

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

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

PPGE3M

ANÁLISE DO COEFICIENTE DE ATRITO DETERMINADO PELO MÉTODO DE
DOBRAMENTO SOB TENSÃO APLICADO AO PROCESSO DE ESTAMPAGEM
PROFUNDA

Adriano Leonardo Schumann

Dissertação para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2018

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Adriano Leonardo Schumann

ANÁLISE DO COEFICIENTE DE ATRITO DETERMINADO PELO MÉTODO DE
DOBRAMENTO SOB TENSÃO APLICADO AO PROCESSO DE ESTAMPAGEM
PROFUNDA

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

Orientador: Prof. Dr. Lirio Schaeffer

Porto Alegre
2018

ADRIANO LEONARDO SCHUMANN

ANÁLISE DO COEFICIENTE DE ATRITO DETERMINADO PELO MÉTODO DE DOBRAMENTO SOB TENSÃO APLICADO AO PROCESSO DE ESTAMPAGEM PROFUNDA

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela banca examinadora do Programa de Pós-graduação em engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer – Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luis Fernando Folle – UNIRITTER

Prof. Dr. Daniel Fritzen – Faculdade Satc

Prof. Dr. Mario Wolfart Junior – IFC

Prof. Dr. Carlos P. Bergmann
Coordenador do PPGE3M

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pela dádiva da vida e por me proteger por todos os quilômetros percorridos para que este sonho pudesse ser realizado.

À minha família, pelo incentivo e pela compreensão.

À UFRGS, universidade através da qual pude aprofundar e adquirir conhecimentos que levarei por toda a vida.

Ao Prof. Dr. Lirio Schaeffer, pela oportunidade de aprendizado junto ao LdTM e pela orientação;

À Bruning Tecnometal Ltda e toda a sua equipe, que disponibilizou recursos e condições para que o trabalho aqui apresentado fosse concretizado.

Ao time do GQF da Bruning, que além do apoio, deu conta do recado em todos os momentos em que estive ausente... timaço esse...!

Ao Colégio Evangélico Panambi, pelo apoio e serviços prestados, bem como pela oportunidade de aprendizado junto ao time de docentes.

À minha esposa Ariane, pelo amor, dedicação e apoio incondicionais.

RESUMO

O presente trabalho tem por finalidade apresentar e discutir os resultados encontrados para o coeficiente de atrito de três tipos de diferentes chapas utilizadas em processos de estampagem na indústria automotiva. O método adotado para determinação do coeficiente de atrito foi o dobramento sob tensão, método este que tem por finalidade simular as condições de uma operação de embutimento. Os resultados apresentados demonstram que diferentes chapas em aço NBR 5915 EM e EMS ME 1508 EM, com ou sem proteção galvânica, apresentam diferentes condições tribológicas determinadas através do ensaio. Coeficientes de atrito que variam desde 0,103 até 0,151 foram determinados, considerando condições de lubrificação e de ferramenta constantes. A influência do coeficiente de atrito no processo é exemplificada através do cálculo da força máxima de estampagem, sendo que para as mesmas condições de propriedades mecânicas a variação do coeficiente de atrito provocou um aumento de 7,6% na força máxima. Através do cálculo determinou-se também a influência do coeficiente de atrito nas forças de atrito do processo. Para as condições apresentadas, a influência do coeficiente de atrito no prensa chapas na força máxima de estampagem é 20x menor em relação à influência do coeficiente de atrito no raio da matriz.

Palavras-chave: Tribologia, estampagem profunda, dobramento sob tensão, aço para estampagem

ABSTRACT

This research aims to show and discuss the friction coefficient of three different kinds of sheet metal used in sheet metal forming processes of automotive industry. The methodology for the determination of the coefficient of friction was the bending under tension, that purpose to simulate the deep drawing conditions. The results show different kinds of sheets metals, as NBR 5915 EM and EMS ME 1508 EM, with or not galvanized protection, show different tribological conditions by the tests. Friction coefficients from 0,103 to 0,151 were founded, considering invariable lubrication and tool conditions. The influence of friction coefficient in the stamping process is exemplified by the maximum stamping strength. For these tests conditions, the coefficient of friction caused an increase of 7.6% in the maximum stamping strength. The influence of the friction coefficient on the friction strengths of the process was determined. For these conditions, the influence of the friction coefficient in the friction strength of the blank holder is 20x smaller than in the friction strength of die's radius.

Keywords: Tribology, deep drawing, bending under tension test, steel to sheet metal forming

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 17 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 2.1. Estampagem de Chapas Metálicas | 20 |
| 2.1.1. Embutimento..... | 22 |
| 2.1.2. Propriedades de Materiais para Estampagem | 24 |
| 2.1.3. Cálculo analítico da força máxima de estampagem..... | 26 |
| 2.2. Tribologia e o Estudo do Atrito | 28 |
| 2.2.1. Conceitos Gerais..... | 28 |
| 2.2.2. O atrito no processo de estampagem | 29 |
| 2.2.2.1 O Efeito da Temperatura no comportamento de um sistema tribológico | 30 |
| 2.2.2.2 O Efeito dos Lubrificantes | 31 |
| 2.2.2.3 O Efeito da Pressão de Contato..... | 33 |
| 2.2.2.4 O Efeito da deformação | 34 |
| 2.2.2.5 O Efeito da Rugosidade | 35 |
| 2.2.2.6 O Efeito da Velocidade de Deslocamento | 37 |
| 2.2.2.7 O Efeito dos materiais e revestimentos | 37 |
| 2.2.3. O Desgaste e seus Mecanismos..... | 38 |
| 2.2.3.1 O Desgaste Adesivo..... | 39 |
| 2.2.3.2 O Desgaste Abrasivo | 40 |
| 2.2.4. O Coeficiente de Atrito | 41 |
| 2.2.5. Determinação do Coeficiente de Atrito..... | 42 |
| 2.2.5.1 Dobramento Sob Tensão (DST)..... | 44 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 46 |
| 3.1. Equipamento DST utilizado nos ensaios | 47 |
| 3.2. Variáveis de Entrada | 51 |
| 3.3. Variáveis controladas | 52 |
| 3.3.1. Material e acabamento das superfícies das ferramentas..... | 52 |
| 3.3.2. Propriedades mecânicas, químicas e de dureza das chapas | 54 |
| 3.3.3. Velocidade de deslocamento | 55 |
| 3.3.4. Lubrificante | 56 |
| 3.4. Variáveis não controladas | 56 |
| 3.5. Procedimentos Experimentais planejados | 56 |
| 3.6. Variáveis de Saída | 57 |
| 3.7. Procedimento para determinação do coeficiente de atrito | 57 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 60 |
| 4.1. Resultados dos Ensaios de Dobramento sob Tensão | 60 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2. Análise dos resultados dos ensaios | 62 |
| 4.2.1. Comparativo dos coeficientes de atrito dos três materiais | 62 |
| 4.2.2. Comparativo entre os ensaios de um mesmo material | 65 |
| 4.3. Análise da força máxima de estampagem | 66 |
| | |
| 5. CONCLUSÕES | 71 |
| | |
| 6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS | 73 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 74 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Relação entre Qualidade, Preço e Prazo de Desenvolvimento. | 17 |
| Figura 2 – Estrutura geral da metodologia de análise | 19 |
| Figura 3 - Ferramenta de Embutimento | 20 |
| Figura 4 - Ferramenta de Estampagem | 21 |
| Figura 5 - Subdivisão do processo de Estampagem | 22 |
| Figura 6 - Peças produzidas através da estampagem | 22 |
| Figura 7 - Produtos fabricados por embutimento | 23 |
| Figura 8 - Estado de Tensões no Embutimento | 23 |
| Figura 9 - Curvas Tensão x Deformação característica de uma liga de aço de baixo carbono | 24 |
| Figura 10 – Croqui do corpo de provas antes e após o ensaio de tração indicando l e lo. | 25 |
| Figura 11 – Representação esquemática da estampagem de copo cilíndrico. | 26 |
| Figura 12 - Homem egípcio utilizando-se do conhecimento da tribologia | 29 |
| Figura 13 - Movimento relativo entre chapa e ferramenta | 29 |
| Figura 14 – Alguns dos fatores que influenciam as condições de atrito | 30 |
| Figura 15 - Requisitos para peças estampadas durante a sua fabricação | 31 |
| Figura 16 - Curva de Stribeck..... | 32 |
| Figura 17 – Coeficiente de atrito x L_{des} para diferentes condições de pressão de contato | 34 |
| Figura 18 - Variação do Coeficiente de Atrito em função da Força Normal | 34 |
| Figura 19 - Curva de Abbott | 35 |
| Figura 20 – Coeficiente de Atrito x Acabamento superficial da chapa | 36 |
| Figura 21 – Coeficiente de Atrito x Velocidade de deslocamento | 37 |
| Figura 22 – Efeito de revestimentos de ferramentas no coeficiente de atrito | 38 |
| Figura 23 – Efeito do desgaste adesivo em produto estampado..... | 39 |
| Figura 24 - Mecanismos de desgaste abrasivo | 40 |
| Figura 25 - Desgaste abrasivo em ferramenta | 40 |
| Figura 26 - Modelo básico de Atrito de Coulomb | 41 |
| Figura 27 - Asperezas superficiais, adesão e penetração..... | 41 |
| Figura 28 - Testes simulativos para conformação de chapas. | 42 |
| Figura 29 - Atrito em processo de embutimento..... | 43 |
| Figura 30 - Relação entre Tensão de Atrito e Tensão Normal | 44 |
| Figura 31 - Ensaio Dobramento Sub Tensão | 44 |
| Figura 32 – Planejamento dos Procedimentos Experimentais | 47 |
| Figura 33 - Equipamento de dobramento sob tensão | 47 |
| Figura 34 - Equipamento de dobramento sob tensão | 48 |
| Figura 35 – Local de posicionamento do pino no equipamento de ensaio | 48 |
| Figura 36 – Fixação da chapa do equipamento de ensaio | 49 |
| Figura 37 – Sequência de movimento do equipamento durante o ensaio..... | 50 |
| Figura 38 – Computador e Spider8 | 50 |
| Figura 39 – Exemplo de planilha de dados coletadas no ensaio..... | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 40 – Comparativo de acabamento superficial dos pinos | 53 |
| Figura 41 – Dimensões dos corpos de provas | 54 |
| Figura 42 – Operação de limpeza das chapas antes de cada ensaio | 58 |
| Figura 43 – Aplicação do lubrificante sobre as chapas | 58 |
| Figura 44 – Modelo de gráfico do coeficiente de atrito após tratamento dos dados.. | 59 |
| Figura 45 – Coeficientes de atrito x tempo nos ensaios do material BFF NBR 5915 EM..... | 60 |
| Figura 46 – Coeficientes de atrito x tempo nos ensaios do material BGA EMS-ME 1508 EM..... | 60 |
| Figura 47 – Coeficientes de atrito x tempo nos ensaios do material BEG EMS-ME 1508 EM..... | 61 |
| Figura 48 – Marca provocada pelo contato com o pino na chapa no material C..... | 61 |
| Figura 49 – Acúmulo de resíduos provenientes do acabamento superficial da chapa no material B | 62 |
| Figura 50 – Comparativo do torque entre os materiais A, B e C | 63 |
| Figura 51 – Mudanças na superfície da chapa ocorridas durante o ensaio DST no material C..... | 64 |
| Figura 52 – Torque medido em cada experimento..... | 65 |
| Figura 53 – Geometria do copo considerada no cálculo | 66 |
| Figura 54 – Geometria do copo considerada no cálculo | 69 |
| Figura 55 – Comparativo de F_{APC} e F_{AR} para o mesmo material com diferentes coeficientes de atrito | 70 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Rugosidade das chapas utilizadas nos ensaios | 52 |
| Tabela 2 – Etapas de confecção dos pinos / ferramentas..... | 52 |
| Tabela 3 – Etapas de lixamento e preparação da superfície das ferramentas..... | 53 |
| Tabela 4 – Resultados da dureza média dos pinos..... | 54 |
| Tabela 5 – Propriedades das chapas utilizadas | 55 |
| Tabela 6: Experimentos Planejados..... | 57 |
| Tabela 7 - Experimentos e Resultados a serem coletados | 57 |
| Tabela 8 – Coeficiente de atrito médio obtido em cada ensaio | 61 |
| Tabela 9 – Coeficiente de atrito médio obtido para cada experimento realizado no DST | 62 |
| Tabela 10 – Propriedades mecânicas da chapa | 67 |
| Tabela 11 – Variáveis de cálculo da força máxima de estampagem..... | 67 |

LISTA DE ABREVIATURAS

- A.C** - Antes de Cristo
- BEG** - Bobina eletrogalvanizada
- BFF** - Bobina laminada a frio
- BGA** - Bobina galvanizada à quente
- BL** - Lubrificação em condição de contorno
- DIN** - Deutsches Institute für Normung
- DST** - Dobramento sob tensão
- Esp.** - Especificação
- HL** - Lubrificação em condição hidrodinâmica
- LdTM** - Laboratório de Transformação Mecânica
- ML** - Lubrificação em condição mista

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|-----------|---|---------------------|
| A_0 | Área inicial..... | [mm ²] |
| C | Coeficiente de Resistência..... | [-] |
| D | Diâmetro em que a força é máxima | [mm] |
| D_0 | Diâmetro do blank | [mm] |
| d_0 | Diâmetro do punção | [mm] |
| DV | Desvio padrão | [-] |
| E | Módulo de Elasticidade | [GPa] |
| F | Força | [N] |
| F_1 | Força de atuação | [N] |
| F_2 | Força de contra-tensão | [N] |
| F_A | Força de atrito | [N] |
| F_{APC} | Força de atrito no prensa-chapas | [N] |
| F_{AR} | Força de atrito no raio da matriz | [N] |
| F_{ID} | Força Ideal | [N] |
| f_{lub} | Quantidade de lubrificante | [g/m ²] |
| F_N | Força normal | [N] |
| F_{Max} | Força máxima de estampagem..... | [N] |
| F_R | Força radial | [N] |
| F_{RE} | Força de retorno elástico..... | [N] |
| F_T | Força tangencial..... | [N] |
| k_f | Tensão de escoamento..... | [MPa] |
| k_{fm} | Tensão de escoamento media | [MPa] |
| l | Comprimento | [mm] |
| l_0 | Comprimento inicial..... | [mm] |
| L_{des} | Deslocamento | [m] |
| n | Coeficiente de encruamento | [-] |
| R_a | Rugosidade média | [μm] |
| R_z | Rugosidade máxima..... | [μm] |
| r_m | Raio da matriz | [mm] |
| s | Espessura | [mm] |
| T | Torque..... | [Nm] |
| T_m | Torque Médio | [Nm] |

t Tempo[s]
V_{des} Velocidade de deslocamento[m/s]

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

| | | |
|------------------------|--|-------|
| β | Relação de Estampagem | [-] |
| ε | Deformação relativa | [%] |
| μ | Coefficiente de atrito de Coulomb | [-] |
| μ_a | Componente de adesão do coeficiente de atrito de Coulomb | [-] |
| $\mu_{m\acute{a}x}$ | Coefficiente de atrito de Coulomb máximo..... | [-] |
| μ_p | Componente de penetração do coeficiente de atrito de Coulomb.... | [-] |
| σ | Tensão | [MPa] |
| σ_{esc} | Tensão limite de escoamento | [MPa] |
| $\sigma_{m\acute{a}x}$ | Tensão limite de ruptura..... | [MPa] |
| σ_N | Tensão normal | [MPa] |
| σ_r | Tensão radial | [MPa] |
| σ_t | Tensão tangencial | [MPa] |
| τ | Tensão de cisalhamento | [MPa] |
| φ | Deformação verdadeira | [-] |

1. INTRODUÇÃO

O mercado em que está inserida a indústria nacional, em função da crescente concorrência e, conseqüentemente, da necessidade de redução de custos e tempo de desenvolvimento de novos produtos, vê-se necessitado de instrumentos e condições que permitam tais avanços. A garantia de qualidade dos produtos, aliado ao baixo custo e a velocidade no desenvolvimento de novos produtos são fatores muitas vezes antagônicos, que precisam ser equilibrados e, desta forma, garantir de sobrevivência da empresa no mercado. A figura 1 representa a relação entre estes fatores e os impactos gerados em função das suas relações.

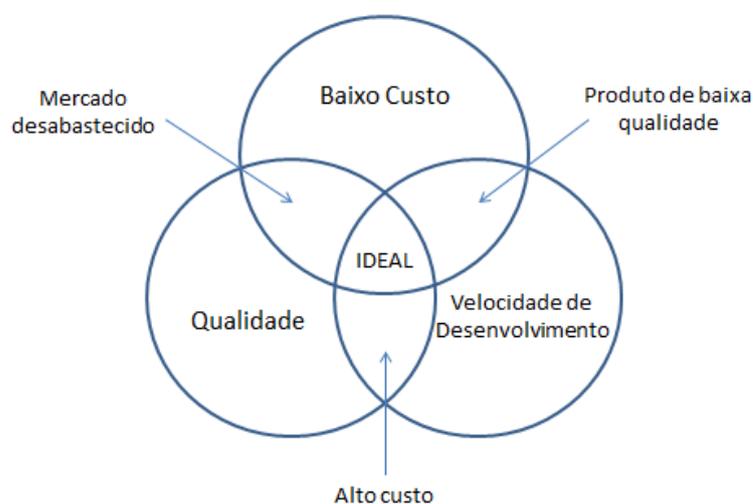


Figura 1 - Relação entre Qualidade, Preço e Prazo de Desenvolvimento.

Visando atender todos os requisitos citados, e conseqüentemente buscar o ganho do mercado consumidor, é necessário que hajam meios e alternativas que facilitem o desenvolvimento de um produto e reduzam custos de desenvolvimento. Além disso, diferentemente de épocas passadas, há o elemento prazo em questão, fazendo com que a habilidade em fornecer respostas rápidas às necessidades do mercado consumidor tem sido um diferencial (CHANARON, 1998).

Com o passar dos anos, à partir da revolução industrial, muitos avanços significativos ocorreram em relação à tecnologia de equipamentos de manufatura e engenharia. Dentre estas evoluções, grande parte da evolução tecnológica ocorreu em função da necessidade de se melhorar um determinado processo, onde tais melhorias são realizadas em pequenas partes. Estes processos de melhoria

contínua podem ser considerados como um método de tentativa e erro, onde a necessidade de melhoria parte justamente do problema.

O estudo das condições tribológicas nos processos de estampagem, ou seja, das interações que ocorrem entre as superfícies da chapa e da ferramenta, bem como dos seus efeitos, tem sido consideravelmente importante quando se tem um mercado consumidor que, a cada dia mais, requer novos produtos, com qualidade superior, a preços competitivos e rapidez. As condições tribológicas de um processo de estampagem estão relacionadas não apenas ao resultado do processo de conformação do produto, mas também às condições de desgaste e vida útil das ferramentas de estampo. Um dos métodos mais utilizados para evitar desperdícios no desenvolvimento de ferramentas de estampagem é a simulação numérica, permitindo prever o comportamento do processo sob determinadas condições. Para tais simulações, os fenômenos relacionados ao atrito e suas influências nos processos de estampagem precisam ser conhecidos, e o coeficiente de atrito médio do processo determinado.

Considerando a complexidade dos fatores que influenciam nos resultados de uma avaliação tribológica, diversos equipamentos têm sido desenvolvidos para esta finalidade. A pesquisa proposta por este trabalho tem por finalidade apresentar um estudo comparativo entre chapas de aço NBR 5915 EM e EMS-ME 1508 EM, comumente aplicadas em estampagem na indústria automobilística, e com diferentes condições de acabamento superficial através do ensaio de dobramento sob tensão, bem como demonstrar a influência dos resultados tribológicos nos parâmetros do processo de estampagem. Para atender à este objetivo, a seguinte metodologia foi aplicada:

- Realização de uma revisão bibliográfica dos temas abordados no trabalho, visando obter a compreensão dos principais fenômenos envolvidos nos processos de ensaios tribológicos e da estampagem;
- Determinação dos fatores (variáveis de entrada controláveis) e dos níveis adotados na experimentação;
- Determinação das variáveis de saída para obtenção dos resultados e posterior análise;
- Elaboração do planejamento dos experimentos;

- Execução dos experimentos práticos, considerando o monitoramento das variáveis de entrada e coletando os dados de saída;
- Avaliação e discussão dos resultados obtidos.

O diagrama representado na figura 2 apresenta a estrutura básica seguida na execução da pesquisa, com as grandes etapas que representam a metodologia utilizada na execução dos ensaios e as fases percorridas na execução da pesquisa visando atender aos objetivos pré-estabelecidos.

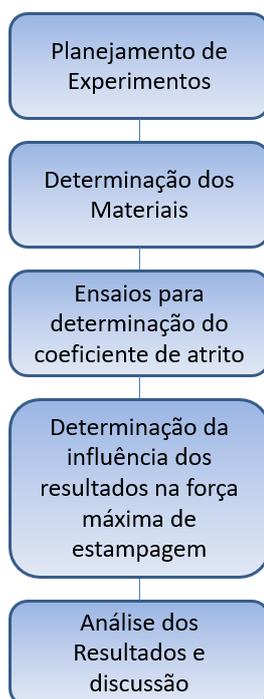


Figura 2 – Estrutura geral da metodologia de análise

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estampagem de Chapas Metálicas

Uma das linhas do processo de conformação mecânica trata-se da fabricação de componentes utilizando chapas metálicas como matéria-prima, ou seja, materiais que foram pré-conformados através do processo de laminação. Trata-se da conformação de chapas ou estampagem.

