso indica que para o inox 420 é necessário um aquecimento maior para se obter esforços compatíveis com o processo atual.

### 5.3 AÇO INOXIDÁVEL ABNT 430

Para a simulação de conformação do rebite com aço inoxidável 430 obteve-se um resultado de deformações superiores ao Alumínio, com pontos de deformação verdadeira superiores a três, conforme mostrado na Figura 5.7.

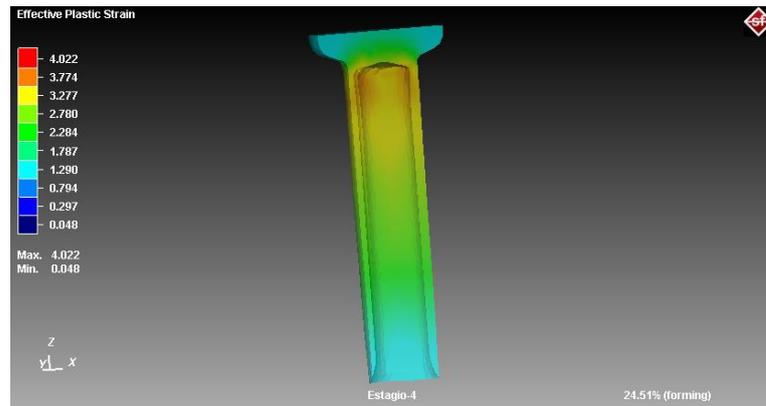


Figura 5.7 - Perfil de deformações no aço inoxidável com arame aquecido a 400°C

As Tabelas 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 mostram as forças no ferramental quando simulou-se o processo de conformação do rebite com arames de inox 430 com temperaturas iniciais de 25, 200, 400 e 500°C.

Tabela 5.6 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 430 com temperatura inicial de 25°C

Estágio	Agulha (kN)	Batente (kN)	Matriz (kN)
1	0	1.16	-1.16
2	-2.77	7.91	-5.09
3	-7.83	8.53	-3.93
4	-58.38	196.03	-139.9

Tabela 5.7 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 430 com temperatura inicial de 200°C

	Agulha (kN)	Batente (kN)	Matriz (kN)
1	0	1.13	-1.13
2	-2.71	7.9	-5.17
3	-7.78	9.37	-3.39
4	-57.8	177	-129

Tabela 5.8 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 430 com temperatura inicial de 400°C

Estágio	Agulha (kN)	Batente (kN)	Matriz (kN)
1	0	1.16	-1.16
2	-2.78	7.6	-4.78
3	-7.92	8.43	-3.91
4	-35.41	120.9	-85.55

Tabela 5.9 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 430 com temperatura inicial de 500°C

Estágio	Agulha (kN)	Batente (kN)	Matriz (kN)
1	0	1.16	-1.16
2	-2.78	7.54	-4.76
0	-8.29	9.44	-3.8
4	-31.94	114.36	-82.85

As forças para o aço inoxidável 430 se mostram bem divergentes comparando-se à temperatura ambiente do arame para as situações onde ele era preaquecido. Quando não aquecido, o esforço da prensa chegou a aproximadamente 22 Ton, enquanto que para o caso de preaquecimento a 500 °C o resultado ficou aproximadamente perto da metade da força. É importante observar que a agulha executa apenas 31kN como sua maior força para a maior temperatura (500°C), resultado semelhante ao alumínio.

#### 5.4 AÇO INOX ABNT 302

No estudo simulado com o aço inoxidável 302, obtiveram-se tensões bem superiores ao Alumínio, como esperado, mas a temperatura demonstrou um impacto significativo na diminuição dos esforços do ferramental. A Figura 5.8 mostra as tensões resultantes no final da conformação do rebite.

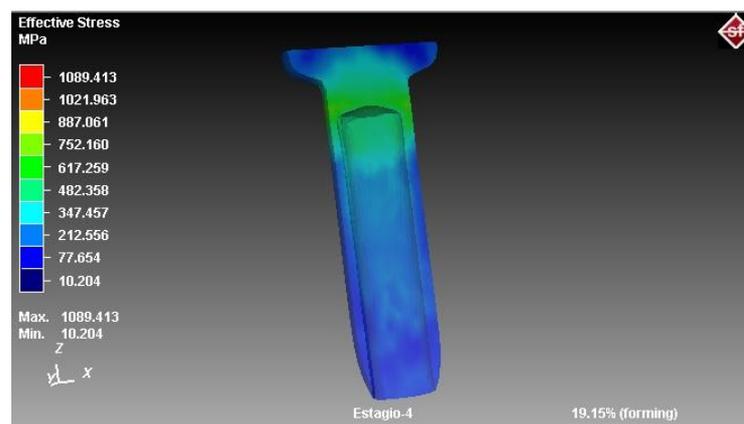


Figura 5.8 - Tensões durante a conformação do 302 preaquecido (400°C)

As Tabelas 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 mostram as forças exercidas no ferramental do Aço inoxidável 302 para os casos de preaquecimento do arame a 200, 400 e 500°C, além do arame à temperatura ambiente de 25°C.

