



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

BRUNO CAETANO DOS SANTOS SILVA

**EFEITOS TRIBOLÓGICOS DA SUPERFÍCIE DE FERRAMENTAS PARA
ESTAMPAGEM DE CHAPAS DE MAGNÉSIO AZ31B**

Salvador

2017

BRUNO CAETANO DOS SANTOS SILVA

EFEITOS TRIBOLÓGICOS DA SUPERFÍCIE DE FERRAMENTAS PARA
ESTAMPAGEM DE CHAPAS DE MAGNÉSIO AZ31B

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Rodrigo Santiago Coelho

Salvador

2017

BRUNO CAETANO DOS SANTOS SILVA

EFEITOS TRIBOLÓGICOS DA SUPERFÍCIE DE FERRAMENTAS PARA
ESTAMPAGEM DE CHAPAS DE MAGNÉSIO AZ31B

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial

Aprovada em ____ de _____ de 2017.

Banca Examinadora

Dr.-Ing. Rodrigo Santiago Coelho - Orientador
Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de Ruhr-Universität, Bochum, Alemanha
Centro Universitário SENAI CIMATEC

Dr. Charles Chemale Yurgel
Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
Centro Universitário SENAI CIMATEC

Dr. Leone Peter da Silva Correia Andrade
Doutor em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil
Sistema FIEB

Dr. Jacson Machado Nunes
Doutor em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

A toda minha família, que sempre acreditou em
mim. A confiança e ao apoio dado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pela força concedida e por estar presente a todo momento em meu caminho.

Aos meus pais, por sempre me incentivarem a prosseguir. Ao meu irmão Cayo, pelos momentos de lazer.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Coelho, pelo tempo dedicado e pela valiosa e imprescindível orientação na execução desse estudo.

Ao colega e grande amigo Daniel Marques, pela importante contribuição nas análises microestruturais.

Ao *Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology* (IWU) pelo acolhimento como pesquisador visitante durante o período de dez meses e por ter disponibilizado infraestrutura e insumos necessários para execução de parte dos experimentos. Agradeço em especial ao diretor do Departamento de Conformação de Chapas, Frank Schieck, ao supervisor e amigo Sören Scheffler e ao colega André Mosel, pelo suporte nos ensaios tribológicos.

Aos bolsistas Gustavo Fornari, Marcelo Espinheira, Marina Andrade e João Rescala, pelo suporte nos ensaios práticos e na realização desse trabalho.

À equipe da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), em especial o Prof. Haroldo Pinto.

Ao SENAI CIMATEC e ao Instituto SENAI de Inovação em Conformação e União de Materiais, através do Programa Jovens Talentos, pela oportunidade oferecida, apoio financeiro e disponibilização da sua infraestrutura.

Enfim, agradeço profundamente a todos que contribuíram nesta caminhada.

RESUMO

O atendimento a requisitos de redução de peso é uma das grandes metas de muitos setores industriais. Este é o caso da indústria automotiva, que busca incessantemente a redução de peso dos veículos produzidos, tendo como fator impulsionador o atendimento a regulamentações governamentais que limitam as emissões de gases estufa. Estudos mostram que a redução no peso dos automóveis implica em um menor consumo de combustível, o que acarreta diretamente em menor emissão de gases estufa, como o dióxido de carbono (CO_2). Nesse contexto, as ligas de magnésio têm se mostrado um material com grande potencial para redução de peso, devido à sua baixa densidade. As carrocerias automotivas oferecem muitas possibilidades para aplicação de componentes de chapas de magnésio, visto que são completamente constituídas por componentes estampados. Entretanto, a conformação de chapas de ligas de magnésio é comprometida pela reduzida conformabilidade desse material à temperatura ambiente e por limitações quanto ao uso de lubrificantes. Nesse sentido, com o objetivo de reduzir os níveis de atrito no processo e obter condições mais favoráveis para a conformação, foram realizadas investigações tribológicas entre nove ferramentas de testes com diferentes estruturas superficiais em contato com chapas de liga de magnésio AZ31B de 2 mm de espessura. As ferramentas de testes foram projetadas variando-se parâmetros como geometria e dimensões das estruturas superficiais e foram produzidas posteriormente por técnicas de estruturação a laser. Os testes de atrito foram executados utilizando um equipamento de dobramento sob tensão de tiras e a análise dos resultados foi realizada considerando o valor médio do coeficiente de atrito entre as tiras ensaiadas em cada ferramenta e o desvio padrão associado. A força resultante em cada ferramenta e a força de dobramento foram analisadas e mostradas graficamente, juntamente com a força de atrito calculada. A caracterização complementar do material como recebido e ensaiado foi realizada através das seguintes técnicas: microscopia óptica, para avaliação da microestrutura do material e da formação de maclas devido às deformações introduzidas pelo processo; difração de raios-X, com o objetivo de analisar variações na textura cristalográfica do material e os mecanismos de deformação envolvidos; ensaios de microdureza, a fim de mapear o gradiente de dureza do material ao longo da seção transversal. A avaliação da rugosidade superficial da ferramenta padrão antes e após os ensaios foi realizada utilizando perfilômetro mecânico. Os resultados dos ensaios de atrito indicam que as ferramentas com estrutura superficial apresentam potencial para

otimização das condições atrito na conformação de chapas de magnésio, visto que uma redução de aproximadamente 8,9% no coeficiente de atrito foi alcançada. Os eventos de alto e baixo atrito visualizados nas curvas de força de atrito plotadas indicam associação direta com a adesão de material da tira ocorrida em todas as ferramentas, o que também está condizente com o aumento da rugosidade superficial na ferramenta após ensaio. As análises com microscópio óptico revelaram uma microestrutura da chapa ensaiada muito similar à do material como recebido, exceto pela presença de um maior volume de maclas na região da chapa que esteve em contato com a superfície da ferramenta. A análise de textura cristalográfica revelou o mesmo comportamento para todas as tiras ensaiadas. A medição de dureza mostrou um leve aumento da dureza das amostras conformadas, em relação ao material como recebido. Por fim, o estudo da viabilidade econômica da utilização de ferramentas com estrutura superficial e da consequente ampliação do uso das ligas de magnésio foi realizado e o resultado se mostrou favorável à utilização dessa tecnologia, principalmente devido ao menor consumo energético no processo e aos ganhos econômicos associados à redução do consumo de combustível e das emissões de gases estufa.

Palavras-chave: Conformação, superfícies de ferramentas, estruturas superficiais, coeficiente de atrito, dobramento sob tensão, magnésio AZ31B, microestrutura, propriedades mecânicas, textura cristalográfica.

ABSTRACT

Aiming to accomplish the weight reduction requirements is one of the ultimate goals of the industry. This is the case of the automotive industry, which aims unceasingly to reduce the vehicle's weight, having as their main factor the governmental regulations, which limit the emissions of greenhouse gases. Studies have shown that the weight reduction in the automobiles implies in lower fuel consumption, which results directly in a lower greenhouse gases emission, such as carbon dioxide (CO₂). In this context, the magnesium alloys have shown high potential for weight reduction, due to its low density. The automotive bodies show many possibilities for components applications produced by magnesium sheets, as they are completely made by stamped components. However, the forming of magnesium alloys sheets is compromised by the reduced formability of this material at room temperature and by limitations in the use of lubricants. In this way, aiming lower friction coefficients in the process and more favorable conditions in the forming process, tribological investigations were carried out on nine test tools with different superficial structures in contact with magnesium AZ31B sheets of 2 mm thickness. The test tools were designed with different parameters, such as geometry and dimensions of the superficial structures. These test tools were produced by laser structuring techniques. The friction tests were performed using a Bending Under Tension machine and the analysis of the results was carried out considering the mean friction coefficient between the strips in each tool and the associated standard deviation. The resultant force in each tool and the bending force were analyzed and shown graphically, along with the theoretical friction force. The complementary characterization of the material in as-received and tested conditions was realized by these following techniques: optical microscopy, in order to evaluate the material microstructure and the formation of crystal twinning due to deformations introduced by the process; X-rays diffraction, aiming to analyzing changes in the material crystallographic texture and the deformation mechanisms involved; micro-hardness tests, in order to map the hardness gradient along the cross section. The superficial roughness evaluation of the standard tool before and after the tests was realized using a mechanical profilometer. The friction tests results showed that the structured tools have a great potential for optimizing the friction conditions in magnesium sheets forming, as it was achieved a reduction of about 8,9% in the friction coefficient. The high and low friction events seen in the plotted friction force curves indicates a direct association with material adhesion from the strip, occurred in all

tools, fact that is consistent with the increase of superficial roughness in the tool after the test. The optical microscope analyses showed a very similar microstructure comparing the tested strip from the non-tested material, except from the presence of a higher crystal twinning volume in the strip region that was in contact with the tool surface. The crystallographic texture analysis showed the same behavior in all tested strips. The hardness measurement showed a slight increase in the tested samples hardness, in comparison to the material as-received. Lastly, the study of economic viability of using tools with structured surface and the consequent increase in the magnesium alloys usage was performed and the results indicated that there is a favorable scenario for this technology application, mainly due to lower energy consumption in the process and the economic benefits associated with reduced both fuel consumption and greenhouse gas emissions.

Keywords: Forming, tool surfaces, surface structures, friction coefficient, bending under tension, magnesium AZ31B, microstructure, mechanical properties, crystallographic texture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema ilustrativo da seção transversal do ferramental convencional de estampagem.	24
Figura 2 - Tensões presentes no processo de estampagem profunda.	25
Figura 3 - Representação da região de contato entre as superfícies da ferramenta e da peça para valores reduzidos de pressão de contato; (a) Região aparente de contato; (b) Área real de contato.....	28
Figura 4 - Efeito do desgaste do sistema na força de atrito.	30
Figura 5 - Tipos de desvios superficiais.	31
Figura 6 - Representação das rugosidades Ra e Rt.....	33
Figura 7 - Principais ensaios para modelagem das condições tribológicas na conformação de chapas metálicas.	35
Figura 8 - Configuração esquemática do ensaio com ferramentas planas.....	36
Figura 9 - Configuração esquemática do ensaio tribológico considerando efeitos de compressão do prensa-chapas e do raio da matriz.....	37
Figura 10 - Configuração esquemática do ensaio de quebra-rugas.	37
Figura 11 - Dispositivo típico para realização do ensaio de redução de tira.	38
Figura 12 - Configuração esquemática do ensaio DST. (a) Vista Lateral; (b) Vista Isométrica.	39
Figura 13 - Comparação da conformação com ferramentas padrão e estruturada em termos do trabalho total e do trabalho relacionado ao atrito.	44
Figura 14 - Propriedades mecânicas de diferentes materiais para construção de carrocerias automotivas.....	49
Figura 15 - Microscopia óptica ilustrando a microestrutura de chapa de magnésio AZ31B laminada a quente (como recebida).	50
Figura 16 - Célula unitária HC e principais planos e direções para o Mg sendo: (a) Basal; (b) Prismático; (c) Piramidal.	50
Figura 17 - Ativação de planos de deslizamento adicionais em temperaturas elevadas.	51

Figura 18 - Dependência das propriedades mecânicas em relação à temperatura para a liga Mg AZ31B (espessura = 1,98 mm).	52
Figura 19 - Aplicações das chapas de liga de magnésio na indústria automotiva.....	53
Figura 20 - Difração de raios-X pela rede de um cristal. Raios difratados pelos planos paralelos não estão em fase.	56
Figura 21 - Comprimento de fase igual em cada plano perpendicular à direção de propagação - não irão se anular e a reflexão irá ocorrer.....	57
Figura 22 - Caminho do raio e rotação da amostra em um goniômetro de textura de raio-X.	58
Figura 23 - (a) Representação da textura cristalográfica do AZ31B; (b) Figura de polo do AZ31B como recebido.....	59
Figura 24 - Potenciais impactos econômicos obtidos com a utilização de ferramentas com estrutura superficial.	60
Figura 25 - Distribuição de material em um veículo médio da América do Norte.	61
Figura 26 - Visão geral do trabalho.....	68
Figura 27 - Fluxograma dos ensaios realizados.	68
Figura 28 - Modelo padrão das ferramentas de teste.....	70
Figura 29 - Equipamento utilizado no Ensaio de Dobramento sob Tensão.	72
Figura 30 - Representação esquemática do Equipamento utilizado no Ensaio de Dobramento sob Tensão.	73
Figura 31 - Ilustração real do ensaio de dobramento sob tensão.....	74
Figura 32 - Desenho esquemático do corte das amostras para caracterização do material da chapa. (a) Identificação das cotas das amostras retiradas do lado de 170 mm; (b) Vista isométrica do segmento da tira.	78
Figura 33 - Representação do ensaio de dureza: (a) Seção transversal da amostra; (b) Cotas dos pontos de medição de dureza ao longo dos eixos L1 e L2.	80
Figura 34 - Indicação da região de medição da rugosidade superficial.....	81
Figura 35 - Valores de rugosidade da ferramenta lisa após fabricação.	85

Figura 36 - Coeficiente de atrito médio e desvio padrão para cada ferramenta.	87
Figura 37 - Relação entre f (%) e μ para todas as ferramentas de teste.	88
Figura 38 - Relação entre f (%) e μ para as ferramentas 3, 4, 6 e 9.	88
Figura 39 - Relação entre \emptyset e μ para as ferramentas com estrutura superficial com geometria circular.	89
Figura 40 - Relação entre $d(c,c)$ e μ para as ferramentas com estrutura superficial com geometria circular.	90
Figura 41 - Comportamento das forças associadas ao ensaio com a ferramenta de teste 1.	91
Figura 42 - Comportamento das forças associadas ao ensaio com a ferramenta de teste 5.	91
Figura 43 - Comportamento das forças associadas ao ensaio com a ferramenta de teste 9.	92
Figura 44 - Ampliação de trecho da curva Fat para amostra ensaiada na ferramenta 5.	93
Figura 45 - Microscopia óptica da liga AZ31B no estado como recebido. Ampliação de 500X.	94
Figura 46 - Microscopia óptica da liga AZ31B processada na ferramenta 1. Ampliação de 200X.	95
Figura 47 - Resultados do ensaio de dureza nas amostras como recebida e ensaiadas. .	99
Figura 48 - Valores de rugosidade da ferramenta lisa antes e após ensaios de atrito...	100
Figura 49 - Adesão de material da chapa de magnésio na ferramenta lisa.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Convenção para designação dos elementos de liga.....	47
Tabela 2 - Propriedades físicas do Mg, Al e Fe.	48
Tabela 3 - Propriedades mecânicas da chapa comercial de Mg AZ31B à temperatura ambiente.	48
Tabela 4 - Propriedades dos aços aplicados na fabricação de painéis de portas automotivas.....	54
Tabela 5 - Distribuição do consumo de eletricidade em instalações de montagem de veículos.....	66
Tabela 6 - Composição química do material da chapa (Mg AZ31B), em % de peso. ...	69
Tabela 7 - Composição química do Mg AZ31B, em % de peso.	69
Tabela 8 - Parâmetro de rugosidade do material utilizado.	69
Tabela 9 - Parâmetros das ferramentas de testes.	71
Tabela 10 - Características do Equipamento utilizado no Ensaio de Dobramento sob Tensão.....	74
Tabela 11 - Número de tiras de AZ31B testadas em cada ferramenta.	76
Tabela 12 - Parâmetros do Material e dos Testes de Atrito.....	77
Tabela 13 - Ferramentas de testes projetadas.	83
Tabela 14 - Ferramentas de teste fabricadas.....	84
Tabela 15 - Coeficiente de atrito médio medido nos ensaios de atrito.....	86
Tabela 16 - Figuras de polo medidas para as tiras ensaiadas nas ferramentas 1, 3, 4, 7 e 8.	97
Tabela 17 - Valor médio de dureza e desvio padrão associado para as amostras ensaiadas.	98
Tabela 18 - Comparação entre as ferramentas padrão e estruturadas com relação aos impactos econômicos diretos e indiretos da utilização de lubrificantes.....	104
Tabela 19 - Análise de viabilidade econômica da utilização de componentes de magnésio AZ31B em veículos de passeio.	106

ABREVIATURAS E SIGLAS

AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BH	<i>Bake Hardening</i>
BUT	<i>Bending Under Tension</i>
CAFE	<i>Corporate Average Fuel Economy</i>
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Faces Centradas
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DP	<i>Dual-Phase</i>
DST	Dobramento Sob Tensão
HC	Hexagonal Compacta
IF	<i>Interstitial-Free</i>
IFUM	<i>Institute for Metal Forming and Metal Forming Machine Tools</i>
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
LM	Linha Média
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MO	Microscópio Óptico
RMS	<i>Root Mean Square</i>
UE	União Europeia
USAMP	<i>United States Automotive Materials Partnership</i>

TABELA DE SÍMBOLOS

a	Parâmetro de rede
A_a	Área aparente de contato
ABr	Alongamento na ruptura
A_g	Alongamento uniforme
A_r	Área real
A_{ri}	Área real de contato entre duas asperezas
c	Parâmetro de rede
d	Espaçamento dos planos refletidos (distância interplanar)
D	Distância de tracionamento
d(c,c)	Distância entre centros das cavidades
d_m	Diâmetro da matriz
d_p	Diâmetro do punção
f	Folga radial entre o punção e a matriz
F	Força tangencial
f	Relação entre a área das estruturas superficiais e a área total da superfície da ferramenta
F'_1	Força de atuação no ensaio de DST com pino livre
F'_2	Força de contra-tensão no ensaio de DST com pino livre
F_1	Força de atuação
F_2	Força de contra-tensão
Fat	Força de atrito
F_b	Força de dobramento puro
F_N	Força normal de contato entre as matrizes
F_{pc}	Força do prensa chapas
F_R	Força resultante
IC_μ	Intervalo de confiança da média
L	Largura da tira
n	Número de variáveis aleatórias
N	Ordem da difração
P	Carga normal relativamente reduzida
phi	Ângulo de rotação

p_r	Pressão real de contato entre as asperezas
ψ	Ângulo de inclinação
r	Coefficiente de correlação
R	Raio da ferramenta de teste
R^2	Coefficiente de determinação
R_a	Rugosidade média
r_{cm}	Raio do canto da matriz
r_{cp}	Raio do canto do punção
R_m	Resistência à tração
$R_{p0,2}$	Tensão de escoamento
R_q	Rugosidade RMS
R_t	Rugosidade pico/vale
R_z	Média das rugosidades
S	Desvio padrão amostral
t	Tempo de permanência da tira no forno
T_F	Temperatura média na superfície da ferramenta
t_{n-1}	Valor do t-Student
T_T	Temperatura média da tira no forno
v	Velocidade de estampagem
V	Velocidade de tracionamento
\bar{X}	Média amostral
θ	Ângulo de contato entre a tira e o pino
Θ	Ângulo de incidência ou reflexão do feixe incidente
λ	Comprimento de onda dos raios X em angstrom (Å)
μ	Coefficiente de atrito
μ_a	Componente adesiva do atrito
μ_p	Componente do atrito associada à deformação ou penetração das asperezas
μ_r	Coefficiente de atrito definido na aspereza
ρ	Densidade
τ_r	Tensão de cisalhamento real que se desenvolve nas asperezas
\emptyset	Diâmetro das cavidades

SUMÁRIO

1.	Introdução	20
1.1.	Objetivo Geral	23
1.2.	Objetivos Específicos	23
2.	Revisão do Estado da Arte.....	24
2.1.	Processos de Estampagem	24
2.1.1.	Forças de Atrito Presentes no Processo de Estampagem	25
2.1.2.	Estampagem de Chapas de Ligas de Magnésio.....	26
2.2.	Tribologia	27
2.2.1.	Conceitos Fundamentais.....	27
2.2.2.	Modelos Usados para Descrever o Atrito.....	28
2.2.3.	Topografia de Superfícies.....	31
2.2.4.	Mecanismos de Desgaste por Adesão entre Duas Superfícies	33
2.3.	Ensaio para Determinação do Coeficiente de Atrito na Estampagem	34
2.3.1.	Ensaio de Tiras com Ferramentas Planas	36
2.3.2.	Ensaio de Quebra-rugas.....	37
2.3.3.	Ensaio de Redução de Tira	38
2.3.4.	Ensaio de Dobramento Sob Tensão (DST).....	38
2.4.	Lubrificantes na Conformação	41
2.4.1.	Lubrificantes na Conformação de Chapas de Ligas de Magnésio.....	42
2.5.	Ferramentas com Estrutura Superficial	43
2.6.	Ligas de Magnésio.....	46
2.6.1.	Classificação das Ligas de Magnésio	47
2.6.2.	Propriedades das Ligas de Magnésio	48
2.6.3.	Aplicações e Comparação com Outros Materiais.....	52
2.7.	Textura Cristalográfica	55

2.7.1. Análise de Textura Cristalográfica por Difração de Raios X: Técnica, Lei de Bragg e Análise dos Resultados	55
2.8. Viabilidade Econômica.....	59
2.8.1. Requisitos de Redução de Peso e Utilização das Ligas de Magnésio	60
2.8.2. Regulamentação das Emissões de CO ₂ pelos Automóveis	62
2.8.3. Impactos da Redução do Atrito na Vida Útil do Ferramental de Estampagem....	64
2.8.4. Redução do Consumo de Energia no Processo de Conformação.....	65
2.8.5. Economia no Consumo de Lubrificantes nos Processos de Estampagem.....	66
3. Materiais e Métodos	68
3.1. Materiais	69
3.2. Métodos	70
3.2.1. Testes de Atrito.....	70
3.2.2. Caracterização do Material da Chapa.....	78
3.2.3. Análise das Ferramentas de Teste	81
4. Resultados e Discussão.....	82
4.1. Projeto das Ferramentas de Teste	82
4.2. Fabricação das Ferramentas de Teste	84
4.3. Ensaio de Atrito	85
4.3.1. Análise dos Coeficientes de Atrito	85
4.3.2. Análise das Forças no Ensaio	90
4.4. Caracterização do Material da Tira	94
4.4.1. Microscopia Óptica.....	94
4.4.2. Análise de Textura Cristalográfica	96
4.4.3. Ensaio de Microdureza	97
4.5. Análise das Ferramentas de Teste	99
4.5.1. Análise de Rugosidade Superficial.....	99

4.6. Avaliação Econômica	100
4.6.1. Impacto Econômico no Consumo de Energia Elétrica.....	101
4.6.2. Impactos Econômicos Associados à Utilização de Lubrificantes	103
4.6.3. Impactos Econômicos Relacionados ao Ferramental de Estampagem.....	104
4.6.4. Impactos Econômicos Associados à Ampliação da Utilização de Ligas de Magnésio	105
5. Considerações Finais	108
5.1. Conclusões.....	108
5.2. Proposta de Trabalhos Futuros	110
Referências	111
ANEXO I.....	119

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, a economia de combustível tornou-se um objeto chave e o tema de muitas pesquisas na indústria automotiva. Estimulados pelo aumento dos preços dos combustíveis, da demanda pública e de padrões governamentais cada vez mais rigorosos, os fabricantes de automóveis têm dispendido grande esforço para reduzir o consumo de combustível dos veículos. Várias abordagens têm se mostrado eficazes, incluindo melhorias no projeto do sistema de motorização e na aerodinâmica do veículo, mas, entre as mais promissoras, está o estudo de materiais mais leves em um esforço para reduzir a massa total do veículo. De fato, as investigações demonstraram que uma parcela significativa do consumo total de combustível de um veículo está relacionada com a sua massa e pesquisas relacionadas à conformação de materiais leves trarão benefícios diretos para os fabricantes de automóveis (BOBA, 2014).

Nesse contexto, as ligas de magnésio têm se mostrado um material com grande potencial para redução de peso, devido a sua baixa densidade ($1,74 \text{ g/cm}^3$). Comparativamente, o magnésio pode ser 35% mais leve que o alumínio ($2,7 \text{ g/cm}^3$) e mais de quatro vezes mais leve que o aço ($7,86 \text{ g/cm}^3$) (DAVIES, 2003). Além disso, este material tem maior resistência à deformação e resistência à flexão em relação ao aço e ao alumínio. Em contrapartida, apresenta uma baixa conformabilidade à temperatura ambiente (SCHIECK et al., 2013). No passado, a demanda por esta liga como material estrutural não era elevada devido a sua reduzida disponibilidade comercial, assim como aos métodos de fabricação limitados. No entanto, a melhoria simultânea das tecnologias de extração de magnésio (que reduziram o custo final dos produtos semiacabados) e o desenvolvimento de processos de conformação adequados posicionaram o magnésio como um material de grande potencial para o futuro. Essa tendência está alinhada com o histórico que mostra que a produção global de magnésio em 2012 foi de cerca de 793.000 toneladas, sendo 70% superior em relação a 2002. Segundo as previsões, a produção mundial de magnésio chegará a 1,183 milhões de toneladas em 2025 (crescimento de 52% em relação a 2010) (THYSSENKRUPP, 2013). No contexto da indústria automotiva, as carrocerias dos automóveis oferecem um grande potencial para a aplicação de componentes de chapa de ligas magnésio. Em geral, a carroceria do automóvel é

completamente constituída por componentes estampados e representa cerca de 25% da massa total do veículo. Assim, a substituição de materiais convencionais por chapas de ligas de magnésio levaria a reduções de peso extremamente significativas (DOEGE et al., 2001).

Apesar dos avanços relacionados ao desenvolvimento de processos de conformação adaptados às especificidades do magnésio, a utilização de lubrificantes na conformação de chapas desse material ainda é um ponto crítico. Os lubrificantes apresentam um papel fundamental no processo de estampagem, que é o controle dos níveis de atrito, o qual tem uma função importante na distribuição das tensões e deformações na chapa. Além disso, atuam diminuindo as forças totais necessárias para estampagem, auxiliam na prevenção do desgaste e trazem melhorias na qualidade dos componentes produzidos (FOLLE, 2012). Wetzel (2012) relatou que um dos problemas associados à utilização de lubrificantes na conformação de ligas de magnésio é a adesão destes ao componente produzido, mesmo após procedimentos de limpeza para remoção terem sido executados. Se o lubrificante não pode ser removido da superfície do componente, a camada de proteção contra corrosão subsequentemente aplicada apresenta fraca adesão, o que compromete a qualidade superficial e a resistência à corrosão da peça final, afetando sua aplicação.

Nesse sentido, além de pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de novos lubrificantes, o que seria outro campo de estudo, esforços visando a eliminação do uso de lubrificantes na conformação de ligas de magnésio são necessários para a obtenção de um aprimoramento do processo. A estampagem profunda completamente livre da utilização de lubrificante é uma condição ideal, porém, difícil de ser aplicada sem a utilização de projeto avançado de ferramental (MOUSAVI et al., 2014). Eliminar a aplicação de lubrificantes requer uma redução do coeficiente de atrito e da tendência de adesão nos processos de conformação a seco. Uma abordagem para proporcionar essa condição é a estruturação da superfície do ferramental de conformação (BÖRNER et al., 2015). Ferramentas com estrutura superficial representam uma solução promissora para controlar o fluxo de material no processo de conformação, além de reduzirem a área efetiva de contato, o que diminui as forças de atrito envolvidas (KARBASIAN et al., 2010; KRUX et al., 2005). Dentro desse contexto, uma área crítica é a avaliação dos níveis de atrito entre diferentes configurações de estruturas superficiais para ferramentas e chapas de ligas de magnésio, analisando a viabilidade técnica de eliminar a utilização de

lubrificantes na conformação desse material, considerando os efeitos dessas ferramentas especiais no material.

Assim, este trabalho foi dividido da seguinte forma:

- O capítulo 1 contém a introdução aos temas relativos a este estudo, com uma breve apresentação sobre a necessidade de redução de peso enfrentada pelo setor automotivo e do magnésio como material promissor para o atendimento a essa demanda. Apresentou-se o problema da lubrificação na conformação de chapas de ligas de magnésio e a abordagem da utilização de ferramentas com estrutura superficial como alternativa para solução desse problema. Aqui também são apresentados os objetivos deste estudo, composto do objetivo geral e os objetivos específicos para atingir esta meta;
- O capítulo 2 traz a fundamentação teórica de acordo com a seguinte ordem: (a) conceitos gerais sobre estampagem e forças de atrito presentes no processo; (b) informações relacionadas ao campo da tribologia; (c) ensaios para determinação do coeficiente de atrito nos processos de estampagem; (d) lubrificantes na conformação; (e) ferramentas com estrutura superficial; (f) apresentação do magnésio e suas ligas; (g) conceitos sobre textura cristalográfica, que foi uma das técnicas de caracterização utilizadas; (h) considerações sobre a análise técnica e econômica para aplicações dessa natureza;
- O capítulo 3 traz os materiais e métodos utilizados durante este trabalho e uma breve explicação sobre os tipos de resultados obtidos e como interpretá-los;
- O capítulo 4 apresenta os resultados e as discussões para cada uma das análises e ensaios realizados, abordando as forças e coeficientes de atrito obtidos e as características microestruturais e mecânicas como forma de explicação para as respostas obtidas nos ensaios realizados. Um estudo de viabilidade econômica é apresentado ao final do capítulo;
- O capítulo 5 conclui o estudo resumindo nas considerações finais os principais resultados obtidos e apresentando também alguns aspectos a serem analisados em trabalhos futuros.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é investigar os efeitos da utilização de ferramentas com estrutura superficial na conformação de chapas de liga de magnésio AZ31B em termos do coeficiente de atrito e das forças envolvidas no processo, e o impacto dessa tecnologia nas propriedades microestruturais e mecânicas do material conformado, em comparação com a ferramenta padrão com superfície lisa.

1.2. Objetivos Específicos

Para atingir a meta estabelecida, pode-se destacar os seguintes objetivos específicos deste estudo como se segue:

- a) Projetar e fabricar ferramentas com diferentes estruturas superficiais;
- b) Realizar ensaios de atrito com equipamento de dobramento sob tensão utilizando ferramenta com superfície lisa (padrão) e ferramentas estruturadas em contato com chapas de liga de magnésio AZ31B;
- c) Avaliar o coeficiente de atrito e as forças envolvidas nos ensaios de atrito e realizar uma análise comparativa dos resultados obtidos entre as ferramentas estruturadas e a ferramenta padrão;
- d) Avaliar a microestrutura, mais especificamente quanto ao tamanho dos grãos e o surgimento de maclas de deformação no material ensaiado;
- e) Avaliar a propriedade de microdureza do material ensaiado;
- f) Avaliar as propriedades superficiais da ferramenta como produzida e após ensaios;
- g) Associar as propriedades mecânicas e microestruturais do material com os mecanismos de deformação introduzidos pelo ensaio de atrito;
- h) Realizar uma análise de viabilidade econômica da utilização da tecnologia e uma análise preliminar de viabilidade econômica levantando os ganhos associados ao estudo realizado.

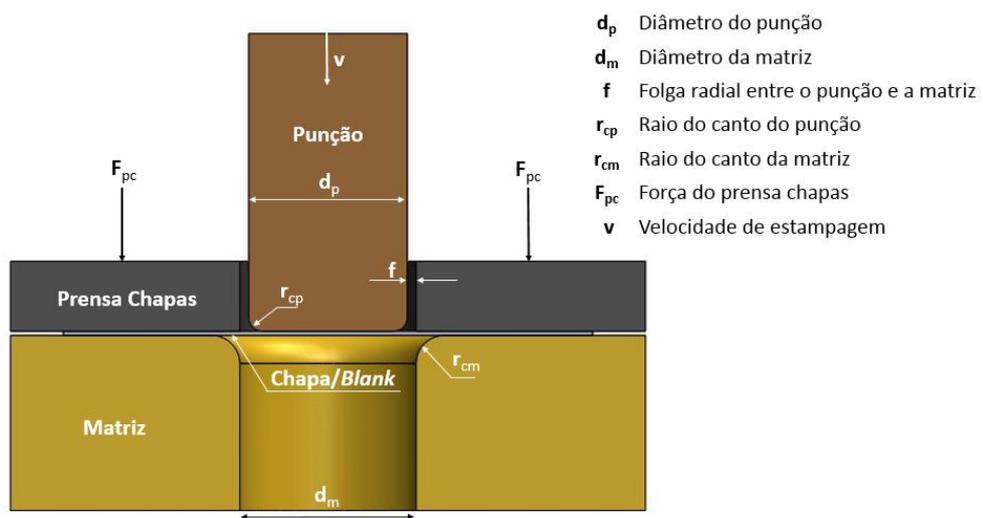
2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1. Processos de Estampagem

Rodrigues e Martins (2010) definem a estampagem ou embutimento como processo tecnológico que permite a fabricação de peças com superfície não plana a partir de uma chapa metálica. Trata-se de um dos processos mais importantes de transformação de chapas metálicas sendo intensamente utilizado por diversos setores como o automobilístico, o aeroespacial e o de bens de consumo. A indústria automobilística faz uso intenso desse processo para produção de um grande número de componentes, podendo-se citar painéis de portas, capôs, estrutura lateral da carroceria, bem como componentes estruturais, como coluna B e reforço interno da porta, através de processos de estampagem a quente.

Neste processo, uma chapa plana de material metálico é forçada a escoar controladamente pela ação de um prensa-chapas para o interior de uma matriz, por meio da ação de um punção, dando origem a uma peça oca com geometria definida pelo punção e pela matriz e onde a espessura sofre pouca variação em relação ao seu valor inicial (RODRIGUES et al., 2010). A Figura 1 ilustra a geometria básica dos componentes em um processo genérico de estampagem.

Figura 1 - Esquema ilustrativo da seção transversal do ferramental convencional de estampagem.