O processo de estampagem é um método de conformação mecânica que ocorre sob condições de tração e compressão, onde uma chapa é forçada a escoar para o interior de uma cavidade ou matriz, da qual assume o formato após um único golpe (SCHULER, 1998). O processo tem suas origens na descoberta dos primeiros metais, mas apenas sofreu um impulso em nível industrial com o surgimento das primeiras laminadoras, no início do século XVIII (SCHAEFFER, 2017). Atualmente, a indústria automobilística comanda as diretrizes no que se refere à evolução e pesquisa relacionada ao processo de conformação de chapas, com o objetivo de melhorar o desempenho, a durabilidade e reduzir o custo de seus produtos.

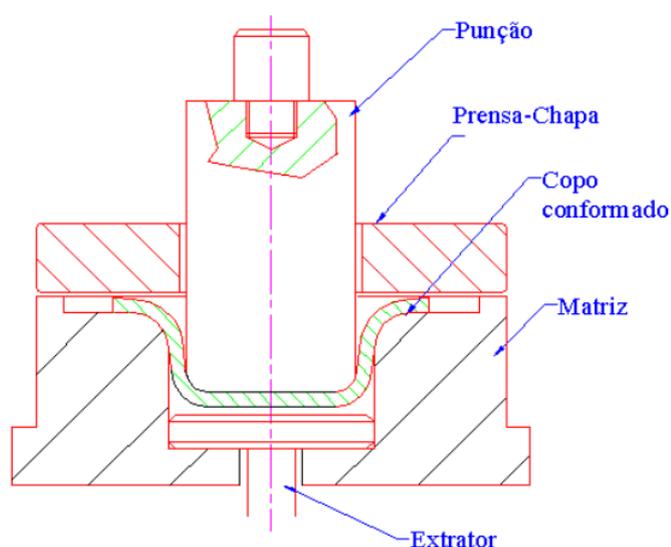


Figura 3 - Ferramenta de Embutimento
Fonte: COSTA (2003)

A força necessária para que o processo ocorra é realizada por uma prensa, onde a matriz ou ferramenta de estampagem é montada. A força necessária para a estampagem, as dimensões úteis da mesa da máquina, o curso de abertura e fechamento, condições de fixação e métodos de acionamento são requisitos básicos a serem avaliados no momento da seleção da prensa a ser usada para um

determinado processo de estampagem (LASCOE, 1988). A figura 3 apresenta um modelo esquemático de uma ferramenta de embutimento, enquanto a figura 4 apresenta uma ferramenta utilizada em um processo de estampagem industrial.



Figura 4 - Ferramenta de Estampagem
Fonte: Cortesia da empresa Bruning Tecnometal Ltda

Conforme SOUZA (2011), os processos de fabricação podem ser classificados através da norma DIN 8580, e as operações de estampagem podem ser classificadas como corte, dobra, estiramento e embutimento. Na estampagem, os processos de dobra, embutimento e estiramento são classificados como processos de conformação, enquanto o processo de corte é considerado um processo de separação (DIN 8580). Um processo de estampagem pode ser caracterizado por apenas uma destas operações ou uma simultaneidade ou sequencia destes processos, em função da geometria desejada para o produto. Através desta simultaneidade ou sequencia destas operações é possível produzir desde simples peças até peças com geometria complexa através deste processo. A figura 5 apresenta as operações compreendidas pelo processo de estampagem, enquanto a figura 6 apresenta dois tipos de peças produzidas através destes processos. A primeira delas trata-se de uma parte de um para-choque, aplicado em caminhões. A segunda, um toldo de um trator. Além destas, outros ramos da indústria também utilizam-se destes processos, como a de utensílios domésticos, automobilística, de embalagens, esportes, micromecânica, entre outras (SCHAEFFER, 2016).

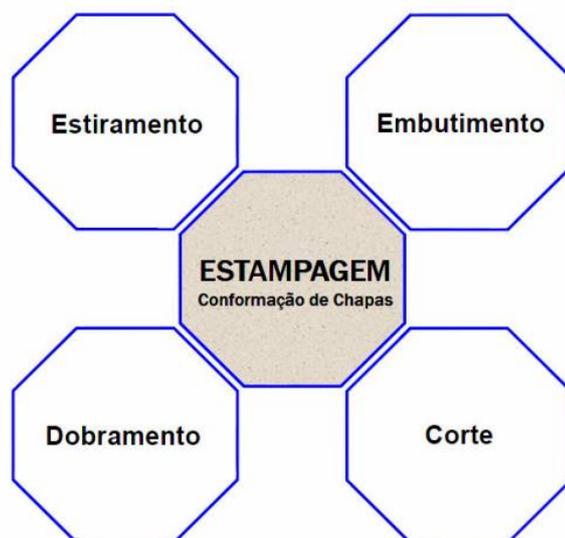


Figura 5 - Subdivisão do processo de Estampagem
Fonte: SOUZA, 2011

PARA-CHOQUE



TOLDO



Figura 6 - Peças produzidas através da estampagem
Fonte: Cortesia da empresa Bruning Tecnometal Ltda

2.1.1.Embutimento

O embutimento é o processo de estampagem em que a chapa é total ou parcialmente deslocada para o interior da matriz e, em função do deslocamento do material entre a matriz e o prensa chapas, se confecciona um objeto oco, com o formato de um copo, por exemplo. A figura 7 apresenta exemplos de produtos fabricados à partir do processo de embutimento.



Figura 7 - Produtos fabricados por embutimento

A principal característica do processo de embutimento é que, simultaneamente, ocorrem tensões de tração e compressão no material que está sendo conformado. Em torno da base do punção, o material é deformado no sentido radial, fazendo com que tensões de compressão ocorram no sentido circunferencial enquanto ocorre o esforço de tração no sentido radial. No raio da matriz, a face da chapa que está em contato com a matriz sofre um esforço de compressão, enquanto a face oposta sofre esforço de tração, como no processo de dobramento. O prensa-chapas é responsável em evitar que o material que ainda não foi deslocado para o interior da matriz não forme rugas. O material deslocado para o interior da ferramenta passa pelo raio da matriz e é dobrado. Quando o material avança para o interior da matriz ele é desdobrado, o que permite que haja um estiramento homogêneo da espessura da peça produzida. A figura 8 apresenta as regiões de uma peça embutida e o estado de tensões em cada uma delas.

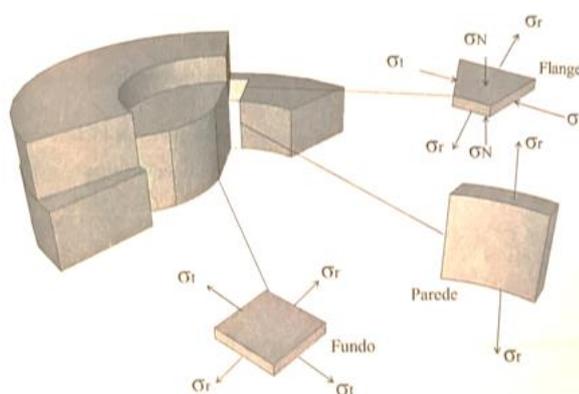


Figura 8 - Estado de Tensões no Embutimento
Fonte: SCHAEFFER (2017)

É possível determinar as condições de espessura de uma peça embutida em função da lei da constância de volume, já que a espessura pode ser determinada

pela soma das deformações ocorridas nas outras duas direções. Nas regiões em que há tensões de tração em ambos os sentidos do plano da chapa, como no caso do fundo do copo apresentado na figura 8, é possível prever o comportamento de redução de espessura do material nesta região, já que o alongamento do material nas duas direções não seria possível sem comprometer a espessura do material (SCHAEFFER, 2017).

2.1.2. Propriedades de Materiais para Estampagem

Considerando o fato de que o processo de estampagem é destinado à produção seriada de grandes volumes de peças, bem como o fato de que as propriedades dos materiais à serem estampados influenciarem diretamente nas condições de estampagem, é de suma importância que se desenvolvam matérias-primas com qualidade que atenda ao mercado garantindo um baixo custo de fabricação e alto nível de qualidade (FERRARINI, 2004).

Conforme GARCIA (2012), o mais comum e usual ensaio para se definir algumas propriedades mecânicas dos materiais é o ensaio de tração. O ensaio de tração é realizado tracionando-se um corpo de provas representativo do material que se deseja avaliar e com dimensões normatizadas e pré-estabelecidas. Durante o ensaio, são coletadas informações que determinam a deformação ocorrida no material em função de uma determinada tensão aplicada. A forma mais usual de apresentação dos resultados deste ensaio é através do gráfico Tensão x Deformação, conforme exemplo demonstrado na figura 9.

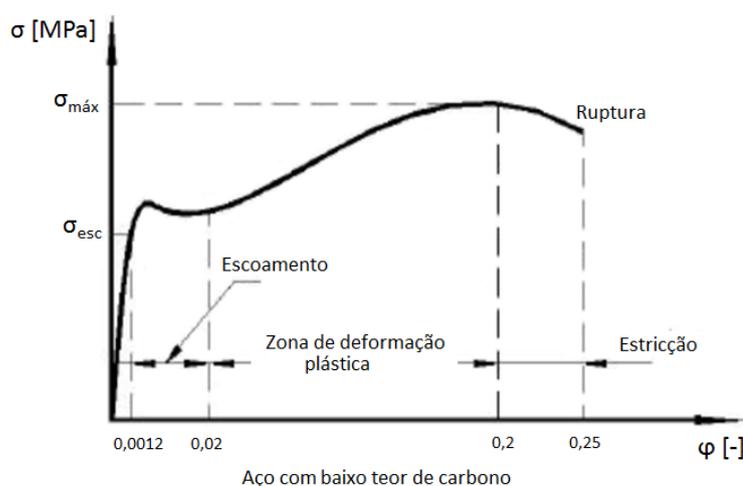


Figura 9 - Curvas Tensão x Deformação característica de uma liga de aço de baixo carbono
Fonte: Adaptado de COSTA (2003)

Conforme GARCIA (2012), muitas informações referentes às propriedades mecânicas podem ser determinadas à partir da curva Tensão x Deformação. Entre elas, destacam-se:

MÓDULO DE ELASTICIDADE “E” [GPa]: Trata-se da medida que determina a rigidez de um material, em função da relação entre a tensão e a deformação do material no regime elástico.

TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO “ σ_{esc} ” [Mpa]: O limite de escoamento é o valor de tensão em que ocorre a transição entre o regime elástico e o regime de deformação plástica do material. Quando, através do gráfico, esta região não estiver bem definida, este parâmetro pode ser estabelecido pela tensão no ponto comum entre a linha do gráfico e uma linha reta que parte do ponto 0,2% no eixo da deformação e avança paralelamente à linha do gráfico que representa o regime elástico de deformação.

TENSÃO LIMITE DE RUPTURA “ σ_{max} ” [Mpa]: Trata-se da tensão máxima suportada pelo material durante toda a execução do ensaio.

Segundo SCHAEFFER (2016), as deformações ocorridas no processo de conformação devem ser calculadas pela deformação verdadeira (φ) e não pela deformação relativa (ϵ) utilizada na mecânica convencional. No caso do corpo de provas para ensaio de tração de uma chapa, a deformação verdadeira pode ser determinada através da relação demonstrada na equação 1. A figura 10 representa as variáveis do ensaio l e l_0 .

$$\varphi l = \ln \frac{l}{l_0} \quad (1)$$

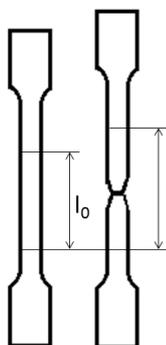


Figura 10 – Croqui do corpo de provas antes e após o ensaio de tração indicando l e l_0 .
Fonte: Adaptado de GARCIA (2012)

2.1.3. Cálculo analítico da força máxima de estampagem

Existem diversos métodos para se determinar a força máxima de estampagem em processos de estampagem. Dentre eles, destaca-se o método desenvolvido por SEIBEL e PANKNIN (1956), que considera diversos fatores de influência para o cálculo da força na conformação de um copo cilíndrico, como por exemplo a influência do atrito no prensa-chapas e no raio da matriz. Por este motivo, este método está sendo adotado nesta pesquisa. A figura 11 representa as variáveis envolvidas na metodologia de cálculo.

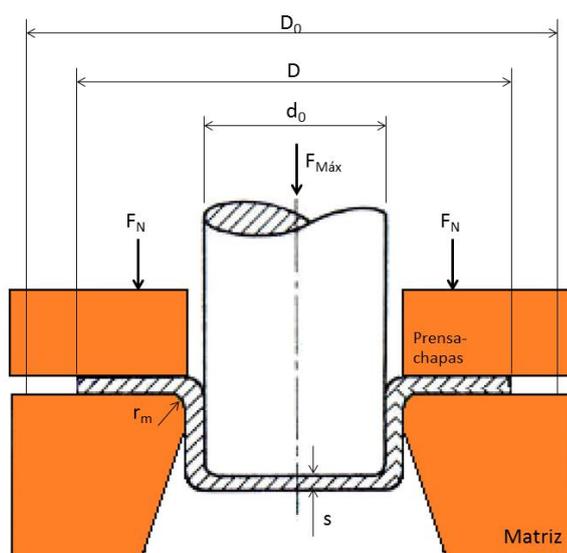


Figura 11 – Representação esquemática da estampagem de copo cilíndrico.
Fonte: Adaptado de SEIBEL e PANKNIN (1956)

Conhecidas as condições geométricas do produto, as propriedades mecânicas do material e as condições de atrito de um processo de embutimento, a força máxima de estampagem pode ser determinada, analiticamente, através da equação de PANKNIN (1961), conforme equação 2.

$$F_{Máx} = F_{ID} + F_{APC} + F_{AR} + F_{RE} \quad (2)$$

O F_{ID} trata-se da Força Ideal, e considera a força necessária para que o punção vença a resistência mecânica da chapa e a deforme. O F_{ID} é determinado conforme equação 3.

$$F_{ID} = A_0 \cdot k f_m \cdot \ln \frac{D}{d_0} \quad (3)$$

A área da secção do copo pode ser determinada em função do seu diâmetro e espessura ($A_0 = \pi \cdot d_0 \cdot s$). O diâmetro D trata-se do diâmetro em que a força é máxima, e conforme SEIBEL e PANKNIN (1956) é determinado em função da equação 4.

$$D = \left(0,77 \cdot \frac{D_0}{d_0} + 0,23 \right) \cdot d_0 \quad (4)$$

A determinação da tensão de escoamento media (kf_m) é realizada através da media entre kf_1 e kf_2 , sendo estas determinadas através do método exponencial de Hollomon, descrito pela equação 5 (SCHAEFFER, 2017):

$$kf = C \cdot \varphi^n \quad (5)$$

Neste caso, C e n são propriedades do material da chapa a ser conformada, e φ_1 e φ_2 são calculados conforme equações 6 e 7 e utilizados, respectivamente, para determinar kf_1 e kf_2 .

$$\varphi_1 = \ln \left(\frac{\sqrt{D_0^2 + d_0^2} - D^2}{d_0} \right) \quad (6)$$

$$\varphi_2 = \ln \left(\frac{D_0}{d_0} \right) \quad (7)$$

O F_{APC} trata-se da força necessária para vencer o atrito que ocorre entre a chapa e o prensa-chapas. Esta força é determinada conforme equação 8 (SCHAEFFER, 2017):

$$F_{APC} = 2 \cdot \mu \cdot F_N \cdot \frac{d_0}{D} \quad (8)$$

Neste caso, μ é o coeficiente de atrito que ocorre entre a chapa e o prensa-chapas e o F_N é a força normal aplicada pelo prensa-chapas. Esta força é determinada conforme equação 9, onde β é a relação de estampagem ($\beta = D/d_0$) (SCHAEFFER, 2017):

$$F_N = \frac{\sigma_{max}}{400} \cdot \left[(\beta - 1)^2 + \left(\frac{d_0 \cdot s}{200} \right) \right] \cdot \frac{\pi \cdot [D_0^2 - (d_0 + 2s + 2r_m)^2]}{4} \quad (9)$$

O F_{AR} trata-se da força de atrito que ocorre no raio da matriz, e é determinado através da equação 10 (SCHAEFFER, 2017):

$$F_{AR} = \left(e^{\mu \cdot \frac{\pi}{2}} - 1 \right) \cdot (F_{ID} + F_{APC}) \quad (10)$$

Nesta equação, o μ representa o coeficiente de atrito entre a chapa e o raio da matriz.

O elemento F_{RE} representa a força necessária para vencer o efeito do retorno elástico do material. Esta é calculada conforme equação 11 (SCHAEFFER, 2017):

$$F_{RE} = \pi \cdot d_0 \cdot s \cdot k f_1 \cdot \frac{s}{4 \cdot r_m} \quad (11)$$

2.2. Tribologia e o Estudo do Atrito

Não apenas nos processos de estampagem, mas em todos os processos de conformação mecânica, as condições dimensionais e de acabamento superficial de um produto são de extrema importância. Basicamente, as condições tribológicas dos processos de conformação estão atreladas à três importantes partes: o material a ser processado, a ferramenta e o lubrificante. A interface entre ferramenta e material normalmente é um local de condições agressivas, como alta temperatura e pressão, fazendo com que o material altere sua forma e a ferramenta seja afetada. O papel do lubrificante, nestes casos, é minimizar os efeitos da fricção entre as superfícies, reduzir os danos causados pelo desgaste nas ferramentas, eliminar impurezas da região de trabalho da ferramenta e promover proteção contra corrosão (KREN, 2007).

2.2.1. Conceitos Gerais

O estudo do atrito e do desgaste, bem como de métodos que permitam minimizar estes fatores nos processos de conformação, permite que haja uma vantagem competitiva, já que fatores tribológicos desconhecidos ou mal dimensionados podem fazer com que ferramentas e dispositivos tenham sua vida útil consideravelmente reduzida (STOETERAU, 2004).

Neste contexto, HUTCHINGS (1992) define tribologia como sendo a ciência e a tecnologia que estuda os fenômenos de interação entre superfícies em movimento relativo, e também pode ser considerada a ciência que estuda o atrito, o desgaste e a lubrificação.

A figura 12 apresenta o que pode ser o registro mais antigo de conhecimentos do homem a respeito da tribologia. Trata-se da imagem, elaborada entre 2400 e

1900 A.C, de um homem egípcio derramando o que se acredita ser água no solo para facilitar o arraste de uma estátua.

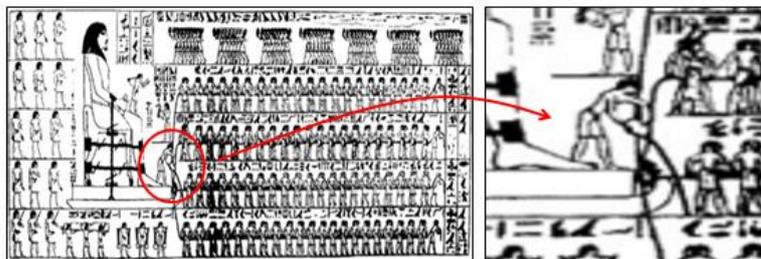


Figura 12 - Homem egípcio utilizando-se do conhecimento da tribologia
Fonte: Adaptado de STOETERAU (2004) *apud* LOOSE (2015)

2.2.2.O atrito no processo de estampagem

No processo de estampagem, o atrito tem fundamental importância e influência, já que o movimento relativo entre ferramenta e material é o princípio dos processos de conformação, grupo no qual a estampagem está inserida.

No processo de embutimento, a geratriz é radialmente deformada e deslocada para o interior da matriz, reduzindo seu diâmetro original até o diâmetro da peça final obtida, definido pelo diâmetro do punção. Para que não haja enrugamento, em função das tensões de compressão radial durante a redução de diâmetro, utiliza-se o prensa-chapas, componente da ferramenta com a função de controlar o avanço do material para o interior da matriz (GAARD, 2008). Neste processo, o movimento relativo entre ferramenta e material se dá principalmente em dois pontos: prensa-chapas e raio da matriz. As demais regiões da ferramenta são pontos em que não há significativo movimento relativo com o material (FOLLE, 2012). A figura 13 representa diferentes locais em que ocorre o movimento relativo entre ferramenta e material.

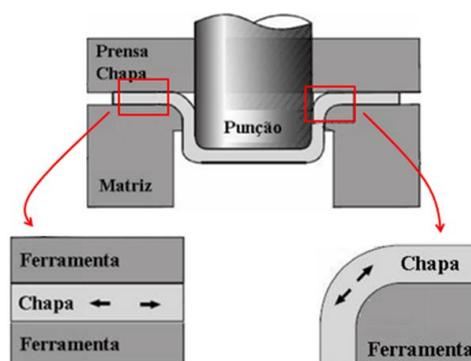


Figura 13 - Movimento relativo entre chapa e ferramenta
Fonte: Adaptado de FOLLE, 2012.

