

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-PPGEM

Estudo do Coeficiente de Atrito para Processos de Estampagem

Luis Fernando Folle

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre
2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM

Estudo do Coeficiente de Atrito para Processos de Estampagem

Luis Fernando Folle
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Laboratório de Transformação Mecânica da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer

Porto Alegre
2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM

TESE PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA

Doutorando: Luis Fernando Folle

Orientador: Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes (UFPR)

Prof. Dr. Eng. Alexandre da Silva Rocha (PPGEM)

Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito (UFGRS)

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGEM

Dedico a minha querida mãe
e incentivadora,
Clair Emília Zenni
, ao meu pai e mestre,
Dirceu Antoninho Folle
e a minha noiva e companheira,
Andressa Austria Kraemer.

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta e indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao professor Dr Eng. Lirio Schaeffer pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

Aos colegas Rodrigo Patrício de Arruda, Uilian Boff e Halston Mozetic pelas sugestões e observações valiosas ao longo de todo o trabalho.

Aos técnicos Luis Eduardo Pinow Ribas e Marco Aurélio Villanova pelo auxílio na construção da parte prática desse trabalho.

Aos bolsistas Mateus Marchioro, Janaina da Rosa e Rodrigo Limberguer pela ajuda tanto nos ensaios práticos como também na realização desse trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro recebido.

E a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Laboratório de Transformação Mecânica pela infraestrutura e qualidade de ensino.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	XI
TABELA DE ABREVIACÕES	XII
TABELA DE SÍMBOLOS	XIII
RESUMO.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivos do trabalho	18
2. REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1. Tipos de Condições de Lubrificação	22
2.2. Forças de Atrito Presentes no Processo de Estampagem	23
2.3. Modelos Usados para Descrever Atrito	26
2.4. Ensaios para medição do coeficiente de atrito em estampagem	29
2.5. Ensaio de pino em disco e suas variações	32
2.6. Ensaio de Dobramento sob Tensão	34
2.7. Equações usadas para o calculo do coeficiente de atrito.....	39
2.8. Alguns resultados obtidos pelo ensaio DST.....	41
2.9. Variação da pressão de contato no pino	46
2.10. Simulação numérica com coeficiente de atrito variável.....	51
2.11. Pesquisas recentes sobre coeficiente de atrito em estampagem.....	56
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	61
3.1. Ensaios para obtenção das propriedades mecânicas do material	61
3.2. Análise De Estampabilidade Do Material – Ensaio Swift	65
3.3. Condições superficiais utilizadas	66
3.4. Aplicação das lixas.....	67
3.5. Lubrificantes utilizados.....	68
3.6. Cálculo analítico da força máxima de estampagem	68
3.7. Simulação Computacional.....	72
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
4.1. Cálculo do coeficiente de atrito pelas equações de força.....	79
4.2. Resultados da simulação	81
4.3. Medição da força vs. deslocamento no ensaio de estampagem	78
4.4. Máquina usada para a medição do coeficiente de atrito.....	75
4.5. Descrição e aplicação do ensaio de dobramento sob tensão –lixa de 220	91
4.6. Avaliação da pressão de contato através de sensor de pressão	96
4.7. Medições com lixa de 1200.....	106
4.8. Medições com pressão variável no ensaio DST - lixa 1200	111
5. CONCLUSÕES	117
6. RECOMENDAÇÕES TECNOLÓGICAS SOBRE O ATRITO E LUBRIFICAÇÃO EM ESTAMPAGEM.....	120
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático das etapas de desenvolvimento do trabalho.....	20
Figura 2. Curva Stribeck esquemática.	23
Figura 3. Tipos de tensões que ocorrem na estampagem profunda. Adaptada de Doege e Behrens (2007).....	24
Figura 4. Forças de atrito de maior influência na estampagem. Fonte: Carlsson (2005).	25
Figura 5. Tipos de esforços envolvidos no embutimento profundo. Fonte: Garcia, Spim <i>et al.</i> (2000)..	25
Figura 6. Modelo de atrito normalmente usado. Fonte: Rodrigues e Martins (2005).	27
Figura 7. Variação do coeficiente de atrito com relação à pressão de contato. Fonte: Budinski (1992).	28
Figura 8. Ilustração esquemática das componentes do coeficiente de atrito presente em contato metal/metal.....	29
Figura 9. Ensaios para obtenção do coeficiente de atrito. Adaptado de: Paunoiu e Nicoara (2003) e Bay, Olsson <i>et al.</i> (2008).....	30
Figura 10. Variações do ensaio de pino em disco. Adaptado de: Carlsson, Bexell <i>et al.</i> (2000).....	33
Figura 11. Variação do ensaio de pino em disco. Adaptado de: Gearing, Moon <i>et al.</i> (2001).....	33
Figura 12. Figura esquemática do ensaio DST. Fonte: Kim, Jain <i>et al.</i> (2004).....	34
Figura 13. Etapas do ensaio DST. Na esquerda, o ensaio com pino fixo e na direita com o pino móvel. Fonte: Andreasen, Olsson <i>et al.</i> (2006).	35
Figura 14. Sistema usado por Lovell, Higgs <i>et al.</i> (2006) para o ensaio dobramento sob tensão.	36
Figura 15. Sistema usado por Hao, Klamecki <i>et al.</i> (1999) para o ensaio DST.	36
Figura 16. Outro sistema também usado por Hao, Klamecki <i>et al.</i> (1999) para o ensaio DST.....	37
Figura 17. Sistema usado por Miguel <i>et al.</i> (2008) para o ensaio DST. Na esquerda a vista superior e lateral da matriz de redução angular e na direita o esquema do ensaio completo.	38
Figura 18. Sistema usado por Sniekers e Smits (1997) para medir o coeficiente de atrito.	38
Figura 19. Coeficiente de atrito obtido por Fratini, Lo Casto <i>et al.</i> (2006) com diferentes lubrificantes e acabamentos do pino.....	41
Figura 20. Coeficiente de atrito vs. deformação para varias velocidades de embutimento obtido por Hao, Klamecki <i>et al.</i> (1999) usando o sistema da figura 16.	42
Figura 21. Coeficiente de atrito vs. deformação para 3 tipos de condições de lubrificação mais o caso a seco obtido por Hao, Klamecki <i>et al.</i> (1999) usando o sistema da figura 16.	42
Figura 22. Coeficiente de atrito vs. alongamento para 3 tipos de materiais do pino obtido por Hao, Klamecki <i>et al.</i> (1999) usando o sistema da figura 16.....	43
Figura 23. Coeficiente de atrito obtido por Lovell, Higgs <i>et al.</i> (2006) para lubrificantes que não agredem ao meio ambiente usando o sistema da figura 15.	43
Figura 24. Medição das forcas de atuação e contra-tensão juntamente como o torque obtidas por Andreasen, Olsson <i>et al.</i> (2006) usando o sistema da figura 13.	44
Figura 25. Gráfico da força de atuação e torque vs. deslocamento da chapa para uma temperatura de 55°C obtido por Andreasen, Olsson <i>et al.</i> (2006) usando o sistema da figura 13.	44

Figura 26. Comparação entre o resultado do coeficiente de atrito obtido pelas equações (8) e (9) para cada diâmetro de pino e lubrificante medido por Nanayakkara, Kelly <i>et al.</i> (2005).....	45
Figura 27. Comparação entre o resultado do coeficiente de atrito obtido pelas equações (9) e (11) para cada diâmetro de pino e lubrificante medido por Nanayakkara, Kelly <i>et al.</i> (2005).....	45
Figura 28. Pressão de contato atuante no pino simulada através do software de elementos finitos ABACUS-implicit. Fonte: Sniekers e Smits (1997).	46
Figura 29. Gráfico da variação da pressão de contato no pino vs. ângulo de dobra da chapa obtido por Kim, Jain <i>et al.</i> (2004).	47
Figura 30. Distribuição de pressão na chapa que foi submetida ao ensaio DST. Fonte: Kim, Jain <i>et al.</i> (2004).	47
Figura 31. Resultado da simulação obtido por Pereira, Duncan <i>et al.</i> (2009). (a) tensão de Von Mises para 1,5mm (b) 9mm e (c) 50mm do deslocamento do punção. (d) pressão de contato para 1,5mm (e) 9mm e (f) 50mm do deslocamento do punção.....	48
Figura 32. Resultado do ensaio de DST com um filme de material piezelétrico no pino quando esse gira livremente. Fonte: Coubrough, Alinger <i>et al.</i> (2002).	49
Figura 33. Resultado do ensaio de DST com um filme de material piezelétrico no pino quando esse está estático. Fonte: Coubrough, Alinger <i>et al.</i> (2002).	49
Figura 34. Resultados obtidos por Hoffmann, Nürnberg <i>et al.</i> (2007) na medição do perfil do raio da ferramenta gerada pelo desgaste da produção de 25000 peças.....	50
Figura 35. Resultados das simulações. (a) gráfico de coeficiente de atrito pela pressão normal para cada tipo de lubrificante. (b) comparação da força do punção medida com os modelos de atrito propostos. Fonte: Gearing, Moon <i>et al.</i> (2001).	51
Figura 36. Resultados das simulações. (a) modelos de atrito propostos. (b) comparação dos modelos de atrito com os resultados da força do punção. (c) comparação do retorno elástico medido na chapa com os resultados da simulação. Fonte: Oliveira, Alves <i>et al.</i> (2008).	52
Figura 37. Resultados das simulações. (a) deformação na espessura da chapa para cada valor e modelo de atrito (b) distribuições de deformação radial e circunferencial experimentais e numéricas obtidas a 23 mm de altura copo para modelo proposto. Fonte: Darendeliler, Akkok <i>et al.</i> (2002).	53
Figura 38. Resultados das simulações feitas por Kim, Jain <i>et al.</i> (2012) (a) curva de atrito prevista em comparação com a curva de Stribeck de entrada (b) resultados dos experimentos (c) resultados da simulação.	54
Figura 39. Evolução da máxima pressão de contato sobre o raio da matriz para a região transiente para diferentes valores do coeficiente de atrito. Fonte: Pereira, Yan <i>et al.</i> (2008).....	55
Figura 40. Curva de escoamento do material Al 1100, obtida através do ensaio de tração.	62
Figura 41. Curva limite de conformação do alumínio AA 1100.	63
Figura 42. Vista em corte do ferramental do ensaio de estampagem.	65
Figura 43. Representação em perspectiva do ensaio de estampagem.....	66
Figura 44. Gráficos de força por deslocamento medido para cada lubrificante e lixa aplicada juntamente com as condições a seco, com folha de teflon e com filme de graxa.	78
Figura 45. Representação esquemática da estampagem de uma peça de formato cilíndrico.	69

Figura 46. Conjunto montado no DYNAFORM para a simulação do processo de estampagem utilizado. 74

Figura 47. Relação entre a força máxima medida e o afastamento entre o resultado das medições e da simulação. 82

Figura 48. Comparação entre os gráficos gerados pela simulação e os medidos. 84

Figura 49. Comparação entre os gráficos gerados pela simulação e os medido de maior coeficiente de atrito. 85

Figura 50. Resultados obtidos para alguns coeficientes de atrito através da simulação. 86

Figura 51. Peça estampada ao qual não apresentou enrugamento. 87

Figura 52. Peça que foi estampada com uma folha de teflon e com as matrizes lixadas a 1200. 88

Figura 53. Peça que foi estampada com lubrificante de graxa e com as matrizes lixadas a 1200. 88

Figura 54. Gravação eletroquímica de uma malha circular para medir as deformações. 89

Figura 55. Comparação entre as deformações medidas no ensaio de estampagem e as obtidas pela simulação. 89

Figura 56. Máquina usada para o ensaio DST. 76

Figura 57. Máquina usada para a realização do ensaio DST. 76

Figura 58. Ensaio DST com lubrificantes diferentes. 91

Figura 59. Desgaste gerando durante o ensaio DST. 92

Figura 60. Ausência de marcações de desgaste no ensaio DST com o pino livre. 92

Figura 61. Torque medido para cada lubrificante durante o ensaio DST. 93

Figura 62. Curva da diferença entre a força de atuação e contra-tensão com o pino fixo para o lubrificante O. 94

Figura 63. Curva da diferença entre a força de atuação e contra-tensão com o pino livre para o lubrificante O. 94

Figura 64. Comparação entre as curvas geradas pelo torquímetro e pelas células de cargas. 95

Figura 65. Comparação entre os coeficientes de atrito calculados para cada equação. 96

Figura 66. Comparação entre as pressões de contato calculadas para cada equação. 97

Figura 67. Vista da seção transversal do filme Pressurex®. 98

Figura 68. Medição da pressão através do Pressurex®. 98

Figura 69. Aplicação do filme de Pressurex® em três estágios de deformação da peça. 99

Figura 70. Aplicação do filme de Pressurex® na tira de chapa durante o ensaio DST. 99

Figura 71. Resultados obtidos no pino e no raio da matriz através da aplicação do filme de pressão. 100

Figura 72. Força em cada lado da chapa medida durante o ensaio DST. 101

Figura 73. Torque medido sobre o pino durante o ensaio DST. 102

Figura 74. Força vertical medida sobre o pino durante o ensaio DST. 103

Figura 75. Filme de Pressurex® obtidos para cada nível de pressão com pino fixo e livre. 103

Figura 76. Resultados de pressão obtidos pelos filmes de Pressurex®. (a) gráfico com os valores considerando os pontos inicial e final zero. (b) gráfico desconsiderando esses pontos.	104
Figura 77. Pressão de contato para diversas formas de calculo diferentes.	105
Figura 78. Coeficiente de atrito calculado por equações diferentes.	106
Figura 79. Forças em cada lado da tira versus tempo para cada lubrificante juntamente com o caso a seco.	107
Figura 80. Torque no pino versus tempo para cada lubrificante.....	108
Figura 81. Força vertical no pino versus tempo para cada lubrificante.	109
Figura 82. Representação esquemática da força média para um atrito alto e um baixo.....	109
Figura 83. Comparação entre os coeficientes de atrito calculados para cada equação.....	110
Figura 84. Medição da força em cada lado da chapa com pressão variável.	112
Figura 85. Torque medido no pino durante do ensaio com pressão variável.	113
Figura 86. Força vertical medido no pino durante do ensaio com pressão variável.....	113
Figura 87. Gráfico do coeficiente de atrito pela pressão de contato no pino.....	114
Figura 88. Gráfico do coeficiente de atrito pelo tempo do ensaio para pressões variáveis.	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Coeficientes n e C para cada direção de laminação da chapa com a média entre elas.	62
Tabela 2. Índice de anisotropia r para cada direção de laminação.	63
Tabela 3. Dados coletados para materiais típicos em processos de conformação mecânica. Fonte: Ghazanfari e Assempour (2012).	64
Tabela 4. Rugosidades medidas para cada acabamento.	67
Tabela 5. Força máxima medida em kN no ensaio de estampagem.	79
Tabela 6. Parâmetros geométricos das ferramentas usadas nos ensaios de estampagem.	79
Tabela 7. Parâmetros geométricos calculados para as ferramentas usadas nos ensaios de estampagem.	80
Tabela 8. Parâmetros do material obtidos por ensaios de tração.	80
Tabela 9. Cálculos das tensões e deformações obtidas pelas equações de Panknin.	80
Tabela 10. Coeficiente de atrito pela equação de força de Panknin.	81
Tabela 11. Propriedades usadas para definir o material da geratriz no DYNAFORM.	75
Tabela 12. Força máxima obtida pela simulação no DYNAFORM em kN.	81
Tabela 13. Coeficientes de atrito calculados segundo 6 equações diferentes mais a equação de força máxima de estampagem.	95
Tabela 14. Pressão de contato no pino segundo 3 equações diferentes. Valores em MPa.	97
Tabela 15. Pressão de contato para diversas formas de calculo diferentes. Valores em MPa.	105
Tabela 16. Coeficiente de atrito calculado por equações diferentes.	106
Tabela 17. Distanciamentos entre as curvas da figura 79.	107
Tabela 18. Tamanho inicial e final da chapa para cada lubrificação aplicada.	110
Tabela 19. Coeficientes de atrito calculados segundo as 6 equações diferentes	110

TABELA DE ABREVIATÖES

BL	condição de lubrificação de “contorno” (do inglês <i>Boundary Lubrication</i>)
CLC	Curva Limite de Conformaço
CP	Corpo de Prova
DST	dobramento sob tensão (do inglês <i>BUT – Bending Under Tension Test</i>)
FLD	Diagrama Limite de Conformaço (do inglês <i>Forming Limit Diagram</i>)
FLD₀	ponto onde a Curva Limite de Conformaço intercepta o eixo vertical
HL	condição de lubrificação “hidrodinâmica” (do inglês <i>Hydrodynamic Lubrication</i>)
ML	condição de lubrificação “mista” (do inglês <i>Mixed Lubrication</i>)

TABELA DE SÍMBOLOS

A_0	área de seção do copo [mm^2]
A_a	área de contato aparente [mm^2]
A_r	área real de contato determinada pela interação das asperezas da superfície [mm^2]
β	relação de estampagem referente ao flange [-]
β_0	relações de estampagem [-]
$\beta_{\max}$	relação de estampagem máxima [-]
C	coeficiente de resistência [N/mm^2]
d_0	diâmetro do punção [mm]
D_0	diâmetro da geratriz [mm]
D	diâmetro do flange no momento da força máxima [mm]
d	braço de alavanca da força F_0 na figura 18 [mm]
F_0	força do braço de alavanca da força F_0 na figura 18 [kN]
F_1	força de atuação no ensaio de dobramento sob tensão [kN]
F_2	força de contra-tensão no ensaio de dobramento sob tensão [kN]
F_1^*	força de atuação no ensaio de dobramento sob tensão com o pino livre [kN]
F_2^*	força de contra-tensão no ensaio de dobramento sob tensão com o pino livre [kN]
F_{AR}	força de atrito na passagem do raio da matriz [kN]
F_{APC}	força de atrito no prensa chapas na região do flange [kN]
F_b	subtração das forças F_1^* e F_2^* durante o ensaio com o pino livre [kN]
F_{id}	força ideal de estampagem [kN]
$F_{\max}$	força máxima de estampagem [kN]
F_n, F_N	força normal no contato [kN]
F_{RE}	força de retorno elástico [kN]
F_t	resultante tangencial da força [kN]
ϕ_1	deformação após a passagem da chapa pelo raio da matriz [-]
ϕ_2	deformação na região do diâmetro externo do flange [-]
k_f	tensão na curva de escoamento [N/mm^2]
k_{f0}	ponto inicial da curva de escoamento [MPa]
k_{fm}	tensão de escoamento média [N/mm^2]
k_{f1}	tensão de escoamento da chapa na saída do raio da matriz [N/mm^2]
k_{f2}	tensão de escoamento no diâmetro externo da região do flange [N/mm^2]
μ	coeficiente de atrito [-]

μ_a	<i>componente adesiva do coeficiente de atrito [-]</i>
μ_p	<i>componente de penetração do coeficiente de atrito [-]</i>
n	<i>grau de encruamento [-]</i>
η	<i>fator que representa a eficiência na deformação [-]</i>
p	<i>pressão normal [N/mm²]</i>
p_r	<i>pressão de contato real [N/mm²]</i>
R	<i>raio do pino no ensaio de dobramento sob tensão [mm]</i>
R_a	<i>rugosidade média [μm]</i>
R_m	<i>tensão máxima do material [N/mm²]</i>
r	<i>índice de anisotropia [-]</i>
r_m	<i>raio da matriz inferior [mm]</i>
R_{max}	<i>rugosidade máxima [μm]</i>
s	<i>espessura da chapa [mm]</i>
T	<i>torque [Nm]</i>
t	<i>espessura da chapa no ensaio de dobramento sob tensão [mm]</i>
τ	<i>tensão cisalhante aparente [N/mm²]</i>
τ_1	<i>tensão cisalhante [N/mm²]</i>
τ_i	<i>tensão cisalhante na interfase de contato da camada de contorno da superfície [N/mm²]</i>
θ	<i>ângulo de contato entre a tira e o pino no ensaio de dobramento sob tensão [rad]</i>
u	<i>velocidade da chapa no ensaio de dobramento sob tensão [mm/s]</i>
W	<i>largura da tira de chapa no ensaio de dobramento sob tensão [mm]</i>

RESUMO

O atrito na interface entre a peça e a ferramenta tem considerável importância em operações de estampagem de chapas, são necessários conhecimentos precisos sobre processos de conformação de chapas para a análise e projeto de novas peças e ferramentas, assim como para validação de uma simulação numérica. Este trabalho usa o método de determinação do coeficiente de atrito em estampagem através do ensaio de dobramento sob tensão e avalia sua precisão com o uso do software de elementos finitos LS-DYNAFORM, específico para esse processo de fabricação. Como existem seis equações que calculam o coeficiente de atrito para o mesmo ensaio de dobramento sob tensão, foram testadas todas as equações com o objetivo de verificar se existe variação entre os resultados. O material de estudo foi o alumínio comercialmente puro, liga AA1100. Os resultados indicam que há certa variação para cada equação usada, principalmente para aquelas que consideram o torque no pino. É observada também uma tendência do software a se distanciar dos resultados práticos por considerar o atrito como uma constante ao longo do processo. A pressão de contato entre o pino e a chapa no ensaio de dobramento sob tensão também foi avaliada através de um filme que tem a capacidade de registrar a pressão aplicada juntamente com a medição da força vertical aplicada ao pino. Os resultados indicam que a força vertical é mais precisa para se definir a pressão de contato ao uso de equações pré-estabelecidas e que a área de atuação da chapa no pino é sempre menor que a área calculada geometricamente. Por fim, para se saber qual é o comportamento do atrito para altas pressões, o ensaio de dobramento sob tensão foi feito com força variável e constatou-se que o atrito diminui com o aumento das pressões. No entanto, os valores iniciais da curva de atrito versus pressão de contato não foram obtidos pois nesse caso seria necessário usar uma máquina diferente da usada nesse estudo, ou seja, que não use pressão de óleo para acionamento e movimentação da chapa.

Palavras-chave: Coeficiente de Atrito, Simulação Numérica, Estampagem de Chapas Metálicas, Ensaio de Dobramento sob Tensão, Pressão de Contato.

ABSTRACT

Friction at the interface of workpiece and tooling has a considerably importance in sheet metal forming operations. It is necessary an accurate knowledge for the analysis and design of new workpieces and tooling, as well as for the validation of a numeric simulation. This work uses the bending under tension test to determining the friction coefficient in sheet metal forming and evaluates its accuracy using the finite element software LS-DYNAFORM, specific to this manufacturing process. Since there are six equations that calculate the coefficient of friction for the same bending under tension test, all equations were tested in order to verify if there is much variation between the results. The material used in these work was pure commercial aluminum alloy AA1100. The results indicate that there is some variation for each equation used, especially for those that consider the torque on the pin. It was also observed a tendency for software to distance themselves from practical results considering friction as a constant throughout the process. It is also observed a tendency for the software to generate curves away from the tests as the friction increases. The contact pressure between the pin and the sheet in the bending under tension test was also evaluated through a film that has the ability to measure the pressure applied, together with the measurement of the vertical force applied to the pin. The results indicate that the vertical force is more accurate to define the contact pressure than equations previously established for this and that the contact area between the sheet and the pin is always smaller than the area calculated geometrically. Finally, to know the behavior of the friction at high pressures, the bending under tension test was done with variable forces and it was found that the friction decreases with increasing the pressure, which is in full agreement with the theory.

Key words: Coefficient of Friction, Numerical Simulation, Sheet Metal Forming Process, Bending under Tension Test, Contact Pressure.

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos processos de conformação envolve o contato entre duas ou mais superfícies e um lubrificante entre elas. O atrito ocorre quando existe um movimento relativo entre uma ferramenta (de conformação) e o material que está sendo deformado. A ocorrência de atrito nos processos de conformação leva a um consumo de energia desnecessário, além de gerar desgaste prematuro das ferramentas e que muitas vezes podem ser reduzidos apenas pela troca do lubrificante.

De um modo geral, o atrito é associado a um aspecto negativo dos processos de conformação (consumo de energia, desgaste de ferramentas, aumento de força de conformação, aumento da temperatura na ferramenta, etc.). Nem sempre é este o caso. Em alguns processos como na laminação, o atrito é fundamental para ocorrer a “mordida” da barra pelos cilindros. Até mesmo na estampagem o atrito tem papel fundamental prevenindo defeitos tal como o enrugamento.

Para que o atrito excessivo não seja o agente causador de defeitos, utiliza-se uma película lubrificante entre as superfícies de contato. Nos processos industriais é normal o uso de óleos lubrificantes em excesso para se evitar problemas como o desgaste das matrizes e chapas “aranhadas”. Porém, com a exigência de processos de fabricação mais limpos de forma a não agredir ao meio ambiente, o uso de óleos lubrificantes deve ser diminuído ou trocado por outro com componentes não nocivos ou, até mesmo, eliminado.

No caso de estampagem, geralmente são usados lubrificantes líquidos. Antigamente era comum o uso de gorduras animais e óleos naturais, atualmente o uso se concentra em óleos minerais. O exato princípio físico que rege o comportamento desses lubrificantes ainda não é totalmente conhecido, mas a sua aplicação sempre trás melhorias ao processo, tais como:

- Diminuição das forças totais necessárias para a operação de estampagem; a força de atrito é menor em superfícies lubrificadas que para o caso a seco.
- Prevenção do desgaste das matrizes causadas por adesão ou abrasão das superfícies.
- Garantia de qualidade dos produtos.

Dessa forma, o controle dos níveis de atrito tem um papel importante na distribuição das tensões e deformações na chapa. O atrito ser o correto para se obter uma peça sem defeitos. Um coeficiente de atrito muito baixo pode gerar problemas de fixação promovendo o aparecimento de rugas na região do prensa chapas. Em estampagem, a força de atrito entre o prensa chapas e a matriz deve ser suficientemente alta para se obter as deformações plásticas desejadas evitando o enrugamento da chapa. Entretanto, uma força de atrito muito alta irá promover um desgaste das superfícies em

contato podendo levar ao surgimento de trincas no produto final. Por isso, é muito importante o controle dos níveis de atrito em estampagem.

Atualmente, devido à grande competição e a constante demanda por produtos novos e de baixo custo é comum, nas indústrias de transformação mecânica, principalmente no caso da indústria brasileira, encontrar metodologias de desenvolvimento baseadas na adaptação de linhas de produtos já fabricados, com modificações inspiradas muitas vezes no método da tentativa e erro. Esta postura, principalmente quando não se tem muita experiência no processo, gera considerável desperdício de material tanto nas peças que apresentaram falha, quanto no ferramental que não se adequou ao projeto. Além de gerar desperdícios e elevar os custos, estes processos são demorados e não trazem resultados otimizados, uma vez que não há um domínio sobre as reais causas da falha.

Por isto, todo o esforço voltado à investigação e controle do processo produtivo é válido. Isso gera um conhecimento que ao longo do tempo é adicionado em livros publicados na área e ficam disponíveis para qualquer pessoa que deseje se especializar em determinado assunto. Assim os métodos de tentativa e erro dão lugar a um conhecimento consolidado, fruto do trabalho de pesquisadores na área.

Nos processos de estampagem, sabe-se que o sucesso para a obtenção de uma peça depende de três fatores principais: da geometria das ferramentas, das propriedades do material da peça e da interação entre a superfície de contato desses dois materiais. Sabe-se também que os custos associados ao terceiro fator representam em torno de 5% do valor final de produção da peça. Sendo assim, qualquer melhora relacionada com atrito em estampagem pode gerar retorno imediato para os fabricantes.

Com o surgimento de leis mais rigorosas quanto à parte ambiental e com a tendência a se fabricar peças com índice de refugo zero, será necessário criar métodos mais eficientes de fabricação que operem sem desperdícios. Neste aspecto, os softwares de simulação podem contribuir consideravelmente, oferecendo soluções rápidas muito próximas da realidade, ou seja, que possam prever falhas na fabricação de peças sem essas serem criadas fisicamente. Dentro desse contexto, uma área crítica é a medição do atrito em estampagem, onde os métodos criados até então não conseguem se adequar ao que acontece na prática.

1.1. Objetivos do trabalho

Esse trabalho tem como objetivo estudar o coeficiente de atrito para o processo de estampagem de chapas metálicas através do ensaio DST (dobramento sob tensão (do inglês BUT – *Bending Under Tension Test*), estudar a influência do coeficiente de atrito na simulação numérica e comparar com testes reais de estampagem de uma geometria conhecida. Para tanto o trabalho foi dividido em 4 fases diferentes.

1.1.1. Objetivos específicos:

- **Avaliação do comportamento do material de trabalho, que foi escolhido como sendo o alumínio comercialmente puro (Al 1100) com relação ao coeficiente de atrito para várias situações diferentes.** Esta fase consiste na realização de ensaios experimentais de medição do coeficiente de atrito que atua nesse material.
- **Avaliação da simulação numérica quanto ao coeficiente de atrito estimado.** Nesta fase, serão feitas simulações numéricas usando o *software* comercial DynaForm para ser comparado com um caso prático. Os programas que fazem simulação dos processos de estampagem consideram o atrito constante, o que pode ser a principal fonte de erro com relação ao caso real.
- **Determinação de um método de medição do coeficiente de atrito.** Como existem diversas equações que calculam o coeficiente de atrito em estampagem para o mesmo ensaio, ou seja o ensaio DST (Dobramento Sob Tensão), o objetivo é determinar qual delas se encaixa melhor em relação ao que acontece na realidade. Essa determinação será feita através da comparação das medições das forças atuantes na estampagem de uma peça com diferentes lubrificantes e as forças medidas no ensaio para obtenção do coeficiente de atrito.
- **Avaliação da pressão de contato atuante no ensaio DST.** A pressão de contato, tanto no ensaio como no caso da estampagem de uma peça é um parâmetro difícil de ser avaliado. Existem esforços no sentido de determinar essa pressão, porém até o momento só se sabe o resultado dado pela simulação numérica. Para tanto, um dos objetivos desse trabalho é conhecer qual a pressão de contato atuante no raio de dobramento da matriz através de métodos experimentais. O motivo de se tomar essa pressão de contato no raio de dobramento da matriz e não no resto das áreas em contato será explicado durante o desenvolvimento desse trabalho.

A Figura 1 mostra um diagrama das etapas que foram executadas nesse trabalho. O primeiro item a ser executado foi a escolha do material e sua caracterização. Após isso, o trabalho seguiu dois caminhos. O primeiro (em azul no diagrama), foi a estampagem de um copo com as mesmas dimensões do ensaio Swift para fazer o levantamento das curvas de força por deslocamento do punção e assim se tem um parâmetro de comparação com um caso real. O copo foi feito com a aplicação de 3 lixas nas matrizes e 4 tipos de lubrificantes diferentes para se variar o acabamento e a lubrificação, tendo assim como resultado curvas diferentes. Na sequência, foi feito o cálculo analítico do coeficiente de atrito com o auxílio de equações usadas para se calcular a força máxima de estampagem de um copo, porém essa informação foi obtida dos ensaios Swifts já executados. Esses coeficientes de atrito determinados analiticamente serviram, então, de dados de entrada para uma simulação numérica que tem como objetivo a comparação das curvas já levantadas experimentalmente com as curvas levantadas por simulação. O segundo caminho (também em azul no diagrama), foi a análise do coeficiente de atrito através de um ensaio chamado “dobramento sob tensão (DST)”, que está sendo muito usado para o estudo e determinação do atrito entre chapa e matriz. Nesse ensaio, foram aplicados duas lixas, a mais grossa e a mais fina, e os mesmos 4 lubrificantes, sendo medido as forças 1 e 2, que são as forças em cada lado da tira de chapa desse ensaio e o torque no pino. Com esses dados foram calculados os coeficientes de atrito por 6 equações diferentes usadas para o mesmo ensaio com o objetivo de comparar os resultados entre as equações e também com o cálculo analíticos pelas equações de força máxima de estampagem obtidas anteriormente.

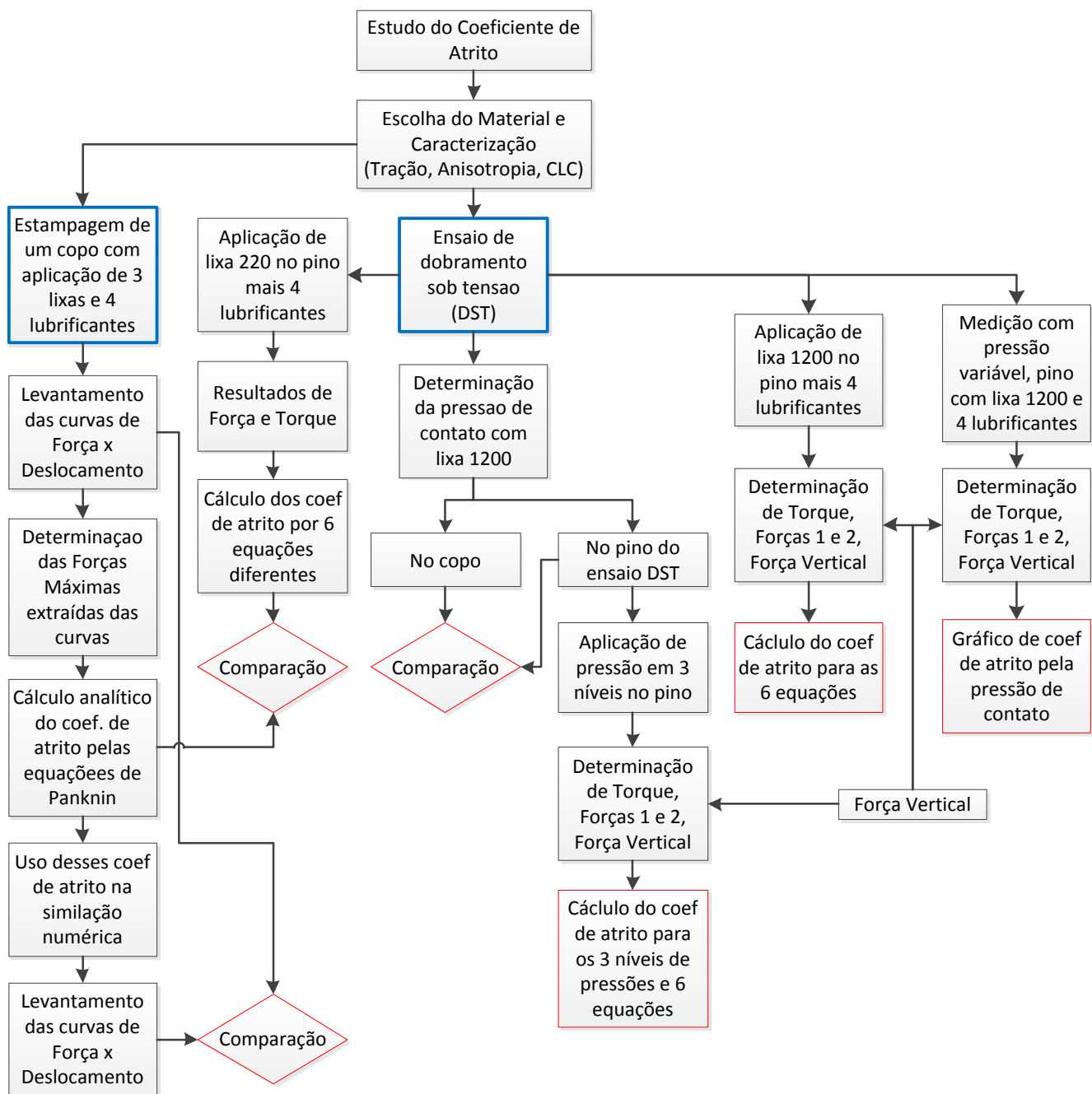


Figura 1. Diagrama esquemático das etapas de desenvolvimento do trabalho.

Outro estudo feito nesse trabalho foi a determinação da pressão de contato que atua tanto na estampagem de um copo como no pino do ensaio DST para se saber qual é essa pressão e também se o ensaio DST consegue simular a estampagem de um copo. Essas pressões foram medidas através de um filme de polímero denominado Pressurex® que será descrito ao longo do trabalho. As pressões nas no copo e no ensaio DST são, então, comparadas. No entanto, outra informação de interesse é saber como calcular essa pressão sem a necessidade de se usar um filme, já que no caso da aplicação de um

lubrificante esse filme é inutilizado. Foi proposto então a medição da força vertical no pino, que é dividida pela área de contato entre chapa e pino, para se saber, se essa pressão, seria a mesma que no filme de polímero. Para esse estudo, foram aplicados 3 níveis de pressão no pino. Além disso, foi feito o cálculo do coeficiente de atrito para os 3 níveis de pressão e as 6 equações diferentes já usadas anteriormente. Os resultados são então avaliados. Por último, é aplicado a lixa mais fina no pino e obtidos resultados de forças 1 e 2, torque e força vertical com e sem variação da pressão aplicada ao pino. Os resultados também são avaliados. No diagrama, as caixas em vermelho correspondem aos objetivos desse trabalho que foram analisados.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Tipos de Condições de Lubrificação

Os efeitos do atrito estão sempre relacionados à dissipação de energia, por isso, algumas vezes são considerados indesejáveis em processos de fabricação. No caso de conformação de metais, o fluxo de metal é limitado pela pressão de contato entre matriz e peça. Por isso, o atrito pode gerar defeitos internos e superficiais, além de influenciar nas tensões na matriz, carga e energia requerida.

Existem três condições distintas de lubrificação que determinam a influência do atrito na conformação de metais.

1. Condições “de contorno” (BL), é a condição onde há contato físico entre as superfícies que interagem. O coeficiente de atrito é governado pelo contato entre os picos da rugosidade superficial de cada parte. Condição usada, por exemplo, na laminação à quente de chapas.
2. Condições “hidrodinâmicas” (HL), que existem quando uma espessa camada de lubrificante está presente entre a matriz e o componente. Esse assunto é tratado em mecânica dos fluidos, onde as tensões geradas têm relação com a viscosidade do fluido.
3. Lubrificação “mista” (ML), é a condição em que um filme de lubrificante envolve todo o material a ser conformado. Essa situação resulta em uma lubrificação intermediária entre a condição de lubrificação “de contorno” e lubrificação “hidrodinâmica”. É a situação mais amplamente encontrada em conformação de metais.

Em 1902, Stribeck foi o primeiro que relatou a dependência do coeficiente de atrito com a velocidade de eixo em mancais. Em seu trabalho ele apresentou uma curva com três regimes de lubrificação distintos. Essa curva recebeu o nome de “Curva Stribeck”. Posteriormente, o coeficiente de atrito foi apresentado como uma função da combinação dos seguintes parâmetros: viscosidade do lubrificante, número de rotações do eixo do mancal e a pressão normal do eixo.

Na figura 2 uma Curva Stribeck genérica é mostrada. Nesta figura os três regimes de lubrificação podem ser distinguidos. O regime “de contorno” está situado na parte esquerda da curva. Nessa região, o coeficiente de atrito tem o valor de BL. A parte direita da curva mostra um valor relativamente baixo, este é o regime “hidrodinâmico”, HL. Entre estes dois regimes o regime “misto”

pode ser encontrado, esta é a parte da curva em que o coeficiente de atrito depende fortemente do lubrificante (Ter Haar, 1996).

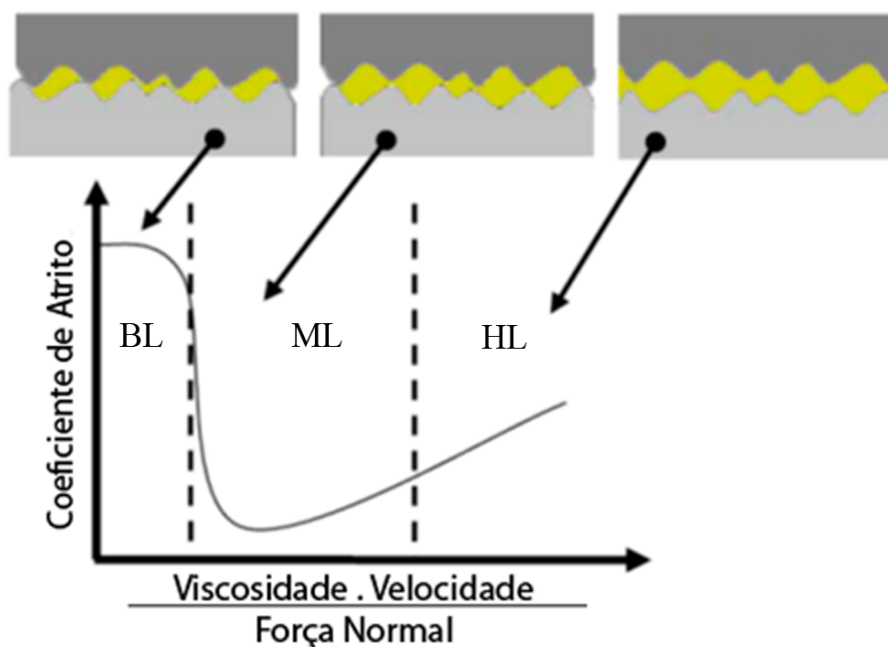


Figura 2. Curva Stribeck esquemática.

2.2. Forças de Atrito Presentes no Processo de Estampagem

Ao longo do processo de estampagem, a geratriz (ou blank) é submetida a diferentes tipos de tensões e deformação, até atingir a forma final, conforme pode ser observado esquematicamente na figura 3. No início da estampagem, a geratriz é deformada radialmente para o interior da matriz, reduzindo assim, seu diâmetro original até o diâmetro de conformação, que corresponde ao do punção. Na região do flange da peça, o material sofre esforços de compressão na direção circunferencial e tração na direção radial (vide figura 3A). Nesta região é necessário cuidado para que não haja enrugamento, o que é feito por um sistema de pressão no anel de fixação ou prensa chapas. Se ocorrer enrugamento, as rugas serão transmitidas do flange para o interior da matriz, o que pode formar e propagar trincas, rompendo a lateral da peça. À medida que o material avança em direção ao raio de entrada da matriz, ele é dobrado e depois desdobrado devido ao esforço trativo que ocorre na lateral da peça (figura 3B). Nesta região ocorre deformação plana que é responsável pela homogeneização da espessura da parede pelo estiramento uniforme, conforme ilustra a figura 3C. Além de todos os esforços representados na figura 3, deve se considerar ainda o efeito do atrito que ocorre entre a geratriz e o prensa chapa (figura 3A), na região de dobramento da chapa, entre a matriz e a chapa

(figura 3B), na lateral da peça, entre chapa e punção e chapa e matriz (figura 3C), no interior da peça, entre punção e chapa (figura 3D) e no fundo da peça, também entre punção e chapa (figura 3E).