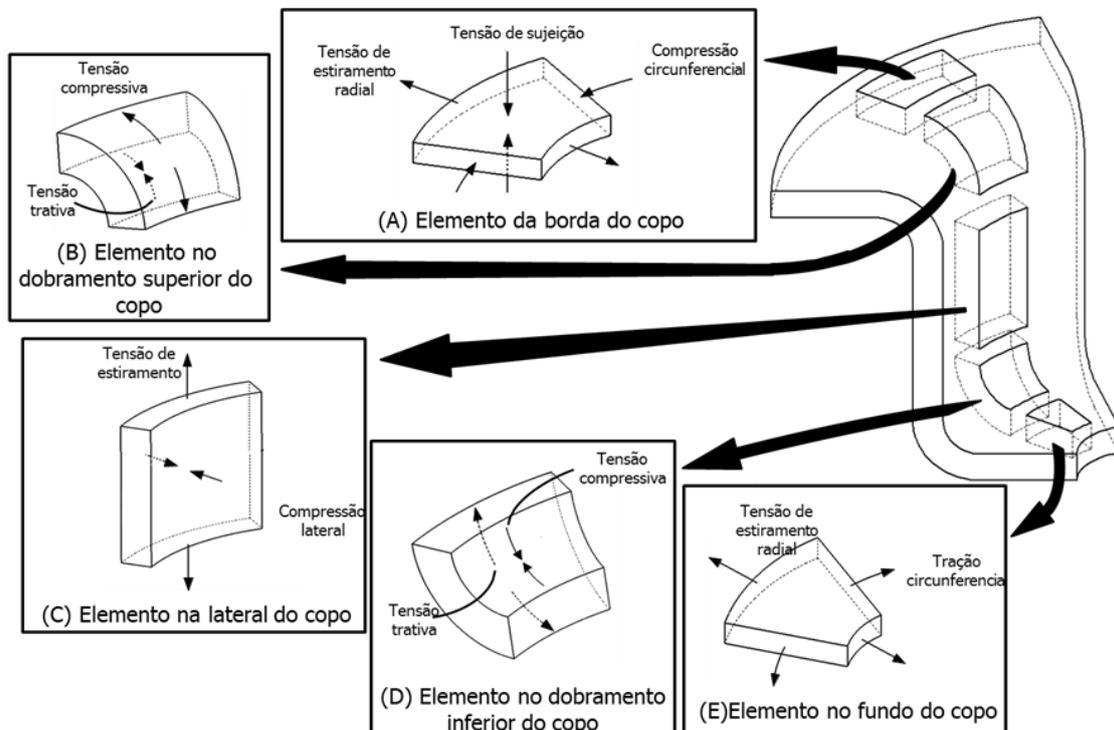
Fonte: (RODRIGUES et al., 2010) adaptado.

A estampagem profunda é o principal processo para a produção em massa de componentes a partir de chapas metálicas e proporciona um grande potencial de aplicação para a fabricação de peças com geometrias complexas que variam de pequenas a grandes dimensões (VOLLERTSEN et al., 2006).

2.1.1. Forças de Atrito Presentes no Processo de Estampagem

De acordo com Folle (2012), ao longo do processo de estampagem, a chapa ou *blank* é submetida a diferentes tipos de tensões e deformações, até a obtenção da geometria final, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Tensões presentes no processo de estampagem profunda.



Fonte: (DOEGE E BEHRENS, 2007 *apud* FOLLE, 2012) adaptado.

Na região do flange, a chapa sofre esforços de compressão na direção circunferencial e tração na direção radial (Figura 2A). Para evitar a ocorrência de defeitos de enrugamento, o prensa-chapas atua exercendo pressão sobre o material. Ao avançar em direção ao raio de entrada da matriz, o material é dobrado e depois desdobrado devido ao esforço trativo que ocorre na lateral da peça (Figura 2B). A Figura 2C ilustra o estiramento unidirecional gerando uma uniformidade na espessura da parede do *blank*.

Além de todos os esforços representados na Figura 2, deve-se considerar o efeito do atrito que ocorre entre: chapa e prensa-chapas (Figura 2A); na região de dobramento da chapa, entre matriz e chapa (Figura 2B); na lateral da peça, entre chapa e punção e chapa e matriz (Figura 2C); no interior da peça, entre o punção e chapa (Figura 2D); e no fundo da peça, também entre punção e chapa (Figura 2E) (FOLLE, 2012).

Ainda de acordo com Folle (2012), as regiões onde o atrito tem maior efeito são as regiões do prensa-chapas e do raio da matriz (região da dobra), pelo fato dessas regiões serem as únicas com movimento relativo entre material e ferramenta. Nas demais regiões existe apenas o atrito estático (sem movimento relativo), por não haver considerável movimento relativo entre o *blank* e a ferramenta. É importante frisar que o atrito estático não contribui com valores significativos para as forças totais de estampagem. A força global de atrito é basicamente composta pelo atrito entre a chapa e o prensa-chapas e entre a chapa e a matriz na região da dobra, que parte de um pico de esforço (atrito estático para o atrito dinâmico) e diminui continuamente devido à diminuição da área de material sob o prensa-chapas (GARCIA et al., 2000). Por ser uma das regiões mais afetadas pelo atrito em um processo de estampagem, o foco desse trabalho consiste em avaliar as condições de atrito na região da dobra.

2.1.2. Estampagem de Chapas de Ligas de Magnésio

A estrutura cristalina do tipo hexagonal compacta (HC) do magnésio exige temperaturas de conformação elevadas para ativar sistemas de deslizamento e permitir assim uma melhor conformabilidade. Esse aspecto gera a necessidade de maior consumo de energia durante o processamento desse material. Nesse sentido, o desenvolvimento de novas ligas e processos, especialmente para o material em formato de chapas, é de grande interesse para suprir essas lacunas. O processo de produção de tiras de Mg denominado *twin roll casting* promete custos reduzidos devido ao pequeno número de passes necessários para atingir reduzidas espessuras de chapas (BLAWERT et al., 2004).

O potencial das chapas de ligas de magnésio AZ31 (categoria da qual faz parte o AZ31B) para aplicações de estampagem profunda tem sido demonstrado com sucesso (BLAWERT et al., 2004; SCHIECK et al., 2013; SILVA et al., 2015). O magnésio apresenta características de embutimento a quente similares às chapas de aço e alumínio. Em temperaturas em torno de 225°C a razão limite de estampagem do AZ31 é 2,6, sendo, portanto, superior a esse parâmetro para o alumínio e para o aço em aplicações

convencionais, que possuem taxas de 2,5 e 2,2, respectivamente. Pesquisas adicionais estão sendo realizadas para investigar o comportamento desse material em processos como dobramento e hidroconformação (BLAWERT et al., 2004; SCHIECK et al., 2013).

2.2. Tribologia

2.2.1. Conceitos Fundamentais

Sempre que duas superfícies sólidas estão em contato e apresentando movimento relativo, uma resistência ao movimento (atrito) surge. O atrito é um parâmetro dependente do tribossistema e não diretamente mensurável (AVITZUR, 1992).

Uma das formas de se avaliar os níveis de atrito em um tribossistema é medindo o seu coeficiente de atrito. Um material não apresenta isoladamente um coeficiente de atrito, nem mesmo um par de materiais apresenta necessariamente um mesmo coeficiente de atrito. Somente quando um material é acoplado a outro material (ou mais de um material) e algum tipo específico de movimento deslizante está presente no sistema, o coeficiente de atrito pode ser medido. Para ser válido, um teste de atrito deve simular o sistema de interesse (BUDINSKI, 1992).

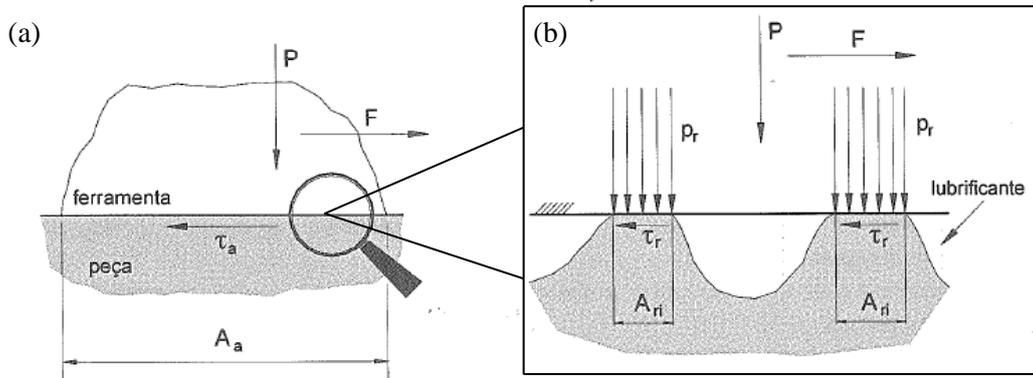
A observação microscópica de uma superfície revela que ela não é perfeitamente lisa, sendo, na verdade, constituída por inúmeros picos e vales que definem a sua rugosidade, de modo que o contato entre duas superfícies é, na maioria das vezes, limitado aos picos mais elevados ou asperezas, de cada uma das superfícies (RODRIGUES et al., 2005). A Figura 3 ilustra a representação esquemática do contato entre as superfícies de uma ferramenta de estampagem e do *blank* para valores reduzidos de pressão de contato.

Para uma carga normal relativamente reduzida (P), o contato entre as superfícies ocorre no nível das asperezas, determinando que a área real (A_r) seja inferior à área aparente de contato (A_a). Nessas condições, a área real de contato entre duas asperezas (A_{ri}) estará diretamente relacionada com o valor da carga aplicada entre as duas superfícies, visando garantir o equilíbrio estático, conforme Equação 1.

$$P = \sum_i p_r A_{ri} \quad (1)$$

Sendo: p_r : Pressão real de contato entre as asperezas

Figura 3 - Representação da região de contato entre as superfícies da ferramenta e da peça para valores reduzidos de pressão de contato; (a) Região aparente de contato; (b) Área real de contato.



Fonte: (RODRIGUES et al., 2005) adaptado.

A força tangencial (F) necessária para vencer o atrito entre duas superfícies e, portanto, promover o movimento relativo entre elas, pode ser dada pela Equação 2:

$$F = \sum_i \tau_r A_{ri} \quad (2)$$

Sendo:

τ_r : Tensão de cisalhamento real que se desenvolve nas asperezas

As irregularidades da superfície e seu comportamento durante o deslizamento, juntamente com o lubrificante e a química de superfície, são fatores-chave na caracterização do atrito e desgaste (AVITZUR, 1992).

2.2.2. Modelos Usados para Descrever o Atrito

Para analisar o fenômeno de atrito na estampagem, é importante a utilização de modelos que descrevam realisticamente o processo em estudo, principalmente quando a superfície de análise é grande. Para esse caso, a força de atrito tem uma contribuição relevante para a força total requerida na operação (FOLLE, 2012).

As dificuldades na determinação do valor de atrito estão na complexidade dos fenômenos e na incapacidade de medir com precisão os esforços de cisalhamento. Portanto, aproximações são utilizadas para descrever o comportamento de atrito durante a conformação do metal. Uma das consequências dessa abordagem é que o atrito deve ser medido individualmente para cada processo de conformação (AVITZUR, 1992).

O coeficiente de atrito (μ) segundo Coulomb pode ser definido como sendo o quociente entre a força tangencial (Equação 2) necessária para realizar o movimento relativo entre duas superfícies e a força normal (Equação 1) aplicada entre as mesmas duas superfícies, de acordo com a Equação 3 (RODRIGUES et al., 2010).

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{\sum_i \tau_r A_{ri}}{\sum_i p_r A_{ri}} = \frac{\tau_r}{p_r} = \mu_r \quad (3)$$

Sendo:

μ_r : Coeficiente de atrito definido na aspereza

Esse resultado segue a teoria de Amonton-Coulomb relativa à mecânica de contato entre corpos sólidos e revela o fato do coeficiente de atrito ser independente das áreas real e aparente de contato e exclusivamente proporcional às forças aplicadas e, conseqüentemente, às tensões envolvidas entre as duas superfícies, conforme representado pela Equação 3 (RODRIGUES et al., 2005).

Entretanto, esta lei nem sempre é adequada para explicar o comportamento do atrito predominante em condições experimentais, como nos processos de estampagem. Durante a conformação de uma chapa metálica o coeficiente de atrito é controlado por duas componentes:

- Uma força adesiva atuando nas áreas reais de contato;
- Uma força de deformação atuando durante a penetração das asperezas da ferramenta (que é mais dura), na superfície da chapa metálica (que é mais macia).

Conseqüentemente, o coeficiente de atrito pode ser expresso como representado pela Equação 4:

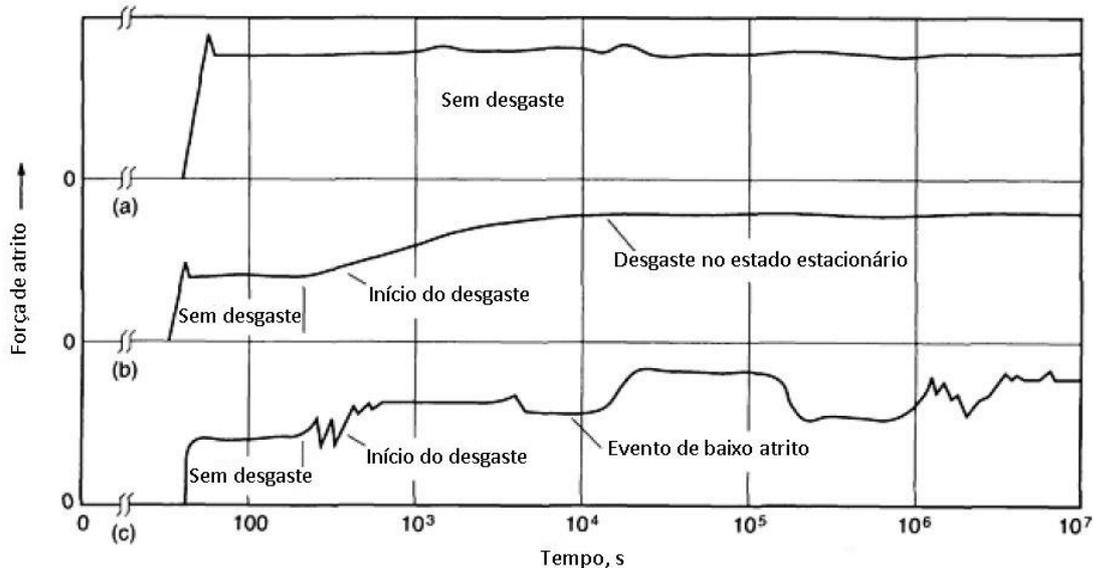
$$\mu = \mu_a + \mu_p \quad (4)$$

onde μ_a é a componente adesiva (que está relacionada ao material) e μ_p é a componente associada à deformação ou à penetração das asperezas (está relacionada à topografia da superfície em contato) (CARLSSON, 2005; FOLLE, 2012).

A consideração sobre o desgaste das superfícies deslizantes pode ser o aspecto mais importante na modelagem de um tribossistema. A Figura 4 ilustra situações de como

esse problema pode afetar as forças de atrito. A Figura 4(a) mostra um sistema que não apresenta nenhum desgaste ou mudança no comportamento quando o mesmo ocorre. Esta é a situação onde, mesmo ocorrendo esse fenômeno, as partículas são transportadas e não ocorre nenhuma mudança no acabamento das superfícies. A Figura 4(b) ilustra um tribossistema onde as forças de atrito aumentam com o desgaste e então atingem um estado estacionário. Este comportamento pode ocorrer em um sistema submetido ao desgaste severo. O atrito é baixo quando ambos os membros ainda apresentam suas superfícies originais. Quando estas começam a se desgastar, o atrito aumenta e, a partir desse ponto, as superfícies gastas permanecem as mesmas. A Figura 4(c) ilustra um sistema onde a força de atrito varia com os eventos no processo de desgaste. Este tipo de comportamento ocorre frequentemente em um tribossistema onde as partículas geradas permanecem no sistema. Dependendo de como as partículas de desgaste separam as superfícies, estas podem ter um efeito lubrificante ou não lubrificante no sistema (BUDINSKI, 1992). A Figura 4 tem como objetivo ressaltar a importância de um modelo que simule adequadamente o sistema em análise.

Figura 4 - Efeito do desgaste do sistema na força de atrito.



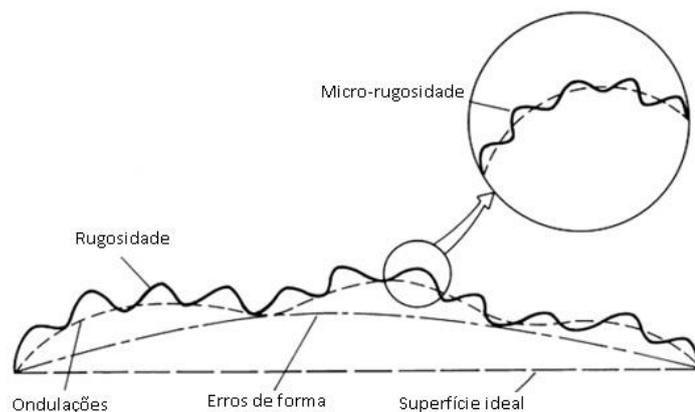
Fonte: (BUDINSKI, 1992) adaptado.

Como a força de atrito pode não ser constante durante todo o teste, podem surgir dúvidas quanto ao valor que deve ser relatado. Os dados mais significativos são o coeficiente de atrito mínimo, o máximo, a média e o desvio padrão.

2.2.3. Topografia de Superfícies

A forma geométrica de qualquer superfície é determinada pelos processos de fabricação ao qual a mesma foi submetida, os quais geram ondulações de comprimentos de onda que vão desde as dimensões atômicas até ao comprimento do componente. Estas ondulações resultam frequentemente da dinâmica do processo de acabamento particular ou da máquina utilizada. São desvios superficiais comuns os erros de forma, as ondulações e a rugosidade (Figura 5) (LARSEN-BASSE, 1992). Os erros de forma são desvios superficiais irregulares do perfil ideal do projeto, causados frequentemente pela falta da exatidão do processo de fabricação. Ondulações consistem em desvios periódicos da superfície geométrica, muitas vezes de forma senoidal e frequentemente determinadas por oscilações de baixo nível do sistema máquina-ferramenta-peça durante o processo de fabricação. Tipicamente, os comprimentos de onda variam de 1 a 10 mm e as amplitudes de onda podem chegar até centenas de micrômetros. Mesmo depois de uma superfície ter sido cuidadosamente polida, ela ainda será rugosa em uma escala atômica.

Figura 5 - Tipos de desvios superficiais.



Fonte: (LARSEN-BASSE, 1992) adaptado.

Um dos termos mais utilizados no estudo da topografia é a “rugosidade”, que consiste em desvios na superfície causados pela geometria da ferramenta de corte e seu desgaste, condições de usinagem, microestrutura da peça de trabalho, dentre outros. A rugosidade superficial pode ser definida como um conjunto de irregularidades de pequena escala, fundamentalmente saliências e reentrâncias, que caracterizam uma determinada superfície. Os picos de rugosidade superficial são chamados de asperezas (LARSEN-BASSE, 1992; PARRA et al., 2006).

Condições Superficiais e Considerações para o Tratamento dos Resultados

Especialistas em tribologia seguem com a afirmação de que o atrito pode ser afetado pela condição superficial. Se as cargas são suficientemente baixas, apenas uma ou duas monocamadas externas na superfície podem participar de interações deslizantes. No deslizamento sem lubrificação, o efeito da rugosidade pode variar de insignificante a significativo, dependendo do sistema. Em superfícies convencionais usinadas com uma rugosidade média (R_a) inferior a cerca de $1,5 \mu\text{m}$, o efeito será pequeno. A rugosidade torna-se um fator significativo quando as interações entre as asperezas resultam em efeitos de travamento mecânico. Isso geralmente acontece apenas com superfícies muito ásperas. Às vezes, superfícies muito lisas causam adesão (BUDINSKI, 1992).

Sistemas erráticos tais como os descritos na Figura 4(c) devem ser tratados estatisticamente. Em testes de atrito onde o objetivo é selecionar um par com o movimento mais suave, um parâmetro de teste adequado para classificar os materiais é o desvio padrão da força de atrito. Este parâmetro mostra a variabilidade das forças de atrito para os vários sistemas.

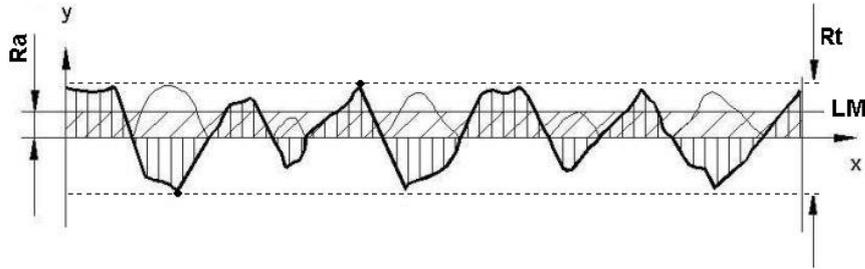
Medição da Rugosidade

Para medição da rugosidade superficial, frequentemente utiliza-se perfilômetro mecânico de contato, também conhecido como perfilômetro *Stylus*. O equipamento apresenta uma agulha de diamante fino que percorre a superfície analisada. Devido aos picos e vales, o apalpador apresenta movimentos que são convertidos em sinais elétricos por um transdutor. Durante a medição, o sinal elétrico é processado para obtenção dos parâmetros de rugosidade (AMARAL et al., 2002; HUTCHINGS et al., 1992; LARSEN-BASSE, 1992). Uma das limitações desse método está associada à ocorrência de deformações no contato apalpador-peça.

Parâmetros de Rugosidade

- Rugosidade média (R_a): é a medida mais comumente citada de rugosidade superficial. O valor de R_a (Figura 6) é calculado através da média aritmética dos valores absolutos das alturas dos pontos que compõem o perfil, em relação à linha média (LM). A linha média é uma linha de referência que divide o perfil de rugosidade, de forma que a soma das áreas superiores seja igual à soma das áreas inferiores (HUTCHINGS et al., 1992; PARRA et al., 2006).

Figura 6 - Representação das rugosidades Ra e Rt.



Fonte: (STOETERAU, 2004) adaptado.

- Rugosidade RMS – *Root Mean Square* (R_q): é definida como a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos desvios e representa o desvio padrão da distribuição de altura (LARSEN-BASSE, 1992).
- Rugosidade pico/vale (R_t): corresponde à diferença encontrada entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo ao longo do perfil de rugosidade traçado, conforme ilustrado na Figura 6 (PARRA et al., 2006; STOETERAU, 2004). Uma das limitações desse parâmetro é a rigidez da avaliação, por considerar o comprimento de amostra igual ao comprimento de avaliação, o que pode levar a resultados enganosos.
- Média das rugosidades (R_z): é a média aritmética das alturas máximas do perfil medidas em cinco comprimentos de base consecutivos. Esse parâmetro é similar a rugosidade R_t , porém um pouco mais sensível a mudanças no acabamento superficial (FACCIO, 2002).

2.2.4. Mecanismos de Desgaste por Adesão entre Duas Superfícies

Um contato deslizante entre superfícies metálicas envolve vários fenômenos tribológicos, por exemplo, atrito e aquecimento por fricção, na interface em contato. A interação entre as superfícies ocorre na área real de contato, que é influenciada pela carga normal e propriedades mecânicas. Se as superfícies não forem separadas, por exemplo, por um lubrificante, a adesão ocorre através da interface, o que influencia tanto o atrito quanto o desgaste. Maiores taxas de desgaste adesivo foram relatadas em temperaturas elevadas, particularmente para tribossistemas abertos onde uma ou ambas as superfícies em contato ainda não sofreram esse tipo de dano (GÅRD et al., 2010).

A conformação de chapas metálicas é uma aplicação típica, correspondente a um tribossistema aberto, no qual o mecanismo de desgaste predominante, em geral, é

atribuído ao desgaste adesivo. Durante o deslizamento, o material da chapa é transferido para a superfície das ferramentas, o que, subsequentemente, leva ao riscamento das chapas (GÅÅRD et al., 2010).

Os principais obstáculos para a produção de superfícies lisas são manchas e o esfolamento (*galling*), sendo este último um fenômeno de desgaste que é a principal causa de falha de ferramentas na conformação de chapas. Tipicamente, o esfolamento se desenvolve gradualmente durante as operações de conformação, através da adesão de regiões do material da chapa na superfície da ferramenta. Isso provoca problemas estéticos para a peça de trabalho e gera condições de atrito instáveis para o processo de conformação (PODGORNIK et al., 2006).

Quando as tensões de escoamento em cisalhamento puro são atingidas, as superfícies das ferramentas e da chapa podem apresentar adesão e/ou emperramento (FOLLE, 2012). Se uma adesão ocorrer, a força de atrito diminuirá, mas as superfícies irão se danificar. Esse fenômeno pode produzir dados falsos para o usuário, que pode pensar que o par em análise apresenta comportamento satisfatório devido ao coeficiente de atrito ter diminuído, quando, na verdade, uma situação de desgaste se estabeleceu e as superfícies estão sendo desgastadas (BUDINSKI, 1992).

Em muitas situações, o desgaste entre duas superfícies deslizantes pode ser reduzido com a utilização de estruturas superficiais. Vários estudos realizados incluem principalmente avaliação experimental de superfícies com diferentes estruturas superficiais (BRUZZONE et al., 2008).

2.3. Ensaios para Determinação do Coeficiente de Atrito na Estampagem

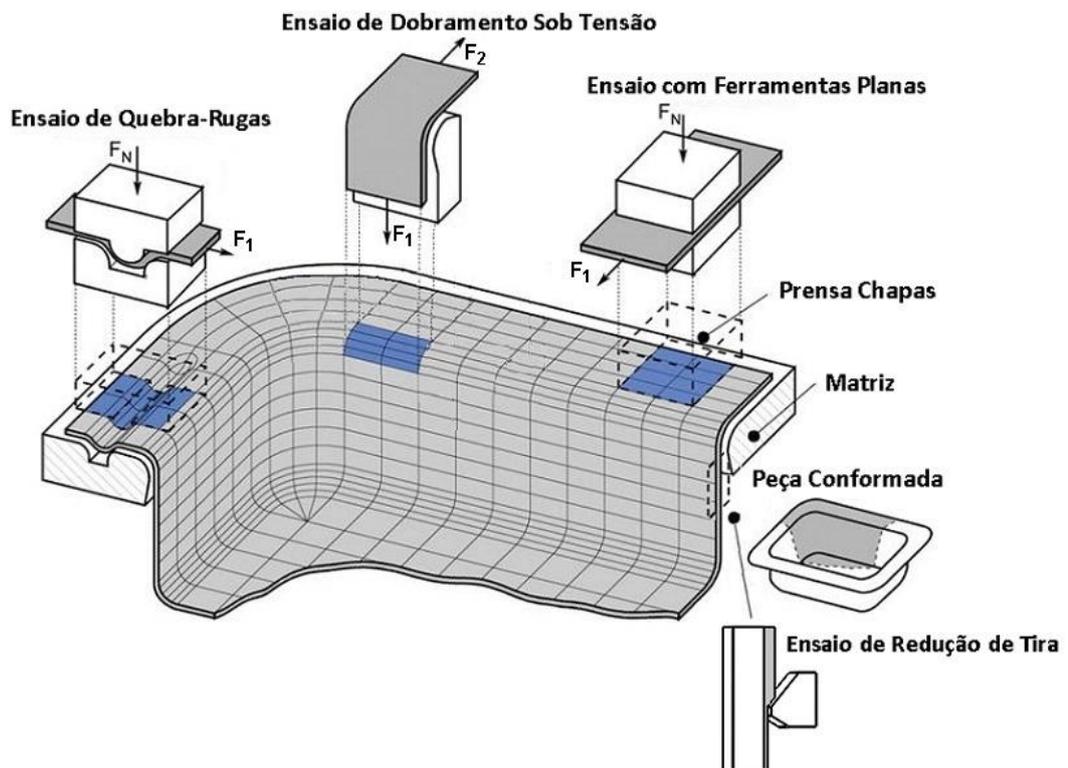
As condições tribológicas da estampagem influenciam diretamente a eficiência energética do processo e as características do componente produzido. Neste sentido, muitas vezes faz-se necessária a determinação do coeficiente de atrito na estampagem em regiões críticas do ferramental, submetidas a diferentes condições de deformação.

Os ensaios tribológicos para simulação de processos de conformação de chapas modelam condições dos processos industriais com o objetivo de avaliar situações de atrito e lubrificação de modo controlado. Várias configurações de ensaios para determinar o coeficiente de atrito na estampagem são relatadas na literatura. Os principais tipos de

deformações na estampagem são o estiramento puro e o embutimento e para cada uma deles um determinado ensaio pode ser aplicado para avaliar os efeitos do atrito.

Alguns dos ensaios aplicados com maior frequência para simular as condições tribológicas na região do prensa-chapas, do quebra-rugas, do raio da matriz e para áreas com maior redução de espessura em processos de conformação de chapas metálicas estão ilustrados na Figura 7.

Figura 7 - Principais ensaios para modelagem das condições tribológicas na conformação de chapas metálicas.



Fonte: (MANG, 2014 *apud* AUTOFORM, 2016) adaptado.

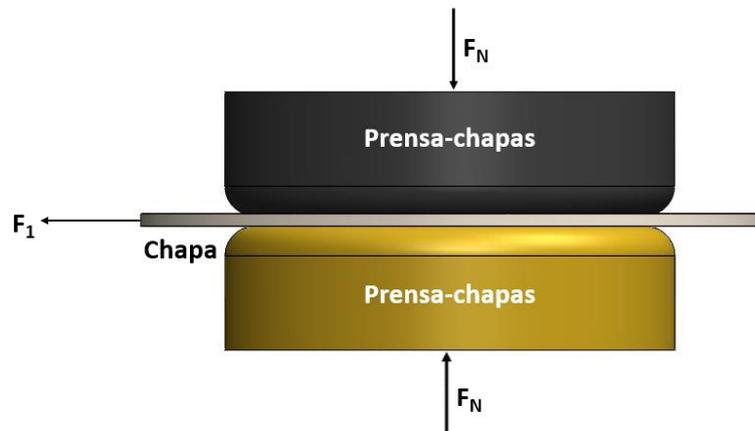
Representando as condições de deformação na região do flange está ilustrado o Ensaio de Tiras com Ferramentas Planas (*Strip Drawing with Flat Dies*). Na região do quebra-rugas, a análise tribológica pode ser realizada através do Ensaio de Quebra-rugas (*Draw Bead Test*). Para representar as condições tribológicas na região do raio, são frequentemente utilizados ensaios de DST - Dobramento Sob Tensão (*BUT - Bending Under Tension*). Por fim, para avaliar aspectos tribológicos em regiões da chapa onde ocorre redução elevada de espessura, é comumente utilizado o Ensaio de Redução de Tira (*Strip Reduction Test*). Além desses, outros ensaios como o Ensaio de Pino em Disco (*Pin-on-disk Test*) são frequentemente utilizados para avaliação de fenômenos

tribológicos em processos de conformação de chapas metálicas. Nos tópicos subsequentes, cada um dos ensaios supracitados será descrito detalhadamente.

2.3.1. Ensaio de Tiras com Ferramentas Planas

De acordo com Păunoiu et al. (2003), simular o comportamento tribológico da zona de ação do prensa-chapa é simples. Isto pode ser realizado com um ensaio onde a chapa é deslizada entre matrizes paralelas, conforme pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8 - Configuração esquemática do ensaio com ferramentas planas.



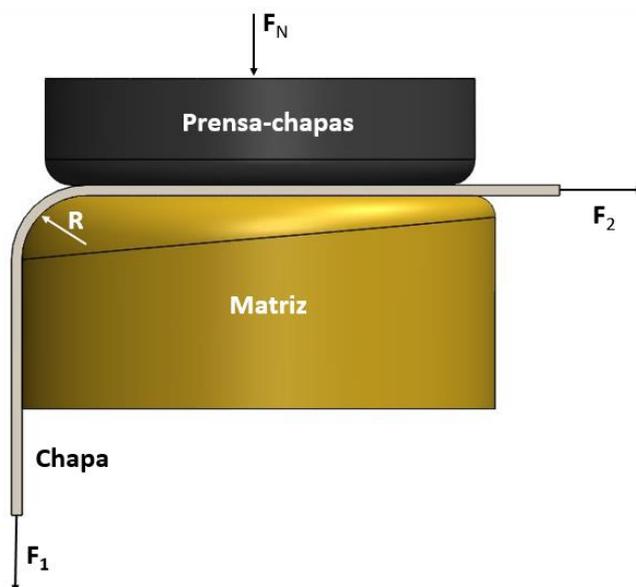
Fonte: (PĂUNOIU et al., 2003) adaptado.

O ensaio mede a força requerida para conformar uma chapa através de dois blocos de matrizes planas de dureza e rugosidade conhecidas. A relação entre a força normal de contato entre as matrizes (F_N) e a força de atuação (F_1) na chapa fornece o coeficiente de atrito conforme Equação 5 (DALTON et al., 1997; LANZON et al., 1998; PĂUNOIU et al., 2003).

$$\mu = \frac{F_1}{2F_N} \quad (5)$$

Devido ao fato desse modelo não considerar os efeitos da compressão axial e do raio da matriz, sua correlação com o processo de embutimento profundo é limitada. Essas limitações podem ser amenizadas com a utilização de um ferramental mais sofisticado, conforme pode ser visualizado na Figura 9. Neste caso, são simulados os efeitos do atrito tanto na região do flange quanto na região do raio da matriz (PĂUNOIU et al., 2003). O termo F_2 corresponde à força de contra-tensão atuante na chapa.

Figura 9 - Configuração esquemática do ensaio tribológico considerando efeitos de compressão do prensa-chapas e do raio da matriz.

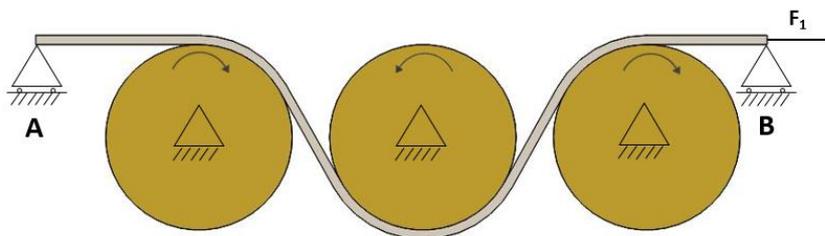


Fonte: (PĂUNOIU et al., 2003) adaptado.

2.3.2. Ensaio de Quebra-rugas

Na região do quebra-rugas ocorre simultaneamente uma condição de embutimento profundo e estiramento. Uma combinação satisfatória entre essas duas condições depende do controle do escoamento da chapa dentro da matriz: restrições excessivas levam à fratura e restrições insuficientes levam à ocorrência de enrugamento (FOLLE, 2012). Para simular as condições de atrito nessa região, pode ser realizado o ensaio de quebra-rugas (Figura 10).

Figura 10 - Configuração esquemática do ensaio de quebra-rugas.



Fonte: (PĂUNOIU et al., 2003) adaptado.

A geometria deste ensaio pode ser bastante próxima da geometria real das matrizes e o resultado ter boa correlação com valores obtidos em aplicações industriais. Neste ensaio, uma tira do material da chapa é conformada através de três raios, os quais

se assemelham a região do quebra-rugas comumente utilizado em matrizes. Como na prática essa região pode apresentar diferentes geometrias em matrizes industriais, torna-se complexa a elaboração de um equipamento de testes unificado (PĂUNOIU et al., 2003).