WANG (2014) indica que o fenômeno de atrito não trata-se de uma equação linear, pois muitos são os fatores que influenciam nestes resultados. Dentre eles, destacam-se a pressão de contato, a temperatura, a lubrificação, os materiais em contato, a deformação, a rugosidade das superfícies em contato e a velocidade de deformação, conforme demonstrado na figura 14.



Figura 14 – Alguns dos fatores que influenciam as condições de atrito

Fonte: Adaptado de WANG, 2014

2.2.2.1 O Efeito da Temperatura no comportamento de um sistema tribológico

A temperatura é um dos fatores que influenciam diretamente as propriedades dos metais. Mudança de dureza, de resistência ao desgaste, nas características microestruturais, bem como na resistência mecânica são esperadas quando os materiais são expostos à fontes de calor. APACHITEI (2002) apresenta diferentes resultados de desgaste em revestimentos de NiP, mensuradas através do volume de material perdido, e conclui que estes devem-se às diferentes propriedades apresentadas pelos materiais a cada faixa de temperatura e ao modo como estas propriedades interferem no resultado tribológico do sistema.

STOTT (2002) indica que as diferenças no comportamento tribológico de superfícies metálicas em contato em função da temperatura podem estar relacionadas à velocidade da formação de óxidos e do tipo de óxidos formados. A formação de óxidos de elevada dureza que não se aderem à superfície do material podem tornar-se um terceiro elemento em movimento no sistema e acelerar o processo de abrasão por três corpos. Em contrapartida, a formação de uma película

endurecida de óxido na superfície do material pode ser um fator que influencia na redução do coeficiente de atrito, protegendo a superfície do desgaste acelerado.

2.2.2.2 O Efeito dos Lubrificantes

As condições de desgaste, maior esforço de estampagem, baixa qualidade do produto, entre outros fatores negativos do processo de estampagem, estão relacionadas aos fenômenos de atrito e desgaste, provenientes do contato e do movimento relativo entre a ferramenta e a chapa. Visando controlar os fenômenos de atrito do processo, são utilizados os lubrificantes (SOUZA, 2011).

O uso de lubrificantes nos processos de conformação tem por objetivo reduzir o coeficiente de atrito entre as superfícies da ferramenta e da peça a ser conformada. Isto pelo fato de que o lubrificante forma uma película que reduz o contato direto entre as superfícies. A utilização de um lubrificante adequado contribui para o aumento da produtividade, melhora da qualidade do produto, aumento da vida útil da ferramenta e redução do consumo de energia (PARISE, 2015).

Os lubrificantes a serem utilizados em processos de conformação devem ser selecionados com base nas funções que ele deve desempenhar (MANG, 1983). SOUZA (2011) indica que dentre os diversos tipos de lubrificantes existentes para estampagem, a escolha do lubrificante impacta em toda a cadeia de produção e não apenas nos processos de conformação. Por este motivo, processos posteriores como soldagem, pintura e até mesmo a própria estocagem devem ser levados em consideração, conforme demonstrado na figura 15, já que o lubrificante utilizado normalmente se mantém aderido à peça fabricada após a operação de conformação.

| Requisitos Adicionais | | Redução do atrito e do desgaste | | Compatibilidade Química | Facilidade de Remoção | |
|-----------------------|--------------------------------|---|-----------------|---|--|---|
| Requisito Básico | Proteção contra corrosão | | | | | |
| Etapa de Fabricação | Bobina, corte | Conformação | Armazenamento | Junção | Pintura | Entrega |
| Fatores de Influência | Ambiente, tempo de armazenagem | Superfícies da chapa e da ferramenta, uso de aditivos, quantidade, posição de aplicação | Ambiente, tempo | Adesivos, solda ponto, solda MAG, compatibilidade com consumíveis | Base do lubrificante, forma de aplicação e tipo de desengraxante, processo de desengraxante. | Ambiente, transporte, tempo de armazenagem. |

Figura 15 - Requisitos para peças estampadas durante a sua fabricação
Fonte: Adaptado de SOUZA (2011)

Conforme NILSON (2010), a redução do coeficiente de atrito do processo de estampagem com o uso de lubrificante pode ocorrer através de dois mecanismos. O primeiro deles é quando o lubrificante separa completamente os dois corpos (ferramenta e material), o que faz com que o coeficiente de atrito esteja relacionado apenas ao esforço necessário para cisalhar o filme lubrificante. Outra condição ocorre quando o lubrificante não é capaz de separar completamente as superfícies, mas ainda assim colabora para a redução do coeficiente de atrito. A influência do filme lubrificante no coeficiente de atrito e nos resultados do processo de conformação pode ser verificada no estudo de DA SILVA (2007), sendo que uma condição adequada de lubrificação no processo pode reduzir a força de embutimento, reduzir a probabilidade de ocorrência de trincas por estrição e permite um melhor deslocamento do material na ferramenta, garantindo que as propriedades de estampabilidade deste possam ser exigidas ao máximo.

Em função do tipo, quantidade, aplicação e atuação do lubrificante nos processos de estampagem, as condições de lubrificação do processo podem ser classificadas em condições de contorno, apresentada na figura 16 como região BL, mista, identificada como ML ou hidrodinâmica, HL. É no regime misto de lubrificação em que as propriedades do lubrificante, como viscosidade e aderência, irão influenciar fortemente o coeficiente de atrito (TER HAAR, 1996 *apud* FOLLE, 2012).

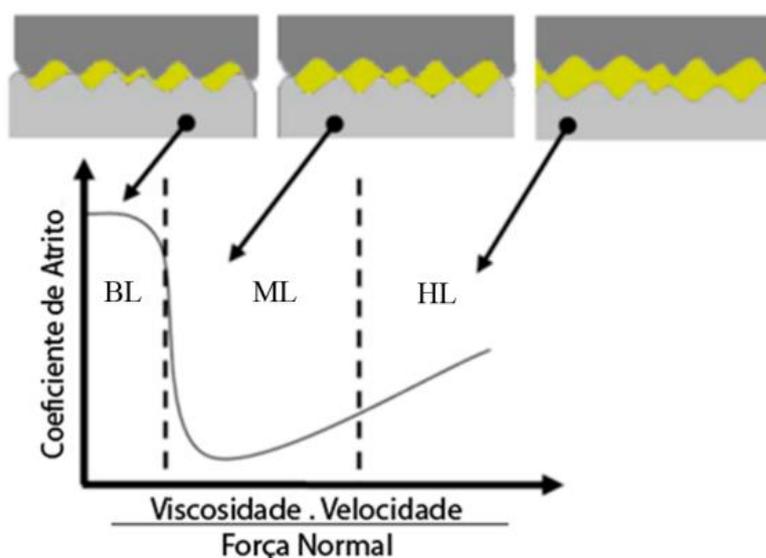


Figura 16 - Curva de Stribeck
Fonte: FOLLE, 2012

KOBAYASHI (1989) indica que as condições de lubrificação e o tipo de lubrificante utilizado influenciam diretamente nos resultados dos processos de

conformação, alterando significativamente o coeficiente de atrito nos pontos de contato entre a ferramenta e o material a ser conformado. FREIRE (2005) comprova esta condição quando, em seus estudos, demonstra diferenças significativas no resultado do ensaio Erichsen em função de variações nas condições de lubrificação.

Conforme LOOSE (2015) o óleo Ferrocote 214 M é um óleo parafínico de origem mineral da fabricante *Quaker*. Trata-se de um óleo passível de solução em água e largamente usado na indústria para proteção contra a corrosão de peças confeccionadas por estampagem. Para determinar a massa de lubrificante a ser aplicada sobre a chapa através de gotejamento, LOOSE (2015) utiliza a relação de que 50 gotas de óleo representam 1,175g. Através desta relação, é possível determinar, através do número de gotas aplicadas sobre a chapa, a quantidade em massa de lubrificante por unidade de área da chapa.

2.2.2.3 O Efeito da Pressão de Contato

RODRIGUEZ (2016) apresenta, conforme indicado na figura 17, resultados diferentes de desgaste e coeficiente de atrito em função da pressão de contato entre as superfícies em movimento relativo, sendo A, B e C diferentes tipos de lubrificantes sólidos testados em equipamento do tipo *flat-on-flat*. Mudanças no comportamento tribológico em função da pressão de contato ocorrem principalmente em função da variação da área de contato real entre os corpos em movimento relativo. O aumento da tensão normal entre os corpos faz com que as asperezas superficiais de ambos os corpos se deformem, aumentando a área real de contato entre as superfícies em função do aumento da pressão entre elas. A relação entre o coeficiente de atrito e a força normal pode ser representada pela figura 18, em que BUDINSKY (1992) *apud* FOLLE(2012) demonstra a variação do coeficiente de atrito em função da força normal. O aumento do coeficiente até o valor de 0,5 indica que a área real de contato aumenta até este ponto, atingindo seu valor máximo. À partir deste ponto, o aumento da força normal provoca uma redução no coeficiente de atrito. No entanto, neste ponto já não se considera a lei de atrito de Coulomb, e a redução do coeficiente de atrito pode estar relacionada ao desgaste e à adesão dos materiais (HELMANN, 1983).

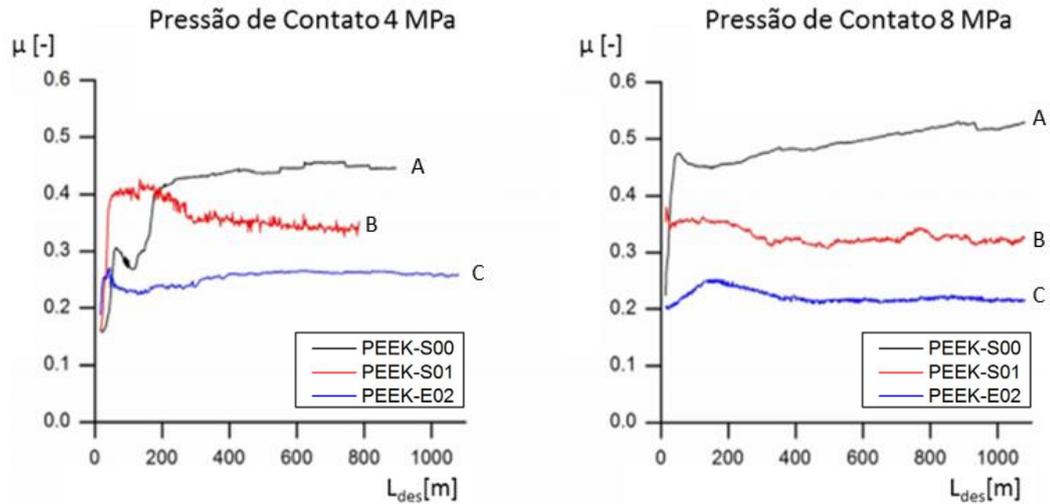


Figura 17 – Coeficiente de atrito x L_{des} para diferentes condições de pressão de contato
 Fonte: Adaptado de RODRIGUEZ, 2016

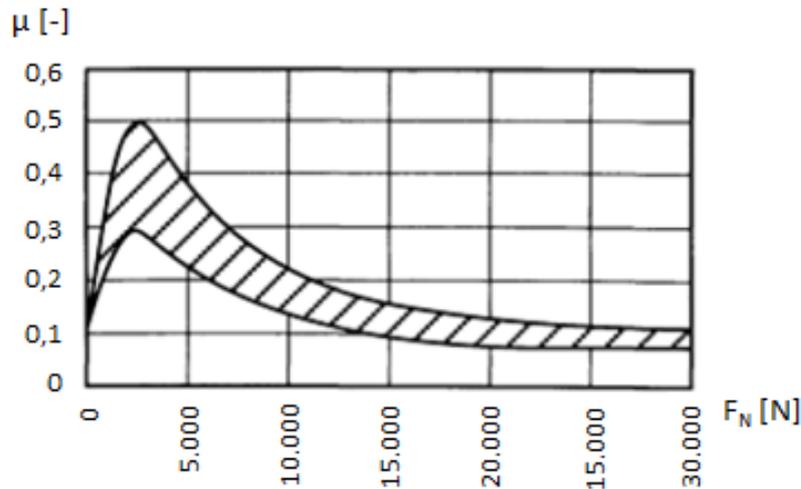


Figura 18 - Variação do Coeficiente de Atrito em função da Força Normal
 Fonte: BUDINSKY (1992) *apud* FOLLE (2012)

2.2.2.4 O Efeito da deformação

Conforme SOUZA (2011), as condições de atrito nos processos de conformação não são constantes. Isto ocorre pelo fato de que o material que está sendo deformado modifica-se em sua condição superficial durante o processo, tornando assim o coeficiente de atrito um parâmetro variável durante o processo. Esta condição faz com que um material que se deforma plasticamente durante o processo tenha suas propriedades superficiais variando constantemente durante todo o período em que a deformação plástica ocorre.

2.2.2.5 O Efeito da Rugosidade

HUTCHINGS (1992) define rugosidade como irregularidades de pequena escala em uma superfície. Estas irregularidades existentes em materiais que estão em contato e em movimento relativo influenciam diretamente nos resultados do fenômeno tribológico. Isto pelo fato de que a real área de contato entre os corpos estar diretamente relacionada à rugosidade (NILSON, 2010). Considerando que a superfície de um corpo não é perfeitamente lisa, existem picos e vales em cada uma das superfícies, que estarão ou não em contato durante o movimento relativo entre os corpos. Parâmetros de rugosidade podem ser determinados através de métodos de medição de rugosidade convencional, onde é possível verificar a distância entre o pico mais alto e o vale mais baixo detectado em uma região a ser medida. Para quantificar condições de rugosidade, o padrão Ra (rugosidade média) pode ser aplicado, que se trata da média aritmética dos desvios de uma linha média, medidos dentro de um determinado deslocamento (BHUSAN, 2013). De acordo com a normal DIN 4766-1 (1981), valores de Ra entre 0,012 e 0,8 são considerados normais para processos de laminação plana.

Por ser um parâmetro de influência nos resultados, medições mais precisas e mais completas podem ser realizadas através da determinação da curva de Abbott (figura 19). Esta curva é gerada através da avaliação de cada um dos fracionamentos de uma superfície, e visa identificar em cada uma destas frações a incidência de material. Mesmo que a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo sejam iguais (R_z), a diferença entre estas topografias pode ser representada pela curva de Abbott (INSAUSTI, 2000).

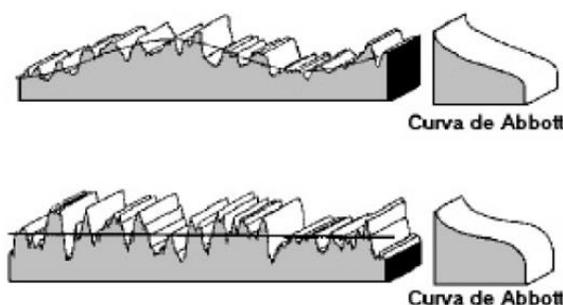


Figura 19 - Curva de Abbott
Fonte: Adaptado de INSAUSTI, 2000

LOOSE (2015) apresenta em sua pesquisa uma relação que demonstra a influência da rugosidade superficial de chapas no coeficiente de atrito e na distância de deslizamento percorrida sobre a chapa, até a ocorrência do desgaste adesivo. Estes ensaios foram realizados com equipamento de tracionamento plano de tiras, em que um elemento que simula a superfície da ferramenta de estampagem é pressionado sobre a chapa enquanto esta se desloca. A figura 20 representa os resultados obtidos para o coeficiente de atrito em função das condições de acabamento superficial das chapas ensaiadas. As condições de atrito e resultados de desgaste estão diretamente vinculadas ao formato e à interação dos picos e vales resultantes do acabamento superficial dos materiais que se encontram em contato relativo durante o ensaio.

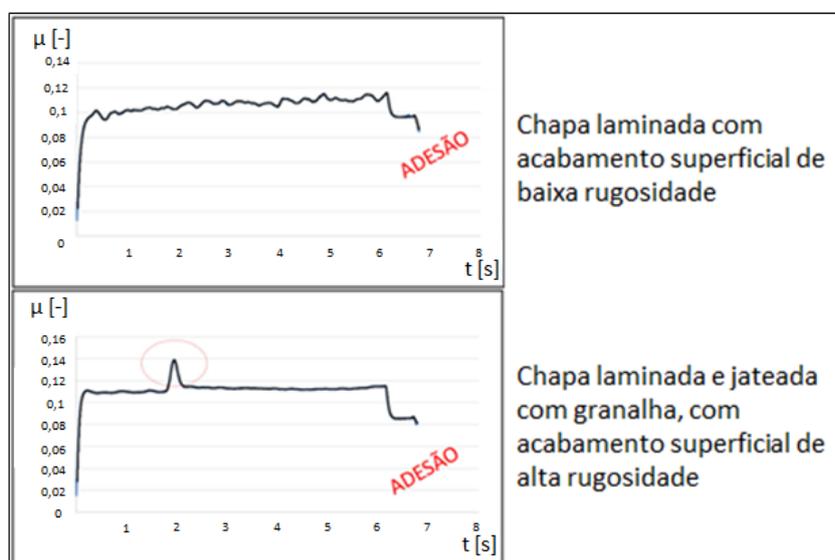


Figura 20 – Coeficiente de Atrito x Acabamento superficial da chapa
Fonte: Adaptado de LOOSE (2015)

Os resultados podem ser influenciados pela interação destes elementos entre si, bem como através das condições que os mesmos possuem de reter um lubrificante, por exemplo. GHERCA (2016) indica que superfícies com determinadas condições de texturização podem garantir condições tribológicas favoráveis à redução do atrito em função da menor área real de contato entre as superfícies, bem como das condições favoráveis para que seja mantido um filme de lubrificante de maior espessura em relação às condições em não há texturização da superfície.

2.2.2.6 O Efeito da Velocidade de Deslocamento

A velocidade relativa entre as superfícies em movimento de um sistema tribológico influenciam nos resultados em função do tempo em que as superfícies ficam em contato absoluto, bem como da energia de impacto que há no contato entre as asperezas das superfícies em deslocamento. SINGH (2018) apresenta variações no coeficiente de atrito em determinadas condições de lubrificação, relacionando o coeficiente de atrito resultante do ensaio pino-disco em função da velocidade relativa entre as superfícies, conforme figura 21.

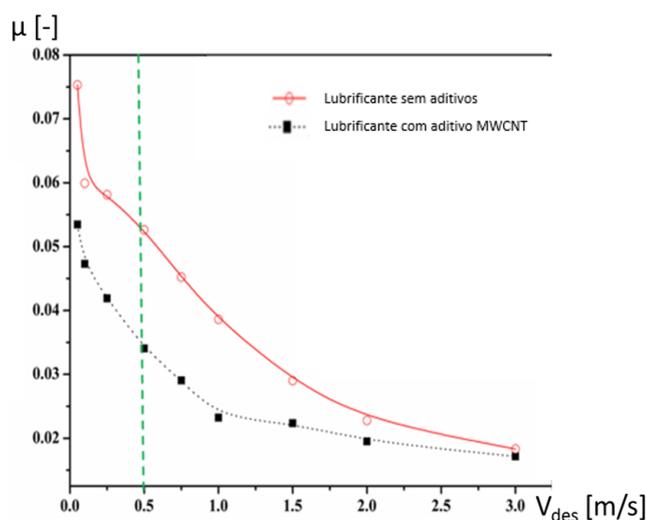


Figura 21 – Coeficiente de Atrito x Velocidade de deslocamento
Fonte: SINGH (2018)

2.2.2.7 O Efeito dos materiais e revestimentos

As condições dos materiais e revestimentos aplicados em sistemas tribológicos impactam diretamente nas condições de atrito e desgaste dos sistemas. Revestimentos podem ser aplicados na superfície de um material sempre que este não ofereça resistência suficiente ao desgaste, visando garantir que a superfície do corpo em que ocorrerá o fenômeno tribológico possua melhores propriedades tribológicas do que o material de base (MENDES, 2009).

SANTOS (2015) apresenta diferentes resultados de coeficientes de atrito para condições de ensaio com diferentes tipos e condições de aplicação de revestimentos em ferramentas de estampagem. A figura 22 representa os resultados encontrados.