Tabela 5.10 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 302 com temperatura inicial de 25°C

Estágio	Agulha (kN)	Batente (kN)	Matriz (kN)
1	0	1.51	-1.51
2	-2.83	9.92	-7.66
3	-11.7	13.23	-6.07
4	-122	446	-317

Tabela 5.11 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 302 com temperatura inicial de 200°C

Estágio	Agulha	Batente	Matriz
1	0	1.52	-1.52
2	-2.63	9.8	-7.43
3	-12.2	16	-4.35
4	-51.54	151	-103.5

Tabela 5.12 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 302 com temperatura inicial de 400°C

Estágio	Agulha	Batente	Matriz
1	0	1.5	-1.5
2	-2.46	9.53	7.73
3	-11.22	17.76	-16.14
4	-45.58	132.97	-95.13

Tabela 5.13 - Forças do ferramental simuladas para o rebite de aço inoxidável 302 com temperatura inicial de 500°C

Estágio	Agulha	Batente	Matriz
1	0	1.48	-1.48
2	-2.67	9.72	-7.44
3	-10.6	8.23	-3.7
4	-43.34	133.6	-93.92

Pode-se notar que para as maiores temperaturas obteve-se um resultado de força exercida sobre a agulha muito próxima à obtida com o Alumínio. Apesar dos esforços bem superiores no material, observa-se que com o aquecimento, o material sofreu uma redução significativa na sua resistência.

## 6 CÁLCULO ANALÍTICO DA FORÇA DE CONFORMAÇÃO A FRIO

O cálculo analítico para conformação é realizado para os materiais envolvidos no estudo:

- Alumínio AA5052;
- Aço inoxidável ABNT 302;
- Aço inoxidável ABNT 420;
- Aço inoxidável ABNT 430.

### 6.1 CONFORMAÇÃO DO ALUMÍNIO AA5052

Conforme tratado capítulo 2.2, as forças durante a conformação do rebite são determinadas pela soma de esforços de prensagem e de extrusão indireta, podendo ser calculadas separadamente, conforme a Figura 6.1. Nela, o bilette é representado por dois volumes, sendo um para prensagem (azul) e outro para extrusão indireta (vermelho). O cálculo é desenvolvido para o rebite de Alumínio da liga 5052.

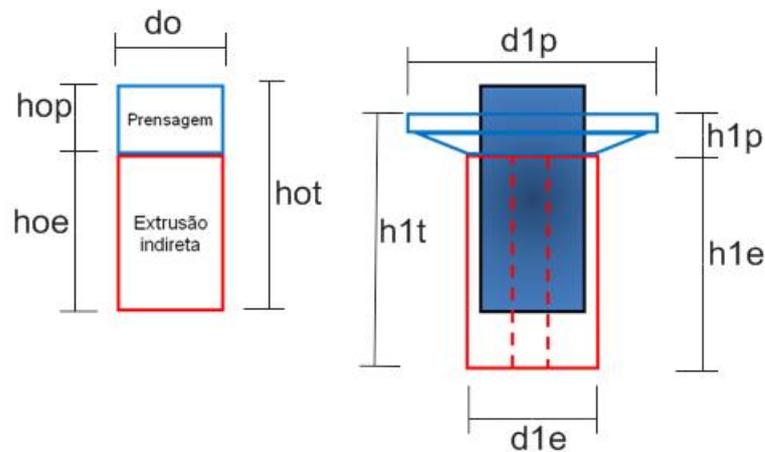


Figura 6.1 - Bilette do rebite dividido nos processos de extrusão indireta e prensagem

Iniciando pela parte da prensagem e utilizando-se os dados dimensionais do rebite e do bilette, calcula-se a força de conformação referente à prensagem, representada ilustrativamente na Figura 6.2. Os valores para  $d1p$  e  $h1p$  são 8 e 1,09mm, respectivamente. Com relação ao tamanho do bilette, tem-se  $hop$  igual a 4,76 e  $do$  igual a 3,9mm. O valor de  $d1e$  é de 3,9mm e  $h1p$  cilíndrico é de 1,15 mm. Por fim,  $h1p$  chanfrada é de 0,50mm.

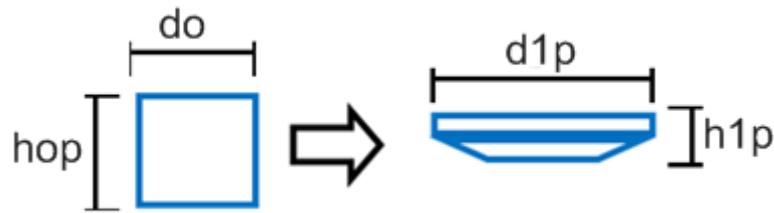


Figura 6.2 - Bilete utilizado para prensagem (esq.) e da cabeça (dir.)