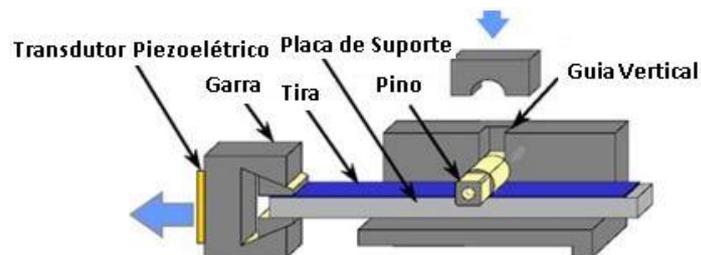
2.3.3. Ensaio de Redução de Tira

Esse ensaio é frequentemente utilizado para simular processos de *ironing*, os quais são empregados para conformação de chapas metálicas onde se busca uma elevada redução de espessura, sendo muito utilizado para produção de peças cilíndricas que possuem uma profundidade muito superior ao seu diâmetro, a exemplo das latas de refrigerante.

O Ensaio de Redução de Tira tem como objetivo avaliar a tendência de adesão de um par de materiais (chapa/ferramenta), bem como avaliar a atuação de lubrificantes. Nesse ensaio, a espessura de uma tira de chapa metálica é reduzida enquanto essa desliza sobre o material da ferramenta (ALTAN et al., 2012). A Figura 11 ilustra um dispositivo típico utilizado para realização do teste.

Visualmente se inspeciona a tira e, caso não se observem arranhões superficiais, o ensaio é reiniciado até o momento em que esses sejam percebidos. A análise é feita mensurando o trecho de tira antes do início das ranhuras, determinando-se assim o limite de deslizamento antes do início do desgaste adesivo (ANDREASEN et al., 1997).

Figura 11 - Dispositivo típico para realização do ensaio de redução de tira.



Fonte: (OLSSON et al., 2004) adaptado.

2.3.4. Ensaio de Dobramento Sob Tensão (DST)

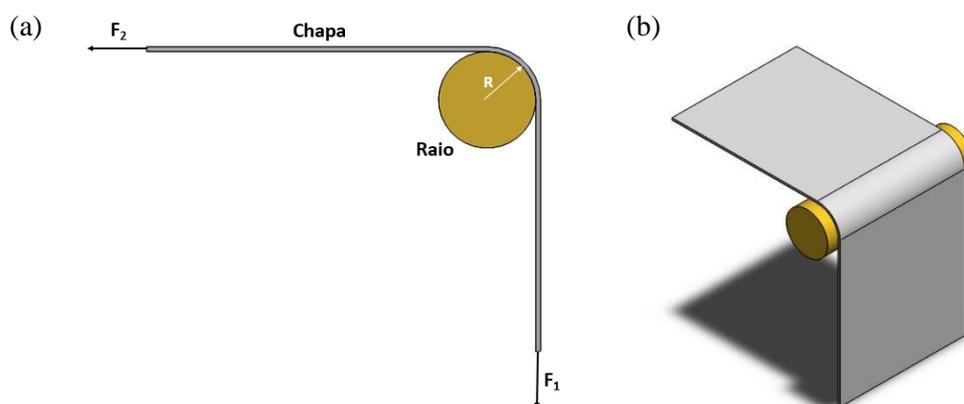
O ensaio de DST tem como objetivo simular as condições de atrito na região do raio da matriz de estampagem. O efeito de lubrificantes, a superfície de ferramentas e as

mudanças do material da chapa podem ser investigados através desse ensaio (PĂUNOIU et al., 2003).

Apesar de diferentes configurações do ensaio DST terem sido desenvolvidas ao longo do tempo, a forma tradicional de executá-lo consiste em dobrar uma tira de chapa através de um pino com raio previamente determinado, que representa o raio da matriz, e fazer a chapa deslizar sobre esse pino.

Para gerar o movimento relativo entre a amostra e o pino, uma força de atuação (F_1) é aplicada em uma das extremidades da chapa. Na outra extremidade é aplicada uma força contrária ao movimento (força de contra-tensão – F_2) com o objetivo de tensionar a chapa e permitir a variação da pressão de contato incidente sobre o pino (FOLLE, 2012). Uma representação esquemática do ensaio pode ser visualizada na Figura 12.

Figura 12 - Configuração esquemática do ensaio DST. (a) Vista Lateral; (b) Vista Isométrica.



Fonte: Autor.

Para execução do ensaio DST, é necessária a construção de um dispositivo de testes específico. Este fator limitante impulsionou alguns pesquisadores como Hao et al. (1999) e Lovell et al. (2006) a criarem variações desse ensaio, visando a adaptação do mesmo em uma máquina de ensaios universal.

No ensaio de dobramento sob tensão atuam duas forças principais: a força de atrito entre a superfície da chapa em contato com a superfície do pino e a força necessária para realizar o dobramento da chapa. Deste modo, para a obtenção da força de atrito no ensaio, este deve ser realizado em duas etapas. Na primeira etapa, a chapa é dobrada e deslizada sobre um pino fixo, estando submetida ao efeito da força de atrito somada a força de dobramento. Na segunda etapa, a chapa é dobrada sobre um pino que pode rotacionar livremente, simulando uma condição de atrito mínimo, sendo significativo

apenas o efeito do dobramento. A força de dobramento puro (F_b) pode ser obtida pela subtração das forças de atuação (F'_1) e contra-tensão (F'_2) no ensaio com o pino livre, conforme Equação 6.

$$F_b = F'_1 - F'_2 \quad (6)$$

Subsequentemente, ao se subtrair a força de dobramento puro obtida na segunda etapa da força resultante (F_R) medida na primeira etapa ($F_R = F_1 - F_2$), pode-se obter apenas a força de atrito atuante no ensaio, conforme Equação 7.

$$F_{at} = F_R - F_b \quad (7)$$

Utilizando equações para o cálculo de polias, o coeficiente de atrito (μ) pode ser expresso pela Equação 8 (PÃOUIU et al., 2003). Essa fórmula tem como base a equação de *capstan* (cabrestante/eixo rotativo) ou fórmula de Eytelwein (Equação 9), de modo que, isolando-se o coeficiente de atrito pode-se obter a Equação 8.

$$\mu = \frac{1}{\theta} \ln \frac{F_1}{F_2} \quad (8)$$

Onde:

F_1 : Força de atuação

F_2 : Força de contra-tensão

θ : Ângulo de contato entre a tira e o pino

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{\mu\theta} \quad (9)$$

A Equação 8 mostra que o atrito na interface pino/chapa é dado por um logaritmo da razão entre as forças de atuação e de contra-tensão. Adequando a fórmula para a condição padrão do ensaio (Figura 12), esta se torna:

$$\mu = \frac{2}{\pi} \ln \frac{F_1}{F_2} \quad (10)$$

O termo $\frac{2}{\pi}$ refere-se ao ângulo de 90° entre as forças de atuação e contra-tensão.

Como a força de atuação é composta pela força de atrito somada a força de dobramento (F_b), é importante descontar a atuação da força de dobramento, a qual pode ser obtida conforme explicitado previamente. Assim, a equação admite a seguinte configuração:

$$\mu = \frac{2}{\pi} \ln \frac{F_1 - F_b}{F_2} \quad (11)$$

Ressalta-se que a Equação 11 considera apenas a contribuição das forças atuantes no atrito, desconsiderando efeitos relacionados ao raio do pino e espessura da chapa. Esse aspecto levou ao surgimento de outras propostas de formas de medição do coeficiente de atrito. O trabalho de Folle et al. (2011) demonstra as principais formulações utilizadas nos trabalhos de alguns autores. Para este trabalho, por se tratar de uma análise comparativa entre os valores do coeficiente de atrito utilizando a ferramenta com superfície lisa e as ferramentas estruturadas, todas com o mesmo raio e sempre utilizando chapas de mesma espessura, o modelo para cálculo do coeficiente de atrito escolhido (Equação 11) pode ser utilizado para obtenção de resultados consistentes.

2.4. Lubrificantes na Conformação

Na conformação de metais, lubrificantes são utilizados para reduzir consideravelmente o atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho. A lubrificação leva à redução da energia dispendida no processo, aumento do limite de conformação do material, redução do número de etapas, aumento da vida útil da ferramenta, além da redução do desgaste dos elementos em contato (MOUSAVI et al., 2014).

Na indústria atual, a redução na geração de resíduos e a utilização eficiente dos recursos estão se tornando cada vez mais relevantes devido aos requisitos econômicos e ambientais. O descarte de resíduos de lubrificantes e o gasto com energia e produtos auxiliares para limpeza dos componentes produzidos são questões ambientais e econômicas que merecem destaque. Lubrificantes que contém derivados de petróleo, gorduras naturais e graxas, bem como materiais orgânicos sintéticos, se descartados em córregos e rios, diminuem a absorção de oxigênio para a água e promovem o crescimento de bactérias que consomem oxigênio, provocando assim danos aos organismos aquáticos (LAEMMLE, 1992).

A diminuição do uso de lubrificantes em processos de conformação, tais como a estampagem profunda, está em alinhamento com essas novas tendências. Uma abordagem radical, que leva a maiores ganhos, é a realização do processo de estampagem completamente livre da utilização de lubrificante. Essa é uma condição atraente, porém, difícil de ser aplicada sem a utilização de um projeto avançado de ferramental (MOUSAVI et al., 2014). Evitar a aplicação de lubrificantes requer uma redução do coeficiente de atrito e da tendência de adesão nos processos de conformação a seco. Uma abordagem é aumentar a pressão nominal da superfície através da estruturação da ferramenta (BÖRNER et al., 2015), objeto de estudo desse trabalho.

2.4.1. Lubrificantes na Conformação de Chapas de Ligas de Magnésio

De modo geral, a lubrificação é mais importante na conformação a quente de ligas de magnésio do que na conformação a frio, devido a maior probabilidade de ocorrência de *galling* com o aumento da temperatura (AVEDESIAN et al., 1999).

Os lubrificantes utilizados na conformação de ligas de magnésio incluem óleo mineral, graxa, sebo, sabão, cera, dissulfeto de molibdênio, grafite coloidal em meio volátil, grafite coloidal em sebo e folhas finas de papel ou fibra de vidro. A seleção de um lubrificante depende principalmente da temperatura do processo de conformação. Para temperaturas até 120 °C, óleo, graxa, sebo, sabão e cera são geralmente utilizados. Uma solução de sabão é aceitável para temperaturas de até 230 °C. Quando a temperatura de conformação excede 230 °C, a escolha da lubrificação é restrita a dissulfeto de molibdênio, solução coloidal de grafite e teflon (AVEDESIAN et al., 1999).

Esses lubrificantes devem ser limpos das peças de magnésio o mais rápido possível após a conformação para evitar a corrosão e para evitar dificuldades na sua remoção. Grafite coloidal é particularmente difícil de remover caso seja mantido nas peças por algum período de tempo após a conformação. Devido ao fato de alguns lubrificantes não suportarem temperaturas elevadas na conformação, folhas finas de papel ou fibra de vidro (dependendo da temperatura) são colocadas entre o material conformado e a ferramenta (AVEDESIAN et al., 1999; KAYA, 2008).

Pesquisas realizadas por Wetzel (2012) compararam diferentes lubrificantes na conformação de chapas de magnésio AZ31B. Além da baixa profundidade de embutimento proporcionada por alguns deles, um ponto de avaliação importante foi a

adesão do lubrificante ao componente estampado, mesmo após os procedimentos de limpeza terem sido executados. Se o lubrificante não pode ser removido da superfície do componente, a camada de proteção contra corrosão subsequentemente aplicada apresenta fraca adesão. Essa camada de revestimento é importante para as ligas de magnésio, visto que elas apresentam susceptibilidade à corrosão e a sua fraca aderência ao substrato compromete a utilização final do componente, afetando a cadeia de processo. Nesse sentido, a capacidade de remoção do lubrificante utilizado no processo é um critério extremamente relevante.

O aumento constante sobre os requisitos dos produtos conformados, especialmente com relação à qualidade superficial e a resistência à corrosão, exige novas soluções de lubrificantes, que sejam termicamente estáveis, não prejudiciais à saúde e, ao mesmo tempo, completamente removíveis da superfície da chapa. Como ainda não existem soluções que atendam a todas essas necessidades, alternativas consistem em revestimentos termoquimicamente estáveis e com capacidade de redução do atrito para ferramentas, os quais podem permitir a conformação de chapas de ligas de magnésio sem lubrificação mesmo para componentes com geometria complexa (FRIEDRICH et al., 2006). A utilização de ferramentas com estruturas superficiais é também uma abordagem promissora para realização da conformação livre de lubrificação (BÖRNER et al., 2015) e é objeto de estudo desse trabalho. Esse conceito pode ser aplicado à conformação de chapas de ligas de magnésio com o intuito de reduzir ou mesmo eliminar a utilização de lubrificantes no processo.

2.5. Ferramentas com Estrutura Superficial

De acordo com Evans et al. (1999), "*structured surfaces*" ou "superfícies estruturadas" são superfícies com um padrão determinístico de características geométricas, projetadas para fornecer uma função específica. O termo textura superficial ou superfícies texturizadas também são utilizados com frequência nas publicações sobre o tema.

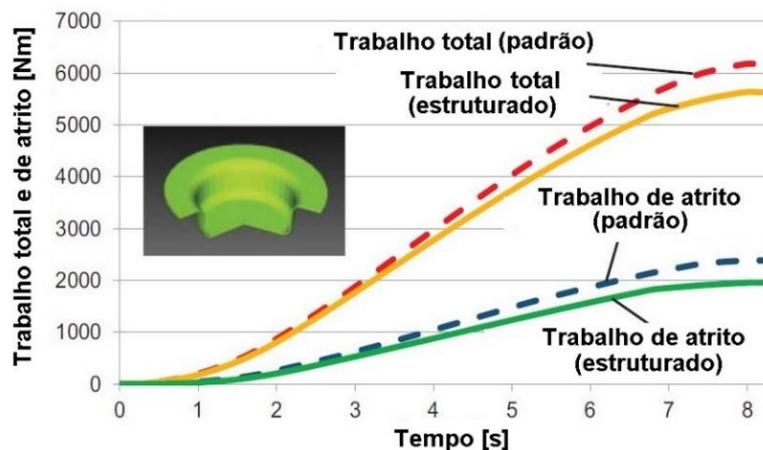
A estruturação de superfícies de ferramentas nas zonas de contato entre a peça de trabalho e a matriz representa uma abordagem promissora para controlar o fluxo de material nos processos de conformação. Para que este fluxo de material seja suficiente e otimizado, especialmente para geometrias de peças não simétricas ou não uniformes, uma distribuição adaptada localmente de estruturas superficiais é uma solução viável. A

adequação da distribuição da estrutura superficial ao fluxo de material desejado requer um conhecimento detalhado sobre a correlação do fluxo de material com as condições tribológicas entre a chapa e a ferramenta de conformação (KRUX et al., 2005).

De acordo com Karbasian et al., (2010), superfícies com estrutura superficial reduzem a área efetiva de contato. Áreas de contato menores no processo de conformação diminuem a força de atrito, mas aumentam a pressão de contato. Para reduzir as áreas de contato entre as ferramentas e a peça de trabalho, a utilização de estruturas macro e microscópica nas ferramentas é requerida. Utilizando esse conceito, é possível reduzir a área de contato em até 80% comparando com ferramentas convencionais (MOUSAVI et al., 2014).

Conforme esperado, a conformação com ferramentas estruturadas necessita de menos energia quando comparada a utilização de ferramentas convencionais, devido à minimização das forças de atrito na região com estrutura superficial (MOUSAVI et al., 2014). Esse efeito pode ser observado na Figura 13, que trata do resultado de simulações numéricas do trabalho desenvolvido por Mousavi et al. (2014), o qual compara o trabalho envolvido na conformação de chapas de aço com ferramentas padrão e com ferramentas com estrutura superficial.

Figura 13 - Comparação da conformação com ferramentas padrão e estruturada em termos do trabalho total e do trabalho relacionado ao atrito.



Fonte: (MOUSAVI et al., 2014) adaptado.

A Figura 13 revela que a minimização da área de contato em uma ferramenta de estampagem profunda através da estruturação superficial reduz as tensões de cisalhamento causadas pelas forças de atrito. Tal efeito leva a uma menor força do punção

e também a uma menor energia de conformação requerida. Pode-se observar que o valor máximo alcançado pelo trabalho total com a ferramenta padrão corresponde à aproximadamente 6200 J, enquanto que para a ferramenta estruturada esse valor é próximo de 5700 J, o que representa um decréscimo de aproximadamente 8,1% no trabalho máximo total envolvido no processo.

Alguns autores utilizam os termos “micro-estrutura” ou “macro-estrutura” a depender das dimensões da estrutura superficial produzida. Não foi encontrada na literatura uma faixa bem definida de transição entre as dimensões micro e macro. No entanto, a maioria das estruturas superficiais produzidas com dimensões de até 1000 μm ou 1 mm eram denominadas de micro-estruturas. Estruturas com dimensões superiores a essas geralmente eram denominadas de macro-estruturas. Essa definição será considerada neste trabalho.

Pesquisas mostram que as estruturas superficiais geralmente consistem em cavidades produzidas nas superfícies das ferramentas de conformação por processos de usinagem como fresamento (BÖRNER et al., 2015), processo de corte de alta velocidade (KRUX et al., 2005), dentre outros. Foram detectados também outros métodos de estruturação de superfícies, como, por exemplo, a estruturação com camadas de silicone nas superfícies, como no trabalho desenvolvido por Pettersson et al. (2003).

Börner et al. (2015), escolheram calotas como elementos de forma devido ao seu comportamento não-direcional. Para evitar uma transição aguda das calotas para a superfície de contato em termos de uma aresta, utilizou-se um raio de entrada.

As estruturas superficiais possuem funções tribológicas extremamente relevantes para os processos de conformação. Uma das funções das cavidades é aprisionar partículas geradas do desgaste. Segundo Suh et al. (1994), a eliminação dos detritos de desgaste na interface reduz o riscamento e a componente de deformação do atrito. As estruturas também podem ser estrategicamente projetadas para reduzir a área efetiva de contato, visando minimizar a adesão e, conseqüentemente, os níveis de atrito no sistema (KIM et al., 2002). Outro efeito importante das cavidades superficiais é atuar como reservatórios de lubrificantes, capazes de alimentar o lubrificante diretamente entre as duas superfícies de contato (TIAN et al., 1989 *apud* PETTERSSON et al., 2003). A durabilidade do lubrificante pode então ser prolongada, conseqüentemente, reduzindo o atrito e aumentando a vida útil do contato (PETTERSSON et al., 2003). De acordo com

Mousavi et al. (2014), o tamanho e a geometria das estruturas superficiais podem afetar o coeficiente de atrito.

Pesquisas realizadas por Wakuda et al. (2003) mostraram o efeito da estrutura superficial na redução de atrito no contato lubrificado entre cerâmica e aço. Nesse estudo, cavidades com diâmetro de 40 a 120 μm foram denominadas de micro-cavidades. Em comparação com uma superfície lisa sem microestrutura, algumas amostras obtiveram reduções no coeficiente de atrito de 0,12 para 0,10 (em torno de 20%). Verificou-se que as características tribológicas dependiam fortemente do tamanho e da densidade das micro-cavidades, enquanto que a forma destas não afetava significativamente o coeficiente de atrito, independentemente dos perfis arredondados ou angulares.

Ferramentas com estrutura superficial podem ser aplicadas aos processos de conformação com outra finalidade, além da redução de atrito. Nos processos de estampagem a quente direta, a taxa de transferência de calor na têmpera é um dos parâmetros afetados pelas condições de contato entre peça e ferramental. Segundo Karbasian et al. (2010), ferramentas com estrutura superficial podem ser utilizadas para redução da transferência de calor em regiões específicas da peça, devido à redução da área efetiva de contato, podendo fazer com que a taxa de resfriamento atinja nesses pontos, a valores inferiores à taxa de resfriamento crítica para a transformação martensítica, produzindo um componente com propriedades combinadas (*tailored properties*).

2.6. Ligas de Magnésio

Desde a guerra de 1939-1945, quando houve um aumento no uso de magnésio em aplicações estruturais (228.000 toneladas por ano em 1944), principalmente para produção de aviões, foram necessários mais 40 anos para atingir o mesmo nível de produção em 1992. Desde 1993 houve um renovado interesse no uso de ligas à base de magnésio em automóveis e outras aplicações domésticas e esportivas. O principal objetivo é a economia de peso (FRIEDRICH et al., 2006).

Atualmente, devido à existência de regulamentações que obrigam a redução das emissões de gases de efeito estufa, associada à necessidade de melhorar a eficiência energética no setor de transporte, todos os fabricantes de automóveis, fornecedores, montadores e produtores de componentes automotivos estão investindo

significativamente em pesquisa, desenvolvimento e comercialização de materiais leves (GHASSEMIEH, 2011). Neste contexto, as ligas de magnésio são de especial interesse devido à sua baixa densidade de 1,74 g/cm³ (DOEGE et al., 2001) e o interesse por estes materiais parece aumentar continuamente (FRIEDRICH et al., 2006). Por outro lado, desafios relacionados à obtenção de resistência à corrosão e reciclabilidade, bem como à consolidação das tecnologias de conformação apropriadas ainda fazem-se presentes (SCHIECK et al., 2013).

O magnésio é o oitavo elemento mais comum na crosta terrestre (LICHT et al., 2005), sendo produzido através da redução metalotérmica de óxido de magnésio com silício ou por meio da eletrólise de cloreto de magnésio da água do mar (KULEKCI, 2008). Cada metro cúbico de água do mar contém aproximadamente 1,3 kg de magnésio (DAVIES, 2003).

2.6.1. Classificação das Ligas de Magnésio

As ligas de magnésio são tradicionalmente classificadas primeiramente de acordo com o método de produção utilizado (fundição em areia, fundição molde permanente, fundição sob pressão, forjamento, extrusão, laminação e posteriormente em termos de composição e aplicação). O número limitado de elementos de liga adicionados resultou na maioria das ligas produzidas, as quais geralmente são constituídas pelos elementos: alumínio, manganês, terras raras (ou similares), zinco e, para ligas livres de alumínio e manganês, o zircônio. A convenção para representar os principais elementos em uma liga está representando na Tabela 1 (FRIEDRICH et al., 2006).

Tabela 1 - Convenção para designação dos elementos de liga.

Sigla	Elemento de Liga	Sigla	Elemento de Liga
A	Alumínio	M	Manganês
C	Cobre	Q	Prata
E	Metais Terras Raras	S	Silício
H	Tório	T	Estanho
K	Zircônio	Y	Ítrio
L	Lítio	Z	Zinco

Fonte: (FRIEDRICH et al., 2006) adaptado.

Na nomenclatura das ligas de magnésio, as duas primeiras letras se referem aos elementos de liga principais e os números posteriores referem-se aos teores nominais de cada um dos elementos de liga. A letra seguinte distingue a posição do registro das ligas com igual composição na norma ASTM (A significa: primeira liga registrada, B: segunda

liga registrada; C: terceira liga registrada; D: liga de alta pureza; E: liga de alta resistência à corrosão; X1: liga não registrada) (CATORCENO, 2013). Seguindo essa convenção, AZ31B significa que a liga possui aproximadamente 3% de Al e 1% de Zn e foi a segunda liga registrada. Caso a liga tenha sido submetida a tratamentos térmicos ou termomecânicos, estes são indicados por letras e números que aparecem após hífen, posicionados ao final do nome da liga.

2.6.2. Propriedades das Ligas de Magnésio

O magnésio é o mais leve de todos os metais de engenharia, com uma densidade de 1,74 g/cm³, sendo 35% mais leve que o alumínio (2,70 g/cm³) e mais de quatro vezes mais leve do que o aço (7,86 g/cm³) (DAVIES, 2003). A Tabela 2 ilustra as propriedades físicas do magnésio e mostra uma comparação com as propriedades do alumínio e do ferro. A resistência à tração para a liga AZ31B é comparável (apesar de um pouco inferior) à da liga de alumínio A380. Porém, a baixa densidade do magnésio é sua principal vantagem, proporcionando uma elevada razão resistência mecânica e peso, superando a dos outros dois materiais.

Tabela 2 - Propriedades físicas do Mg, Al e Fe.

Propriedade	Magnésio	Alumínio	Ferro
Estrutura Cristalina	HC	CFC	CCC
Densidade a 20°C (g/cm ³)	1,74	2,70	7,86
Resistência à Tração (MPa)	255 (para AZ31)	320 (para A380)	350
Ponto de Fusão (°C)	650	660	1536

Fonte: (DAVIES, 2003) adaptado.

Durante os últimos anos, a lista de ligas de magnésio trabalhadas para chapa foi continuamente reduzida para a liga AZ31 apenas. As propriedades mecânicas da liga de magnésio AZ31 comercial em formato de chapa geralmente atendem aos limites impostos pela ASTM e estão descritos na Tabela 3.

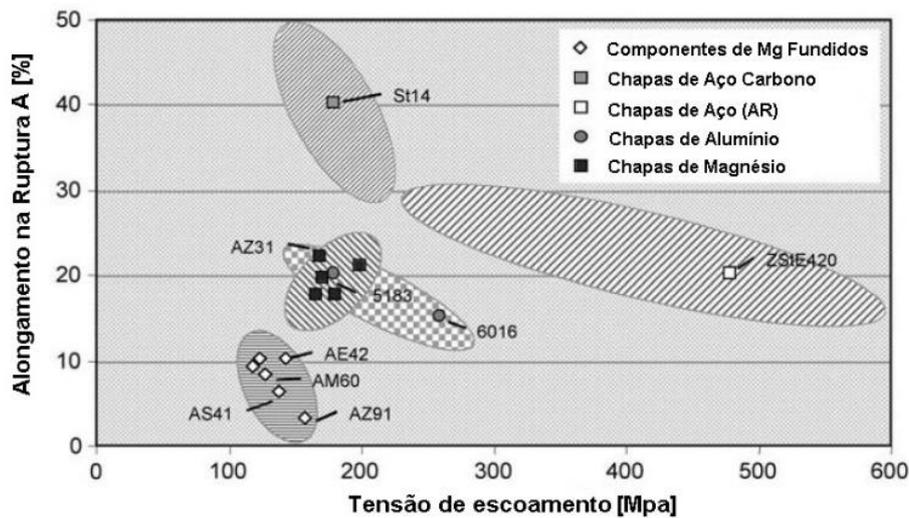
Tabela 3 - Propriedades mecânicas da chapa comercial de Mg AZ31B à temperatura ambiente.

Propriedade	Símbolo	Unidade	Faixa	Valor Médio
Resistência à Tração	Rm	MPa	220 – 290	255
Tensão de Escoamento	Rp _{0,2}	MPa	125 – 220	172,5
Alongamento na Ruptura	ABr	%	8 – 21	14,5
Resistência Específica	Rm/ρ	kN.m/kg	126,4 – 166,7	146,6

Fonte: (FRIEDRICH et al., 2006) adaptado.

Essas propriedades são competitivas com as propriedades das chapas de alumínio convencionais utilizadas para aplicações nas carrocerias dos veículos, conforme ilustrado na Figura 14 (FRIEDRICH et al., 2006).

Figura 14 - Propriedades mecânicas de diferentes materiais para construção de carrocerias automotivas.



Fonte: (FRIEDRICH et al., 2006) adaptado.

A liga de magnésio AZ31B é considerada de média resistência mecânica e elevado alongamento, após deformação plástica. Apresenta dureza Vickers que gira em torno de 53 HV0,1 (COELHO et al., 2008). De acordo com Housh et al. (1990) a liga AZ31B é a mais utilizada usada para chapas e placas. A reduzida capacidade de conformação à temperatura ambiente é uma das limitações desse material (SCHIECK et al., 2013).

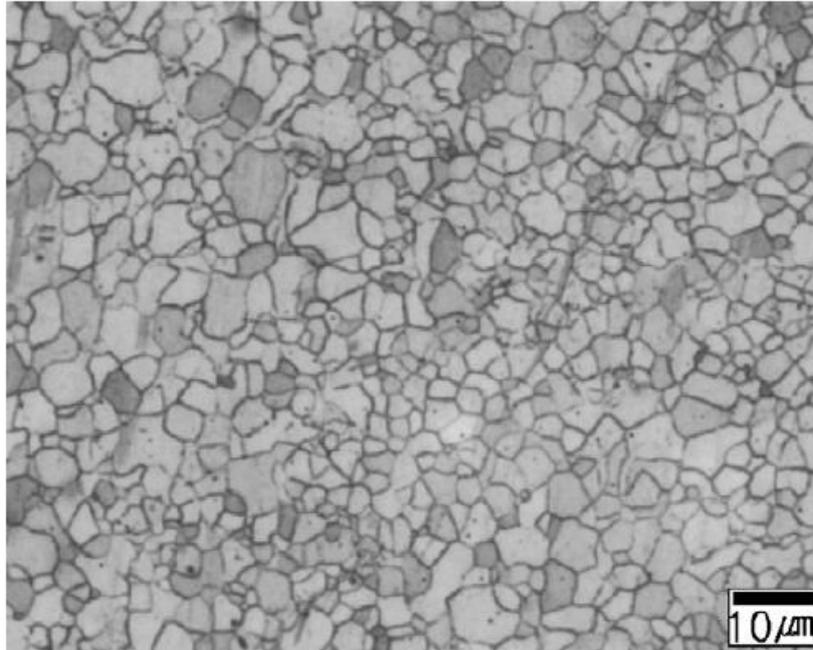
2.6.2.1. Microscopia e Cristalografia

A microestrutura de uma chapa de liga de magnésio AZ31 com 0,8 mm de espessura, produzida por extrusão e posteriormente laminada a quente está indicada na Figura 15. A microestrutura é composta de grãos finos e equiaxiais (KIM et al., 2008).

O magnésio apresenta estrutura cristalina hexagonal compacta. Esse tipo de estrutura apresenta quatro sistemas independentes de deslizamento constituídos pelos planos basais e prismáticos. Os sistemas de deslizamento dos planos piramidais não são considerados independentes, porque cristalograficamente equivalem a deslizamentos com desvio gerados pela combinação de um plano basal com um prismático. O baixo

número de sistemas independentes de deslizamento limita fortemente a deformação plástica da estrutura hexagonal compacta, em especial na deformação a frio (ZARANDI et al., 2007 *apud* CATORCENO, 2013).

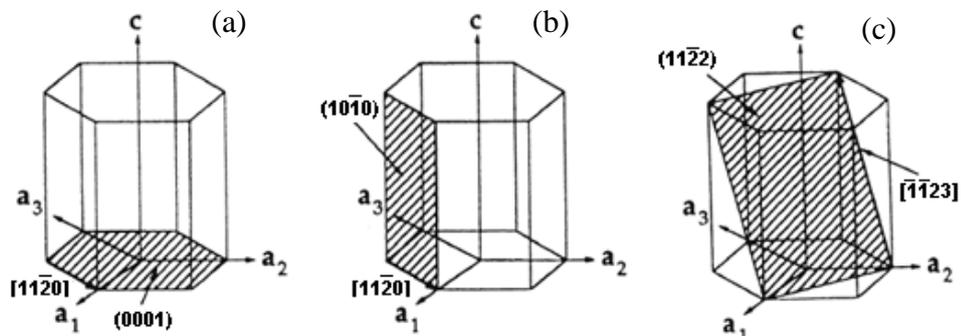
Figura 15 - Microscopia óptica ilustrando a microestrutura de chapa de magnésio AZ31B laminada a quente (como recebida).



Fonte: (KIM et al., 2008) adaptado.

A Figura 16 ilustra os principais planos e direções cristalográficas na estrutura cristalina do magnésio.

Figura 16 - Célula unitária HC e principais planos e direções para o Mg sendo: (a) Basal; (b) Prismático; (c) Piramidal.



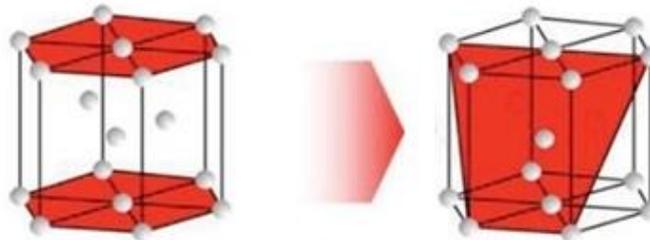
Fonte: (FRIEDRICH et al., 2006) adaptado.

2.6.2.2. Conformabilidade do Magnésio AZ31B

Devido a sua estrutura cristalina hexagonal compacta, a conformação de chapas de magnésio à temperatura ambiente não é viável para produção de componentes com geometrias complexas para aplicação em automóveis (SCHIECK et al., 2013).

De acordo com o critério de escoamento de von Mises, pelo menos cinco planos de deslizamento independentes precisam ser ativados para garantir uma conformação plástica sem qualquer dano ao material (por exemplo, iniciação de trincas nos contornos de grão). No entanto, o nível basal possui apenas três planos de deslizamento independentes. Por esse motivo, as ligas de magnésio raramente podem ser conformadas utilizando-se tecnologias convencionais de conformação a frio, tais como a estampagem profunda e o dobramento. Uma carga de tração leva rapidamente a uma fratura frágil. Devido ao fenômeno de que as tensões de cisalhamento críticas dos planos piramidais e prismáticos reduzem com o aumento da temperatura, a conformabilidade das ligas de magnésio pode ser aumentada pela ativação de planos de deslizamento adicionais em temperaturas superiores a 225°C, Figura 17 (RICHTER et al., 2015).

Figura 17 - Ativação de planos de deslizamento adicionais em temperaturas elevadas.