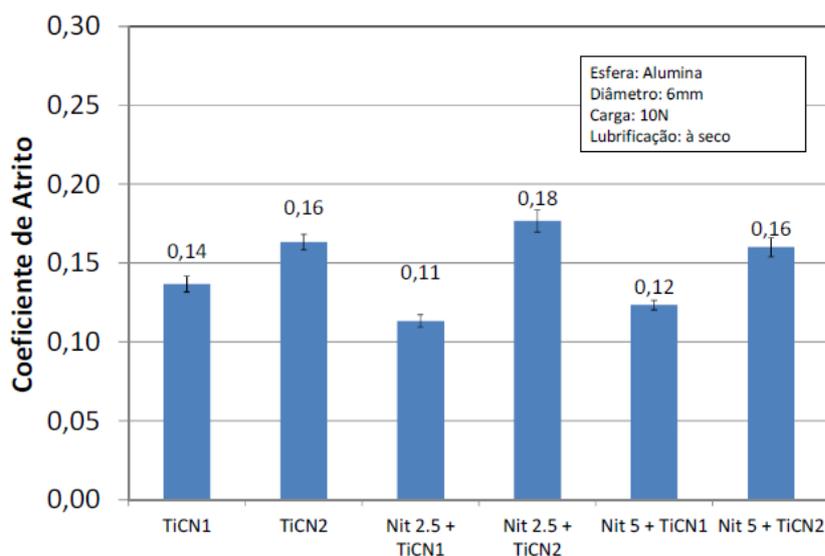


Figura 22 – Efeito de revestimentos de ferramentas no coeficiente de atrito
 Fonte: SANTOS (2015)

2.2.3.O Desgaste e seus Mecanismos

As condições de atrito de um processo de conformação mecânica estão diretamente relacionadas ao desgaste dos ferramentais utilizados no processo. A vida útil de ferramentas de conformação utilizadas para produtos que possuem elevadas demandas de produção deve ser cuidadosamente estabelecida e as ferramentas devem ser projetadas com o objetivo de atender à esta demanda sem requerer altos custos de manutenção. Conforme SCHAEFFER (2016), existem processos de conformação que podem produzir quase mil peças por minuto. O efeito do atrito das peças na superfície das ferramentas pode causar desgaste da superfície das ferramentas e impactarem significativamente nas condições de qualidade dos produtos produzidos.

Conceitualmente, o desgaste pode ser definido como o fenômeno da remoção de material de uma superfície devido à interação com outra superfície em contato (KATO, 2000). Os fenômenos de desgaste mais significativos no processo de estampagem são o desgaste adesivo e o desgaste abrasivo. Apesar de não ser um problema grave quando atua isoladamente, o desgaste abrasivo quando associado ao desgaste adesivo pode ser crítico tanto para a ferramenta de conformação quanto para a peça que se deseja produzir (SOUZA, 2009).

2.2.3.1 O Desgaste Adesivo

Quando elevadas pressões de contato ocorrem entre as superfícies da ferramenta e da chapa, as rugosidades e asperezas superficiais dos materiais deformam-se plasticamente, promovendo ligações entre as superfícies de ambos os materiais, fenômeno este conhecido como adesão. Tratam-se de ligações de natureza complexa, que envolvem interações de natureza atômica, fenômenos de solubilidade e difusão (FERRARINI, 2004).

Quando a adesão ocorre no processo de estampagem, normalmente uma pequena parte do material da peça fica aderida à superfície da ferramenta. Este material, posteriormente, se solta, levando com ele parte do material da superfície da ferramenta. Este fenômeno causa problemas desde a adesão na ferramenta, como riscos e danos às peças produzidas, bem como quando se solta da ferramenta, podendo a partir de então causar o fenômeno de desgaste abrasivo com sistema de três corpos, alterando a superfície da ferramenta (GAARD, 2008).

A figura 23 apresenta um exemplo de desgaste adesivo ocorrido em produto estampado, em função da adesão entre o material da peça e a ferramenta utilizada no processo produtivo.

Segundo SCHEY (1983), fenômenos tribológicos que ocorrem em processos de conformação possuem um comportamento diferenciado em relação aos demais, em função das mudanças superficiais que ocorrem no material conformado durante a execução do processo. Por este motivo, também as condições de acabamento superficial da chapa a ser conformada influencia nas condições de desgaste.



Figura 23 – Efeito do desgaste adesivo em produto estampado.
Fonte: SOUZA (2011)

2.2.3.2 O Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo se dá pela perda de material devido à passagem de partículas duras pela superfície de um material com igual ou maior dureza. Segundo BHUSHAN (2013), a abrasão é promovida por duras protuberâncias ou simplesmente pela diferença de dureza e rugosidade entre as superfícies que se encontram em movimento relativo.

O desgaste abrasivo pode ocorrer através do contato entre dois corpos apenas, ou com três corpos atuantes. O sistema de dois corpos trata-se apenas de um dos corpos causar danos na superfície do outro durante o movimento. No sistema de três corpos, um corpo central atua como elemento que causa danos nos dois corpos que estão em contato com ele. Estas condições estão representadas na figura 24, enquanto um exemplo de desgaste abrasivo do material de uma ferramenta é apresentado na figura 25. Normalmente, as taxas de desgaste em condições de desgaste abrasivo de dois corpos são maiores quando comparadas às taxas de desgaste em sistemas de três corpos (GAARD, 2008).

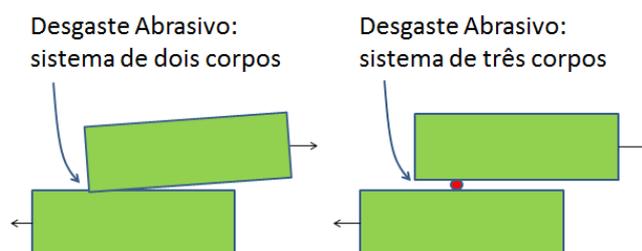


Figura 24 - Mecanismos de desgaste abrasivo

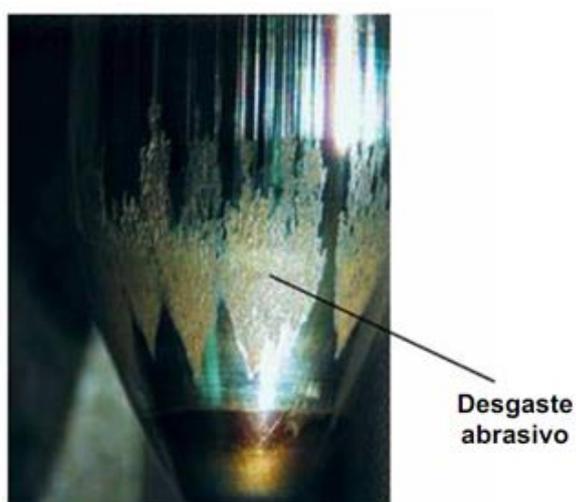


Figura 25 - Desgaste abrasivo em ferramenta
Fonte: SOUZA (2011)

2.2.4.O Coeficiente de Atrito

O coeficiente de atrito de Coulomb pode ser definido como a razão entre a força tangencial (F_T) necessária para mover um determinado corpo e a força normal que este corpo exerce sobre a superfície na qual está em contato (SCHAEFFER, 2017). A equação 12 representa esta relação, demonstrada na figura 26.

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \quad (12)$$

Segundo FOLLE (2012), considerando que as superfícies que estão em contato possuem asperezas, ainda que microscópicas, a força tangencial necessária para deslocar o corpo depende das condições de contato entre as asperezas das duas superfícies. Duas são as componentes que definem as condições de atrito total do sistema. A componente adesiva e a componente de penetração. A adesão depende basicamente da composição química, enquanto a componente de penetração depende das condições mecânicas de resistência do material. A figura 27 exemplifica asperezas superficiais em materiais, bem como as duas componentes que influenciam no coeficiente de atrito quando as superfícies são postas em contato e movimento relativo.

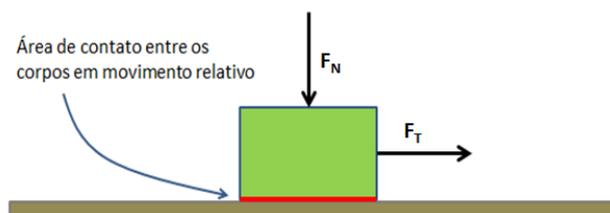


Figura 26 - Modelo básico de Atrito de Coulomb

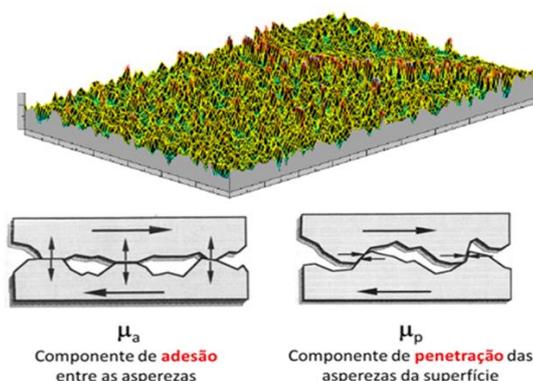


Figura 27 - Asperezas superficiais, adesão e penetração
Fonte: Adaptado de portal UNDA, et al. (2007) e FOLLE (2012)

2.2.5. Determinação do Coeficiente de Atrito

Considerando que o coeficiente de atrito é fortemente influenciado por fatores entre eles a condição de lubrificação e as asperezas superficiais dos materiais, e que estas condições não são estáveis em todos os pontos de contato entre chapa e ferramenta, o coeficiente de atrito em um processo de estampagem pode ser diferente em diversos pontos. Segundo SOUZA (2011), as diferentes condições de força de contato entre peça e ferramenta ao longo de toda a área de contato fazem com que diferentes condições de atrito estejam atuando simultaneamente ao longo de toda a superfície de contato.

Considerando estes fatores, o simples fato de simular as condições de contato e medir as condições de atrito de maneira experimental não indicam que na prática os processos seguirão a estas condições. Para investigar as condições de atrito de maneira mais próxima à realidade dos processos de conformação, BAY (1994) indica duas características de simulação de comportamento tribológico: os testes de processo e os testes simulativos. Testes de processo são assim denominados porque mantêm as condições cinemáticas básicas do processo real, mantendo-se mais fiéis ao processo. Os testes simulativos tratam-se de ensaios que reproduzem as condições de processo de maneira controlada. WANG (2014) apresenta em sua pesquisa sistemas de testes simulativos apropriados para diversos pontos em um processo de estampagem, conforme figura 28.

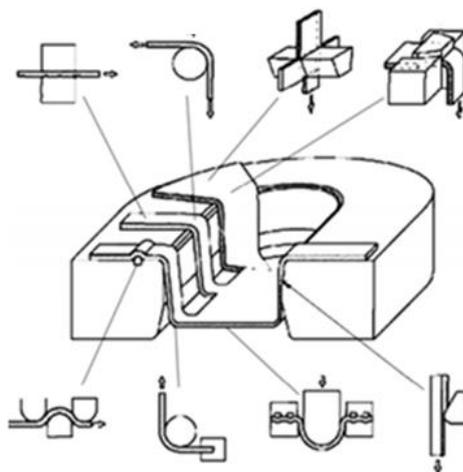


Figura 28 - Testes simulativos para conformação de chapas.
Fonte: WANG (2014)

Em um processo de embutimento, conforme demonstrado na figura 29, existem diferentes regiões em que os esforços e o contato entre chapa e ferramenta

ocorrem de maneiras diferentes. Apesar de haverem estas diversas condições, e conseqüentemente, diferentes coeficientes de atrito agindo simultaneamente, os pontos em que o coeficiente de atrito mais causa influência no processo é entre chapa e prensa-chapas e entre chapa e raio da matriz (FOLLE, 2012).

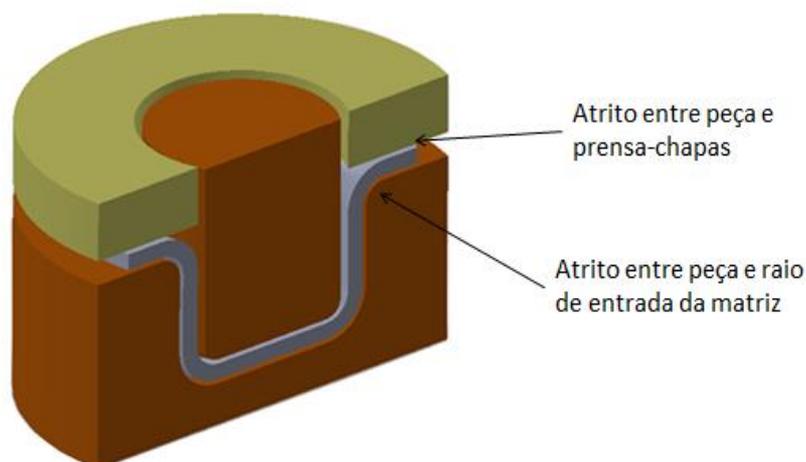


Figura 29 - Atrito em processo de embutimento

Para a determinação do coeficiente de atrito, considera-se válida a relação entre a tensão cisalhante e a tensão normal como sendo o coeficiente de atrito de um sistema, conforme demonstrado na equação 13. Desta forma, medir o coeficiente de atrito está vinculado à necessidade de conhecer as tensões normal e tangencial (ou de atrito) que ocorrem durante o movimento relativo entre os corpos (SCHAEFFER, 2017).

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_N} = \frac{F_A}{F_N} = \frac{F_T}{F_N} \quad (13)$$

HELMAN (1983) e HAAR (1996) indicam que o modelo de atrito de Coulomb é válido somente até o ponto em que a tensão de atrito atinja o valor da tensão cisalhante do próprio material. À partir deste momento tem-se a aplicação da lei de Von Mises, indicando que $\mu_{\max}=0,577$. A figura 30 descreve este comportamento.

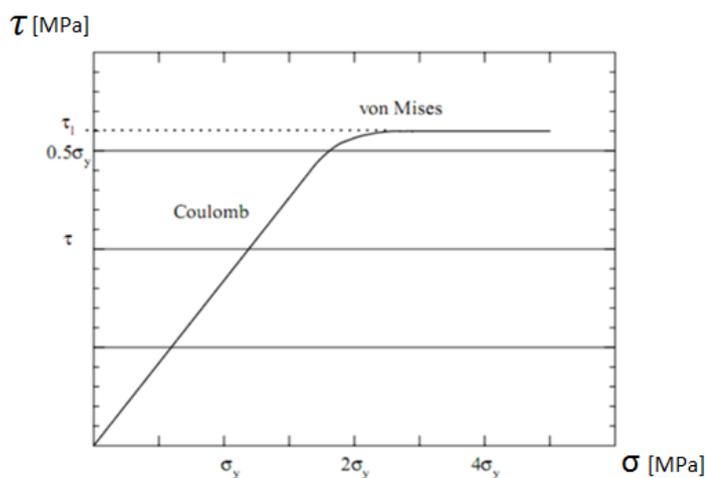


Figura 30 - Relação entre Tensão de Atrito e Tensão Normal
 Fonte: Adaptado de HAAR (1996)

2.2.5.1 Dobramento Sob Tensão (DST)

Segundo WANG (2014), este método de avaliação aproxima-se das condições de atrito que ocorrem entre o material a ser embutido e o raio de entrada da matriz de embutimento.

O ensaio de dobramento sob tensão (DST) consiste no dobramento de uma chapa em forma de tira, fazendo com que ela seja conduzida por uma força que a faça contornar um pino, que simula o raio de entrada da matriz da ferramenta. Uma força aplicada na extremidade da tira é responsável em tracionar o material, simulando o punção que leva o material para o interior da matriz. Uma força contrária ao movimento é aplicada no lado oposto da tira, que simula a força do prensa-chapas. A figura 31 apresenta um dos métodos do processo de dobramento sob tensão, onde F_1 é a força de atuação (que simula o punção), F_2 a força de contra-tensão (que simula o prensa-chapas) e T é o torque resultante do atrito entre a chapa e o pino (SNIKERS e SMITS, 1997).

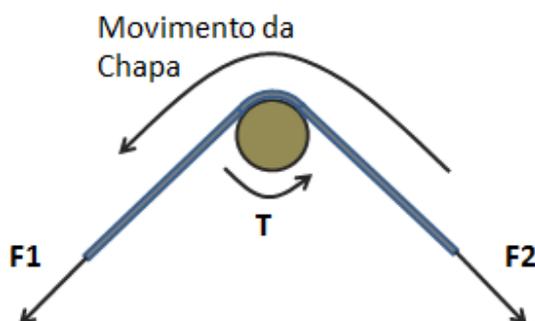


Figura 31 - Ensaio Dobramento Sub Tensão

Em função destas variáveis, bem como do raio do pino que representa a matriz de embutimento, FOLLE (2012) deduz a equação 14 para o cálculo do coeficiente de atrito do sistema com base no trabalho de ANDREASEN, OLSSON, *et. al.* (2006).

$$\mu = \frac{4T}{\pi \cdot r_m (F1 + F2)} \quad (14)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Equipamentos para ensaios de coeficientes de atrito são utilizados com o objetivo de conhecer as condições tribológicas de um processo.

Os equipamentos consistem em simular uma condição de atrito entre superfícies, sob condições controladas e com variáveis de entradas conhecidas, possibilitando obter resultados como coeficiente de atrito, por exemplo, para estas condições do processo. Outros resultados, como avaliações de desgaste por exemplo, podem ser obtidos. Diversos modelos e condições de equipamentos para esta finalidade estão disponíveis e podem ser utilizados.

A estrutura da pesquisa está baseada na análise de três diferentes tipos de chapas utilizadas na indústria de peças de automóveis, visando avaliar o comportamento das mesmas ao ensaio de atrito e como isto influencia nos parâmetros do processo de estampagem.

Foram determinadas as variáveis de entrada com as quais serão realizados os ensaios, sendo elas o tipo de material da chapa a ser ensaiada e os diferentes tipos de acabamento superficial das chapas.

Outras variáveis controláveis serão mantidas fixas no ensaio, como a velocidade de deslocamento (movimento relativo) e as condições de lubrificação. Dentre as variáveis não controladas, que podem influenciar nos resultados, há o operador do equipamento, a viscosidade do lubrificante no momento do ensaio, a temperatura de execução do ensaio, o ruído eletrônico do processo de obtenção dos dados.

Os resultados a serem coletados durante os ensaios são os esforços relacionados ao processo de ensaio, com o objetivo de determinar, a partir destas informações, o coeficiente de atrito médio de cada condição ensaiada. A figura 32 representa o planejamento dos ensaios, considerando todas as variáveis de influência nos ensaios a serem realizados.

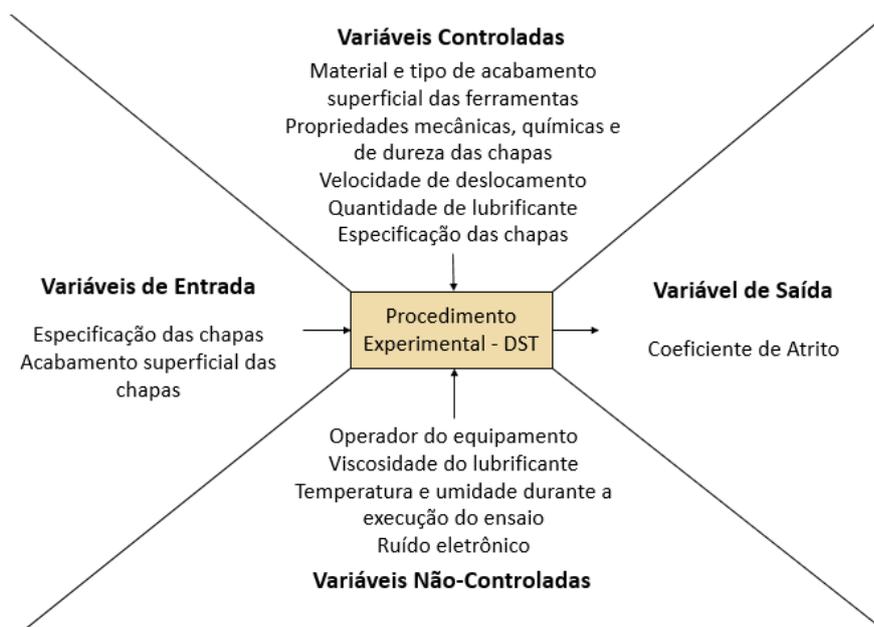


Figura 32 – Planejamento dos Procedimentos Experimentais

3.1. Equipamento DST utilizado nos ensaios

O equipamento de dobramento sob tensão utilizado no desenvolvimento das atividades da pesquisa está disponível no LdTM (Laboratório de Transformação Mecânica) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Porto Alegre-RS.

As figuras 33 e 34 apresentam o equipamento disponível e alguns de seus componentes.

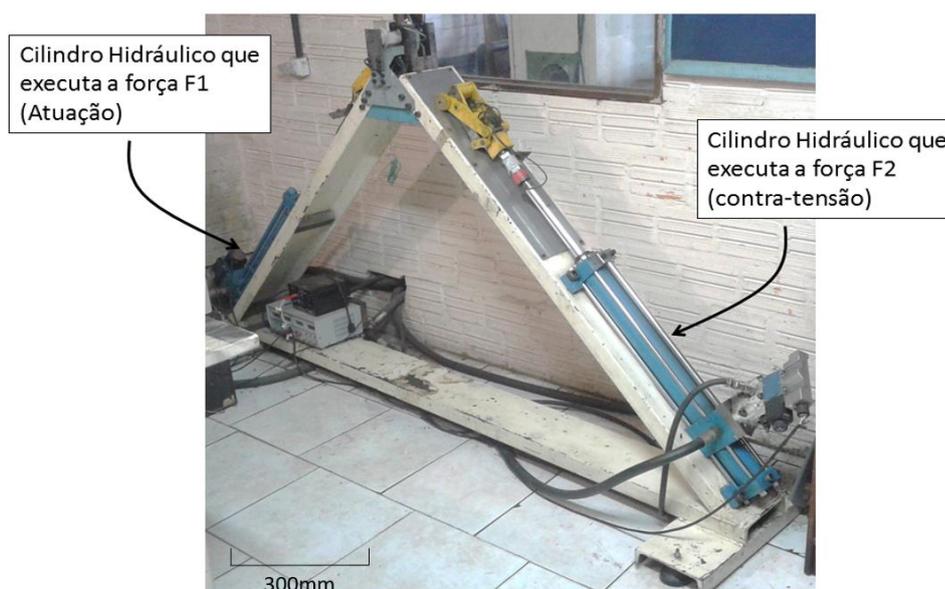


Figura 33 - Equipamento de dobramento sob tensão



Figura 34 - Equipamento de dobramento sob tensão

O equipamento já foi objeto de estudo e pesquisas de diversos alunos e pesquisadores da universidade e possui características construtivas similares à de equipamentos da Universidade de Dresden, da Universidade de Darmstadt e na empresa Thyssen Krupp em Dortmund, Alemanha (SCHAEFFER, 2017).