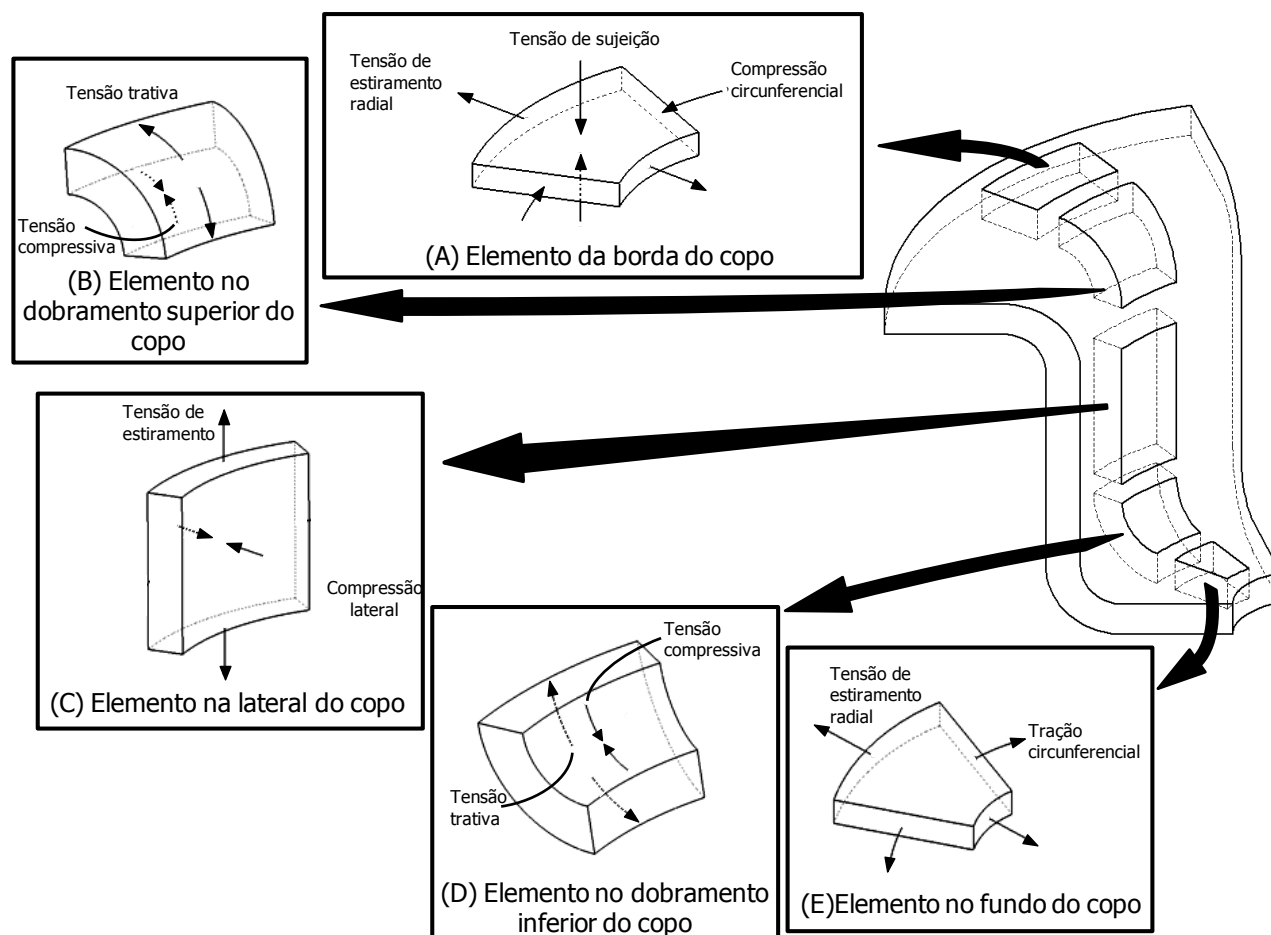


Figura 3. Tipos de tensões que ocorrem na estampagem profunda. Adaptada de Doege e Behrens (2007).

Entretanto, as regiões onde o atrito tem maior efeito são as regiões A e B da figura 4, por se tratar dessas regiões as únicas com movimento relativo entre material e ferramenta. Nas outras regiões há apenas o atrito estático por não haver considerável movimento relativo entre material e ferramenta. O atrito estático geralmente não contribui com valores significativos para nas forças totais de estampagem. Na região A as tensões são geralmente baixas, entre 1e 10 MPa, porém, na região B as tensões são bastante superiores, atingindo valores da ordem de 100 MPa (Ter Haar, 1996). Na região de formação do copo no interior da matriz, empregam-se comumente folgas da ordem de 10 a 20% da espessura da geratriz, além da utilização de lubrificação especificada em norma.

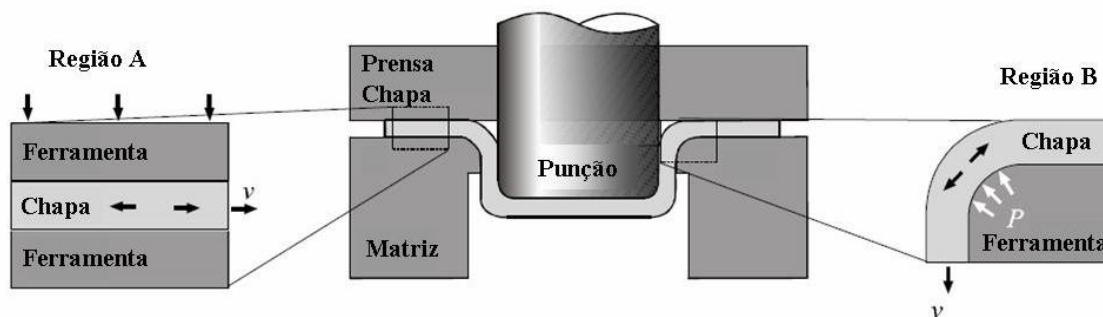


Figura 4. Forças de atrito de maior influência na estampagem. Fonte: Carlsson (2005).

A força total do punção para a deformação completa do copo corresponde à somatória de todos os esforços envolvidos na deformação da peça, inclusive o atrito. O esforço para deformação ideal aumenta continuamente devido ao efeito do encruamento na conformação plástica. A força global de atrito é basicamente composta pelo atrito entre a geratriz e o prensa chapa e entre a chapa e a matriz na região de dobra, que parte de um pico de esforço (atrito estático para o atrito dinâmico) e diminui continuamente devido à diminuição da área de material sob o prensa chapas. Caso não exista folga entre punção/geratriz/matriz, o atrito deve se estabilizar em um valor mínimo diferente de zero. A uniformização da espessura da parede ocorre ao final de processo, após toda a área da geratriz estar contida no interior da matriz. A figura 5 ilustra um esboço dos esforços envolvidos na estampagem e a força global do punção.

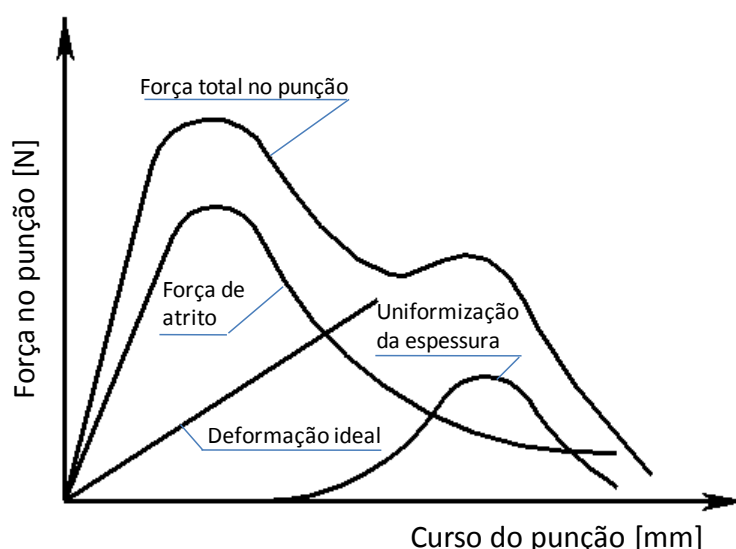


Figura 5. Tipos de esforços envolvidos no embutimento profundo. Fonte: Garcia, Spim *et al.* (2000)

2.3. Modelos Usados para Descrever Atrito

Para descrever o fenômeno de atrito em estampagem, é importante usar um modelo que descreva razoavelmente bem a realidade, principalmente quando a superfície de análise é grande. Para esse caso, a força de atrito tem uma contribuição relevante para a força total requerida na operação. Apesar do grande desenvolvimento em modelos que descrevem o comportamento dos materiais, simulações numéricas computacionais geralmente não fornecem resultados corretos. Isso é devido ao uso de modelos muito simplificados de atrito (Ter Haar, 1996). A figura 6 representa a combinação do modelo de Coulomb e o modelo da tensão de cisalhamento limite definido por von Misses.

Nas situações onde há contato entre dois corpos, a tensão cisalhante aparente τ e a pressão normal p aparente são calculadas nas simulações feitas em estampagem com base nas condições de contorno. A definição dessas grandezas é dada pelas equações (1) e (2).

$$p = \frac{F_n}{A_a} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{F_t}{A_a} \quad (2)$$

onde F_n representa a força normal no contato, F_t é a resultante tangencial da força e A_a é a área de contato aparente. Na figura 6, a tensão cisalhante é mostrada como função da pressão normal aparente. A primeira parte da figura é considerada como a parte de Coulomb. A relação entre a força de atrito e a força normal, definido como o coeficiente de atrito μ , é constante nessa parte da curva, ver equação 3. Quando a tensão cisalhante τ é igual à tensão de escoamento em cisalhamento puro, o material começa a escoar. A partir desse ponto a tensão cisalhante do material não aumenta mais e passa a ter o valor da tensão de escoamento em cisalhamento puro do material, o coeficiente de atrito então passa a ser variável. Este fenômeno é representado pela parte horizontal da curva (figura 6).

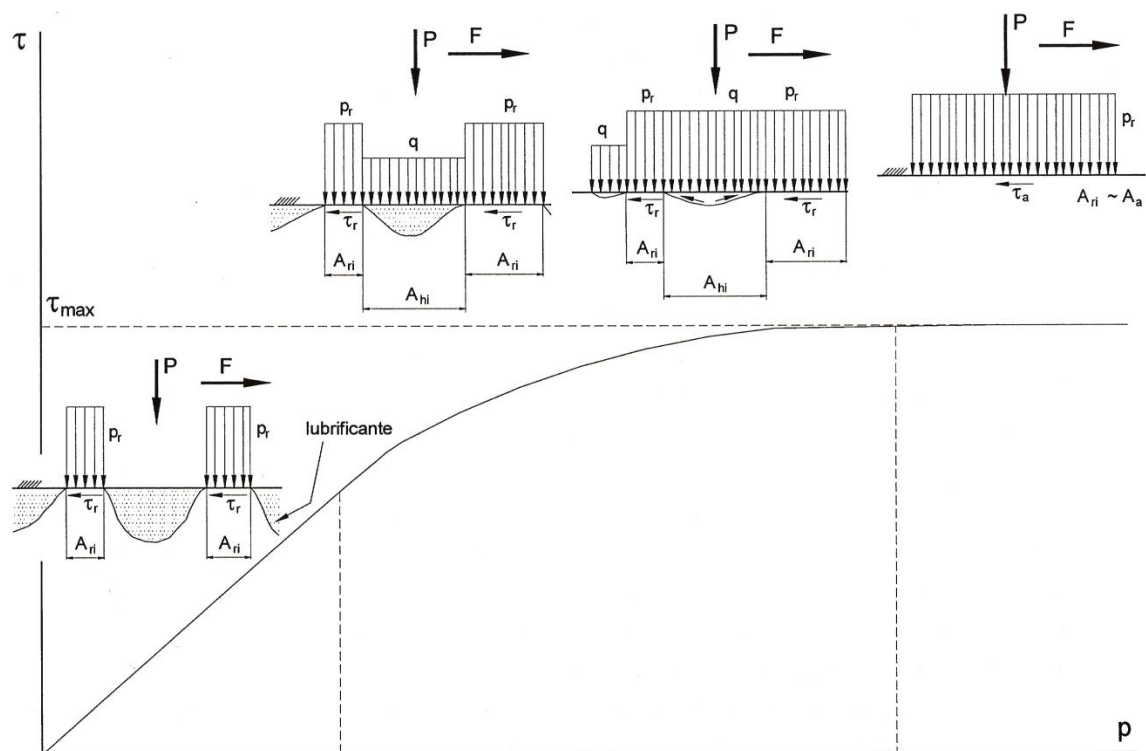


Figura 6. Modelo de atrito normalmente usado. Fonte: Rodrigues e Martins (2005).

Quando as tensões de escoamento em cisalhamento puro são atingidas, as superfícies das ferramentas e da chapa podem apresentar adesão e/ou emperramento. Adesão é caracterizada pelo acúmulo de material microscópico transferido durante o deslizamento da chapa na matriz e emperramento (parada na movimentação) pode ser o resultado. Se ambas as superfícies emperram, não haverá coeficiente de atrito dinâmico para ser medido, mas meramente o fato de que as superfícies emperraram. Se uma adesão ocorrer, a força de atrito diminuirá (figura 7), mas as superfícies irão se danificar. Isso pode produzir dados falsos para a pessoa que está medindo, que pode pensar que o lubrificante usado está sendo útil devido ao coeficiente de atrito ter diminuído, mas na verdade uma situação de desgaste se estabeleceu e as superfícies não estão sendo preservadas (Budinski, 1992).

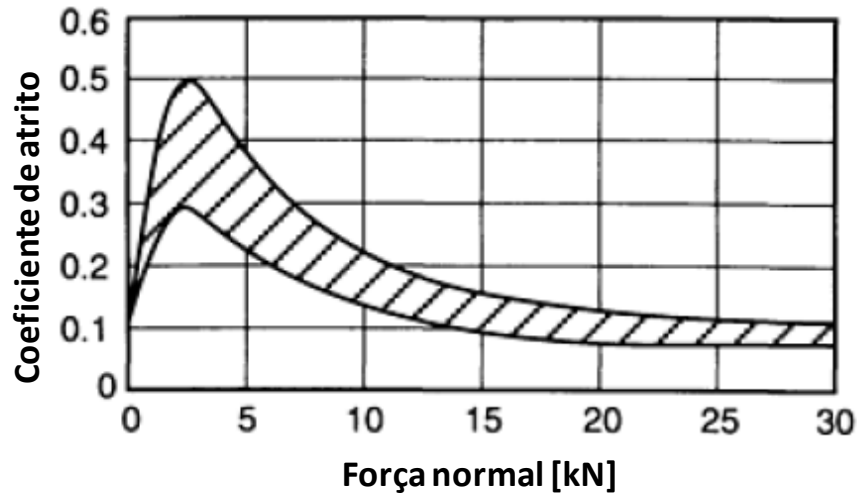


Figura 7. Variação do coeficiente de atrito com relação à pressão de contato. Fonte: Budinski (1992).

A alteração da superfície é outro aspecto importante dos muitos ensaios de desgaste e atrito. Sempre que o desgaste ocorre em um ensaio deslizante, o coeficiente de atrito não é apenas das superfícies envolvidas, mas do sistema todo. Quando ocorre desgaste em uma simples medição de atrito, é importante examinar ambas as superfícies alteradas. Os danos frequentemente podem ser causados tanto por superfícies polidas como rugosas. Quando o atrito altera a textura da superfície inicial, um ensaio de desgaste foi executado, não um ensaio de atrito. A força de atrito medida e o coeficiente de atrito devem ser considerados para uma superfície gasta (Budinski, 1992).

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \equiv \frac{\tau \cdot A_a}{p \cdot A_a} = \frac{\tau}{p} \quad (3)$$

Entretanto, de acordo com Bowden e Tabor (1954), o coeficiente de atrito segundo Coulomb é definido pela equação 4.

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \equiv \frac{\tau_i \cdot A_r}{p_r \cdot A_r} \quad (4)$$

Nessa equação, τ_i representa a tensão cisalhante na interface de contato determinado pela camada de contorno da superfície. A_r é a área real de contato determinada pela interação das asperezas da superfície. O parâmetro p_r é pressão de contato real definida por F_n/A_r .

Durante a deformação de uma chapa metálica o coeficiente de atrito é controlado por duas componentes diferentes:

- Uma força adesiva atuando nas áreas reais de contato (lado esquerdo da Figura 8),
- Uma força de deformação atuando durante a penetração das asperezas da ferramenta que é mais dura, na chapa que é mais macia (lado direito da Figura 8).

Consequentemente, o coeficiente de atrito pode ser escrito como se segue:

$$\mu = \mu_a + \mu_p \quad (5)$$

onde μ_a é a componente adesiva que está relacionada ao material e μ_p é a componente de penetração (ou deformação) que está relacionada à topologia das superfícies em contato. A componente adesiva de atrito é dependente da composição química da superfície da interface deslizante. Se a superfície da ferramenta é mais dura que a superfície da chapa, qualquer irregularidade nela pode resultar em um arranhamento na superfície da chapa, aumentando assim a força de atrito.

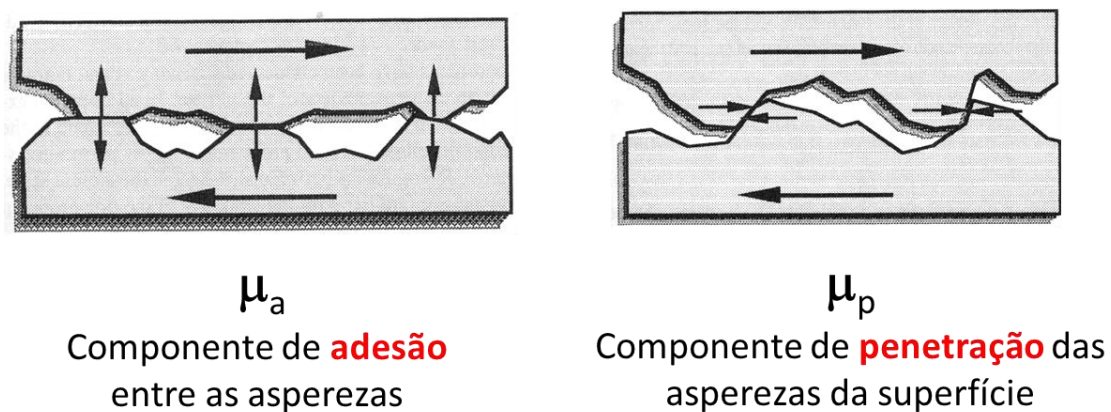


Figura 8. Ilustração esquemática das componentes do coeficiente de atrito presente em contato metal/metal.

2.4. Ensaios para medição do coeficiente de atrito em estampagem

Existem vários ensaios tecnológicos para se determinar o coeficiente de atrito em estampagem, dependendo do tipo de condição de deformação. Os principais tipos de deformações em estampagem são o estiramento puro e o embutimento e para cada um existe um ensaio correspondente para se avaliar o atrito.

Em um ensaio de estiramento puro, a chapa é totalmente presa no prensa chapas e deformada por um punção, figura 9a. O mais comum é o ensaio Erichsen onde um punção esférico deforma a chapa até a ruptura e a altura da chapa deformada é medida.

Para a condição de estiramento, o coeficiente de atrito é obtido através de um ensaio onde uma tira de chapa passa por um pino de raio R a noventa graus, em que uma das pontas da tira está presa e a

outra se movimenta com uma velocidade u (figura 9b). Através da medição da força que a chapa oferece para se deslocar é obtido o coeficiente de atrito.

A vantagem desse ensaio é que ocorrem grandes deformações na zona de contato. Porém, há desvantagens, que são: a pressão normal não pode ser ajustada para níveis desejados, a velocidade de deslizamento na área de contato varia bastante e é difícil de medir e o ensaio gera uma deformação localizada muito grande, o qual geralmente é ausente nos processos de fabricação. Isso acaba por mudar a condição de lubrificação na área de contato gerando consequências desconhecidas.

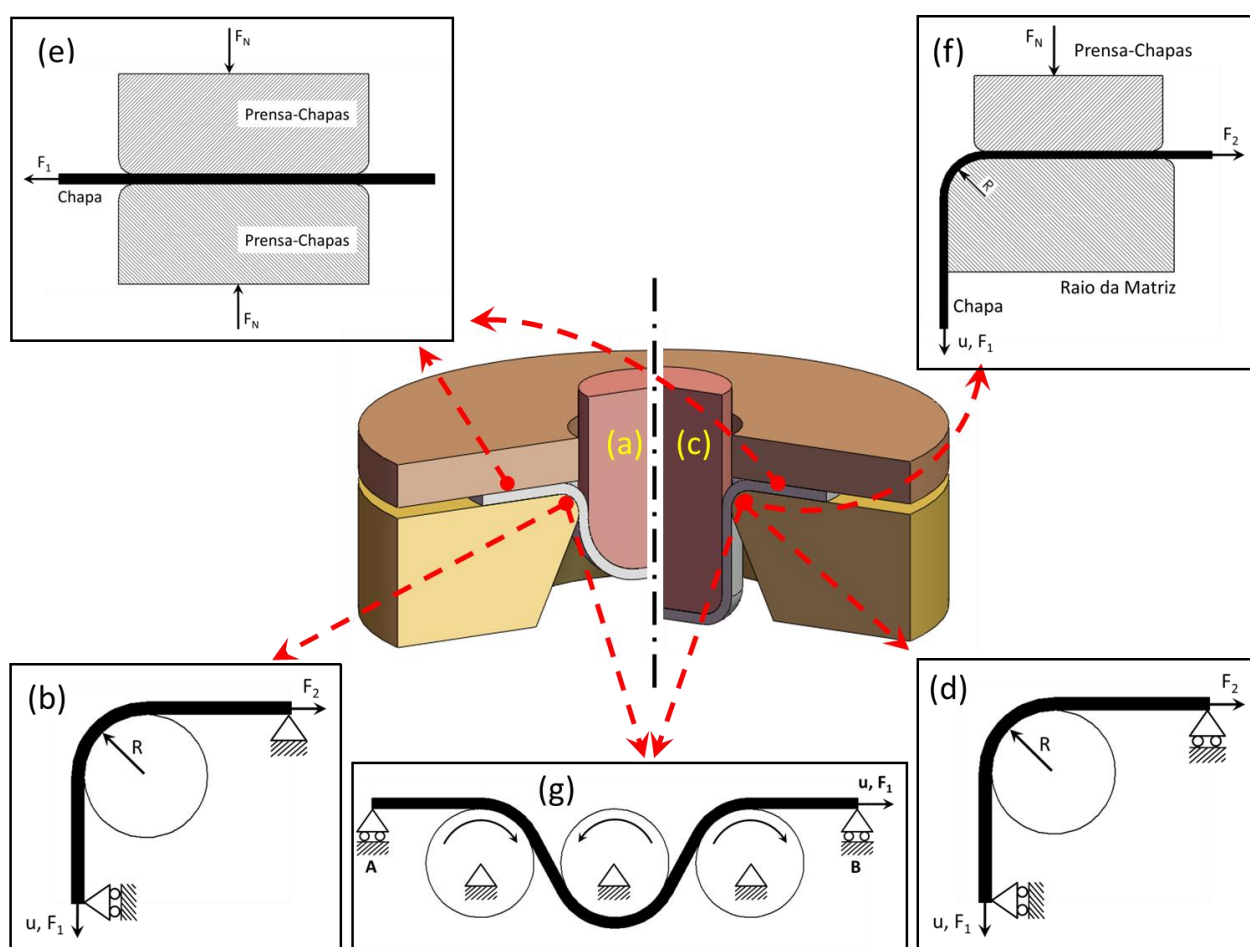


Figura 9. Ensaios para obtenção do coeficiente de atrito. Adaptado de: Paunoiu e Nicoara (2003) e Bay, Olsson *et al.* (2008).

Em um ensaio de estampagem, a chapa é conformada através de uma matriz por um punção e a lubrificação empregada facilita o processo (figura 9c). No início da estampagem, as zonas de contato com a matriz e o punção formam um filme de lubrificante fino. O contato vai gradualmente mudando e a condição de lubrificação torna-se diferente em vários pontos da chapa.

O ensaio mais comum usado para simular a estampabilidade é o ensaio Swift. A geratriz é estampada com diferentes diâmetros até se atingir a máxima força do punção antes do copo ser todo estampado. Esse ensaio mede o maior tamanho da geratriz que o material é capaz de suportar antes de haver o rompimento do copo. O diâmetro do punção é de 50 mm e a matriz tem 52,5 mm.

O ensaio DST é usado para simular a deformação do material no raio da matriz. Uma tira de chapa é submetida a um deslizamento sobre um pino de raio R enquanto uma tensão é aplicada nas duas pontas da tira (figura 9d).

Através desse ensaio e com o uso de um pino fixo e posteriormente, um pino que gira livremente, é possível obter-se a força de atrito pela subtração das forças com pino livre e fixo. O efeito da lubrificação, do acabamento das matrizes, e o material da chapa pode ser avaliado com relação às matrizes. O coeficiente de atrito pode ser obtido através da equação (6).

$$\mu = \frac{1}{\theta} \ln \frac{F_1}{F_2} \quad (6)$$

onde F_1 é a força de atuação, F_2 é a força de contra-tensão, que atua no sentido oposto ao movimento da chapa e θ é o ângulo de contato entre a tira e o pino.

A simulação da zona de ação do prensa chapa é simples. Com um ensaio onde uma chapa é deslizada entre duas matrizes paralelas pode-se averiguar a força de atrito nessa região (figura 9e). Esse tipo de ensaio foi utilizado nos experimentos de Wichern e Van Tyne (1999), Lee, Keum *et al.* (2002) e Severo, Vilhena *et al.* (2009).

O coeficiente de atrito pode ser obtido através da equação (7).

$$\mu = \frac{F_1}{2 \cdot F_N} \quad (7)$$

Entretanto, a correlação com embutimento profundo é relativamente fraca. Algumas razões podem ser citadas: a compressão axial não é modelada e o efeito do raio não é levado em conta. Esses inconvenientes podem ser reduzidos por ferramentas mais sofisticadas (figura 9f) e isso obviamente pode levar a uma simulação mais complexa.

A vantagem adicional desse ensaio é que os efeitos do dobramento ao redor do raio da matriz são os mesmos que nos casos reais de deformação. Porém os efeitos de retorno elástico são negligenciados modificando um pouco a condição de lubrificação nesse ensaio em comparação ao real.

Existe ainda uma condição em que se tem ao mesmo tempo embutimento profundo e estiramento. Esse tipo de condição está presente na região do “quebra-rugas” e o ensaio geralmente é

aplicado para simular essa região. O sucesso na combinação entre estiramento e embutimento profundo depende do controle do escoamento da chapa dentro da matriz: restrições excessivas levam a fratura, insuficientes restrições levam a enrugamentos. Para um controle adequado, a força requerida para o dobramento e o desdobramento da chapa sobre um ou mais quebra rugas deve ser determinada.

A geometria do ensaio de quebra ruga pode ser bastante próxima da geometria real das matrizes e o resultado tem uma boa correlação com o usado nas indústrias. Nesse ensaio uma tira de chapa é conformada através de três cilindros que se assemelham ao quebra rugas comumente usados em matrizes (figura 9g). Esse ensaio é usado também como uma boa aproximação para a região do raio da matriz tanto para o embutimento profundo como para o estiramento (Paunoiu e Nicoara, 2003).

2.5. Ensaio de pino em disco e suas variações

Os ensaios que normalmente são usados para caracterizar o atrito entre a chapa e as ferramentas são baseados nos ensaios de pino em disco, figura 10a. Esses ensaios apresentam algumas variações de acordo com o objetivo de cada autor. O ensaio é constituído de um pino, que pode ser com ponta esférica, ovalada ou reta, que representa o material das ferramentas, e uma chapa, que é de formato circular e gira em torno do seu eixo. O pino é então pressionado contra a chapa sob força controlada e a chapa gira com velocidade e rotação específica. A relação da força que o pino faz na chapa com o torque gerado nela fornece o coeficiente de atrito. Esse ensaio é mais usado normalmente para se ter uma ideia do desgaste das ferramentas, uma vez que se pode rotacionar a chapa a uma velocidade constante e essa permanecer girando por um tempo bastante longo.

Existem também algumas variações do ensaio de pino em disco, onde ao invés do pino girar, ele é transladado em linha reta, figura 10b. Na figura 10b tem-se o ensaio com a ferramenta de formato esférico transladando em linha reta, utilizado pelos autores Andreasen, Bay *et al.* (1998); Guillon, Roizard *et al.* (2001); Murakawa e Takeuchi (2003); Bay, Olsson *et al.* (2008); Cora, Namiki *et al.* (2009); Hanna (2009). Na figura 10c tem-se um punção esférico girando sobre um eixo fixo e delineando uma trajetória circular na chapa. Já na figura 10a tem-se o mesmo caso, porém com punção cilíndrico (Riahi, Edrisy *et al.*, 2009).

Gearing, Moon *et al.* (2001), realizaram outro tipo de ensaio no qual existem duas matrizes anulares que entram em contato com a chapa (figura 11). A matriz inferior apresenta uma superfície serrilhada que serve para prender a chapa enquanto que a matriz superior pode deslizar sobre a chapa que pode estar lubrificada ou não. Com isso, através da relação entre a força normal F_N e o torque T pode-se determinar o coeficiente de atrito entre a chapa a matriz superior, o qual é formada do mesmo

material das matrizes de estampagem em um processo industrial. Através desse ensaio pode-se avaliar o atrito com relação à pressão de contato, à distância angular de giro ou à velocidade de rotação da matriz anular.

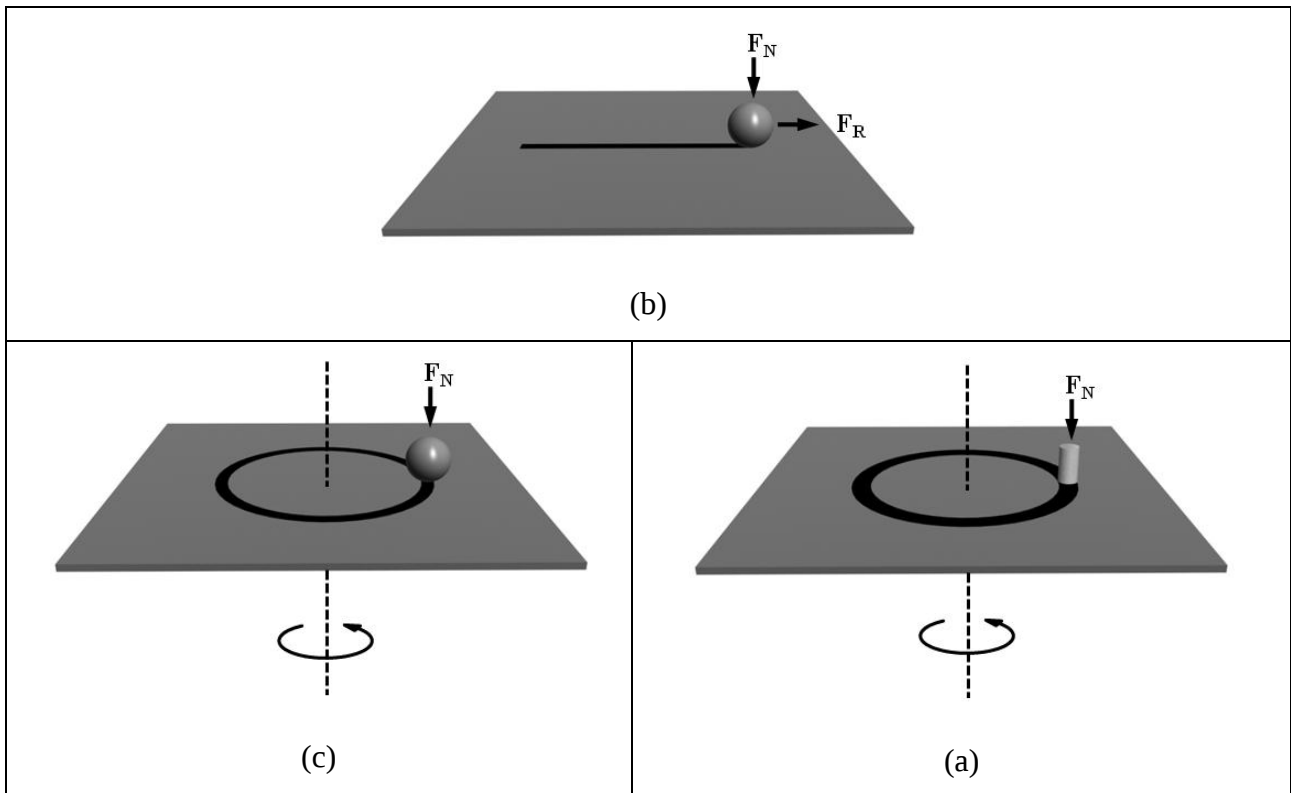


Figura 10. Variações do ensaio de pino em disco. Adaptado de: Carlsson, Bexell *et al.* (2000).

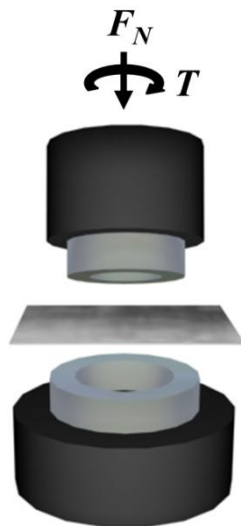


Figura 11. Variação do ensaio de pino em disco. Adaptado de: Gearing, Moon *et al.* (2001).

2.6. Ensaio de Dobramento sob Tensão

O ensaio de dobramento sob tensão (DST – do inglês BUT – Bending Under Tension Test) consiste em dobrar uma tira de chapa através de um pino de raio pré-determinado e sobre esse pino fazer a chapa deslizar. Para isso, há a aplicação de uma força em uma das extremidades da chapa para que haja o movimento relativo entre a chapa e o pino. Na outra extremidade é aplicada uma força contrária ao movimento com o objetivo de tencionar a chapa e poder-se variar a pressão de contato incidente sobre o pino. A figura 12 mostra um desenho esquemático desse ensaio. A força que gera o movimento é chamada de força de atuação (F_2 na figura 12) e a força que é aplicada no sentido contrario é chamada de força de contra-tensão (F_1 na figura 12). O pino de raio r tem a função de simular o atrito na passagem do raio da matriz de estampagem, por ser nessa região que as tensões são maiores.

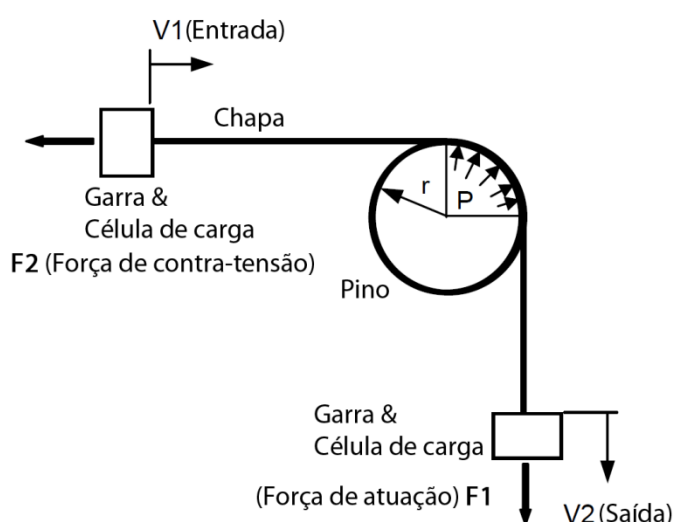


Figura 12. Figura esquemática do ensaio DST. Fonte: Kim, Jain *et al.* (2004).

Nesse ensaio, existem duas forças necessárias para fazer com que a chapa deslize sobre o pino, uma é a força de atrito entre as superfícies de contato e a outra é a força necessária para realizar o dobramento e desdobramento da chapa. Como o propósito do ensaio é de se conhecer a força de atrito entre as superfícies de contato, ele é executado em duas etapas. Na primeira o pino por onde a chapa passa pode rotacionar livremente através do seu eixo, fazendo com que não haja um movimento relativo na interface pino/chapa. Isso gera uma condição de atrito mínimo, sendo que a força necessária para fazer a chapa se movimentar é devido exclusivamente à força de dobramento e desdobramento da

chapa. Na segunda etapa, esse mesmo pino é fixado no seu eixo impedindo qualquer movimento. A força necessária para fazer a chapa se movimentar é composta então pela força de dobra mais a força de atrito. A figura 13 mostra um esquema das duas etapas. Assim, pode-se descontar a força de dobra, medida na primeira etapa, da segunda e obter-se como resultado apenas a força de atrito.

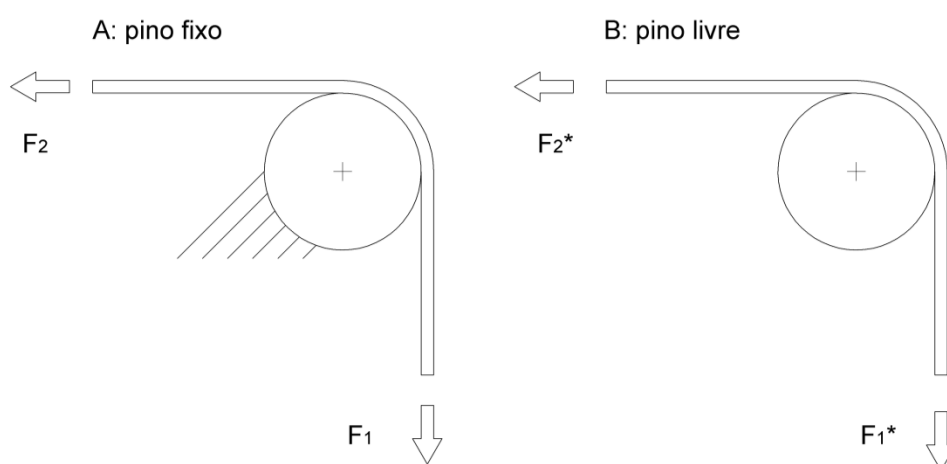


Figura 13. Etapas do ensaio DST. Na esquerda, o ensaio com pino fixo e na direita com o pino móvel.
Fonte: Andreasen, Olsson *et al.* (2006).

O ensaio DST descrito acima foi concebido a partir da ideia de se conhecer o atrito na passagem do raio da matriz e é a forma tradicional de se executar esse ensaio. Porém, recentemente, alguns autores propuseram algumas variações nesse ensaio a fim de facilitar a sua construção ou gerar resultados mais próximos do processo de embutimento profundo. Isso é devido primeiramente ao fato de que para se executar o ensaio DST, é necessária a construção de um equipamento específico para isso, o que, muitas vezes é de difícil execução. Dessa forma, alguns autores propuseram alguns sistemas nos quais é possível adaptar em uma máquina de ensaios universal. É o caso do sistema proposto por Lovell, Higgs *et al.* (2006) que pode ser visto na figura 14. Nesse sistema a chapa é presa em uma placa superior e dobrada sob dois pinos que ficam localizados em uma placa inferior. As duas placas são então tensionadas e a tira de chapa se deforma e realiza um movimento na interface pino/chapa.

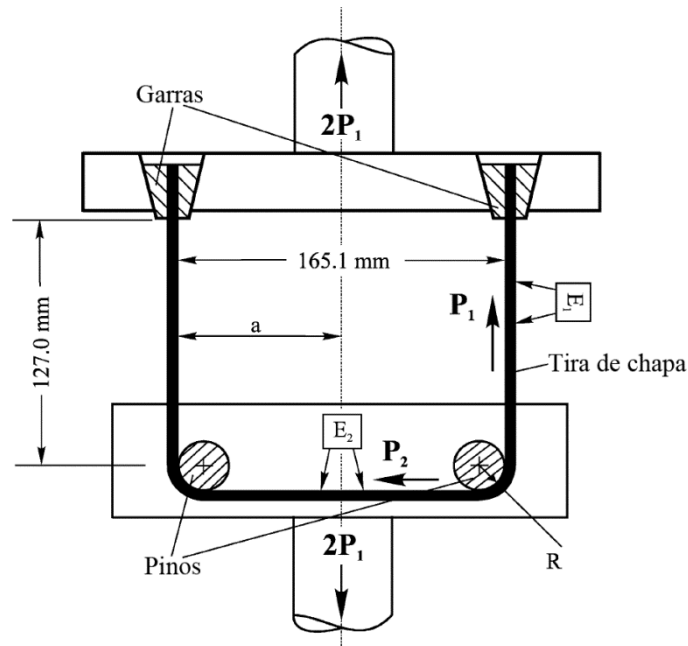


Figura 14. Sistema usado por Lovell, Higgs *et al.* (2006) para o ensaio dobramento sob tensão.

Outro sistema que foi proposto por Hao, Klamecki *et al.* (1999), figura 15, funciona de forma semelhante ao descrito acima, porém a chapa passa por uma região curva onde ela é apoiada sobre uma célula de carga. Essa região, pela própria simetria do equipamento, faz com que a chapa não apresente movimento significativo de deslizamento, permanecendo esse movimento predominantemente nos pinos. Hao, Klamecki *et al.* (1999) ainda propôs outro sistema, mais parecido com o tradicional, que pode ser visto na figura 16. Nesse sistema, a chapa é presa em uma garra fixada a uma célula de carga que fica posicionada na direção horizontal enquanto que a parte que se movimenta da chapa é acoplada em uma garra na direção vertical.

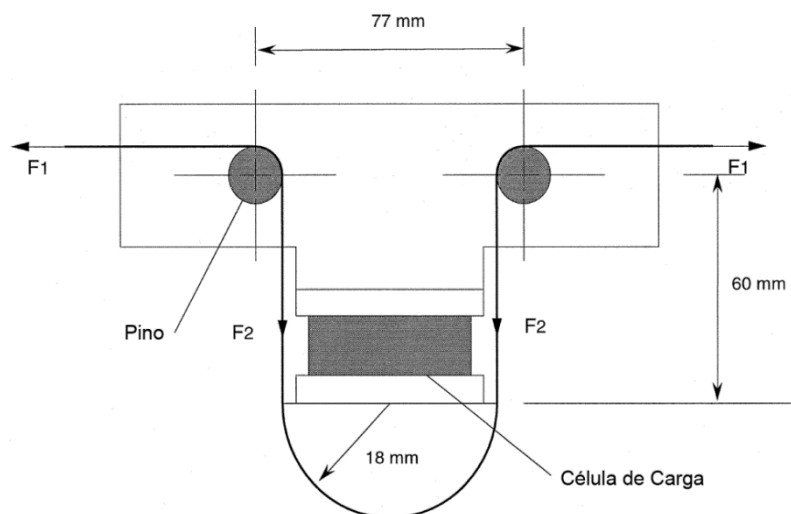


Figura 15. Sistema usado por Hao, Klamecki *et al.* (1999) para o ensaio DST.

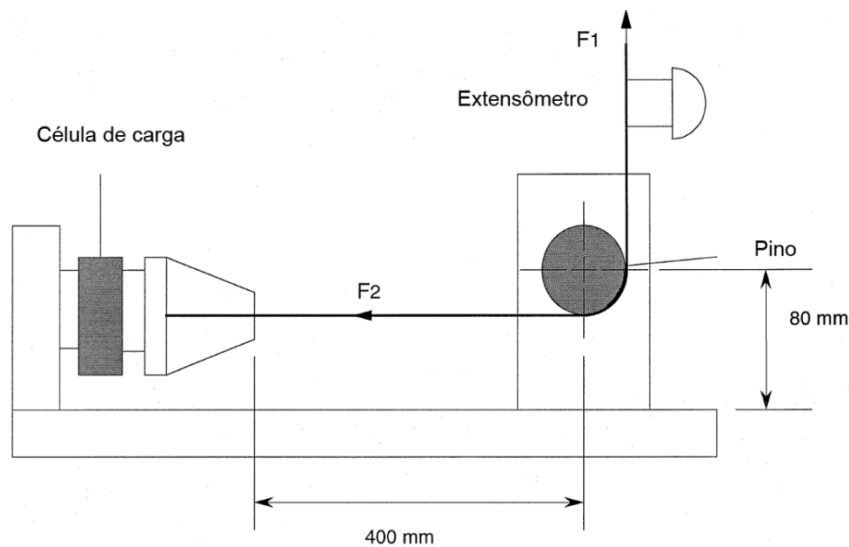


Figura 16. Outro sistema também usado por Hao, Klamecki *et al.* (1999) para o ensaio DST.