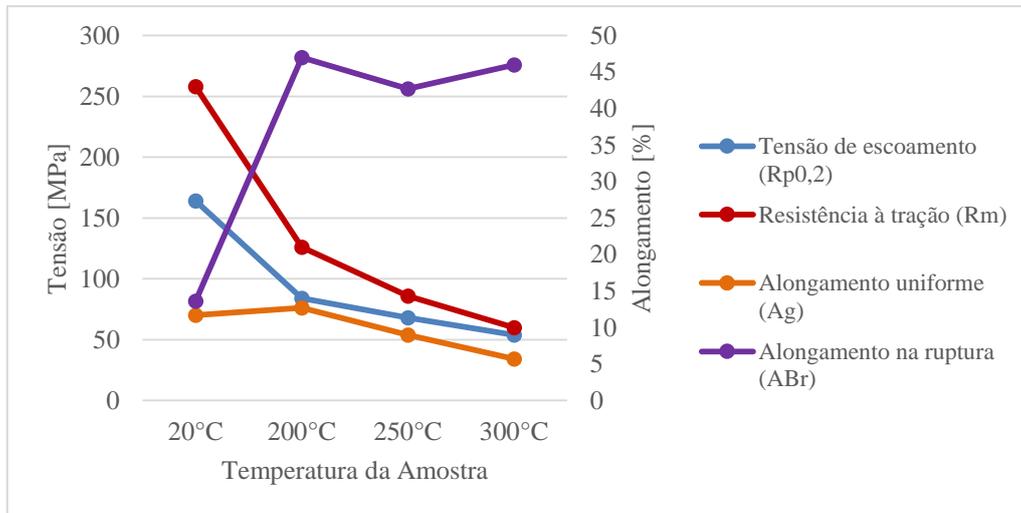


Fonte: (SCHIECK et al., 2013) adaptado.

Ao se introduzir a temperatura como um parâmetro adicional do processo, os limites de conformação das chapas de magnésio podem ser aumentados em torno de 250 a 400%, quando comparados à condição a temperatura ambiente (SCHIECK et al., 2013). Uma comparação das propriedades mecânicas observadas a diferentes temperaturas, incluindo a temperatura ambiente, é ilustrada adicionalmente na Figura 18.

Devido à dependência das propriedades das ligas de magnésio em função da temperatura, torna-se relevante verificar a textura cristalográfica do material, conforme será discutido no tópico 2.7.

Figura 18 - Dependência das propriedades mecânicas em relação à temperatura para a liga Mg AZ31B (espessura = 1,98 mm).



Fonte: (RICHTER et al., 2015) adaptado.

2.6.2.3. Qualidade Superficial

Segundo Friedrich et al. (2006), a qualidade superficial de chapas de magnésio comerciais e de laboratório tem sido analisada por diferentes autores através da medição de rugosidade e do número de picos. A topografia das chapas, por vezes, muda significativamente com a orientação para a direção de laminação. Para diferentes materiais da chapa que proporcionam uma superfície limpa e lisa, são medidos valores Ra entre 0,3 e 1,0 μm . Testes indicaram que a rugosidade média (Ra) é inferior quando comparada aos valores para chapa de aço comercial St14 e para chapa de alumínio AlMg₅Mn, porém, uma dispersão ligeiramente maior dos dados foi observada para o magnésio. A otimização dos processos de laminação, incluindo um passe final com rolos especialmente texturizados, pode levar a melhorias adicionais na qualidade da superfície final (FRIEDRICH et al., 2006).

2.6.3. Aplicações e Comparação com Outros Materiais

No setor automotivo, a utilização de chapas de magnésio oferece novas oportunidades para construções ultraleves, principalmente na carroceria, mas também nos componentes do chassi, interior e motor. O potencial de utilização das chapas de magnésio para produção de componentes submetidos à carregamentos dinâmicos já foi comprovado com sucesso (FRIEDRICH et al., 2006).

Muitas grandes empresas automotivas já substituíram aço e alumínio por magnésio em várias peças de seus produtos. Audi, DaimlerChrysler (Mercedes-Benz), Ford, Jaguar, Fiat e Kia Motors Corporation são apenas algumas dessas empresas. O magnésio está sendo usado atualmente nas caixas de engrenagens, nas colunas de direção e nas carcaças do *airbag*, assim como nos volantes, na moldura do assento e nas tampas do reservatório de combustível (ASIAN-METAL, 2014). A Figura 19 ilustra alguns exemplos e perspectivas de aplicações de chapas de magnésio: (a) protótipo da viga do para-choque (Benteler Automotive); (b) elementos de suporte (Stolfig); (c) componente do assento (IFUM); (d) painel interno da porta (Volkswagen); (e) capô híbrido (Al/Mg) (Volkswagen); (f) protótipo do veículo Opel G90 com teto de chapa de magnésio (FRIEDRICH et al., 2006).

Figura 19 - Aplicações das chapas de liga de magnésio na indústria automotiva.



Fonte: (FRIEDRICH et al., 2006) adaptado.

Além do uso na indústria automotiva, as ligas de magnésio têm grande aplicação no setor aeroespacial, no setor médico (como um biomaterial para próteses), no segmento de esportes (quadros de bicicletas e chassis de skates). Devido à sua capacidade de blindagem da interferência eletromagnética, as ligas de magnésio estão disponíveis para produzir peças estruturais para componentes eletrônicos, como revestimentos de telefones celulares, computadores portáteis e minidiscos portáteis (ASIAN-METAL, 2014; ZHANG et al., 2007).

Conforme supracitado, dentre as diversas possibilidades de aplicação de chapas de magnésio AZ31B nas carrocerias e componentes estampados nos automóveis, a produção dos painéis das portas é uma potencial aplicação. Pesquisas realizadas por Schieck et al. (2013) e Silva et al. (2015) demonstram investigações nesse sentido.

De acordo com Geck et al. (2005) e Qamar (2003) aços como o IF-REPHOS (*Interstitial-Free* com adição de fósforo), BH210 (*Bake Hardening*), BH250 e o DP500 (*Dual-Phase*) podem ser utilizados para fabricação dos painéis de portas automotivas. A Tabela 4 exibe as principais propriedades mecânicas desses aços.

Tabela 4 - Propriedades dos aços aplicados na fabricação de painéis de portas automotivas.

Material	Rp_{0,2} (MPa)	Rm (MPa)	ABr (%)	ρ (g/cm³)	Rm/ρ
BH210	210	320	37	7,87	40,7
IF-REPHOS	216,9	344,7	41,59	7,87	43,8
BH260	280	400	30	7,87	50,8
DP500	355	583	28	7,87	74,1

Fonte: (ARCELORMITTAL, 2017; AUTOSTEEL, 2009; MATWEB, 2006).

Uma comparação entre os aços da Tabela 4 e a liga de magnésio AZ31B (Tabela 3) indica que as propriedades mecânicas (tensão de escoamento e limite de resistência à tração) do AZ31B são inferiores à dos aços mencionados. No entanto, um cálculo da resistência específica desses materiais indica que a liga de magnésio apresenta um valor significativamente superior para esse parâmetro, apresentando a melhor relação resistência/peso. Deste modo, para uma determinada aplicação, apesar do componente fabricado em AZ31B necessitar de uma espessura superior para proporcionar uma resistência mecânica equivalente à de um componente fabricado em BH210, por exemplo, o componente fabricado com a liga de magnésio ainda apresentará um peso inferior em relação ao componente produzido em aço, em virtude da sua baixa densidade. Tal aspecto

reforça o fato de grandes empresas automotivas já estarem substituindo o aço e alumínio por magnésio em várias peças de seus produtos (FRIEDRICH et al., 2006).

2.7. Textura Cristalográfica

Devido ao processamento dos materiais, como a conformação ou tratamento térmico, a maioria dos materiais metálicos apresenta uma distribuição de orientação cristalográfica onde certas orientações são preferenciais. Essa distribuição de orientação é conhecida com textura cristalográfica (GOTTSTEIN, 2004).

A textura cristalográfica também descreve o comportamento anisotrópico das propriedades (i.e., de Módulo de Young, condutividade elétrica, expansão térmica, anisotropia plástica, comportamento magnético, etc.). Desse modo, o conhecimento da textura cristalográfica é fundamental para o entendimento de propriedades dos materiais cristalinos para aplicações técnicas (BROKMEIER et al., 2008).

2.7.1. Análise de Textura Cristalográfica por Difração de Raios X: Técnica, Lei de Bragg e Análise dos Resultados

A difração de raios-X é o método laboratorial mais comumente utilizado para análise de textura cristalográfica. O método se baseia na existência de uma rede cristalina ou na periodicidade do arranjo atômico no interior dos materiais. Outras informações estruturais como parâmetro de rede e fases existentes no material que está sendo investigado podem ser obtidas por esse método (FOOK et al., 2015). De acordo com Fook et al.:

Quando um feixe de raios-X monocromático incide sobre um material cristalino ocorre o fenômeno da difração. Imaginando-se inicialmente que a incidência ocorra em um único átomo isolado, os elétrons desse átomo ficarão excitados e vibrarão com a mesma frequência do feixe incidente. Esses elétrons, vibrando, emitirão raios-X em todas as direções com a mesma frequência do feixe incidente. O átomo pode ser visto como uma fonte de emissão esférica de radiação (princípio de Huygens) (FOOK et al., 2015).

Nestas condições, poderá haver interferências construtivas ou destrutivas entre as ondas eletromagnéticas se elas estiverem em fase ou defasadas entre si,

respectivamente. O comprimento de onda da radiação incidente deve ser da mesma ordem de grandeza do tamanho da partícula a ser analisada (FOOK et al., 2015).

A fundamentação teórica para investigação de cristais por raios-X é a Lei de Bragg. Esta descreve a difração de ondas pela rede cristalina e é dada pela Equação 12 (GOTTSTEIN, 2004):

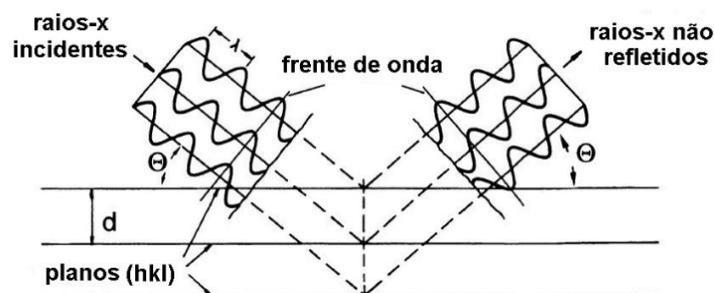
$$N\lambda = 2d\text{sen}(\theta) \quad (12)$$

Sendo:

- λ Comprimento de onda dos raios-X em angstrom (\AA)
- d Espaçamento dos planos refletidos (distância interplanar)
- θ Ângulo de incidência ou reflexão do feixe incidente
- N Ordem da difração (1, 2, 3,...)

Correspondentemente, se um raio-X de comprimento de onda λ incide sobre um conjunto de planos da rede com espaçamento entre os planos d e ângulo de incidência (θ), a radiação será refletida. Se houver alguma diferença de fase entre os raios difratados a partir dos planos paralelos (Figura 20), a intensidade difratada irá desaparecer devido aos inúmeros planos da rede que contribuem para a difração (GOTTSTEIN, 2004).

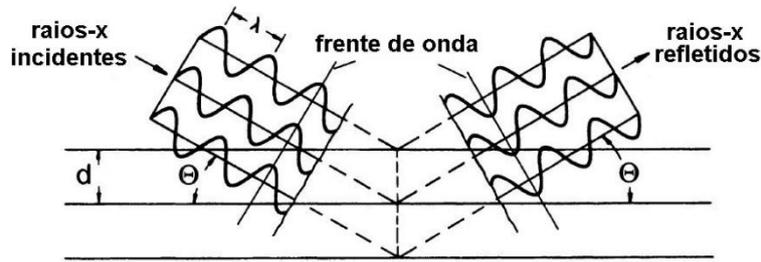
Figura 20 - Difração de raios-X pela rede de um cristal. Raios difratados pelos planos paralelos não estão em fase.



Fonte: (GOTTSTEIN, 2004) adaptado.

Apenas se a radiação difratada dos planos paralelos estiver em fase, a intensidade refletida será diferente de zero (Figura 21).

Figura 21 - Comprimento de fase igual em cada plano perpendicular à direção de propagação - não irão se anular e a reflexão irá ocorrer.



Fonte: (GOTTSTEIN, 2004) adaptado.

Duas ondas que são difratadas através de planos paralelos vizinhos podem apenas estar em fase se a diferença do comprimento do percurso for um múltiplo inteiro do comprimento de onda. Este será o caso apenas se a Lei de Bragg for obedecida (GOTTSTEIN, 2004).

O espaçamento dos planos da rede d depende da estrutura do cristal e dos índices de Miller $\{hkl\}$ dos planos cristalográficos. Para uma estrutura hexagonal, d pode ser obtido pela Equação 13 (GOTTSTEIN, 2004):

$$d = \frac{a}{\sqrt{\frac{4}{3}(h^2 + k^2 + h \cdot k) + \left(\frac{c}{a}\right)^2}} \quad (13)$$

Onde a e c são os parâmetros de rede.

A equação de Bragg tem uma solução real apenas para:

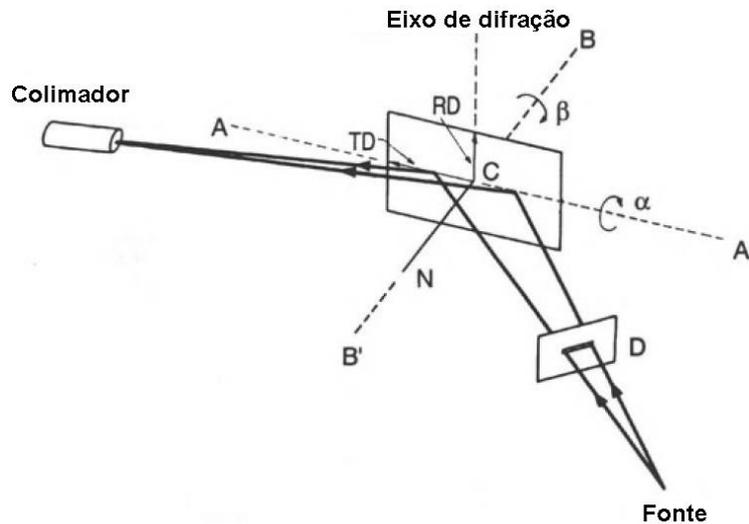
$$\frac{n\lambda}{2d} \leq 1 \quad (14)$$

Pois $\sin(x) \leq 1$. Visto que o espaçamento dos planos da rede (de acordo com as equações acima) é menor que o parâmetro da rede, a estrutura do cristal pode difratar radiação apenas se o comprimento de onda for de igual magnitude ou menor que o parâmetro da rede. O comprimento de onda de raios-X de tubos de raios-X convencional é da ordem de aproximadamente 0,1 nm (GOTTSTEIN, 2004).

Para determinação quantitativa da textura cristalográfica, geralmente utiliza-se um goniômetro de raios-X (Figura 22). Neste dispositivo, raios-X monocromáticos são

utilizados e uma fonte de raios-X e o colimador são posicionadas em uma geometria fixa, dependendo apenas do ângulo de Bragg do plano cristalográfico investigado (GOTTSTEIN, 2004).

Figura 22 - Caminho do raio e rotação da amostra em um goniômetro de textura de raio-X.

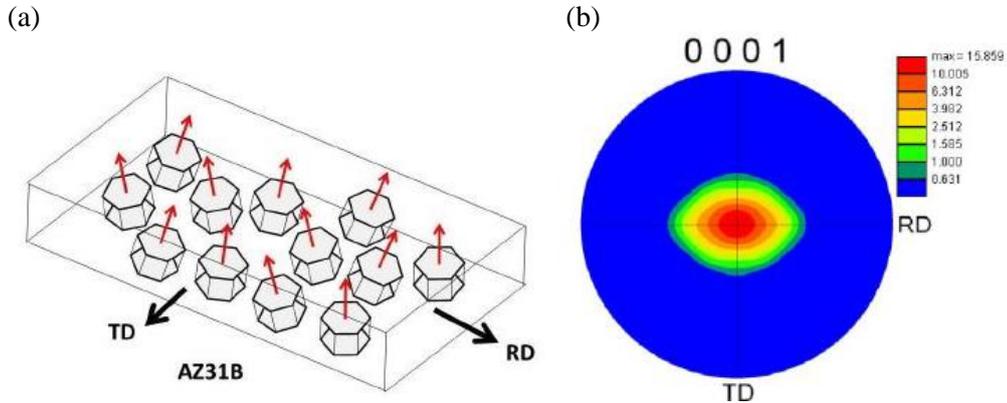


Fonte: (GOTTSTEIN, 2004) adaptado.

A amostra é posicionada em um porta-amostras que pode ser rotacionado ao redor de dois eixos mutuamente perpendiculares para orientar a amostra em praticamente qualquer posição em relação ao feixe de raio-X incidente. Por causa da geometria fixa da fonte e do colimador, a difração ocorre apenas se uma particular família de planos cristalográficos $\{hkl\}$ obedecer à Lei de Bragg. O movimento da amostra revela a orientação espacial dos respectivos polos $\{hkl\}$. Na projeção esferográfica, a distribuição de intensidade medida gera a figura polo $\{hkl\}$ (GOTTSTEIN, 2004).

Considerando a análise de uma chapa de liga de magnésio AZ31B laminada a quente, as orientações da chapa laminada são de grande importância, mais precisamente a direção de laminação (RD) e a direção transversal (TD). Para o AZ31B, o eixo-c dos cristais, indicados pela seta em vermelho na Figura 23(a), estão orientados na direção perpendicular à superfície da chapa, com ligeira inclinação em relação à direção de laminação. Esse aspecto é comprovado com a figura de polo para o AZ31B, indicada na Figura 23(b), que mostra uma forte intensidade de textura cristalográfica basal (BOBA, 2014).

Figura 23 - (a) Representação da textura cristalográfica do AZ31B; (b) Figura de polo do AZ31B como recebido.



Fonte: (BOBA, 2014) adaptado.

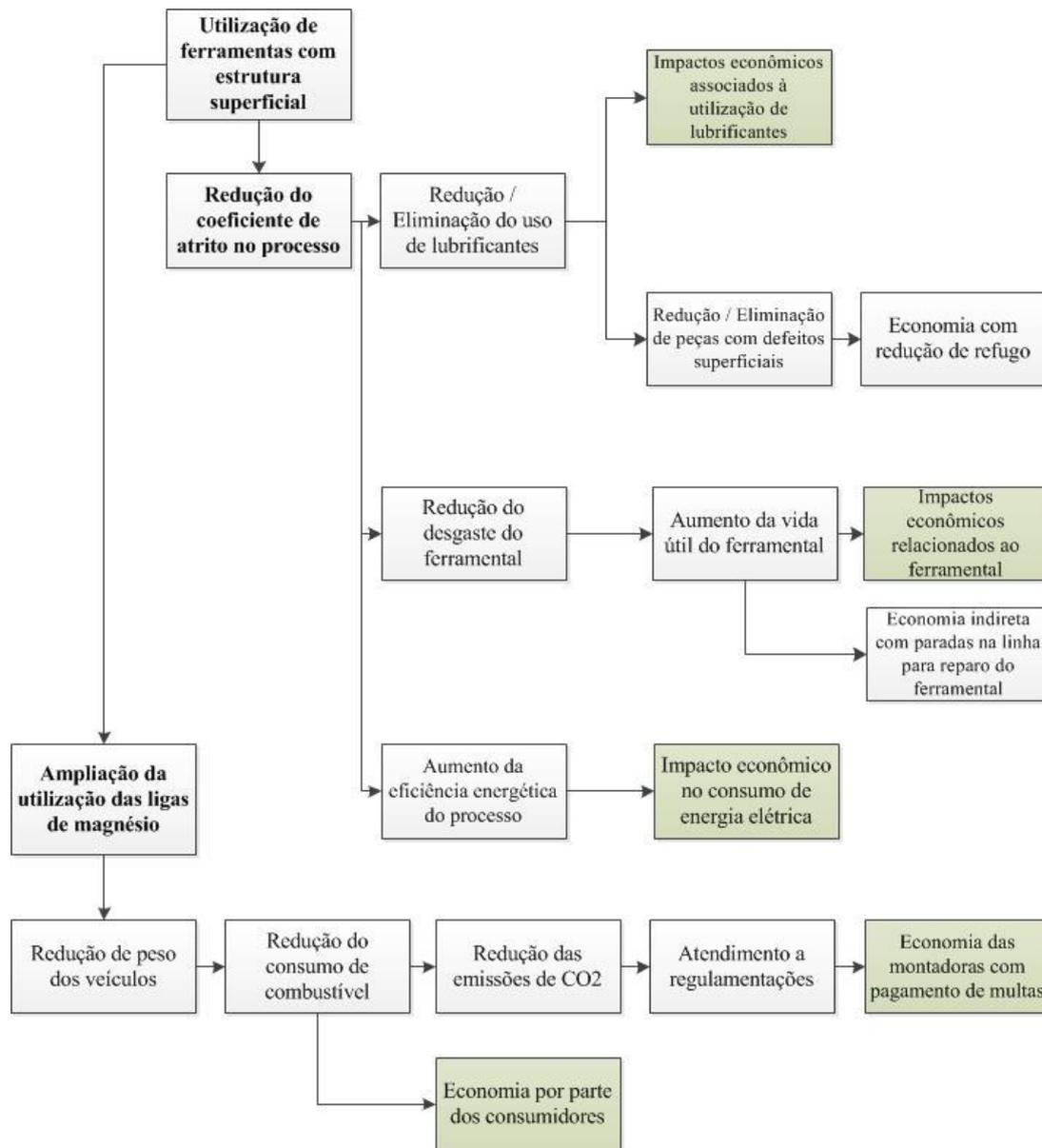
2.8. Viabilidade Econômica

Estudos de viabilidade técnica e econômica são essenciais para implementação de novas tecnologias. Neste tópico serão evidenciados os benefícios obtidos a partir da aplicação de ferramentas com estrutura superficial para conformação de chapas de ligas de magnésio, baseando-se na produção científica disponível. As ferramentas com estrutura superficial apresentam potencial para reduzir o atrito nos processos de conformação, impactando no aumento da vida útil do ferramental, na redução do consumo de lubrificantes e no aumento da eficiência energética do processo de conformação.

O desenvolvimento desta tecnologia associado aos benefícios tecnológicos supracitados tem potencial para ampliar a viabilidade de utilização das ligas de magnésio, o que impactará no atendimento a requisitos de redução de peso e das emissões de CO₂ pelos automóveis, ambos em destaque atualmente.

A Figura 24 ilustra os principais impactos econômicos que podem ser obtidos com a utilização de ferramentas com estrutura superficial na conformação de chapas de ligas de magnésio. Os itens destacados em verde serão analisados quantitativamente no capítulo de Resultados e Discussão. Para contextualizar e expor dados para o posterior estudo de viabilidade econômica, a seguir serão expostas informações sobre os pontos ilustrados na Figura 24.

Figura 24 - Potenciais impactos econômicos obtidos com a utilização de ferramentas com estrutura superficial.



Fonte: Autor.

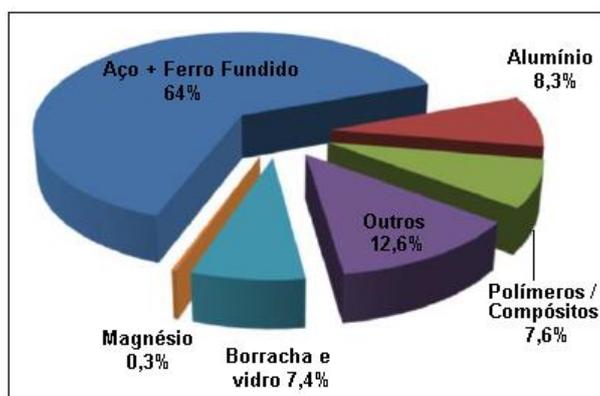
2.8.1. Requisitos de Redução de Peso e Utilização das Ligas de Magnésio

Ao longo dos últimos anos, a economia de combustível tornou-se um objeto chave e o tema de muitas pesquisas na indústria automotiva. Estimulados pelo aumento dos preços dos combustíveis, da demanda pública e juntamente com mais rigorosos padrões governamentais, os fabricantes de automóveis estão se esforçando para reduzir o consumo de combustível dos veículos. Várias abordagens têm se mostrado eficazes, incluindo melhorias no projeto do sistema de motorização e na aerodinâmica do veículo,

mas, entre as mais promissoras, está o desenvolvimento de materiais mais leves em um esforço para reduzir a massa total do veículo. De fato, as investigações demonstraram que uma parcela significativa do consumo total de combustível de um veículo está relacionada com a sua massa e pesquisas relacionadas à conformação de materiais leves trarão um benefício direto para os fabricantes de automóveis (BOBA, 2014).

Atualmente os automóveis são compostos por vários materiais cujos fins variam de estruturais a estéticos. A Figura 25 apresenta a distribuição em peso dos materiais em um veículo médio de acordo com a *United States Automotive Materials Partnership* (USAMP). Considerando um veículo médio com massa aproximada de 1000 kg, de acordo com a Figura 25, este contém apenas 3 kg de magnésio, o que ainda é pouco representativo. Do peso total, quase dois terços são compostos de aço e ferro fundido. A maior parte corresponde aos componentes estruturais e que devem atender à requisitos de segurança ao impacto, alguns dos quais poderiam ser substituídos por materiais mais leves que reduziriam o peso total sem comprometer a integridade estrutural do veículo. Deste modo, as chapas de liga de magnésio apresentam grande potencial para aplicações automotivas (BOBA, 2014).

Figura 25 - Distribuição de material em um veículo médio da América do Norte.



Fonte: (BOBA, 2014) adaptado.

Nesse sentido, as principais montadoras estão concentrando-se na redução do peso dos veículos e limitando a quantidade de emissões devido aos requisitos legislativos e dos consumidores por veículos mais seguros e mais limpos. Essa exigência pela redução de peso dos componentes dos veículos criou um renovado interesse pelas ligas de magnésio (AGHION et al., 2000).

Alinhado com a CAFE (*Corporate Average Fuel Economy*) e outras legislações ambientais, a maioria dos fabricantes de automóveis estabeleceram metas para usar entre 40 a 100 kg de ligas de magnésio nos veículos em um futuro próximo. Esse montante envolve tanto componentes maciços (tais como o bloco do motor e as rodas) como componentes estampados (peças da carroceria, acabamentos internos) (AGHION et al., 2000).

Em termos quantitativos, a redução de peso de 100 quilogramas representa uma economia de combustível de cerca de 0,5 litros para cada 100 quilômetros percorridos por um veículo. Supondo que 20 kg de componentes de liga de magnésio serão usados em 25% dos 40 milhões de carros produzidos anualmente, calcula-se que a indústria automobilística requer 200.000 toneladas de ligas de magnésio (KULEKCI, 2008). Essa tendência está alinhada com o histórico que mostra que a produção global de magnésio em 2012 foi de cerca de 793.000 toneladas, sendo 70% superior em relação a 2002. Segundo as previsões, a produção mundial de magnésio chegará a 1,183 milhões de toneladas em 2025 (crescimento de 52% em relação a 2010) (THYSSENKRUPP, 2013).

De acordo com a U.S. Automotive Partnership, até 2020 o magnésio será capaz de reduzir 15% do peso de um veículo, levando a uma economia de combustível de 9 a 12% (AUTOMOTIVE-NEWS, 2012). Preços mais baixos para o magnésio irão estimular o uso massivo desse material na indústria automotiva (KULEKCI, 2008). Considerando o grande número de veículos produzidos em todo o mundo, economias de peso podem levar a uma queda significativa na quantidade de dióxido de carbono liberado para a atmosfera, reduzindo seu impacto nocivo que resulta no aquecimento global. É por esta razão que o magnésio é conhecido como o metal verde do século XXI (ASIAN-METAL, 2014).

2.8.2. Regulamentação das Emissões de CO₂ pelos Automóveis

Os automóveis são responsáveis por cerca de 12% das emissões totais de dióxido de carbono (CO₂) da União Europeia (UE), o qual é o principal gás causador do efeito estufa. A legislação da UE define metas obrigatórias de redução de emissões para os novos veículos produzidos e é o ponto chave da estratégia da UE para melhorar a economia de combustível dos veículos vendidos no mercado europeu (CLIMATE ACTION, 2012).

A regulamentação vigente exigia que os veículos novos registrados na UE não emitissem mais de uma média de 130 gramas de CO₂ por quilômetro (g CO₂/km) até 2015. Até 2021, progressivamente a partir de 2020, a média a ser atingida por todos os carros novos é de 95 g CO₂/km. Isto significa um consumo de combustível de cerca de 4,1 L/100 km com gasolina ou 3,6 L/100 km com diesel. As metas de 2015 e 2021 representam reduções de 18% e 40%, respectivamente, em comparação com a média das emissões da frota de 2007 que era de 158,7 g CO₂/km (CLIMATE ACTION, 2012).

Se as emissões médias de CO₂ da frota de um fabricante excederem o seu valor limite em qualquer ano a partir de 2012, o fabricante deverá pagar uma multa de emissões em excesso para cada automóvel registrado. Esta penalidade corresponde a:

- 5 Euros (€) para o primeiro grama de CO₂ em excesso por quilômetro percorrido
- 15 € para o segundo g CO₂/km
- 25 € para o terceiro g CO₂/km
- 95 € por cada g CO₂/km subsequente.

A partir de 2019, a penalidade será de 95 € a partir do primeiro grama excedido em diante (CLIMATE ACTION, 2012).

No contexto internacional, regulamentações semelhantes à da UE estão sendo aplicadas em todo o mundo, podendo ser comparada com diretrizes semelhantes para os EUA (93 g CO₂/km para 2025), Japão (105 g CO₂/km até 2020) e China (117 g CO₂/km até 2020) (MOCK, 2014).

No Brasil, o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores (Inovar-Auto) é o regime automotivo do Governo Brasileiro que tem como objetivo a criação de condições para o aumento de competitividade no setor automotivo, produzir veículos mais econômicos e seguros, investir na cadeia de fornecedores, em engenharia, tecnologia industrial básica, pesquisa e desenvolvimento e capacitação de fornecedores. Criado pela Lei n° 12.715/2012, o programa possui validade para o período de 2013 a 2017.

O Programa estimula a concorrência e a busca de ganhos sistêmicos de eficiência e aumento de produtividade da cadeia automotiva, das etapas de fabricação até a rede de serviços tecnológicos e de comercialização. Uma das suas metas específicas é a produção de veículos mais econômicos. A partir de 2017 veículos que consumam 15,46% menos terão direito a abatimento de um ponto percentual de IPI (Imposto sobre Produtos

Industrializados). Veículos que consumam 18,84% menos terão direito a abatimento de dois pontos percentuais de IPI (MDIC, 2012). Considerando um veículo compacto cujo valor gira em torno de R\$ 45.000,00, um cálculo direto indica que um abatimento de dois pontos percentuais no IPI representaria uma economia de aproximadamente R\$ 840,00 para o consumidor final.

2.8.3. Impactos da Redução do Atrito na Vida Útil do Ferramental de Estampagem

A produção de componentes está associada a demandas cada vez maiores de produtividade, o que aumenta as exigências de resistência ao desgaste e resistência à fadiga das ferramentas de conformação (PODGORNIK et al., 2006).

O foco principal para uma melhoria das propriedades tribológicas na conformação de chapas tem sido a modificação de lubrificantes para uma melhor retenção e permeabilidade na região de contato ferramenta/chapa. No entanto, o *galling* pode ser dificultado com sucesso também pela modificação da superfície da ferramenta (PODGORNIK et al., 2006).

De acordo com o relatório setorial de 1998 do BNDES:

Um fator de suma importância para o setor de estamparia é o desenvolvimento e a fabricação do ferramental das prensas, ou seja, os punções e matrizes que darão forma às chapas metálicas. Como exemplo, um conjunto de ferramentas para estampar uma porta dianteira direita tem seus custos estimados em mais de US\$ 1 milhão. Com base nisso, um exercício de cálculo permitiria estimar o custo de ferramental para um modelo de 4 portas (1 conjunto de ferramentas para cada porta, mais 2 laterais, 2 para-lamas, 1 capô, 1 tampa traseira, 1 teto e 1 assoalho), num total de 12 conjuntos, em algo como US\$ 12 milhões, somente para as peças de superfície (SANTOS et al., 1998).

Apesar dos dados serem relativamente antigos, a informação mostra o impacto do custo do ferramental em relação aos itens produzidos, de modo que a vida útil dessas matrizes necessita ser a maior possível.

É importante ressaltar que a vida útil das matrizes é influenciada pelas propriedades dos materiais utilizados para fabricação da ferramenta, pela geometria da ferramenta e pelas condições de processo como velocidade relativa entre as superfícies

em contato, pressão de contato entre as superfícies da peça e da ferramenta, tipo de lubrificação utilizada, dentre outros (RODRIGUES et al., 2010). A vida útil está associada ao número de ciclos de operação e possui relação direta com o número de componentes que podem ser produzidos com um mesmo ferramental. Um estudo de caso realizado por Rodrigues et al. (2010) mostrou que uma matriz revestida com nitreto de titânio (TiN) para produção de apoio para suspensão de automóvel possibilitava a fabricação de 180 mil componentes antes de necessitar ser substituída. A alteração do revestimento dessa matriz para o duplex (CrN + WS₂) aumentou a vida útil da matriz em cerca de 3,6 vezes, possibilitando a produção de 650 mil peças antes de ser necessário substituir cada matriz.

O desgaste prematuro dessas matrizes demanda reparos frequentes, o que já impacta em custos diretos com insumos e mão de obra, além de custos indiretos de parada da linha de fabricação. Vale ressaltar que, mesmo com os reparos, o desgaste excessivo reduz significativamente a vida útil desses ferramentais.

Um estudo realizado por Monteiro (2001) analisou os custos envolvidos na fabricação de cinco tipos de componentes por diferentes companhias do setor automotivo. Todos os componentes realizavam a estampagem como uma das etapas de manufatura. A avaliação dos custos envolvidos para produção dos cinco componentes indicou que, em média, os custos com ferramental representavam 7% dos custos totais envolvidos na produção de um componente e que os custos relativos à manutenção de ferramentas representavam cerca de 5% dos custos totais, refletindo o tempo necessário para essa atividade e a necessidade de equipamentos custosos. Esse alto custo com manutenção era associado basicamente à manutenção do ferramental de estampagem.

Conforme citado anteriormente, ferramentas com estrutura superficial reduzem a área efetiva de contato (KARBASIAN et al., 2010). Menor área de contato pode reduzir a ocorrência do desgaste por adesão, impactando em um aumento da vida útil das matrizes de conformação.

2.8.4. Redução do Consumo de Energia no Processo de Conformação

A indústria automobilística nos EUA gasta cerca de US\$ 3,6 bilhões em energia anualmente. A fabricação de veículos nos Estados Unidos é um dos mais importantes setores, produzindo entre 12 a 13 milhões de carros e caminhões leves anualmente e

gerando quase US\$ 350 bilhões em produção (FULTON et al., 2001). Cerca de dois terços do gasto energético total nas montadoras está associado à energia elétrica (GALITSKY et al., 2008).