O encaixe do pino no sensor de torque deve ser garantido, visando permitir a correta leitura dos dados durante o ensaio. A figura 35 demonstra a posição de montagem do pino e o local de encaixe no sensor de torque.

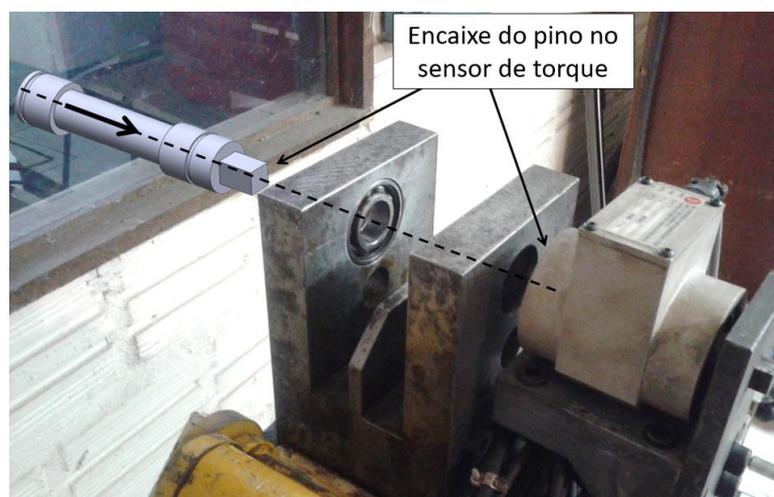


Figura 35 – Local de posicionamento do pino no equipamento de ensaio

A chapa a ser utilizada deve possuir no máximo 50mm de largura, já que o equipamento não permite o encaixe de corpos de provas com larguras maiores. O comprimento do corpo de provas deve ser de no mínimo 600mm visando permitir a

correta fixação e posicionamento na máquina. Antes da fixação do corpo de provas no equipamento, é necessário que o cilindro hidráulico que executa a força de atuação esteja em posição avançado, enquanto o de contra-tensão esteja recolhido. A figura 36 apresenta as condições de fixação da chapa antes do início do ensaio.

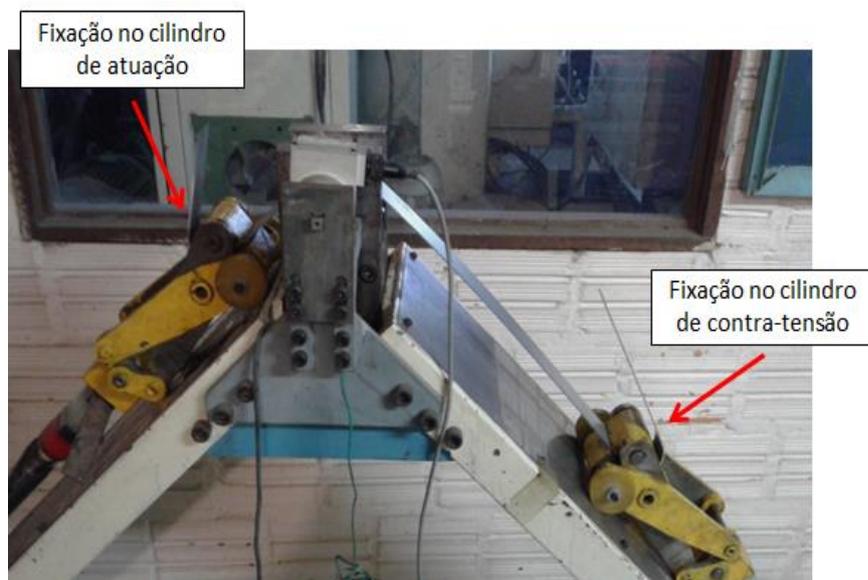


Figura 36 – Fixação da chapa do equipamento de ensaio

O acionamento de leitura de dados é realizado antes do acionamento do sistema hidráulico que realiza o movimento. Após garantir que os dados estão sendo lidos, o sistema hidráulico é acionado e o movimento do sistema é realizado.

O cilindro de atuação é acionado e inicia o seu movimento em sentido descendente. Durante o movimento de recolhimento do cilindro de atuação, o cilindro de contra-tensão avança permitindo assim o deslocamento da chapa sobre a superfície do pino.

A figura 37 representa a sequência de movimento do equipamento durante o ensaio. O quadro 1 indica a posição inicial do ensaio e apresenta a direção em que cada um dos cilindros avança no decorrer do processo, enquanto as posições 2, 3 e 4 apresentam a sequência do movimento realizado pelo equipamento.

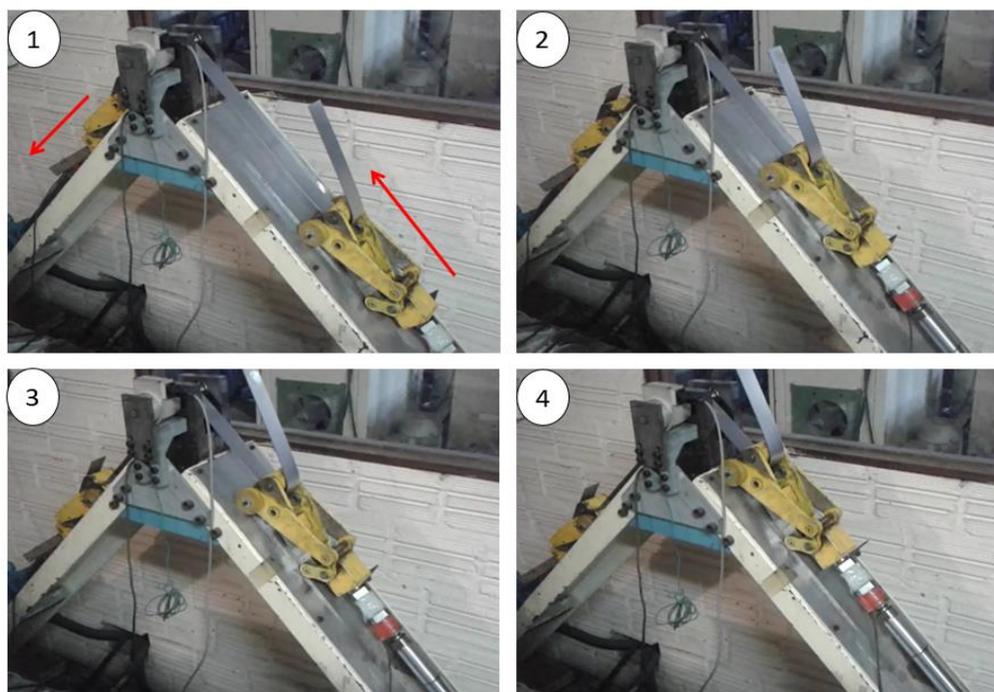


Figura 37 – Sequência de movimento do equipamento durante o ensaio

Os equipamentos utilizados para converter em dados as informações fornecidas pelo sensor de torque e pelas células de carga que determinar a força executada por cada um dos cilindros hidráulicos é um Spider8 associado à um computador com software específico para esta finalidade, conforme demonstrado na figura 38. A leitura dos dados ocorre a uma taxa de cinquenta leituras por segundo durante todo o ensaio, registrando os dados necessários para o cálculo do coeficiente de atrito: As duas forças atuantes nos cilindros de atuação e contra-tensão e o torque ao qual está sendo submetido o pino.

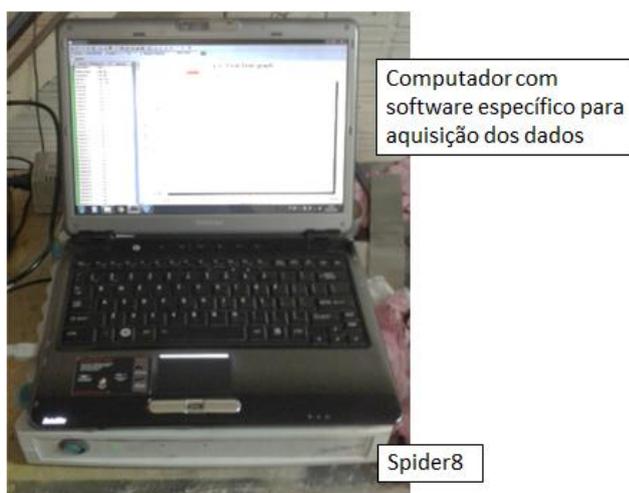


Figura 38 – Computador e Spider8

Os dados são coletados e armazenados em formato de planilha eletrônica, permitindo assim a análise posterior e execução dos cálculos necessários. Um exemplo da planilha eletrônica resultante desta coleta de dados é demonstrado na figura 39.

| | A | B | C | D | E | F |
|----|---------------|-----------|----------|----------|----------|---|
| 1 | file comment: | | | | | |
| 2 | Time DEVI | Célula de | Torquime | CÉLULA 2 | CÉLULA 1 | |
| 3 | s | KN | NM | TON | TON | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 6 | 0 | -0,24096 | -0,17839 | -0,40872 | 0,177858 | |
| 7 | 0,02 | -0,24096 | -0,17839 | -0,40872 | 0,177858 | |
| 8 | 0,04 | -0,24096 | -0,17839 | -0,40872 | 0,177858 | |
| 9 | 0,06 | -0,25703 | -0,17526 | -0,40895 | 0,177858 | |
| 10 | 0,08 | -0,24096 | -0,17526 | -0,40872 | 0,177858 | |
| 11 | 0,1 | -0,24096 | -0,17839 | -0,40872 | 0,177858 | |
| 12 | 0,12 | -0,24096 | -0,17526 | -0,40872 | 0,177858 | |

Figura 39 – Exemplo de planilha de dados coletadas no ensaio

3.2. Variáveis de Entrada

Foram determinados para os ensaios 3 materiais diferentes sendo que dois deles possuem a mesma especificação normativa, diferenciando-se pelo tipo de acabamento superficial. Os materiais escolhidos foram o BFF *NBR 5915 EM*, o BGA *EMS-ME 1508 EM* e o BEG *EMS-ME 1508 EM*, todos com 1,5mm de espessura. Estes são materiais utilizados pela Bruning Tecnometal na produção de peças estampadas para a indústria de automóveis.

Por possuírem condições de acabamento superficial diferentes, cada um dos materiais possui características superficiais diferentes entre si. Os materiais da norma *EMS-ME 1508 EM* possuem um acabamento superficial com aplicação de proteção galvânica de zinco, que possui a função de aumentar a resistência do produto à corrosão durante o processo produtivo e em sua aplicação final. Dois métodos diferentes de aplicação da camada de galvanização foram escolhidos, em função da sua disponibilidade: a galvanização à quente e a eletro galvanização. Estes diferentes métodos de aplicação de zinco resultam em diferentes condições superficiais das chapas, conforme pode ser evidenciado através das medições de rugosidades das chapas demonstradas na tabela 1. As medições foram realizadas

em dois sentidos nas chapas, sendo no sentido de laminação da chapa, e no sentido perpendicular ao de laminação.

Tabela 1 – Rugosidade das chapas utilizadas nos ensaios

| Material [Esp.] | Norma de Referência [Esp.] | Ra (Sentido de Laminação) [μm] | Ra (Perpendicular ao sentido de laminação) [μm] |
|--------------------|-------------------------------|--|---|
| A | BFF NBR 5915 EM | 0,81 | 0,76 |
| B | BGA EMS-ME 1508 EM | 0,62 | 0,51 |
| C | BEG EMS-ME 1508 EM | 0,68 | 0,73 |

3.3. Variáveis controladas

3.3.1. Material e acabamento das superfícies das ferramentas

As ferramentas foram projetadas e fabricadas em função das características necessárias ao equipamento de ensaio. O apêndice 1 apresenta suas especificações construtivas com maior detalhamento. O material utilizado na confecção das ferramentas foi um aço ferramenta denominado comercialmente como VF800AT®, do fabricante Villares Metals. O boletim técnico com características deste aço está no anexo 1. As ferramentas foram confeccionadas através das seguintes etapas apresentadas na tabela 2:

Tabela 2 – Etapas de confecção dos pinos / ferramentas

| Operação | Descrição |
|----------|------------------------------|
| 1 | Usinagem desbaste |
| 2 | Têmpera + Revenimento |
| 3 | Usinagem acabamento |
| 4 | Acabamento Superficial |
| 5 | Análise dimensional e dureza |

A etapa 4 do processo foi realizada com o objetivo de manter uma condição superficial mais próxima à realidade das condições das ferramentas de estampagem. Em cada um dos pinos a operação de lixamento foi realizada manualmente (direção longitudinal) e com auxílio de um torno mecânico (direção tangencial), adaptando-se a metodologia de preparação dos corpos de provas para

ensaios tribológicos da Bruning Tecnometal Ltda (anexo 3). Assim, o acabamento superficial foi realizado através da sequência de etapas de lixamento apresentadas na tabela 3 na região indicada na figura 40.

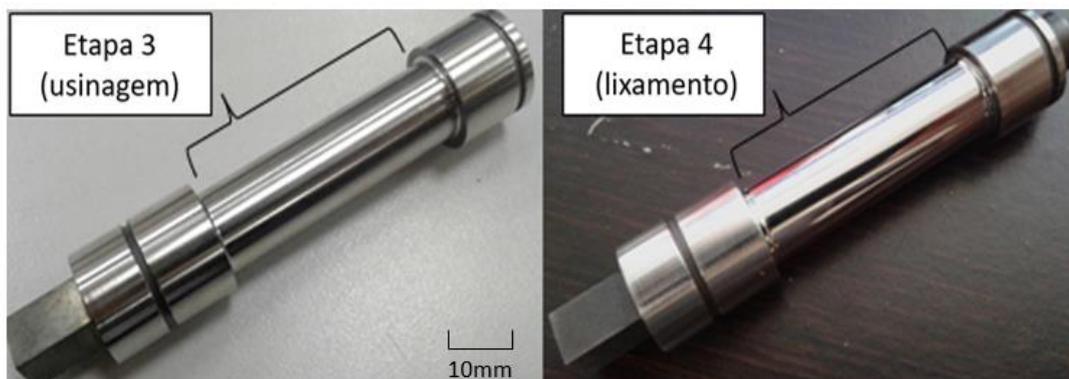


Figura 40 – Comparativo de acabamento superficial dos pinos

Tabela 3 – Etapas de lixamento e preparação da superfície das ferramentas

| Sequência de Etapas | Grão da Lixa utilizada | Direção de lixamento | Quantidade de Passes |
|---------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 600 | Tangencial | 60 |
| 2 | 600 | Longitudinal | 60 |
| 3 | 600 | Tangencial | 60 |
| 4 | 600 | Longitudinal | 60 |
| 5 | 600 | Tangencial | 60 |
| 6 | 800 | Tangencial | 60 |
| 7 | 800 | Longitudinal | 60 |
| 8 | 800 | Tangencial | 60 |
| 9 | 800 | Longitudinal | 60 |
| 10 | 800 | Tangencial | 60 |
| 11 | 1000 | Tangencial | 60 |
| 12 | 1000 | Longitudinal | 60 |
| 13 | 1000 | Tangencial | 60 |
| 14 | 1000 | Longitudinal | 60 |
| 15 | 1000 | Tangencial | 60 |
| 16 | 1200 | Tangencial | 60 |
| 17 | 1200 | Longitudinal | 60 |
| 18 | 1200 | Tangencial | 60 |
| 19 | 1200 | Longitudinal | 60 |
| 20 | 1200 | Tangencial | 60 |

Como última etapa, foram avaliadas as condições dimensionais e de dureza dos pinos. Em função das características geométricas dos pinos, as condições de rugosidade superficial não puderam ser medidas com precisão utilizando métodos convencionais (rugosímetro). Os resultados dimensionais foram satisfatórios em relação às condições de montagem dos pinos no equipamento, bem como os resultados de dureza atenderam às especificações definidas. A tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de dureza média (entre 3 pontos de medição) dos pinos.

Tabela 4 – Resultados da dureza média dos pinos

| Pino [Esp.] | Dureza média [HRC] |
|-------------|--------------------|
| 1 | 57,3 |
| 2 | 58,0 |
| 3 | 58,3 |
| 4 | 57,0 |
| 5 | 57,3 |
| 6 | 57,7 |
| 7 | 57,7 |
| 8 | 58,0 |
| 9 | 58,3 |

3.3.2. Propriedades mecânicas, químicas e de dureza das chapas

Foram retiradas 10 amostras de cada um dos 3 tipos de chapas, sendo que 5 delas foram destinadas aos ensaios de caracterização e as demais destinadas aos ensaios de atrito. Os corpos de provas foram cortados em guilhotina nas dimensões apresentadas na figura 41. A dimensão 40mm considerando que o equipamento permite larguras de até 50mm, e a medida de 1000mm trata-se da largura das bobinas das quais os materiais foram retirados. A direção de laminação escolhida tem relação com a facilidade de corte dos corpos de provas, e foi mantida constante para todos os corpos de provas.



Figura 41 – Dimensões dos corpos de provas

A tabela 5 apresenta os resultados das propriedades dos materiais utilizados na avaliação. Estes dados foram fornecidos pela empresa Bruning Tecnometal Ltda.

Tabela 5 – Propriedades das chapas utilizadas

| Especificações | Norma Técnica | [Esp.] | NBR 5915 EM | EMS ME 1508 EM | EMS ME 1508 EM |
|------------------------|-----------------|--------|----------------|----------------------|--------------------|
| | Espeçura (s) | [mm] | | 1,5 | 1,5 |
| Acabamento | [Esp.] | | Sem Acabamento | Galvanizado à quente | Eletro galvanizado |
| Propriedades Mecânicas | σ_{esc} | [MPa] | 177,5 | 241,4 | 241,4 |
| | $\sigma_{máx}$ | [MPa] | 286,5 | 363,4 | 363,4 |
| | C | [-] | 444,5 | 601,7 | 601,7 |
| | n | [-] | 0,1618 | 0,1888 | 0,1888 |
| Composição Química | Carbono (C) | [%] | 0,035 | 0,026 | 0,03 |
| | Silício (Si) | [%] | 0,015 | 0,0095 | 0,01 |
| | Manganês (Mn) | [%] | 0,186 | 0,192 | 0,22 |
| | Fósforo (P) | [%] | 0,0094 | 0,013 | 0,012 |
| | Enxofre (S) | [%] | 0,0041 | 0,012 | 0,019 |
| | Cromo (Cr) | [%] | 0,014 | 0,012 | 0,042 |
| | Molibdênio (Mo) | [%] | 0,0013 | 0,0018 | 0,0046 |
| | Níquel (Ni) | [%] | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 |
| | Alumínio (Al) | [%] | 0,054 | 0,043 | 0,044 |
| | Cobre (Cu) | [%] | 0,0067 | 0,0078 | 0,0092 |
| | Nióbio (Nb) | [%] | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 |
| | Titânio (Ti) | [%] | 0,0015 | 0,0011 | 0,0012 |
| | Vanádio (V) | [%] | 0,002 | 0,0019 | 0,0019 |
| | Boro (B) | [%] | < 0,0001 | 0,0025 | < 0,0001 |
| | Nitrogênio (N) | [%] | 0,0014 | 0,0031 | 0,0065 |
| Ferro (Fe) | [%] | 99,66 | 99,66 | 99,59 | |
| Dureza | [HV] | | 100 | 128 | 134 |

3.3.3. Velocidade de deslocamento

A velocidade de deslizamento é um parâmetro que pode ser controlado e parametrizado, visto que se trata apenas da regulagem da velocidade do cilindro hidráulico responsável pelo movimento do equipamento. Assim sendo, foi padronizada a velocidade de deslocamento dos ensaios $V_{des} = 0,03$ m/s, sendo esta uma velocidade intermediária possível de ser aplicada no equipamento de testes.

3.3.4. Lubrificante

Visando padronizar as condições de lubrificação em cada um dos ensaios, utilizou-se o lubrificante Ferrocote 214M®, cuja ficha técnica é apresentada no anexo 2, sem diluição em água. Este lubrificante é amplamente utilizado nos processos de estampagem da empresa Bruning Tecnometal Ltda por possuir propriedades que se adequam à toda a cadeia de produção da empresa (estampagem, soldagem, pintura, logística, entre outros). Para controlar a espessura do filme lubrificante, padronizou-se a aplicação de três gotas de óleo em cada corpo de prova. Homogeneamente distribuída, esta massa de óleo representa um filme de lubrificante $f_{lub} = 1,75\text{g/m}^2$.