Os ensaios das figura 14, figura 15 e figura 16 foram concebidos para que se possa instalar facilmente em uma máquina de ensaios universal, tornando o ensaio mais simples de ser realizado sem a necessidade de se construir uma máquina específica para isso. Esses ensaios, no entanto, não geram muito deslocamento entre a chapa e o pino pois um dos lados da chapa fica preso, fazendo com que o ensaio seja mais indicado para estiramento e não tanto para embutimento profundo. Outras variantes do ensaio DST foram concebidas para se ter um teste mais próximo do processo de embutimento profundo. É o caso do sistema proposto por Miguel, Coello *et al.* (2009) que é mostrado na figura 17. Nesse ensaio, a chapa passa por uma matriz que imprime nela uma deformação angular com o objetivo de se simular o efeito de diminuição da área da geratriz no caso do embutimento de uma geometria cilíndrica.

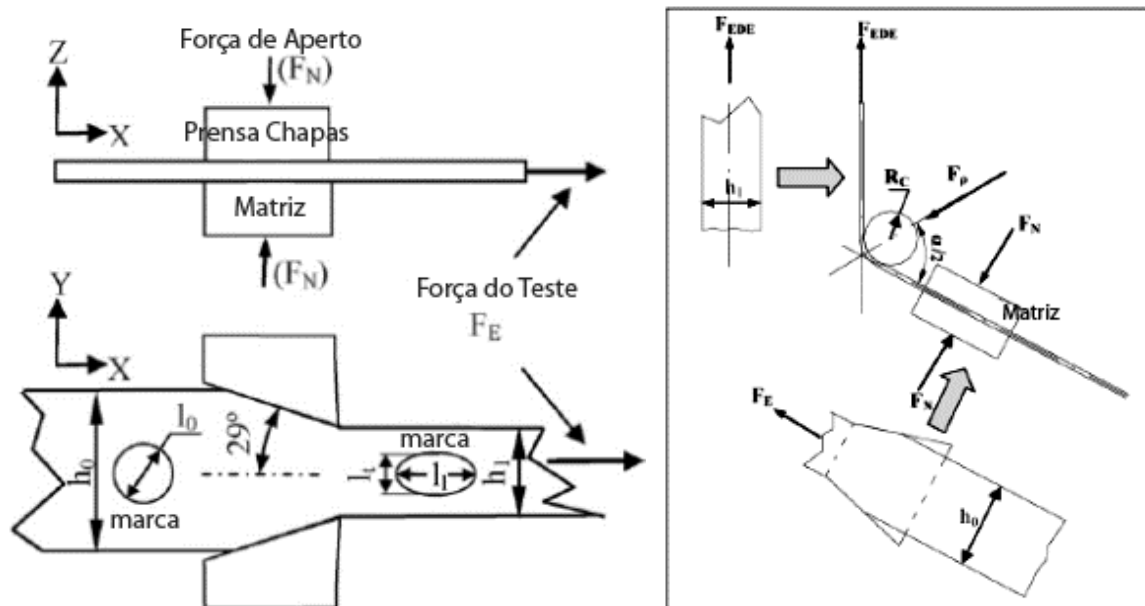


Figura 17. Sistema usado por Miguel et al (2008) para o ensaio DST. Na esquerda a vista superior e lateral da matriz de redução angular e na direita o esquema do ensaio completo.

Existe ainda outro sistema que foi proposto primeiramente por Sniekers e Smits (1997) e depois aperfeiçoado por Andreasen, Olsson *et al.* (2006) no qual se obtém um torque no pino por onde a chapa passa. A idéia dessa variante do ensaio DST tem o objetivo de eliminar o ensaio feito com o pino livre (que pode girar no seu eixo), pois o torque medido no pino é gerado unicamente pela força de atrito, que é o objetivo do ensaio. Um esquema do sistema proposto por Sniekers e Smits (1997) é mostrado na figura 18.

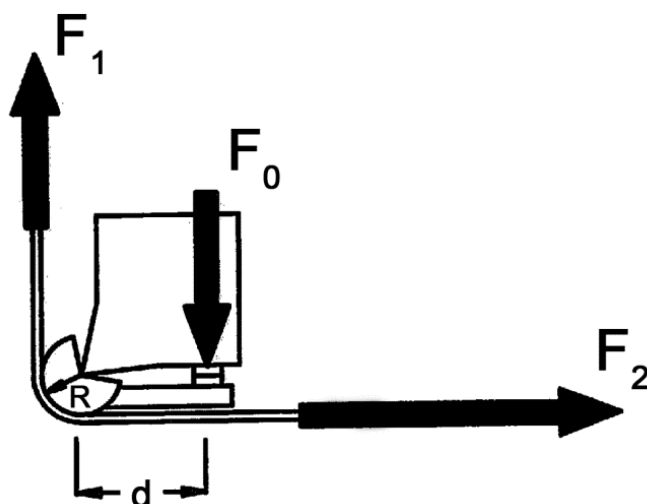


Figura 18. Sistema usado por Sniekers e Smits (1997) para medir o coeficiente de atrito.

2.7. Equações usadas para o cálculo do coeficiente de atrito

Assim como os ensaios DST tem variações na sua forma básica, as equações que são usadas para determinar o atrito também têm diferenças segundo a forma construtiva do sistema que é usado ou segundo alguns autores que propuseram formas distintas de cálculo. A primeira aproximação para o cálculo do coeficiente de atrito foi baseada nas equações para o cálculo de polias. Nesse caso tem-se que o atrito na interface pino/chapa é dado por um logaritmo natural da razão entre as forças de atuação e de contra-tensão como pode ser visto na equação (8).

$$\mu = \frac{2}{\pi} \ln \frac{F_1}{F_2} \quad (8)$$

Sendo que F_1 é a força de atuação e F_2 é a força de contra-tensão. O termo $2/\pi$ é referente ao ângulo de 90 graus entre as forças F_1 e F_2 . Porém, como falado acima, é necessário realizar dois ensaios para que se possa descontar a atuação da força de dobramento e desdobramento da chapa. Por isso, na equação (8) foi adicionado um termo que se refere a força de dobra da chapa. Esse termo é chamado de força de dobra F_b da equação (9) e é obtido pela subtração das forças de atuação e contra-tensão durante o ensaio com o pino livre, F_1^* e F_2^* da equação (10), respectivamente.

$$\mu = \frac{2}{\pi} \ln \frac{(F_1 - F_b)}{F_2} \quad (9)$$

$$F_b = F_1^* - F_2^* \quad (10)$$

Como pode ser visto nas equações (8) e (9), a geometria do ensaio, raio do pino e espessura da chapa, não tem nenhuma contribuição no atrito. Por isso, foi proposta outra forma de medição do coeficiente de atrito onde o raio do pino e a espessura da chapa são levados em consideração, equação (11). Essa equação foi usada nos trabalhos de Han (1997); Jonasson, Wihlborg *et al.* (1998); Wihlborg e Gunnarsson (2000); Nanayakkara, Kelly *et al.* (2005).

$$\mu = \frac{2}{\pi} \left[\frac{R + 0.5t}{R} \right] \ln \left[\frac{F_1 - F_b}{F_2} \right] \quad (11)$$

Onde t é a espessura da chapa e R é o raio do pino.

Pode-se notar que todas as equações mencionadas até aqui são compostas por um logaritmo natural da razão entre duas ou mais forças. Porém, foi proposto outra forma de se calcular o atrito, que pode ser visto na equação (12). Essa equação foi descrita e usada por Saha, Wilson *et al.* (1996); Fratini, Lo Casto *et al.* (2006).

$$\mu = \frac{2 \cdot (F_1 - F_2 - F_b)}{\theta \cdot (F_1 + F_2)} \quad (12)$$

Onde F_1 é a força de atuação, F_2 é a força de contra-tensão, F_b é a força de dobra e θ é o ângulo de dobramento da chapa.

Com o objetivo de eliminar a segunda etapa do ensaio com o pino livre, Sniekers e Smits (1997) e depois Andreasen, Olsson *et al.* (2006) fizeram uso de um sensor de torque no pino do ensaio DST. A equação (13), concebida por Sniekers e Smits (1997), mostra como é calculado o coeficiente de atrito com a medição de um torque.

$$\mu = \frac{\frac{F_0 d}{R}}{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 - \left(\frac{F_0 d}{R}\right)^2}} \quad (13)$$

Onde o termo $F_0 d$ representa o torque no pino (os termos F_0 e d são mostrados na Figura 18), F_1 é a força de atuação e F_2 é a força de contra-tensão.

A equação concebida por Andreasen, Olsson *et al.* (2006) foi proposta para se saber a tensão de atrito que ocorre na interface pino/chapa e é dada pela equação (14).

$$\tau = \frac{2T}{\pi W R^2} \quad (14)$$

Onde τ é a tensão de atrito, T representa o torque do pino, W a largura da tira de chapa que passa sobre o pino e R é o raio do pino.

Para o cálculo do coeficiente de atrito, foram propostas várias formas, porém para o cálculo da pressão de contato entre a chapa e o pino, todos os autores usam a mesma equação (15).

$$p = \frac{F_1 + F_2}{2WR} \quad (15)$$

Onde p é a pressão de contato, F_1 é a força de atuação, F_2 é a força de contra-tensão, W a largura da chapa que passa sobre o pino e R é o raio do pino.

A relação entre a equação (14) e (15) gera o coeficiente de atrito, mostrada na equação (16). É importante salientar aqui que a equação abaixo não está presente no trabalho de Andreasen, Olsson *et al.* (2006), ela foi deduzida com base nas equações (14) e (15) e essas sim estão presentes no trabalho deles.

$$\mu = \frac{\tau}{p} = \frac{4T}{\pi R(F_1 + F_2)} \quad (16)$$

2.8. Alguns resultados obtidos pelo ensaio DST

Como foi mostrado até aqui, existem muitas variações e métodos de se obter o coeficiente de atrito para o caso de embutimento profundo pelo ensaio DST. Porém a grande vantagem desse ensaio é a possibilidade de se avaliar o efeito de algumas variáveis de processo como velocidade de embutimento, pressão de contato, deformação e tensões da chapa.

Fratini, Lo Casto *et al.* (2006) em seu trabalho analisou o efeito de alguns acabamentos da superfície do pino juntamente com a aplicação de lubrificantes distintos. Ele constatou que uma superfície apenas cromada não basta para reduzir grandemente o atrito, é necessário se aplicar um lubrificante, que no caso de menor atrito foi de teflon. A figura 19 mostra esse resultado. Fratini, Lo Casto *et al.* (2006) usou a equação (12) para o calculo do coeficiente de atrito.

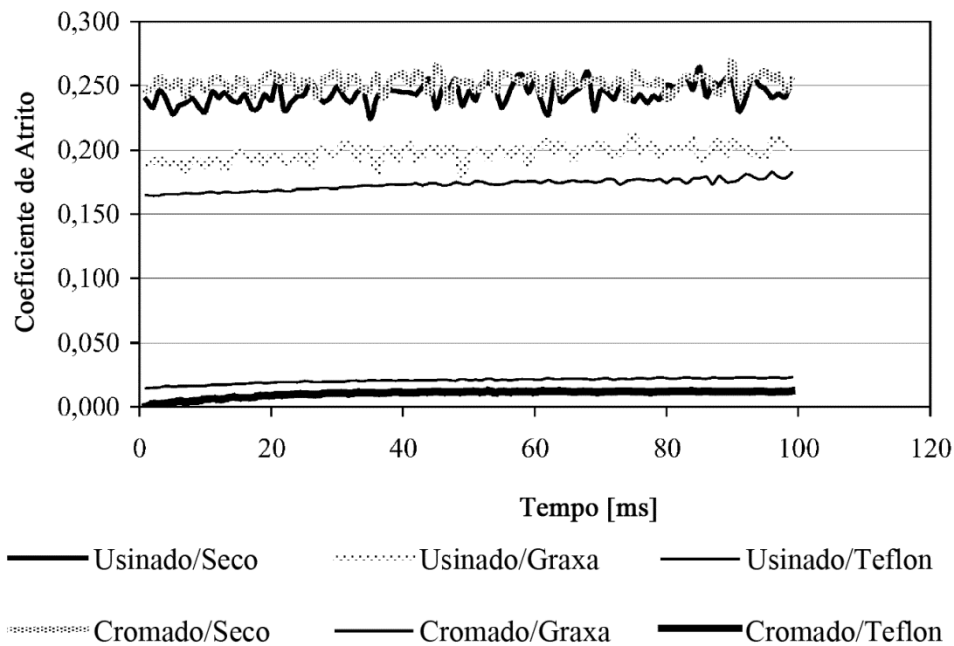


Figura 19. Coeficiente de atrito obtido por Fratini, Lo Casto *et al.* (2006) com diferentes lubrificantes e acabamentos do pino.

Outras informações importantes foram obtidas por Hao, Klamecki *et al.* (1999), usando o sistema da figura 16, que variou a velocidade de embutimento, o lubrificante empregado e o material do pino com relação a deformação da chapa. A figura 20 mostra o efeito da velocidade no atrito e como pode-se constatar, quanto maior a velocidade de embutimento, menor o atrito na interface pino/chapa.

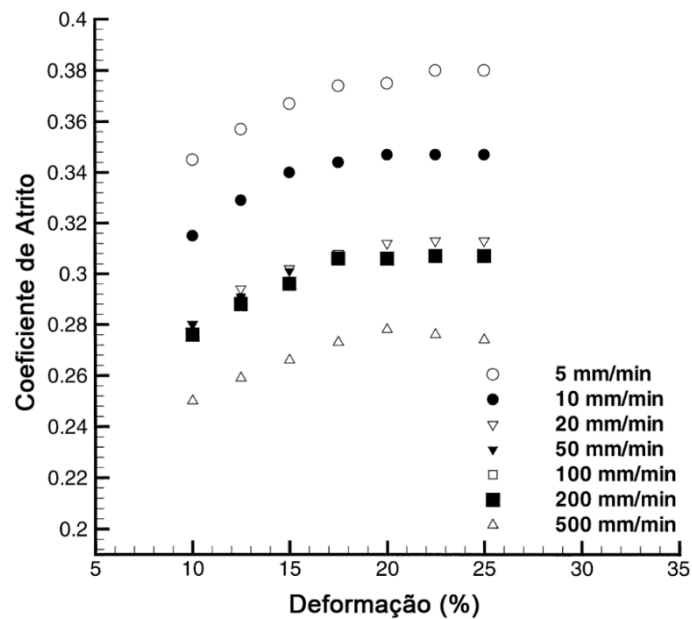


Figura 20. Coeficiente de atrito vs. deformação para varias velocidades de embutimento obtido por Hao, Klamecki *et al.* (1999) usando o sistema da figura 16.

Hao, Klamecki *et al.* (1999) variaram o tipo de lubrificante aplicado no pino e constataram que uma adição de 1% de acido esteárico em uma composição de óleo mineral, reduziu em mais de 50% o valor do atrito (figura 21). De forma semelhante, na figura 22, Hao, Klamecki *et al.* (1999) verificou que o material do pino também influencia no atrito e que o cobre gera níveis de atrito mais baixos no ensaio. Hao, Klamecki *et al.* (1999) usou a equação (8) para calcular o coeficiente de atrito.

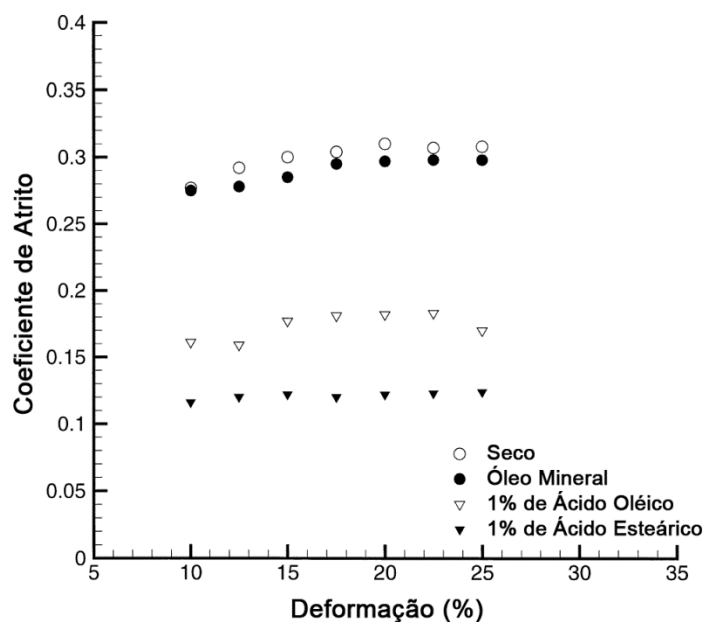


Figura 21. Coeficiente de atrito vs. deformação para 3 tipos de condições de lubrificação mais o caso a seco obtido por Hao, Klamecki *et al.* (1999) usando o sistema da figura 16.

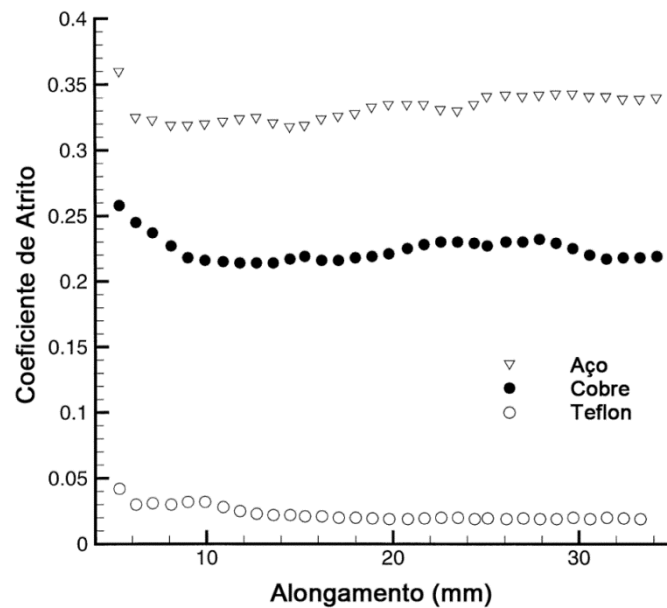


Figura 22. Coeficiente de atrito vs. alongamento para 3 tipos de materiais do pino obtido por Hao, Klamecki *et al.* (1999) usando o sistema da figura 16.

De forma semelhante à Hao, Klamecki *et al.* (1999), Lovell, Higgs *et al.* (2006) usando o sistema da figura 14 analisou o coeficiente de atrito em relação ao uso de óleos que não agridem ao meio ambiente e constatou que o óleo de canola com uma mistura de ácido bórico apresenta bons resultados de atrito (figura 23). Lovell, Higgs *et al.* (2006) também usou a equação (8) para calcular o coeficiente de atrito.

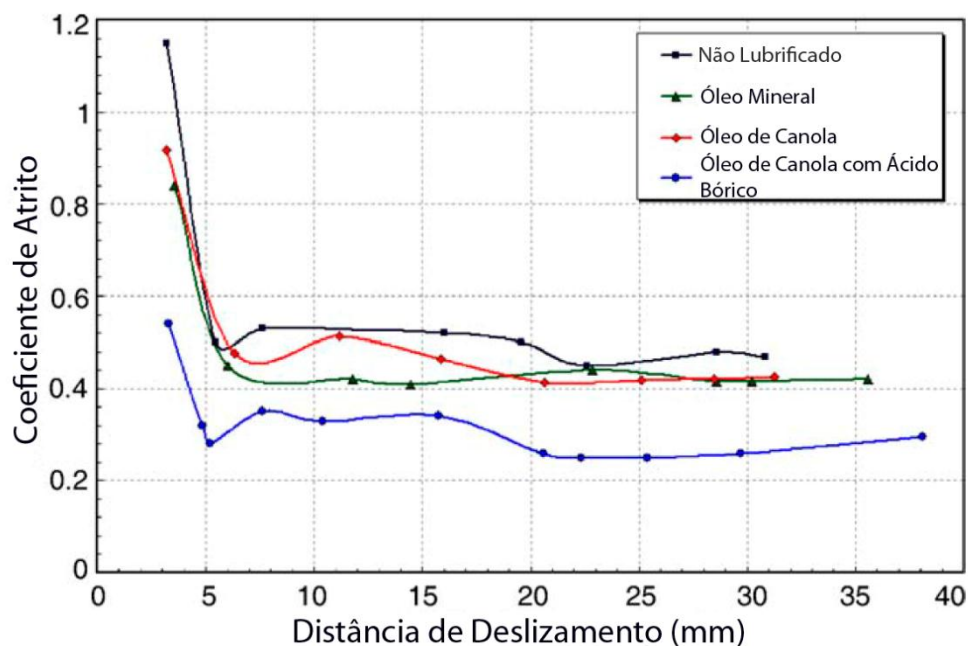


Figura 23. Coeficiente de atrito obtido por Lovell, Higgs *et al.* (2006) para lubrificantes que não agridem ao meio ambiente usando o sistema da figura 15.

Andreasen, Olsson *et al.* (2006), usando o sistema da figura 13, constataram que o torque medido no pino durante o ensaio é mais sensível ao atrito que as forças de atuação e de contra-tensão. Isso pode ser visto na figura 24. Para tanto, eles usaram essa propriedade do torque no pino para constatar a temperatura em que há a quebra da camada de filme do lubrificante. Isso pode ser visto na figura 25 onde a partir de certo ponto de deslocamento da chapa o torque medido gera uma instabilidade característica do contato metal-metal.

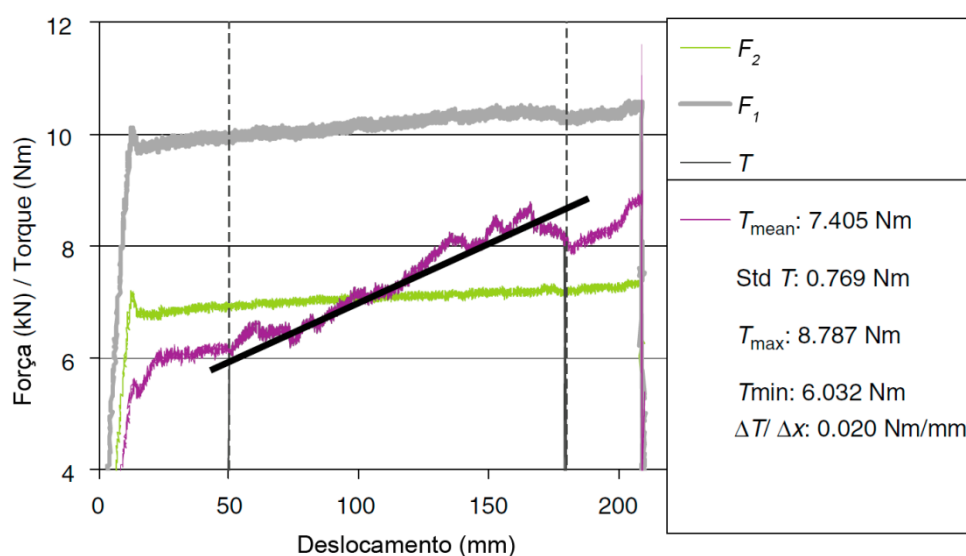


Figura 24. Medição das forças de atuação e contra-tensão juntamente como o torque obtidas por Andreasen, Olsson *et al.* (2006) usando o sistema da figura 13.

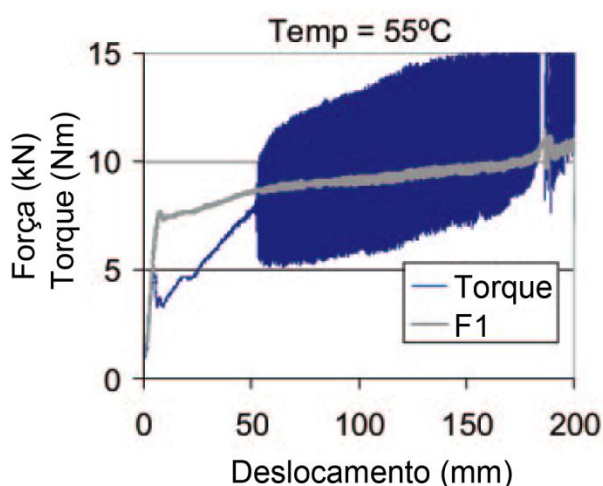


Figura 25. Gráfico da força de atuação e torque vs. deslocamento da chapa para uma temperatura de 55°C obtido por Andreasen, Olsson *et al.* (2006) usando o sistema da figura 13.

Como foi visto anteriormente, existem varias equações que podem ser usadas para se calcular o coeficiente de atrito na interface pino/chapa. Para analisar o efeito de cada uma Nanayakkara, Kelly *et al.* (2005) fez uma comparação entre as equações (8), (9) e (11) para verificar a contribuição de cada uma no valor do atrito. Como pode ser visto nas figura 26 e figura 27 o atrito varia de acordo com a equação a ser usada. Eles também fizeram uma comparação entre os lubrificantes usados e o diâmetro do pino e constataram que o menor atrito não é quando se tem o maior diâmetro do pino, existe um valor ótimo, que reflete sobre o raio de concordância da matriz.

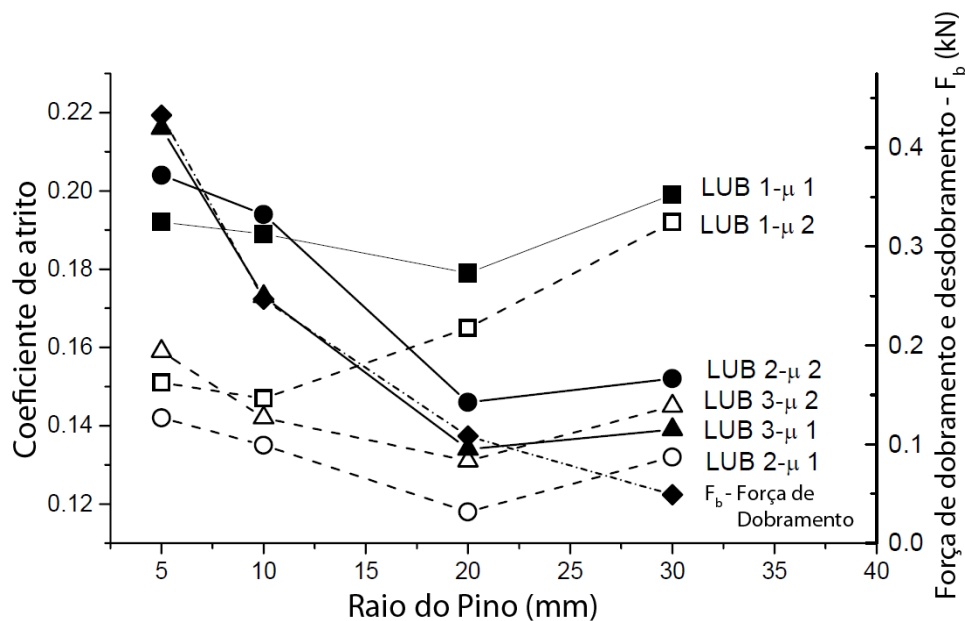


Figura 26. Comparação ente o resultado do coeficiente de atrito obtido pelas equações (8) e (9) para cada diâmetro de pino e lubrificante medido por Nanayakkara, Kelly *et al.* (2005).

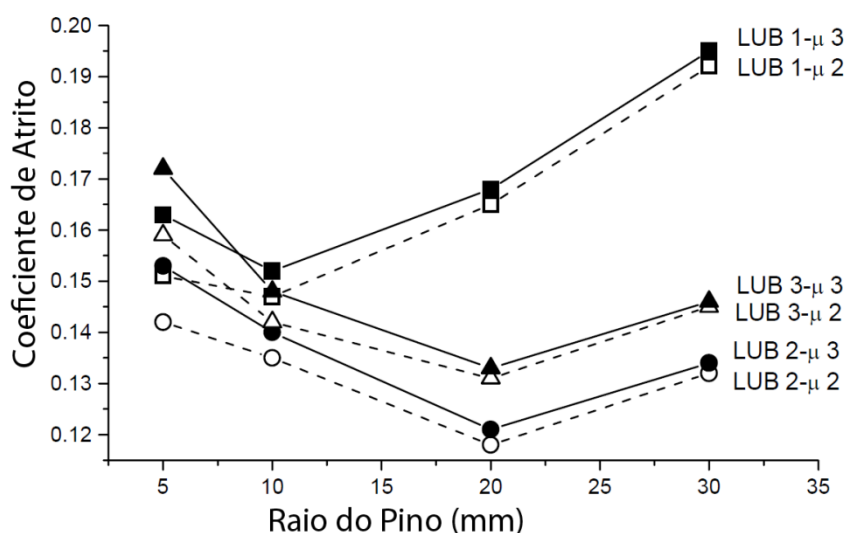


Figura 27. Comparação ente o resultado do coeficiente de atrito obtido pelas equações (9) e (11) para cada diâmetro de pino e lubrificante medido por Nanayakkara, Kelly *et al.* (2005).

2.9. Variação da pressão de contato no pino

Durante o ensaio DST existe uma pressão entre a chapa e o pino gerada pelas forças que atuam em cada lado da tira de chapa. Essa pressão de contato incide sobre o pino que fica em uma posição estática no ensaio. Alguns pesquisadores constataram que o perfil dessa pressão não é constante, ou seja, existem dois picos de pressão localizados próximos do início e do final do contato entre a chapa e o pino. Isso foi demonstrado que ocorre da mesma forma durante a passagem da chapa no raio de concordância da matriz.

Sniekers e Smits (1997) demonstraram através da simulação por elementos finitos do ensaio DST que essa pressão de contato entre a chapa e o pino apresentava um perfil desigual em toda a sua extensão e que existiam dois grandes picos de pressão. A figura 28 mostra o resultado de Sniekers e Smits (1997).

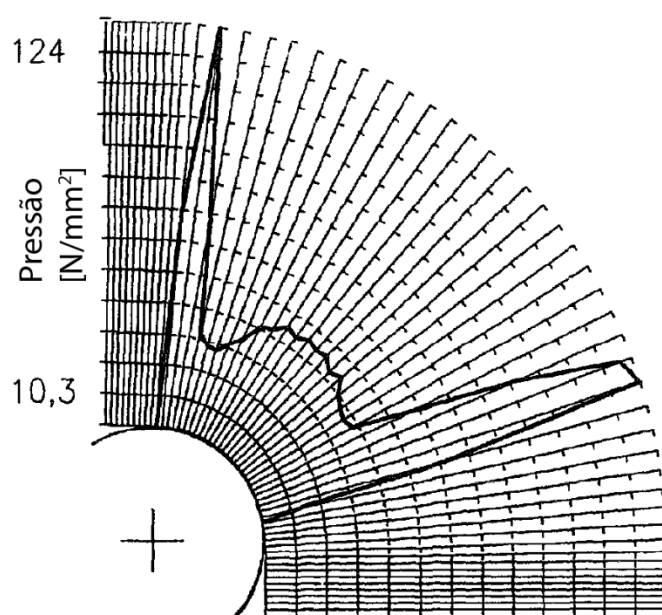


Figura 28. Pressão de contato atuante no pino simulada através do software de elementos finitos ABACUS-implicit. Fonte: Sniekers e Smits (1997).

Kim, Jain *et al.* (2004), posteriormente fizeram um estudo, também através de simulação por software de elementos finitos, da pressão gerada entre o pino e a chapa e constataram o mesmo que Sniekers e Smits (1997). Além disso, o ângulo de atuação da pressão no pino é menor que 90 graus. A figura 29 mostra esse efeito onde cada curva do gráfico representa uma região da chapa no sentido

longitudinal de aplicação do movimento. A figura 30 mostra a distribuição de pressão em cada ponto da chapa.

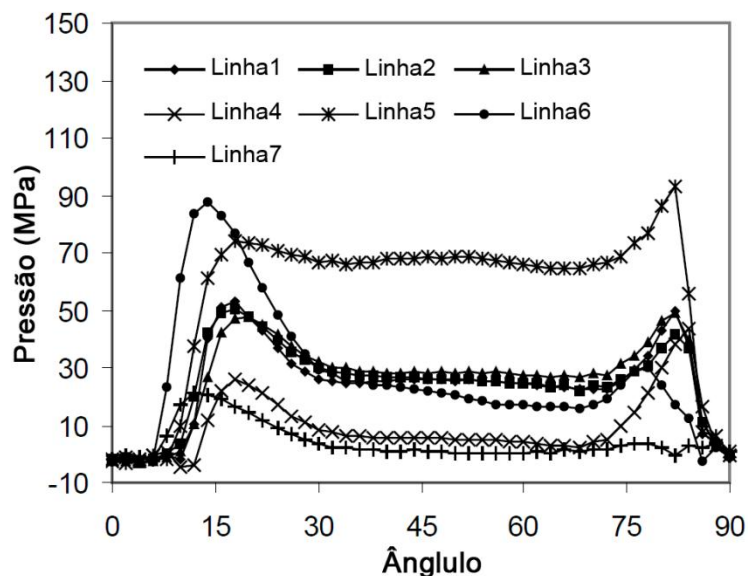


Figura 29. Gráfico da variação da pressão de contato no pino vs. ângulo de dobra da chapa obtido por Kim, Jain *et al.* (2004).

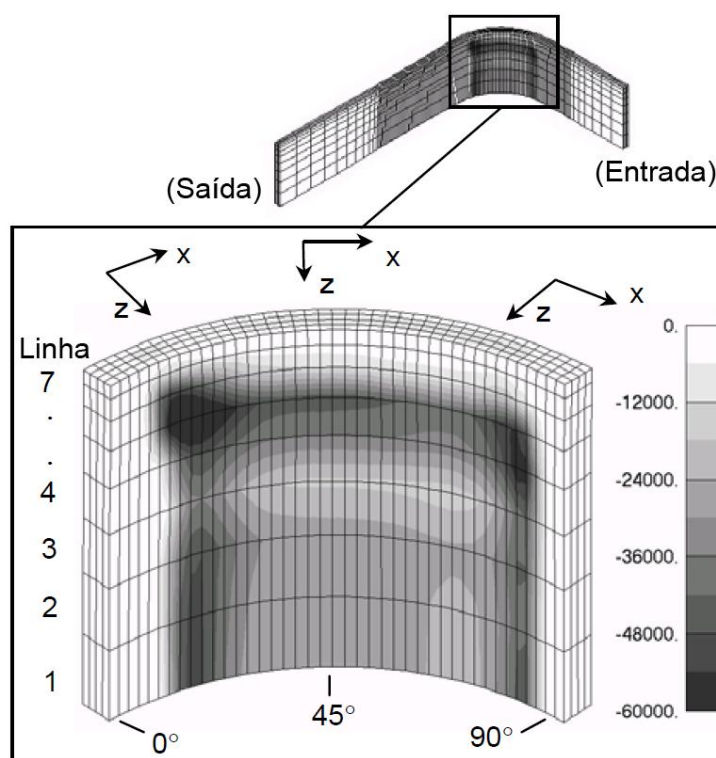


Figura 30. Distribuição de pressão na chapa que foi submetida ao ensaio DST. Fonte: Kim, Jain *et al.* (2004).

Ainda dentro desse contexto, Pereira, Duncan *et al.* (2009) conduziram um estudo através simulação por elementos finitos da evolução da pressão de contato no raio da matriz durante a estampagem de um perfil circular. Eles constataram que esses picos de pressão que ocorrem durante o dobramento da chapa sobre o raio da matriz se devem a altos momentos torçores que ocorrem nessas regiões e isso faz com que a parte central a esses picos sofra perda de contato, diminuindo muito a pressão nessa região. Eles constataram também que esses momentos torçores são gerados pelo retorno elástico da chapa. A figura 31 mostra a evolução da pressão sobre o raio da matriz durante os estágios de deformação da chapa.

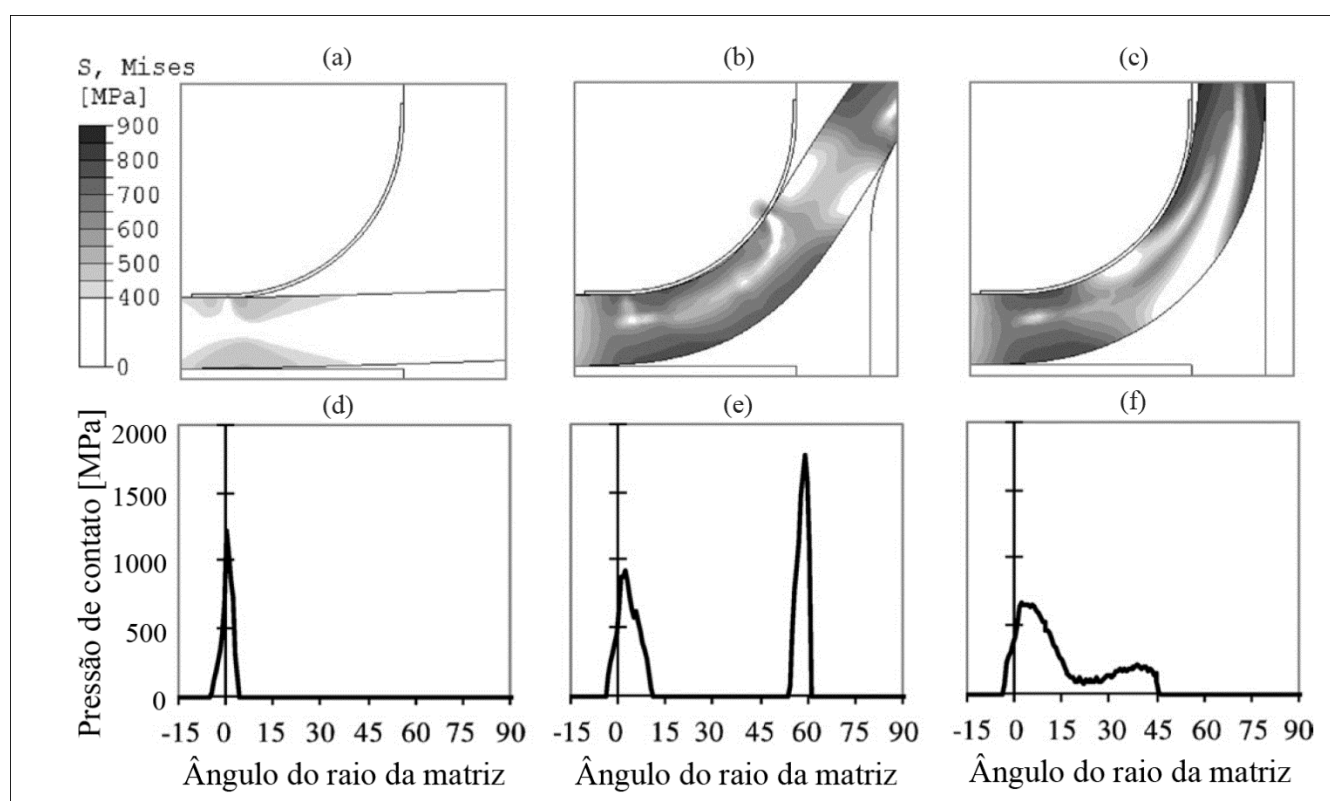


Figura 31. Resultado da simulação obtido por Pereira, Duncan *et al.* (2009). (a) tensão de Von Mises para 1,5mm (b) 9mm e (c) 50mm do deslocamento do punção. (d) pressão de contato para 1,5mm (e) 9mm e (f) 50mm do deslocamento do punção.

Pereira, Duncan *et al.* (2009) também concluíram, em seu trabalho, que o ângulo de contato entre a chapa e a matriz é inferior a 90° que é o ângulo do raio de concordância da matriz. Isso confirma a existência do efeito de desdobramento da chapa na metade do ângulo de dobra dela.

Os resultados mostrados até aqui foram todos baseados em simulação numérica por elementos finitos, porém, Coubrough, Alinger *et al.* (2002), obtiveram resultados medidos através da adição de um filme de material piezelétrico no pino do ensaio de DST. Os resultados obtidos por eles através desse filme foram em Volts, pois esse material não havia sido calibrado, porém, essa medida era

proporcional ao valor de pressão no pino. Coubrough, Alinger *et al.* (2002) fizeram dois ensaios, um com o pino livre (podendo girar livremente em torno do seu eixo) e outro com o pino estático. A figura 32 mostra a variação da pressão de contato no pino livre, enquanto que a figura 33 mostra o mesmo ensaio para o caso em que o pino permanece estático.

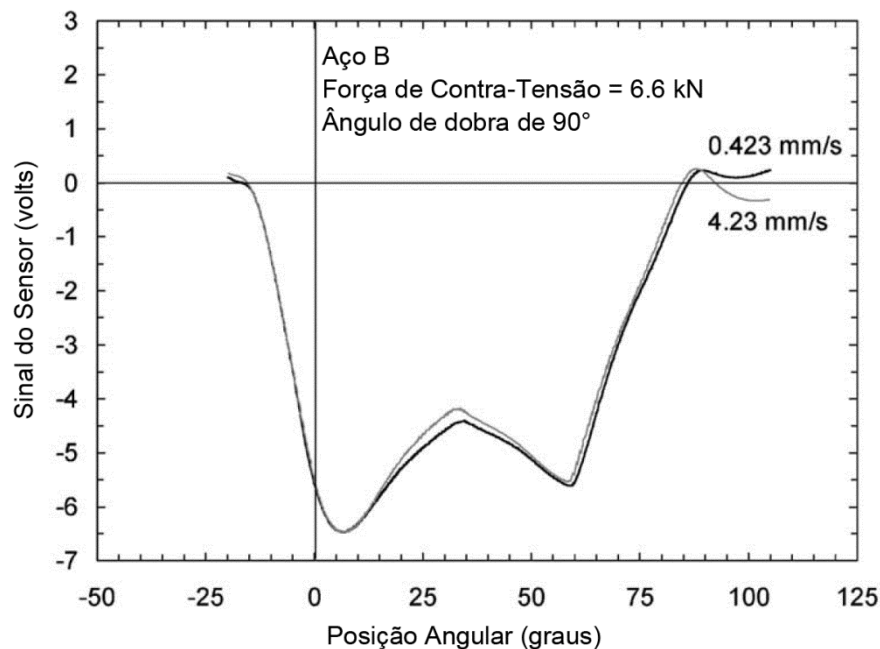


Figura 32. Resultado do ensaio de DST com um filme de material piezelétrico no pino quando esse gira livremente. Fonte: Coubrough, Alinger *et al.* (2002).