Primeiramente calcula-se a deformação principal da prensagem, a qual é definida pela relação logarítmica das alturas iniciais e finais, conforme dada pela equação 30. Substituindo os valores, tem-se:

$$\begin{aligned}\varphi h &= \left| \ln \frac{h_1}{h_0} \right| \\ \varphi h &= \ln \frac{1,65}{4,76} = 1,059\end{aligned}\quad (30)$$

Através da equação de  $k_f$ , dado pela equação 20, e extraindo as constantes da Tabela 2.6, tem-se como resultado a equação mostrada 31. Ela representa uma condição de temperaturas baixas, ou seja, em um processo realizado a frio.

$$\begin{aligned}k_f &= C \cdot \varphi^n \\ k_f &= 428,9 \cdot \varphi_h^{0,28}\end{aligned}\quad (31)$$

Para o cálculo da Força de Prensagem, ou  $F_p$ , utiliza-se o  $k_{f1}$ , que é a tensão resultante na condição de deformação final,  $\varphi h$ , dada pela equação 30. Substituindo o valor de  $\varphi h$  na equação 31, chega-se a um valor de 435,84 MPa.

Com  $k_{f1}$  determinado, é possível realizar o cálculo da Força de Prensagem ( $F_p$ ) dada pela equação 32. Sabe-se que  $A_{1p}$  é igual a  $38,48 \text{ mm}^2$  e o coeficiente de atrito  $\mu$  é considerado igual a 0,30, conforme resultado obtido pelo ensaio do anel, no subcapítulo 3.4. Substituindo os valores temos:

$$\begin{aligned}F_p &= A_{1p} \cdot k_{f1} \cdot \left( 1 + \frac{1}{3} \mu \cdot \frac{d_{1p}}{h_{1p}} \right) \\ F_p &= 38,48 \cdot 435,84 \cdot \left( 1 + \frac{1}{3} \cdot 0,30 \cdot \frac{7}{1,65} \right) = 23.889,01 \text{ N}\end{aligned}\quad (32)$$

Após realizar o cálculo da Força de Prensagem ( $F_p$ ), parte-se para o cálculo da força de extrusão indireta, responsável pela formação da parte tubular do rebite, ou então, do corpo. Conforme representado na Figura 6.3, observa-se o bilete na esquerda e o corpo do rebite formado, com suas respectivas dimensões indicadas. Os valores de  $d_o$ ,  $h_o$ ,  $d_{1e}$ ,  $h_{1e}$  e  $d_{1i}$  são 3,9; 6,10; 3,9; 13,65 e 2,9 mm, respectivamente.

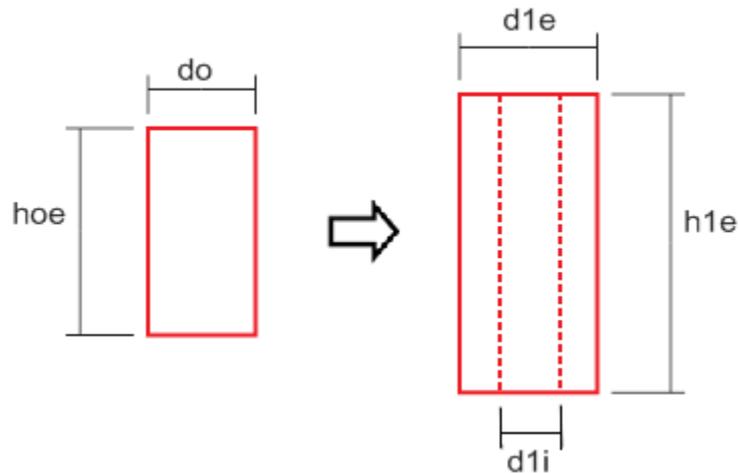


Figura 6.3 - Dimensões da porção do bilete utilizado para extrusão indireta (esq.) e o corpo do rebite (dir.)

A deformação principal na extrusão indireta é dada pela relação logarítmica de alturas entre a região não extrudada ( $h_{1p}$ ) e a altura inicial do bilete ( $h_{0e}$ ), representada pela equação 33, mostrada abaixo.

$$\begin{aligned}\varphi h &= \ln \frac{h_{1p}}{h_0} \\ \varphi h &= \ln \frac{1,65}{10,86} = 1,884\end{aligned}\quad (33)$$

Como realizado no cálculo da prensagem, substitui-se o valor de  $\varphi h$  na equação 20, de modo a encontrar  $k_{f1}$ . Substituindo os valores, chega-se a um valor de 512,12 MPa. O  $k_{fm}$  é dado pela média aritmética entre o  $k_{f0}$  e  $k_{f1}$ . Então  $k_{fm}$  é igual a 352,56 MPa. Como a matriz não tem ângulos para a extrusão,  $\alpha$  e  $\varphi$  são considerados nulos.