3.4. Variáveis não controladas

Algumas variáveis que podem influenciar nos resultados não foram controladas na execução dos ensaios, dentre elas o operador do equipamento, variações de temperatura, características físicas do lubrificante em função das condições de temperatura e umidade relativa durante o ensaio ou o próprio ruído eletrônico oriundo da incerteza dos equipamentos de coleta de dados.

A possível variação de propriedades mecânicas entre os corpos de provas também não foi controlada no procedimento em questão, já que as mesmas propriedades mecânicas foram consideradas para os materiais B e C, que possuem a mesma especificação normativa. Para estas situações não foram planejados meios de controle.

3.5. Procedimentos Experimentais planejados

Em função das variáveis definidas, determinou-se o tipo de cruzamento destes dados para a execução dos ensaios práticos. Os ensaios planejados estão relacionados na tabela 6 e foram consideradas três repetições de cada um dos ensaios previstos, totalizando nove ensaios.

Para execução desta bateria de ensaios foram necessárias três ferramentas para cada um dos experimentos, considerando que cada repetição seja realizada com um pino diferente.

Tabela 6: Experimentos Planejados

| Experimento | Material da Chapa | Repetição |
|-------------|--------------------|-----------|
| A | BFF NBR 5915 EM | 1 |
| | | 2 |
| | | 3 |
| B | BGA EMS-ME 1508 EM | 1 |
| | | 2 |
| | | 3 |
| C | BEG EMS-ME 1508 EM | 1 |
| | | 2 |
| | | 3 |

3.6. Variáveis de Saída

Como resultados da bateria de ensaios a serem realizadas, para cada um dos métodos foram coletadas todas as variáveis necessárias para se calcular o coeficiente de atrito. A tabela 7 representa os ensaios realizados e os dados a serem coletados para determinação do coeficiente de atrito.

Tabela 7 - Experimentos e Resultados a serem coletados

| Experimento [Esp.] | Material da Chapa [Esp.] | Repetição [Esp.] | F1 [N] | F2 [N] | T [N.m] |
|--------------------|--------------------------|------------------|--------|--------|---------|
| A | BFF NBR 5915 EM | 1 | $F1$ | $F2$ | T |
| | | 2 | $F1$ | $F2$ | T |
| | | 3 | $F1$ | $F2$ | T |
| B | BGA EMS-ME 1508 EM | 1 | $F1$ | $F2$ | T |
| | | 2 | $F1$ | $F2$ | T |
| | | 3 | $F1$ | $F2$ | T |
| C | BEG EMS-ME 1508 EM | 1 | $F1$ | $F2$ | T |
| | | 2 | $F1$ | $F2$ | T |
| | | 3 | $F1$ | $F2$ | T |

3.7. Procedimento para determinação do coeficiente de atrito

Os ensaios de dobramento sob tensão foram realizados no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, local em que o equipamento está disponível e com o auxílio da equipe responsável.

Visando evitar que qualquer impureza que estivesse na superfície das chapas pudesse influenciar nos resultados dos ensaios, uma operação de limpeza das

chapas foi realizada antes do início de cada um dos ensaios. Cada chapa foi limpa através da passagem de pano absorvente embebido em acetona, para que quaisquer resíduos, inclusive o óleo protetivo da superfície da chapa, fosse completamente removido antes do início do ensaio, conforme demonstrado na figura 42.



Figura 42 – Operação de limpeza das chapas antes de cada ensaio

Após a limpeza das chapas, a aplicação do lubrificante foi realizada com o auxílio de um conta-gotas, visando padronizar a quantidade de lubrificante utilizada em cada um dos ensaios. Três gotas foram colocadas sobre a superfície da chapa e homogeneamente com auxílio de um rolo de material plástico distribuídas sobre a superfície. O uso do rolo plástico foi para evitar que o óleo aplicado sobre a chapa fosse absorvido, o que ocorreria se um pincel ou tecido fosse utilizado. A figura 43 demonstra a aplicação do lubrificante.



Figura 43 – Aplicação do lubrificante sobre as chapas

Com a chapa devidamente lubrificada, o pino que representa a ferramenta e a chapa são montados no equipamento e o ensaio executado. Os dados fornecidos pelo ensaio permitem, através da aplicação da equação 14, o cálculo do coeficiente de atrito. Após calculado o coeficiente de atrito em cada momento do ensaio foi realizada uma análise destes valores através do gráfico que relaciona o coeficiente de atrito e o tempo percorrido de ensaio. Considerando que o sistema de leitura de dados foi acionado antes do início do ensaio, as leituras iniciais são errôneas e não representam as condições de atrito do ensaio e, por este motivo, são desconsideradas. O início do tensionamento da tira é visível no gráfico quando ocorre um pico no coeficiente de atrito, que representa o momento do início do movimento relativo entre a chapa e o pino. Os dados a serem considerados portanto correspondem ao ponto imediatamente após este pico inicial, ou seja, à partir da estabilização do coeficiente de atrito e a partir deste ponto por um período de dois segundos de ensaio. Os dados coletados após este momento também são desconsiderados.

Após a exclusão dos dados a serem desconsiderados, o gráfico do coeficiente de atrito pode ser representado de maneira mais clara e permite uma avaliação dos resultados de maneira mais adequada. A figura 44 representa um modelo do gráfico resultante do coeficiente de atrito de um dos ensaios realizados. Esta mesma metodologia de tratamentos dos dados foi utilizada para todos os nove ensaios realizados.

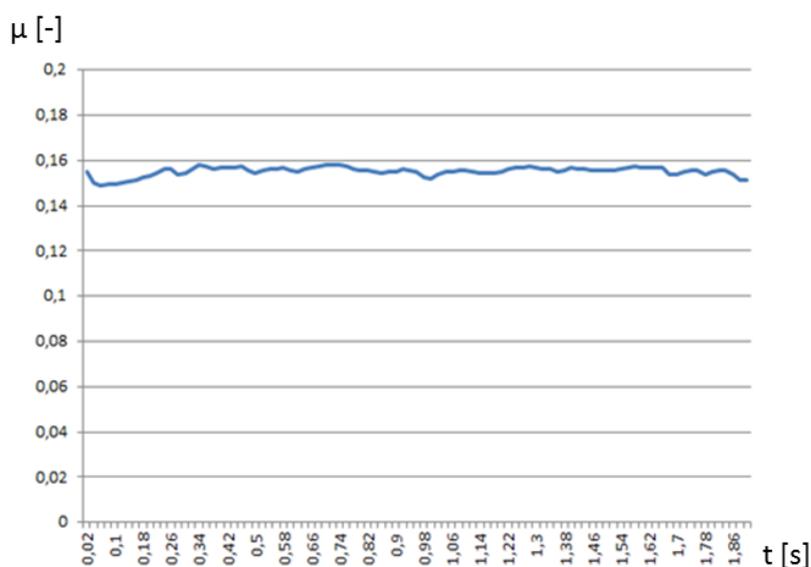


Figura 44 – Modelo de gráfico do coeficiente de atrito após tratamento dos dados

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir estão apresentados os resultados obtidos em todos os ensaios realizados após o tratamento dos dados, permitindo que à partir destes dados possam ser realizadas as análises e conclusões necessárias.

4.1. Resultados dos Ensaios de Dobramento sob Tensão

Os dados coletados dos ensaios de dobramento sob tensão (F1, F2 e T) permitem a execução dos cálculos de coeficiente de atrito conforme equação 14. Assim, foram obtidos os resultados de coeficiente de atrito de Coulomb mostrados nos gráficos das figuras 45, 46 e 47. O gráfico representa o comportamento do coeficiente de atrito em cada instante durante o ensaio. Entretanto, através de uma média aritmética dos resultados em todos os instantes, definiu-se um coeficiente de atrito médio para cada um dos ensaios, que estão listados conforme tabela 8.

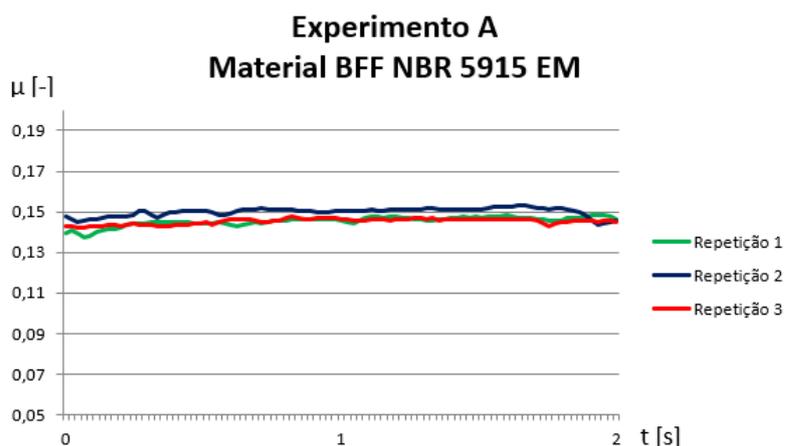


Figura 45 –Coeficientes de atrito x tempo nos ensaios do material BFF NBR 5915 EM

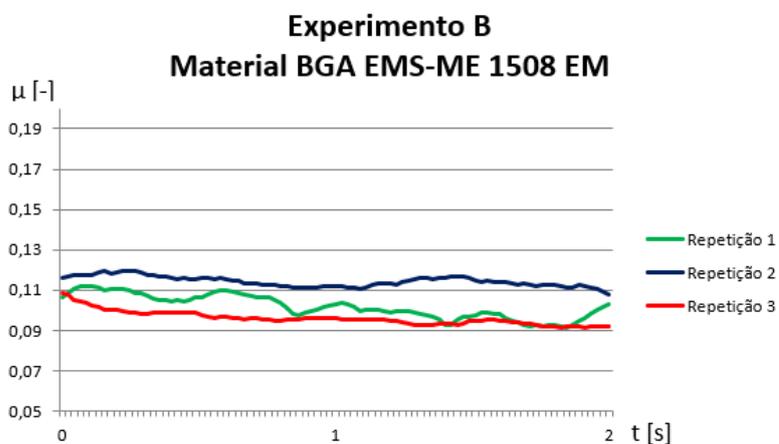


Figura 46 –Coeficientes de atrito x tempo nos ensaios do material BGA EMS-ME 1508 EM

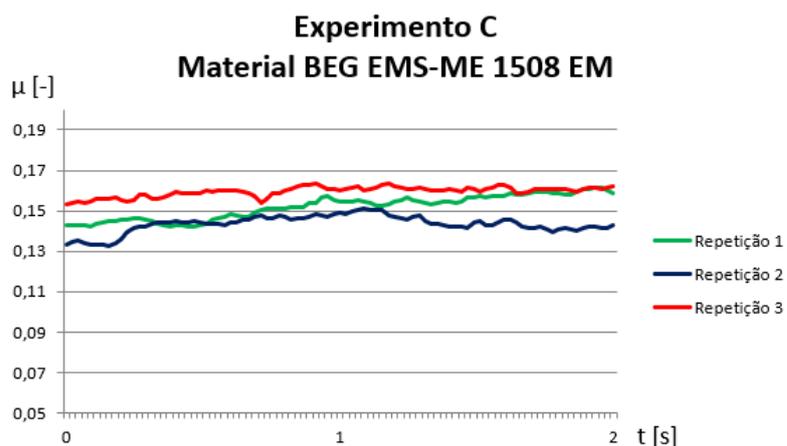


Tabela 8 – Coeficiente de atrito médio obtido em cada ensaio

| Experimento [Esp.] | Material da Chapa [Esp.] | Repetição [Esp.] | μ [-] | DV [-] |
|--------------------|--------------------------|------------------|-----------|--------|
| A | BFF NBR 5915 EM | 1 | 0,145 | 0,0018 |
| | | 2 | 0,149 | |
| | | 3 | 0,145 | |
| B | BGA EMS-ME 1508 EM | 1 | 0,101 | 0,0075 |
| | | 2 | 0,114 | |
| | | 3 | 0,096 | |
| C | BEG EMS-ME 1508 EM | 1 | 0,151 | 0,0065 |
| | | 2 | 0,143 | |
| | | 3 | 0,159 | |

Visualmente a característica do corpo de provas após a realização do ensaio é de um material que sofreu uma expressiva deformação plástica, que pode ser evidenciada pelas condições da tira após o ensaio mostrada na figura 48.

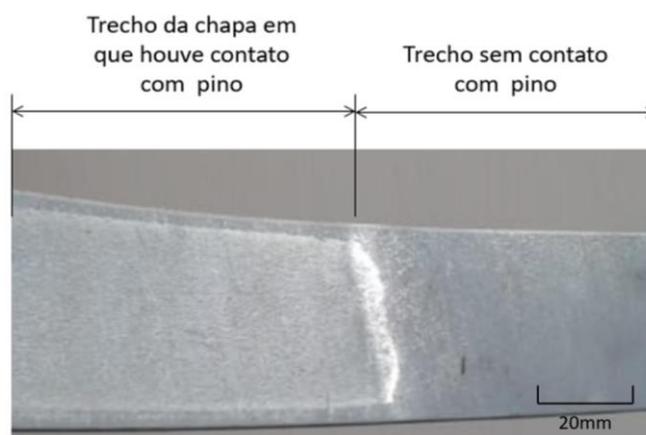


Figura 48 – Marca provocada pelo contato com o pino na chapa no material C.

Além da deformação plástica ocorrida durante o processo, foi possível perceber visualmente que, durante o ensaio no material B, ocorreu o acúmulo de resíduos provenientes do acabamento superficial da chapa misturados ao óleo de lubrificação que deu uma coloração escurecida ao lubrificante, conforme demonstrado na figura 49. Nos ensaios realizados nos materiais A e C não foi possível perceber tal situação.



Figura 49 – Acúmulo de resíduos provenientes do acabamento superficial da chapa no material B

4.2. Análise dos resultados dos ensaios

A análise dos resultados encontrados está separa em dois grupos. A primeira análise retrata um comparativo entre os resultados dos gerais apresentados por cada um dos três materiais ensaiados, comparando os resultados de um material com outro. Na sequência, uma análise dos resultados das repetições do ensaio em cada um dos materiais isoladamente, comparando os resultados das três repetições do ensaio em um mesmo material.

4.2.1. Comparativo dos coeficientes de atrito dos três materiais

Uma nova média entre os três ensaios de cada um dos experimentos permite a determinação do coeficiente de atrito médio encontrados para cada um dos materiais ensaiados, sendo estas apresentadas na tabela 9.

Tabela 9 – Coeficiente de atrito médio obtido para cada experimento realizado no DST

| Experimento [Esp.] | Material [Esp.] | μ [-] | DV [-] |
|--------------------|-----------------|-----------|--------|
| 1 | A | 0,146 | 0,0018 |
| 2 | B | 0,103 | 0,0075 |
| 3 | C | 0,151 | 0,0065 |

Os materiais denominados A e C tiveram comportamentos similares no que diz respeito ao coeficiente de atrito médio, com valores que se aproximam de 0,15. O material B, por sua vez, apresentou valores significativamente menores de coeficiente de atrito. Estes resultados confirmam que chapas com condições superficiais diferentes estão sujeitos a condições de atrito diferentes, como já citado por LOOSE (2015), que apresenta diferentes resultados para as condições de atrito e desgaste em chapas com diferentes níveis de rugosidade superficial. Ainda, confirmam as condições citadas por WANG (2014), que apresenta os principais fatores que influenciam no coeficiente de atrito de um processo, dentre eles as condições de acabamento superficial dos elementos em contato.

Os dados do torque, variável que influencia diretamente no resultado do coeficiente de atrito, podem ser observados na figura 50 e avaliados de maneira isolada. Nela estão representados os torques dos três materiais, sendo que o experimento 2 (material B) apresentou valores de torque médio de 2,94 Nm, enquanto os experimentos 1 e 3 apresentaram valores de 3,60 Nm e 3,79 Nm, respectivamente. Isto corresponde, em relação ao experimento 2, um torque 22% maior no experimento 1 e 28% maior no experimento 3. O torque, na equação, representa exatamente o resultado das condições e forças de atrito que estão ocorrendo na área de contato entre o pino e a chapa. Percebe-se, portanto, a influência direta e significativa do torque na equação do cálculo do coeficiente de atrito.

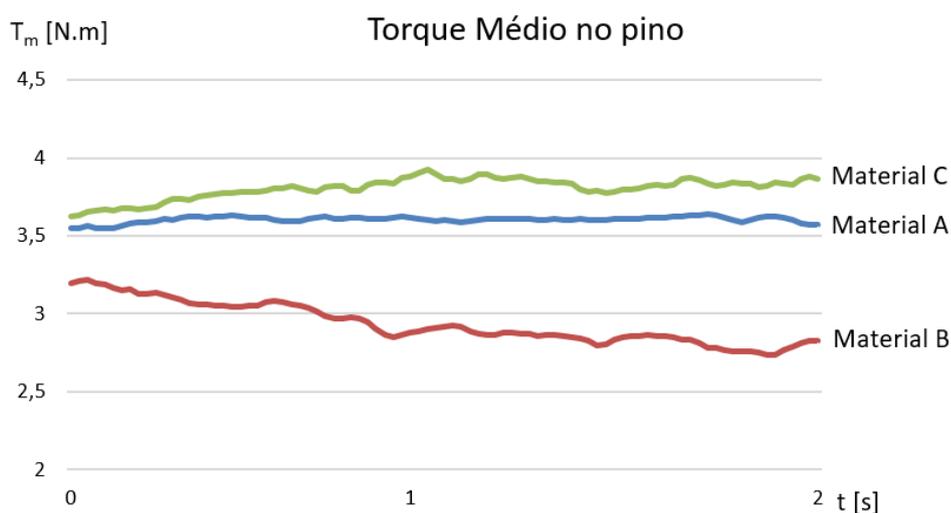


Figura 50 – Comparativo do torque entre os materiais A, B e C

Valores de torque mais baixos no experimento B estão relacionadas diretamente às condições de contato entre a chapa e o pino. Percebe-se através da figura 50 as partículas que se desprenderam da camada de zincagem da chapa, afetando as características superficiais da chapa. Além disso, outros elementos do sistema são afetados, como as condições de lubrificação por exemplo, já que o óleo passou a estar contaminado com partículas. Na figura 51 é possível perceber a mudança que ocorre na superfície da chapa já no primeiro momento em que esta entra em contato com o pino. Isto significa que, fazendo com que, a partir deste ponto, a chapa já não possua as mesmas características superficiais iniciais. Estes fatores, em combinação à todas as demais condições do ensaio, provocaram as diferentes condições de torque nos pinos e, conseqüentemente, no coeficiente de atrito.

Estes resultados representam as condições citadas por SOUZA (2011) e SCHEY (1983), que indicam a ocorrência de mudanças no corpo de provas durante o ensaio, fazendo com que o coeficiente de atrito não seja constante ao longo do ensaio, bem como de WANG (2014) que indica a não linearidade das condições de atrito de um processo, em função da quantidade de fatores que impactam no resultado e dos efeitos da combinação entre estes fatores.

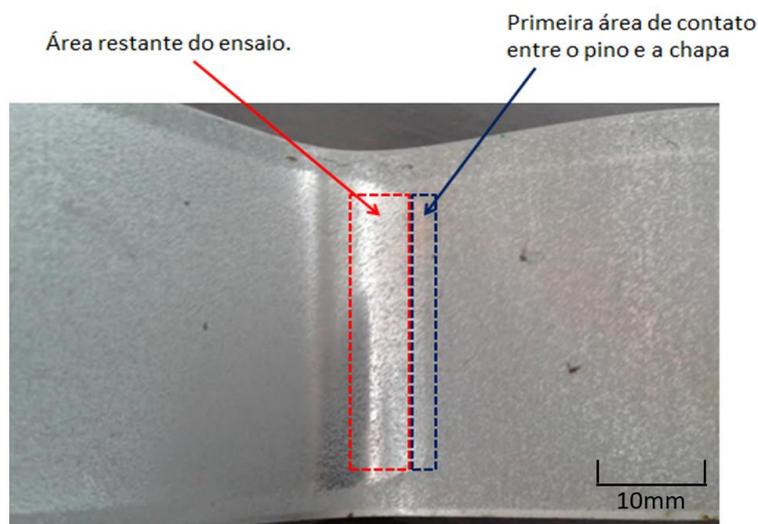


Figura 51 – Mudanças na superfície da chapa ocorridas durante o ensaio DST no material C

4.2.2. Comparativo entre os ensaios de um mesmo material

As variações entre três medições em condições similares de ensaios apresentaram algumas variações, que podem ser identificadas pelo comparativo do coeficiente de atrito médio em cada um dos ensaios. As variações entre os três coeficientes de atrito medidos nas condições de ensaio do experimento A apresentaram um desvio padrão inferior aos demais ensaios, ou seja, os resultados foram os mais estáveis dentre os três experimentos realizados. Isto pode ser explicado pelo fato de não haver a camada de galvanização na chapa. Neste caso temos um elemento de influência a menos em relação aos outros casos e conseqüentemente maior estabilidade no processo.