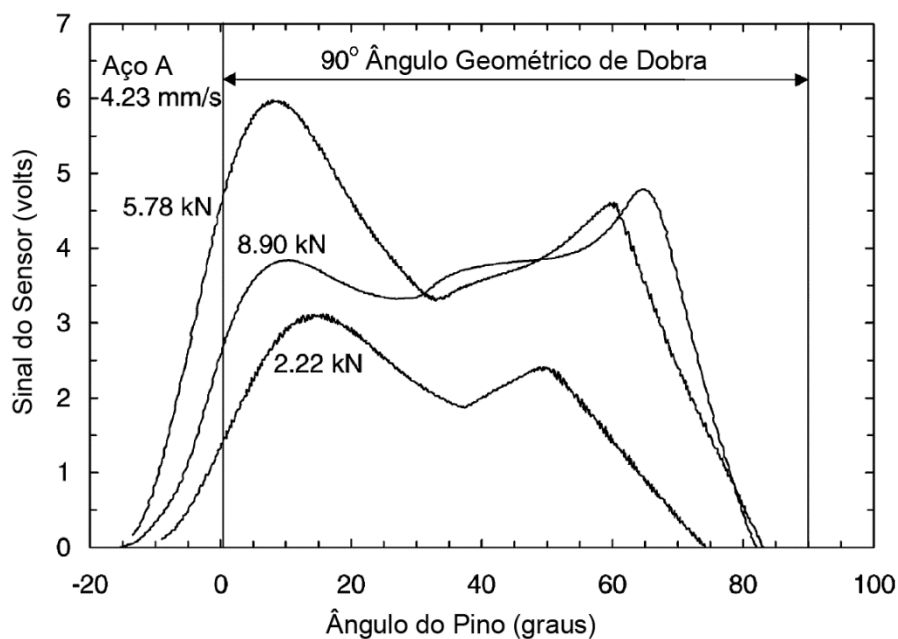


Figura 33. Resultado do ensaio de DST com um filme de material piezelétrico no pino quando esse está estático. Fonte: Coubrough, Alinger *et al.* (2002).

Na figura 33, cada curva representa uma força aplicada no sentido inverso ao movimento da chapa (força de contra-tensão). Como é possível observar, Coubrough, Alinger *et al.* (2002) obtiveram os mesmos resultados que foram simulados por Sniekers e Smits (1997); Kim, Jain *et al.* (2004) e Pereira, Duncan *et al.* (2009). Coubrough, Alinger *et al.* (2002) observaram também que o início do contato entre a chapa e o pino se dá em um ângulo anterior a tangente que a chapa faz com o pino, o que está de acordo com as simulações de Pereira, Duncan *et al.* (2009) mas não está de acordo com as simulações dos outros autores. Isso pode ser devido ao fato de que simular o ensaio DST talvez não represente bem o que acontece no caso de uma estampagem propriamente dita.

Em outro estudo, Hoffmann, Nürnberg *et al.* (2007) compararam o desgaste ocorrido no raio de concordância da matriz para 7 combinações de material da chapa e da matriz. Eles mediram o desgaste ocorrido no raio da matriz e compararam com simulações numéricas. A figura 34 mostra o resultado que eles obtiveram. Como pode ser visto, o maior desgaste ocorreu exatamente nas regiões onde a pressão de contato entre chapa e matriz apresenta altos valores e que essas regiões de maior desgaste estão localizadas em ângulos inferiores a 90°.

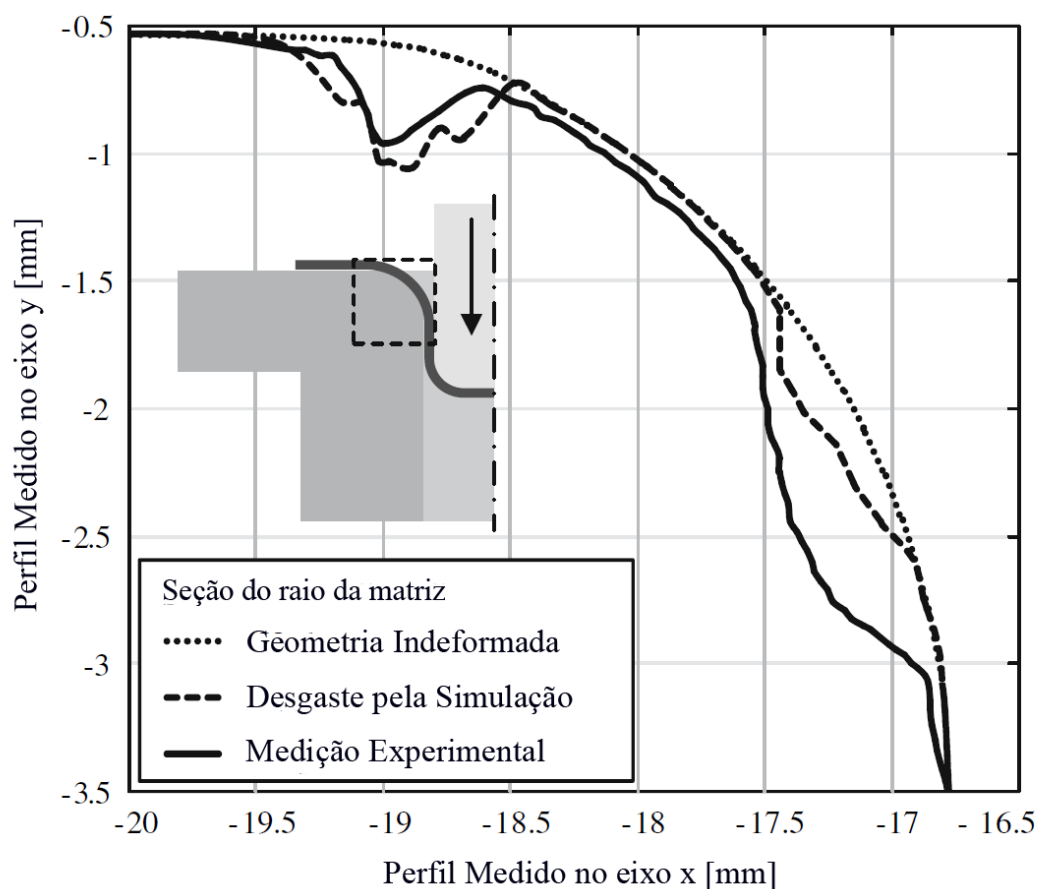


Figura 34. Resultados obtidos por Hoffmann, Nürnberg *et al.* (2007) na medição do perfil do raio da ferramenta gerada pelo desgaste da produção de 25000 peças.

2.10. Simulação numérica com coeficiente de atrito variável

Como foi demonstrado até aqui, o coeficiente de atrito, dependendo das tensões envolvidas, pode se tornar variável durante do processo de estampagem, isso é mostrado através da figura 6 e figura 7. Devido a esse fenômeno, os softwares de simulação em estampagem deveriam fazer uso desse conhecimento para melhorar seus desempenhos. Entretanto a maioria dos softwares comerciais desconsidera esse efeito. Assim, vários autores fizeram estudos para comprovar que adicionando-se uma sub-rotina no software que considera o coeficiente de atrito uma curva e não um valor apenas, os resultados são mais próximos do real.

Gearing, Moon *et al.* (2001) demonstraram primeiramente que o atrito varia segundo a pressão de contato aplicada através de um ensaio simples (figura 11). A figura 35(a) mostra os resultados obtidos. Após foi feito um modelamento matemático que considera o atrito como sendo dependente da pressão de contato para duas condições de lubrificação. Posteriormente foi feita uma comparação de quatro situações conforme figura 35(b). Foram comparados os dados experimentais com o modelo proposto pelos autores mais duas situações limites de atrito, ou seja, com atrito baixo e com atrito alto. Pela figura 35(b) é possível notar que o melhor resultado foi o modelo proposto pelos autores, que ficou mais próximo dos dados experimentais em termos de força máxima do punção.

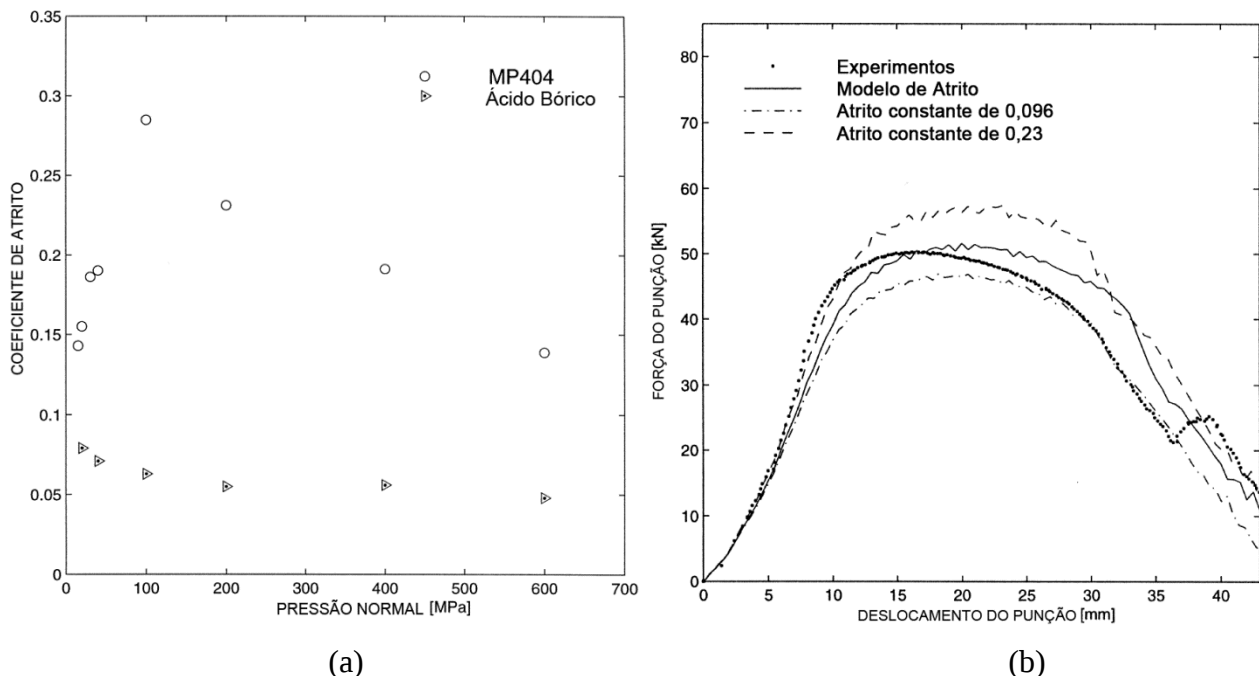


Figura 35. Resultados das simulações. (a) gráfico de coeficiente de atrito pela pressão normal para cada tipo de lubrificante. (b) comparação da força do punção medida com os modelos de atrito propostos. Fonte: Gearing, Moon *et al.* (2001).

Oliveira, Alves *et al.* (2008), de forma semelhante, levantaram uma curva de atrito dependente da pressão de contato que posteriormente foi atualizado em um software de elementos finitos para comparar com dados experimentais da estampagem de uma geometria quadrada (figura 36(a)). Nesse trabalho, além da curva de atrito (Lei de Atrito (a)), foram comparadas outras três condições de atrito, uma com valor constante de 0,10, outras com valores constantes de atrito para três regiões da chapa (Atrito por Região) que são o prensa-chapa, raio de dobra da matriz e punção e a última com uma correção da área de contato dos nós da malha durante a simulação (Lei de Atrito (b)). As figura 36(b) e figura 36(c) mostram que os melhores resultados são aqueles que fazem uso de um atrito que varia de acordo com a pressão de contato.

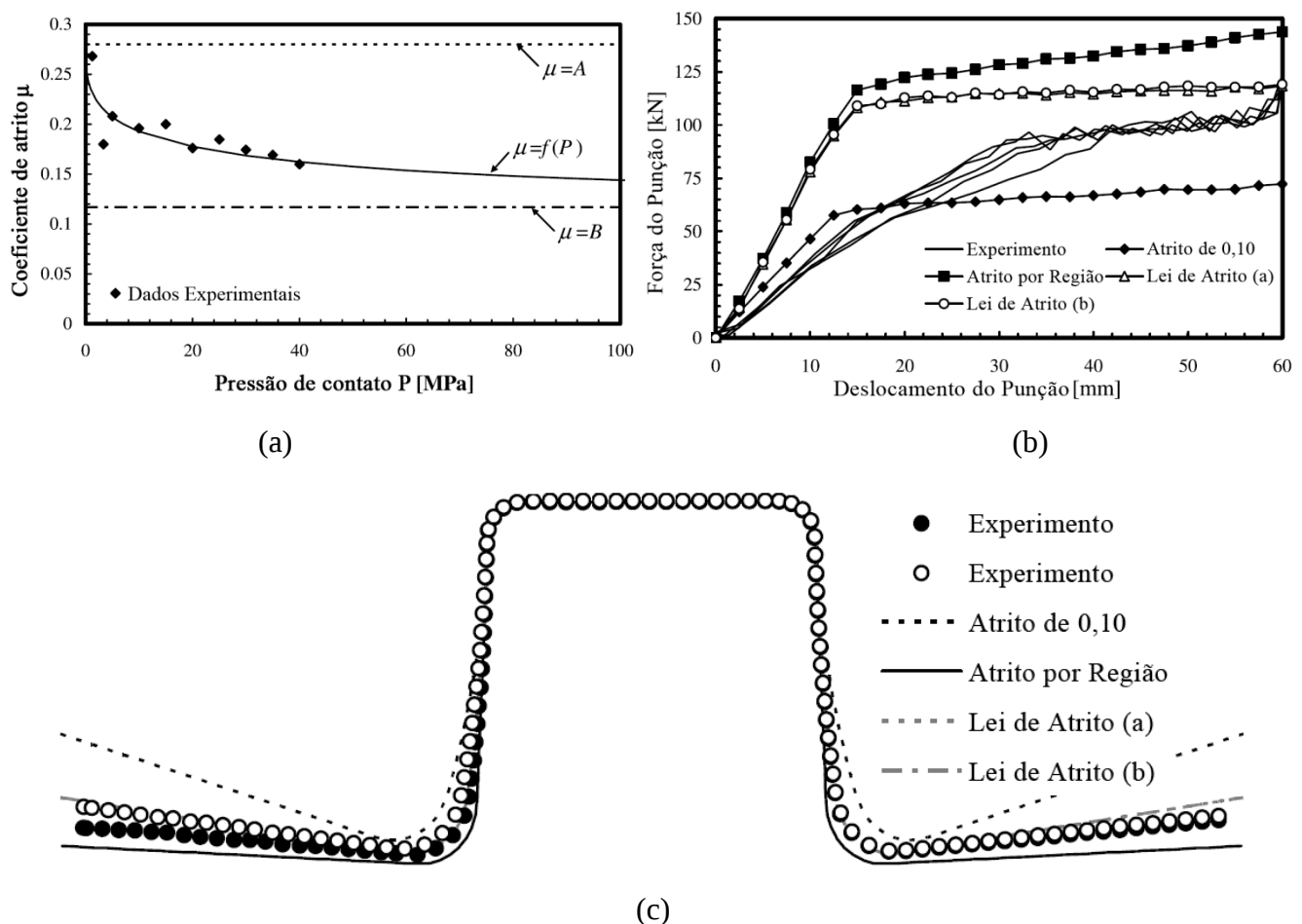


Figura 36. Resultados das simulações. (a) modelos de atrito propostos. (b) comparação dos modelos de atrito com os resultados da força do punção. (c) comparação do retorno elástico medido na chapa com os resultados da simulação. Fonte: Oliveira, Alves *et al.* (2008).

Já no trabalho de Darendeliler, Akkok *et al.* (2002) o coeficiente de atrito foi relacionado com alguns outros parâmetros tais como as rugosidades das ferramentas e da chapa, a viscosidade do

lubrificante, as velocidades de deslizamento entre as superfícies em contato, a inclinação média da asperezas das ferramentas e o coeficiente de adesão das superfícies em contato, de forma que o coeficiente de atrito em si acaba não sendo um dado de entrada mas sim um fator dependente de outros parâmetros. Os autores compararam esse modelo de atrito chamado de “modelo de atrito variável - *variable friction model (VFM)*” com a adição de um valor de atrito constante na simulação. Os resultados são mostrados nas figura 37(a) e (b) onde é possível observar que o modelo proposto previu relativamente bem o comportamento das deformações nos experimentos, porém é notado que valores médios de coeficiente de atrito também geram resultados satisfatórios em relação à previsão das deformações da chapa.

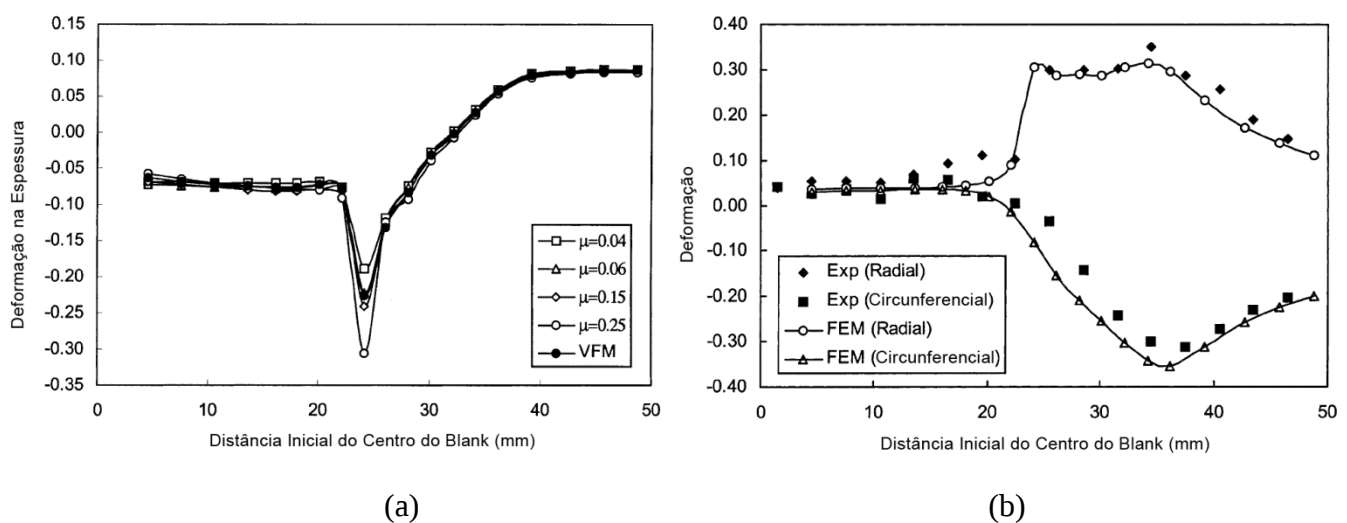
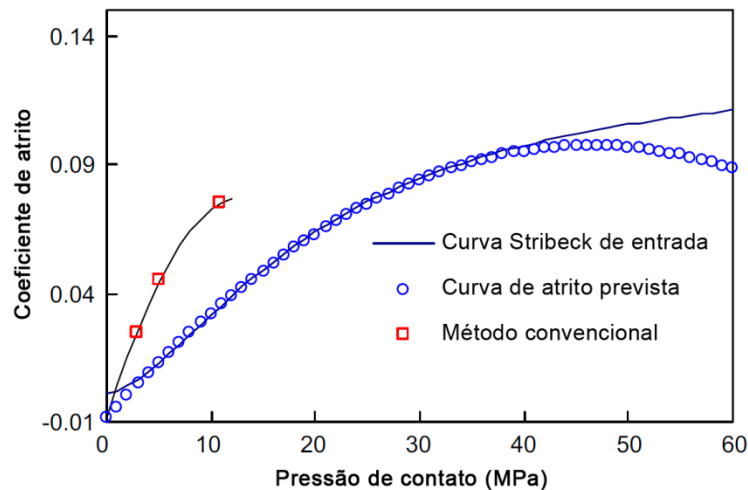
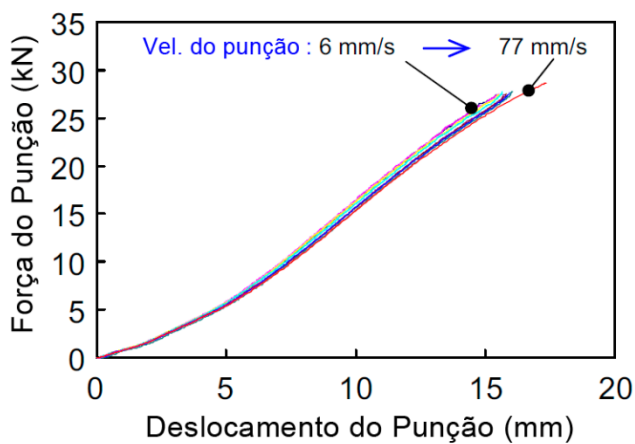


Figura 37. Resultados das simulações. (a) deformação na espessura da chapa para cada valor e modelo de atrito (b) distribuições de deformação radial e circunferencial experimentais e numéricas obtidas a 23 mm de altura copo para modelo proposto. Fonte: Darendeliler, Akkok *et al.* (2002).

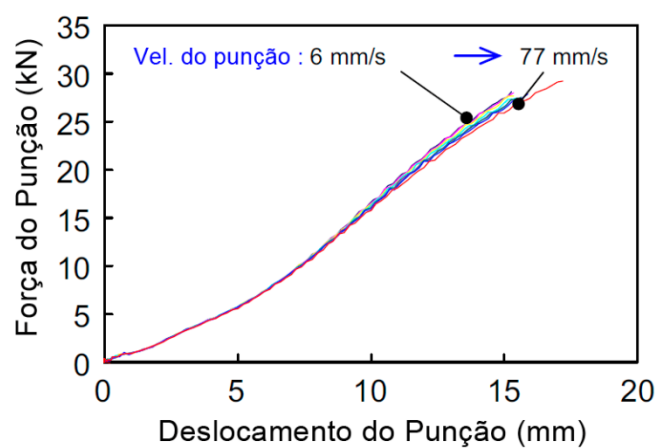
No trabalho de Kim, Jain *et al.* (2012) é obtido uma curva de atrito em relação à pressão de contato que é obtida através da curva Stribeck convencional (quadrados vermelhos da figura 38(a)) e dessa curva ajustado com os dados de um ensaio DST (círculos azuis da figura 38(a)). Essa relação da pressão de contato com o atrito é então adicionada em *software* de simulação no qual os resultados são comparados com a estampagem de um copo. A figura 38(b) e (c) mostra essa comparação, que apresenta resultados muito semelhantes, porém não é mostrado o resultado se fosse usado um valor de atrito constante.



(a)



(b)



(c)

Figura 38. Resultados das simulações feitas por Kim, Jain *et al.* (2012) (a) curva de atrito prevista em comparação com a curva de Stribeck de entrada (b) resultados dos experimentos (c) resultados da simulação.

Os estudos comentados até aqui usam um coeficiente de atrito variável que depende de outros parâmetros, porém há estudos que fazem diferentes análises sobre o coeficiente de atrito, como no trabalho de Fereshteh-Saniee e Montazeran (2003) onde a força máxima de estampagem é comparada com resultados da simulação e de equações analíticas. Nesse trabalho o coeficiente de atrito é variado como constata na simulação e nas equações analíticas e os resultados são comparados com dados experimentais. Tanto a simulação quanto as equações analíticas apresentam resultados próximos aos experimentos.

De forma semelhante Kim, Sung *et al.* (2007), fazem um estudo onde é usada a simulação numérica para avaliar a estampagem de uma geometria circular com relação ao coeficiente de atrito.

Porém, como nesse trabalho foram usados 5 lubrificantes diferentes nos ensaios, diversas análises são feitas acerca desses lubrificantes. Os resultados das simulações com os experimentos usando lubrificantes diferentes também foram próximos.

Já no trabalho de Pereira, Yan *et al.* (2008), foram feitas simulações da estampagem de uma tira reta para avaliar a pressão de contato gerada no ângulo de dobra da matriz. Nesse trabalho um dos resultados é que a pressão de contato sempre apresenta dois picos máximos correspondendo ao início e final do ângulo de dobra da matriz que é semelhante aos resultados encontrados por outros autores e descrito anteriormente desse trabalho. Entretanto um resultado obtido no trabalho de Pereira, Yan *et al.* (2008) (mostrado na figura 39) é que a pressão máxima após o punção se deslocar o suficiente (depois de deslocado 17mm na figura 39), para três coeficientes de atrito diferentes é a mesma, ou seja, a pressão máxima não é influenciada pelo atrito. Essa influencia só ocorre na região antes de 17mm de deslocamento. Essas duas regiões, antes e depois de 17mm, o autor chama de “região transiente” e “região estável”, respectivamente.

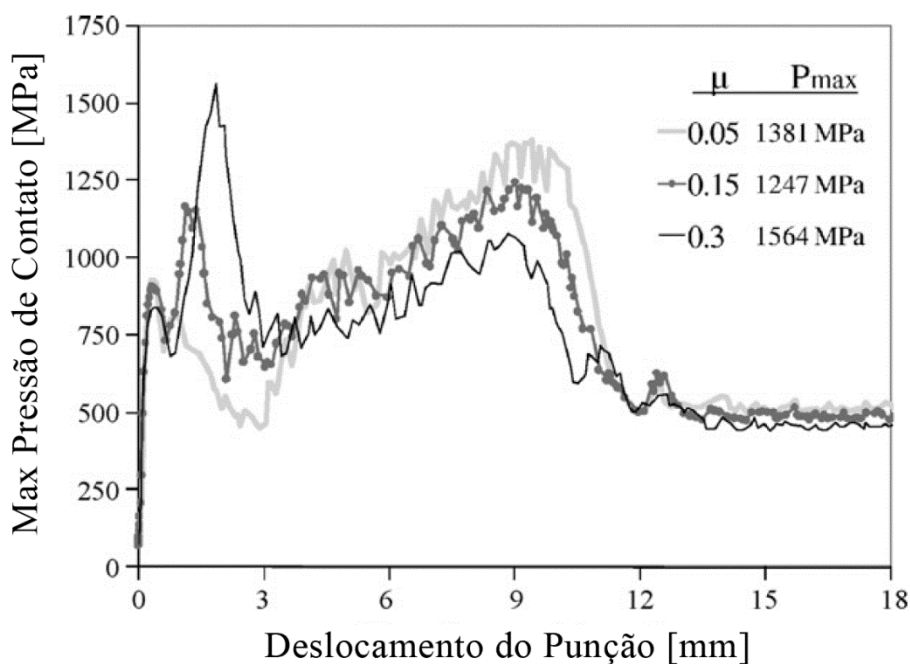


Figura 39. Evolução da máxima pressão de contato sobre o raio da matriz para a região transiente para diferentes valores do coeficiente de atrito. Fonte: Pereira, Yan *et al.* (2008).

2.11. Pesquisas recentes sobre coeficiente de atrito em estampagem

Nos últimos 2 anos (desde 2010), os trabalhos relacionados com o tema principal dessa tese foram focados em outras análises, diferentes das analisadas nessa tese, mas que são relevantes para a área. Abaixo é feito um apanhado dos estudos mais atuais relacionados ao estudo do coeficiente de atrito em estampagem.

Berglund, Brown *et al.* (2010) fizeram um estudo sobre a correlação do coeficiente de atrito com a textura superficial gerada em um ensaio DST em que a textura variada foi no pino. Eles estudaram vários parâmetros de definição de superfície segundo a norma ISO e concluem no final que o que mais influencia o atrito, de modo geral, é a quantidade e forma das depressões da superfície. Isso está de acordo com estudos anteriores que mencionam que quanto melhor a capacidade da superfície armazenar lubrificante nas suas depressões, ou seja, com “bolsões de lubrificantes”, menos atrito será gerado, uma vez que a quebra da camada do filme do lubrificante ocorrerá em pressões mais altas. Nilsson, Olsson *et al.* (2010) fizeram esse mesmo estudo, mas aplicaram a textura na chapa e descobriram que se a chapa for tratada superficialmente para aumentar o número de micro cavidades que podem armazenar “bolsões de lubrificantes”, o potencial de estampabilidade do material da chapa aumenta bastante. No entanto, um estudo comparando a aplicação dos tratamentos de superfície tanto na chapa quanto nas matrizes para verificar qual seria o mais eficaz ainda não foi feito.

Chandra Mohan Reddy, Ravindra Reddy *et al.* (2010) fizeram um estudo onde foi comparado estampabilidade de uma liga de alumínio com o aumento do coeficiente de atrito através de simulação numérica. Eles usaram o *software* LSDYNA e concluíram que quanto menor o coeficiente de atrito, maior a estampabilidade do material, o que é relativamente óbvio, uma vez que o atrito afeta diretamente o escoamento do material da chapa para dentro da matriz. Da Silva, Button *et al.* (2010) avaliaram a influência da lubrificação na estampagem de uma chapa espessa (3,5mm) através de simulação. Eles avaliaram também através de análise estatística a influência de vários parâmetros, como o raio da matriz e o diâmetro da geratriz na possibilidade de ocorrência de falhas na peça. Eles concluíram que a lubrificação não influencia na ocorrência de falha na peça. Isso provavelmente ocorreu porque em uma chapa espessa, as tensões são maiores que em uma chapa fina e isso aumenta a probabilidade da ocorrência da quebra da camada do filme de lubrificante, inutilizando o mesmo. Olsson, Bay *et al.* (2010) usaram a força necessária para tirar uma peça cilíndrica de dentro das ferramentas como parâmetro para avaliar o atrito e a lubrificação na interface e concluíram que esse dado é mais eficiente para indicar a qualidade do lubrificante que a medição da força do punção na estampagem principalmente quando ocorre adesão severa de material da chapa na matriz ocasionada pela quebra da camada do filme de lubrificante. A medição da força no punção durante a estampagem

já foi usada por alguns autores para avaliar a qualidade do lubrificante, como no trabalho de Kim, Sung *et al.* (2007), no entanto eles avaliaram os lubrificantes para uma peça estampada apenas, e no trabalho de Olsson, Bay *et al.* (2010) foram avaliadas 10 peças, o que tem a tendência a aumentar a chance de ocorrer adesão severa de material e assim evidenciando melhor a qualidade do lubrificante.

De Souza e Liewald (2010) fizeram um estudo sobre o desgaste e o atrito gerado na produção de peças com o uso de matrizes poliméricas na obtenção de pequenos lotes ou protótipos. O estudo deles foi focado na medição do atrito e desgaste com três tipos de aço e dois tipos de poliuretanos. O trabalho é focado em desenvolver um equacionamento que descreva bem o comportamento do par de materiais polímero/metal em relação ao desgaste e atrito. No entanto, uma conclusão interessante foi que a chapa de aço que gerou o menor atrito e desgaste foi exatamente aquela de maior resistência, o que deveria ter sido ao contrario. Isso ocorreu porque a superfície dessa chapa continha um formato que facilitava a deposição de lubrificante e “bolsões” e isso, segundo os autores, formavam uma almofada que diminui o contato entre as superfícies. Isso está de acordo com os trabalhos mencionados acima, em que o objetivo é melhorar a capacidade da superfície em reter lubrificante, porém isso não foi o objetivo do trabalho deles.

Franzen, Trompeter *et al.* (2010) fizeram uma análise do comportamento tribológico de chapas submetidas a um ensaio de atrito plano com matrizes recobertas por pulverização térmica que foram submetidas a um polimento através de conformação com uma esfera. O objetivo desse trabalho era obter superfícies que diminuíssem as forças tribológicas nas ferramentas de conformação de chapas. Eles testaram dois níveis de pressão de conformação da superfície da chapa, dois níveis de pressão de contato no ensaio de atrito plano e duas velocidades e compararam com uma chapa não recoberta. Eles concluíram que o menor atrito gerado foi, em primeiro lugar, para a menor pressão na chapa não recoberta, devido a sua baixa rugosidade, mas não explicam bem porque isso ocorreu e em, segundo lugar, para a chapa com maior pressão de conformação da superfície com a maior pressão de contato. Eles atribuíram esse resultado a maior capacidade da chapa de armazenar lubrificante em “bolsões”, já que o recobrimento apresenta poros, o que está de acordo com os estudos mencionados acima. Szakaly e Lenard (2010) usaram o mesmo ensaio de atrito plano, porém se detiveram em analisar o efeito de parâmetros de estampagem como a velocidade, rugosidade das matrizes e das chapas e pressão de contato gerado durante o processo. Eles chegaram ao resultado que quanto maior a velocidade e a pressão de contato, menor o atrito e, também, que existe uma rugosidade ideal para o atrito ser baixo. Esses resultados estão de acordo com as literaturas já escritas sobre o assunto. Os autores explicam bem o porquê de o atrito diminuir com a velocidade de deslizamento mas não fazem o mesmo para a pressão de contato. Azushima, Uda *et al.* (2012) usaram o ensaio de atrito plano para analisar o comportamento

tribológico de chapas de alumínio recobertas em condições de estampagem à quente (720°C) com lubrificante a base de água e a seco. No estudo, foi variada a rugosidade das matrizes em três níveis (0,07; 0,2 e 0,5µm de Ra). Eles constataram que quando o ensaio é feito a seco, o coeficiente de atrito permanece constante, em torno de 0,55, devido à adesão de alumínio nas matrizes, fazendo com que a chapa deslize sobre o próprio alumínio aderido. No entanto, para o ensaio com lubrificante, eles constataram que o atrito teve um valor mais baixo para a rugosidade de 0,2µm, ficando mais alta para as outras. Os autores atribuem esse efeito ao lubrificante que consegue ser preso em “bolsões” nas micro cavidades da rugosidade do material que é mais pronunciado para uma rugosidade intermediária. Tanto no ensaio a seco como no lubrificado, houve adesão de alumínio nas matrizes, porém no último, a camada aderida foi mais uniforme. Já Dörr e Liewald (2012), através do mesmo ensaio, analisaram as deformações e a porcentagem da área de contato das asperezas da superfície da chapa em relação ao aumento da pressão de contato. Com isso, eles determinaram qual o grau de contato real entre as asperezas das superfícies para cada pressão aplicada. No entanto, eles fizeram essa análise sem movimentar as superfícies (ensaio estático), o que pode gerar distorções em relação ao caso de uma estampagem real, mas os próprios autores recomendam mais estudos sobre o assunto adicionando uma análise com movimento relativo entre matriz e chapa. Yang (2010) se deteve em analisar um conjunto de equações propostas para deixar a simulação numérica mais precisa na previsão dos resultados. O principal parâmetro de estudo foi a previsão da espessura da camada de lubrificante ao longo do processo de estampagem de um copo e adição dessa na simulação. Nos resultados, o pesquisador constatou que a simulação ficou muito próxima aos dados experimentais. No entanto, o pesquisador não comparou os próprios resultados com uma simulação sem o equacionamento proposto e com isso fica difícil dizer se há muito desvio em relação às simulações tradicionais.

Guo, Gong *et al.* (2010) analisaram o efeito do coeficiente de atrito quando as dimensões da chapa são reduzidas em escala. O objetivo desse trabalho foi determinar a influência que o atrito gera na conformação quando as dimensões são reduzidas até o caso de microconformação. Os autores constataram que o coeficiente de atrito aumenta com a diminuição das dimensões da chapa para as chapas lubrificadas e que quando a chapa não é lubrificada o atrito permanece constante. Os pesquisadores atribuem esse efeito ao início do processo que forma um desgaste em forma de “onda” devido ao aumento da pressão de contato, facilitando o escape do lubrificante para as bordas da chapa quando as dimensões são pequenas. Isso faz com que haja contato metal/metal sem lubrificante, se aproximando, então, do caso a seco. No entanto, os autores não avaliam se a rugosidade, tanto da chapa, quanto das matrizes influenciam o atrito para pequenas dimensões.

Hoon Kim, Hyun Sung *et al.* (2010) e Kim, Sung *et al.* (2011) usaram o ensaio DST para simularem os tipos de defeitos que podem ocorrer em uma estampagem convencional de aços de alta

resistência. Eles mencionam nos artigos que as simulações com *softwares* convencionais não são capazes de prever com precisão a falha do material para esses tipos de aços. Para isso, eles propuseram um modelo que contabiliza a temperatura proveniente do encruamento, a taxa de deformação e a temperatura de amaciamento do material, batizado como modelo termomecânico. Nos resultados, eles concluíram que para aços de alta resistência o modelo proposto se adaptou melhor que os modelos convencionais. O *software* de simulações usado foi o Abaqus.

Hou, Yu *et al.* (2010) e Pereira, Yan *et al.* (2010) se concentraram no estudo do desgaste (adesão) gerado em estampagem de chapas. Hou, Yu *et al.* (2010) constataram, através de simulação, que a região do raio de dobramento da matriz é onde ocorre o maior aumento da pressão de contato e temperatura durante a estampagem e, por isso, é a região onde a adesão inicia. Essa, por sua vez, aumenta com o aumento da força do prensa chapas e da rugosidade da matriz. Pereira, Yan *et al.* (2010), no entanto, se concentraram em analisar o desgaste diretamente no raio de dobramento da matriz e constataram que o maior desgaste ocorre no início do raio de dobramento, devido a alta pressão de contato presente nessa região e que é maior que em qualquer outra. Isso mostra que essa região deve ser de maior preocupação para minimizar o desgaste.

Sanchez (2010), usou o ensaio DST para avaliar o retorno elástico de uma chapa de aço e de alumínio. Ele propôs um modelo analítico para prever o retorno elástico das chapas considerando efeitos como taxa de deformação e efeito Bauschinger. Ele constatou que o modelo proposto previu com boa aproximação as forças submetidas a chapa, mas divergiu bastante com relação ao raio de curvatura após o descarregamento da chapa de aço. Ele atribuiu isso ao coeficiente de atrito que não foi medido, mas sim estimado. Entretanto, o autor poderia ter feito um cálculo simples e achado esse atrito, já que ele tinha valores experimentais do ensaio DST.

Os ensaios usados atualmente se concentram em estampar uma peça cilíndrica ou no ensaio DST, no entanto, o ensaio de pino em disco ainda é usado como no caso do estudo de Eriksson e Olsson (2011) e onde é avaliado o desgaste dos pinos com diferentes recobrimentos. Eles constataram que o recobrimento de Carboneto de Cromo (CrC/C) juntamente com um substrato mais duro no pino conseguem manter o coeficiente de atrito estável mesmo para grandes deslocamentos do disco. O ensaio de pino em disco é bastante utilizado para verificar rapidamente o desempenho de recobrimento quanto ao atrito, e principalmente, quanto ao desgaste pela própria simplicidade do ensaio. No entanto, o pino sempre passa pelo mesmo lugar da chapa e isso não é o que acontece na indústria onde a chapa sempre é renovada quando uma nova peça é feita, o que permanece a mesma é a matriz. Nesse sentido o ensaio DST é mais realista. Menezes, Kishore *et al.* (2011) usaram o mesmo ensaio de pino em disco para avaliar vários tipos de acabamentos superficiais, ou mais precisamente, texturas superficiais da chapa em que a rugosidade média R_a permaneceu em valor fixo. Eles constataram que a melhor

superfície, ou seja, a que menos gera atrito é aquela que apresenta picos mais dispersos. Esse tipo de superfície apresenta uma baixa área real de contato com a matriz e, portanto, consegue armazenar mais lubrificante em seus vales, no entanto, não foi exatamente essa a explicação dada pelos autores.

Há, também, autores que fazem estudos relacionando dois ensaios de atrito diferentes, como é o caso de Figueiredo, Ramalho *et al.* (2011) onde o objetivo é compará-los. Nos resultados, eles concluem que os coeficientes de atrito ficam próximos embora os ensaios sejam muito diferentes entre si pois um ensaio é aplicado em uma área de contato e o outro em um ponto apenas, o que torna difícil uma comparação. Outro resultado é que o coeficiente de atrito aumenta com o aumento da rugosidade devido ao atrito abrasivo, que já havia sido comprovado em outros estudos.

Outros pesquisadores se concentraram em analisar, através de simulação e por ensaios, as respostas de desgaste e pressão de contato diretamente no raio de dobramento da matriz como é o caso de Wang e Masood (2011) e Pereira, Yan *et al.* (2012). Wang e Masood (2011) analisaram o efeito do formato do raio de dobramento da matriz na distribuição da pressão de contato e do desgaste. Eles concluíram que o perfil do raio da matriz tem um impacto enorme no desgaste e pressão de contato e que esses podem ser bastante reduzidos dependendo do formato aplicado. No final, os autores sugerem mais estudos para outros formatos não analisados, mas que podem reduzir ainda mais o desgaste na matriz. Pereira, Yan *et al.* (2012) se concentraram em estudar como o desgaste ocorre no raio de dobramento da matriz e constataram que o maior desgaste ocorre no início do raio. No entanto, eles fizeram todos os testes sem lubrificante, o que não é muito representativo da realidade da indústria, onde quase todo processo de fabricação por estampagem faz uso de lubrificante. Já no trabalho de Groche, Kloepsch *et al.* (2012), o objetivo foi minimizar o atrito no raio de dobramento através da injeção de lubrificante diretamente nessa região através de furos na matriz, durante a conformação da chapa. Eles constataram que nessas condições a força de estampagem total pode ser reduzida em até 14%. Isso seria semelhante a reduzir o atrito no raio da matriz à praticamente zero. Os autores ainda constatarem que a maior redução da força total de estampagem se dá em condições mais favoráveis como um raio de dobramento alto e uma força do prensa-chapas baixa. No entanto, os autores poderiam ter feito um ensaio com uma matriz maior, que em condições normais iria falhar, para ver se o método proposto faria uma peça sem falha por ruptura, constatando assim, um aumento de estampabilidade da chapa. Há, também, estudos que se concentram em analisar o efeito do perfil de rugosidade das superfícies em contato no atrito e desgaste, como no caso do estudo de Hol, Cid Alfaro *et al.* (2012). Eles propuseram um modelo matemático para calcular o atrito gerado durante a estampagem de uma peça, no qual são considerados os efeitos da mudança da textura superficial da chapa gerados pelo aumento da área de contato entre as asperezas das superfícies. Ou seja, eles desenvolveram um modelo de atrito que contabiliza a mudança de textura da superfície na escala micro e a sua influência sobre o

comportamento de atrito sobre na escala macro. Nos resultados de uma simulação sem o modelo proposto é constatado que o atrito varia segundo apenas a pressão de contato, porém na simulação com modelo proposto o atrito apresenta uma variação maior e é influenciado mais pela deformação plástica que pela pressão de contato, fazendo com que os maiores valores sejam em regiões diferentes das visualizadas sem a aplicação do modelo. Esses resultados são muito interessante e podem explicar e prever muitos defeitos que ocorrem durante uma estampagem, no entanto, no artigo deles não foi feita nenhuma comparação com um estampagem real, o que seria de grande importância para validar o modelo deles.

Em quase todos os trabalhos pesquisados fica evidente que os pesquisadores estão fazendo esforços para aumentar os conhecimentos sobre o fenômeno de atrito em estampagem e, também, que há muitos esforços para entender o que ocorre na interface matriz/peça em nível microscópico. Uma informação que se repete em praticamente todos os estudos é que o formato das superfícies em contato tem uma influência forte no atrito, ou mais precisamente, que as superfícies devem ter um formato tal que consigam armazenar o lubrificante em micro cavidades (“bolsões”) para que o mesmo sempre consiga manter uma interface de separação entre as superfícies em contato.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Ensaios para obtenção das propriedades mecânicas do material

Os ensaios tecnológicos, atualmente assumiram dois papéis bem definidos. Primeiro e para o caso específico da área de fabricação em estampagem, servem para estimar a capacidade de conformação mecânica nas etapas de produção bem como para se ter conhecimentos a cerca de suas propriedades para comparar com outros materiais. Segundo, para serem adicionados em programas de simulação que fazem uso das suas propriedades para os cálculos iterativos. Aqui será mostrado o uso das propriedades para o segundo caso, onde se fez uso de um software de simulação em estampagem. O material que foi usado no presente trabalho é o alumínio comercialmente puro Al 1100.