A Tabela 5 fornece uma estimativa da distribuição típica de uso final de eletricidade em plantas de montagem de veículos, com base em estudos realizados em montadoras nos Estados Unidos (Price e Ross, 1989), Bélgica e Suécia (Dag, 2000) e Alemanha (Leven e Weber, 2001). Cerca de 2 a 9% de toda a eletricidade é utilizada nos processos de conformação (GALITSKY et al., 2008).

Tabela 5 - Distribuição do consumo de eletricidade em instalações de montagem de veículos.

Uso Final	Utilização de Eletricidade (%)	Estimativa do Consumo Eletricidade ¹ (kWh / automóvel)
Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC)	11-20%	95-170
Sistemas de pintura	27-50%	230-320
Iluminação	15-16%	130-140
Ar comprimido	9-14%	80-120
Manuseio de materiais / ferramentas	7-8%	60-70
Conformação de metais	2-9%	20-80
Soldagem	9-11%	80-95
Diversos	4-5%	35-45
Total	100%	730-1040

Fonte: (GALITSKY et al., 2008) adaptado.

Conforme citado anteriormente, a conformação com ferramentas estruturadas necessita de menos energia quando comparada a utilização de ferramentas convencionais, devido à minimização das forças de atrito na região com estrutura superficial (MOUSAVI et al., 2014). Neste sentido, uma redução no consumo de energia elétrica pode ser obtida com a utilização dessa tecnologia.

2.8.5. Economia no Consumo de Lubrificantes nos Processos de Estampagem

A lubrificação desempenha um papel importante na estampagem, pois reduz o atrito na interface ferramenta-peça de trabalho. Reduzindo o atrito, também se reduz o desgaste da matriz e da ferramenta em grande volume de produção, o que por sua vez aumenta a vida útil da ferramenta.

¹ Estimativa do consumo típico de eletricidade em uma montadora em 1995.

De acordo com Ing (2009), anualmente, 40 milhões de toneladas de lubrificantes são consumidos em todo o mundo, para ser usado em todas as aplicações, desde motores de carro a cadeiras de escritório. A indústria automotiva é responsável pela maior quantidade consumida, mas as outras aplicações como o setor industrial pesado, a marinha e a metalurgia também são grandes consumidores de lubrificantes (BARTELS, 2005).

Segundo Mang (2007), 56% de todos os lubrificantes são óleos automotivos (i.e. óleos para motores, óleos para engrenagens e fluidos de transmissão), que continuam a ser o grupo de produtos predominante. Apenas 26% são óleos industriais, sendo o restante composto por óleos de processo, graxas lubrificantes, fluidos para conformação de metais e fluidos contra corrosão. Dados específicos sobre a quantidade de lubrificantes utilizados nos processos de conformação não foram localizados, no entanto, sabe-se que esse valor somado à quantidade de óleos de processo, graxas lubrificantes e aos fluidos contra corrosão totalizam em torno de 18% das 40 milhões de toneladas de lubrificantes consumidas anualmente no mundo.

A produção industrial acelerada nas indústrias de conformação, mineração e usinagem de metais, juntamente com expansões de capacidade, levou à alta demanda na indústria global de lubrificantes (GRANDVIEWRESEARCH, 2016).

Além dos lubrificantes representarem em torno 0,5% do custo operacional total dos processos de estampagem (JEFFERY, 2003), gastos com a limpeza final dos componentes produzidos, bem como com o descarte dos resíduos de lubrificantes poderão ser eliminados ou reduzidos significativamente com a utilização da tecnologia proposta.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais estudados e os ensaios realizados. A Figura 26 apresenta a visão geral do trabalho. Um resumo do fluxo de atividades, bem como a infraestrutura necessária e o resultado esperado em cada etapa estão apresentados na Figura 27. O detalhamento dos ensaios é realizado nos tópicos subsequentes.

Figura 26 - Visão geral do trabalho.

ANÁLISE DO PROBLEMA DE PESQUISA			
Problema Geral	Solução Geral	Problema Tecnológico	Solução Tecnológica
Necessidade de redução de peso dos automóveis	Ampliação da utilização de ligas de magnésio nos veículos	Problemas gerados pela lubrificação na conformação de ligas de magnésio	Conformação sem lubrificação - ferramentas com estrutura superficial
CORRELAÇÃO DO TRABALHO COM O PROBLEMA			
Por Que	Como	Objetivo	O Que
Ferramentas com estrutura superficial reduzem a área efetiva de contato e a força de atrito	Avaliação tribológica de 8 ferramentas de teste com estrutura superficial	Reduzir os níveis de atrito no processo com a utilização de ferramentas com estrutura superficial para viabilizar processo sem lubrificação	Testes de Atrito
			Caracterização do Material da Chapa
			Análise das Ferramentas de Teste

Fonte: Autor.

Figura 27 - Fluxograma dos ensaios realizados.

TESTES DE ATRITO					
ETAPA	Projeto das Ferramentas	Fabricação das Ferramentas	Obtenção dos Corpos de Prova	Configuração do Equipamento de Ensaio de DST de Tiras	Execução dos Ensaios de Atrito e Análise dos Resultados
INFRAESTRUTURA	SolidWorks® 2015	Sistema de laser de picosegundos	Guilhotina hidráulica	Equipamento de dobramento sob tensão	Equipamento de dobramento sob tensão / Pacote Office 2013
RESULTADO	CAD das ferramentas	Ferramentas usinadas e polidas	Tiras de Mg AZ31B para ensaios	Equipamento pré-configurado	Ensaios de atrito executados / Coeficientes de atrito e Forças
CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DA CHAPA			ANÁLISE DAS FERRAMENTAS DE TESTE		
ETAPA	Microscopia	Análise de Textura por Difração de Raios-X	Microdureza	Análise de Rugosidade Superficial	Análise Qualitativa da Adesão
INFRAESTRUTURA	Microscópio Óptico Zeiss Scope A1	Difratômetro de raios-X, marca PANalytical, modelo MRD-XL	Microdurômetro Shimadzu, modelo HMV-2T E	Perfilômetro portátil, marca Mahr, modelo Perthometer M1	Visual
RESULTADO	Geometria e contornos de grão / Presença de maclas e precipitados	Figuras de polo - plano basal (0002)	Perfil de dureza na seção transversal da amostra	Rugosidade superficial da ferramenta plana (Ra, Rz, Rt e Rq)	Avaliação da adesão de material da chapa na ferramenta

Fonte: Autor.

3.1. Materiais

O material analisado neste trabalho consiste em chapas de liga de magnésio AZ31B fornecidas pela MgF *Magnesium Flachprodukte GmbH* nas dimensões de 590 x 1280 x 1,90 mm. De acordo com a folha de dados do material, sua composição química está descrita na Tabela 6. O material foi fornecido pelo Instituto Fraunhofer IWU (Chemnitz, Alemanha).

Tabela 6 - Composição química do material da chapa (Mg AZ31B), em % de peso.

Elemento	Concentração (% em peso)	Elemento	Concentração (% em peso)
Al	2,64	Si	0,0283
Zn	0,744	Ca	0,0011
Mn	0,305	Mg	96,27
Fe	0,00375	Zr	< 0,001
Be	0,00069	Ni	< 0,001
Cu	0,00207	Sn	< 0,005

Fonte: (MgF, 2009) adaptado.

A composição química informada pelo fabricante é condizente com os valores da composição química nominal para a liga de AZ31B especificada pela norma ASTM B90 / B90M - 13 (Tabela 7).

Tabela 7 - Composição química do Mg AZ31B, em % de peso.

Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Si	Ca	Ni	Outros
2,5-3,5	0,6 -1,4	0,2 min	0,005 max	0,005 max	0,1 max	0,004 max	0,005 max	0,3 max

Fonte: (ASTM, 2013).

As chapas foram produzidas através de processo de laminação a quente com recozimento final a 330°C durante 60 minutos, apresentando estrutura cristalina completamente recristalizada. Os parâmetros de rugosidade estão listados na Tabela 8 (MGF, 2009).

Tabela 8 - Parâmetro de rugosidade do material utilizado.

PARÂMETRO	VALOR
R _a	1,3 – 1,6 µm
R _z	10,5 – 11,4 µm

Fonte: (MGF, 2009) adaptado.

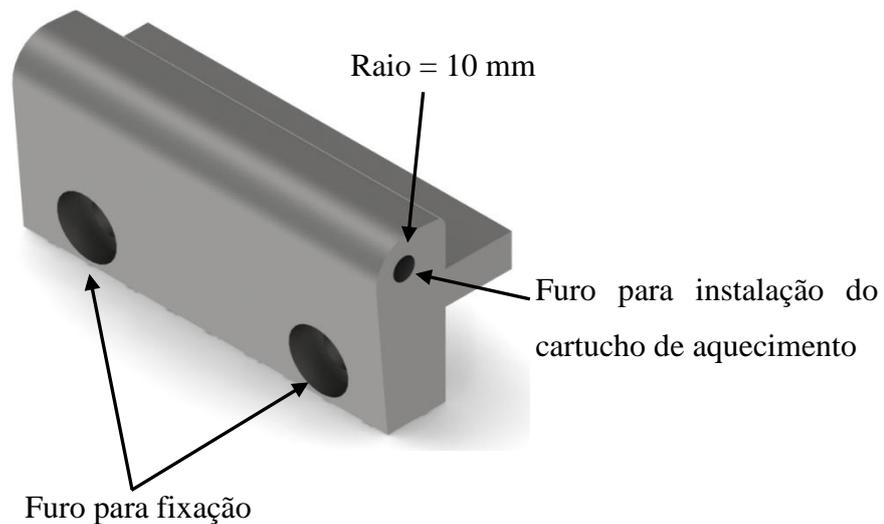
3.2. Métodos

3.2.1. Testes de Atrito

3.2.1.1. Projeto das Ferramentas de Teste

Para simular experimentalmente as condições de contato entre chapa e matriz através dos ensaios de atrito foram utilizadas 9 ferramentas de teste, similares à representada na Figura 28.

Figura 28 - Modelo padrão das ferramentas de teste.



Fonte: Autor.

A ferramenta 1 possui superfície lisa na região do raio (região de contato com a chapa) e representa a superfície convencional de uma matriz de estampagem sendo, portanto, utilizada como padrão comparativo. Para a ferramenta 2 foi projetada uma estrutura superficial com geometria elíptica. Para as demais ferramentas (3 a 9) foram projetadas cavidades superficiais, ou seja, estruturas superficiais com geometria circular. As cavidades foram escolhidas como elementos de forma devido ao seu comportamento não-direcional, de modo a não influenciar o fluxo de material durante o processo de conformação.

Segundo Mousavi et al. (2014), o tamanho das estruturas superficiais podem afetar o coeficiente de atrito. Visando avaliar esse efeito, as ferramentas com geometria superficial circular foram produzidas variando alguns parâmetros, sendo eles a distância entre o centro dos círculos e o diâmetro destes.

Um fator f , definido como a relação entre a área das estruturas superficiais e a área total da superfície da ferramenta, foi calculado. Quanto mais elevado for o valor f , menor será a área de contato entre a ferramenta de teste e a tira. As ferramentas de testes foram organizadas de 1 a 9 em ordem crescente do valor do fator f . Os parâmetros de diâmetro (\emptyset) e distância entre centros ($d(c,c)$) das cavidades para cada uma das ferramentas estão descritos na Tabela 9. Para a geometria elíptica não se aplica o conceito de diâmetro, mas sim o de eixo menor (2,00 mm) e eixo maior (5,00 mm).

Tabela 9 - Parâmetros das ferramentas de testes.

Ferramenta	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Superfície	Lisa	Elíptica	Circular						
\emptyset [mm]	-	2,00 x 5,00	3,00	1,50	6,00	0,75	3,00	1,00	1,00
$d(c,c)$ [mm]	-	7,00	6,00	3,00	10,00	1,25	4,50	1,50	1,25
f (%)	-	13,09	19,51	21,30	26,50	31,40	36,10	39,50	55,80

Fonte: Autor.

Todas as ferramentas possuem raio de 10 mm, o qual é representativo para matrizes de estampagem. Alguns detalhes construtivos são a existência de dois furos frontais para aparafusamento no equipamento de testes e um furo horizontal para introdução do cartucho de aquecimento, para possibilitar a realização dos testes sob temperaturas elevadas.

Os modelos em CAD e desenhos técnicos de fabricação foram realizados utilizando o software SolidWorks® versão 2015. Essa etapa foi realizada no Instituto Fraunhofer IWU (Chemnitz, Alemanha), durante o intercâmbio do autor nessa instituição como pesquisador visitante.

3.2.1.2. Fabricação das Ferramentas de Teste

As ferramentas de teste foram fabricadas em aço ferramenta Boehler W400 (DIN 1.2343) com dureza de 52 HC. O aço é caracterizado por uma boa resistência ao desgaste (a frio e a quente), quando comparado com aços convencionais para trabalho a quente (BÖHLER, 2013).

A estrutura superficial das ferramentas foi usinada com um sistema de laser de picosegundos com comprimento de onda de 532 nm e duração de pulso de 12 ps. Este sistema de laser possui múltiplos eixos para estruturação de superfícies 3D e um sistema de medição óptica para controle de profundidade. Estruturas superficiais sem rebarba

podem ser produzidas com esta técnica, já que o material é transferido para a fase de vapor durante o processo. Neste contexto, o sistema de laser é extremamente apropriado para a fabricação de estruturas superficiais com fins de redução de atrito. Todas as cavidades produzidas apresentam profundidade de 50 μm . A fabricação das ferramentas de teste foi realizada no Instituto Fraunhofer IWU (Chemnitz, Alemanha), durante o intercâmbio do autor nessa instituição como pesquisador visitante.

3.2.1.3. Obtenção dos Corpos de Prova

Para realização dos ensaios de atrito foram utilizadas tiras obtidas das chapas de liga de magnésio AZ31B. As tiras foram cortadas por cisalhamento utilizando uma guilhotina hidráulica e apresentaram dimensões de 1280 x 70 mm. Essa etapa foi realizada no Instituto Fraunhofer IWU (Chemnitz, Alemanha).

3.2.1.4. Configuração do Equipamento de Ensaio de Dobramento sob Tensão de Tiras

Para determinar o coeficiente de atrito entre as tiras de AZ31B e as ferramentas de teste sob condições similares às dos processos industriais, um experimento foi montado utilizando um equipamento de tracionamento de tiras com dobramento na região do raio, o qual representa um ensaio de dobramento sob tensão (Figura 29).

Figura 29 - Equipamento utilizado no Ensaio de Dobramento sob Tensão.



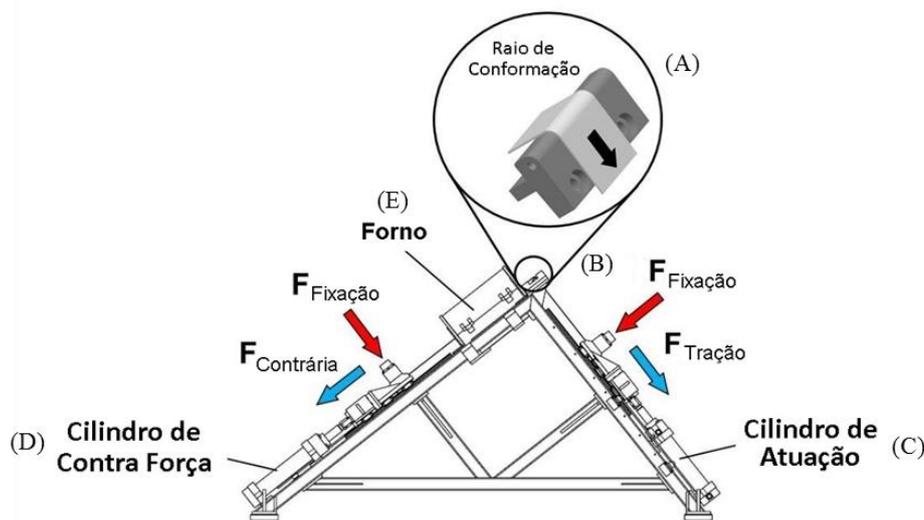
Fonte: (MÜLLER, 2007) adaptado.

O equipamento utilizado não é produzido comercialmente e foi desenvolvido no Fraunhofer IWU (Chemnitz, Alemanha). O desenvolvimento de um equipamento similar visando a execução de testes de atrito é factível. Nesse caso, competências de projeto de máquinas, automação, eletrônica, programação e conhecimentos no campo da tribologia seriam necessários.

Comparado com o Ensaio de Tractionamento de Tiras com Ferramentas Planas, o tracionamento de tiras com dobramento permite a obtenção de condições de contato similares às da região do raio das matrizes de estampagem, as quais apresentam coeficientes de atrito mais elevados, representando assim as condições de atrito mais críticas em um processo de conformação de chapas.

Para avaliação tribológica das estruturas superficiais, o dispositivo permite a instalação de ferramentas de testes (Figura 30A) por meio do encaixe e aparafusamento em um suporte localizado na parte superior do equipamento (Figura 30B).

Figura 30 – Representação esquemática do Equipamento utilizado no Ensaio de Dobramento sob Tensão.



Fonte: (MÜLLER et al., 2014) adaptado.

O equipamento apresenta um cilindro hidráulico de atuação (Figura 30C), que é responsável pelo tracionamento da tira e um cilindro de contra força (Figura 30D), que exerce uma força contrária ao movimento da tira. A força máxima exercida por cada um dos cilindros é igual a 100 kN. A tira é fixada nesses dois cilindros através de um sistema de engate acionado pneumaticamente. A máquina de testes também possui um forno elétrico de geometria cilíndrica (Figura 30E), com 618 mm de comprimento e diâmetro

de aproximadamente 400 mm, o qual permite o aquecimento de 615 mm do comprimento das tiras a uma temperatura de até 1000°C. As principais características do equipamento estão indicadas na Tabela 10.

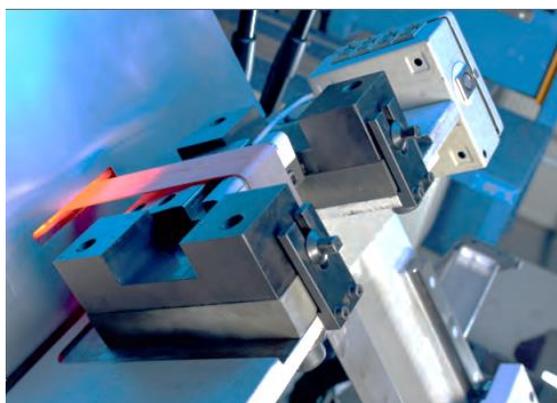
Tabela 10 – Características do Equipamento utilizado no Ensaio de Dobramento sob Tensão.

PARÂMETRO	VALOR
Máxima força de atuação (F_1)	100 kN
Máxima força de contra-tensão (F_2)	100 kN
Máxima distância de tracionamento (D)	500 mm
Máxima velocidade de tracionamento (V)	300 mm/s
Mínimo raio da ferramenta (R)	3 mm
Máxima temperatura na superfície da ferramenta (T_F)	800°C
Comprimento do forno	618 mm
Diâmetro do forno	400 mm

Fonte: Autor.

Para que ocorra o ensaio, o primeiro passo consiste em inserir os parâmetros do processo no painel do equipamento. Ao iniciar o teste, o cilindro de atuação é acionado por uma bomba, exercendo uma força de tração sobre a tira, fazendo com que ela deslize sobre a ferramenta de teste. Durante o movimento relativo entre a tira e a ferramenta, as forças são medidas por um sistema de células de carga dimensionadas para atender a capacidade dos cilindros de atuação e contra-tensão e o deslocamento dos cilindros é medido por um sistema de sensores de deslocamento especificados para atender a faixa de valores de distância de tracionamento (D). Todos esses dados são armazenados no computador do equipamento e ao final do ensaio é gerada uma planilha de dados com todas as informações, as quais posteriormente devem ser processadas pelo usuário. Uma representação real do ensaio de dobramento sob tensão, na qual pode ser visualizado o contato entre a tira e a ferramenta de testes, é mostrada na Figura 31.

Figura 31 – Ilustração real do ensaio de dobramento sob tensão.



Fonte: (FRAUNHOFER-IWU, 2016).

3.2.1.5. Execução dos Ensaios de Atrito e Análise dos Resultados

Inicialmente os ensaios foram realizados utilizando a ferramenta de teste com superfície lisa (ferramenta 1) com o objetivo de obter o valor do coeficiente de atrito de referência. Subsequentemente, os ensaios com as ferramentas com estrutura superficial foram realizados. A execução dos ensaios segue algumas etapas sequenciais descritas a seguir:

- i. Instalação da ferramenta de teste no equipamento e do cartucho de aquecimento para possibilitar o aquecimento da ferramenta;
- ii. Inicialização do equipamento, inserção dos parâmetros de testes e espera até estabilização das temperaturas inseridas:
 - i. Velocidade de tracionamento: adotada como 50 mm/s para todos os ensaios;
 - ii. Temperatura do cartucho de aquecimento: 280°C, a qual gerava uma temperatura média de 245°C na superfície das ferramentas, devido às perdas térmicas;
 - iii. Temperatura do forno: 300°C, a qual gerava uma temperatura média da tira de 288°C ainda no interior do forno. Esse valor foi medido considerando uma média em três pontos da tira;
- iii. Introdução da tira no equipamento, permitindo que uma região com um comprimento de 615 mm permaneça no interior do forno para aquecimento;
- iv. Espera de 10 min para aquecimento da tira e estabilização da temperatura.

Após as etapas acima, a tira é puxada manualmente e a região aquecida é colocada em contato com o raio da ferramenta de teste (em um intervalo de tempo inferior a 5 segundos visando evitar perda excessiva de calor da tira para o ambiente). Por fim, extremidades da tira são presas ao cilindro de atuação e ao cilindro de contra força e o tracionamento é iniciado, fazendo a tira deslizar contra a ferramenta de teste por uma distância de 200 mm.

Os experimentos foram realizados em três etapas. Na primeira etapa foram utilizadas três tiras de Mg AZ31B para cada ferramenta. Visando avaliar com mais precisão a repetitividade dos resultados, na segunda e terceira etapas foram utilizadas 5 tiras. Em cada etapa subsequente, tanto a ferramenta de teste lisa (padrão) quanto a ferramenta que apresentou o melhor resultado na etapa imediatamente anterior foram

novamente testadas. Por esse motivo, o número de tiras testadas para algumas ferramentas não é o mesmo. A Tabela 11 ilustra o número de tiras testadas em cada ferramenta de teste nas etapas 1 a 3.

Tabela 11 - Número de tiras de AZ31B testadas em cada ferramenta.

Ferramenta	Nº de Tiras			Total
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	
1	3	5	5	13
2	3	-	-	3
3	3	5	-	8
4	-	5	-	5
5	3	-	-	3
6	-	-	5	5
7	-	5	-	5
8	-	5	5	10
9	-	-	5	5

Fonte: Autor.

Intervalos de confiança podem ser utilizados para indicar a confiabilidade de um resultado. Neste trabalho, adotou-se um nível de confiança de 95%, pois este é representativo para essa aplicação e tipicamente estabelecido na literatura (FIELD, 2013). Para determinar o Intervalo de Confiança da média (IC_{μ}) foi utilizada a Equação 15:

$$IC_{\mu} = \left(\bar{X} - t_{n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}; \bar{X} + t_{n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (15)$$

Sendo:

IC_{μ} Intervalo de confiança da média

\bar{X} Média amostral

S Desvio padrão amostral

n Número de variáveis aleatórias

t_{n-1} Valor do t-Student

Para a obtenção da força de dobramento, necessária para o cálculo da força de atrito (conforme Equação 7), o suporte das ferramentas de teste deve ser removido e um suporte contendo um pino que pode rotacionar livremente é instalado. O raio do pino deve ser igual ao raio das ferramentas de teste, nesse caso, 10 mm. Os parâmetros do material e dos testes de atrito estão resumidos na Tabela 12. Os resultados foram analisados através de dados gerados pelo equipamento.

Tabela 12 - Parâmetros do Material e dos Testes de Atrito.

PARÂMETRO	VALOR
Material da Chapa	
Largura da tira (L)	70 mm
Rugosidade superficial da tira (R_z) – <i>Data sheet</i>	10,5 – 11,4 μm
Rugosidade superficial da tira (R_a) – <i>Data sheet</i>	1,3 – 1,6 μm
Rugosidade superficial da tira (R_z) – Medida	11,11 μm
Rugosidade superficial da tira (R_a) – Medida	1,58 μm
Ferramentas de Teste	
Rugosidade superficial da ferramenta (R_z) – Medida	1,57 μm
Rugosidade superficial da ferramenta (R_a) – Medida	0,15 μm
Ensaio	
Tempo de permanência da tira no forno (t)	10 min
Temperatura média da tira no forno após aquecimento (T_T)	288°C
Temperatura média na superfície da ferramenta (T_F)	245°C
Velocidade de tracionamento (V)	50 mm/s
Distância de tracionamento (D)	200 mm

Fonte: Autor.

Uma análise da correlação entre a distância entre centros e o coeficiente de atrito e entre o diâmetro dos furos e o coeficiente de atrito foi realizada para as ferramentas com estrutura superficial circular (ferramentas 3 a 9), com o objetivo de avaliar a tendência destas variáveis, ou seja, se há ou não relação entre a mudança na variável de entrada e o resultado obtido na variável de saída e, se esta correlação pode ser classificada como positiva ou negativa e como forte ou fraca. O intervalo de correlação é dado por [-1;1]. Valores mais próximos de [1] indicam correlações fortes, dependência alta, enquanto os valores próximos de zero indicam correlações fracas ou independentes, e valores positivos e negativos indicam relações diretas e inversas, respectivamente (MONTGOMERY et al., 2012; NETO et al., 2001; SPIEGEL et al., 2016).

A análise foi baseada na Equação 16, sendo x e y os valores do diâmetro das cavidades e do coeficiente de atrito, respectivamente, e os valores da distância entre centros e do coeficiente de atrito, respectivamente, para a segunda análise (SPIEGEL et al., 2016). O resultado dos cálculos é o coeficiente de correlação (r).

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}} \quad (16)$$

3.2.2. Caracterização do Material da Chapa

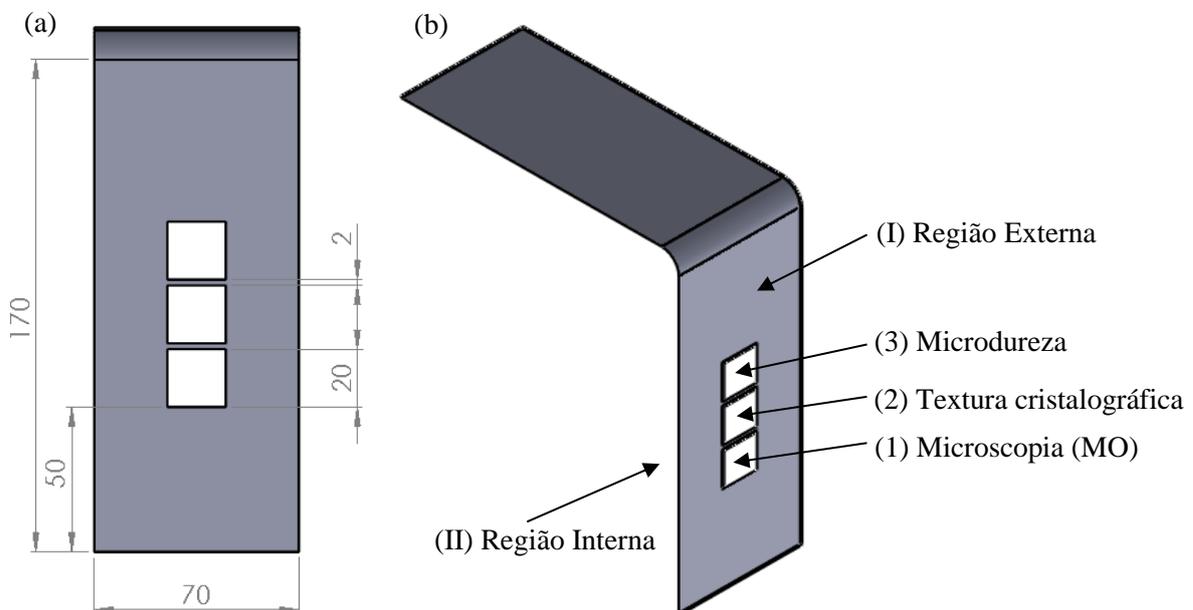
A caracterização do material foi realizada através de análise microestrutural por microscopia óptica, análise de textura cristalográfica e mecanismos de deformação utilizando técnica de difração de raios-X e análise de microdureza.

3.2.2.1. Obtenção das Amostras

Para a obtenção das amostras, as extremidades da tira foram removidas, de modo a manter um segmento em formato de “L”, medindo em cada lado aproximadamente 170 mm x 150 mm (Figura 32). A região interna do lado de 170 mm, indicada como (II) na Figura 32b, representa a parte da tira que esteve em contato com a ferramenta de teste. Desta região foram retiradas 3 amostras quadradas medindo 20 x 20 mm, sempre da primeira tira ensaiada em cada ferramenta, para realização das análises no material ensaiado. As cotas de posição das amostras e a identificação do tipo de caracterização realizada em cada uma delas estão indicadas na Figura 32.

Figura 32 - Desenho esquemático do corte das amostras para caracterização do material da chapa.

(a) Identificação das cotas das amostras retiradas do lado de 170 mm; (b) Vista isométrica do segmento da tira.



Fonte: Autor.

Também foram retiradas amostras nas mesmas dimensões de uma tira não ensaiada, ou seja, da chapa como fornecida pelo fabricante. Esta etapa foi realizada no SENAI CIMATEC (Salvador, Brasil).

3.2.2.2. Microscopia

Foi realizada a análise microestrutural das amostras de AZ31B utilizando a técnica de microscopia óptica, visando a observação da forma e distribuição dos grãos e dos precipitados.

A preparação das amostras é um passo essencial para realização com sucesso de análises microestruturais seja por microscopia óptica, seja na microscopia eletrônica de varredura (COELHO, 2009).

Para análise por microscopia óptica todas as amostras foram embutidas a frio com resina pré-acelerada 2021 PA da marca Fortel e submetidas ao lixamento seguindo as granulometrias de 360, 600, 800 e 1200. Posteriormente as amostras lixadas foram polidas com pasta de diamante na sequência 6, 3 e 1 μm , utilizando lubrificante (RedLube). Em seguida, as amostras polidas passaram por uma etapa de limpeza com álcool etílico e foram atacadas com uma solução ácida de 4,2 g de ácido pícrico, 10 ml de ácido acético, 10 ml de água destilada e 70 ml de etanol por aproximadamente 8 segundos. Esta etapa foi realizada no SENAI CIMATEC (Salvador, Brasil).

Microscopia Óptica

O microscópio óptico (MO) é uma ferramenta aplicada na caracterização de materiais e informações importantes podem ser obtidas utilizando técnicas adequadas e as devidas preparações das amostras (COELHO, 2009). Neste estudo, esse equipamento foi utilizado inicialmente para avaliar a microestrutura das tiras de magnésio AZ31B. A análise foi realizada em duas etapas, primeiramente com as tiras como recebidas e posteriormente com as tiras ensaiadas, revelando a geometria dos grãos e seus contornos. O microscópio óptico também foi utilizado para observação e análise das maclas no material. Para análise microscópica utilizou-se o microscópio óptico Zeiss Scope A1, equipado com câmera Zeiss AxioCam ERc5s. Esta etapa foi realizada no SENAI CIMATEC (Salvador, Brasil).

3.2.2.3. Análise de Textura Cristalográfica por Difração de Raios-X

A análise de textura cristalográfica utilizando a técnica de difração de raios-X foi realizada na superfície da tira como recebida para servir como padrão comparativo e na superfície de 5 amostras ensaiadas, provenientes das ferramentas 1, 3, 4, 7 e 8.

A análise por difração de raios-X foi realizada na Escola de Engenharia de São Carlos (USP), utilizando um difratômetro da marca PANalytical, modelo MRD-XL com radiação Cu K α ($\lambda = 0,15405$ nm), com o objetivo de gerar as figuras de polo referentes ao plano basal (0002).

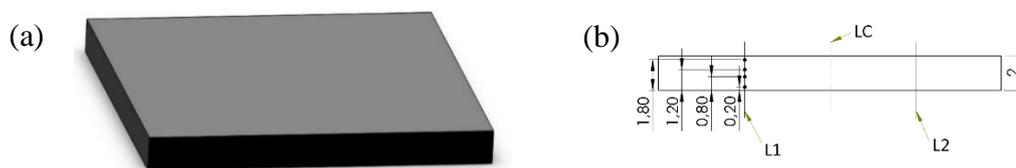
As medições foram feitas nas amostras seguindo rotina de medição padrão de figuras de polo. As figuras foram medidas variando o ângulo de rotação (ϕ) de 0 a 360° no passo de 5° e o ângulo de inclinação (ψ) de 0 a 89.9° no passo de 5°. O tempo de medição por ponto foi de 10 segundos.

3.2.2.4. Microdureza

Ensaio de microdureza foram realizados na seção transversal das amostras, com o objetivo de avaliar possíveis variações na dureza do material por efeito do encruamento durante o ensaio. Foi utilizada a escala Vickers de dureza, com a utilização de um penetrador de pirâmide de diamante de base quadrada e com ângulo de 136 °C entre as faces opostas do diedro.

O microdurômetro utilizado para obtenção do perfil de dureza é da marca Shimadzu, modelo HMV-2T E, e estava calibrado de acordo com o plano de manutenção e calibração do Laboratório de Ensaio Mecânicos do SENAI CIMATEC. As medições foram realizadas em 4 pontos ao longo de dois eixos verticais na seção transversal da amostra (Figura 33), visando a montagem de uma linha de dureza considerando o valor médio obtido nos dois eixos. A força na indentação foi de 2,942 N (HV0,3).

Figura 33 - Representação do ensaio de dureza: (a) Seção transversal da amostra; (b) Cotas dos pontos de medição de dureza ao longo dos eixos L1 e L2.



Fonte: Autor.

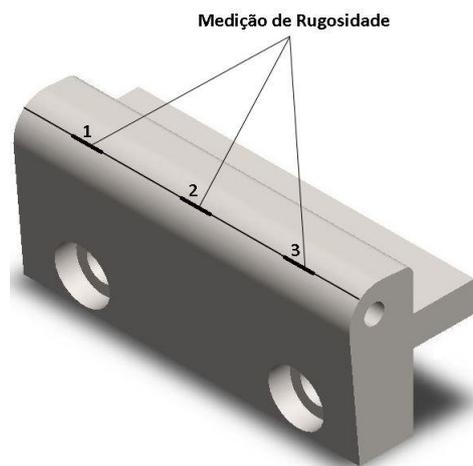
Antes dos ensaios as amostras foram polidas, visando a remoção de substâncias estranhas. O ensaio foi realizado à temperatura ambiente em um tempo de 10 segundos. Esta etapa foi realizada no SENAI CIMATEC (Salvador, Brasil).