Os experimentos 2 e 3 apresentaram resultados com variações representadas por um desvio padrão de 0,0075 e 0,0065 respectivamente. Estas variações estão diretamente relacionadas à variação de torque, demonstrada através do gráfico da figura 52. É possível perceber, na análise das variações do torque, que o experimento 1 possui valores de torque estáveis em todos os ensaios, enquanto os torques dos experimentos 2 e 3 possuem valores que variam significativamente entre um ensaio e outro.

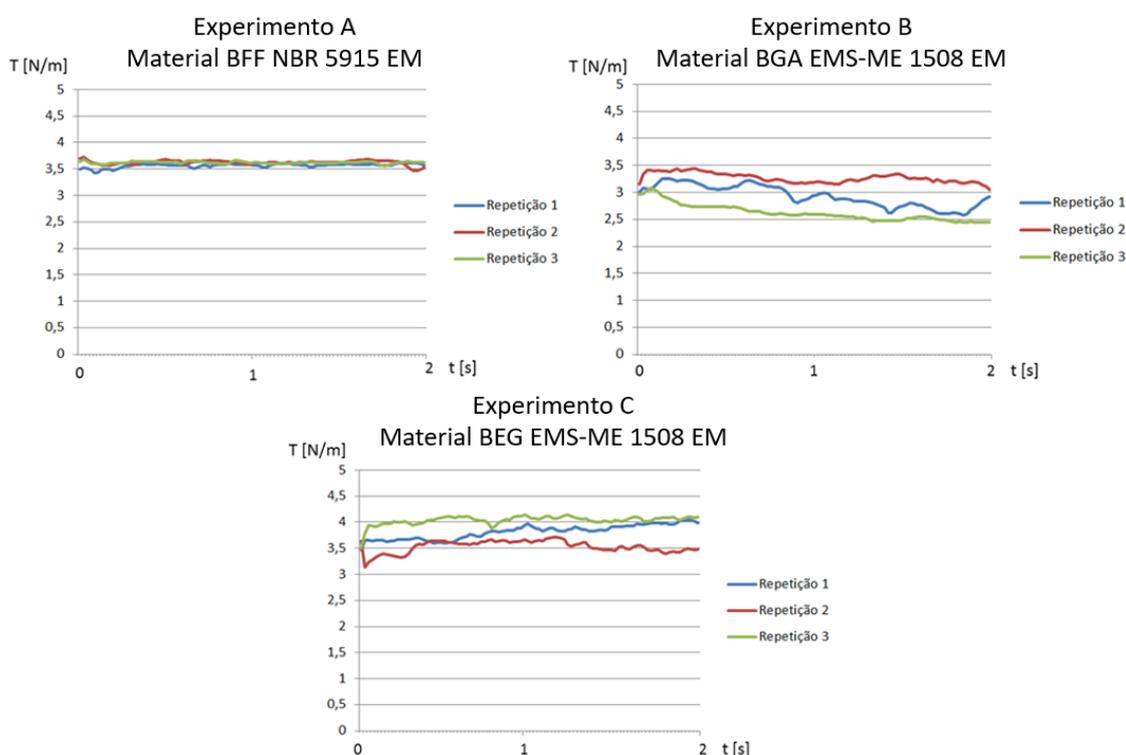


Figura 52 – Torque medido em cada experimento

As variações entre os resultados dos experimentos 2 e 3 podem estar diretamente relacionadas às condições de acabamento superficial das chapas, que possuem camada de zinco como proteção contra a oxidação. Outros fatores também podem influenciar nestes resultados, como variações nas propriedades mecânicas das chapas entre um e outro corpo de provas e consequentes diferenças nas condições de deformação plástica que ocorrem durante o processo ou ainda variações no próprio equipamento de ensaio. As chapas com acabamento superficial galvanizado geraram uma condição de maior instabilidade no coeficiente de atrito, instabilidade esta que se reflete também nos processos produtivos de estampagem para as condições propostas.

4.3. Análise da força máxima de estampagem

A determinação da força máxima de estampagem em um processo requer que sejam conhecidas as condições de atrito, as propriedades mecânicas do material e as condições geométricas do produto. Para calcular analiticamente a força de estampagem e compreender a influência do coeficiente de atrito neste resultado, considera-se a condições geométricas da figura 53 e as propriedades mecânicas da chapa conforme tabela 10. Estas dimensões foram consideradas em função de uma ferramenta de embutimento existente e disponível, permitindo assim a continuidade das análises futuramente.

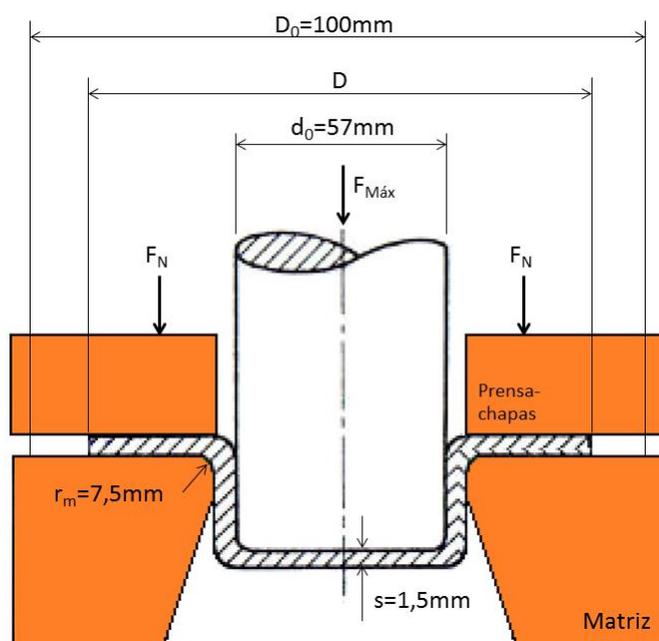


Figura 53 – Geometria do copo considerada no cálculo

Tabela 10 – Propriedades mecânicas da chapa

| Material [Esp.] | Norma de Referência [Esp.] | σ_{esc} [Mpa] | σ_{max} [Mpa] | C [MPa] | n [-] |
|--------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|----------|
| A | NBR 5915 EM | 177,5 | 286,5 | 444,5 | 0,1618 |
| B | EMS ME 1508 EM | 241,4 | 363,4 | 601,7 | 0,1888 |
| C | EMS ME 1508 EM | 241,4 | 363,4 | 601,7 | 0,1888 |

Com relação às condições de atrito, considera-se os coeficientes de atrito determinados nos resultados dos ensaios, cujos resultados são diferentes apesar dos materiais B e C possuírem a mesma especificação de propriedades mecânicas. Portanto, a determinação da força máxima de estampagem dar-se-á considerando a geometria, as propriedades mecânicas e os coeficientes de atrito conforme demonstrado na tabela 11.

Tabela 11 – Variáveis de cálculo da força máxima de estampagem

| Material [Esp.] | σ_{esc} [Mpa] | σ_{max} [Mpa] | C [MPa] | n [-] | D_0 [mm] | d_0 [mm] | s [mm] | r_m [mm] | μ [-] |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|------------|----------|---------------|---------------|-----------|---------------|--------------|
| A | 177,5 | 286,5 | 444,5 | 0,1618 | 100 | 57 | 1,5 | 7,5 | 0,146 |
| B | 241,4 | 363,4 | 601,7 | 0,1888 | 100 | 57 | 1,5 | 7,5 | 0,103 |
| C | 241,4 | 363,4 | 601,7 | 0,1888 | 100 | 57 | 1,5 | 7,5 | 0,151 |

Com estes dados, a força máxima de estampagem pode ser determinada, analiticamente para as condições do material A:

Determinação do F_{ID} :

$$D = \left(0,77 \cdot \frac{D_0}{d_0} + 0,23\right) \cdot d_0 = \left(0,77 \cdot \frac{100}{57} + 0,23\right) \cdot 57 = 90,11mm \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\varphi_1 = \ln \left(\frac{\sqrt{D_0^2 + d_0^2 - D^2}}{d_0} \right) = \ln \left(\frac{\sqrt{100^2 + 57^2 - 90,11^2}}{57} \right) = 0,228 \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\varphi_2 = \ln\left(\frac{D_0}{d_0}\right) = \ln\left(\frac{100}{57}\right) = 0,562 \quad (\text{Eq. 7})$$

$$kf_1 = C \cdot \varphi_1^n = 444,5 \cdot 0,228^{0,1618} = 350 \text{ MPa} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$kf_2 = C \cdot \varphi_2^n = 444,5 \cdot 0,526^{0,1618} = 404,94 \text{ MPa} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$kf_m = \frac{kf_1 + kf_2}{2} = \frac{350 + 404,94}{2} = 377,47 \text{ MPa}$$

$$F_{ID} = A_0 \cdot kf_m \cdot \ln\frac{D}{d_0} = \pi \cdot 57,1,5 \cdot 377,47 \cdot \ln\left(\frac{90,11}{57}\right) = 46435,62 \text{ N} \quad (\text{Eq. 3})$$

Determinação do F_{APC} :

$$F_N = \frac{\sigma_{max}}{400} \cdot \left[(\beta - 1)^2 + \left(\frac{d_0}{200 \cdot s} \right) \right] \cdot \frac{\pi \cdot [D_0^2 - (d_0 + 2s + 2r_m)^2]}{4} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$F_N = \frac{444,5}{400} \cdot \left[\left(\frac{100}{57} - 1 \right)^2 + \left(\frac{57}{200 \cdot 1,5} \right) \right] \cdot \frac{\pi \cdot [100^2 - (57 + 3 + 15)^2]}{4} = 2898,53 \text{ N}$$

$$F_{APC} = 2 \cdot \mu \cdot F_N \cdot \frac{d_0}{D} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$F_{APC} = 2 \cdot 0,146 \cdot 2898,53 \cdot \frac{57}{90,11} = 535,38 \text{ N}$$

Determinação do F_{AR} :

$$F_{AR} = \left(e^{\mu \cdot \frac{\pi}{2}} - 1 \right) \cdot (F_{ID} + F_{APC}) \quad (\text{Eq. 10})$$

$$F_{AR} = \left(e^{0,146 \cdot \frac{\pi}{2}} - 1 \right) \cdot (46435,62 + 535,38) = 11324,07 \text{ N}$$

Determinação do F_{RE} :

$$F_{RE} = \pi \cdot d_0 \cdot s \cdot k f_1 \cdot \frac{s}{4 \cdot r_m} = \pi \cdot 57,1,5,350 \cdot \frac{1,5}{4,7,5} = 4700,71 \text{ N} \quad (\text{Eq. 11})$$

Determinação do F_{Max} :

$$F_{\text{Máx}} = 46435,62 + 535,38 + 11324,07 + 4700,71 = 62995,79 \text{ N} \quad (\text{Eq. 2})$$

Utilizando-se da mesma metodologia de cálculos para todas as condições, os resultados obtidos estão apresentados no gráfico da figura 54.

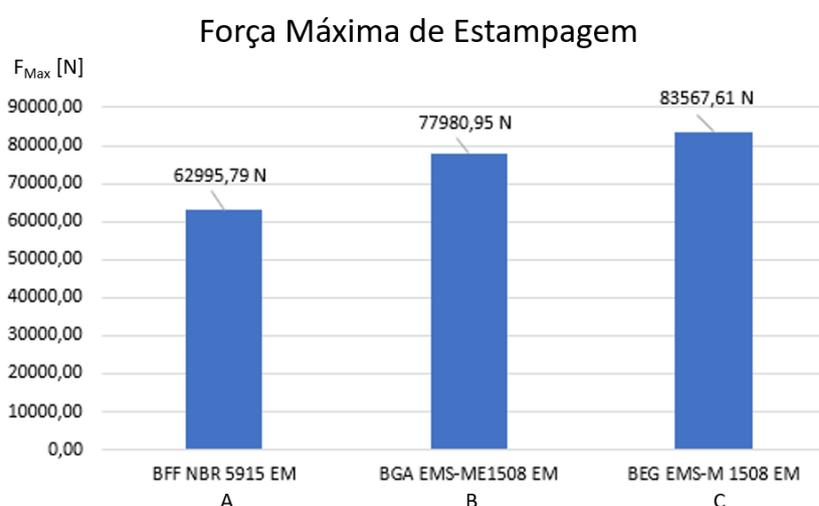


Figura 54 – Geometria do copo considerada no cálculo

Percebem-se diferenças consideráveis na força máxima de estampagem para as condições analisadas, principalmente do material A em relação aos demais. Esta condição está vinculada ao fato de que este possui propriedades mecânicas com limites de resistência inferiores aos materiais B e C. A influência do coeficiente de atrito de maneira isolada pode ser observada entre os materiais B e C, sendo que as propriedades mecânicas dos materiais são as mesmas. Neste caso, o aumento do coeficiente de atrito de 0,103 para 0,151 provocou um aumento de 7,6% na força máxima de estampagem. Trata-se de uma diferença pouco significativa quando o objetivo de determinar a força máxima de estampagem for determinar a prensa ou capacidade do equipamento de estampagem.

Considerando o fato de que a força máxima é determinada pelo somatório de outras quatro forças determinadas isoladamente, é possível identificar que o

coeficiente de atrito não influencia nos resultados das forças F_{ID} e F_{RE} . Assim sendo, apenas as forças F_{APC} e F_{AR} são influenciadas pelo coeficiente de atrito. Comparando os resultados de F_{APC} e F_{AR} para os materiais B e C, que possuem as mesmas propriedades mecânicas, nota-se que a F_{APC} possui uma menor influência no resultado final, indicando conseqüentemente uma menor influência do coeficiente de atrito na região do prensa-chapas em relação à do coeficiente de atrito no raio da matriz. Os resultados podem ser observados na figura 55 através do comparativo das forças F_{APC} e F_{AR} para as duas condições de coeficiente de atrito.

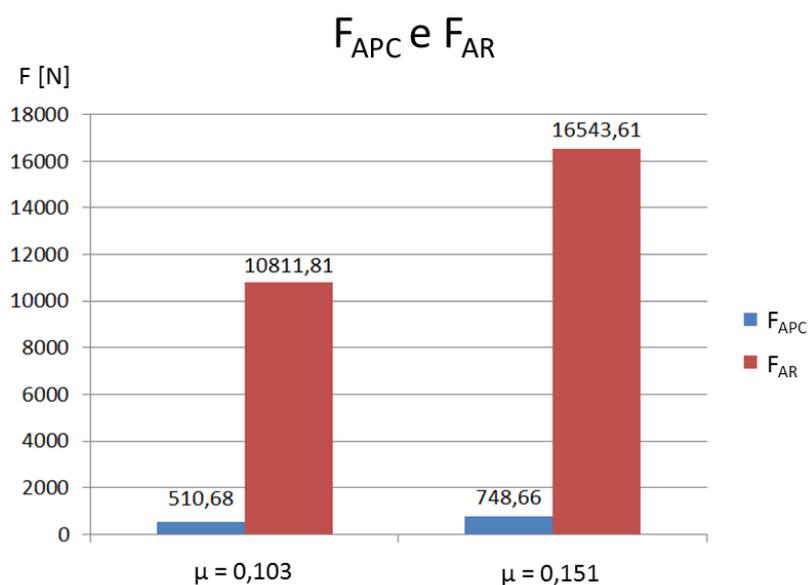


Figura 55 – Comparativo de F_{APC} e F_{AR} para o mesmo material com diferentes coeficientes de atrito

5. CONCLUSÕES

Dados confiáveis são necessários no desenvolvimento de novos produtos e/ou novas tecnologias de estampagem, já que o coeficiente de atrito é um fator primordial na simulação numérica de processos de estampagem. O ensaio de dobramento sob tensão permite obter resultados de coeficientes de atrito de sistemas, aproximando-se das condições de processo de embutimento, onde o pino representa o raio da matriz de embutimento e os fenômenos que ocorrem durante o ensaio são similares aos que ocorrem na execução do processo. Considerando que o coeficiente de atrito não é constante em todas as regiões de contato entre chapa e ferramenta, bem como não é constante ao longo do processo, a aproximação do ensaio à condição real do processo permite que os resultados, conseqüentemente, aproximem-se das condições reais em um processo de embutimento.

As condições de atrito determinadas pelos ensaios obtiveram resultados que representam a grande diversidade de fatores que envolvem o estudo da tribologia e o efeito que estes fatores podem ter nos resultados dos ensaios. Os resultados obtidos para o coeficiente de atrito têm influência das variáveis de maneira isolada e também da interação entre elas, já que nestes ensaios mais de uma variável estavam presentes simultaneamente. O torque que é gerado no pino e lido pelo sensor do equipamento mostrou-se diretamente relacionado ao coeficiente de atrito. Este torque é resultado das condições de contato e movimento relativo entre a chapa ensaiada e o pino, que representa o raio da ferramenta.

A aproximação do ensaio às condições reais do processo de embutimento permite reduzir o número de variáveis que não se pode controlar e assim obter um resultado mais próximo do real. Exemplos destas variáveis são a deformação plástica que ocorre durante o processo e o encruamento da chapa. O ensaio provoca na tira uma deformação plástica de dobramento e endireitamento, em condições similares à ocorrida em um processo de embutimento. Esta deformação plástica ocorrida na chapa modifica as propriedades mecânicas e superficiais da chapa, permitindo a análise das condições de atrito em uma situação que representa mais fielmente o que ocorre na região de contato entre a chapa e o raio da ferramenta em uma operação de embutimento.

Os parâmetros de um processo de estampagem (força de estampagem, por exemplo), são influenciados diretamente pelo coeficiente de atrito médio do sistema. Além dos parâmetros, os próprios resultados do produto são afetados quando as condições de atrito não forem conhecidas e levadas em consideração no desenvolvimento do processo. A força máxima foi o parâmetro adotado nesta análise para confirmar estas condições, e exemplifica a importância da correta determinação do coeficiente de atrito, já que há influência direta das condições de atrito na força máxima de estampagem.

As forças de atrito no prensa chapas e no raio da ferramenta (F_{APC} e F_{AR}) mostraram-se, através dos cálculos, ter influências bastante diferentes na força máxima de estampagem, sendo que a força de atrito no raio da ferramenta foi mais de 20x maior em relação à força de atrito no prensa-chapas.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros, podem ser citadas as seguintes alternativas:

1 – Comparativo dos resultados apresentados nesta pesquisa com resultados práticos de embutimento e simulação numérica do processo;

2 – Comparativo do coeficiente de atrito para diferentes condições de acabamento superficial de chapas através de outros métodos de determinação do coeficiente de atrito;

3 – Comparativo de resultados entre diferentes métodos de determinação do coeficiente de atrito;

4 – Análise das condições de desgaste na utilização de chapas com ou sem revestimento ou tipos diferentes de revestimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREASEN, J.L., OLSSON, D. D, CHODNIKIEWICZ, K., BAY, N. **Bending under tension test with direct friction measurement.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, v. 220, n. 1, p. 73-80, Jan 2006.

APACHITEI, I., TICHELAAR, F., DUSZCZYK J., KATGERMAN, L., **The effect of heat treatment on the structure and abrasive wear resistance of autocatalytic NiP and NiP–SiC coatings,** Surface & Coatings Technology, 149, pp 263–278, 2002.

BAY, N. **The State of the Art in cold forging lubrication.** Journal of Materials Processing Technology,46. pp 19-40, 1994.

BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology.** Editora John Wiley & Sons, Segunda Edição, Nova York, 2013.

BUDINSKI, K. G. **Friction, Lubrication, and Wear Technology.** In: FRICTION, L. T. M. F. S. (Ed.). ASM Metals Handbook. 1992

CHANARON, J.J. **Automobiles. A static technology, a ‘wait-and-see’ industry?** Technology Management, V. 16, n. 7, 1998.

COSTA, A.R. da. **Análise da estampagem de chapas metálicas utilizando elementos finitos.** Dissertação de Mestrado – UNESP - Guaratinguetá, 2003.

DA SILVA, M. F. L. P., **Influência do Uso de Lubrificantes no Processo de Estampagem Profunda com Chapas Espessas de Aço.** Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas – Campinas-SP, 2007.

DIN 4766 - Herstellverfahren der Rauheit von Oberflächen. Editora Beuth Verlag. Berlin,1981

DIN 8580 – Fertigungsverfahren. Editora Beuth Verlag. Berlin,1985

FERRARINI, J.L. **Caracterização de Chapas Metálicas para Estampagem.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, 2004.

FOLLE, L.F., **Estudo do coeficiente de atrito para processos de estampagem.** Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, 2012.

FREIRE, J. L.; JUNIOR, J.L.; DE BARCELOS, C.S., **Avaliação do lubrificante no processo de estampagem usando ensaio Erichsen.** Tecnologia em Metalurgia e Materiais, v.1 n.4, pp.47-50, 2005.

GAARD, A., **Wear mechanisms in sheet metal forming.** Dissertation – Karlstad University Studies – Karlstad, 2008.

GARCIA, A., SPIN, J.A., SANTOS, C.A. dos, **Ensaios dos Materiais.** Brasil LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2ª ed. 2012.