3.1.1. Ensaio de tração

Conforme as normas ABNT NBR 6152 e DIN EM 10002, foi realizado o ensaio de tração em uma máquina de ensaios universal para se obter a curva de escoamento do alumínio. Foram realizados três ensaios válidos para 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação. Com esses dados do ensaio de tração é possível obter a curva de escoamento do material. Como geralmente a curva de tração

apresenta um limite de deformação baixo, ou seja, o corpo de prova colapsa com uma deformação baixa, que no caso do alumínio foi de 2,5 %, o restante da curva é extrapolado através do cálculo de uma aproximação matemática que foi concebida por Hollomon em 1945.

Essa aproximação é usada para se definir matematicamente a curva de escoamento (ver equação (17)) onde os coeficientes n (grau de encruamento) e C (coeficiente de resistência) são obtidos para cada direção de laminação. A Figura 40 mostra a curva de escoamento juntamente com a extrapolação.

$$kf = C \cdot \varphi^n \quad (17)$$

onde kf representa a tensão de escoamento na curva.

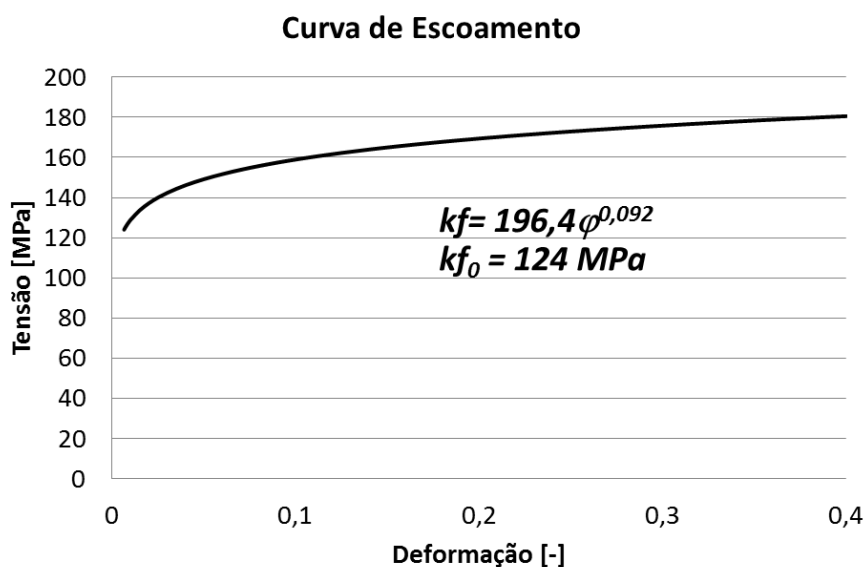


Figura 40. Curva de escoamento do material Al 1100, obtida através do ensaio de tração.

Os coeficientes n e C são mostrados na tabela 1 para cada direção de laminação juntamente com a sua média.

Tabela 1. Coeficientes n e C para cada direção de laminação da chapa com a média entre elas.

Direção de laminação	C	n
0°	193,7	0,093
45°	195,9	0,092
90°	199,6	0,092
Média	196,4	0,092

3.1.2. Índice de anisotropia

Através da norma ABNT NBR 8164, foi determinada a anisotropia normal do alumínio com três ensaios válidos para 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação da chapa. A Tabela 2 mostra os valores médios de três ensaios válidos para cada direção de laminação.

Tabela 2. Índice de anisotropia r para cada direção de laminação.

Direção	0°	45°	90°
Anisotropia	0,82	0,76	0,81

3.1.3. Curva limite de conformação (CLC)

Para o ensaio Nakajima utilizou-se um punção do tipo hemisférico com raio de 50mm. Com o objetivo de reduzir o atrito utilizou-se uma almofada de POLIURETANO com 6mm de espessura. Os ensaios para a determinação da curva limite de conformação (CLC) do alumínio (AL1100) foram baseados no trabalho desenvolvido por Silveira em 2004. Na figura 41 é mostrada a curva limite de conformação (CLC) resultante do ensaio Nakajima.

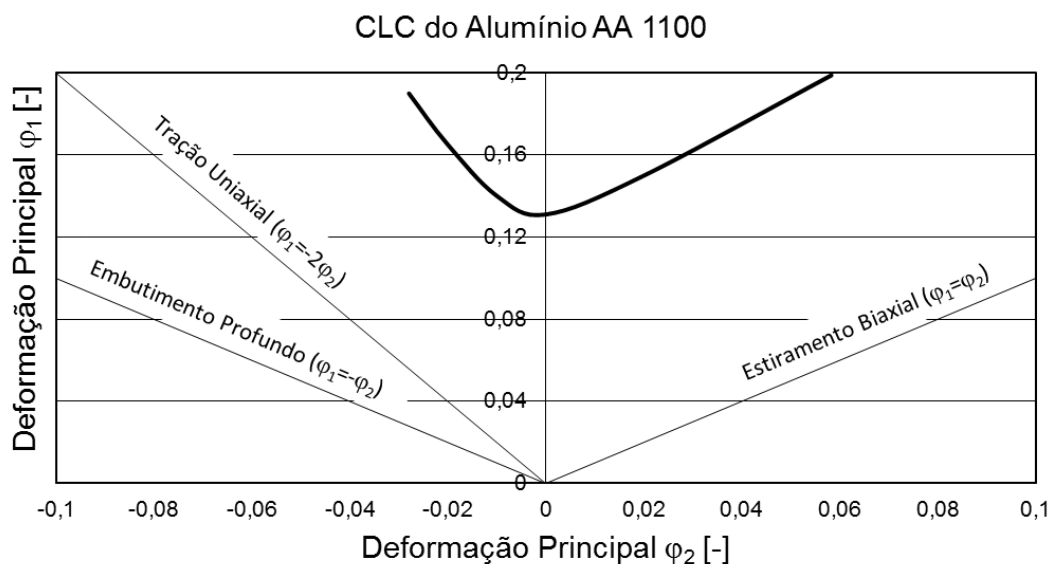


Figura 41. Curva limite de conformação do alumínio AA 1100.

Os resultados dos ensaios obtidos nesse trabalho foram comparados com o trabalho de Ghazanfari e Assempour (2012) que propôs um modelo de cálculo matemático da CLC baseado no modelo Marciniak–Kuczynski (M–K) sem a necessidade de medições experimentais. Para validar o

modelo, os autores levantaram uma série de dados experimentais de outros artigos e que serviu de comparação para o presente trabalho. Pela Tabela 3 é possível observar que o índice de anisotropia está na mesma ordem de grandeza do material Al 1100 [32] e que um valor de n baixo corresponde a um valor de FLD_0 também baixo. Os valores de FLD_0 são obtidos quando Curva Limite de Conformação intercepta o eixo vertical. Para o presente trabalho esse valor foi de 0,13 que é próximo ao material AA3003-H16.

Tabela 3. Dados coletados para materiais típicos em processos de conformação mecânica. Fonte: Ghazanfari e Assempour (2012).

Material	t (mm)	n	r	FLD_0^a
Al-1.25Mn AR85 [44]	1.4	0.032	1*	0.10
Al 1100 [32]	1*	0.04	0.75	0.05
Al-1.25Mn SR85 [44]	1.4	0.062	1*	0.18
DX 53D [35]	1	0.154	1.515	0.265
ZStE 340 [35]	1.25	0.165	1.076	0.253
Al 5182 [38]	1	0.17	0.685	0.17
AA3003-H16 [37]	0.7	0.173	0.603	0.155
Al 5754 [38]	1	0.177	0.775	0.17

3.2. Análise De Estampabilidade Do Material – Ensaio Swift

Para as medições práticas, foram usadas as ferramentas do ensaio Swift (Mielinik, 1991). Este ensaio mecânico simula o embutimento profundo em estampagem, pois há tensões trativas no sentido radial e compressivas no sentido circunferencial do corpo de prova, ambas iguais em módulo. Basicamente o conjunto de ferramentas utilizado para o ensaio Swift é composto por um punção cilíndrico, prendedor de chapas e matriz (Silveira Netto, 2004). As dimensões são mostradas na figura 42 e uma representação em perspectiva pode ser observada na figura 43. Podem-se utilizar corpos de prova (CP's) cilíndricos de vários diâmetros que são restringidos em uma prensa de duplo efeito pelo prensa chapas em forma de anel, o punção é então forçado contra os CP's provocando o embutimento, isto é, a chapa é forçada para dentro da matriz até que o material seja todo embutido. A principal função do prensa chapas, nesse caso, é de impedir o enrugamento, mas não o movimento da chapa. Esse ferramental foi usado no presente trabalho pois a folga entre o punção e a matriz superior é a ideal para a estampagem de uma chapa de alumínio de 1mm de espessura.

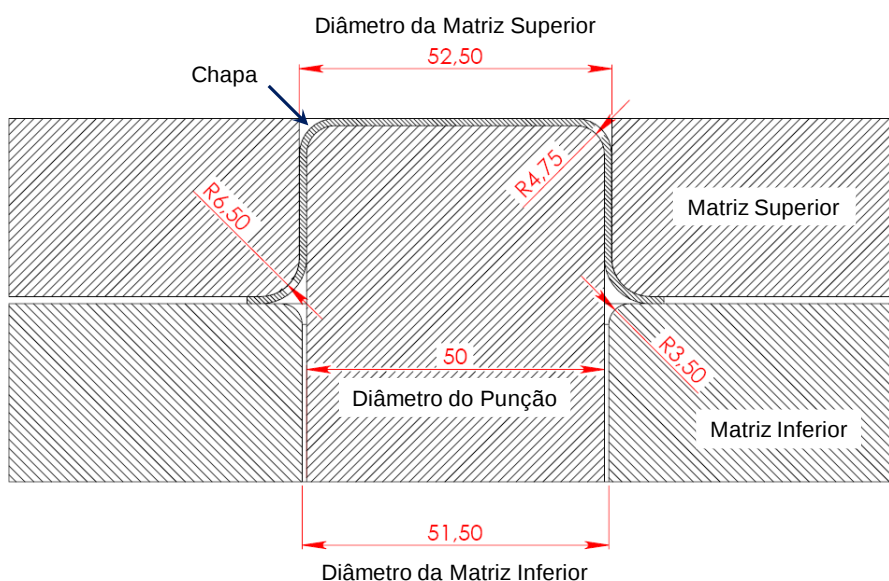


Figura 42. Vista em corte do ferramental do ensaio de estampagem.

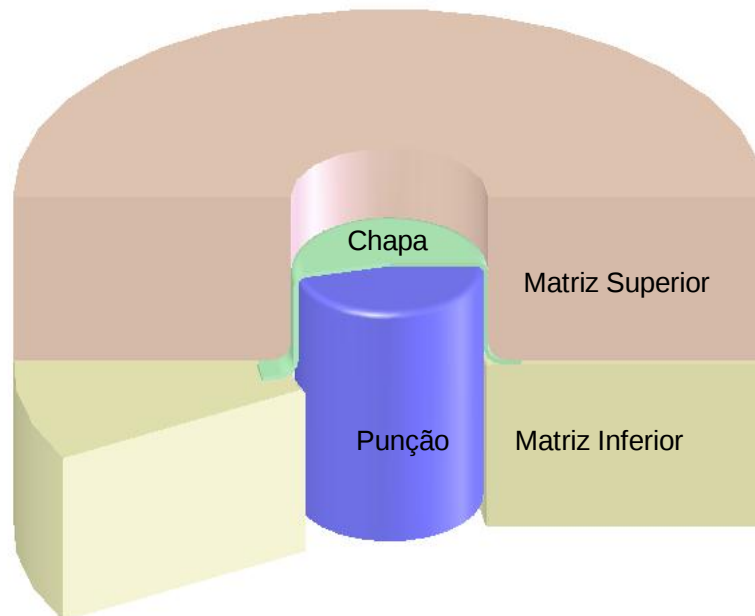


Figura 43. Representação em perspectiva do ensaio de estampagem.

Para esse ensaio foi usado uma célula de carga com capacidade de 178kN para medir a força que o punção exerce na chapa e um transdutor de deslocamento do tipo LVDT para medir o deslocamento das matrizes. No caso específico da máquina que foi usada, a estampagem não é feita pelo punção, mas sim pelas matrizes que se deslocam, sendo que o primeiro permanece parado. A matriz superior é acoplada no cilindro superior, e nesse é acoplado o LVDT, e a matriz inferior, ou prensa chapas é acoplado no cilindro inferior. A máquina usada para isso foi uma prensa hidráulica de duplo efeito da marca Dan Presse, com capacidade de 178kN (53kN no cilindro inferior).

3.3. Condições superficiais utilizadas

Como foi mencionado anteriormente, um dos objetivos desse trabalho é avaliar o comportamento dos lubrificantes empregados assim como o acabamento das superfícies com relação ao coeficiente de atrito. Para tanto, foi usada uma metodologia que consiste na aplicação de lixas específicas nas matrizes superior e inferior (prensa chapas) juntamente com a aplicação de lubrificantes de uso comercial para embutimento profundo e estiramento. Os acabamentos superficiais e os lubrificantes foram os únicos parâmetros variados nas medições, permanecendo assim, os outros parâmetros constantes.

3.3.1. Aplicação das lixas

As lixas utilizadas para esse estudo possuíam granulometrias de 220, 400, 600 e 1200. A metodologia de aplicação consistiu em adaptar as matrizes em um torno mecânico de usinagem com velocidade de giro constante na placa do torno (“castanha”). As aplicações das lixas foram feitas de dentro para fora das matrizes em apenas uma única passada e lento o suficiente para assegurar uma mudança visível na textura do acabamento. Para eliminar os acabamentos anteriores, as lixas foram passadas em sequência, da maior granulometria para a menor, ou seja, se era necessário a aplicação da lixa 600, antes, era aplicado às lixas 220 e 400 em sequência.

Foram avaliadas, para esses acabamentos, as rugosidades médias (R_a) e máximas (R_{max}) das superfícies após a aplicação de cada lixa final de acordo com a norma ISO. Os resultados são mostrados na tabela 4 em μm para uma média de 5 medições. O parâmetro “cut off” adotado foi de 0,8mm.

Tabela 4. Rugosidades medidas para cada acabamento.

Lixas	1200		600		400		220	
Rugosidades	R_a	R_{max}	R_a	R_{max}	R_a	R_{max}	R_a	R_{max}
Matriz superior	0,20	2,36	0,18	2,20	0,32	2,98	0,32	2,56
Matriz inferior	0,30	2,38	1,77	7,82	0,20	2,18	0,27	2,64

Através da tabela 4 pode-se observar que as rugosidades medidas em todos os acabamentos aplicados ficaram com valores muito próximos. Isso está de acordo com a literatura, uma vez que para os valores de R_a entre 0,4 e 0,2 μm têm-se acabamentos que vão desde a usinagem convencional até a operação de polimento. Entretanto, para a lixa de 600, observou-se que as rugosidades da matriz inferior ficaram com valores muito altos e isso se refletiu nas medições das curvas Força VS. Deslocamento que ficaram com valores acima dos medidos para a lixa de 400, o que é incoerente e difere do restante dos resultados. Esses valores se devem, provavelmente, a algum erro na aplicação das lixas que resultou em um acabamento indesejado. Para tanto, as análises referente à lixa de 600 foram desconsideradas do presente trabalho.

As rugosidades R_a e R_{max} , medidas no punção, foram de 0,11 e 1,46 μm respectivamente e não houve a aplicação de nenhuma lixa, ou seja, esses valores permaneceram constantes durante todas as medições. Isso foi feito devido ao fato de que, para a geometria utilizada, o punção entra em contato com a chapa apenas no centro da mesma, onde há praticamente nenhuma deformação da chapa e o deslizamento entre as superfícies é quase zero.

3.3.2. Lubrificantes utilizados

Os lubrificantes utilizados para os ensaios práticos são de uso comercial e de base mineral e seus nomes serão ocultados, pois os fabricantes não autorizaram a publicação dos mesmos. Sendo assim, para poder serem diferenciados foi adotado a seguinte nomenclatura: lubrificantes F, L, O e S. Os lubrificantes foram aplicados em todas as condições superficiais (todas as lixas).

Além desses lubrificantes comerciais, foram testados ainda dois outros lubrificantes, graxa de máquinas, de uso comercial e uma folha de teflon de 0,09mm de espessura. Outra condição avaliada foi a seco, ou seja, sem lubrificação e com a aplicação da lixa 1200.

A metodologia de aplicação dos lubrificantes consistiu em passar esses em abundância nos dois lados da geratriz, ou seja, na chapa a ser estampada e não passar nem nas matrizes nem no punção. Nesse caso, como há lubrificação em excesso na chapa, essa se espalha para o punção e as ferramentas, não necessitando assim lubrificá-la. Para a remoção do lubrificante e posterior aplicação de outro, foi usado Acetona, que foi passada também em excesso, tanto nas matrizes, como no punção para se assegurar uma limpeza e remoção completa do lubrificante e assim não se ter uma mistura entre eles.

3.4. Cálculo analítico da força máxima de estampagem

Como no ensaio Swift serão medidas as forças de estampagem juntamente com a força de prensa-chapas, essas forças serão usadas para se calcular o coeficiente de atrito através de um equacionamento que foi proposto por Siebel e Panknin (1956). Nesse cálculo a força máxima de estampagem será medida e adicionada nas equações de Siebel e Panknin (1956) e o resultado será o coeficiente de atrito. A força máxima de estampagem desenvolvida por Siebel e Panknin (1956) foi baseada na teoria da plasticidade e engloba quatro cálculos de força atuantes durante a conformação de uma peça de formato cilíndrico. A figura 44 ilustra esquematicamente os parâmetros envolvidos.

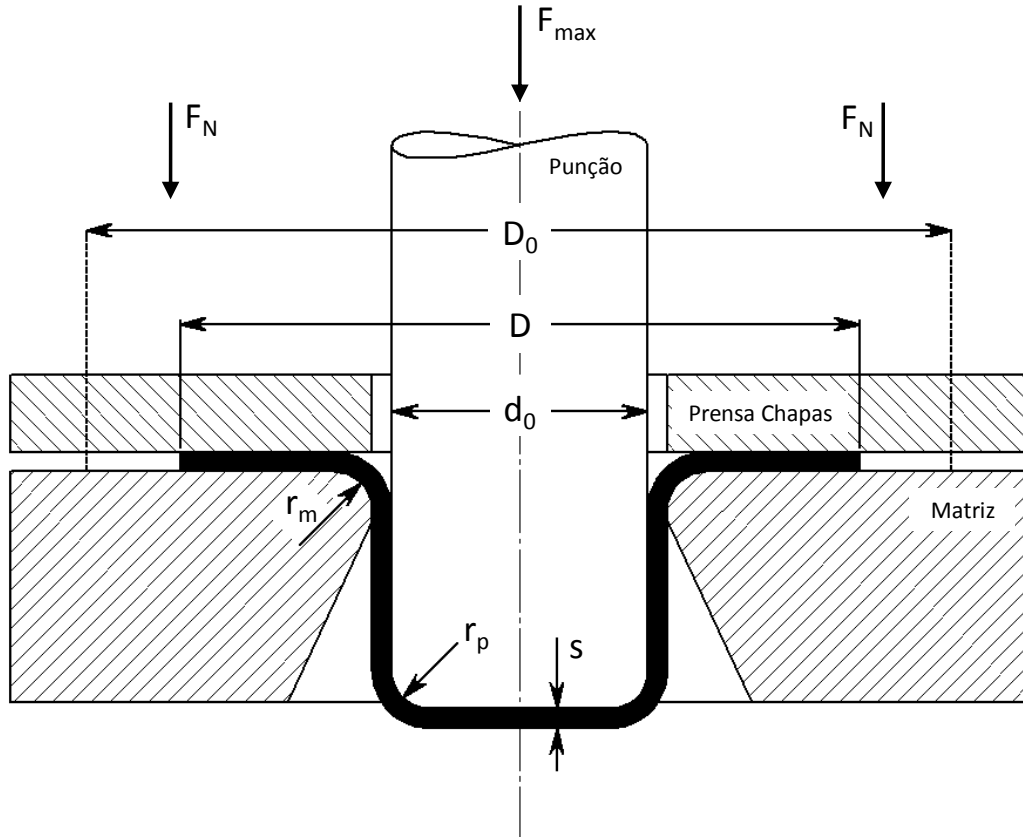


Figura 44. Representação esquemática da estampagem de uma peça de formato cilíndrico.

As expressões para cada força atuante são:

a) Força ideal de estampagem (F_{id})

$$F_{id} = A_0 \cdot k f_m \cdot \ln \frac{D}{d_0} \quad (18)$$

onde A_0 é a área de seção do copo ($A_0 = \pi \cdot d_0 \cdot s$) e D é o diâmetro do flange no momento da força máxima calculado por Siebel e Panknin (1956) que é representado pela equação (19).

$$D = \left(0,77 \cdot \frac{D_0}{d_0} + 0,23 \right) \cdot d_0 \quad (19)$$

A força máxima, de acordo com Siebel e Panknin (1956), ocorre em aproximadamente 30% do caminho total percorrido pelo punção na estampagem de uma geometria circular. Na equação (18) a tensão de escoamento média $k f_m$ é calculada por:

$$kf_m = \frac{kf_1 + kf_2}{2} \quad (20)$$

onde kf_1 é a tensão de escoamento da chapa na saída do raio da matriz e kf_2 é a tensão de escoamento no diâmetro externo da região do flange. Como o cálculo dessas tensões de escoamento depende da região e de qual foi a deformação nela, é necessário saber como se calculam essas deformações. Assim, tem-se como deformação φ_1 após a passagem da chapa pelo raio da matriz:

$$\varphi_1 = \ln \left(\frac{\sqrt{D_0^2 + d_0^2} - D}{d_0} \right) = \ln \sqrt{\beta_0^2 + 1 - \beta^2} \quad (21)$$

Essa deformação pode ser calculada em função das relações de estampagem β_0 e β , onde tem-se que:

$$\beta_0 = \frac{D_0}{d_0} \quad (22)$$

e

$$\beta = \frac{D}{d_0} \quad (23)$$

A deformação na região do diâmetro externo do flange φ_2 é calculada por:

$$\varphi_2 = \ln \frac{D_0}{d_0} \quad (24)$$

Dessa forma, pode-se calcular as tensões de escoamento kf_1 e kf_2 através da equação (17) onde C e n devem ser conhecidos para o material da chapa. Assim, kf_m pode ser determinado.

b) Força de atrito no prensa chapas na região do flange (F_{APC})

$$F_{APC} = 2 \cdot \mu \cdot F_N \cdot \frac{d_0}{D} \quad (25)$$

onde F_n é a força normal do prensa chapas e μ é o coeficiente de atrito entre a chapa e as matrizes.

c) Força de atrito na passagem do raio da matriz (F_{AR})

$$F_{AR} = \left(e^{\mu \frac{\pi}{2}} - 1 \right) \cdot (F_{id} + F_{APC}) \quad (26)$$

Para a equação (26), μ representa o coeficiente de atrito entre a chapa e a matriz inferior na passagem do raio. A rigor, o coeficiente de atrito da equação (25) deveria ser tomado como diferente da equação (26), porém, nesse estudo, considera-se que ambos são iguais durante todo o processo.

d) Força de retorno elástico (F_{RE})

$$F_{RE} = \pi \cdot d_0 \cdot s \cdot kf_1 \cdot \frac{s}{4r_m} \quad (27)$$

onde r_m representa o raio da matriz inferior.

Por fim, para se obter a força máxima de estampagem pela equação de Siebel e Panknin (1956), é necessário somar todos os efeitos das forças descritas acima, ou seja:

$$F_{max} = F_{id} + F_{APC} + F_{AR} + F_{RE} \quad (28)$$

Esse método de cálculo será usado no presente trabalho porque ele usa o coeficiente de atrito como parâmetro de entrada para a determinação da força máxima. Além disso, pela relação de Siebel e Panknin (1956), pode-se estimar também qual a contribuição das forças de atrito na força máxima que será objeto de estudo nesse trabalho.

3.5. Simulação Computacional

Para as análises com a simulação empregadas no presente estudo foi usado o *software* eta/DYNAFORM Versão 5.6 com o solver LS-Dyna versão 971. O eta/DYNAFORM é um software de simulação em estampagem que usa o LS-DYNA como “solver”. Esse foi desenvolvido pela ETA (Engineering Technology Associates, Inc). O eta/DYNAFORM combina as análises do LS-DYNA versão 971 com as funções pré e pós processador do próprio DYNAFORM. As funções iterativas e as análises dos elementos são integradas unicamente para servir a indústria de estampagem no dimensionamento de matrizes e no desenvolvimento de peças finais.

O LS-DYNA é vendido pela LSTC (*Livermore Software Technology Corporation*) sediada em Livermore na Califórnia, EUA. O “solver” é um *software* de uso geral, que incorpora as análises não lineares, dinâmicas e de elementos finitos utilizando capacidades implícitas e explícitas para resolver problemas tanto de fluidos como estrutural. Algumas análises atuais desse “solver” englobam simulação de acidentes automotivos, segurança dos ocupantes de automóveis, explosões subaquáticas e processos de estampagem.

O eta/DYNAFORM tem a capacidade de dar informações, no caso da estampagem, acerca da estampabilidade das chapas, atuação do prensa chapas e do punção, retorno elástico, orelhamento, espessura da chapa durante o processo, tendências a rupturas prematuras, tendências a enrugamento e estampagem em múltiplos estágios.

Algumas propriedades particulares do DYNAFORM são descritas abaixo, isso ajuda a entender como foi executada a simulação:

3.5.1. Tipo de contato usado (“Contact interface”): “Form one way Surface to Surface”.

Esse tipo de contato é usado para modelar corpos rígidos que usam elementos tipo casca ao qual é necessário que a espessura desse corpo rígido seja levada em consideração.

O contato “(forming ou form) surface to surface” usa um recurso chamado projeção de nós (elementos) que consiste em fazer coincidir os nós da malha de uma superfície na outra, para que as forças possam ser transmitidas mesmo se não houver um perfeito acoplamento entre os nós das superfícies em contato. Esse recurso é muito preciso e bastante usado para o caso de conformação de metais onde um contato contínuo é necessário durante a simulação. A única desvantagem desse método é o alto custo de máquina para a simulação, ou seja, são necessários mais cálculos e a simulação é mais demorada.

3.5.2. Tipo de deslocamento empregado (“Process Type”): “Single Action”

O movimento das ferramentas é relacionado com o tipo de deslocamento das mesmas (Draw Type). Se for definida uma ação simples (“Single Action”), o movimento é executado pela matriz e o punção permanece estático, se for definida uma ação dupla (“Double Action”), o movimento é executado pelo punção e a matriz permanece estática, porém pode-se atribuir uma pressão de atuação entre ela e o prensa-chapas, por isso a definição de duplo efeito. No caso do simples efeito tanto o deslocamento como as forças de sujeição do prensa-chapas são atribuídas à matriz.

3.5.3. Propriedade aplicada à geratriz (“Material Property”): BELYTSCHKO-TSAY

A propriedade BELYTSCHKO-TSAY é usada para definir o tipo de formulação matemática que será aplicada nos elementos tipo casca da geratriz. Essa propriedade é amplamente usada em simulações de estampagem

Para um elemento casca com cinco pontos de integração através da espessura, o elemento BELYTSCHKO-TSAY requer 725 operações matemáticas comparado a 4050 operações geradas pelo elemento Hughes-Liu que era usado antes de ser criado o elemento BELYTSCHKO-TSAY. Esse tipo de elemento foi criado em 1981 por BELYTSCHKO e TSAY e é baseado numa combinação das formulações co-rotacionais e de velocidade de deformação. A eficiência desse elemento é obtida de uma formulação matemática simplificada que resulta dessas duas suposições cinéticas. A parte co-rotacional da formulação evita as complexidades dos mecanismos não lineares através do acoplamento de um sistema de coordenadas no próprio elemento. A parte da velocidade de deformação da formulação facilita a avaliação dos balanços energéticos entre os elementos (Hallquist, March 2006).

O elemento usado para definir as ferramentas (punção, matriz e prensa chapas) também é do tipo casca, porém esse elemento é indeformável. A figura 45 mostra a construção de todo o conjunto montado no simulador para a execução da estampagem com as malhas geradas e os detalhes de refinamento da malha nas regiões críticas.

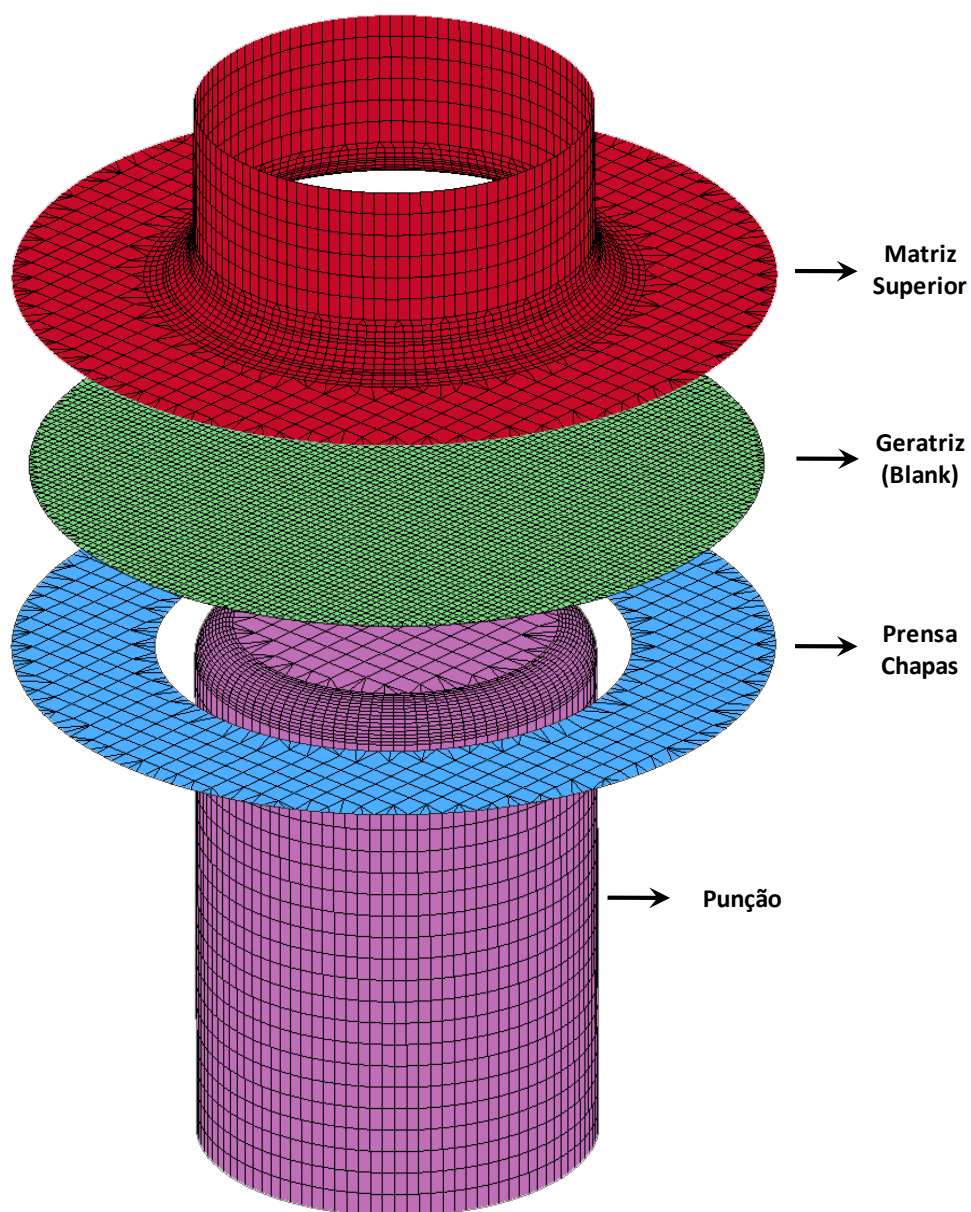


Figura 45. Conjunto montado no DYNAFORM para a simulação do processo de estampagem utilizado.

3.5.4. Propriedades mecânicas do material da geratriz

As propriedades aplicadas ao material usado, Al1100, ou seja, alumínio comercialmente puro, que são usadas como dados de entrada no DYNAFORM são descritas na tabela 5.

Tabela 5. Propriedades usadas para definir o material da geratriz no DYNAFORM.

Propriedades do material		
Densidade	2,7	g/cm ³
Modulo de Young	69000	N/mm ²
Coeficiente de Poisson	0,33	
Índice de encruamento (<i>n</i>)	0,092	
Coeficiente de resistência (<i>C</i>)	196,4	
Índice de anisotropia médio	0,79	
Tensão de escoamento (<i>kf₀</i>)	124	N/mm ²

A curva tensão vs. deformação verdadeira é gerada pelo próprio DYNAFORM usando os valores de *C* e *n* dada pela equação (17), essa aproximação foi criada por Hollomon em te boa concordância com a curva real do material desde que obedeça a algumas condições como, por exemplo, realizar o ensaio a temperatura ambiente. A parte inicial da curva tensão vs. deformação (parte elástica) é criada pelo DYNAFORM informando-se a deformação e tensão de escoamento e a parte final da curva (ruptura) também é informada por uma deformação final.

A Curva Limite de Conformação (CLC) também é criada pelo DYNAFORM através de *n*, dada pela equação (17), e pela espessura inicial da geratriz. Essa forma de criação da CLC foi concebida por Keeler através de uma relação empírica. A CLC criada por esse método é bastante próxima da maioria das CLC's medidas através de ensaios, a principal diferença pode estar no ponto onde a CLC intercepta o eixo das ordenadas, que pode ser mais alto ou mais baixo que o real. Entretanto, esse ponto pode ser facilmente mudado já na entrada dos dados do DYNAFORM, o que deixa a curva bem próxima do caso real.

3.6. Máquina usada para a medição do coeficiente de atrito

A máquina usada para medição de atrito, ver figura 46 e figura 47 foi projetada com objetivo de medir e avaliar o coeficiente de atrito em estampagem e é baseada no ensaio DST. Para tal, existem dois cilindros hidráulicos que tem a função de fazer uma tira de chapa deslizar sobre um pino. Esses cilindros hidráulicos foram montados em uma estrutura triangular que tem como objetivo a diminuição da influência da vibração dando mais estabilidade para transmitir as forças durante o ensaio. O cilindro hidráulico do lado esquerdo da figura 46, tem a função de tracionar a tira de chapa e o outro cilindro hidráulico, do lado direito, tem a função de fazer uma força de resistência oposta para gerar o nível de solicitação desejado na chapa.

No vértice superior da máquina há um pino que pode ser apoiado com ou sem rolamentos, ver figura 47. Sobre esse pino passa a tira de chapa com ângulo de dobra de 90°.

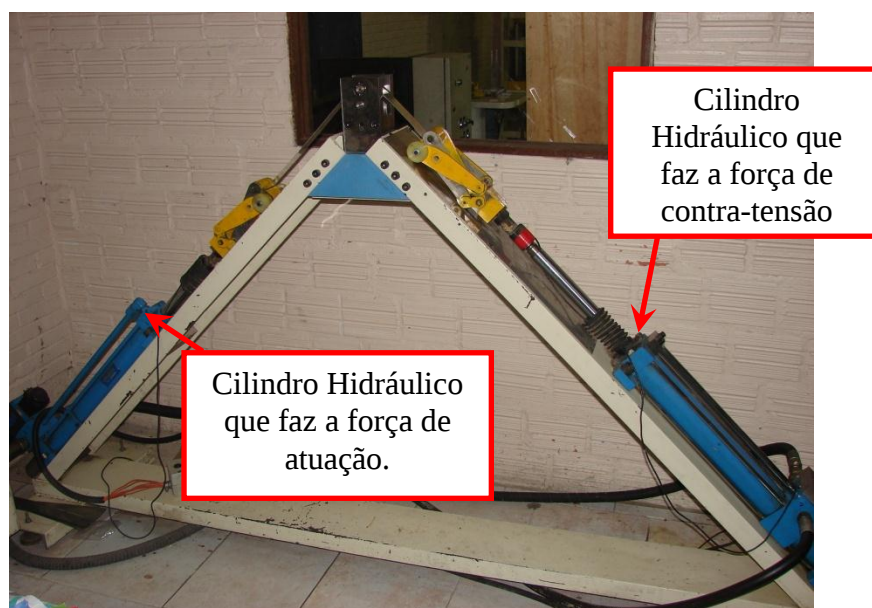


Figura 46. Máquina usada para o ensaio DST.

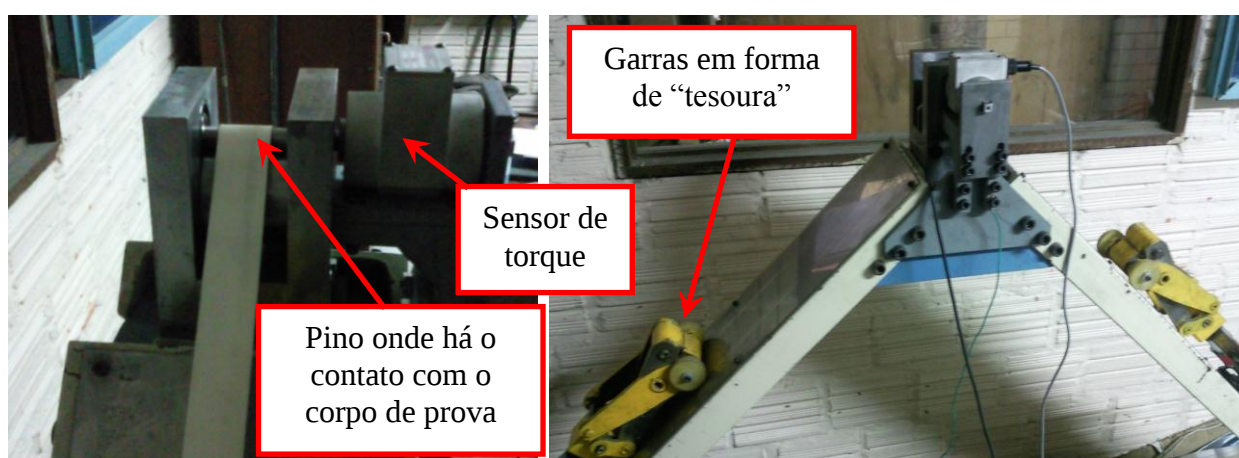


Figura 47. Máquina usada para a realização do ensaio DST.

Na figura 47 é mostrada a máquina de avaliação de atrito através de ensaio DST. No lado esquerdo da máquina, há uma célula de carga acoplada ao cilindro hidráulico, o qual tem o papel de medir a força de atuação na chapa. No lado direito da máquina, há outra célula de carga que tem a função de medir a força de contra-tensão atuante na chapa. Ambas as células de carga tem capacidade de 50 kN. Acoplado ao pino por onde passa a chapa há um sensor de torque com capacidade de 50 Nm, que tem por objetivo medir o torque ao qual o pino é submetido quando a chapa passa por ele.

As garras da máquina de medição de atrito são em forma de “tesoura” (foto da direita da figura 47). Essa forma faz com que mais força se aplique na chapa à medida que ela é tracionada. Há dois tipos de ensaios que a máquina pode executar. No primeiro o pino por onde passa a chapa é deixado livre, ou seja, pode girar livremente. Esse ensaio tem por objetivo medir apenas a força de dobramento da chapa, pois se considera um atrito muito pequeno, ou praticamente nulo entre a chapa e o pino quando ele está livre. No segundo ensaio, o pino é fixado, ou seja, ele não pode girar em torno do seu eixo. Nesse ensaio, considera-se que haverá a atuação da força de dobramento adicionada das forças de atrito entre a chapa e o pino.

Para dar o movimento de avanço e recuo é utilizado uma unidade hidráulica Racine com capacidade de 83 L/min de fluxo de óleo e pressão máxima de 100MPa. O movimento de avanço e retorno é dado por uma válvula montada sobre o cilindro de atuação (lado esquerda da figura 46) enquanto que no outro cilindro há uma válvula que tem a função de gerar uma força contrária ao movimento da chapa (lado direito da figura 46).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Medição da força vs. deslocamento no ensaio de estampagem

Como foi mencionado anteriormente, foram aplicadas três lixas nas matrizes e quatro tipos de lubrificantes para cada caso. Para cada condição de atrito foram feitos três ensaios válidos e a curva média entre as três foi tomada como a curva representativa para a dada lixa e lubrificante. Os resultados das medições da força no punção pelo seu deslocamento são mostrados na figura 48 onde eles foram agrupados segundo a lixa aplicada e variando o lubrificante. O gráfico inferior da direita da figura 48 mostra os resultados obtidos para outros lubrificantes em que a lixa usada nas matrizes foi a 1200.

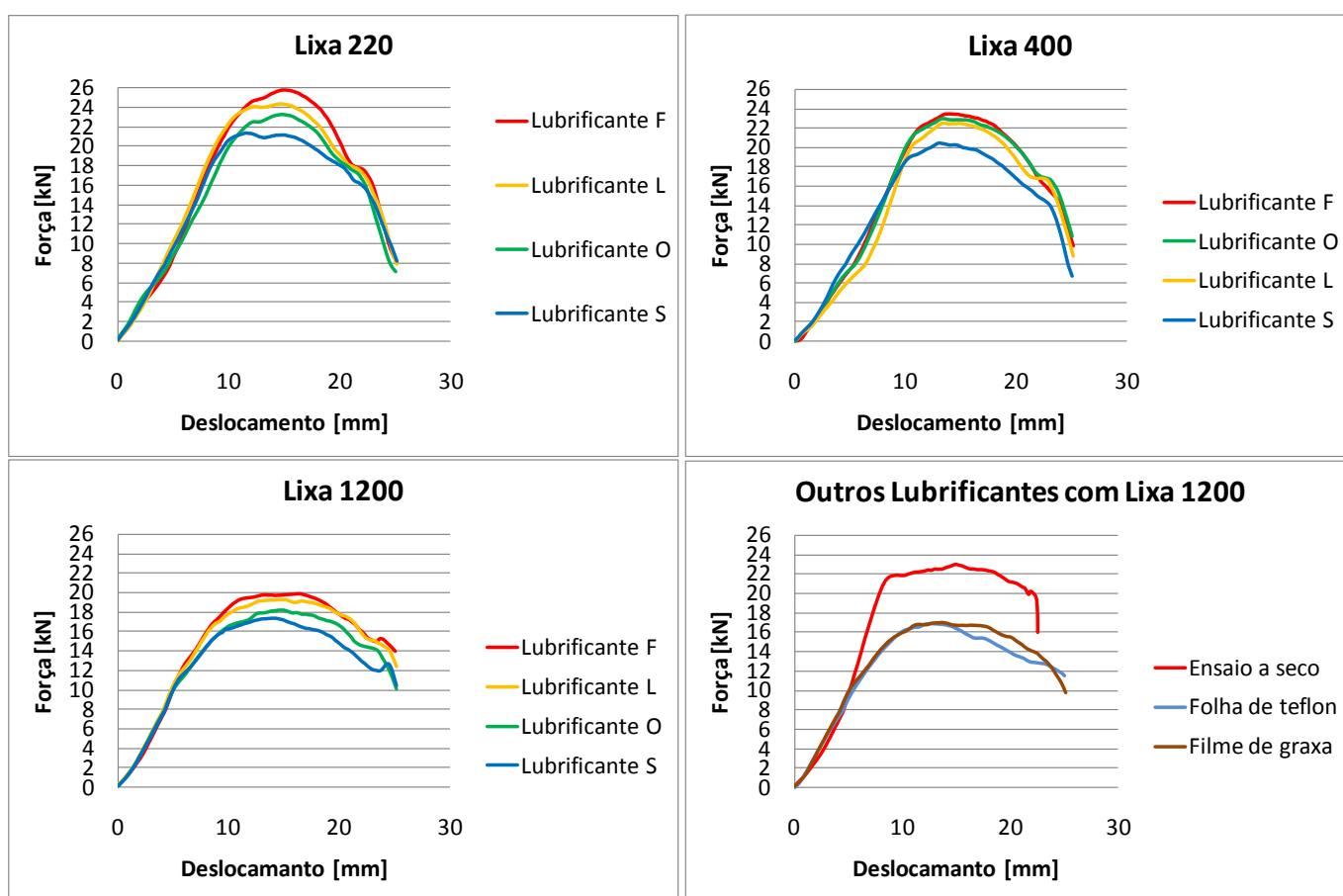


Figura 48. Gráficos de força por deslocamento medido para cada lubrificante e lixa aplicada juntamente com as condições a seco, com folha de teflon e com filme de graxa.