Para o cálculo da força de extrusão indireta, dada pela equação 11, resta substituir os valores encontrados. Sabe-se que  $A_0$  é igual a  $11,95\text{mm}^2$  e estão definidos os valores de  $k_{fm}$  e  $\varphi h$ . Por fim, o valor de  $\eta$  foi considerado igual a 0,4, por se tratar de uma geometria simples e deformação pequena. Os valores de referência limites para a deformação verdadeira da extrusão indireta do Alumínio 5052 são bem superiores aos encontrados no rebite [1].

$$F_e = \frac{A_0 \cdot k_{fm} \cdot \varphi}{\eta_F}$$

Substituindo os valores temos:

$$F_e = 11,95 \cdot 296,05 \cdot 1,884 / 0,4 = 19.843,53 \text{ N} \quad (34)$$

Após definir as duas forças, de prensagem ( $F_p$ ) e extrusão indireta ( $F_e$ ), obtém-se a força total ( $FT$ ), através da soma. Este resultado é mostrado na equação 35.

$$FT = F_p + F_e = 23.889,01 + 19.843,53 = 43.732,54 \text{ N} \quad (35)$$

## 6.2 CONFORMAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL ABNT 302

Para o cálculo analítico do Aço inoxidável 302, aplicam-se as deformações e equações utilizadas no Alumínio. A diferença está na curva de escoamento, dada pela equação 20. Os valores são extraídos da Tabela 2.5, resultando na equação abaixo:

$$\begin{aligned} kf &= C \cdot \varphi^n \\ kf &= 1451 \cdot \varphi^{0,6} \end{aligned} \quad (36)$$

Substituindo o valor de  $\varphi h$  na equação 37, chega-se ao resultado de  $k_{f1}$

$$k_{f1} = 1451 \cdot 1,059^{0,6} = 1.501,77 \text{ MPa} \quad (37)$$

Para o cálculo da prensagem tem-se:

$$\begin{aligned} Fp &= A_{1p} \cdot k_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \mu \cdot \frac{d_{1p}}{h_{1p}}\right) \\ Fp &= 38,48 \cdot 1.501,77 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,20 \cdot \frac{7}{1,65}\right) = 74.132,22 \text{ N} \end{aligned} \quad (38)$$

Para o cálculo da extrusão indireta é necessário definir a tensão média,  $k_{fm}$ , dada pela média aritmética entre a tensão inicial,  $k_{fo}$ , e a tensão final,  $k_{f1}$ . Os valores são 90 MPa e 2.122,98 MPa, respectivamente. A tensão média de escoamento,  $k_{fm}$ , é igual a 1.106,49 MPa.

Por fim, substituindo-se os valores na equação da força de extrusão,  $F_e$ , temos:

$$F_e = \frac{11,95 \cdot 1.106,49 \cdot 1,884}{0,4} = 62.278,24 \text{ N} \quad (39)$$

A força total é dada pela equação 40.

$$FT = Fp + F_e = 74.132,22 + 62.278,24 = 136.410,46 \text{ N} \quad (40)$$

## 6.3 CONFORMAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL ABNT 420

No cálculo analítico do Aço inoxidável 420, aplicam-se as deformações e equações utilizadas no Alumínio e no aço inoxidável 302. A curva de escoamento, que é dada pela equação 20, e os valores da Tabela 2.5, resulta na equação 41.

$$\begin{aligned} kf &= C \cdot \varphi^n \\ kf &= 798 \cdot \varphi^{0,183} \end{aligned} \quad (41)$$

Substituindo o valor de  $\varphi h$  na equação 41, chega-se ao resultado de  $k_{f1}$  na equação 42:

$$k_{f1} = 798 \cdot 1,059^{0,183} = 806,41 \text{ MPa} \quad (42)$$

Para o cálculo da prensagem tem-se:

$$Fp = A_{1p} \cdot k_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \mu \cdot \frac{d_{1p}}{h_{1p}}\right)$$

$$Fp = 38,48 \cdot 806,41 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,20 \cdot \frac{7}{1,65}\right) = 39.807,04 \text{ N} \quad (43)$$

Para o cálculo da extrusão indireta é necessário definir a tensão média,  $k_{fm}$ , dada pela média aritmética entre a tensão inicial,  $k_{fo}$ , e a tensão final,  $k_{f1}$ . Os valores são 497 MPa e 806,41 MPa, respectivamente. A tensão média de escoamento,  $k_{fm}$  é igual a 651,70 MPa.

Por fim, substituindo-se os valores na equação da força de extrusão,  $F_e$ , temos:

$$F_e = \frac{11,95 \cdot 651,7 \cdot 1,884}{0,4} = 36.680,89 \text{ N} \quad (44)$$

A força total é dada pela equação 45.

$$FT = Fp + F_e = 39.807,04 + 36.680,89 = 76.487,93 \text{ N} \quad (45)$$

#### 6.4 CONFORMAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL ABNT 430

No cálculo analítico do Aço inoxidável 430, aplicam-se as deformações e equações utilizadas no Alumínio, no aço inoxidável 302 e 420. A curva de escoamento, que é dada pela equação 20, e os valores da Tabela 2.5, resulta na equação 46.

$$kf = C \cdot \varphi^n$$

$$kf = 800,7 \cdot \varphi^{0,1901} \quad (46)$$

Substituindo o valor de  $\varphi h$  na equação 46, chega-se ao resultado de  $k_{f1}$  na equação 47.

$$k_{f1} = 800,7 \cdot 1,059^{0,1901} = 809,47 \text{ MPa} \quad (47)$$

Para o cálculo da prensagem tem-se:

$$Fp = A_{1p} \cdot k_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \mu \cdot \frac{d_{1p}}{h_{1p}}\right)$$

$$Fp = 38,48 \cdot 825,92 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,20 \cdot \frac{7}{1,65}\right) = 39.958,05 \text{ N} \quad (48)$$

Para o cálculo da extrusão indireta é necessário definir a tensão média,  $k_{fm}$ , dada pela média aritmética entre a tensão inicial,  $k_{fo}$ , e a tensão final,  $k_{f1}$ . Os valores são 349 MPa e 809,47 MPa, respectivamente. A tensão média de escoamento,  $k_{fm}$ , é igual a 579,235 MPa.