3.2.3. Análise das Ferramentas de Teste

3.2.3.1. Análise de Rugosidade Superficial

Utilizando um perfilômetro portátil da marca Mahr modelo Perthometer M1 foi realizada a medição da rugosidade superficial da ferramenta lisa, com o objetivo de avaliar comparativamente a rugosidade superficial através dos parâmetros Ra e Rz, antes e após os ensaios de atrito. As medições foram realizadas em três trechos ao longo da linha de referência que fica situada no raio da ferramenta (Figura 34) onde sempre ocorre o contato com a chapa de magnésio. Essa mesma referência foi utilizada para medição da rugosidade na ferramenta lisa após testes. Esta etapa foi realizada no Instituto Fraunhofer IWU (Chemnitz, Alemanha).

Figura 34 - Indicação da região de medição da rugosidade superficial.



Fonte: Autor.

3.2.3.2. Análise Qualitativa da Adesão

Uma análise qualitativa da adesão de material da chapa também foi realizada de modo visual, comparando-se a ocorrência desse mecanismo de desgaste entre a ferramenta lisa e as ferramentas com menores e maiores valores de coeficiente de atrito.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises serão apresentados seguindo, de forma aproximada, a sequência cronológica dos ensaios apresentados no capítulo anterior. As análises de caracterização do material da tira (análise microestrutural, análise de textura cristalográfica por difração de raios-X e microdureza) foram realizadas para a chapa de magnésio AZ31B como recebida e para amostras ensaiadas.

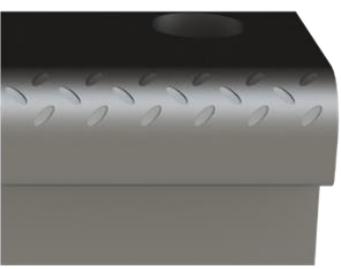
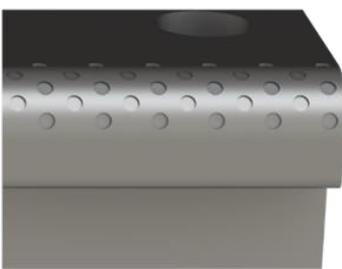
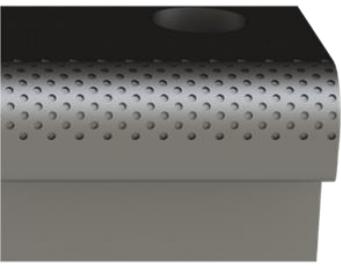
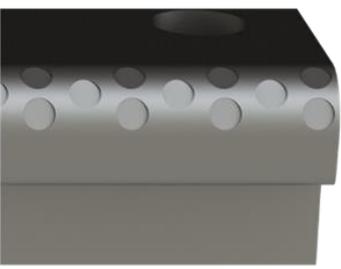
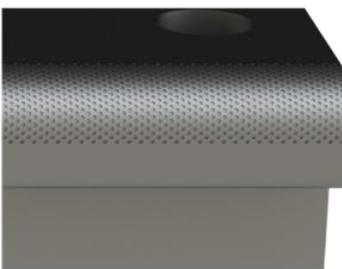
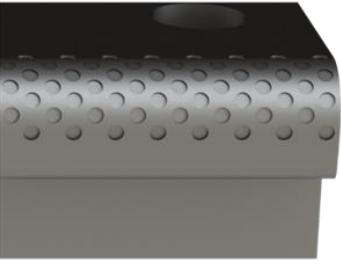
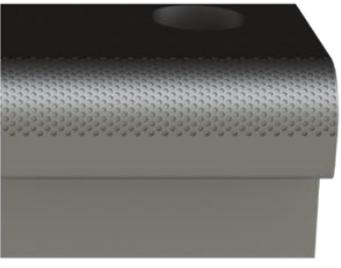
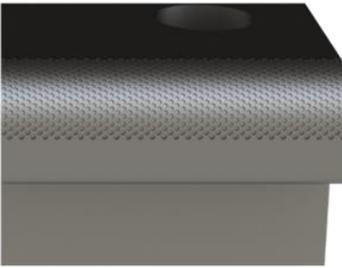
4.1. Projeto das Ferramentas de Teste

A Tabela 13 ilustra as ferramentas de teste projetadas. Excetuando a ferramenta 1, todas as demais apresentam estrutura superficial com geometria elíptica ou circular, conforme descrito na metodologia.

As ferramentas estão organizadas em ordem crescente do fator f (definido como a relação entre a área da superfície estruturada e a área total da superfície da ferramenta). Analisando os parâmetros distância entre centros das cavidades ($d(c,c)$), diâmetro das cavidades (\emptyset) e fator f dessas ferramentas, pode-se observar as seguintes relações:

- F4 apresenta metade dos valores de $d(c,c)$ e \emptyset em relação a F3. Apesar do valor do fator f ser muito próximo para ambas as ferramentas, é esperado que F4 apresente menor valor do coeficiente de atrito em virtude do menor \emptyset das cavidades, o que gera uma menor possibilidade de contato entre a tira e a base das cavidades;
- F6 e F9 apresentam o mesmo valor de $d(c,c)$ e diferentes valores de \emptyset , o que possibilita uma avaliação da influência da variação do \emptyset no coeficiente de atrito;
- F8 e F9 apresentam o mesmo valor de \emptyset e diferentes valores de $d(c,c)$, o que possibilita uma avaliação da influência da variação da $d(c,c)$ no coeficiente de atrito;
- F8 apresenta 1/3 dos valores de $d(c,c)$ e \emptyset em relação a F7. Apesar do valor do fator f ser muito próximo para ambas as ferramentas, é esperado que F8 apresente um coeficiente de atrito menor, em virtude das mesmas causas descritas para a relação entre F3 e F4.

Tabela 13 – Ferramentas de testes projetadas.

F1	F2	F3
		
$d(c,c) = 0$ $\varnothing = 0$ $f = 0\%$	$d(c,c) = 7,0$ Eixo maior = 5,0 Eixo menor = 2,0 $f = 13,1\%$	$d(c,c) = 6$ $\varnothing = 3,0$ $f = 19,5\%$
F4	F5	F6
		
$d(c,c) = 3,0$ $\varnothing = 1,5$ $f = 21,3\%$	$d(c,c) = 10,0$ $\varnothing = 6,0$ $f = 26,5\%$	$d(c,c) = 1,25$ $\varnothing = 0,75$ $f = 31,4\%$
F7	F8	F9
		
$d(c,c) = 4,5$ $\varnothing = 3,0$ $f = 36,1\%$	$d(c,c) = 1,5$ $\varnothing = 1,0$ $f = 39,5\%$	$d(c,c) = 1,25$ $\varnothing = 1,0$ $f = 55,8\%$

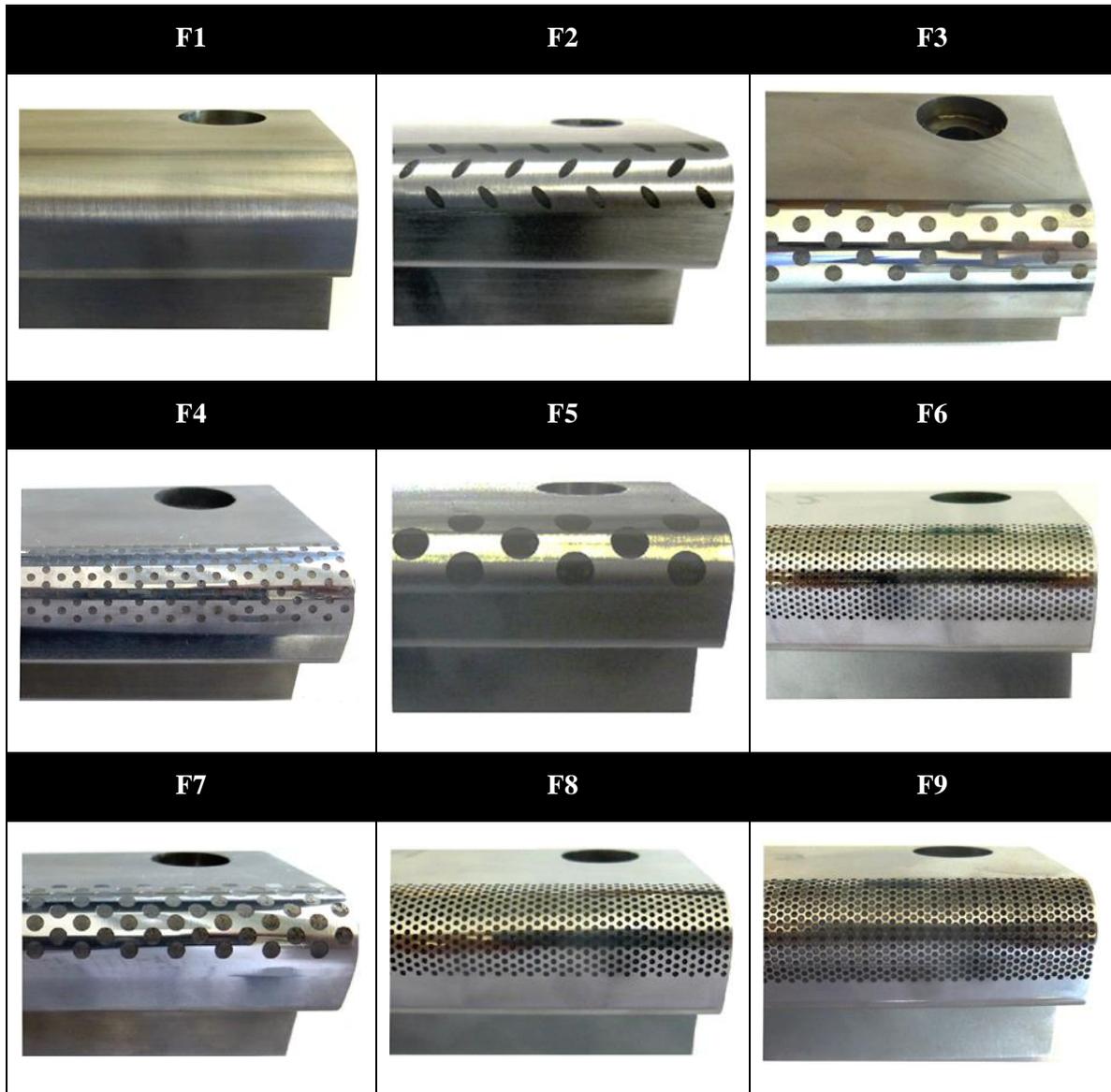
Fonte: Autor.

O modelo em CAD e o desenho técnico dessas ferramentas foram utilizados na etapa posterior de fabricação.

4.2. Fabricação das Ferramentas de Teste

A Tabela 14 ilustra as ferramentas de teste fabricadas conforme projeto realizado em etapa anterior.

Tabela 14 - Ferramentas de teste fabricadas.

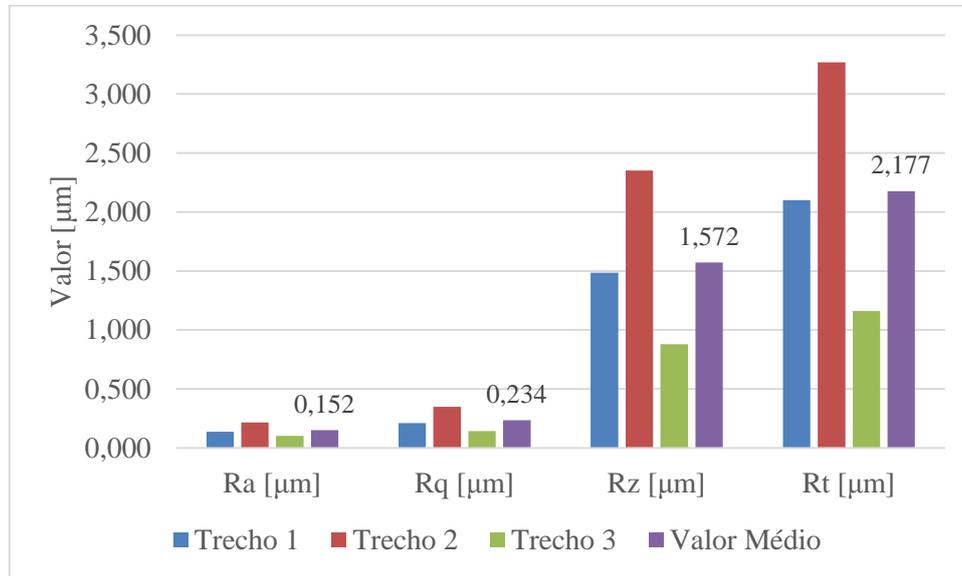


Fonte: Autor.

As ferramentas de teste foram submetidas a um processo de polimento superficial, de modo que todas elas devem apresentar valores de rugosidades superficial semelhantes, característico do processo. Por esse motivo, a medição da rugosidade superficial das ferramentas fabricadas foi realizada apenas para uma das ferramentas (lisa) e os resultados estão indicados na Figura 35. Os trechos 1, 2 e 3 estão indicados na Figura 34. É importante ressaltar que a base das cavidades não foi submetida ao polimento e

apresenta, portanto, rugosidade superior à da superfície polida. A rugosidade nessa região não é relevante para o estudo realizado, pois espera-se que o contato entre a chapa e a ferramenta ocorra apenas na superfície polida.

Figura 35 - Valores de rugosidade da ferramenta lisa após fabricação.



Fonte: Autor.

Os valores da Figura 35 mostram que a ferramenta produzida apresenta valor médio de Ra igual a 0,152 μm e Rz igual a 1,572 μm , os quais representam parâmetros de rugosidade compatíveis com o utilizado em ferramentas de conformação de chapas (MONFORT et al., 1991; WU et al., 2007). Comparativamente, esses valores são bastante inferiores à rugosidade da chapa de magnésio que foi utilizada em ensaios, os quais correspondem a Ra (1,58 μm) e Rz (11,11 μm) conforme medido. Isso indica uma qualidade superficial da ferramenta bastante superior à da chapa ensaiada.

4.3. Ensaios de Atrito

4.3.1. Análise dos Coeficientes de Atrito

A análise dos dados obtidos após o ensaio com cada ferramenta de teste e as tiras de magnésio AZ31B, com base na Equação 11, levou à obtenção dos valores de coeficiente de atrito médio (μ), conforme ilustrado na Tabela 15. O valor do desvio padrão (σ) também é apresentado. Esses valores foram obtidos analisando-se uma distância de tracionamento de 100 mm, onde o deslizamento da tira apresentou comportamento mais

estável, ou seja, onde a força de atuação e a força de atrito se mostraram mais constantes ao longo da distância percorrida.

Tabela 15 - Coeficiente de atrito médio medido nos ensaios de atrito.

Ferramenta	1	2	3	4	5	6	7	8	9
μ	0,270	0,310	0,272	0,264	0,326	0,248	0,275	0,265	0,246
σ	0,027	0,021	0,029	0,010	0,024	0,028	0,021	0,021	0,059

Fonte: Autor.

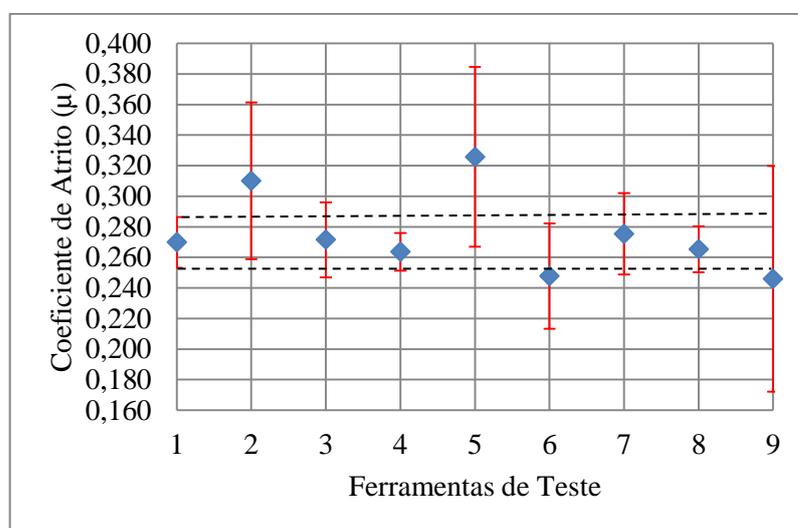
De acordo com os resultados, constata-se que o coeficiente de atrito médio apresentou diferenças significativas para as nove ferramentas. A ferramenta com superfície lisa (padrão) apresentou $\mu = 0,270$. O menor valor do coeficiente de atrito foi detectado para a ferramenta 9, com $\mu = 0,246$, o que representa uma redução de 8,9% em relação a ferramenta padrão. Essa redução é bastante similar aos resultados encontrados por Mousavi et al. (2014) relacionados à simulação numérica da conformação de chapas de aço com a utilização de ferramentas com estrutura superficial e um pouco inferior aos resultados obtidos por Wakuda et al. (2003) em pesquisas avaliando efeito da estrutura superficial na redução do atrito no contato entre cerâmica e aço. No entanto, este último utilizou lubrificação na região de contato. Taltavull et al. (2014) avaliou o comportamento tribológico da liga de magnésio AM50B deslizando sem lubrificação contra discos de aço carbono sem superfície estruturada utilizando um tribômetro do tipo pino sob disco e obteve valores de coeficiente de atrito em torno de 0,25, para cargas aplicadas acima de 40 N. Resultados envolvendo estudos tribológicos entre chapas de liga de magnésio e ferramentas com estrutura superficial não foram detectados na literatura. O fato da ferramenta F9 ter apresentado o menor valor de μ é um resultado esperado, visto que F9 apresenta maior valor do fator f (55,8%), o que indica a condição de menor área de contato entre a ferramenta de teste e a tira. Supõe-se que essa combinação de elevado valor de f associado a um pequeno valor do \emptyset das cavidades (nesse caso, 1,0 mm) proporcionou esse melhor resultado.

A condição mais crítica de atrito ocorreu para a ferramenta 5 ($\mu = 0,326$), representando um aumento de 20,7% também em relação a F1. Acredita-se que devido ao elevado diâmetro das cavidades, com a aplicação da carga, o contato entre a tira e a base dessas cavidades era bastante expressivo. Conforme mencionado anteriormente, a rugosidade dessa região é superior à rugosidade superficial da ferramenta, visto que a mesma não foi submetida ao processo de polimento, o que atuou dificultando o

deslizamento do material, gerando uma elevação da fricção no processo. A ferramenta 2 (elíptica) também apresentou elevado valor de μ . Neste caso, presume-se que a inclinação das elipses em relação à direção de conformação da tira atuou como uma barreira ao deslizamento do material, impactando em um aumento do atrito no processo.

Os resultados obtidos para o nível de confiança de 95% estão ilustrados na Figura 36. É importante ressaltar que os coeficientes de atrito para as ferramentas 3, 4, 7 e 8 encontraram-se na faixa abrangida pelo valor médio e desvio padrão de μ da ferramenta lisa, conforme representado pela linha tracejada na Figura 36.

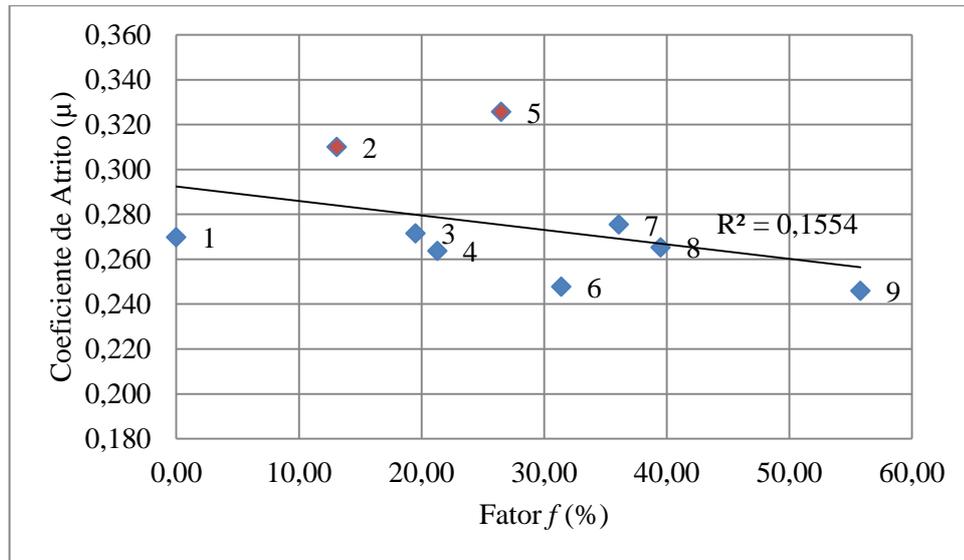
Figura 36 - Coeficiente de atrito médio e desvio padrão para cada ferramenta.



Fonte: Autor.

Uma tendência esperada é a redução do coeficiente de atrito com o aumento do fator f . No entanto, como pode ser visto na Figura 37, nem todas as ferramentas seguiram esta tendência. As ferramentas 2 e 5, por exemplo, apresentaram um aumento de μ para um maior valor de f . Nessas duas situações, acredita-se que o efeito da geometria elíptica e o elevado \emptyset das cavidades influenciaram mais significativamente o atrito do que o aumento de f (redução da área de contato), conforme já explicitado. Os elevados valores de μ de F2 e F5 foram significativos para obtenção de um coeficiente de determinação (R^2) extremamente baixo. As ferramentas 7 e 8 também não seguiram a tendência esperada de redução do atrito com o aumento de f , ao considerar todas as ferramentas.

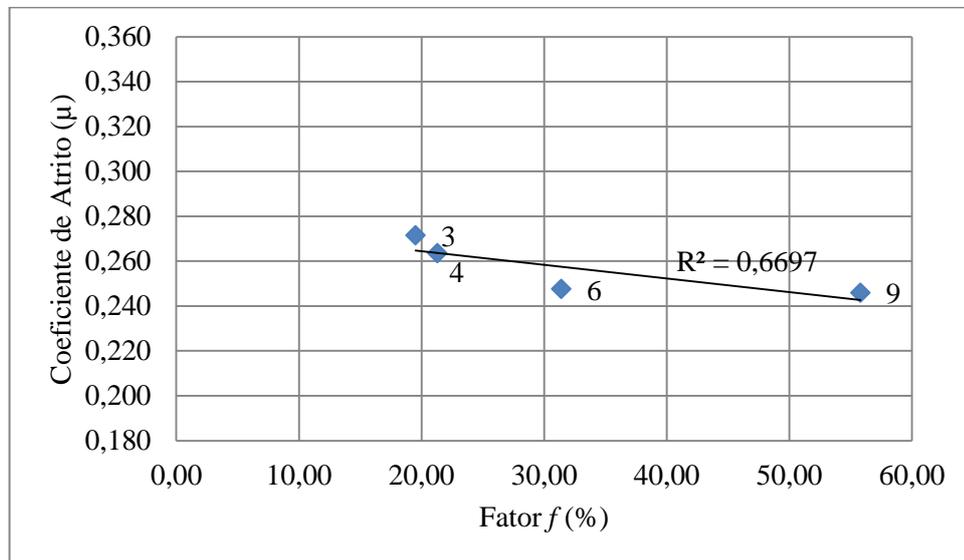
Figura 37 - Relação entre f (%) e μ para todas as ferramentas de teste.



Fonte: Autor.

Apesar destas exceções, as ferramentas 3, 4, 6 e 9 apresentaram uma tendência de redução no valor μ ao aumentar f (Figura 38), o que pode ser comprovado com um aumento do valor de R^2 , quando comparado com o R^2 da Figura 37.

Figura 38 - Relação entre f (%) e μ para as ferramentas 3, 4, 6 e 9.



Fonte: Autor.

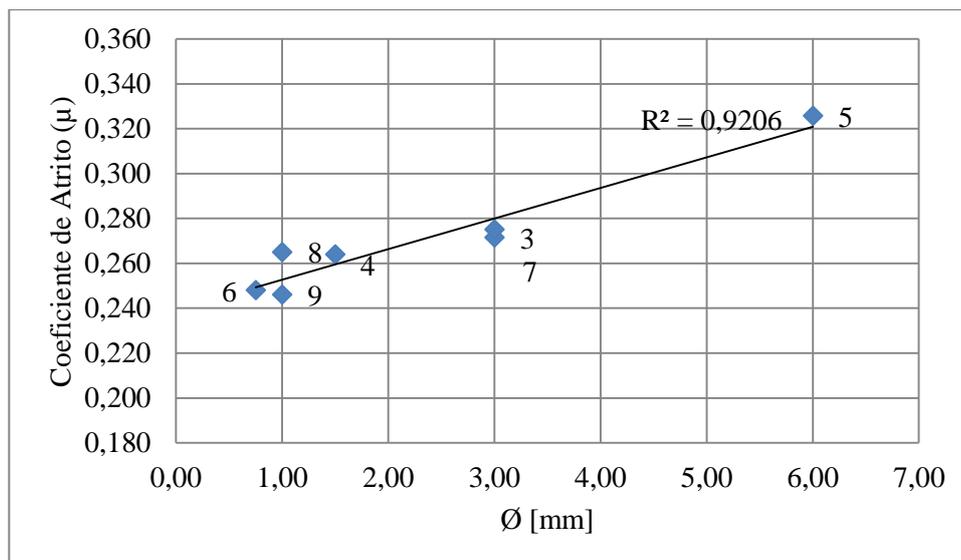
Uma comparação entre as ferramentas 3 e 4 (F4 apresenta metade dos valores de $d(c,c)$ e \emptyset em relação a F3 e maior valor de f) mostra que o coeficiente de atrito para a ferramenta 4 foi inferior ao da ferramenta 3. Esse é um resultado esperado devido ao maior valor de f , porém, pode ter sido influenciado também pelo menor valor de \emptyset . Um

fenômeno semelhante ocorreu entre as ferramentas 7 e 8, exceto que nesta situação os parâmetros $d(c,c)$ e \emptyset foram reduzidos em um terço.

As ferramentas 6 e 9 apresentam mesmo valor de $d(c,c)$, diâmetros das cavidades $\emptyset 6 = 0,75$ mm e $\emptyset 9 = 1,00$ mm e fator $f_6 = 31,4\%$ e $f_9 = 55,8\%$, respectivamente. Essa combinação de parâmetros gerou um coeficiente de atrito levemente inferior para F9. Esse é um resultado esperado devido ao maior valor de f , apesar da conclusão de que valor de \emptyset menores geralmente proporcionam melhores resultados. No entanto, nesse caso, o valor de f_9 é bastante superior a f_6 (77,7% superior), o que torna esse parâmetro mais relevante que o aumento no valor de \emptyset ($\emptyset 9$ é 33,3% superior a $\emptyset 6$).

As ferramentas 8 e 9 apresentam cavidades com mesmo diâmetro ($\emptyset = 1,0$ mm) e foram variados os valores de distância entre centros ($F_8 = 1,5$ mm e $F_9 = 1,25$ mm), gerando os respectivos valores de f ($f_8 = 39,5\%$ e $f_9 = 55,8\%$). Um coeficiente de atrito 7,3% inferior para F9 foi observado, o que pode estar relacionado também ao maior valor do fator f (menor área de contato entre chapa e ferramenta). O coeficiente de correlação (r) obtido entre o diâmetro dos furos e o coeficiente de atrito foi igual a 0,96, o que mostra uma correlação forte e positiva, ou seja, o coeficiente de atrito aumenta de forma direta com o aumento do diâmetro dos furos e sua dependência é alta. A Figura 39 ilustra relação entre o \emptyset e μ , onde pode ser confirmada a correlação obtida através dos cálculos.

Figura 39 - Relação entre \emptyset e μ para as ferramentas com estrutura superficial com geometria circular.

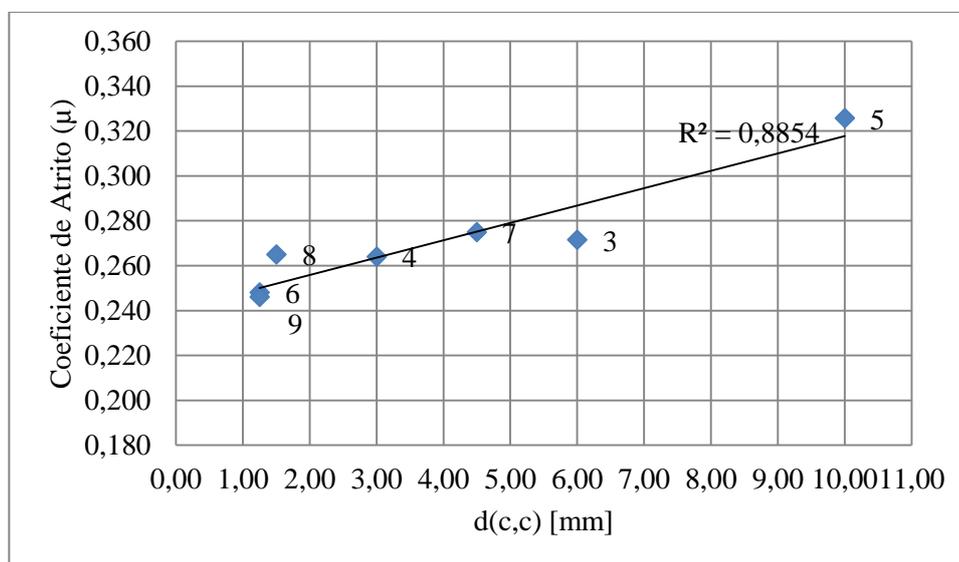


Fonte: Autor.

Um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,92 confirma que o modelo consegue explicar razoavelmente bem essa tendência. O valor obtido na correlação entre a distância entre centros e o coeficiente de atrito foi igual a 0,94, o que também representa uma correlação forte e positiva e, da mesma forma, o coeficiente de atrito aumenta de forma direta com o aumento da distância entre centros e sua dependência também é alta.

A Figura 40 ilustra a relação entre as variáveis analisadas, cuja forma condiz com o resultado obtido através da fórmula de correlação. O valor de R^2 igual a 0,88 também demonstra uma boa relação entre a utilização de um maior valor de $d(c,c)$ impactar no aumento de μ .

Figura 40 - Relação entre $d(c,c)$ e μ para as ferramentas com estrutura superficial com geometria circular.



Fonte: Autor.

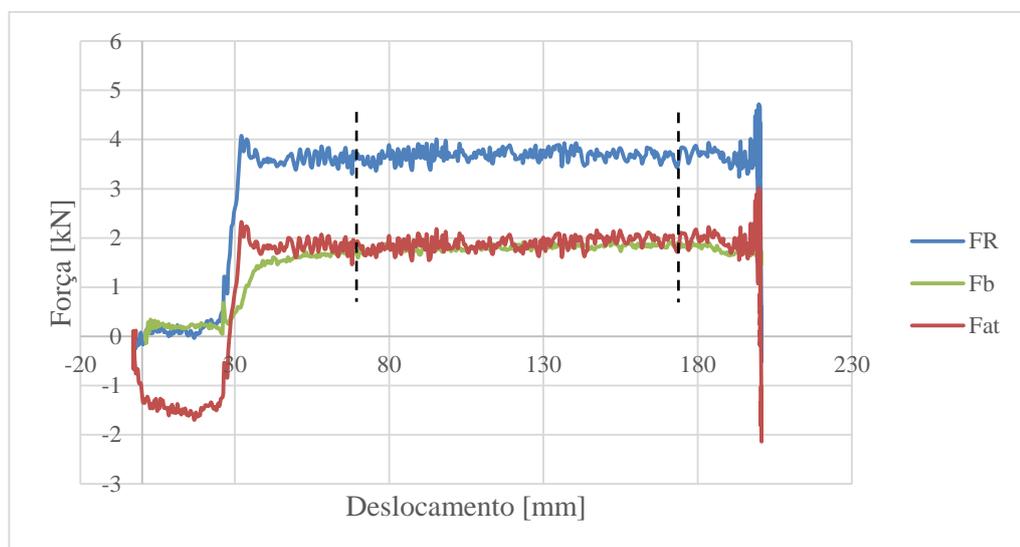
Ambas as situações mostram uma forte tendência de aumento do coeficiente de atrito com aumento do valor dos parâmetros $d(c,c)$ e \emptyset . Em geral, os coeficientes de atrito médio apresentaram um desvio padrão relativamente alto (Tabela 15). Isto está provavelmente relacionado com a adesão do material da tira na superfície das ferramentas, o que resulta no aumento da rugosidade da superfície, levando a uma variação no coeficiente de atrito medido para a tira subsequente.

4.3.2. Análise das Forças no Ensaio

Nesta etapa foram analisadas as forças atuantes no ensaio. A força resultante na ferramenta (FR) corresponde à diferença entre as forças de atuação e contra-tensão

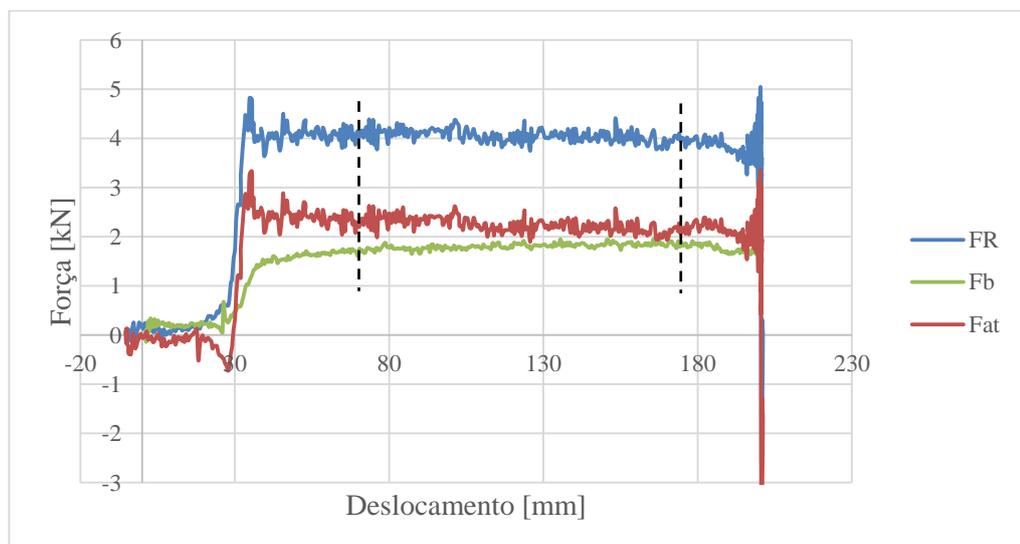
medidas em relação ao deslocamento de cada tira ensaiada em cada ferramenta de teste. A força de dobramento (F_b) corresponde à diferença entre as forças de atuação e contra-tensão medidas para cada tira ensaiada com o pino livre, de acordo com a Equação 6. Já a força de atrito (F_{at}) pode ser calculada utilizando a Equação 7, correspondendo a força resultante na respectiva ferramenta de teste subtraída da força de dobramento. Essas forças estão plotadas na Figura 41 (para a ferramenta lisa), na Figura 42 (para a ferramenta 5, que proporcionou o maior coeficiente de atrito) e na Figura 43 (para a ferramenta 9, que proporcionou o menor coeficiente de atrito).