Para cada gráfico da figura 48 é obtida uma força que corresponde ao valor máximo que cada curva atinge e que ocorre com aproximadamente 15mm de deslocamento. Após esse máximo a força medida no punção decai até zero correspondendo ao final da estampagem onde se obtém a forma final desejada da peça. Um pequeno aumento da força durante esse decaimento pode ocorrer devido à uniformização da espessura, porém esse pequeno aumento geralmente nunca atinge valores tão altos quanto o valor da força máxima.

A tabela 6 mostra os valores das forças máximas obtidas pelos dados que geram as curvas para cada condição superficial aplicada. Os valores são medidos em kN.

Tabela 6. Força máxima medida em kN no ensaio de estampagem.

Lixas	Lubrificantes						
	F	L	O	S	Teflon	Graxa	A seco
220	25,7	24,3	23,3	21,4	-	-	-
400	23,4	22,4	22,9	20,4	-	-	-
1200	19,8	19,2	18,2	17,3	16,9	16,9	22,9

4.1.1. Cálculo do coeficiente de atrito pelas equações de força

Os parâmetros geométricos obtidos através das ferramentas do ensaio Swift são mostrados na tabela 7. A figura 42 mostra uma vista em corte do ferramental com as dimensões de cada componente.

Tabela 7. Parâmetros geométricos das ferramentas usadas nos ensaios de estampagem.

Parâmetros Geométricos			
Diâmetro do punção	d_0	50	mm
Espessura da chapa	s_0	1	mm
Diâmetro do blank	D_0	90	mm
Raio da matriz	r_m	6,5	mm

Através dos parâmetros geométricos medidos (tabela 7) e utilizando-se as equações 13, 16 e 18 calculam-se os parâmetros descritos na tabela 8. A tabela 9 mostra as constantes do material que foram obtidas através do ensaio de tração (figura 40).

Tabela 8. Parâmetros geométricos calculados para as ferramentas usadas nos ensaios de estampagem.

Parâmetros Geométricos Calculados			
Diâmetro do flange	D	80,8	mm
Secção do copo	A_0	160,22	mm ²
Relação de estampagem	β_0	1,8	
Relação de estampagem (flange)	β	1,62	

Tabela 9. Parâmetros do material obtidos por ensaios de tração.

Parâmetros do Material			
Coefficiente de resistência	C	196,4	N/mm ²
Índice de encruamento	n	0,092	
Tensão máxima do material	Rm	180	N/mm ²

Para o calculo de φ_1 e φ_2 , foram aplicadas as equações 15 e 18 respectivamente. Com essas deformações e utilizando a equação 8, as tensões kf_1 , kf_2 podem ser calculadas e a media delas kf_m é achada pela equação 14. Os resultados são mostrados na tabela 10.

Tabela 10. Cálculos das tensões e deformações obtidas pelas equações de Panknin.

Cálculo das tensões e deformações			
Deformação verdadeira antes	φ_1	0,24	
Deformação verdadeira depois	φ_2	0,59	
Tensão de escoamento antes	kf_1	172,41	N/mm ²
Tensão de escoamento depois	kf_2	187,00	N/mm ²
Tensão de escoamento média	kf_m	179,70	N/mm ²

Como foi proposto nos objetivos do presente estudo de se fazer a medição do coeficiente de atrito para o processo de estampagem onde tem-se uma dada condição de superfície das ferramentas com um lubrificante específico, pode-se fazer o caminho inverso das equações de Panknin e com a força máxima obtida nos ensaios, obter-se o coeficiente de atrito. Para tanto, a tabela 11 mostra os

resultados dos coeficientes de atrito para cada lixa aplicada e lubrificante empregado. A força no prensa chapas F_n foi também medida e mantida constante para todos os ensaios práticos, seu valor ficou em 10kN, aproximadamente.

Tabela 11. Coeficiente de atrito pela equação de força de Panknin.

Lixas	Lubrificantes						
	F	L	O	S	Teflon	Graxa	A seco
220	0,244	0,219	0,200	0,160	-	-	-
400	0,202	0,182	0,192	0,140	-	-	-
1200	0,127	0,113	0,089	0,067	0,056	0,056	0,192

4.1.2. Resultados da simulação

De forma similar, foi feita a simulação numérica do ensaio Swift através do DYNAFORM onde o coeficiente de atrito adotado para cada simulação foi o obtido pelas equações de Panknin e que é mostrado na tabela 11. Entre todas as simulações realizadas, o único parâmetro que foi avaliado foi o coeficiente de atrito, permanecendo todos os outros constantes. A tabela 12 mostra os resultados das forças máximas obtidos pela simulação onde se faz referência as lixas aplicadas e aos lubrificantes empregados.

Tabela 12. Força máxima obtida pela simulação no DYNAFORM em kN.

Lixas	Lubrificantes						
	F	L	O	S	Teflon	Graxa	A seco
220	24,2	22,8	22,3	20,8	-	-	-
400	22,3	21,5	21,8	20,0	-	-	-
1200	19,4	18,6	18,1	17,2	16,9	16,9	21,8

Após a obtenção das forças máximas de estampagem que o DYNAFORM gera, observou-se que há uma tendência crescente dos resultados se afastarem das forças máximas medidas na estampagem da peça em forma de copo. A figura 49 mostra essa tendência onde o eixo das ordenadas representa o afastamento percentual entre as forças máximas medidas e simuladas e o eixo das abscissas apresenta os valores das forças máximas em escala linear crescente.

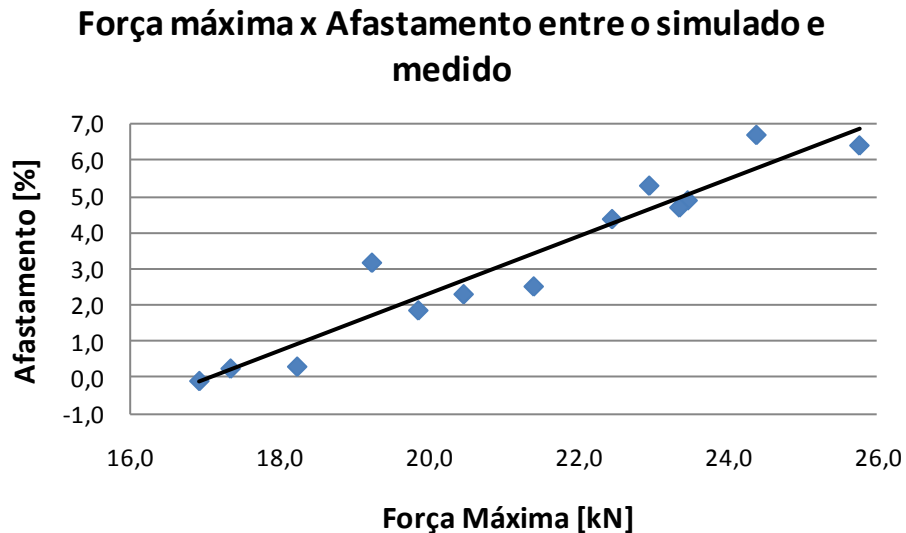
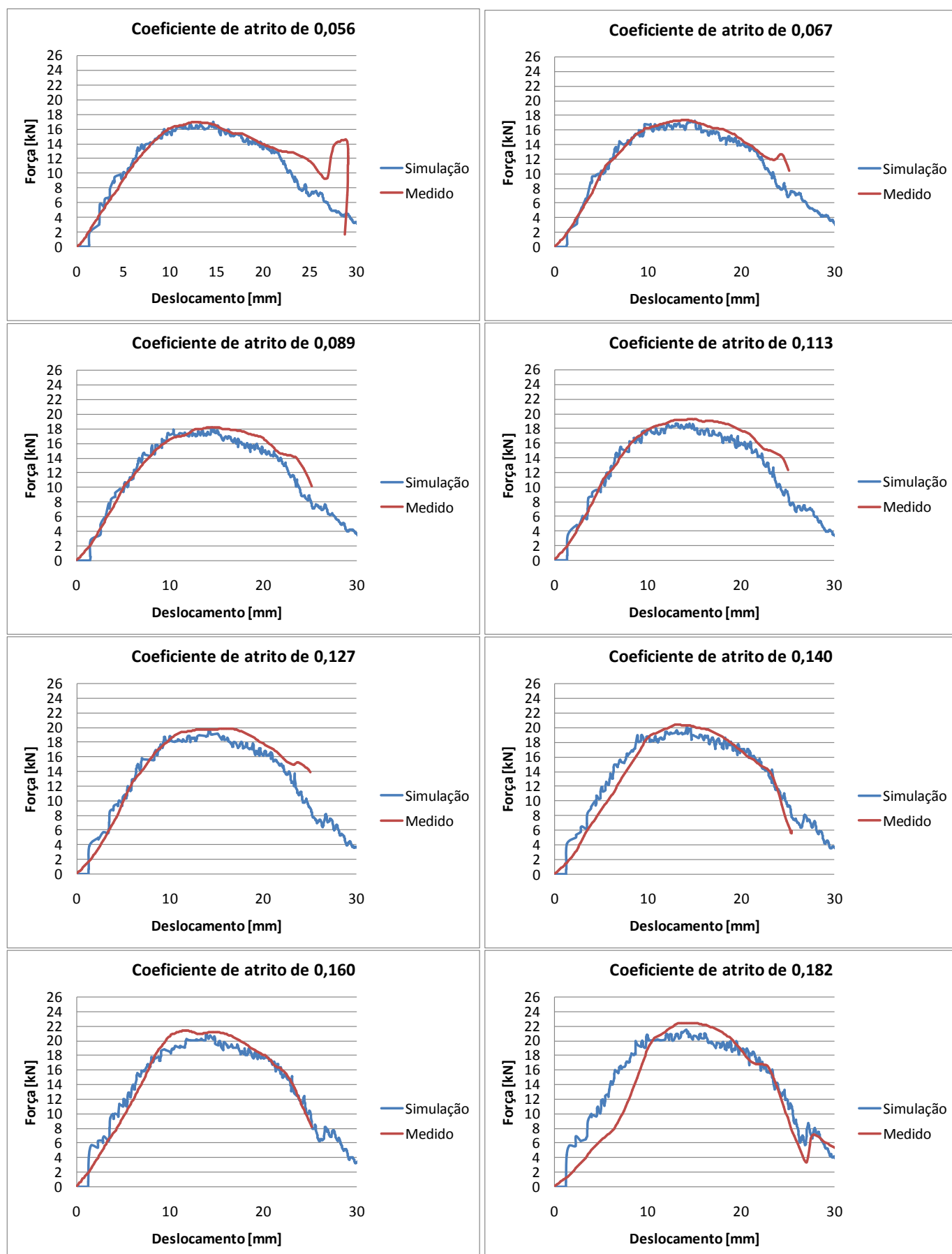


Figura 49. Relação entre a força máxima medida e o afastamento entre o resultado das medições e da simulação.

O gráfico da figura 49 mostra que quanto maior o coeficiente de atrito e, portanto maior a força máxima, maior o distanciamento dos valores simulados com relação aos valores medidos. Isso sugere que quanto maior a atuação das forças de atrito na simulação, mais erro a simulação pode estar gerando. Outra forma de visualizar isso é através dos gráficos da figura 50 onde são mostrados os resultados de força vs. deslocamento para cada coeficiente de atrito, e portanto para cada condição superficial e lubrificação aplicados, onde é comparada as curvas medidas com as obtidas pela simulação.



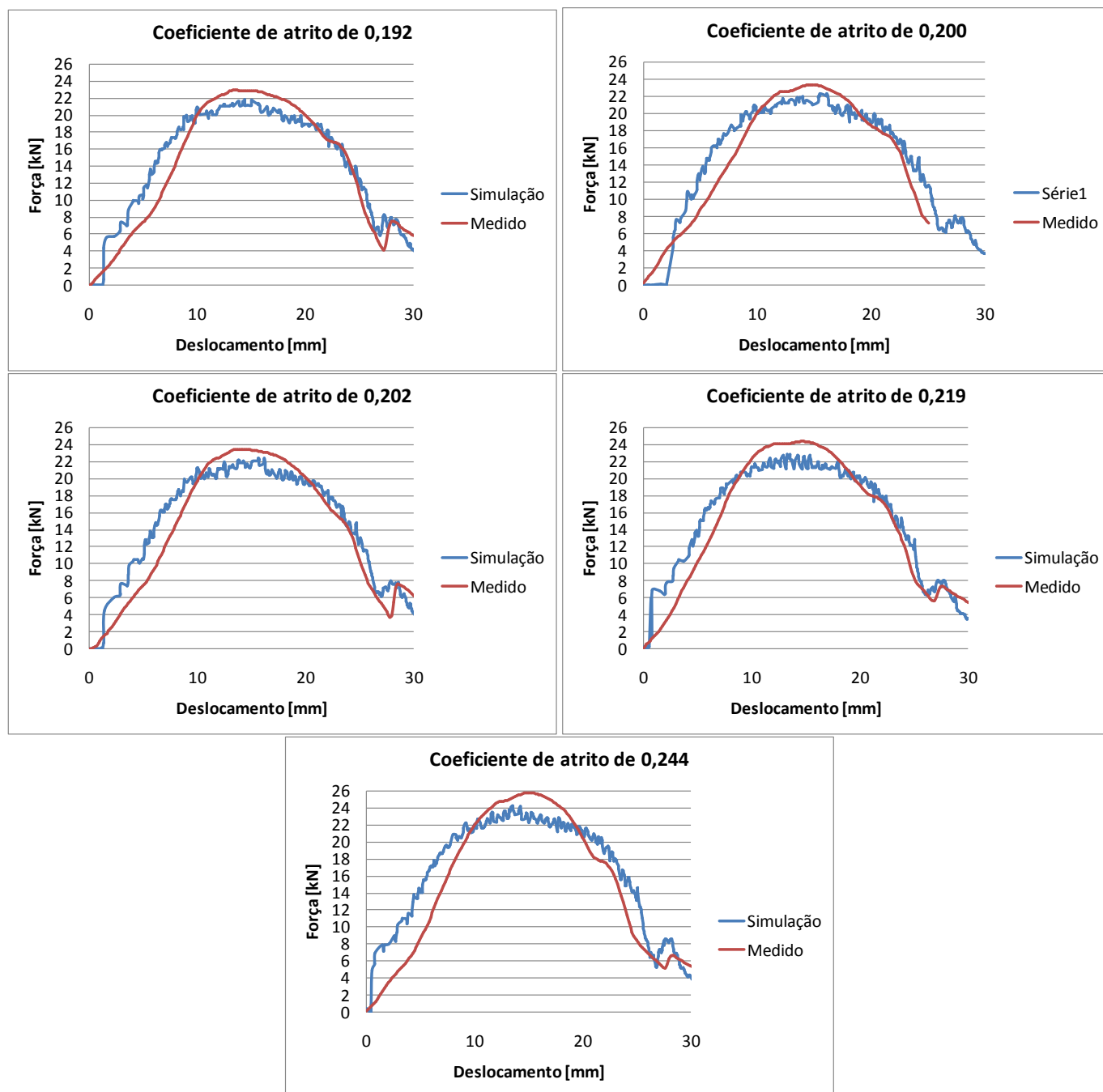


Figura 50. Comparação entre os gráficos gerados pela simulação e os medidos.

Através da análise dos gráficos da figura 50 é possível observar que à medida que o coeficiente de atrito aumenta, as curvas simuladas se distanciam das medidas. Estudos em medições do coeficiente de atrito em estampagem (Saha, Wilson *et al.*, 1996; Jonasson, Wihlborg *et al.*, 1998; Hao, Klamecki *et al.*, 1999; Carlsson, Bexell *et al.*, 2000; Matuszak, 2000a; b; Lovell e Deng, 2002; Kim, Jain *et al.*, 2004; Nanayakkara, Kelly *et al.*, 2005) sugerem que esse não é uma constante do processo, ou seja, há uma variação significativa que pode ser a principal fonte de erro dos programas de simulação em estampagem, uma vez que esses consideram o atrito como constantes. A figura 51 mostra como essa variação ocorreu. Pela figura 51 pode-se observar também que no início da estampagem, o coeficiente de atrito aumenta, visto que a curva em preto intercepta as curvas de atrito simuladas de maior valor, até um limite superior. De forma similar, no fim da estampagem, o atrito diminui, pois a curva em preto intercepta as curvas simuladas de menor atrito, até atingir um mínimo.

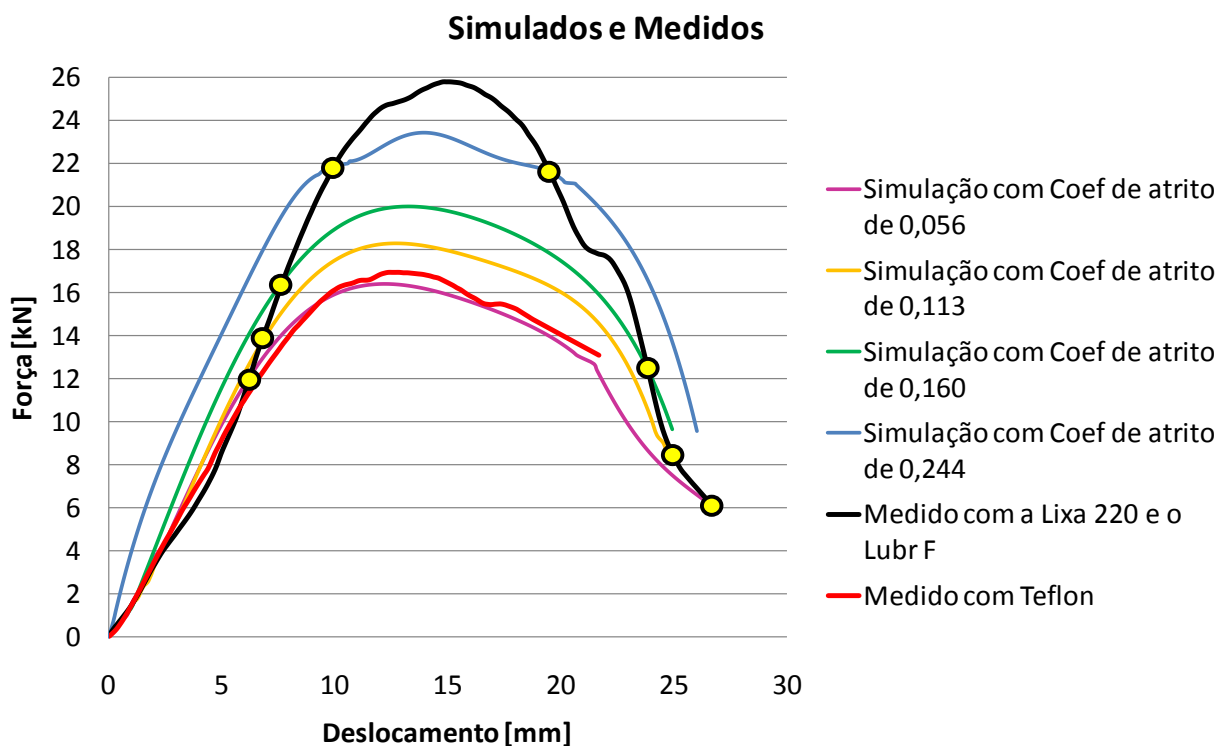


Figura 51. Comparação entre os gráficos gerados pela simulação e os medidos de maior coeficiente de atrito.

Como foi mostrado até aqui, a simulação apresentou uma diferença nos resultados em comparação ao caso real e que essa diferença tende a aumentar quanto maior a influência do atrito no processo. Entretanto, o afastamento máximo que foi verificado entre o ensaio de estampagem e o

simulado com relação à força máxima foi de 6%, o que pode ser atribuído as baixas forças e tensões geradas na peça pelo fato de se estar usando como material de análise o alumínio. Para tanto, a simulação, no caso estudado se mostrou razoável para prever as solicitações que a peça sofreu durante a estampagem. A figura 52 mostra, para quatro condições de atrito, as solicitações que a peça sofrerá de acordo com a simulação. Pode-se ver que, quanto maior for o atrito, mais as deformações se aproximam da curva limite de conformação (CLC) e maiores as chances da peça romper prematuramente.

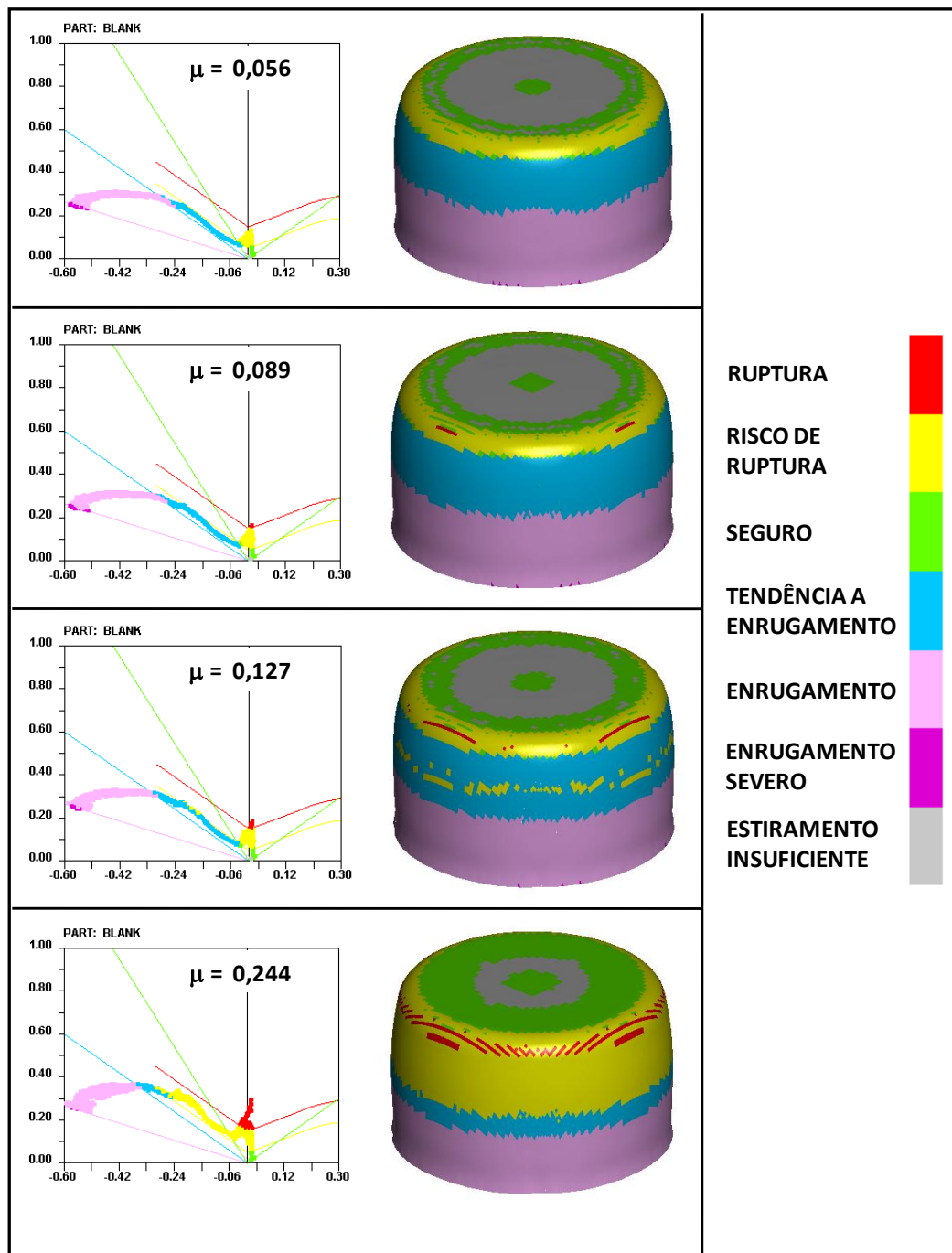


Figura 52. Resultados obtidos para alguns coeficientes de atrito através da simulação.

Nota-se também que existe uma larga região da peça na borda inferior, que a simulação prevê uma tendência a enrugamento e que se mantém a mesma para todos os valores de atrito. Porém, para todas as aplicações das lixas e lubrificantes, isso não ocorreu e isso pode indicar que o DYNAFORM não está apresentando bons resultados. A figura 53 mostra uma peça estampada onde observa-se que não houve enrugamento. Entretanto, se sabe que os materiais têm certos comportamentos peculiares dependendo da aplicação, o que indica mesmo que se, para o caso em questão, não houve enrugamento, o material pode estar sofrendo tensões internas que propiciam isso.



Figura 53. Peça estampada ao qual não apresentou enrugamento.

O fato do enrugamento não ter ocorrido nessa peça se deve, principalmente, as restrições que as matrizes fazem a peça e que, se essas restrições fossem diminuídas, a chapa teria enrugado, o que é mostrado na figura 54 onde, de fato, houve enrugamento da peça. A estampagem da figura 54 foi feita com uma folha de teflon onde há uma separação física entre as matrizes e a chapa e essa separação, serve como corpo de sacrifício, dando a liberdade das tensões internas da chapas de atuarem.

Durante os ensaios, foi feito também o uso de uma camada de graxa em alguns copos de prova, para se analisar o efeito gerado por essa lubrificação. O atrito gerado pela graxa foi praticamente igual ao gerado pela folha de teflon e nesse caso também houve uma visível tendência a enrugamento das bordas da peça. Isso é mostrado na figura 55.



Figura 54. Peça que foi estampada com uma folha de teflon e com as matrizes lixadas a 1200.



Figura 55. Peça que foi estampada com lubrificante de graxa e com as matrizes lixadas a 1200.

Por fim, ainda por motivos de comparação, em um dos corpos de prova foi feita a gravação eletroquímica de uma malha para se medir as deformações geradas na estampagem. A figura 56 mostra a peça com a malha após estampagem. Os resultados são mostrados na figura 57 onde pode-se observar que o perfil das deformações para o caso medido e para o caso simulado são bem próximos.



Figura 56. Gravação eletroquímica de uma malha circular para medir as deformações.

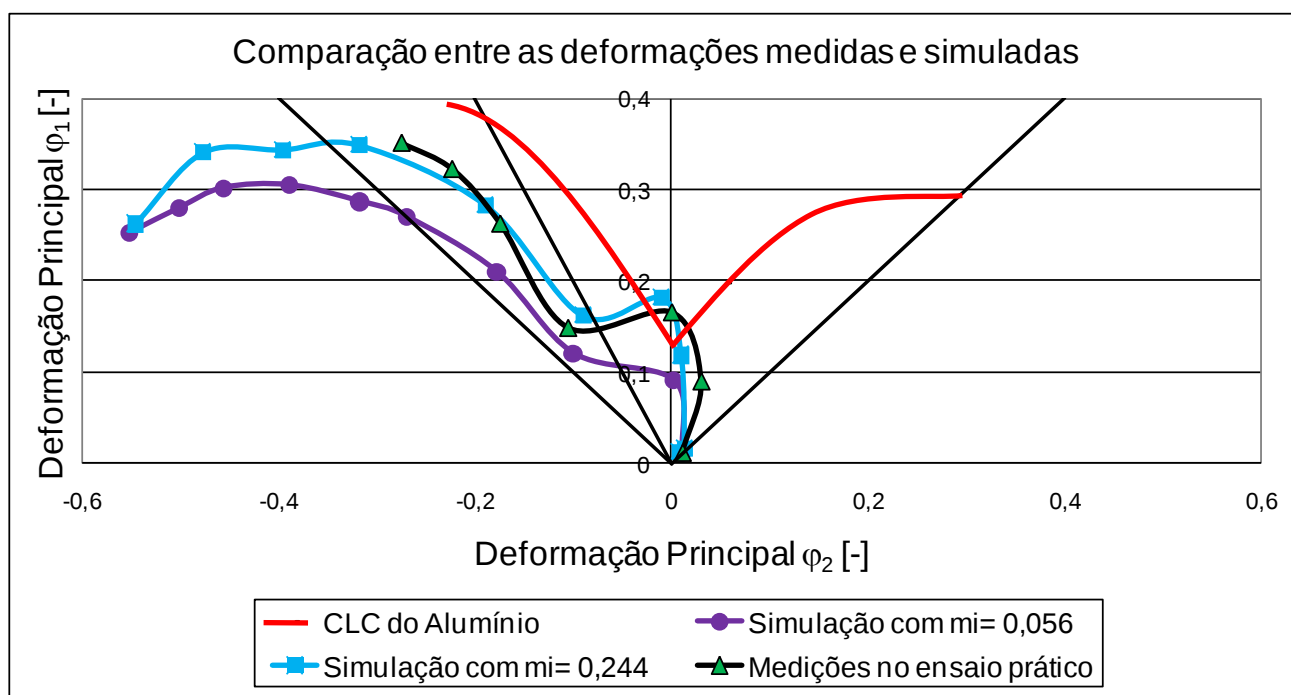


Figura 57. Comparação entre as deformações medidas no ensaio de estampagem e as obtidas pela simulação.

Existem duas regiões importantes no gráfico da curva limite de conformação que devem ser discutidos. A primeira é a região das deformações principais ϕ_1 no eixo das ordenadas. Nessa região as deformações simuladas com maior atrito e as medidas em uma peça estampada atingiram valores acima da CLC. Isso aconteceu apenas naquele ponto onde a CLC tem o menor valor de deformação.

Isso pode estar relacionado com a maneira com que a CLC é obtida que é através dos ensaios Nakajima. Nesses ensaios, corta-se oito corpos de prova (CP's) com uma geometria padronizada e cada corpo de prova vai gerar um ponto de deformação na curva. Esses CP's são então gravados com a mesma malha da figura 56, colocados em uma ferramenta que restringe o movimento dos CP's e forçados contra um punção até o rompimento. Pelo fato dos CP's estarem restringidos pelo prensa-chapas de forma que não apresentem movimento relativo entre si, há apenas a atuação das deformações de estiramento. Após os ensaios, faz-se a medição dos círculos gravados mais próximos do rompimento possível, ou seja, onde eles apresentaram uma estricção. Esses círculos então servirão para se calcular as deformações e assim obter-se a CLC. Dessa forma a CLC gerada não representa a parte de ruptura do material da chapa, mas apenas a estricção. Isso em termos de projeto é benéfico, pois se tem uma curva que já engloba uma segurança de uso, ou seja, todas as deformações que estiverem abaixo dela ou ainda muito próximas estarão em um regime seguro de estampagem, portanto, nessa região onde há apenas as deformações principais ϕ_1 , se o material estiver acima da CLC, nem sempre ocorrerá rompimento, que foi o que aconteceu para as estampagens com maior atrito. Mais informações sobre a construção das CLC's podem ser obtidas do trabalho feito por Silveira Netto (2004).

Entretanto, pela análise da figura 57, pode-se ver que ao reduzir o coeficiente de atrito entre as ferramentas e a chapa, as deformações principais ϕ_1 diminuem bastante, chegando a ficar bem abaixo da CLC naquele ponto. Isso pode ser facilmente obtido com um bom acabamento das matrizes associado a uma boa lubrificação.

Outra região do gráfico da figura 57 que é importante observar é a parte das deformações principais ϕ_2 negativas, no eixo das abscissas. Essas deformações apresentaram valores muito altos em módulo, o que indica uma grande região que sofrerá enrugamento. Nas medições feitas na peça gravada, essas deformações não atingem valores tão altos por não ser possível medir as deformações próximas da borda do copo. Nessa região a iteração das ferramentas imprimiu uma mudança tão severa na superfície que os círculos gravados ficaram difíceis de observar. Mas como para o caso do uso do teflon houve um enrugamento na borda da peça, essas deformações previstas pelo DYNAFORM estão muito próximas das reais.

4.2. Descrição e aplicação do ensaio de dobramento sob tensão –lixa de 220

Como o objetivo dessa pesquisa é avaliar o coeficiente de atrito e comparar com os resultados da simulação numérica e tendo em vista que o ensaio DST é o ensaio mais amplamente estudado e usado para esse fim, foram realizadas medições com os mesmos lubrificantes já utilizados, na condição de aplicação da lixa 220. Para todos os testes com o ensaio DST foram usadas tiras de chapas de 800x30mm de dimensão. Os dados obtidos pelo ensaio foram os deslocamentos, as forças atuantes em cada lado da chapa e o torque no pino. A figura 58 mostra os resultados de força de cada lado da chapa por tempo obtidos para os 4 lubrificante mais o resultado com o pino livre. O número 2 do lado do lubrificante representa a força de atuação e o número 1 representa a força de contra-tensão.

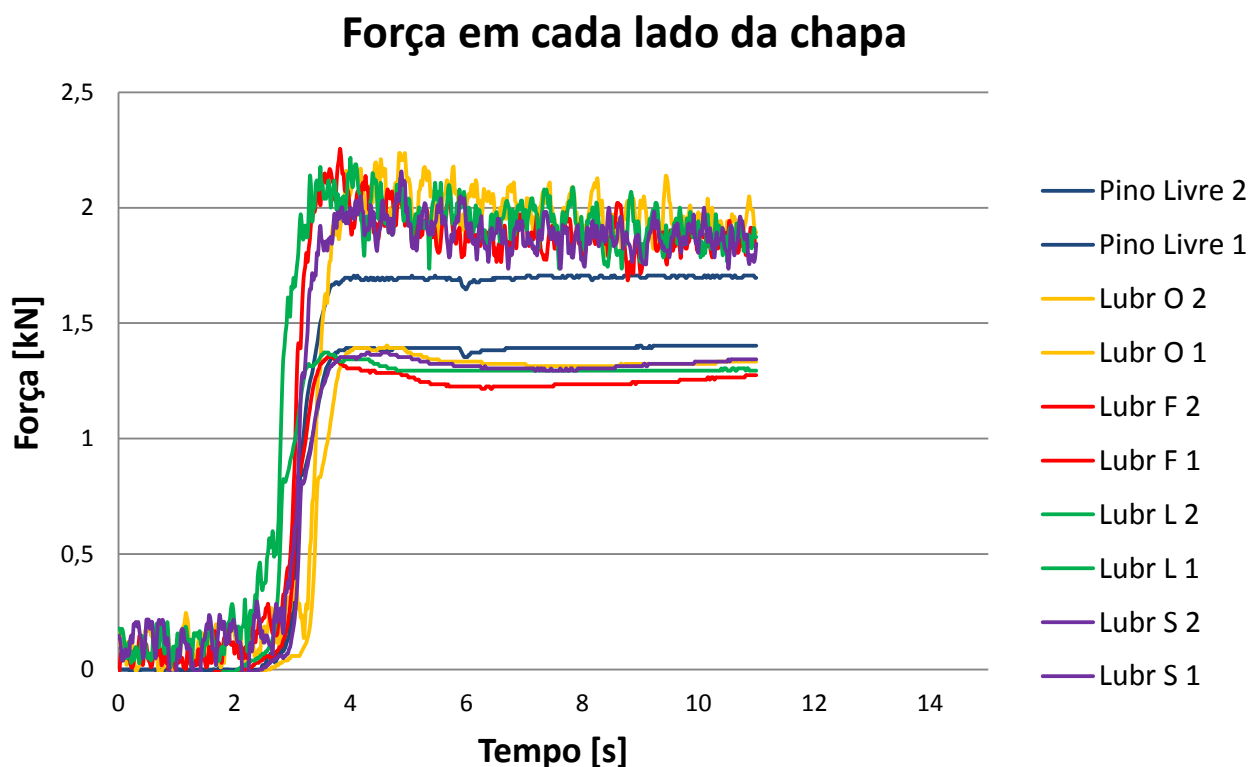


Figura 58. Ensaio DST com lubrificantes diferentes.

Pela figura 58 é possível notar que a força de atuação apresenta uma oscilação muito forte em comparação a força de contra-tensão, o que não acontece quando o pino pode girar livremente em torno do seu eixo. Isso indica a presença de dois efeitos que são a adesão ou aderência, no qual o material mais dúctil é “arrancado” da superfície de origem ou fica aderido na outra superfície e “emperramento” que é o fenômeno pelo qual o material gera tensões oscilantes toda vez que há uma

aderência e subsequente desprendimento de material da superfície original. Nessa circunstância, ocorre um desgaste entre as superfícies, visível a olho nu. A figura 59 mostra que houve a presença de marcas severas na tira de chapa que pode vir a gerar desgaste em ambas as superfícies. Já na figura 60, onde o ensaio foi realizado com o pino livre, não foi observada a presença de marcações de desgaste na chapa.

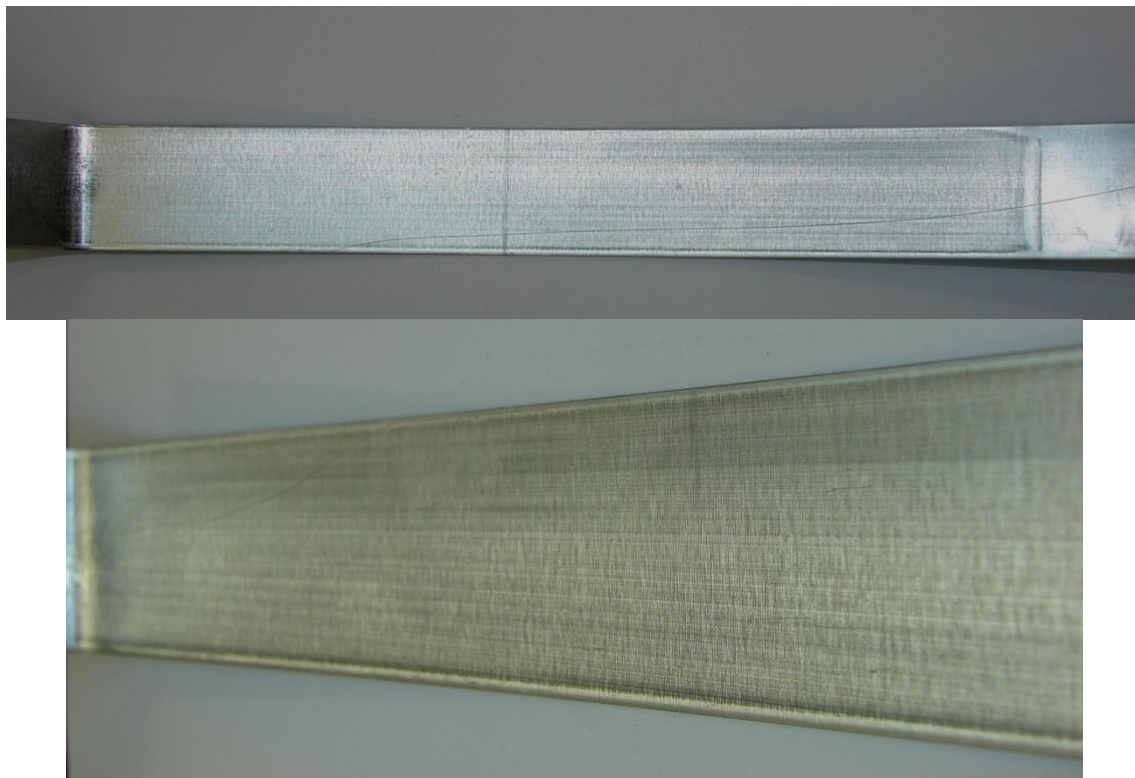


Figura 59. Marcações geradas durante o ensaio DST.



Figura 60. Ausência de marcações na chapa durante o ensaio DST com o pino livre.

Como foi descrito nas equações (8) a (12), as força de atuação e contra-tensão são necessárias para se obter o valor do coeficiente entre a chapa e o pino. Porém, a diferença entre a média das forças geradas por cada lubrificante foi muito pequena. Para tanto, foi obtido o torque atuante sobre o pino com base na pesquisa de Andreasen, Olsson *et al.* (2006). A Figura 61 mostra o torque obtido para cada lubrificante.

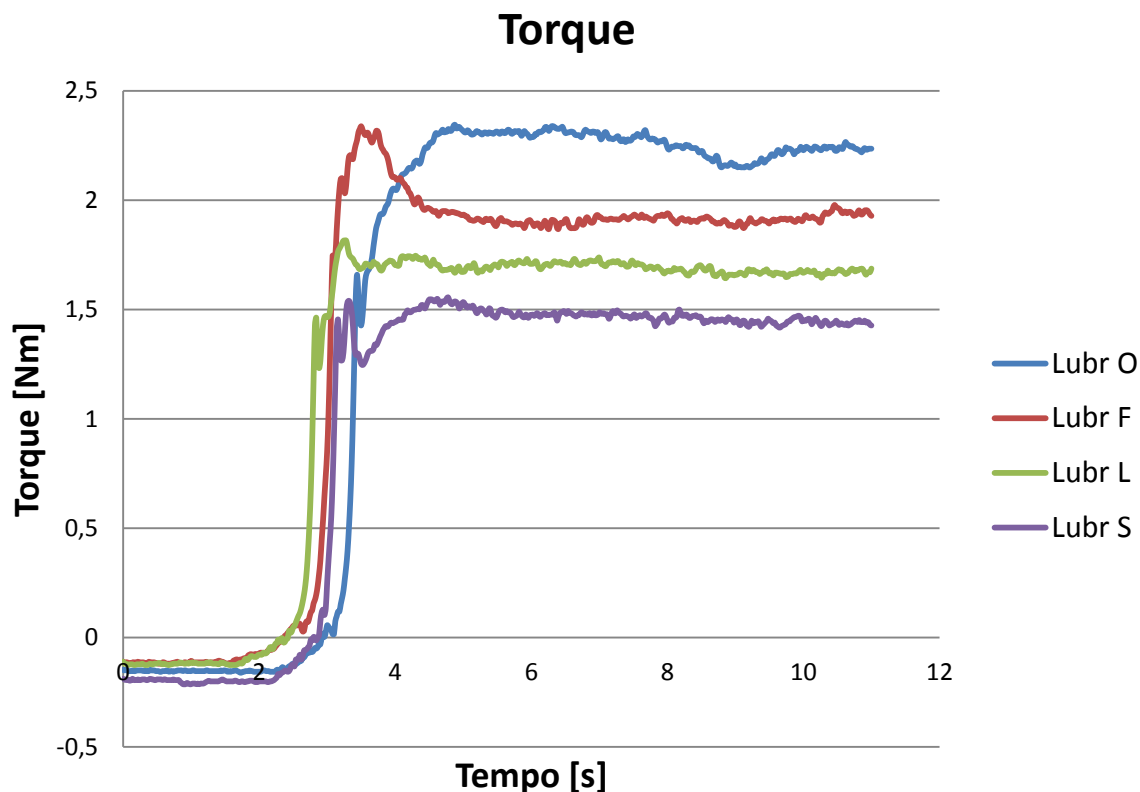


Figura 61. Torque medido para cada lubrificante durante o ensaio DST.