Por fim, substituindo-se os valores na equação da força de extrusão,  $F_e$ , temos:

$$F_e = \frac{11,95 \cdot 579,235 \cdot 1,884}{0,4} = 32.601,95 \text{ N} \quad (49)$$

A força total é dada pela equação 50.

$$FT = Fp + F_e = 39.958,05 + 32.601,95 = 72.560,00 \text{ N} \quad (50)$$

## 6.5 COMPARAÇÃO DO RESULTADO DE FORÇAS DO CÁLCULO ANALÍTICO X SIMULAÇÃO

Para fins de comparação e avaliação dos métodos de cálculos analíticos e simulações, somaram-se as forças do batente nos primeiros e segundos estágios e da agulha ou punção nos terceiros e quartos estágios da simulação a frio, ou seja, a 25°C. Esses valores foram utilizados para comparação, conforme mostrado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Força necessária para conformar rebite segundo cálculo analítico e simulação computacional a 25°C

Material	Equação da Tensão de escoamento, $k_f$ (MPa)	Força simulação computacional, $F_T$ (kN)	Força cálculo analítico, $F_T$ (kN)	Diferença (%)
Alumínio AA 5052	$428,9 \cdot \varphi^{0,28}$	46	44	5,22
Aço inoxidável ABNT 420	$798 \cdot \varphi^{0,183}$	76	77	0,75
Aço inoxidável ABNT 430	$800,7 \cdot \varphi^{0,183}$	75	73	3,68
Aço inoxidável ABNT 302	$1451 \cdot \varphi^{0,6}$	145	136	6,01

## 7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS NA INDÚSTRIA

Para simular a condição proposta com o arame de aço inoxidável foi instalado um aquecedor por indução na entrada da máquina, conforme representado na Figura 7.1, garantindo o aquecimento de forma contínua do arame de aço inoxidável. No entanto, máquinas para conformação a quente ou a morno são as mais adequadas e estão disponíveis no mercado para esse tipo de processo.

Durante o início do aquecimento mediu-se uma temperatura aproximada de 600°C nos arames de aço inoxidável 430 e 302. Não foram realizados testes com a liga 420 devido à baixa resistência à corrosão. A temperatura foi elevada de modo com que o material trocasse calor com a prensa, chegando à região onde é conformada com a temperatura esperada, que, de acordo com o estudo realizado, varia de 200°C a 500°C. O tempo de alimentação do arame é de 30 segundos até chegar na posição de corte do arame. Após, o bilette é conformado nos quatro estágios. A Figura 7.2 mostra o arame sendo alimentado na máquina em sua coloração vermelha, representando a temperatura elevada em que está submetido.