Figura 41 - Comportamento das forças associadas ao ensaio com a ferramenta de teste 1.



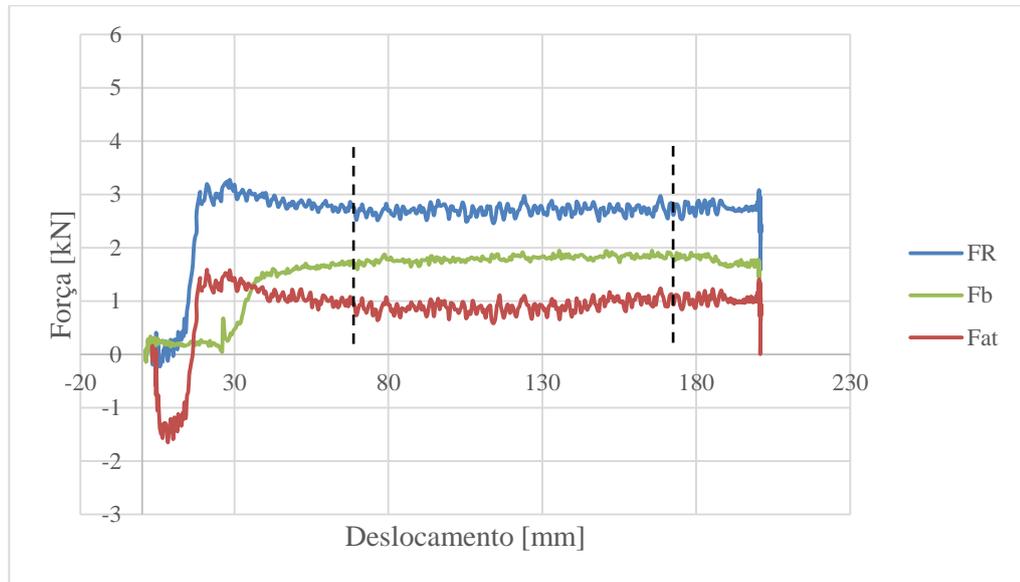
Fonte: Autor.

Figura 42 - Comportamento das forças associadas ao ensaio com a ferramenta de teste 5.



Fonte: Autor.

Figura 43 - Comportamento das forças associadas ao ensaio com a ferramenta de teste 9.



Fonte: Autor.

As curvas para as ferramentas 1, 5 e 9 foram selecionadas com o objetivo de proporcionar uma maior representatividade da análise e foram geradas considerando os valores obtidos no ensaio com a primeira tira ensaiada na ferramenta de teste e na ferramenta com pino livre. As curvas FR e Fb apresentaram comportamento similar para todas as ferramentas, apesar da ocorrência de valores mais elevados para a ferramenta 5 (o que é coerente com o fato desta ferramenta ter gerado maior coeficiente de atrito) e de valores mais baixos para a ferramenta 9 (o que é coerente com o fato desta ferramenta ter gerado menor coeficiente de atrito). Devido às instabilidades inerentes ao sistema, os trechos inicial e final das curvas apresentam uma maior variação. Por esse motivo, o cálculo do coeficiente de atrito na etapa anterior foi realizado considerando os valores de força em um deslocamento de 100 mm, no trecho das abcissas de 70 a 170 mm, representado nas figuras pela região entre as duas linhas pontilhadas nas figuras 41 a 43. Nesse trecho o ensaio apresentou comportamento mais estável e as forças apresentaram menor variabilidade ao longo da distância percorrida.

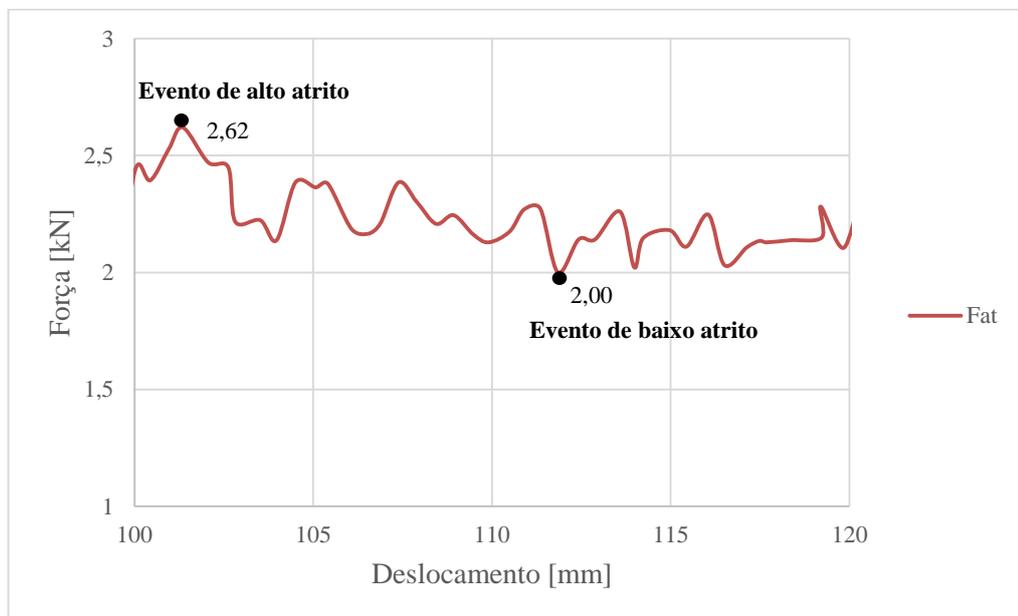
A análise das curvas mostra que a força resultante na ferramenta de teste (curva em azul, Fig. 41-43) oscilou com maior intensidade, quando comparada com a força de dobramento (curva em verde, Fig. 41-43). Essa oscilação acentuada pode estar associada à ocorrência mais expressiva de adesão do material da chapa na ferramenta de teste. Esse fenômeno é responsável por gerar tensões oscilantes sempre que há uma aderência e subsequente desprendimento de material da superfície original (FOLLE, 2012). No caso

do ensaio com pino livre, pelo fato do pino poder girar livremente, a adesão foi menos intensa.

Com relação à curva da força de atrito (curva em vermelho, Fig. 41-43), por ter sido obtida através da diferença entre FR e Fb (e não medida diretamente), ela apresenta valores inconsistentes nas regiões inicial e final, os quais podem ser desconsiderados nessa análise. Para a ferramenta 1 (Figura 41) a força de atrito foi muito semelhante à força de dobramento, praticamente sobrepondo a curva Fb. Com relação à ferramenta 5 (Figura 42), a curva Fat foi a que mais se aproximou da curva FR, o que é coerente com o fato desta ferramenta ter proporcionado o maior coeficiente de atrito. O inverso ocorreu com o tribossistema envolvendo a (Figura 43), de modo que os menores valores de força de atrito foram identificados para essa situação.

Conforme discutido na revisão do estado da arte e ilustrado pela Figura 4, o desgaste pode afetar as forças de atrito. Uma análise da força de atrito no trecho de 100 a 120 mm para a ferramenta 5 (Figura 44) mostra mais claramente a ocorrência de eventos de alto atrito (força igual a 2,62 kN) e baixo atrito (força igual a 2,00 kN), em torno de um valor médio da força de atrito para esse trecho.

Figura 44 - Ampliação de trecho da curva Fat para amostra ensaiada na ferramenta 5.



Fonte: Autor.

Realizando um comparativo com a Figura 4, entende-se que a condição em questão se aproxima mais da situação ilustrada na Figura 4c, ilustrando um tribossistema

onde a força de atrito varia (nesse caso, com pouca intensidade) com os eventos no processo de desgaste, o que é um comportamento típico de tribossistemas onde as partículas oriundas do processo de desgaste permanecem no sistema.

4.4. Caracterização do Material da Tira

Os ensaios de caracterização do material ensaiado, a saber, microscopia óptica, textura cristalográfica e microdureza, foram realizados em todas as amostras ensaiadas na etapa 2 de testes, que correspondem a amostras retiradas de tiras testadas nas ferramentas 1, 3, 4, 7 e 8. Essa escolha foi realizada devido ao fato dessa etapa ter abordado o maior número de ferramentas com parâmetros de $d(c,c)$ e \emptyset mais abrangentes, o que permitiu uma análise mais completa.

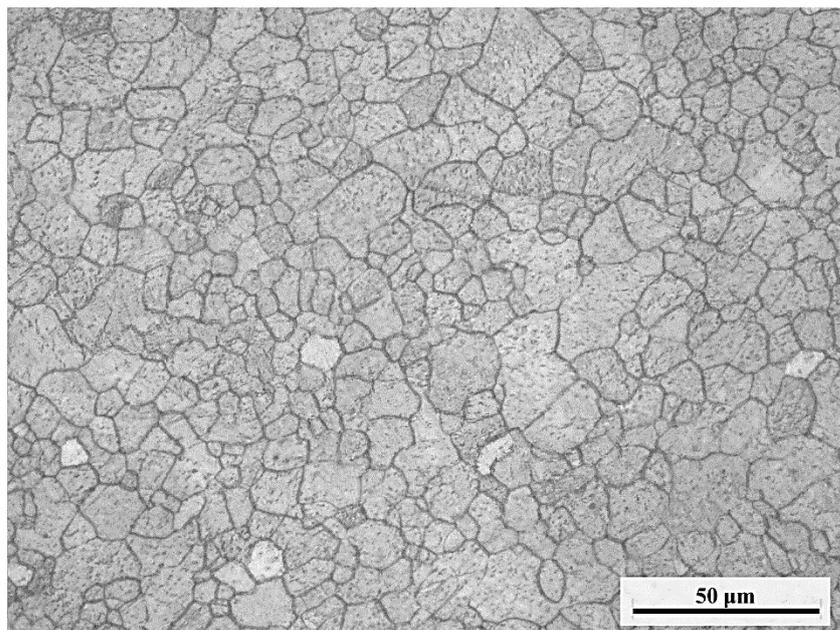
4.4.1. Microscopia Óptica

A microscopia óptica foi utilizada para avaliação da microestrutura e análise da presença de maclas no material como recebido e ensaiado.

4.4.1.1. Material como recebido

Primeiramente investigou-se a microestrutura da chapa como recebida. A micrografia mostra uma estrutura monofásica, conforme esperado (Figura 45).

Figura 45 - Microscopia óptica da liga AZ31B no estado como recebido. Ampliação de 500X.



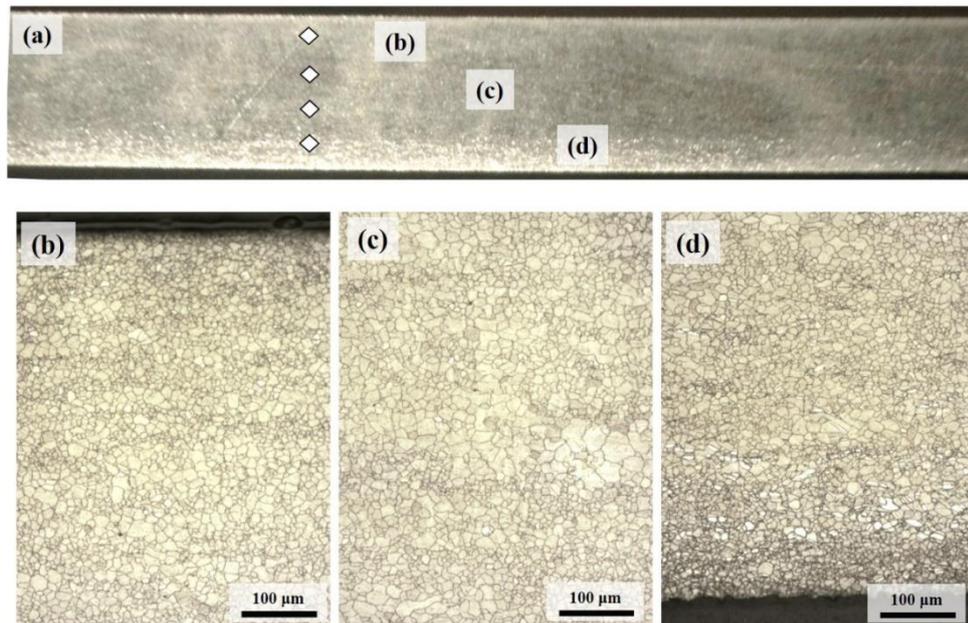
Fonte: Autor.

A microestrutura é constituída de grãos poligonais com tamanho médio de 12,36 μm . Não foi constatada a presença de maclas na microestrutura analisada. A medição da dureza Vickers indicou um valor médio de 59,4 HV, que é correspondente a uma dureza característica das ligas de magnésio AZ31B, segundo os valores encontrados por Coelho et al. (2008). O aspecto da microestrutura é condizente com ligas submetidas a tratamentos térmicos de recozimento após laminação, conforme informado pelo fabricante.

4.4.1.2. Material ensaiado

As análises microestruturais foram realizadas em três regiões identificadas por (b), (c) e (d) na Figura 46. Os resultados foram muito semelhantes para todas as amostras e, por isso, apenas a micrografia da tira ensaiada na ferramenta 1 é exibida na Figura 46, de modo que os resultados para as demais amostras estão incluídos no Anexo I deste trabalho.

Figura 46 - Microscopia óptica da liga AZ31B processada na ferramenta 1. Ampliação de 200X.



Fonte: Autor.

A região (b) corresponde ao segmento da seção transversal mais próximo da superfície superior da tira (superfície que não entrou em contato com a ferramenta). A região (c) corresponde ao centro da seção transversal e a região (d) refere-se ao trecho da seção transversal mais próximo da superfície inferior da tira (superfície que entrou em

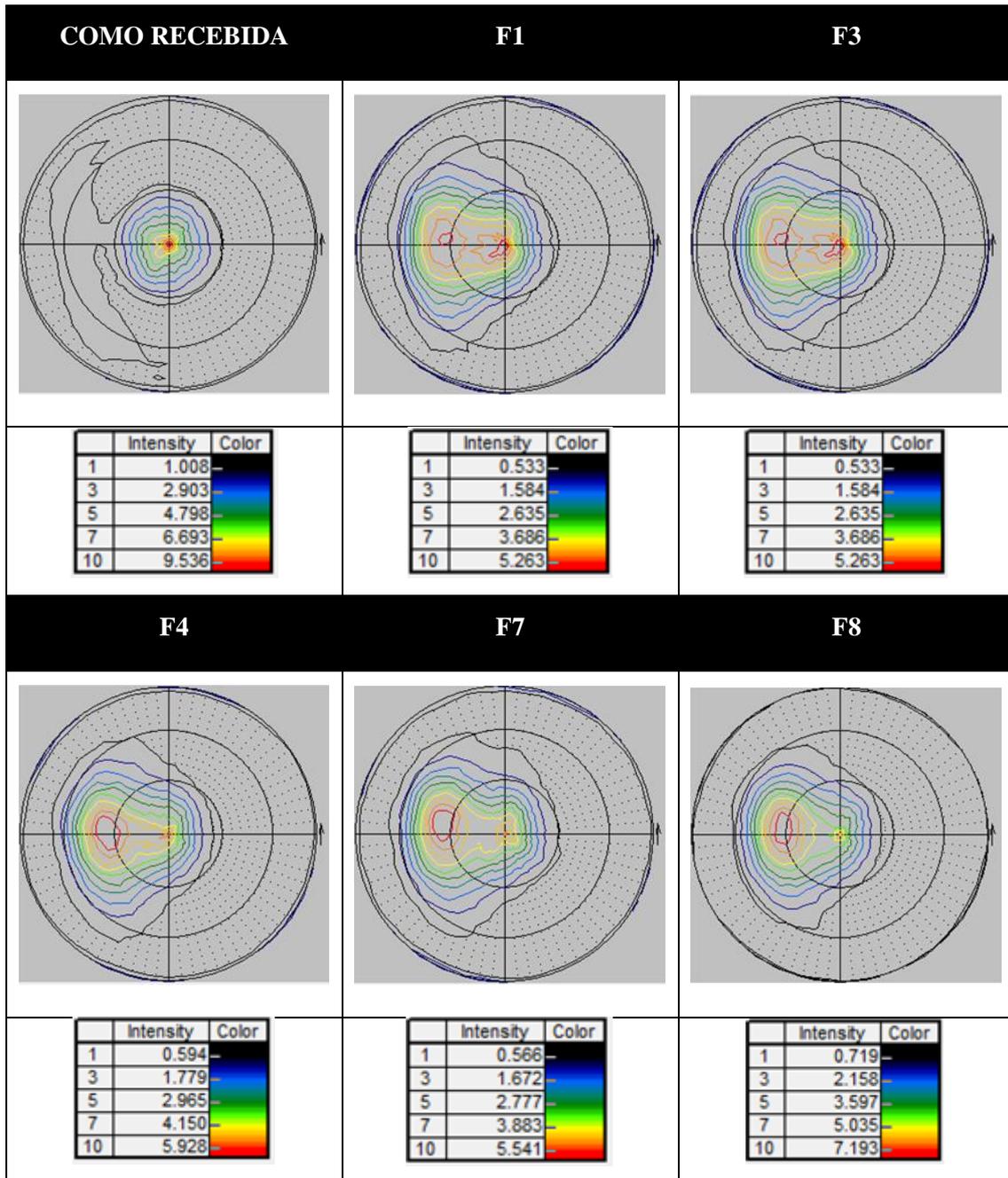
contato com a ferramenta). Para todas as amostras analisadas, as regiões (b) e (c) apresentaram microestrutura semelhante à do material como recebido, ou seja, uma estrutura com aparência monofásica, constituída de grãos poligonais com tamanho médio de 11,14 e 13,68 μm , respectivamente, e sem a presença de maclas. A região (d) apresentou aspecto diferenciado, com a presença de grãos menores (tamanho médio de 10,53 μm) e um maior volume de maclas, quando comparada às regiões (b) e (c), que não apresentaram indício da presença desse mecanismo de deformação.

Maclas, que são defeitos planares resultantes de deslocamentos atômicos produzidos por tensões de cisalhamento (maclas de deformação), aparecem como características microestruturais alongadas de diferentes comprimentos e larguras. Como as maclas foram detectadas em apenas uma das regiões da amostra, descarta-se a possibilidade delas terem sido geradas pelo processo de corte ou lixamento. Os resultados indicam, portanto, que as ferramentas 1, 3, 4, 7 e 8 provocam o mesmo efeito na microestrutura do material, independentemente de serem ou não ferramentas estruturadas (Anexo I). Acredita-se que essa tendência se repetirá para as demais ferramentas. Desse modo, conclui-se que a execução do processo com a utilização de ferramentas estruturadas não gera nenhum efeito diferenciado na microestrutura do material, em relação à utilização da ferramenta com superfície lisa. O aumento do volume de maclas está associado ao mecanismo de deformação das ligas de magnésio (CALLISTER, 2008; COELHO et al., 2013).

4.4.2. Análise de Textura Cristalográfica

A análise de textura cristalográfica realizada, investigando as figuras de polo 0002, revelou o mesmo comportamento para todas as chapas ensaiadas. Observa-se que as figuras de polo apresentadas na Tabela 16 exibem uma inclinação de aproximadamente 30° do plano basal 0002 na direção transversal, quando comparada à chapa como recebida. Levando-se em consideração que a análise foi feita na face que estava em contato com a ferramenta, pode-se relacionar essa rotação do plano basal com a formação de maclas nessa região (Figura 46d). No caso da amostra como recebida, não foi observado esse comportamento, o que era esperado, visto que a análise microestrutural não revelou a presença de maclas (Figura 46b).

Tabela 16 - Figuras de polo medidas para as tiras ensaiadas nas ferramentas 1, 3, 4, 7 e 8.



Fonte: Autor.

4.4.3. Ensaio de Microdureza

A medição da dureza na amostra como recebida e nas amostras ensaiadas na etapa 2 foi realizada ao longo de duas linhas na seção transversal, nos pontos indicados na Figura 46a. Os valores médios de dureza e o desvio padrão associado estão indicados na Tabela 17.

Tabela 17 - Valor médio de dureza e desvio padrão associado para as amostras ensaiadas.

AMOSTRA	DUREZA MÉDIA [HV0.3]	DESVIO PADRÃO [HV0.3]
Como Recebida	59,4	2,0
F1	64,4	2,4
F3	68,8	8,0
F4	64,2	2,2
F7	65,4	1,6
F8	67,3	4,3

Fonte: Autor.

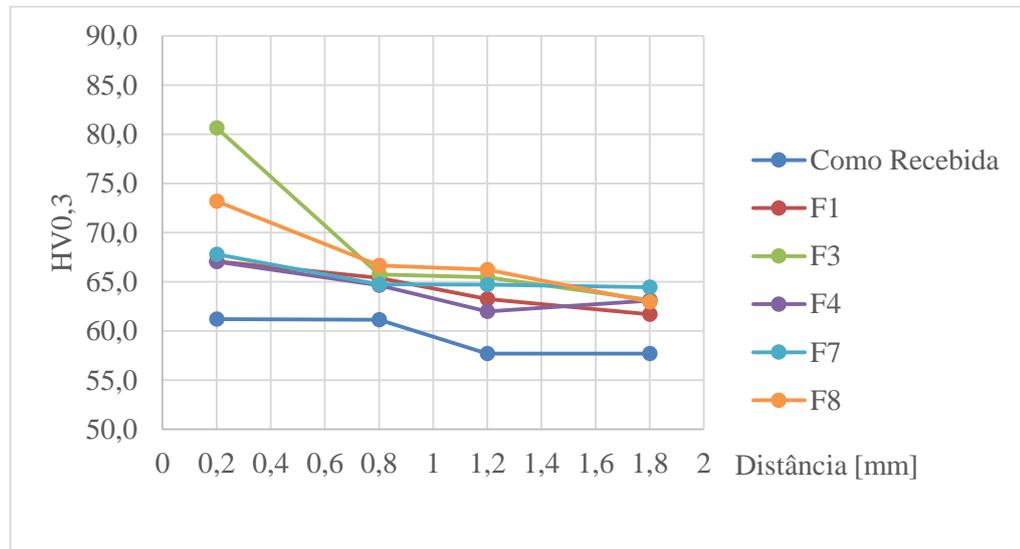
Para a amostra como recebida, o perfil de dureza apresentou valores muito próximos, o que era esperado. Um valor médio de $59,4 \pm 2$ HV0.3 foi calculado para essa amostra.

As amostras ensaiadas nas ferramentas de teste apresentaram dureza levemente superior à da amostra como recebida, o que é um indicativo de que o processo de conformação gerou algum grau de encruamento no material. Os valores médios de dureza para as amostras F1, F4 e F7 foram parecidos e apresentaram baixo desvio padrão. Para as amostras F3 e F8, a dureza foi mais elevada. Esse resultado pode ser devido ao penetrador ter atingido, em algum dos pontos, uma região mais dura do material, gerando valores extremos, o que é coerente com o elevado valor do desvio padrão associado. Descartando-se esses pontos fora da curva, os valores médios de dureza e desvio padrão para F3 e F8 seriam, respectivamente $64,8 \pm 1,4$ HV0.3 e $65,3 \pm 2,0$ HV0.3, o que é um resultado semelhante ao obtido para as demais ferramentas. Seguindo essas considerações, pode-se concluir que, tanto as ferramentas com estrutura superficial como a ferramenta lisa geraram o mesmo efeito na dureza do material.

A Figura 47 ilustra os valores médios de dureza em cada ponto para cada amostra avaliada. Conforme explicitado previamente, o eixo das abcissas aumenta da superfície não ensaiada (região (b) da Figura 46a) em direção à superfície que estava em contato com a ferramenta (região (d) da Figura 46a). Esse resultado indica que, mesmo na região com maior volume de maclas, a dureza foi levemente inferior. Durante o dobramento inerente ao ensaio, a superfície em contato com a ferramenta estava submetida a tensões de compressão, enquanto que a superfície não ensaiada estava submetida às tensões de tração. (COELHO et al., 2013) sugere que as maclas de compressão apresentam menor dureza, quando comparadas às maclas geradas por tensões de tração. Dessa forma,

acredita-se que a tendência de queda da dureza identificada pode estar associada ao fato do penetrador ter atingido regiões apresentando maclas de compressão.

Figura 47 - Resultados do ensaio de dureza nas amostras como recebida e ensaiadas.



Fonte: Autor.

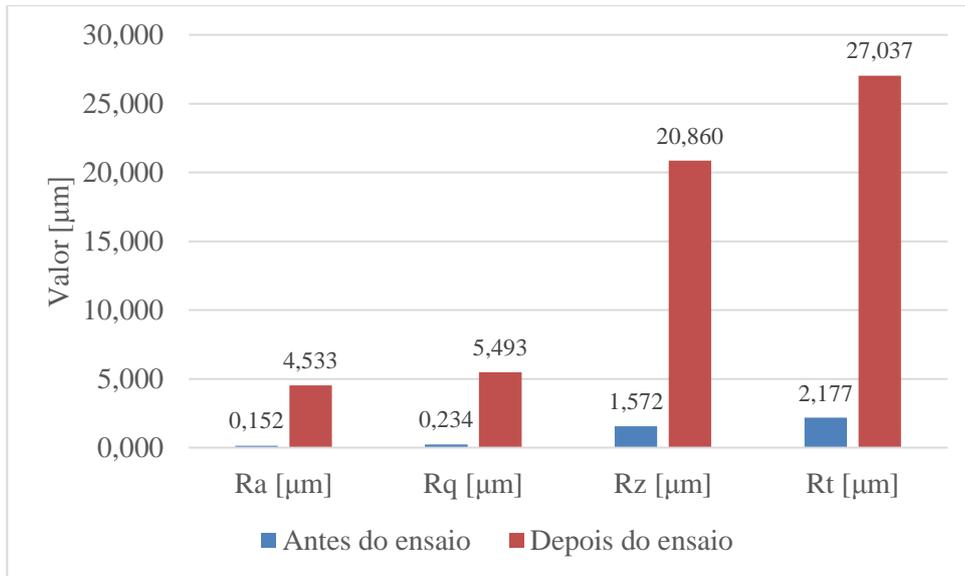
4.5. Análise das Ferramentas de Teste

4.5.1. Análise de Rugosidade Superficial

Utilizando o perfilômetro mecânico portátil a medição da rugosidade superficial da ferramenta lisa foi realizada após os ensaios de atrito entre essa ferramenta e cinco tiras de magnésio AZ31B. As medições foram realizadas seguindo a mesma metodologia utilizada para análise da rugosidade na ferramenta como fabricada, ainda não submetida aos ensaios tribológicos. Uma comparação entre o valor médio dos parâmetros de rugosidade medidos para a ferramenta lisa antes e após os ensaios de atrito estão exibidos na Figura 48.

Os resultados da Figura 48 indicam um aumento expressivo da rugosidade na superfície da ferramenta submetida ao ensaio de atrito. Esse resultado deve-se ao fenômeno de desgaste desenvolvido através da adesão de regiões do material da chapa na superfície da ferramenta de teste, conforme pode ser visualizado na Figura 49.

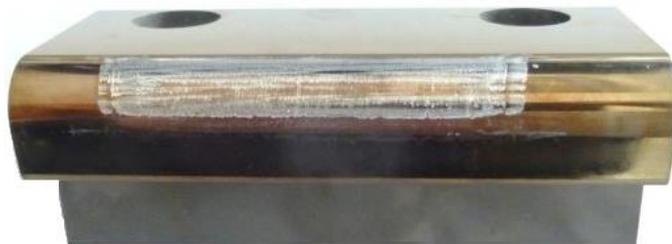
Figura 48 - Valores de rugosidade da ferramenta lisa antes e após ensaios de atrito.



Fonte: Autor.

A adesão de material da tira foi uma ocorrência verificada para todas as ferramentas de teste, inclusive para a ferramenta com superfície lisa, não sendo resultado, portanto, apenas das ferramentas com estrutura superficial. Como o desgaste não foi avaliado quantitativamente, não se pode informar com precisão quais ferramentas ocasionaram maior nível de desgaste. O desgaste por adesão é um dos grandes problemas associados aos processos de conformação, sendo a causa de problemas estéticos para a peça de trabalho e de condições de atrito instáveis para o processo de conformação (PODGORNIK et al., 2006).

Figura 49 - Adesão de material da chapa de magnésio na ferramenta lisa.



Fonte: Autor.

4.6. Avaliação Econômica

A utilização da tecnologia de ferramentas com estrutura superficial para estampagem de chapas de ligas de magnésio, associada à produção de componentes para

indústria automotiva, pode trazer benefícios econômicos para as montadoras e para os usuários finais dos veículos. Conforme indicado na Figura 24, esses ganhos podem estar associados a diferentes pontos da cadeia produtiva e também na utilização final. Uma análise de viabilidade econômica relacionada à utilização de ferramentas com estrutura superficial será realizada nos tópicos subsequentes, baseando-se nos pontos identificados na Figura 24 e nos dados previamente levantados. É importante ressaltar que, para a realização desse estudo, algumas considerações foram feitas, baseadas nos dados encontrados na literatura, o que indica que a análise econômica representa uma estimativa dos potenciais ganhos com a utilização da tecnologia proposta.

4.6.1. Impacto Econômico no Consumo de Energia Elétrica

O elevado custo da energia elétrica tem se tornado um dos gargalos nos processos produtivos. Nesse sentido, a redução no consumo de eletricidade é uma meta constante das empresas do setor industrial.

A indústria automobilística dos EUA gasta anualmente cerca de US\$ 3,6 bilhões em energia, para produção de 12 a 13 milhões de carros e caminhões leves (FULTON et al., 2001; GALITSKY et al., 2008). Considerando que: (1) o gasto de energia para produção de um veículo de passeio ou caminhão leve é o mesmo; (2) as plantas de produção de veículos apresentam eficiência energética semelhante em todo o mundo; (3) o número global de veículos de passeio produzidos anualmente gira em torno de 40 milhões (KULEKCI, 2008); pode-se estimar que o consumo anual de energia da indústria automobilística gira em torno de US\$ 11,5 bilhões. Desse montante, US\$ 7,7 bilhões correspondem ao gasto com energia elétrica, visto que, cerca de dois terços do gasto energético total nas montadoras está associado a esse tipo de energia (GALITSKY et al., 2008).

Segundo Galitsky et al. (2008), cerca de 2 a 9% de toda a eletricidade consumida nas plantas de montagem de veículos é devida a todos os processos de conformação, o que torna coerente considerar o valor médio de 5,5%. Como a estampagem se trata de um processo cujo volume de material conformado e cujas cargas envolvidas são menores, quando comparada a processos como forjamento e extrusão, considera-se que 10% de toda eletricidade utilizada nos processos de conformação seja devido a estampagem. Deste modo, baseado nas considerações feitas, 0,55% de toda eletricidade consumida pela indústria automotiva é relativa aos processos de estampagem, o que corresponde a um

montante financeiro de aproximadamente 42,2 milhões de dólares por ano para produção mundial de veículos de passeio.

Segundo Mousavi et al. (2014), a conformação com ferramentas estruturadas necessita de menos energia quando comparada a utilização de ferramentas convencionais, devido à minimização das forças de atrito na região com estrutura superficial. A análise entre as curvas de trabalho da força de atrito e trabalho total (Figura 13) utilizando ferramentas de conformação padrão e ferramentas com estrutura superficial, indica que a execução da conformação utilizando ferramentas estruturadas resulta em uma redução de aproximadamente 16,7% no trabalho da força de atrito e 8,1% na quantidade do trabalho total envolvido no processo, indicando que a redução de um determinado valor no trabalho da força de atrito representa uma redução de aproximadamente 50% desse valor no trabalho total do processo.

A redução do trabalho associado aos processos de conformação impacta diretamente na necessidade de menores cargas exercidas pelas prensas, o que acarreta em um menor consumo de energia. Para fins de análise, as seguintes considerações foram feitas:

(1) a redução de um determinado valor no trabalho da força de atrito representa uma redução de 50% desse valor no trabalho total do processo;

(2) a redução percentual do coeficiente de atrito é equivalente à redução a percentual no trabalho da força de atrito;

(3) a redução do trabalho total no processo se reflete basicamente em uma redução do consumo de energia elétrica;

(4) 20% das plantas de produção de veículos utilizem a tecnologia de ferramentas estruturadas;

Baseado na redução de 8,9% no valor de μ obtido nessa pesquisa, a qual representaria uma redução de aproximadamente 4,5% no trabalho total envolvido no processo, pode-se afirmar que a utilização dessa tecnologia gera uma economia financeira aproximada de US\$ 375.580,00 anualmente.

A análise do ganho percentual por cada companhia que utilize a tecnologia de ferramentas com estrutura superficial é mais simples e corresponde a uma redução de

aproximadamente 4,5% no consumo de energia elétrica, conforme as considerações realizadas.

4.6.2. Impactos Econômicos Associados à Utilização de Lubrificantes

Um dos resultados esperados com a utilização de ferramentas com estrutura superficial é a execução do processo de conformação a seco, ou seja, sem a utilização de lubrificantes. Para atingir esse objetivo, aprimoramentos nessa tecnologia ainda precisam ser desenvolvidos, para que seja factível a obtenção de uma redução ainda mais acentuada do coeficiente de atrito para o processo utilizando as ferramentas estruturadas, quando comparadas com a ferramenta convencional.

Caso avanços futuros possam promover a eliminação do uso de lubrificantes nos processos de estampagem utilizando ferramentas com estrutura superficial, os impactos econômicos poderão ser bastante representativos.

O primeiro impacto estaria relacionado à economia com o custo dos lubrificantes. De acordo com Jeffery (2003), os lubrificantes representam em torno de 0,5% do custo operacional total das operações de estampagem. Baseado nessa informação, pode-se inferir que uma companhia poderia economizar em torno de 0,5% do seu custo operacional, isso sem considerar os custos adicionais associados ao tratamento e descarte dos lubrificantes utilizados.