Pela figura 61 pode-se ver que o torque gerado durante os ensaios apresentou uma nítida diferença para cada lubrificante usado e que houve uma oscilação relativamente pequena no perfil da curva, possibilitando visualizar essa diferença existente entre cada lubrificante. Para que seja possível comparar os resultados dos gráficos da figura 58 e figura 61, é necessário obter a força de atrito gerada no pino para cada situação, ou seja, com e sem a utilização do torque. Para tanto, primeiro é necessário fazer a diferença entre as forças de atuação e contra-tensão no ensaio com o pino fixo, como mostrado na figura 62 (curva em verde) para o caso do lubrificante O. Após, faz-se o mesmo para o ensaio com o pino livre, como mostrado na figura 63. No segundo caso tem-se uma média de 300 N de força resultante entre a diferença das forças de atuação e contra-tensão (curva em verde). Por fim, desconta-se da curva em verde da figura 62 o valor de 300 N, que corresponde a força necessária para dobrar e desdobrar a chapa, já que o pino é livre para girar e o atrito é considerado desprezível. O resultado gerado é uma curva que descreve a força de atrito que é gerada no pino. Para o caso do torque, para se ter a força de atrito gerada no pino, basta dividir o torque medido pelo braço de alavanca, que corresponde ao raio do pino (0,0065m). Com isso, é possível fazer um gráfico comparativo entre a força de atrito gerada através da medição do torque e a força de

atrito gerada através da medição das forças diretamente na chapa. Esse resultado é mostrado na figura 64.

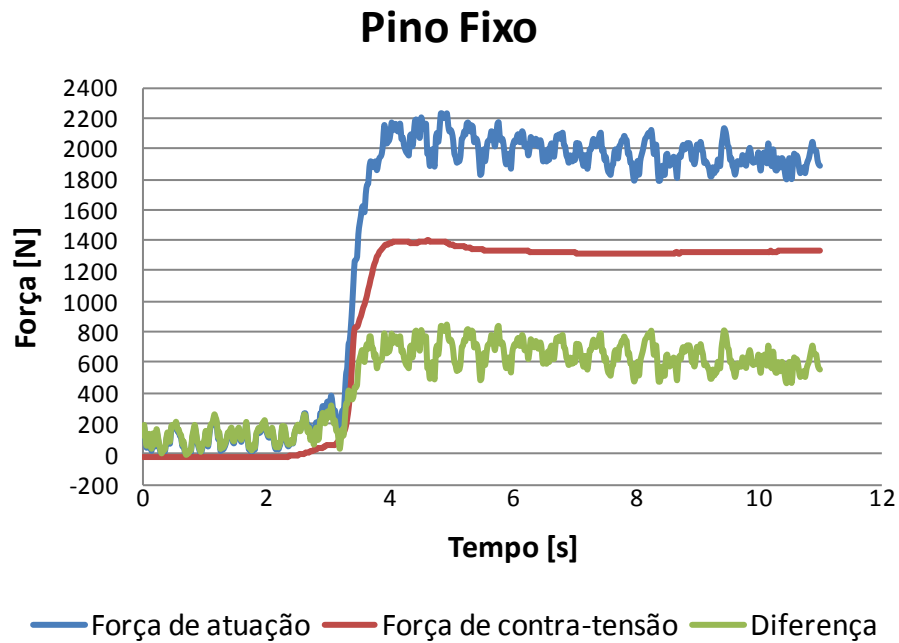


Figura 62. Curva da diferença entre a força de atuação e contra-tensão com o pino fixo para o lubrificante O.

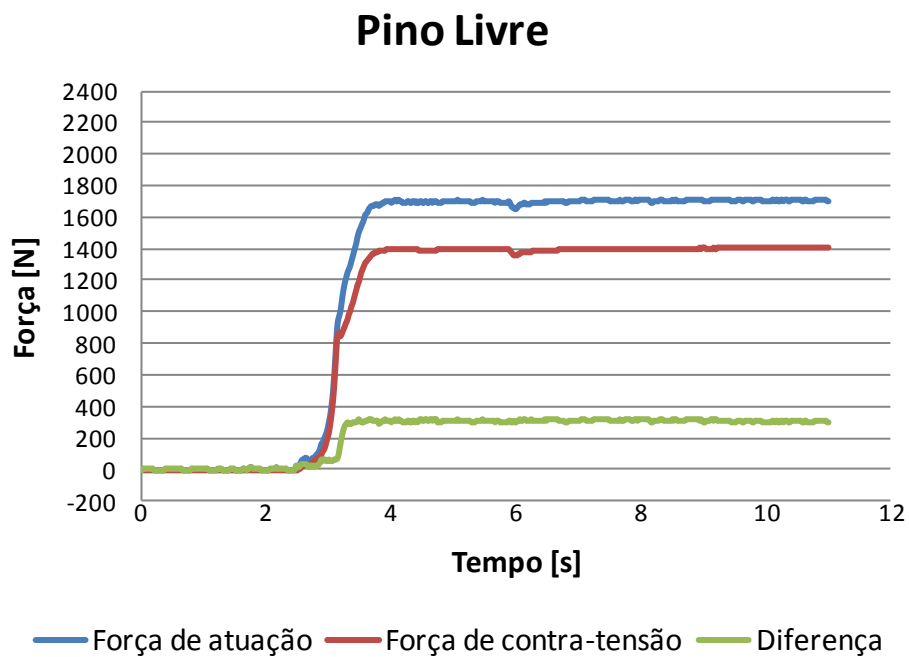


Figura 63. Curva da diferença entre a força de atuação e contra-tensão com o pino livre para o lubrificante O.

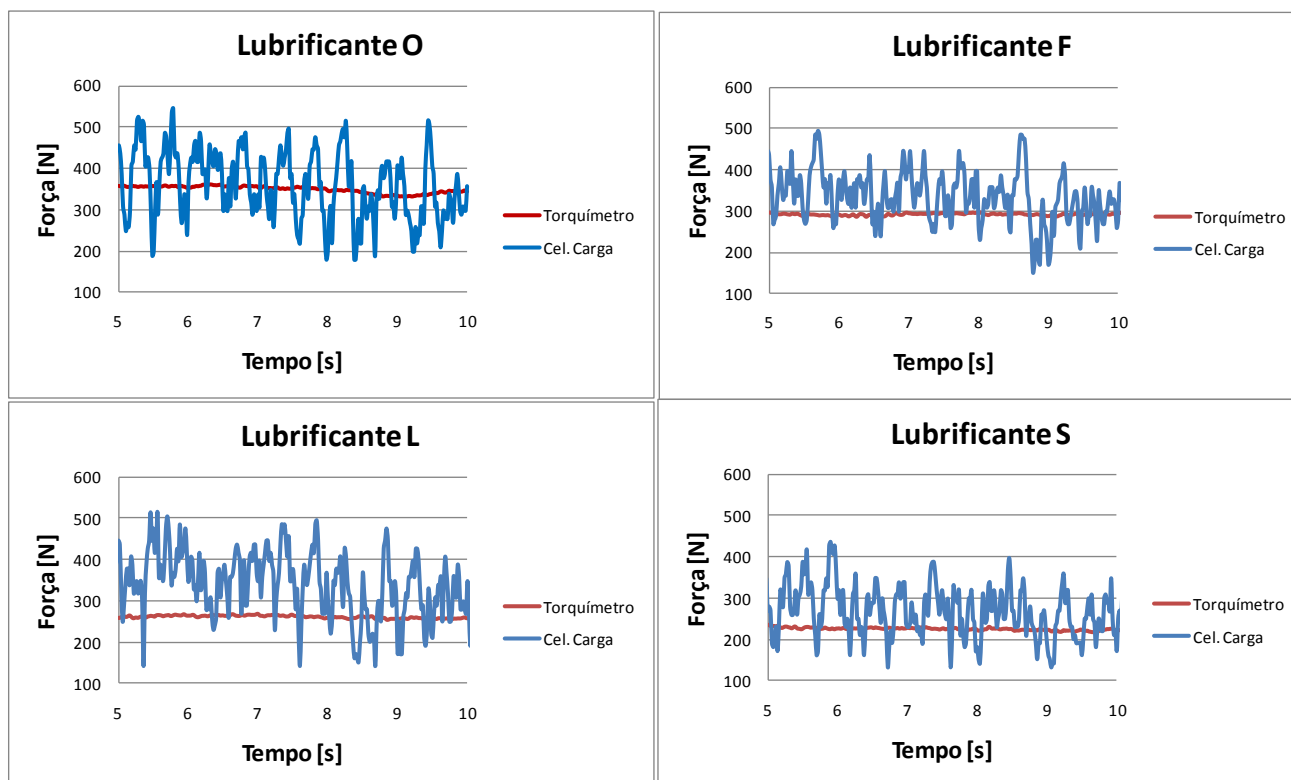


Figura 64. Comparação entre as curvas geradas pelo torquímetro e pelas células de cargas.

Pela análise da figura 64, pode-se ver que os resultados de força de atrito gerados pelas duas formas de ensaio, ou seja, medindo as forças no pino ou na chapa, são coerentes, uma vez que as curvas provindas das células de carga passam por valores próximos ao das curvas provindas do torquímetro.

Com esses resultados, foi possível calcular os coeficientes de atrito para cada lubrificante usando as diversas formulações descritas no capítulo 2.7 dessa tese. Os resultados são apresentados na tabela 13.

Tabela 13. Coeficientes de atrito calculados segundo 6 equações diferentes mais a equação de força máxima de estampagem.

Lubrificantes	Equação (8)	Equação (9)	Equação (11)	Equação (12)	Equação (16)	Equação(13)	Equações de força
Lubr. F	0,263	0,150	0,161	0,134	0,120	0,131	0,244
Lubr. L	0,255	0,146	0,157	0,132	0,102	0,112	0,219
Lubr. O	0,257	0,151	0,162	0,136	0,133	0,147	0,200
Lubr. S	0,228	0,115	0,124	0,104	0,090	0,098	0,160

A tabela 13 mostra que há uma considerável diferença no valor calculado do coeficiente de atrito dependendo do tipo de equação usada. A equação (8) mostra um valor de atrito que não é correspondente com os demais valores por não remover a força necessária para dobrar a chapa. Para as equações (9), (11) e (12), houve diferença apenas para o lubrificante S, os outros apresentaram valores de atrito semelhantes. Já para as equações (13) e (16) houve uma diferença visível pelo fato de essas equações considerarem o torque no pino. É possível observar também que o lubrificante O, que nos ensaios práticos foi o segundo de melhor desempenho, pelo ensaio DST passou a ser o de pior desempenho. A figura 65 mostra uma comparação entre os coeficientes de atrito calculados para cada equação e cada lubrificante, onde é possível observar de forma mais nítida o resultado que cada equação gerou no cálculo do coeficiente de atrito.

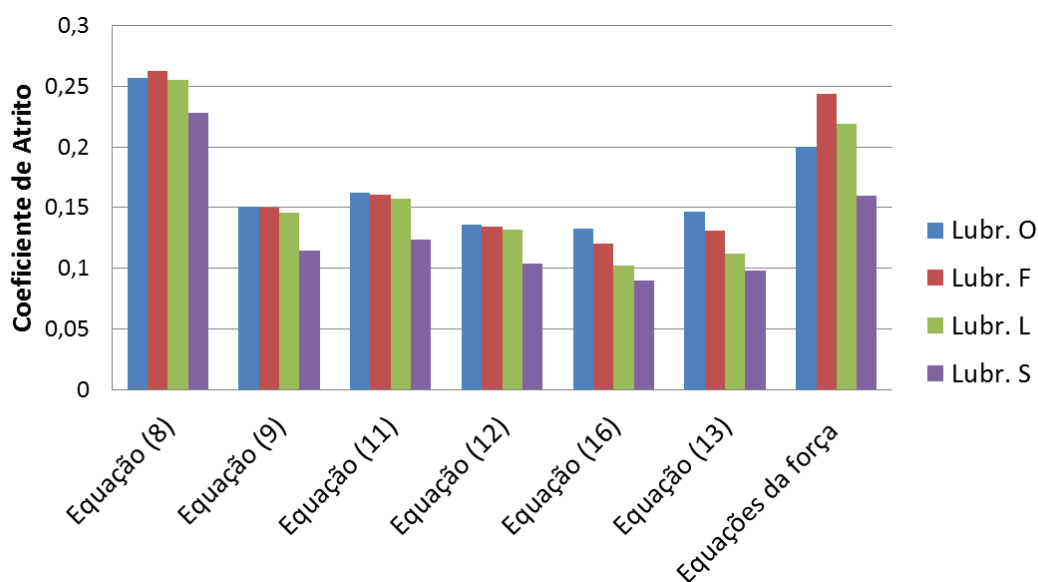


Figura 65. Comparação entre os coeficientes de atrito calculados para cada equação.

4.3. Avaliação da pressão de contato através de sensor de pressão

Outro ponto interessante considerado pelos autores das equações da tabela 13 é a pressão de contato entre o pino e a chapa. A pressão de contato é calculada pela equação (15) segundo os autores Han (1997); Jonasson, Wihlborg *et al.* (1998); Hao, Klamecki *et al.* (1999); Wihlborg e Gunnarsson (2000); Kim, Jain *et al.* (2004); Andreasen, Olsson *et al.* (2006); Miguel, Coello *et al.* (2009). Uma variação dessa expressão é mostrada na equação (29) que foi proposta por Wilson em 1996, obtida do trabalho Fratini, Lo Casto *et al.* (2006).

$$P = \frac{F_1 + F_2}{2WR} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \quad (29)$$

Existe ainda uma terceira variação da equação (15) que foi proposta por Sube (2000) e é mostrada na equação (30).

$$P = \frac{(F_1 + F_2) - F_b}{2WR} \quad (30)$$

Através da tabela 14 é possível visualizar que a pressão de contato apresenta praticamente os mesmos valores independentemente do lubrificante, ou seja, a atuação do lubrificante, por essas equações não influencia na pressão. A figura 66 mostra a comparação entre os resultados de cada equação. Outro fator de consideração é que a pressão de contato entre a chapa e o pino não é constante e também apresenta valores altos, como foi discutido anteriormente. Segundo os trabalhos de Sniekers e Smits (1997) e de Kim, Jain *et al.* (2004) essa pressão pode apresentar valores de até 124 MPa para o aço e de 90 MPa para o alumínio nas regiões de picos que correspondem ao início e final do ângulo de dobra da chapa. Esses valores foram obtidos com base em simulações numéricas e demonstram que a pressão de contato pode ter valores muito diferentes daqueles obtidos pelas equações (15), (29) e (30).

Tabela 14. Pressão de contato no pino segundo 3 equações diferentes. Valores em MPa.

Lubrificantes	Equação (15)	Equação (29)	Equação (30)
Lubr. F	8,5	6,0	7,7
Lubr. L	8,0	5,6	7,2
Lubr. O	8,3	5,9	7,5
Lubr. S	8,2	5,8	7,4

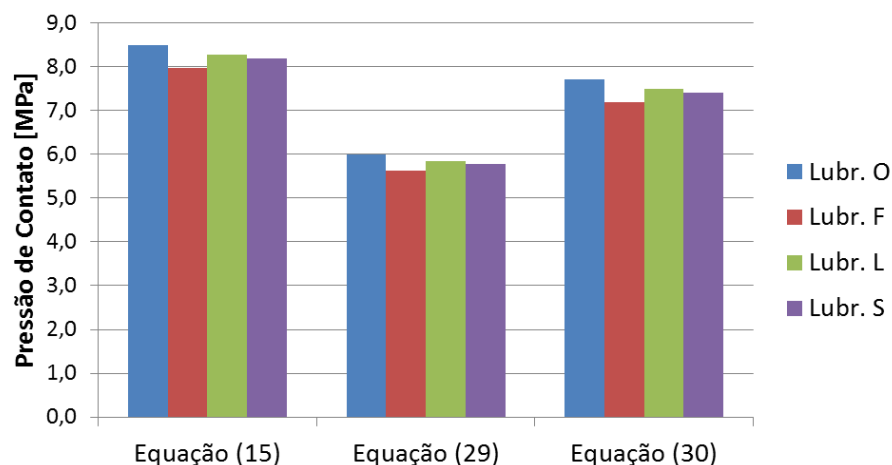


Figura 66. Comparação entre as pressões de contato calculadas para cada equação.

Com o intuito de verificar essa diferença na pressão de contato, foi usado um filme de polímero capaz de medir a pressão de contato entre duas superfícies. Esse filme é chamado de Pressurex® e é comercializado pela empresa *Sensor Products Inc.*

Pressurex® é um filme a base de mylar (poliéster) que contém uma camada de micro cápsulas. A aplicação da força sobre o filme faz com que as micro cápsulas se rompam, produzindo uma imagem instantânea e permanente de alta resolução topográfica da variação da pressão em toda a área de contato (figura 67). A intensidade da cor do filme de Pressurex ® está diretamente relacionada à quantidade de pressão aplicada a ele. Quanto maior for a pressão, mais intensa será a cor. O valor numérico da pressão é avaliado através de um padrão de intensidade de cor que é fornecido pelo fabricante (ver figura 68). O filme de Pressurex® tem de 0,1 a 0,2 mm de espessura, o que lhe permite ser aplicado em superfícies curvas também.

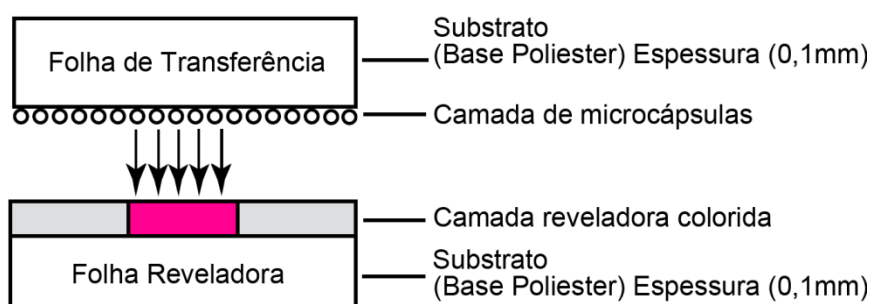


Figura 67. Vista da seção transversal do filme Pressurex®.

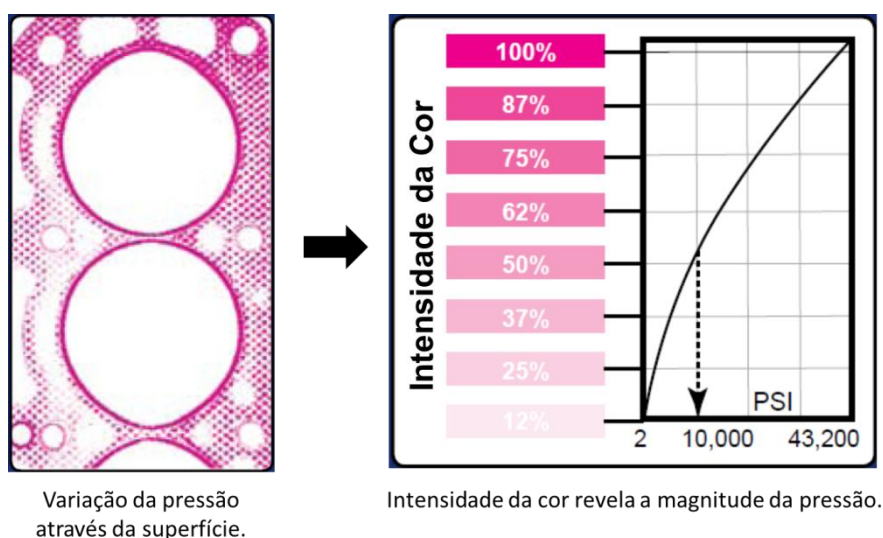


Figura 68. Medição da pressão através do Pressurex®.

Através dos filmes de Pressurex® foi possível a avaliação da intensidade da pressão de contato tanto na geometria estampada quanto na tira de chapa durante o ensaio DST. A figura 69 mostra a aplicação do filme de Pressurex® em três estágios da deformação da geometria estampada (para deslocamentos do punção de 20, 15 e 10mm) sendo que peça foi submetida a uma deformação prévia para chegar próximo da geometria final com o intuito de não deixar que houvesse um grande deslizamento do filme de pressão já que esse estava fixo a chapa. Como o filme de pressão atua sob condições estáticas, era preciso medir a pressão com um mínimo de deslizamento entre a geratriz e a matriz, por isso foi feita uma deformação prévia na chapa antes de se colocar o filme propriamente dito. A figura 70 mostra o resultado da aplicação dos filmes de Pressurex® na tira de chapa durante o ensaio DST sendo que o pino foi mantido fixo.

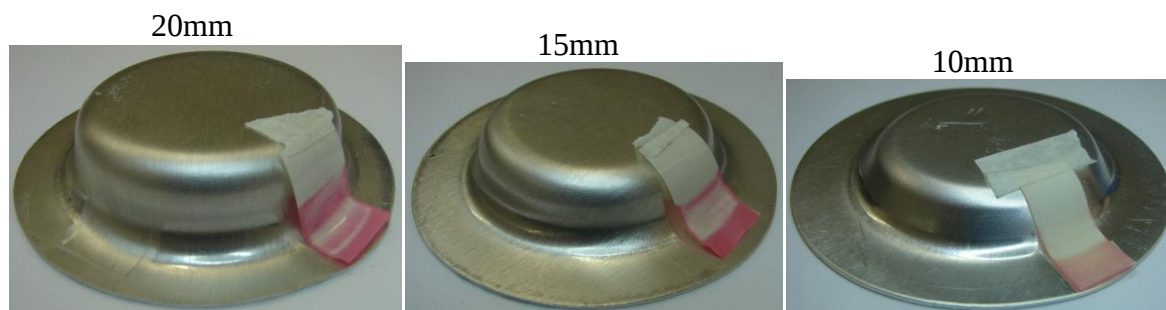


Figura 69. Aplicação do filme de Pressurex® em três estágios de deformação da peça.

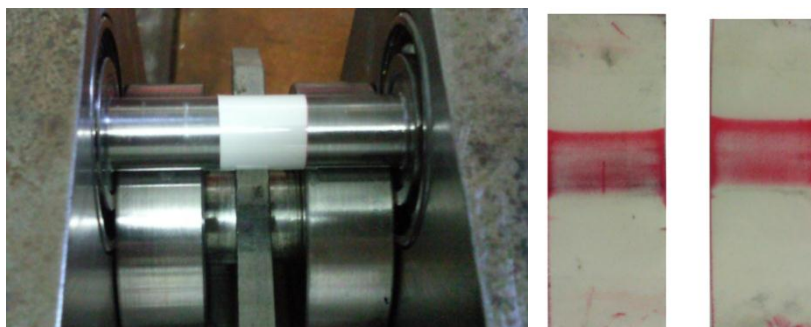


Figura 70. Aplicação do filme de Pressurex® na tira de chapa durante o ensaio DST.

Os resultados obtidos pela aplicação do filme de pressão são mostrados na figura 71, tanto para a peça estampada quanto para o pino. A medição do filme de pressão foi feita apenas para a peça com maior deformação (foto da esquerda da figura 69), pois a peça nesse estágio atingiu o máximo de força de estampagem e que corresponde ao máximo de tensões na região da entrada do raio da matriz. A primeira observação importante do gráfico da figura 71 é que o nível de pressão atingido fica em torno de 30 MPa, o que é muito superior aos valores obtidos pelas equações (15),

(29) e (30). Outra observação é que a atuação dessa pressão não se dá em todo o ângulo de dobramento, 90°, ela atua em uma região interna a esse ângulo. Isso gera um erro quando é efetuado o cálculo da pressão de contato, pois as equações (15), (29) e (30) consideram a área de atuação da pressão como sendo abrangido por todo o ângulo de dobra, o que não foi verificado. Esses resultados já haviam sido descobertos através de estudos prévios que foram mostrados anteriormente nesse trabalho, porém não havia sido feita nenhuma medição direta do valor dessa pressão, o máximo que foi obtido foi um resultado de tensão em Volts como no caso do trabalho de Coubrough, Alinger *et al.* (2002) e diversas simulações numéricas desse ensaio.

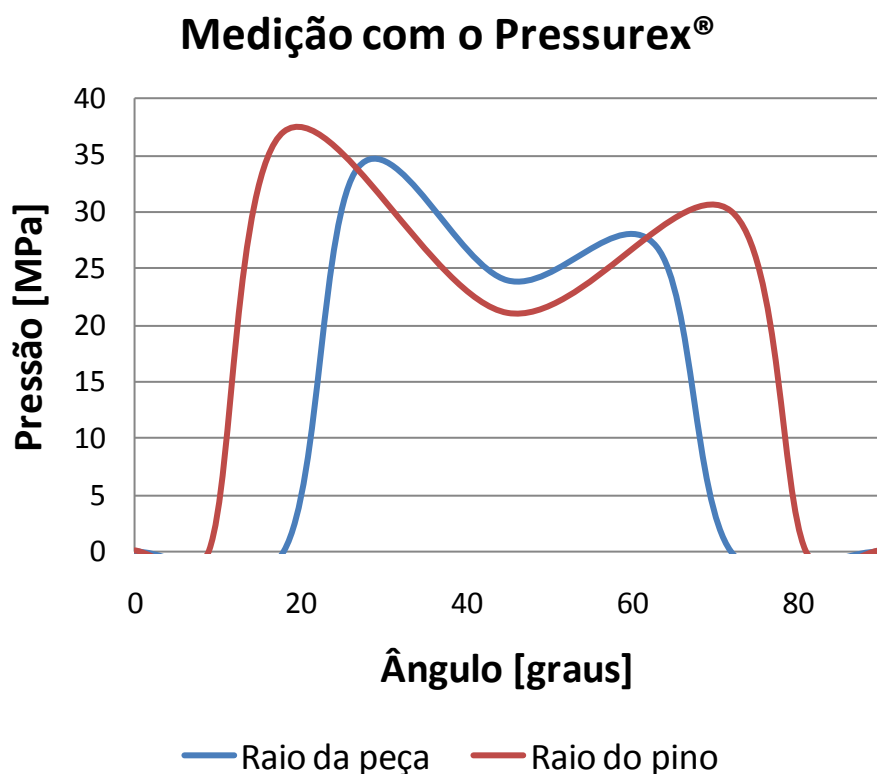


Figura 71. Resultados obtidos no pino e no raio da matriz através da aplicação do filme de pressão.

Para se ter uma ideia mais precisa da influência dessa pressão de contato para níveis de solicitação da chapa diferentes, foram feitas medições com o filme Pressurex® no pino do ensaio DST para 3 níveis de pressão. A figura 72 mostra a força de cada lado da chapa para essas 3 pressões, chamadas de “Máxima, Média e Mínima”. Foram feitos ensaios com o pino fixo e após com o pino livre. O nível “Máximo” corresponde à pressão que é exercida na chapa muito próximo da sua ruptura. O nível “Mínimo” corresponde ao mínimo valor de pressão que a máquina aplica a chapa, ou seja, apenas a força necessária para mover o cilindro hidráulico sem aplicação de carga. E, por fim, nível “Médio” corresponde a um valor intermediário entre o máximo e o mínimo. Pelas

curvas da figura 72 é possível observar que quando o pino está girando livremente, indeterminado da pressão, a diferença se mantém constante e que quando o pino está fixo somente a força de atuação é que aumenta. Já na figura 73 o valor do torque aumenta proporcionalmente com o aumento das pressões.

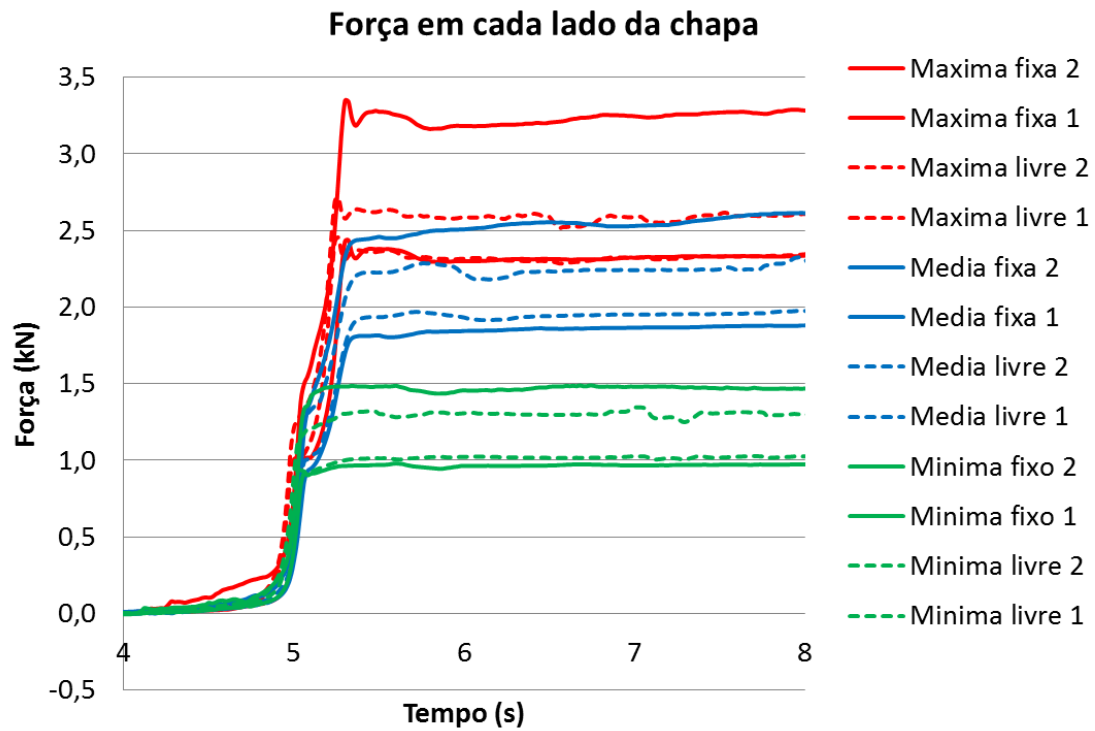


Figura 72. Força em cada lado da chapa medida durante o ensaio DST.

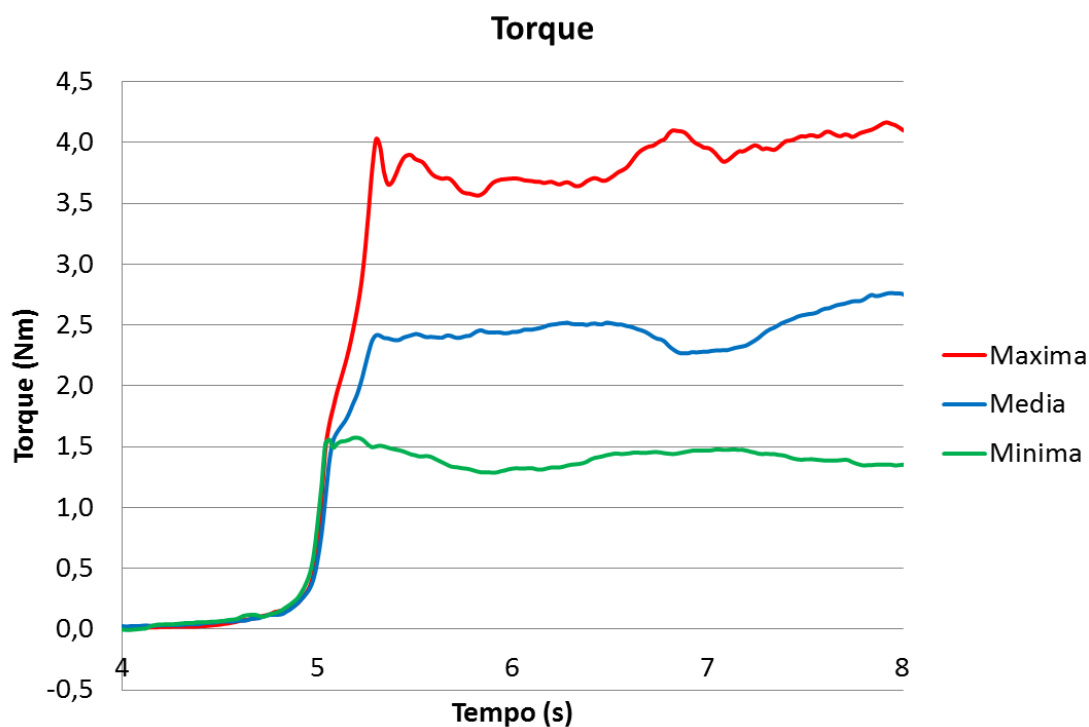


Figura 73. Torque medido sobre o pino durante o ensaio DST.

Como um dos objetivos desse trabalho é avaliar a pressão de contato atuante no ensaio DST, foi obtida a força vertical que atua sobre o pino tanto no caso fixo quanto no caso móvel. A pressão de contato será dada então dividindo-se a força vertical que atua na chapa pela área de atuação dessa força. A figura 74 mostra esses resultados. É possível notar que quanto maior forem as forças atuantes em cada lado da chapa, maior será a força vertical. É possível, ainda, notar que nas medições com o pino livre, as curvas da pressão “Média” e da pressão “Máxima” ficaram muito próximas, chegando a ser invertidas de posição. Isso se deve ao fato de que a célula de carga que mede essa força, faz uma medição média das pressões atuantes na chapa, ou seja, existem picos de pressão localizados em certas regiões que acabam promovendo um abaixamento da curva. Isso fica evidente na figura 75, que são os filmes de Pressurex® obtidos nesses ensaios. No caso da medição da pressão “Média” e da pressão “Máxima” para o pino livre é possível observar que a coloração, e portanto a pressão, são semelhantes ficando na ordem de 28Mpa cada uma. Pela figura 75 também é possível observar que para as medições com o pino fixo, existem dois picos característicos no início e no final do ângulo de dobramento da chapa, que está de acordo com os estudos de diversos autores, descritos anteriormente neste trabalho.

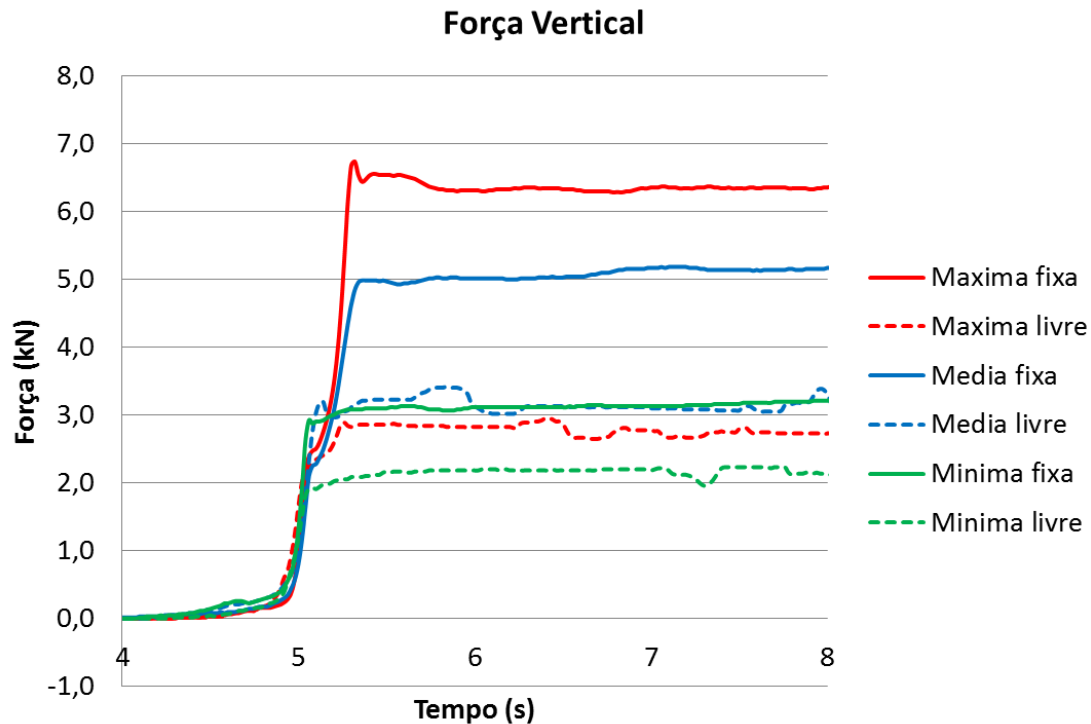


Figura 74. Força vertical medida sobre o pino durante o ensaio DST.

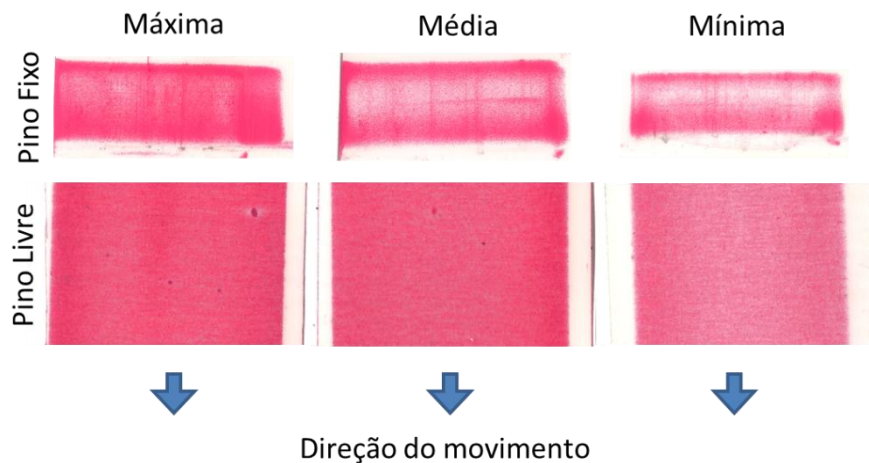


Figura 75. Filme de Pressurex® obtidos para cada nível de pressão com pino fixo e livre.

A figura 75 mostra o resultado visual das medições, ou seja, qualitativamente, porém, na figura 76, esses resultados são mostrados em forma gráfica quantitativa. Nesses gráficos fica evidente que há picos bem pronunciados na pressão de contato no raio de dobramento da chapa. As retas tracejadas de ambos os gráficos mostram como seria a média linear desses picos de pressão. O gráfico da figura 76(a) mostra o resultado quando a pressão começa e termina do zero e o gráfico da

figura 76(b) mostra qual seria essa média linear quando são desconsiderados os pontos inicial e final. Nessa circunstância (figura 76(b)) as médias lineares de pressão são bem mais altas que na figura 76(a).

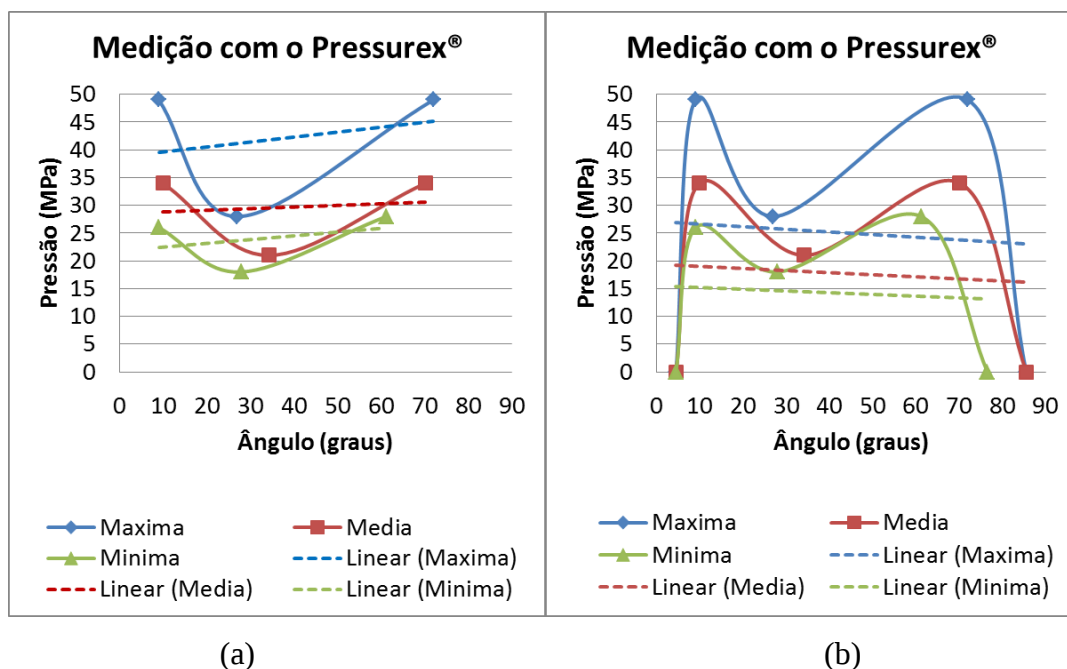


Figura 76. Resultados de pressão obtidos pelos filmes de Pressurex®. (a) gráfico com os valores considerando os pontos inicial e final zero. (b) gráfico desconsiderando esses pontos.

Com os resultados das medições da força vertical no pino é possível se estimar a pressão de contato que atua sobre o pino. A primeira observação importante obtida pela na figura 76(a) é que a área de contato do pino com a chapa não atua em todos os 90 graus, portanto ela deve ser corrigida. A tabela 15 mostra esses resultados. Foi calculada a pressão de contato da chapa com o pino para cada nível de pressão através das equações 30, 31 e 15, para a equação 15 com correção da área, com a força vertical medida pela área real mais duas situações que correspondem a pressão estimada mínima e a estimada máxima. Essas pressões estimadas foram obtidas através da figura 76(a) que corresponde a pressão estimada mínima, ou seja, considerando-se os pontos inicial e final zero e da figura 76(b) que corresponde a pressão estimada máxima, ou seja, sem os pontos inicial e final zero. É possível notar que se desconsiderarmos os pontos inicial e final zero haverá uma diferença entre 60 e 70% com relação ao medido com a força vertical. Entretanto se considerarmos os pontos inicial e final zero a diferença será mínima. A figura 77 mostra os valores da tabela 15 de forma gráfica.

Tabela 15. Pressão de contato para diversas formas de calculo diferentes. Valores em MPa.