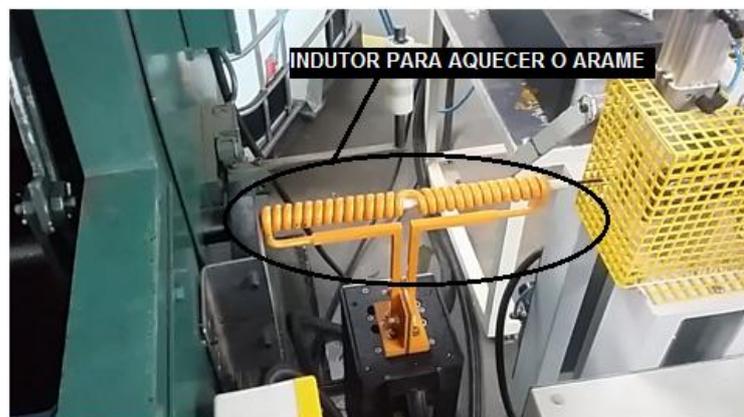


Figura 7.1 - Indutor instalado na entrada da prensa

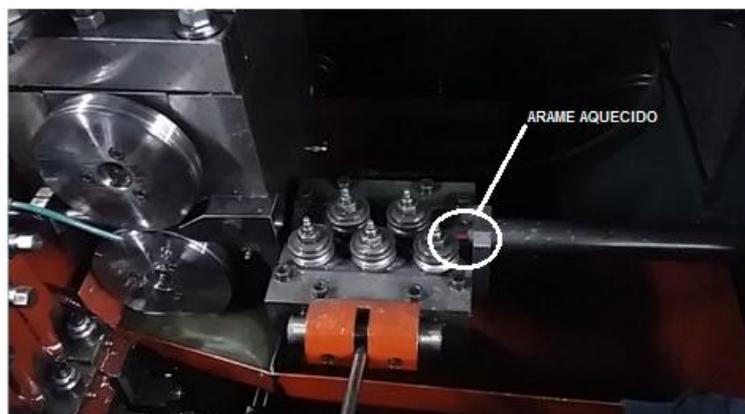


Figura 7.2 - Alimentação do arame aquecido, na entrada da prensa

Os resultados preliminares mostram que foi possível conformar o rebite parcialmente com o ferramental utilizado e com as ligas de aço inoxidável 302 e 430, conforme representado na Figura 7.3. Para atingir um resultado satisfatório, o aquecimento ainda não é suficiente, pois está se formando um depósito de material entre a cabeça e o corpo do rebite. Esse efeito demonstra que o ferramental não teve a força de fechamento ( $F_z$ ) necessária, devido à alta tensão de escoamento ( $k_f$ ) no momento da conformação. Também, o comprimento do rebite ( $h_{1t}$ ) se mostrou menor que o projeto, uma vez que o ferramental ficou parcialmente aberto durante a conformação. Tal fato representa que o punção não chegou ao seu curso final, interrompendo a extrusão indireta antes do final do processo.



Figura 7.3 - Rebite conformado com depósito de material entre o corpo e a cabeça

## 8 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Uma série de conclusões e resultados foram significantes, ainda que resultados mais precisos possam ser obtidos uma vez que se eliminem algumas variáveis e aproximações consideradas no trabalho, como a realização de ensaios de compressão e de atrito em todas as temperaturas simuladas.

Sobre os resultados simulados, algumas considerações são importantes com relação às curvas de escoamento dos aços inoxidáveis. Ao passo que a curva do Alumínio foi ensaiada e utilizada na simulação, as curvas dos aços inoxidáveis ABNT 302, 420 e 430 foram importadas do *software* Simufact. As curvas dos Aços inoxidáveis 302 e 430 não contém todos dados para as temperaturas e velocidades de deformação utilizadas nas simulações. Sendo assim, o resultado das simulações é fruto de uma interpolação de curvas. Para um estudo mais exato é necessária a realização de uma série de ensaios para determinar as curvas de escoamento nas temperaturas até 500°C, que é a temperatura máxima utilizada nas simulações. Além dos resultados relativos às curvas de escoamento, o mesmo se aplica aos ensaios para determinação do coeficiente de atrito, pois é sabido que o atrito sofre alteração conforme a temperatura se eleva. Também, o coeficiente de atrito do aço inoxidável 430 foi considerado o mesmo dos aços inoxidáveis 302 e 420, conforme mostrado no capítulo 3.4, pois não foram encontrados no mercado corpos de prova na dimensão desejada para realizar o ensaio de atrito.

Tratando-se do resultado experimental, nota-se que o material teve sua conformação facilitada pelo aquecimento, porém um aquecimento mais intenso torna-se necessário de modo a resultar num esforço semelhante ao processo do Alumínio realizado a frio. É importante considerar que no momento do aquecimento, o arame está com uma temperatura acima de 600°C, mas no momento da conformação, o arame já está abaixo de 300°C, devido à troca térmica entre o arame e os componentes da máquina e o ferramental. Para um resultado satisfatório recomenda-se o desenvolvimento experimental através de uma prensa para conformação a quente. Esse tipo de equipamento possui controle de temperatura e aquecimento até regiões próximas da conformação, ao passo que o aquecimento externo não garante esse controle.

Até o momento há pouco material existente sobre conformação de rebites semi tubulares. Isso se deve ao fato deles serem utilizados em um tipo de indústria bem específica, que são as cutelarias. Por isso não se tem resultados comparativos de forças de conformação.

## 9 CONCLUSÕES

Após o modelamento do processo convencional do Alumínio AA5052 e as simulações computacionais e ensaios relativos às ligas de aço inoxidável ABNT 302, ABNT 420 e ABNT 430, foi possível chegar a uma série de conclusões:

- a) O coeficiente de atrito do processo com o Alumínio de 0,30, obtido pelo ensaio de atrito, se reduz para 0,20 com a utilização do aço inoxidável, seja da liga ABNT 302, ABNT 420 ou ABNT 430. Esse efeito facilita o processo, tanto na redução da geração de calor referente ao atrito, quanto na redução do desgaste do ferramental, devido a menores forças de conformação;
- b) Os resultados da força do ferramental da simulação computacional apresentaram pouca diferença, comparados aos cálculos analíticos, para temperaturas a frio (25°). Tanto para o aço inoxidável como para o Alumínio foram encontradas diferenças inferiores que 6%.
- c) Os aços inoxidáveis ABNT 430 e ABNT 302 apresentaram boa resistência à corrosão, conforme é citado no Capítulo 3.7. Portanto são considerados os mais adequados para a utilização em produtos de cutelaria. Para a utilização do ABNT 420 ser viável deve ser estudado outro meio de melhorar a resistência à corrosão, como tratamento térmico, por exemplo;
- d) Considerando o aquecimento do arame de aço inoxidável antes da conformação do rebite, obtiveram-se resultados satisfatórios com relação às forças de conformação do ferramental. Como demonstrado nos resultados, o ferramental estudado pode ser utilizado para a conformação de rebites de aço inoxidável, com forças no ferramental semelhantes ou até menores do que as obtidas com o Alumínio AA5052 à temperatura ambiente.