GHERCA, A., FATU, A., HAJJAM, M., MASPEYROT, P., **Influence of surface texturing on the hydrodynamic performance of a thrust bearing operating in steady-state and transient lubrication regime,** Tribology International, 102, pp. 305–318, 2016.

HAAR, R. **Friction in sheet metal forming. The influence of local contact conditions and deformations.** Phd Thesis, Twenty University, 1996.

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

HUTCHINGS, I. M., **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials.** Butterworth Heinemann, Oxford (1992)

INSAUSTI, J. W., et al. **Comparación de rugosidades de superficies metálicas medidas con rugosímetro electromecánico y con análisis de imágenes de microscopía electrónica**, Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, p. 863-870, 2000.

KATO, K. **Wear in relation to friction – a review**. Wear, 241, 151-157, 2000.

KREN, L. A., **The Case for Dry-Film Lube**. Metalforming Magazine, February- 2007, pp.28-30, 2007.

KOBAYASHI, S., OH, S.I., ALTAN T., **Metal Forming and the Finite-Element Method**, Oxford University Press, New York, 1989.

LASCOE, O.D., **Handbook of Fabrication Processes**, Metals park ASM International, 1988.

LOOSE, D. E., **Desenvolvimento de metodologia de ensaios Tribológicos para conformação de chapas**. Monografia – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Panambi, 2015.

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

MENDES, M. A. R. S. **Estudo do desgaste de ferramentas com e sem revestimentos de filmes finos utilizadas em operações de conformação a frio**. Dissertação de Mestrado – Escola politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo, 2009.

Metal Forming Handbook / Schuler (c) Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1998.

NILSON, M. S. et al. **Strategic surface topographies for enhanced lubrication in sheet forming of stainless steel**. International Journal of Surface Science and Engineering, V. 4, n. 1, p. 68-79, 2010.

PANKNIN, W. **Die Grundlagen des Tiefziehens im Anschlag unter besonderer Berücksichtigung der Tiefziehprüfung.** Bänder Bleche Rohre, v. 2, n. 4 pp.133-143, 1961.

PARISE, Karine. **Estudo do comportamento Tribológico de Líquidos Iônicos como Fluidos Lubrificantes em Processos de Estampagem.** Monografia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, 2015.

RODRIGUEZ, V.; SUKUMARAN, J.; SCHLARB, A. K.; DE BAETS, P., **Influence of solid lubricants on tribological properties of polyetheretherketone (PEEK).** Tribology International, 103, pp.45-57, 2016.

SANTOS, G. R. dos. **Caracterização e avaliação do comportamento tribológico do aço DIN X100CrMoV8-1-1 com tratamento duplex.** Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, 2015.

SCHAEFFER, L. **Manufatura por Conformação Mecânica.** Editora Imprensa Livre, Porto Alegre, 2016.

SCHAEFFER, L, NUNES, R. M., BRITO, A.M.G. **Tecnologia da Estampagem de chapas metálicas.** Gráfica da UFRGS, Porto Alegre, 2017.

SCHEY, J. A., **Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear.** American Society for Metals, 1983.

SEIBEL E., PANKNIN W., **Die Grundlagen des Tiefziehens im Anschlag,** v. 46, n. 7, pp. 321-326, 1956.

SINGH, H.; SINGH, P.;BHOWMICK, H., **Influence of MOS₂, H₃BO₃, and MWCNT additives on the dry and lubricated sliding tribology of AMMC–steel contacts.** Journal of Tribology, v 140(4). 2018

SNIEKERS R. J. J. M., SMITS, H. A. A. **Experimental set-up and data processing of the radial strip-drawing friction test.** Journal of Materials Processing Technology, vol. 66, pp. 216-223. Eindhoven University of Technology, 1997.

SOUZA, J H C. **Otimização de Superfícies tribológicas em ferramentas para conformação de chapas.** 13º Conferencia Nacional de Conformação de Chapas, pp 99-109 - Porto Alegre, 2009.

SOUZA, J. H. C. de. **Seleção de Lubrificantes para Conformação de Chapas: Visão da Cadeia Produtiva,** Anais do 31º Senafor, pp 145-156 - Porto Alegre, 2011.

STOETERAU, R. L. **Tribologia.** Apostila da Disciplina de Tribologia da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2004. Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/Stoterau/Tribolbogia-final-v4.pdf>> Acesso em: 28 ago. 2017.

STOTT, F.H., **High-temperature sliding wear of metals,** Tribology International, 35, pp 489–495, 2002.

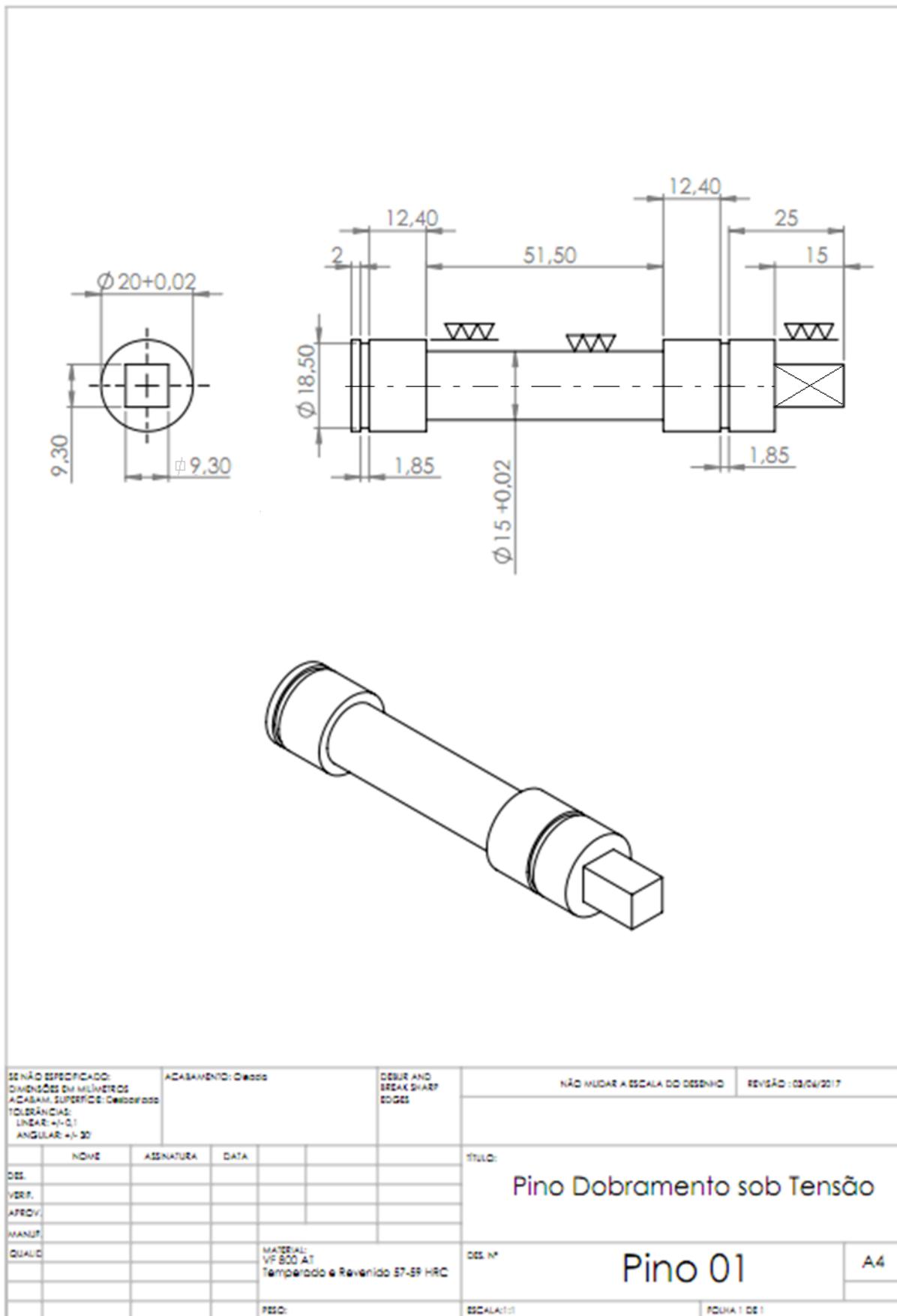
TER HAAR, R. **Friction in sheet metal forming, the influence of (local) contact conditions and deformation** (1996). Ph.D. thesis, University of Twente, Enschede, 1996.

UNDA, A.G.R.; LIN, V.F.C.; DE GODOY, G.C.D. **Metodologia para a aplicação da análise topográfica ao estudo de processos de superfície,** Revista Matéria vol.12 no.4, 2007.

WANG, D.; YANG H.; LI, H., **Advance and trend of friction study in plastic forming.** Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 24, pp.1263-1272, Xi'an-China, 2014.

APÊNDICE

Apêndice 1 –Pino utilizado no ensaio DST

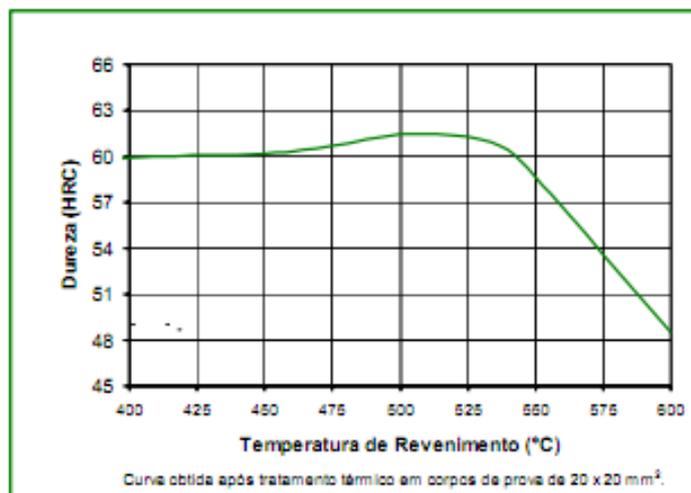


ANEXOS

Anexo 1 – Ficha técnica do material utilizado na fabricação do pino

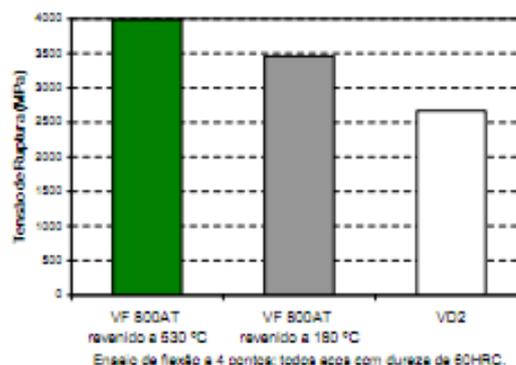
|  | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|------|------|------|------|----|---|------|------|------|------|------|------|
| AÇOS PARA TRABALHO A FRIO | | | | | | | | | | | | | |
| VF800AT | | | | | | | | | | | | | |
| Composição Química: | <table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>Cr</th> <th>Mo</th> <th>V</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,85</td> <td>0,90</td> <td>0,40</td> <td>8,00</td> <td>2,00</td> <td>0,50</td> </tr> </tbody> </table> | C | Si | Mn | Cr | Mo | V | 0,85 | 0,90 | 0,40 | 8,00 | 2,00 | 0,50 |
| C | Si | Mn | Cr | Mo | V | | | | | | | | |
| 0,85 | 0,90 | 0,40 | 8,00 | 2,00 | 0,50 | | | | | | | | |
| Normas / Similares: | Sem similar | | | | | | | | | | | | |
| Cores de Identificação: | Branco - Azul – Branco | | | | | | | | | | | | |
| Características gerais: | Aço com uma composição química especialmente desenvolvida para proporcionar boa resistência ao desgaste associada a elevada tenacidade. Tem elevada temperabilidade, podendo ser temperado ao ar ou em óleo, inclusive com aquecimento em forno a vácuo. Reduzida susceptibilidade a trincas durante e após usinagem por eletroerosão em comparação aos aços da série D. | | | | | | | | | | | | |
| Estado de fornecimento: | Recozido, com dureza máxima de 250 HB. | | | | | | | | | | | | |
| Aplicações Típicas: | Matrizes e ferramentas para estampagem, prensagem, extrusão, corte, rolos laminadores de rosca, conformação a frio e todas as aplicações de processamento de materiais abaixo de 250 °C, especialmente à temperatura ambiente, onde estejam envolvidas elevadas tensões. | | | | | | | | | | | | |
| Alívio de Tensões: | Deve ser realizado após usinagem e antes da têmpera. O alívio de tensões é necessário em peças com gravuras e perfis, nas quais a retirada de material tenha sido superior a 30%, a fim de minimizar as distorções durante a têmpera. O procedimento de alívio deve envolver aquecimento lento até temperaturas entre 500 e 600 °C e resfriamento em forno até a temperatura de 200 °C. Se aplicado após o trabalho, o alívio de tensões deve ser realizado em uma temperatura 50 °C inferior a temperatura do último revenimento. | | | | | | | | | | | | |
| Têmpera: | O aquecimento para têmpera deve ser entre 1.020 e 1.040 °C. Recomenda-se pré-aquecer as ferramentas. Resfriar em: <ul style="list-style-type: none"> - Óleo apropriado, com agitação e aquecido entre 40 e 70 °C. - Banho de sal fundido, mantido entre 500 e 550 °C. - Ar calmo. | | | | | | | | | | | | |
| Revenimento: | As ferramentas devem ser revenidas imediatamente após a têmpera, tão logo atinjam 60 °C. Fazer, no mínimo, 2 revenimentos e entre cada revenimento as peças devem resfriar lentamente até a temperatura ambiente. Recomenda-se temperaturas de revenimento entre 520 e 600 °C, conforme a dureza desejada (curva a seguir). O tempo de cada revenimento deve ser, de no mínimo, 2 horas. Para peças maiores que 70 mm, deve-se calcular o tempo em função de sua dimensão. Considerar 1 hora para cada polegada de espessura. | | | | | | | | | | | | |
| Nov/2003 | | | | | | | | | | | | | |

Curva de Revenimento



Revenimento em Alta Temperatura

As temperaturas de revenimento devem estar acima de 520 °C, para que a máxima tenacidade seja promovida. O gráfico ao lado permite verificar este ganho.



Variação Dimensional

Após têmpera e revenimento nas condições indicadas, é esperado aumento das dimensões em aproximadamente +0,10% (em média). Este valor deve ser considerado especialmente em ferramentas de grandes dimensões, como por exemplo facas de grande comprimento.

Tratamento Superficial:

Nitreção e coberturas de nitretos / carbonitretos, são recomendados quando se deseja elevar a resistência ao desgaste. Devem ser realizados após a têmpera e revenimento, desde que a temperatura do tratamento seja no mínimo 50 °C inferior a temperatura do último revenimento.

Eletroerosão:

Quando utilizada a eletroerosão em ferramentas tratadas, recomenda-se remover a camada superficial alterada (camada branca) com rebolo de grana fina. Revenir novamente a peça em uma temperatura 50 °C abaixo do último revenimento realizado.

Nota: Todas as informações apresentadas são apenas orientativas. Elas não têm relação com parâmetros de propriedades específicas.

Anexo 2 – Ficha técnica do óleo lubrificante

FLUIDO PROTETIVO
SOLÚVEL EM ÁGUA**FERROCOTE 214 M****APLICAÇÕES**

FERROCOTE 214 M é um fluido protetivo solúvel em água, que fornece proteção contra corrosão de materiais ferrosos e galvanizados, tais como, tubos, arames, perfis e peças metálicas de diferentes tipos.

O produto pode ser aplicado por spray, imersão, pincel ou rolo com a temperatura do banho variando entre a temperatura ambiente até 50 ° C.

O tempo de proteção depende da concentração de utilização, abrigo das intempéries, umidade relativa, tipo de aplicação, temperatura do banho e embalagem;

- 5,0 a 8,0% - proteção de 3 meses;
- 8,0 a 12,0% - proteção de 6 meses

BENEFÍCIOS

- Pode ser diluído em água, solventes, óleos minerais para atingir diferentes níveis de proteção;
- Quando diluído em água o produto forma uma emulsão meta estável, depositando uma camada uniforme, ideal para superfícies metálicas de alto brilho;
- O filme depositado pelo produto é praticamente imperceptível, facilitando o seu manuseio, inspeção e embalagem;
- O filme deixado pelo produto é auto-reparador;
- Quando aplicado a quente facilita a evaporação da água e formação do filme protetor;
- Reduz o custo do processo por ser solúvel em água;
- Produto versátil na fabricação de tubos com costura, no processo auxilia na conformação, refrigeração e proteção do material;
- Produto não inflamável.

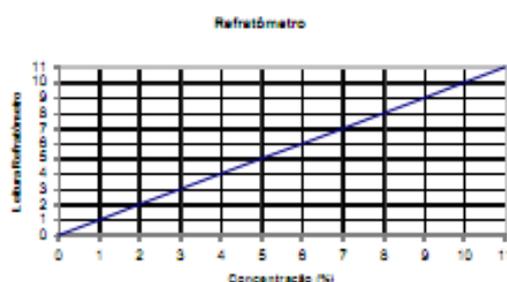
O Departamento Técnico coloca-se à disposição para suporte e treinamento necessários visando à otimização do produto **FERROCOTE 214 M** em uso. Consulte um dos nossos representantes **Quaker**.

FLUIDO PROTETIVO SOLÚVEL EM ÁGUA

FERROCOTE 214 M

MANUTENÇÃO DO FLUIDO

FERROCOTE 214 M deve ser adicionado em água, para maior durabilidade da emulsão e para evitar o surgimento de emulsão invertida. Para boa proteção anti-corrosiva a taxa de diluição varia entre 5,0 a 12,0% por volume, para maiores esclarecimentos sobre a melhor concentração a ser utilizada consulte a Assistência Técnica Quaker. A concentração do produto em água pode ser controlada através do uso de refratômetro ótico, utilizando-se o gráfico abaixo, ou multiplicando a leitura do refratômetro por 1,0.



ESTOCAGEM – SEGURANÇA E DESCARTE

- **Estocagem:** Local coberto/ Temperatura de 4 a 40°C. Manter os tambores fechados. Proteger a etiqueta de identificação do produto que contém informações importantes caso seja necessário uma rastreamento do material. A QUAKER fornece este produto em tambores de 200 litros.
- **Segurança:** O produto FERROCOTE 214 M não apresenta problemas ou perigos de segurança quando utilizado como recomendado. Hábitos adequados de higiene industrial e pessoal devem ser mantidos pelo usuário, consulte a FISPQ para instruções de manuseio do produto puro.
- **Descarte:** O produto deve ser descartado atendendo legislações governamentais do meio ambiente e, as embalagens usadas, manipuladas por firma reconhecida e autorizada por órgãos do governo.

PROPRIEDADES - FÍSICO QUÍMICAS

| <i>CARACTERÍSTICAS</i> | <i>TÍPICO</i> | <i>UNIDADE</i> |
|---|-------------------------|-----------------------|
| Aspecto visual | Líquido límpido a turvo | Não aplicável |
| Cor visual | amarelo a castanho | Não aplicável |
| Densidade a 20/4°C | 0,940 | Não aplicável |
| Teste de corrosão Ferro Fundido, diluído a 3,0% | 0 | grau |
| pH diluído 5,0% | 9,50 | Não aplicável |

A informação aqui contida é baseada em dados práticos. Porém a Quaker Chemical não assume responsabilidade por qualquer alegação de ineficiência do produto ou qualquer dano, direto ou consequente, resultante do uso indevido deste produto, a não ser que tais danos sejam atribuídos somente à negligência por parte da Quaker Chemical.

BT_Ferrocote214M-março/2009

Anexo 3 – Procedimento de Preparação de Corpos de Provas para ensaio Tribológico

Metodologia – Procedimento de polimento

Cada classe de rugosidade superficial passa por determinadas granulometrias de lixa de desbaste conforme mostra a Tabela abaixo.

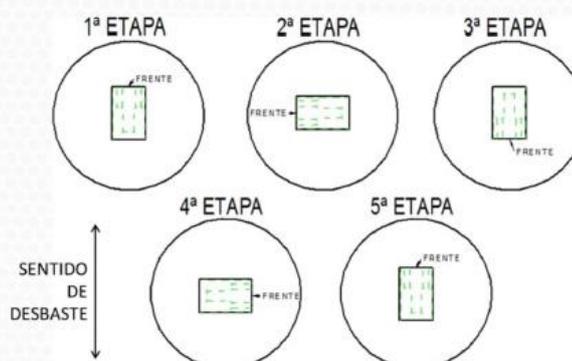
| Classe do polimento | Granulometria do abrasivo |
|---------------------|---------------------------|
| R2 | 600, 800, 1000 e 1200 |
| R3 | 600 |
| Retificado | Granulometria do rebolo |



Metodologia – Etapas do procedimento de polimento

Para cada granulometria de lixa são executadas cinco etapas.

Cada etapa é caracterizada por um sentido do corpo de prova da ferramenta para o desbaste.



Metodologia – Etapas do procedimento de polimento

Uma etapa estará completa após 120 movimentos (60 movimentos de avanço e 60 de recuo) no intervalo de 1 minuto. A cada nova etapa a lixa é lavada com água.