Para o caso da estampagem de chapas de ligas de magnésio, os benefícios econômicos da conformação sem lubrificação podem ser ainda mais significativos. De acordo com Wetzel (2012), as partículas remanescentes dos lubrificantes na superfície dos componentes de ligas de magnésio estampados dificultam a adesão da camada de revestimento posteriormente aplicada ao componente, o que pode ocasionar em uma baixa qualidade superficial da peça e em uma baixa resistência à corrosão do componente. Baseado nessas informações, pode-se inferir que a economia associada à redução de refugo (componentes com cobertura superficial defeituosa) pode reduzir o custo produtivo total. A Tabela 18 mostra a comparação entre as ferramentas padrão e estruturadas com relação aos impactos econômicos diretos e indiretos da utilização de lubrificantes.

Tabela 18 - Comparação entre as ferramentas padrão e estruturadas com relação aos impactos econômicos diretos e indiretos da utilização de lubrificantes.

Item	Ferramenta Padrão	Ferramenta Estruturada
Gasto ² com lubrificantes	0,50%	0,00%
Gasto com descarte de lubrificantes	0,05% ³	0,00%
Peças com cobertura defeituosa (devido efeito dos lubrificantes)	Sim	Não
CUSTO TOTAL (%)⁴	> 0,55%	0,00%

Fonte: Autor.

Sem considerar quantitativamente a economia associada à redução de refugo, em virtude da insuficiência de dados disponíveis na literatura, estima-se que uma economia de 0,55% em relação aos custos produtivos devido à redução de custos com lubrificantes pode ser alcançada em uma planta de fabricação de automóveis após aprimoramentos na tecnologia proposta. No entanto, os resultados obtidos ainda indicam que a conformação livre de lubrificação não se mostra plenamente viável.

4.6.3. Impactos Econômicos Relacionados ao Ferramental de Estampagem

Baseado no estudo realizado por Monteiro (2001), aproximadamente 7% dos custos totais associados à fabricação de um componente são relativos à produção do ferramental de estampagem. Realizar uma análise dos impactos econômicos associados à utilização de ferramentas com estrutura superficial nos custos dos ferramentais de estampagem em uma linha automotiva depende de dados como: (1) definição de um tipo de componente produzido por estampagem; (2) quantidade de componentes produzidos com o ferramental padrão e com o ferramental com superfície estruturada. Essa análise envolveria a necessidade de um estudo específico dentro de uma planta automotiva. No entanto, para fins de uma análise quantitativa preliminar as seguintes considerações foram feitas:

(1) os custos relativos à produção do ferramental de estampagem representam cerca de 7% dos custos totais;

² Valores em função do custo produtivo total.

³ Foi considerado que o gasto com descarte representa 10% do custo dos lubrificantes.

⁴ Em função do custo produtivo total.

(2) ferramentas com estrutura superficial reduzem a área efetiva de contato (KARBASIAN et al., 2010). Menor área de contato pode reduzir a ocorrência do desgaste por adesão, impactando em um aumento da vida útil das matrizes de conformação;

(3) a redução percentual do coeficiente de atrito é equivalente à redução percentual da força de atrito.

Baseado na redução de 8,9% no valor de μ obtido nesta pesquisa, a qual representaria uma redução equivalente na força de atrito e considerando a relação entre a redução nas forças de atrito com o aumento da vida útil do ferramental, pode-se estimar que, para uma planta de fabricação de componentes automotivos envolvendo processos de estampagem, a estruturação das superfícies de contato pode aumentar a vida útil do ferramental de estampagem em aproximadamente 8,9%. Esse aumento na vida útil pode representar valores extremamente significativos, em virtude dos elevados custos desses ferramentais, além de impactar na produção de um maior número de componentes durante o ciclo de vida da matriz.

4.6.4. Impactos Econômicos Associados à Ampliação da Utilização de Ligas de Magnésio

Conforme discutido anteriormente, a utilização de ligas de magnésio em substituição a componentes convencionalmente produzidos em materiais de maior densidade (aço, alumínio, etc.) pode ser uma solução para alcançar a almejada redução de peso dos veículos. O Instituto Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology (IWU) já vem desenvolvendo pesquisas com esse intuito, tendo como um importante resultado, a produção de uma porta automotiva em chapa de magnésio, que, quando comparada a uma porta de aço, representou uma redução no peso de 10,7 kg para 4,7 kg (FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT, 2011)

Com o objetivo de avaliar os impactos econômicos da redução do consumo de combustível devido à redução de peso do veículo, os resultados obtidos pelo Fraunhofer IWU foram considerados para esse estudo. Além disso, considerou-se que a redução de peso de 100 quilogramas representa uma economia de combustível de cerca de 0,5 litros para 100 quilômetros percorridos por um veículo (KULEKCI, 2008), e que um veículo possui 4 portas laterais e uma porta traseira (tampa do porta malas), totalizando uma possibilidade de se fabricar 5 portas em liga de magnésio. A Tabela 19 indica outras

considerações realizadas e o resultado dessa análise de viabilidade econômica preliminar, em termos da economia com combustível em R\$, anualmente, pela frota considerada.

Baseado nos resultados desse estudo, pode-se constatar que é possível obter uma economia anual de 240 milhões de litros de combustível ou, aproximadamente, R\$ 900 milhões, o que representam valores bastante representativos. Apesar da economia anual para um motorista que percorre em torno de 20.000 km/ano não ser tão significativa (\approx R\$ 112,00), para motoristas que percorrem maiores distâncias essa redução no consumo pode se mostrar significativa.

Tabela 19 - Análise de viabilidade econômica da utilização de componentes de magnésio AZ31B em veículos de passeio.

Item	Unidade	Valor
Quilometragem percorrida/ano	Km	20.000
Quantidade de portas/veículo	und	5
Peso/porta (em aço)	kg	10,7
Peso/porta (em Mg)	kg	4,7
Redução de peso/porta	kg	6,0
Redução de peso/veículo	kg	30,0
Economia de combustível/kg reduzido (por veículo)	L/100 km	0,005
Economia de combustível/veículo ⁵	L/100 km	0,15
Economia de combustível anual/veículo	L	30
Economia de combustível anual/veículo	R\$	112,5
Produção anual de veículos	milhões	40
% da produção anual considerada	%	20%
Total de veículos considerado	milhões	8
Preço médio da gasolina no Brasil	R\$	3,75
Economia de combustível/ano/frota considerada	milhões de L	240
Economia com combustível/ano/frota considerada	milhões de R\$	900,00

Fonte: Autor.

Outro ponto relevante é a redução das emissões de CO₂ associadas à redução no consumo de combustível. A redução estimada de 0,15 litros de combustível para 100 quilômetros percorridos resulta, aproximadamente, em uma redução de 3,5 gramas de CO₂ por quilômetro percorrido. Esse é um resultado relevante que auxilia no atendimento das regulamentações vigentes de emissões de CO₂. Considerando as penalidades existentes, as quais o fabricante deverá pagar uma multa relativa à emissões excedentes

⁵ Considerando a redução de 30 kg em virtude da fabricação das 5 portas em liga de magnésio.

para cada automóvel registado, uma redução em 3,5 g CO₂/km pode significar uma economia de aproximadamente 92,5 Euros⁶ por veículo produzido para qualquer montadora na Europa. A partir de 2019, esse valor poderia passar para 332,5 Euros⁷, de acordo com as novas taxas que serão cobradas a partir desse ano.

A partir dessas análises fica evidenciado o grande potencial da utilização de ferramentas com estrutura superficial associada à produção de componentes estampados de chapas de magnésio para a indústria automotiva, do ponto de vista econômico. Estudos mais representativos devem ser feitos para cada caso, porém, simplificada, as ferramentas estruturadas apresentam grande potencial, principalmente associado à redução do consumo de energia nos processos de conformação e de consumo de combustível pelos automóveis.

⁶ O cálculo considerou uma multa de 5 Euros para o primeiro grama de CO₂ em excesso por quilômetro percorrido, 15 € para o segundo g/km, 25 € para o terceiro g/km e 95 € por cada g/km subsequente.

⁷ A partir de 2019, a penalidade será de 95 € a partir do primeiro grama excedido em diante.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

A partir dos ensaios e análises realizadas foi possível constatar que a utilização de ferramentas com estrutura superficial apresenta potencial para redução do atrito na conformação de chapas de ligas de magnésio AZ31B. A ferramenta estruturada superficialmente com cavidades de diâmetro (\emptyset) igual a 1,0 mm e distância entre centros (d(c,c)) igual a 1,25 mm proporcionou melhor desempenho, com uma redução de aproximadamente 8,9% no coeficiente de atrito, quando comparada com a ferramenta com superfície lisa. Esse resultado, apesar de não representar uma redução significativamente elevada no coeficiente de atrito, pode trazer ganhos expressivos em termos de economia de energia no processo de conformação. No contexto da utilização de estruturas superficiais em matrizes industriais, os menores níveis de atrito no processo podem implicar em um menor desgaste desses ferramentais, proporcionando um aumento na vida útil. Apesar do grande interesse na eliminação da utilização de lubrificantes na conformação de chapas de ligas de magnésio, acredita-se que a redução no coeficiente de atrito alcançada ainda não seja suficiente para executar a conformação a seco. No entanto, investigações precisam ser realizadas para comprovação deste ponto. Por hora, pode-se supor que o menor nível de atrito no processo impactará em um menor consumo de lubrificantes. Economicamente, a perspectiva de utilização da tecnologia de ferramentas com estrutura superficial é positiva, visto que, além de ganhos financeiros diretamente relacionados à eficiência energética do processo e aumento da vida útil do ferramental, essa tecnologia também pode atuar como um impulsionador para a ampliação do uso de ligas de magnésio na indústria automotiva. Esse material, devido à sua baixa densidade, representa uma solução promissora para redução de peso dos veículos, trazendo como resultado o menor consumo de combustível e, conseqüentemente, menores emissões de gases de efeito estufa.

A partir dos itens estudados, os seguintes detalhamentos podem ser destacados:

- A superfície estruturada com maior valor do fator f proporcionou um menor coeficiente de atrito, o que é um resultado esperado em virtude da menor área de contato real entre a superfície da ferramenta e a tira ensaiada;

- A superfície estruturada com cavidades de maior diâmetro gerou um maior coeficiente de atrito, mesmo essa ferramenta não apresentando o menor valor de f . Esse resultado pode ser proveniente do contato entre a tira e a base das cavidades, gerando uma condição de atrito mais elevada;
- Em geral, os coeficientes de atrito médio apresentaram um desvio padrão relativamente alto, o que possivelmente está relacionado com a adesão do material da tira na superfície das ferramentas, resultando no aumento da rugosidade da superfície, levando a uma variação no coeficiente de atrito medido para a tira subsequente;
- A análise das curvas da força de atrito mostrou a ocorrência de eventos de alto e baixo atrito, indicando uma situação onde partículas provenientes do desgaste da superfície da chapa permanecem no sistema, gerando oscilações na força de atrito;
- A caracterização do material da chapa como recebida e ensaiada mostrou que as ferramentas provocam o mesmo efeito no material, independentemente de serem estruturadas ou de possuírem superfície lisa. Esse aspecto foi observado em termos das análises microestruturais com microscópio óptico, que mostraram grão de menores dimensões e um maior volume de maclas próximo à superfície da tira que estava em contato com a ferramenta;
- As análises de textura cristalográfica confirmaram esse resultado, visto que as figuras de polo exibiram uma inclinação de aproximadamente 30° do plano basal 0002 na direção transversal, de modo que essa rotação está relacionada com a formação das maclas;
- Os ensaios de microdureza exibiram valores de dureza extremamente semelhantes para o material ensaiado tanto nas diferentes ferramentas com estrutura superficial quanto na ferramenta padrão. Esses valores foram levemente superiores àqueles apresentados pelo material como recebido, o que está coerente com o encruamento do material durante a conformação;
- Do ponto de vista econômico, baseado nas considerações realizadas, uma planta de produção de automóveis pode obter uma redução de 4,5% no

consumo de energia elétrica com a utilização de ferramentas de estampagem mediante a tecnologia de superfícies estruturadas.

5.2. Proposta de Trabalhos Futuros

A partir deste estudo, alguns trabalhos futuros são recomendados para a obtenção de mais informações sobre a tecnologia de ferramentas estruturadas:

- i. Avaliar a reprodutibilidade dos resultados obtidos com o conceito das ferramentas F6 e F9, que proporcionaram os melhores resultados;
- ii. Realizar estudos futuros, levando em consideração a correlação das variáveis apresentadas neste trabalho, permitindo avançar no experimento de otimização e, conseqüentemente, na determinação de uma janela ótima dos parâmetros \emptyset e $d(c,c)$;
- iii. Desenvolver estudos visando analisar a adesão de material na superfície da ferramenta padrão e das ferramentas estruturadas sob diferentes condições: com lubrificante e sem lubrificante;
- iv. Avaliar os efeitos tribológicos de conceitos de superfícies estruturadas com cavidades ainda menores, em nível micrométrico, ou seja, microestruturas.

REFERÊNCIAS

- AGHION, E.; BRONFIN, B. Magnesium Alloys Development towards the 21st Century. **Materials Science Forum**, v. 350–351, p. 19–30, 2000.
- ALTAN, T.; TEKKAYA, A. E. **Sheet metal forming: processes and applications**, 2012. (Nota técnica).
- AMARAL, R.; CHONG, L. H. **Surface Roughness**. [s.l: s.n.].
- ANDREASEN, J. L.; BAY, N.; ANDERSEN, M.; E.CHRISTENSEN; N.BJERRUM. Screening the performance of lubricants for the ironing of stainless steel with a strip reduction test. **Wear**, v. 207, n. 1–2, p. 1–5, 1997.
- ARCELORMITTAL. **Bake hardening steels**. [s.l: s.n.].
- ASIAN-METAL. **Magnesium uses**. Disponível em: <<http://metalpedia.asianmetal.com/metal/magnesium/application.shtml>>. Acesso em: 12 fev. 2017.
- ASTM. **ASTM B90/B90M-13 Standard Specification for Magnesium-Alloy Sheet and Plate**. [s.l: s.n.].
- AUTOMOTIVE-NEWS. **GM tests magnesium sheet metal to take weight out of cars**. Disponível em: <<http://www.autonews.com/article/20121023/OEM01/121029965/gm-tests-magnesium-sheet-metal-to-take-weight-out-of-cars>>. Acesso em: 28 fev. 2017.
- AUTOSTEEL. **IF Rephos GA**. Disponível em: <<http://www.autosteel.org/research/ahss-data-utilization/if-rephos-ga.aspx>>. Acesso em: 22 set. 2017.
- AVEDESIAN, M.; BUKER, H. **Magnesium and magnesium alloys**, 1999. (Nota técnica).
- AVITZUR, B. **Friction during Metal Forming**. ASM Handbook, 1992. (Nota técnica).
- BARTELS, T. **Lubricants and lubrication**. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, , 2005. (Nota técnica).
- BLAWERT, C.; HORT, N.; KAINER, K. U. Automotive Applications of Magnesium and Its Alloys. **Trans. Indian Inst. Met**, p. 397–408, 2004.
- BOBA, M. Warm Forming Behaviour of ZEK100 and AZ31B Magnesium Alloy Sheet.

p. 148, 2014.

BÖHLER, E. G. & C. K. **Produktinformation Böhler W400 VMR**. Disponível em: <<http://www.bohler-edelstahl.com/files/W400DE.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2014.

BÖRNER, R.; SCHOLZ, P.; KÜHN, R.; SCHUBERT, A.; ZEIDLER, H.; MÜLLER, R. **Micro structuring of coated tools for dry sheet metal forming of aluminium alloys**. n. June, 2015.

BROKMEIER, H.; YI, S.-B. Texture and Texture Analysis in Engineering Materials. In: **Neutrons and Synchrotron Radiation in Engineering Materials Science: From Fundamentals to Material and Component Characterization**. [s.l: s.n.]. p. 57–77.

BRUZZONE, A. A. G.; COSTA, H. L.; LONARDO, P. M.; LUCCA, D. A. Advances in engineered surfaces for functional performance. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, n. 2, p. 750–769, 2008.

BUDINSKI, K. G. **Laboratory testing methods for solid friction** ASM Handbook, , 1992. (Nota técnica).

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 7ª Edição ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2008.

CARLSSON, P. **Surface Engineering in Sheet Metal Forming**. Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis, 2005.

CATORCENO, L. L. C. **Estudo do encruamento, recristalização e crescimento de grão em chapa da liga de magnésio AZ31B (Mg–3% Al–1% Zn–0,3% Mn)**. p. 230, 2013.

CLIMATE ACTION. **Reducing CO2 emissions from passenger cars** CLIMATE ACTION, 2012.

COELHO, R. S. Joining of light-weight materials by friction stir welding and laser beam welding. **Bochum: Europäischer Universität**, 2009.

COELHO, R. S.; KLAUS, M.; GENZEL, C. Analysis of Texture Depth Distribution by Energy-Dispersive Diffraction. **Materials Science Forum**, p. 36–43, 2013.

COELHO, R. S.; KOSTKA, A.; PINTO, H.; RIEKEHR, S.; KOÇAK, M.; PYZALLA, A. R. Microstructure and Residual Stresses in Dissimilar Mg-Al-Zn-Alloy Single Overlap Laser Beam Welds. **Materials Science Forum**, v. 571–572, p. 361–366, 2008.

DALTON, G.; OULTON, N. **Lubrication evaluation test methods**. Midland, Ont.: [s.n.].

DAVIES, G. **Magnesium. Materials for automotive bodies**. p. 91, 158, 159., 2003.

DOEGE, E.; DRO, K. **Sheet metal forming of magnesium wrought alloys — formability and process technology**. v. 115, p. 14–19, 2001.

EVANS, C. J.; BRYAN, J. B. “Structured”, “Textured” or “Engineered” Surfaces. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 48, n. 2, p. 541–556, 1999.

FACCIO, I. **Investigações sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2002.

FIELD, A. **Discovering statistics using SPSS**. Londres: [s.n.].

FOLLE, L. F. **Estudo do Coeficiente de Atrito para Processos de Estampagem Estudo do Coeficiente de Atrito para Processos de Estampagem**. 2012.

FOLLE, L. F.; FERRARINI, J. L.; SCHAEFFER, L. Determinação do coeficiente de atrito por meio de ensaio de dobramento sob tensão. **Corte & Conformação de Metais**, n. 9, 2011.

FOOK, M. V. L.; CARDOSO, M. J. B. **Estrutura Cristalina**. 1ª ed. Brasil: Editora Artliber, 2015.

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT. **Resource-Friendly Car Manufacturing**. Disponível em: <<https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2011/april/resource-friendly-car-manufacturing.html>>. Acesso em: 19 mar. 2017.

FRAUNHOFER-IWU. **Press Hardening of Sheet Metal and Closed Profiles**. Disponível em: <<https://www.iwu.fraunhofer.de/content/dam/iwu/en/documents/Brochures/IWU-KB-Press-Hardening-of-Sheet-Metal-and-Closed-Profiles.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2017.

FRIEDRICH, H. E.; L.MORDIKE, B. **Magnesium Technology**. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2006. v. 1

FULTON, G. A.; D.R., G.; L.G., S.; S.P., M.; B.C., R. **Contribution of the Automotive Industry to the U.S. Economy in 1998: The Nation and its Fifty States**. 2001.

GÅÅRD, A.; HALLBÄCK, N.; KRAKHMALOV, P.; BERGSTRÖM, J. Temperature effects on adhesive wear in dry sliding contacts. **Wear**, v. 268, n. 7–8, p. 968–975, 2010.

GALITSKY, C.; WORRELL, E. **Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Vehicle Assembly Industry: An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers**. Berkeley, CA: [s.n.]. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/8h25n5pr%5Cnhttp://www.escholarship.org/help_copyright.html#reuse>.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. DOS. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000.

GECK, P.; KERSCHAEVER, R. VAN. **New Steel Materials for Doors**. [s.l.: s.n.].

GHASSEMIEH, E. Materials in Automotive Application , State of the Art and Prospects. **New Trends and Developments in Automotive Industry**, p. 365–394, 2011.

GOTTSTEIN, G. **Physical foundations of materials science**. Germany: Springer Science & Business Media, 2004.

GRANDVIEWRESEARCH. **Lubricants Market Size, Share & Trends, Industry Report 2022**. Disponível em: <<http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lubricants-market>>. Acesso em: 5 mar. 2017.

HAO, S.; KLAMECKI, B. .; RAMALINGAM, S. Friction measurement apparatus for sheet metal forming. **Wear**, v. 224, n. 1, p. 1–7, 1999.

HOUSH, S.; MIKUCKI, B. **Selection and Application of Magnesium and Magnesium Alloys**ASM International, , 1990. (Nota técnica).

HUTCHINGS, I. M.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. n. London, 1992.

ING, A. Biobased Lubricants: A Viability Study. **Proceedings of the 53th Annual Meeting of the International Society for the Systems Sciences**, 2009.

JEFFERY, B. **Investing in lubricants**. Disponível em: <<http://www.thefabricator.com/article/stamping/investing-in-lubricants>>. Acesso em: 5 mar. 2017.

KARBASIAN, H.; TEKKAYA, A. E. A review on hot stamping. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 15, p. 2103–2118, 2010.

KAYA, S. **Improving the formability limits of lightweight metal alloy sheet using advanced processes-finite element modeling and experimental validation**. [s.l.] The

Ohio State University, 2008.

KIM, D. E.; CHA, K. H.; SUNG, I. H.; BRYAN, J. Design of Surface Micro-structures for Friction Control in Micro-systems Applications. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 51, n. 1, p. 495–498, 2002.

KIM, W. J.; KIM, H. K.; KIM, W. Y.; HAN, S. W. Temperature and strain rate effect incorporated failure criteria for sheet forming of magnesium alloys. **Materials Science and Engineering A**, v. 488, p. 468–474, 2008.

KRUX, R.; HOMBERG, W.; KALVERAM, M.; TROMPETER, M.; KLEINER, M.; WEINERT, K. Die Surface Structures and Hydrostatic Pressure System for the Material Flow Control in High- Pressure Sheet Metal. **Advanced Materials Research**, v. 6–8, n. Maio 2015, p. 385–392, 2005.

KULEKCI, M. K. Magnesium and its alloys applications in automotive industry. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 39, n. 9–10, p. 851–865, 2008.

LAEMMLE, J. T. **Metalworking Lubricants**, 1992. (Nota técnica).

LANZON, J. M.; CARDEW-HALL, M. J.; HODGSON, P. D. Characterising frictional behaviour in sheet metal forming. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 80–81, p. 251–256, 1998.

LARSEN-BASSE, J. **Basic Theory of Solid Friction** ASM Handbook, , 1992. (Nota técnica).

LICHT, O. A. B.; PLAWIAK, R. A. B. **Levantamento geoquímico multielementar do Estado do Paraná**. Curitiba: [s.n.].

LOVELL, M.; HIGGS, C. F.; DESHMUKH, P.; MOBLEY, A. Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly lubricants. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 177, n. 1–3, p. 87–90, 2006.

MANG, T. Lubricants and their Market. **Lubricants and Lubrication: Second Edition**, p. 1–6, 2007.

MATWEB. **AK Steel Cold Rolled Carbon Steel, Bake Hardenable (BH 210), SAE J2340 Type 210 B**.

MDIC. **Conheça o InovarAuto.** Disponível em: <http://inovarauto.mdic.gov.br/InovarAuto/public/inovar.jspx?_adf.ctrl-state=ckbbbxe0v_19>. Acesso em: 28 fev. 2017.

MGF. **Data sheet das chapas de liga de magnésio AZ31B.** Freiberg: [s.n.].

MOCK, P. EU CO2 standards for passenger cars and light-commercial vehicles. **International Council on Clean Transportation**, n. January, p. 1–9, 2014.

MONFORT, G.; DEFOURNY, J. **Surface roughness and friction in press forming.** Luxembourg: [s.n.].

MONTEIRO, A. J. M. **Production Cost Modeling for the Automotive Industry.** [s.l.] Universidade Técnica de Lisboa, 2001.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros.** [s.l.] Grupo Gen-LTC, 2012.

MOUSAVI, A.; SCHOMÄCKER, M.; BROSIUS, A. Macro and micro structuring of deep drawing 's tools for lubricant free forming. **Procedia Engineering**, v. 81, n. October, p. 1890–1895, 2014.

MÜLLER, R. **Streifenziehenanlage Funktionsprinzip.** Chemnitz: [s.n.].

MÜLLER, R.; MOSEL, A. Characterisation of Tool Coatings for Press Hardening. **Advanced Materials Research**, v. 966–967, p. 259–269, 2014.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos.** Campinas: Unicamp, 2001.

OLSSON, D. D.; BAY, N.; ANDREASEN, J. L. Prediction of limits of lubrication in strip reduction testing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 53, n. 1, p. 231–234, 2004.

PARRA, B. S.; GENNARI, R. C.; MELCHIADES, F. G.; FEDERAL, U.; CARLOS, D. S.; LUIZ, R. W.; SP, S. C. Rugosidade Superficial de Revestimentos Cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 2, p. 15–18, 2006.

PĂUNOIU, V.; NICOARĂ, D. Simulation of friction phenomenon in deep drawing process. **THE ANNALS OF UNIVERSITY “DUNĂREA DE JOS“ OF GALAȚI**, n. September, 2003.

PETTERSSON, U.; JACOBSON, S. Influence of surface texture on boundary lubricated

sliding contacts. **Tribology International**, v. 36, n. 11, p. 857–864, 2003.

PODGORNIK, B.; HOGMARK, S. Surface modification to improve friction and galling properties of forming tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 174, n. 1–3, p. 334–341, 2006.

QAMAR, A. **Dual-Phase Steel for Door Outer Application**. [s.l.: s.n.].

RICHTER, K.; HAASE, R.; SCHIECK, F.; LANDGREBE, D. Tempered Forming of Magnesium Alloys Using the Example of Roll Forming. **Materials Today: Proceedings**, v. 2, p. S60–S66, 2015.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica**. Portugal: Editora Escolar, 2005.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica**. Portugal: Editora Escolar, 2010.

SANTOS, A. M. M. M.; PINHÃO, C. M. DE A. **Carrocerias e cabines estamparia pesada Relatório Setorial BNDES de 09/1998**. [s.l.: s.n.].

SCHIECK, F.; DROSSEL, W.; BRÄUNLICH, H.; SCHEFFLER, S.; PIERSCHEL, N. **Draft: Temperature-Supported Forming of Automobile Related Magnesium Components**. 2013.

SILVA, B. C. DOS S.; LANDGREBE, D.; SCHIECK, F.; SCHMIDT, T.; MOSEL, A. Determination of friction coefficient for tool surfaces for temperature-supported forming of magnesium. **COBEF**, 2015.

SPIEGEL, M. R.; SCHILLER, J. J.; SRINIVASAN, R. A. **Probabilidade e Estatística: Coleção Schaum**. [s.l.] Bookman Editora, 2016.

STOETERAU, R. L. **Tribologia**. Florianópolis: [s.n.].

SUH, N. P.; MOSLEH, M.; HOWARD, P. S. Control of friction. **Wear**, v. 175, n. 1–2, p. 151–158, 1994.

The role of lubrication in the stamping system. Disponível em: <<http://www.autoform.com/blog/stamping-system-challenges-press-speed-lube/>>. Acesso em: 15 dez. 2016.

THYSSENKRUPP, S. E. **MgF Magnesium Flachprodukte**. Disponível em: <<http://www.thyssenkrupp-mgf.com/en/downloads/>>. Acesso em: 24 nov. 2014.

VOLLERTSEN, F.; HU, Z. Tribological size effects in sheet metal forming measured by a strip drawing test. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 55, n. 1, p. 291–294, 2006.

WAKUDA, M.; YAMAUCHI, Y.; KANZAKI, S.; YASUDA, Y. Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact. **Wear**, v. 254, n. 3–4, p. 356–363, 2003.

WETZEL, T. **Magnesiumblech-Technologiekette für innovative Leichtbauanwendungen im Automobilbau**. [s.l.: s.n.].

WU, H.; CHIU, C.; SHEU, S.; LEE, S.; WANG, J. Effect of Die Surface Roughness on Deformation Characteristics and Cavitation during Blow Forming in a Superplastic 5083 Alloy. **Materials Transactions**, v. 48, n. 9, p. 2483–2488, 2007.

ZHANG, S. H.; ZHANG, K.; XU, Y. C.; WANG, Z. T.; XU, Y.; WANG, Z. G. Deep-drawing of magnesium alloy sheets at warm temperatures. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 185, n. 1–3, p. 147–151, 2007.

ANEXO I

Figura 1A1 - Microscopia óptica da liga AZ31B processada na ferramenta 3. Ampliação de 200X.

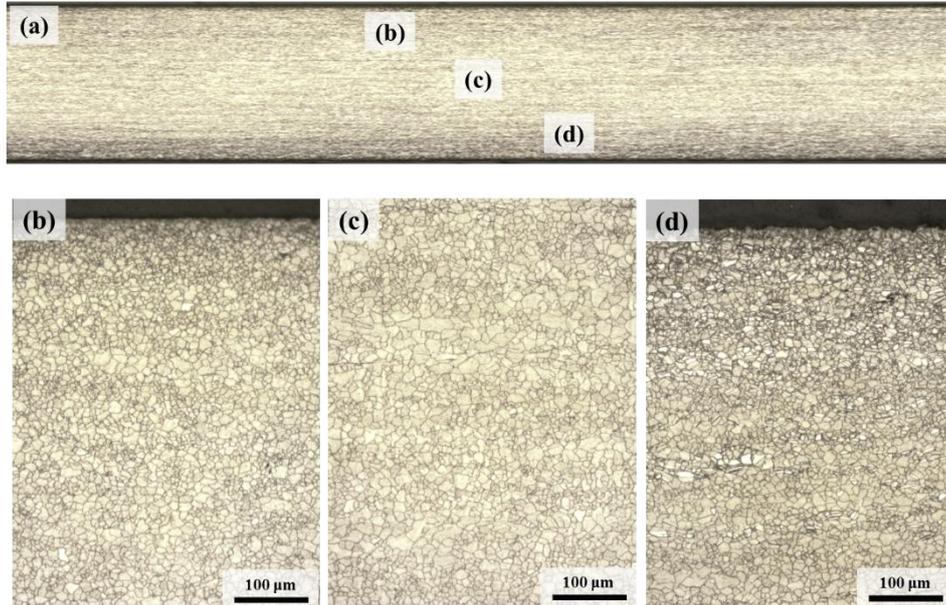


Figura 2A1 - Microscopia óptica da liga AZ31B processada na ferramenta 4. Ampliação de 200X.

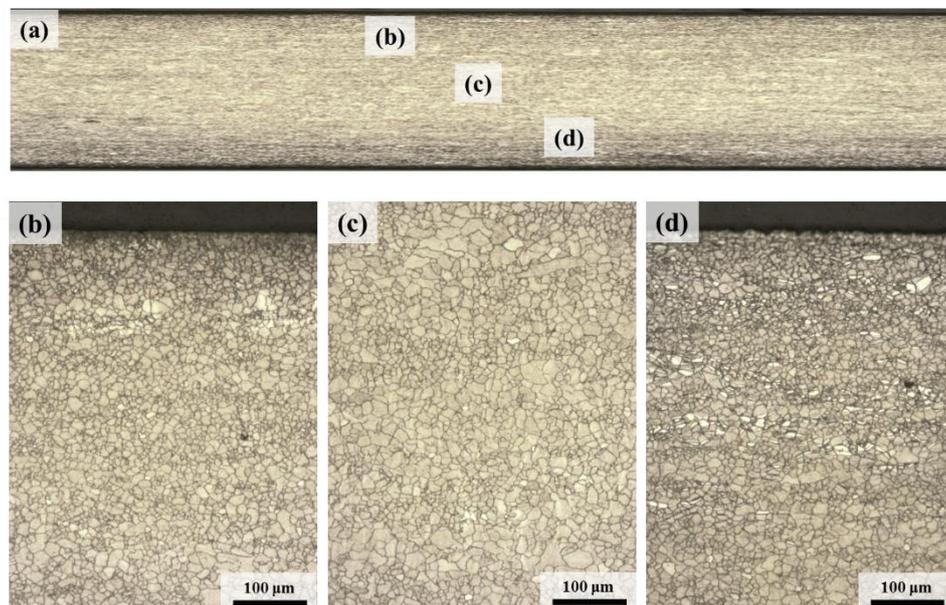


Figura 3A1 - Microscopia óptica da liga AZ31B processada na ferramenta 7. Ampliação de 200X.

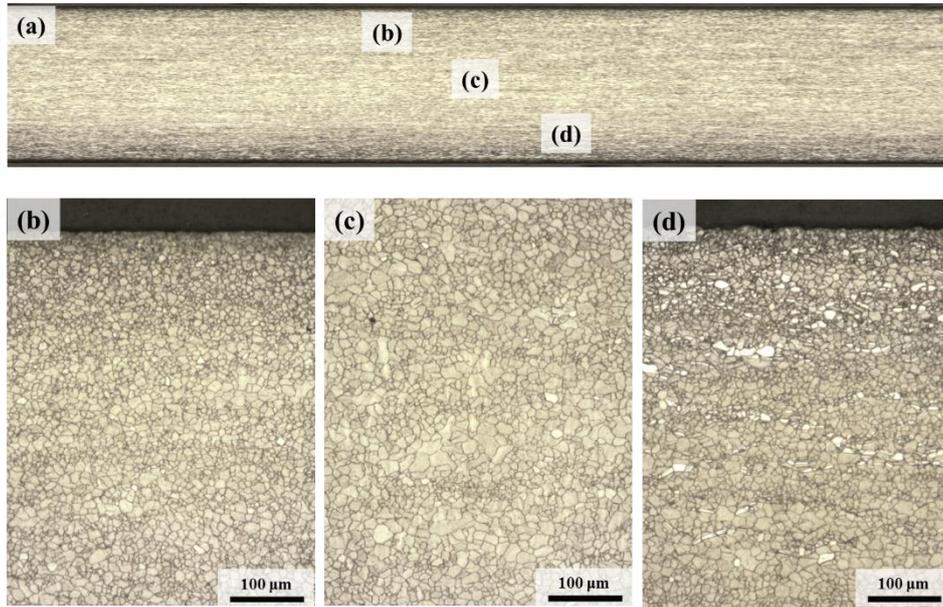


Figura 4A1 - Microscopia óptica da liga AZ31B processada na ferramenta 8. Ampliação de 200X.