O aço inoxidável ABNT 420 não pode ser utilizado devido ao resultado insatisfatório no ensaio de corrosão, citado no Capítulo 3.7. Portanto, como as forças de conformação do aço inoxidável ABNT 430 reduziram-se para valores inferiores aos do Alumínio AA5052, esta é a liga mais recomendada para a fabricação de rebites de aço inoxidável. Já para o Aço inoxidável ABNT 302, mesmo com o aquecimento do arame antes da conformação, as forças de conformação continuaram aproximadamente 30% mais elevadas que no processo do Alumínio AA5052. Por isso um aumento da resistência do ferramental pode ser necessário para a utilização do aço inoxidável ABNT 302.

## 10 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuação do trabalho realizado é possível estudar o dimensionamento do sistema de aquecimento necessário, determinando a potência, capacidades, distribuições de temperatura do arame antes, durante e após o processo.

O foco do estudo foi o projeto, considerando os arames de inox recozidos e com as propriedades mecânicas e microestruturas ideais. Sabe-se que na prática, utilizar este tipo de material representa um custo elevado. Portanto, pode-se estudar materiais com microestruturas diferenciadas, encruamento, entre outras alternativas. Para fazer novo estudo, obtém-se novas curvas de escoamento e também faz-se toda caracterização e análise dos materiais.

O estudo de processo foi focado na temperatura e atrito principalmente. Para um estudo mais abrangente, pode-se levar em conta simulações com diferentes velocidades e geometria do ferramental. Nestes casos, seria possível modificar os estágios de modo com que os esforços ficassem mais equilibrados nos estágios existentes, ou seja, é possível reduzir o esforço do quarto estágio, aumentando os demais.

Após implementação dos testes práticos é possível fazer todo um acompanhamento do ferramental, abrangendo desgaste, ocorrência de trincas ou quebras. Além do ferramental, pode-se avaliar o acabamento superficial dos rebites, assim como a sua variação dimensional.

## REFERÊNCIAS

- [1] SCHAEFFER, L. **Forjamento**: introdução ao processo. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2006.
- [2] INDUSTRIAL FASTENERS INSTITUTE. **Annual Reports**. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <[http://www.indfast.org/info/abbreviated\\_annual\\_report.asp](http://www.indfast.org/info/abbreviated_annual_report.asp)>. Acesso em: 06 jun. 2017.
- [3] INDUSTRIAL FASTENERS INSTITUTE. **The Industry**. [S.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: <<http://www.indfast.org/assets/pdf/The-Industry.pdf>>. Acesso em: 02 jun. 2017.
- [4] COELHO, P. A. A. **Fabrico por enformação de porcas e parafusos ocos de parede fina**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2014.
- [5] DIETER, G. E. **Mechanical metallurgy**. New York: McGraw-Hill, 1986.
- [6] SACMA GROUP. **Winning Technologies**. [S.l.], [201-]. Disponível em: <<http://www.sacmagroup.com/uk/winning-technologies/sacma.ow?pageId=12655>>. Acesso em: 10 jan. 2016.
- [7] VAN VLACK, L. H. **Princípio de ciência e tecnologia dos materiais**. 4. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1984.
- [8] POLOZINE, A. **Desenvolvimento da técnica analítica para determinar a resistência térmica de contato no processo de forjamento**. 2009. 104 f. Tese (Doutorado em Engenharia)-Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [9] INCROPERA, F. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2008.
- [10] VOLLMER, M.; MÖLLMANN, K.P. **Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications**. Hoboken: Wiley-VCH, 2010.
- [11] UNITED ALUMINUM. **Chemical composition and properties of Aluminum Alloys**. North Haven, [2013]. Disponível em: <<https://www.unitedaluminum.com/chemical-composition-and-properties-of-aluminum-alloys>>. Acesso em: 13 out. 2013.
- [12] CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. v. 3.
- [13] NASCIMENTO, F. M. F. **Caracterização e Análise de Ligas de Alumínio Processadas**. 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado)- Engenharia de Materiais, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.
- [14] ASM HANDBOOK. **Properties and selection nonferrous alloys and special: purpose materials**. [S.l.]: ASM Internacional, 1990. v. 2
- [15] BO WANG, et Al. Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminum alloy. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, China, v.25. p. 2481-2489, 2015.

- [16] UK ALUMINIUM INDUSTRY FACT SHEET 2. **Aluminium and corrosion**. [S.l.]: Aluminium Federation, [s.d.]. Disponível em: <<http://www.alfed.org.uk/files/Fact%20sheets/2-aluminium-and-corrosion.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2015.
- [17] CARBÓ, H. M. **Aços inoxidáveis: aplicações e especificações**. São Paulo: Arcelor Mittal, 2008.
- [18] ASM HANDBOOK. **Heat treating**. [Geauga]: ASM International, 1991.
- [19] OUTOKUMPU. **Handbook of stainless steel**. Avesta: Outokumpu Oyj, 2013.
- [20] CAMINAGA, C. et Al. Processos e lubrificantes alternativos para extrusão a frio de peças em aço. **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Brasil, 2005.
- [21] BONIARDI, M.;CASAROLI, A., **Stainless Steel**. Politecnico Di Milano, Italy, 2014.
- [22] SHUI-SHENG, Y.; YU-BIN, L.; YONG; C. **The strain-rate effect of engineering materials and its unified model**. Latin American Journal of Solids and Structures. Vol 10, 11 p., São Paulo, 2012.
- [23] SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
- [24] SCARI, A.S.; POCKSZEVNICKI, B.C.; JUNIOR, J.L.; JUNIOR, P.A.A.M. **Stress-strain Compression of AA6082-T6 Aluminum Alloy at room temperature**. Journal of structures. Vol 2014, 7 p., United Kingdom, 2014.
- [25] Li, Z. et Al. Low temperature deformation behavior of an electromagnetically bulged 5052 aluminum alloy. **Sci. Rep. 6, 29973**; <http://www.nature.com/articles/srep29973>, 2016.
- [26] FERRARINI, J. L. **Caracterização de materiais para o processo de estampagem**. 2004. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- [27] BONG, H. J. et al. Formability of austenitic and ferritic stainless steels at warm forming temperature. **International Journal of Mechanical Sciences**, Coreia do Sul, v. 75, p. 94 – 109, 2013.
- [28] CORRÊA, E. C. S. **Aspecto do encruamento de metais previamente deformados a frio**. 2004. 262 f. Tese (Doutorado)-Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- [29] JUNIOR, A. L. L. **Análise da influência das propriedades do material e parâmetros do processo na simulação numérica do processo de forjamento**. 2007. 78 f. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- [30] CIPRIANO, G. L. **Determinação do coeficiente de encruamento de metais através da morfologia das impressões de dureza na escala macroscópica**. 2008. 125 f. Dissertação

(Mestrado)–Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

[31] SILVA, E.P. **Estudo da influência dos parâmetros de recozimento em caixa nas propriedades mecânicas de aços para estampagem de limite de escoamento máximo de 230 MPa.** 2013. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

[32] LIU, J.; LUI, W.; XUE, W. **Forming limit diagram prediction of AA5052/polyethylene/AA5052 sandwich sheets.** *Materials and Design*. Vol 46, 8 p., United Kingdom, 2013.

[33] TIGRINHO, L. M. V. **Análise da fratura de chapas do aço avançado de alta resistência DP600 quando submetido a diferentes estados de tensões.** 2011. 128 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)–Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

[34] WANG, B. et Al. Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminium alloy. **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, China, v. 25, p. 2481 – 2489, 2015.

[35] HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais.** São Paulo: Artliber, 2005.

[36] JUNIOR, P. R. B.; MARTINS, V.; SCHAEFFER, L. Determinação do coeficiente de atrito pelo ensaio de compressão do anel: uma revisão. **Thema**, Pelotas, v. 8, n. 1, 2011.

[37] GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio de Materiais.** Campinas: LTC, 2000.

[38] MARTELLO, L. **Desenvolvimento de processo de forjamento de liga de Alumínio AA6351 com auxílio de computação numérica.** 2007. 93 f. Dissertação (Mestrado)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

[39] BUENO, A.F., et Al. Ensaio do Anel para avaliação do comportamento do coeficiente de atrito da liga de alumínio AA6351. *Estudos tecnológicos, Brasil*, v. 6. P. 11-21, 2010.

[40] COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

[41] TRIDAPALLI, C. W. **Estudo comparativo de metodologias de ensaios acelerados de corrosão por frestas nas ligas de aço inox AISI 430 e AISI 304.** 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

[42] QIN, Y.; BALENDRA, R.; CHODNIKIEWICZ, K. A method for the simulation of temperature stabilization in the tools during multi-cycle cold-forging operations. **Journal of Materials Processing Technology**, [S.l.], v. 107, n. 1-3, p. 252-259, 2000.

[43] COLOMBO, T. C. A. **Análise numérica do forjamento em matriz aberta para a produção de eixos vazados**. 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

[44] NACIONAL LUBRIFICANTES. **Ipitur AW 68**. [S.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: <<http://www.naclub.com.br/uploads/produtos/0408100422bt.pdf>>. Acesso em: 23 maio 2014.

[45] ASM SPECIALTY HANDBOOK. **Aluminum and aluminum alloys**. [S.l.]: ASM Internacional, 1993.

[46] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM E3-01). **Standard guide for preparation of metallographic specimens**. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 2007.

[47] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM E407-07). **Standard practice for micretching metals and alloys**. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 2007.

[48] MONDARDO, M. M. **Análise de parâmetros do processo de trefilação de barras cilíndricas de aço AISI 1045 via simulação numérica computacional**. 2012. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.