Níveis de Pressão	Equação (29)	Equação (30)	Equação (15)	Equação (15) com Área Real	Força Vertical (FV)	Estimada mínima (EMi)	Estimada máxima (EMa)	Diferença entre a FV e a EMa (%)
Máxima	10,1	13,6	14,3	20,6	23,5	24,0	40,0	70
Média	8,0	10,6	11,3	16,4	18,8	18,0	30,0	60
Mínima	4,4	5,5	6,3	10,2	13,1	14,0	22,0	68

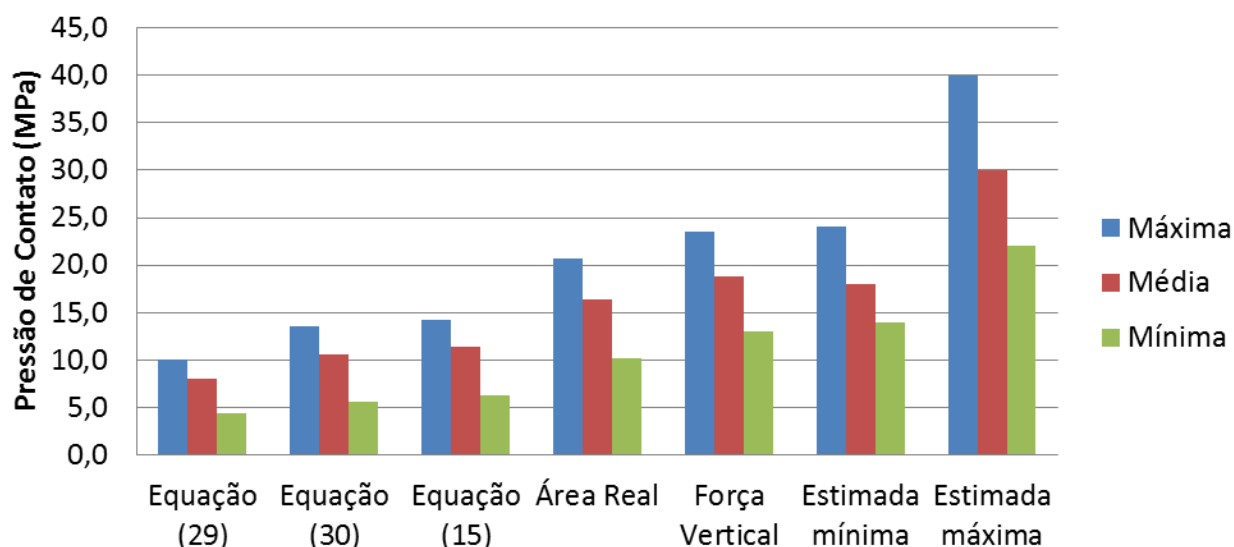


Figura 77. Pressão de contato para diversas formas de calculo diferentes.

Através das medições do torque e das forças em cada lado da chapa é possível calcular o coeficiente de atrito para cada equação descrita na revisão bibliográfica. A tabela 16 mostra esses resultados. É possível observar que o coeficiente de atrito permanece praticamente inalterado independente do nível de pressão aplicado. É importante salientar que o filme de Pressurex® atua com um elemento de interface separando as duas superfícies, ou seja, um lubrificante sólido a seco, já que o filme deve ser usado com as superfícies limpas e secas. Em outras palavras, o filme de Pressurex® mantém a proporção entre a força de atrito e a força normal independentemente da pressão que será aplicada, e isso é o comportamento esperado de um lubrificante de bom desempenho, onde a camada de lubrificação não se quebra com a pressão. Isso indica que para um lubrificante ter boa atuação, ele deve, além de diminuir o valor do atrito, mantê-lo constante durante o processo de conformação, o que seria o ideal para qualquer processo de conformação. Essa constatação é bastante benéfica para quem desenvolve lubrificantes pois a ideia não é apenas diminuir o atrito ao máximo mas sim mantê-lo em níveis aceitáveis mesmo em alta pressões, o que

melhora em muito a estampabilidade do material. A figura 78 mostra os valores da tabela 16 de forma gráfica.

Tabela 16. Coeficiente de atrito calculado por equações diferentes.

Níveis de Pressão	Equação (8)	Equação (9)	Equação (11)	Equação (12)	Equação (16)	Equação(13)
Máxima	0,213	0,159	0,171	0,151	0,139	0,154
Média	0,201	0,124	0,134	0,116	0,111	0,122
Mínima	0,267	0,131	0,141	0,115	0,113	0,124

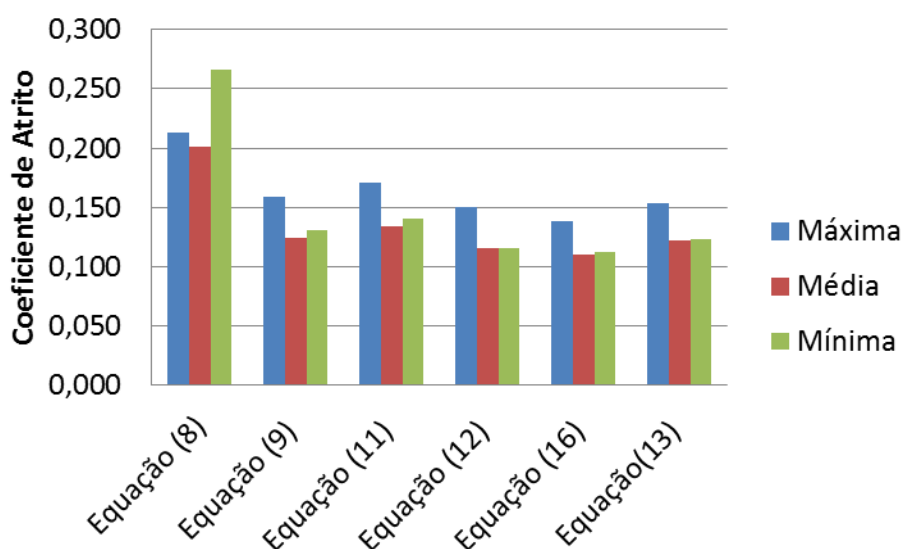


Figura 78. Coeficiente de atrito calculado por equações diferentes.

4.4. Medições com lixa de 1200

O resultado para as medições das forças em cada lado da chapa versus o tempo de duração do ensaio para cada lubrificante é mostrado na figura 79. A primeira observação é que os lubrificantes mantiveram uma força constante durante o ensaio, prevenindo o fenômeno da aderência de material que ocorreu para a lixa 220.

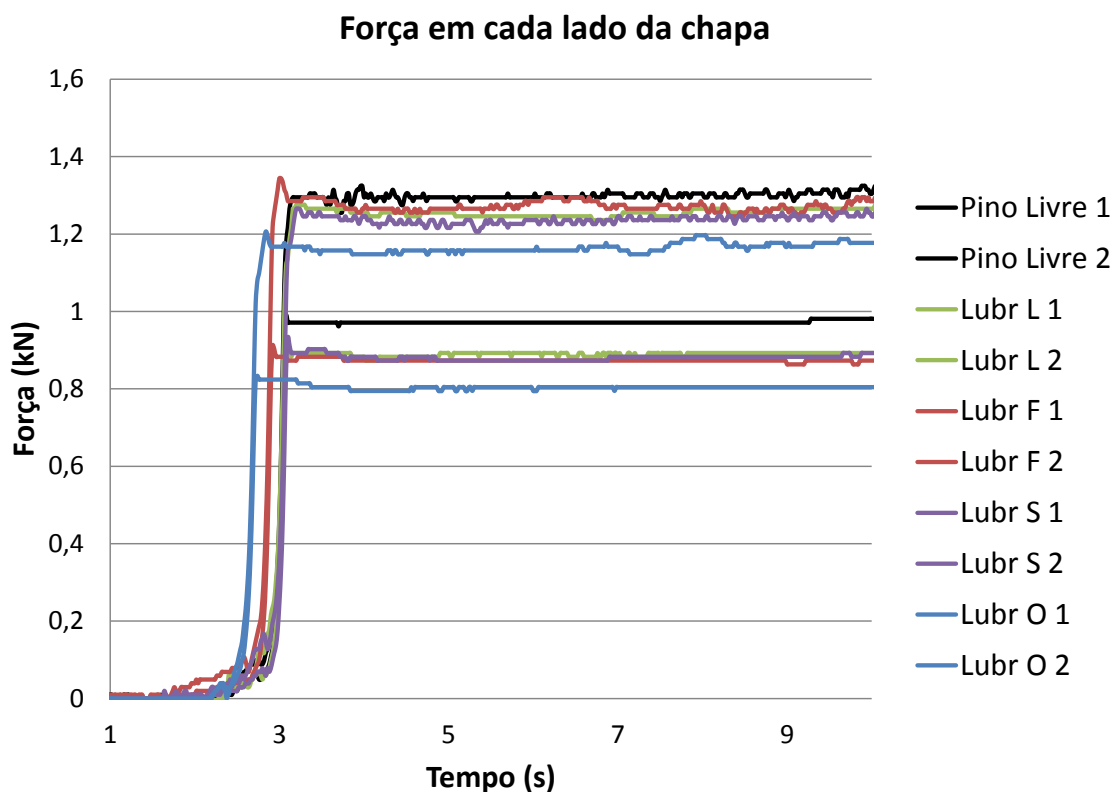


Figura 79. Forças em cada lado da tira versus tempo para cada lubrificante juntamente com o caso a seco.

Na figura 79 é importante observar que as força de atuação e contra-tensão estão se sobrepondo em vários lugares, o que dificulta a identificação do melhor lubrificante. Entretanto, o que se deve considerar para isso é na verdade o distanciamento entre as curvas, que corresponde a subtrair uma curva da outra. Quanto maior o distanciamento entre elas, maior será a força necessária para fazer a chapa deslizar pelo pino e, portanto, maior será a força de atrito gerada (ver tabela 17). A força de atrito mínima, que corresponde ao atrito de rolamento, ocorre quando o pino está livre para girar e o distanciamento entre as curvas para esse caso foi a mínimo registrado durante o ensaio.

Tabela 17. Distanciamentos entre as curvas da figura 79.

Lubrificante	Distanciamentos
Pino Livre	327
Lubr S	357
Lubr O	362
Lubr L	364
Lubr F	397

O resultado para as medições do torque versus o tempo de duração do ensaio para cada lubrificante é mostrado na figura 80. Como no caso da medição para a lixa 220 a medição do torque

favorece a avaliação dos lubrificantes, pois diminui a quantidade de medidas e deixa mais evidente o desempenho do lubrificante.

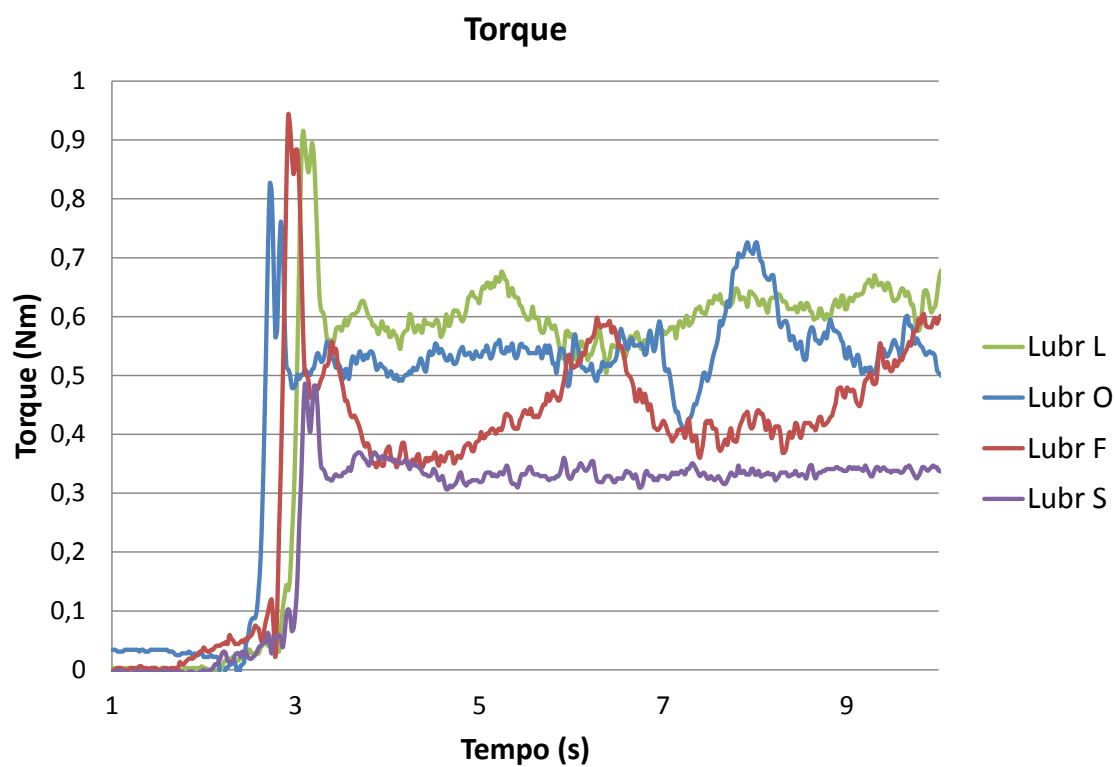


Figura 80. Torque no pino versus tempo para cada lubrificante.

O resultado para as medições da força vertical no pino versus o tempo de duração do ensaio para cada lubrificante é mostrado na figura 81. Ao contrario dos outros ensaios, os resultados das medições da força vertical no pino foram o oposto dos resultados anteriores. A explicação para esse fenômeno está ligada aos picos de pressão quando a chapa passa pelo pino. Como foi comprovado em diversos trabalhos e no presente estudo, durante o ensaio DST sempre ocorre dois picos de pressão no pino, que correspondem à entrada e saída da chapa nessa região. Esses picos tem maior ou menor intensidade dependendo da condição de lubrificação aplicada. Se o lubrificante tiver capacidade de equalizar as pressões máximas e mínimas, significa dizer que a célula de carga que registra uma média dessas pressões, irá registrar uma força maior, porém se as diferenças de pressões forem muito pontuais a célula de carga irá registrar uma força baixa. A figura 82 mostra esse fenômeno. A condição de equalizar as pressões será atingida quando o lubrificante apresentar bom desempenho, ou seja, ele diminui o atrito que promove a adesão de material e portanto uma pico de pressão muito acentuado.

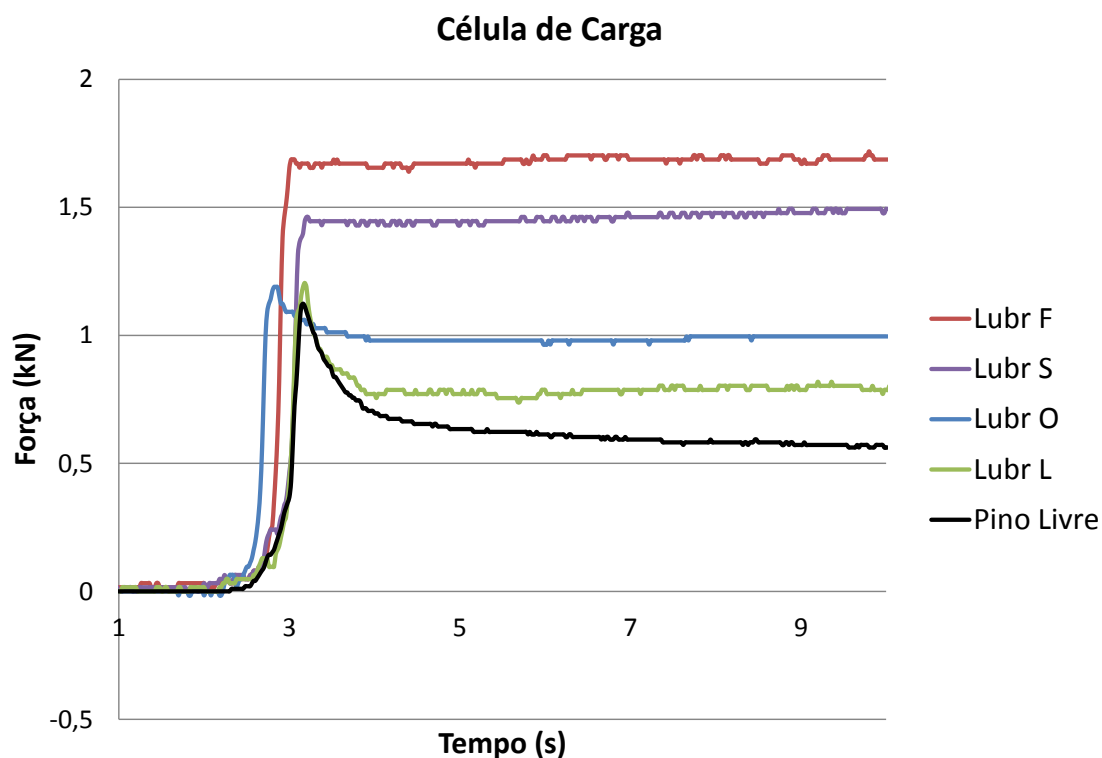


Figura 81. Força vertical no pino versus tempo para cada lubrificante.

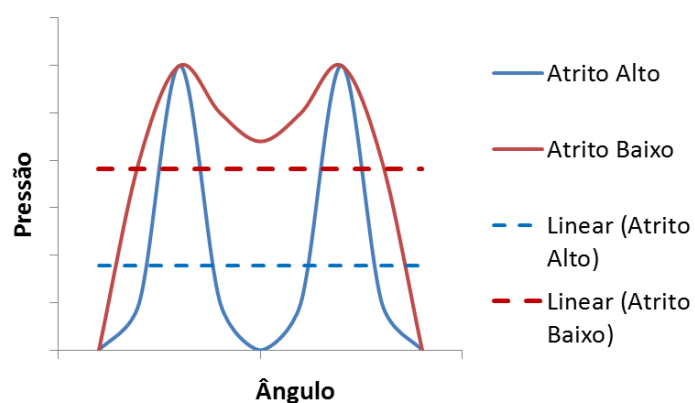


Figura 82. Representação esquemática da força média para um atrito alto e um baixo.

Outra observação importante na figura 81 é que a chapa ensaiada com o pino livre apresentou uma redução na força vertical ao longo do ensaio. Isso se deve ao fato que a chapa apresenta um grau de liberdade a mais que nos outros casos, isso faz com que a chapa apresente um alongamento uniforme e provoque uma redução na força. Isso é mostrado na tabela 18, onde é possível observar que a chapa no ensaio com pino livre apresentou o maior alongamento.

Tabela 18. Tamanho inicial e final da chapa para cada lubrificação aplicada.

	Tamanho Inicial	Tamanho Final
Pino Livre	800	809,4
Lubr L	800	809,3
Lubr O	800	808,7
Lubr F	800	808,6
Lubr S	800	808,6

Com os resultados das medições de força em cada lado da chapa e torque no ensaio DST foi possível fazer o cálculo dos coeficientes de atrito para cada formulação e cada lubrificante. A tabela 19 mostra os resultados para cada situação. A figura 83 mostra uma comparação entre os coeficientes de atrito calculados para cada equação e cada lubrificante, onde é possível observar de forma mais nítida o resultado que cada equação gerou no cálculo do coeficiente de atrito.

Tabela 19. Coeficientes de atrito calculados segundo as 6 equações diferentes

Equações	Equação (8)	Equação (9)	Equação (11)	Equação (12)	Equação (16)	Equação (13)	Equações da força
Lubr O	0,237	0,027	0,029	0,023	0,054	0,060	0,089
Lubr L	0,218	0,026	0,028	0,022	0,055	0,061	0,113
Lubr F	0,239	0,049	0,053	0,042	0,041	0,044	0,127
Lubr S	0,217	0,021	0,023	0,018	0,031	0,034	0,067

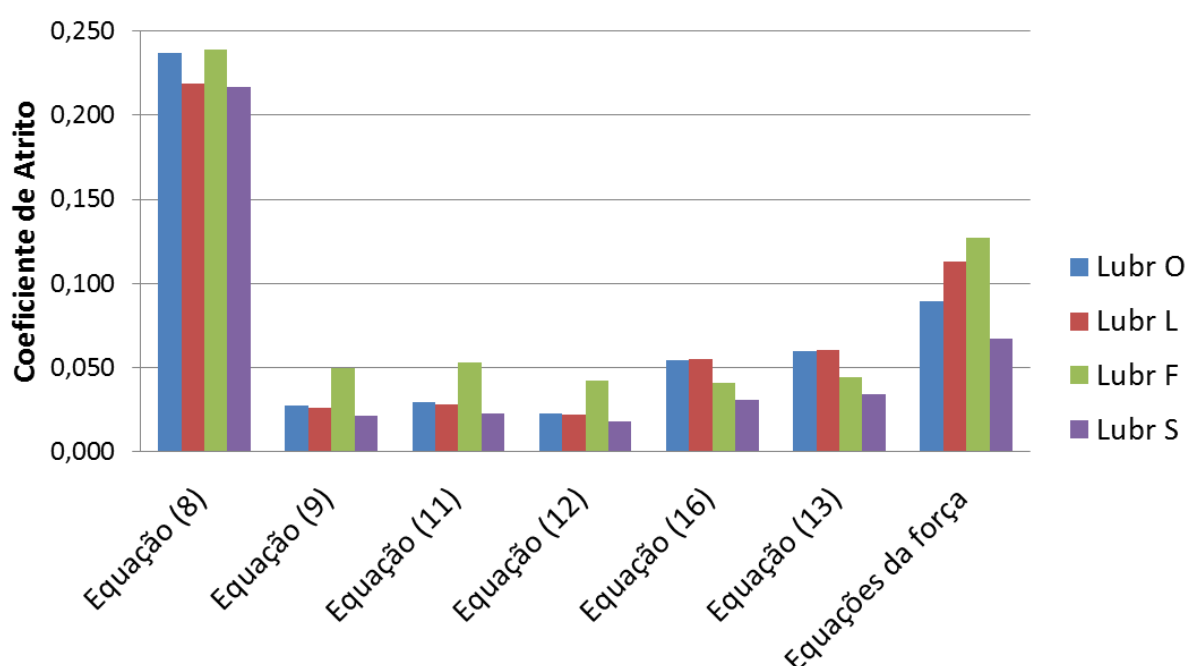


Figura 83. Comparação entre os coeficientes de atrito calculados para cada equação.

A tabela 19 mostra que há uma considerável diferença no valor calculado do coeficiente de atrito dependendo do tipo de equação usada. A equação (8) mostra um valor de atrito que não é correspondente com os demais valores por não remover a força necessária para dobrar a chapa. Para as equações (9), (11) e (12), houve diferença apenas para o lubrificante F, os outros apresentaram valores de atrito próximos. Já para as equações (13) e (16), houve uma diferença visível pelo fato de essas equações considerarem o torque no pino. Nesse caso o torque no pino funciona como se fosse um filtro que deixa a atuação dos lubrificantes mais visível se comparado com os outros métodos de cálculo que levam em consideração apenas as forças em cada lado da chapa. Por fim as equações de força máxima de estampagem apresentaram valores superiores aos medidos no ensaio DST, provavelmente por considerar o atrito como um valor global independente das pressões que atuam durante a estampagem da geometria de estudo.

4.5. Medições com pressão variável no ensaio DST - lixa 1200

Para se avaliar como é o comportamento do atrito para pressões que variam ao longo do tempo, foi feito também um ensaio DST com aumento de pressão. Para tanto, foram feitos novos ensaios com os mesmos lubrificantes sendo que a força de contra-tensão foi variada manualmente de um valor mínimo até que a chapa rompesse. A figura 84 mostra os resultados das forças medidas em cada lado da chapa. Nota-se que as curvas apresentam declives diferentes, isso provém do fato que a pressão foi aumentada manualmente, ou seja, para que as curvas tivessem um aumento igual, deveria ser feita eletronicamente ou mecanicamente, porém isso demandaria a instalação de equipamentos adicionais na máquina que faz o ensaio. Outra observação é que a pressão mínima do ensaio não começa gradualmente do zero, ela salta para um valor em torno de 1kN e a partir daí sobe até romper. Isso acontece pelo fato de se usar uma máquina hidráulica para realizar os ensaios e o valor de 1kN seria a força necessária para mover o óleo de dentro da camisa do cilindro. Para que a força inicie do zero e suba gradualmente seria necessário trocar o cilindro hidráulico por um pneumático. Nota-se também que o lubrificante L apresentou um aumento na força de atuação antes mesmo da chapa ser totalmente tensionada. Isso aconteceu provavelmente porque quando o ensaio é iniciado a chapa desliza sobre o pino até que haja força suficiente para puxar o cilindro do outro lado (que corresponde a força de contra-tensão) e nesse meio tempo, um atrito alto já havia sido estabelecido.

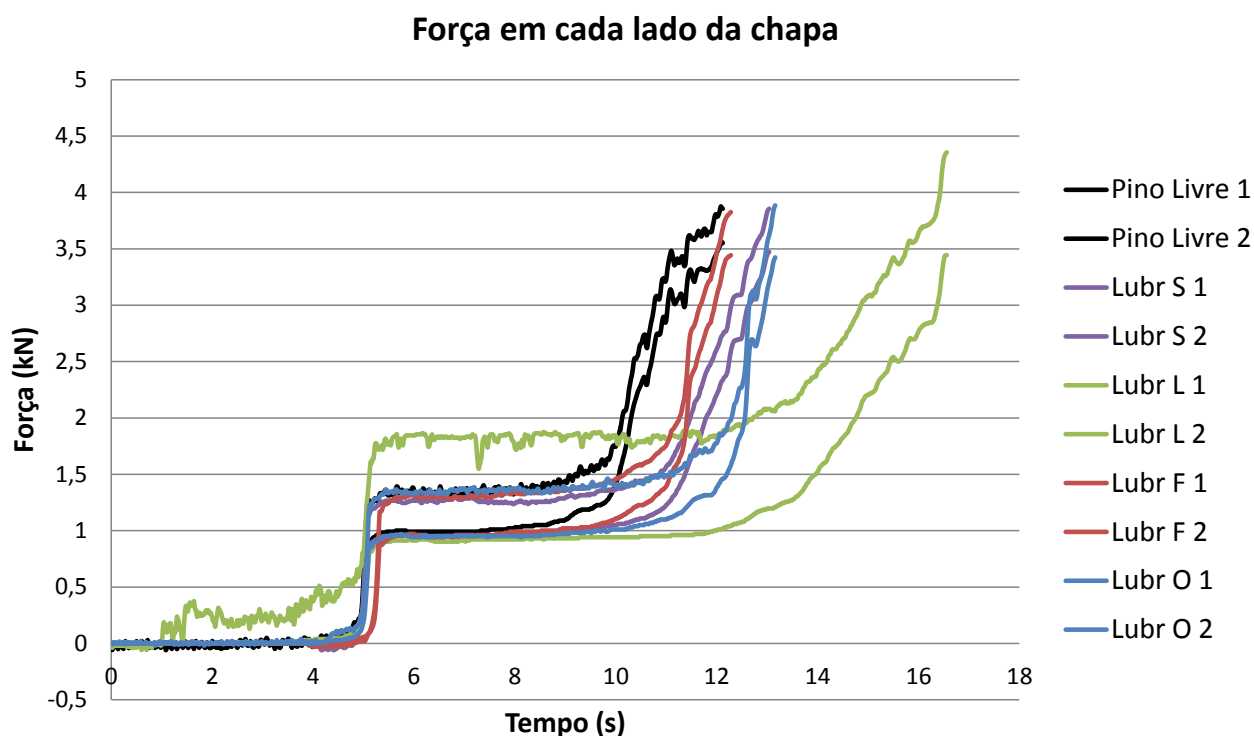


Figura 84. Medição da força em cada lado da chapa com pressão variável.

Assim como nos ensaios anteriores, o torque e a força vertical foram igualmente medidas. As figura 85 e figura 86 mostram os resultados. Também aqui os lubrificantes que geraram maior e menor torque se mantiveram os mesmos, assim como no caso da força vertical que manteve a inversão dos resultados com relação ao torque. Entretanto a medição da força vertical para o pino livre teve um valor bem maior em relação aos dados anteriores. Isso ocorreu provavelmente pelo fato das forças medidas em cada lado da chapa, do pino livre, apresentaram valores ligeiramente maiores que para os pinos fixos com lubrificantes. Isso, por sua vez ocorre pelo fato que a força de contra-tensão ter um grau de liberdade a mais para atuar.

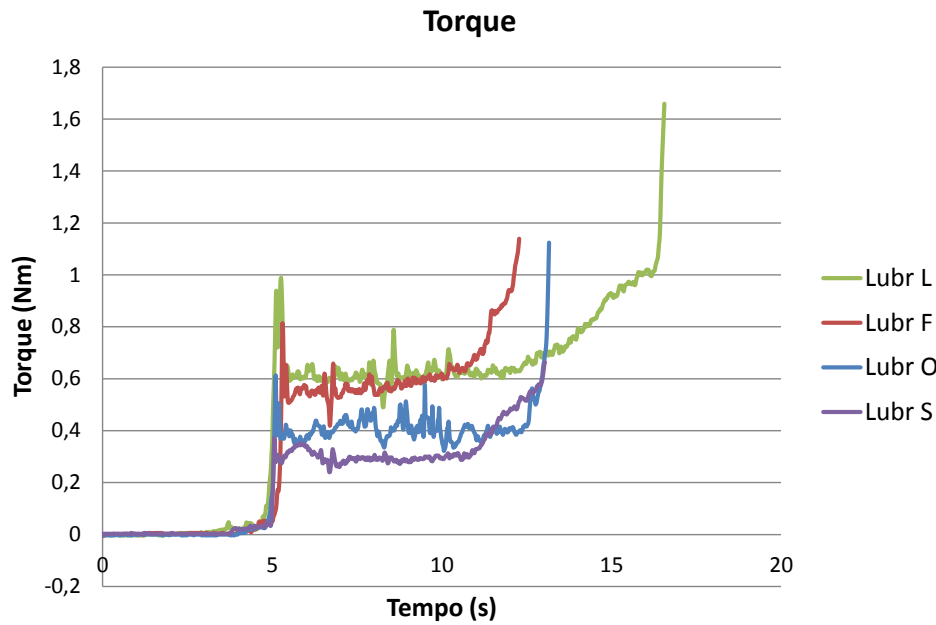


Figura 85. Torque medido no pino durante do ensaio com pressão variável.

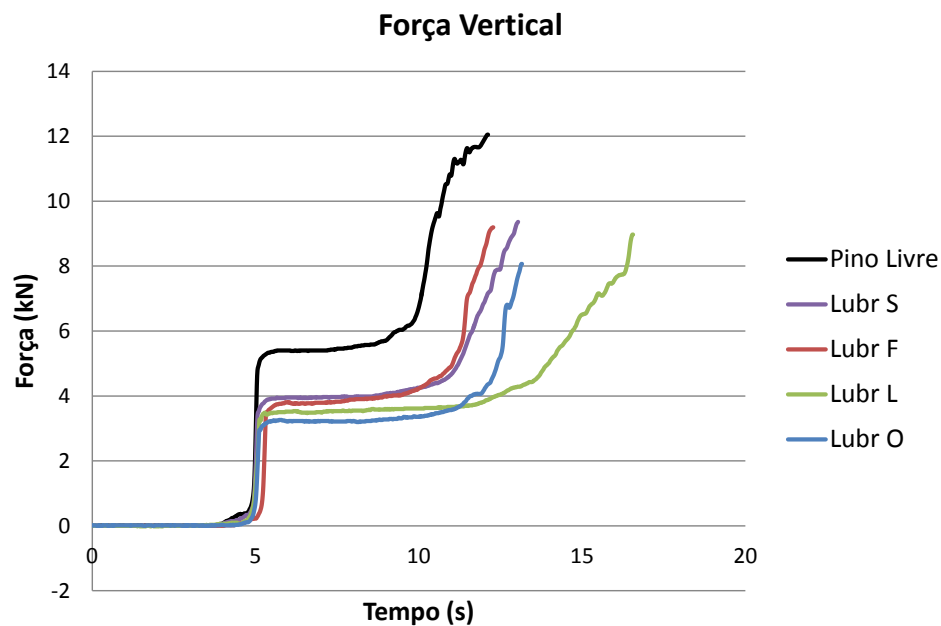


Figura 86. Força vertical medido no pino durante do ensaio com pressão variável.

Com o objetivo de se obter uma curva de atrito em relação a pressão de contato com o pino, o coeficiente de atrito foi calculado com base na equação (16) e plotado na figura 87. O gráfico da esquerda foi obtido através do cálculo da força vertical pela área do pino e o gráfico da direita foi obtido através da equação (15). Pelos gráficos da figura 87 é possível notar que com o aumento da pressão o atrito diminui para os dois casos, entretanto esse decaimento só é observado quando há um

significativo aumento nas forças de cada lado da chapa que ocorre após aproximadamente 10 segundos do início do ensaio como pode ser observado na figura 88. Isso acontece porque nesse nível de pressões a tensão cisalhante do alumínio passa a ter o valor da tensão de escoamento em cisalhamento puro e o coeficiente de atrito então passa a diminuir (veja a figura 6). A equação (16) foi selecionada para o cálculo do coeficiente de atrito, pois contabiliza o torque no pino e por ser a equação concebida mais recentemente.

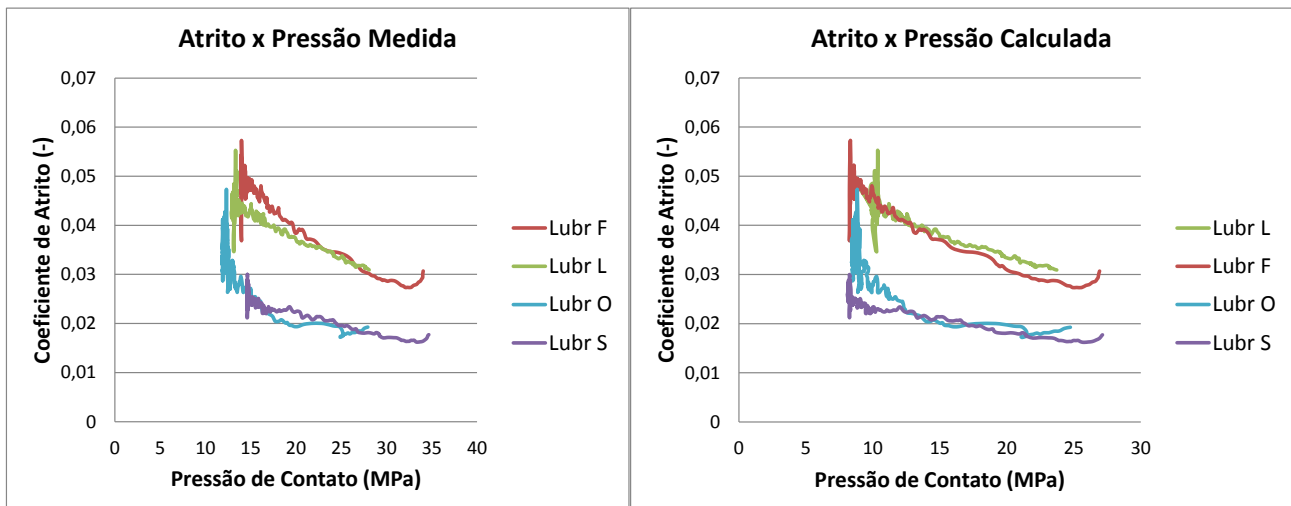


Figura 87. Gráfico do coeficiente de atrito pela pressão de contato no pino.

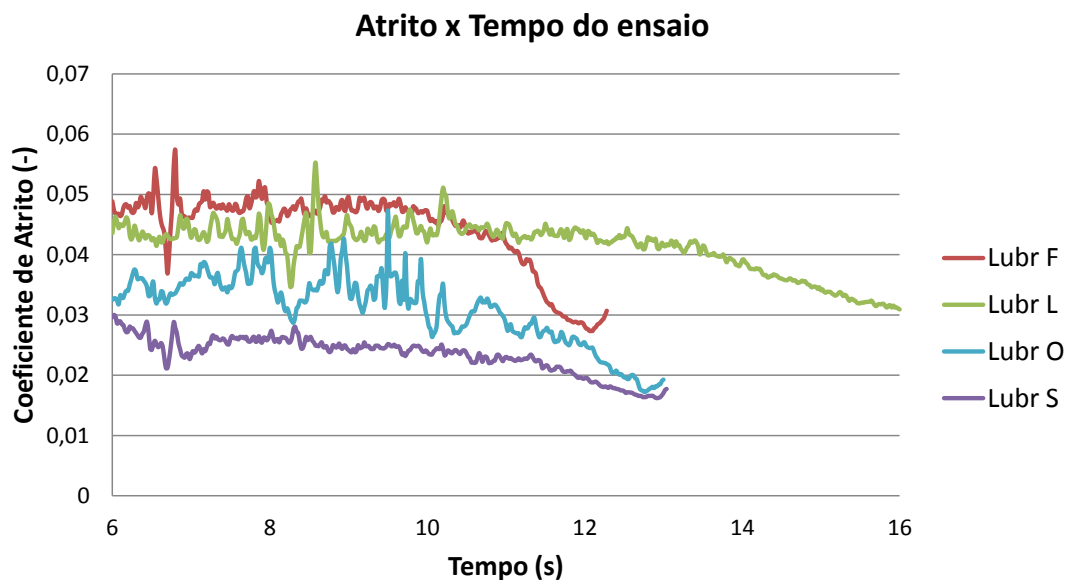


Figura 88. Gráfico do coeficiente de atrito pelo tempo do ensaio para pressões variáveis.

Outra explicação possível para a redução do coeficiente de atrito com o aumento da pressão de contato reside no fato de que à medida que a pressão aumenta, aumenta também a pressão a que o

lubrificante é submetido. Se as superfícies fossem perfeitamente lisas essa alta pressão faria com o lubrificante perdesse o seu potencial de lubrificação sendo expulso para as laterais da chapa. No entanto, a chapa apresenta algumas regiões que podem acomodar lubrificantes em “bolsões” regulares como pode ser visto na figura 89 (circulo em vermelho da figura 89b) e isso aprisiona-o durante o contato entre as superfícies laterais da rugosidade da chapa. Com o aumento da pressão, o lubrificante que está aprisionado acaba por escapar desses “bolsões” e lubrificar as regiões de contato plano (circulo em vermelho da figura 89a), diminuindo assim o atrito.

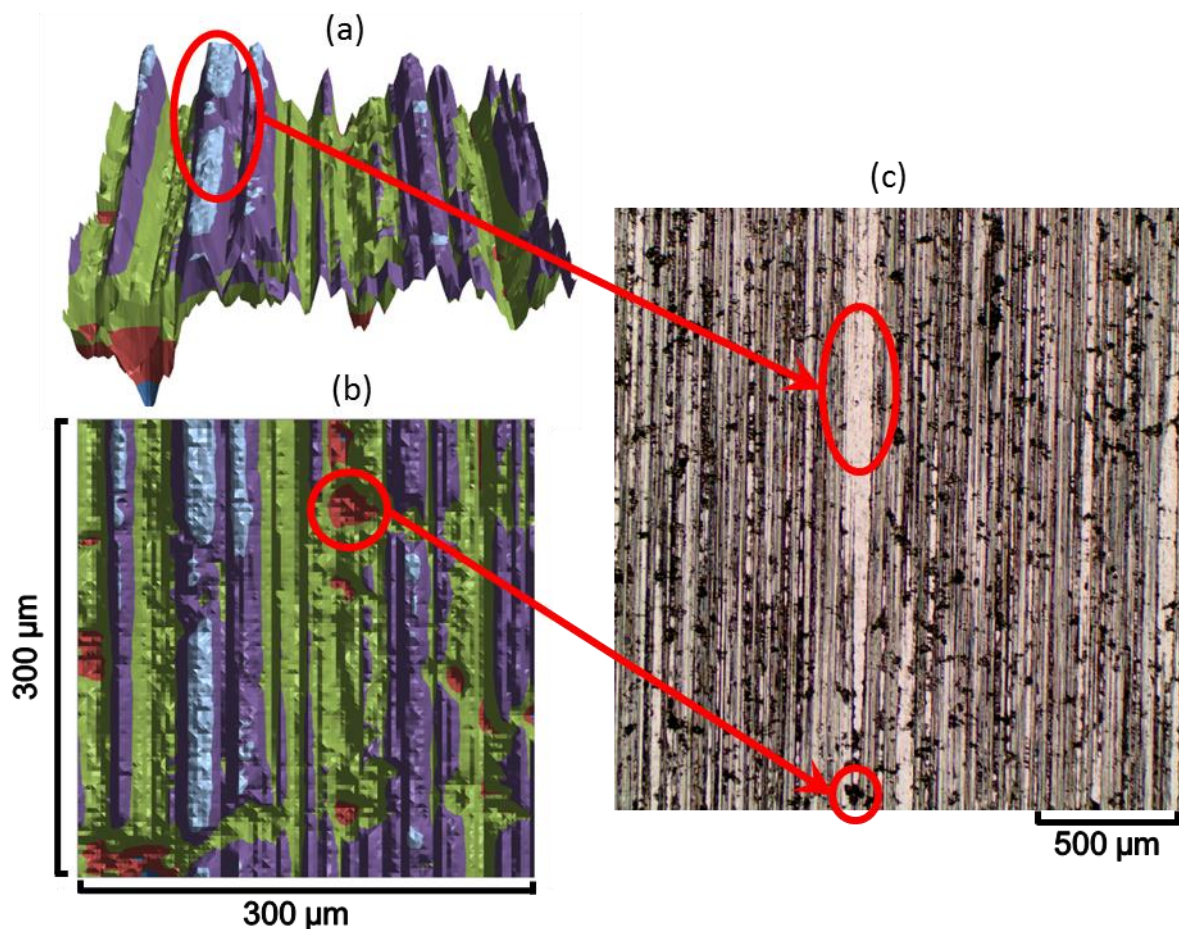


Figura 89. Visão microscopia da chapa não deformada. (a) vista em perspectiva do escaneamento 3D da chapa. (b) vista superior do escaneamento 3D. (c) visualização em microscópio ótico da chapa.

Dentre tudo que foi pesquisado até aqui, algumas observações se fazem necessário. Das diversas equações propostas para medir o atrito no ensaio DST, as que melhor apresentam resultados são as que consideram o torque na medição pois esse parâmetro diminui a necessidade de se fazer

dois ensaios, um com pino livre e outro com fixo e deixam a medição mais constante, evidenciando melhor o desempenho do lubrificante. A medição da força vertical também trouxe uma vantagem no cálculo da pressão de contato entre a chapa e o pino, pois as equações concebidas para isso são ineficazes (equações (15), (29) e (30)). Essa constatação foi possível através da medição com o filme de Pressurex[®] que também é uma forma bastante eficiente de se determinar as pressões de contato entre superfícies e pode ser de grande utilidade inclusive em outras áreas.

Com relação às equações de Siebel e Panknin (1956) é possível afirmar que elas dão uma ideia mais global da atuação do atrito durante o processo de conformação de um copo, porém não dão informações mais precisas sobre a atuação do atrito na região do raio de dobramento da chapa. Talvez, com uma medição do atrito plano, ou seja, com matrizes planas, simulando a região do prensa chapas, as equações de Siebel e Panknin (1956) poderiam ser melhor avaliadas, pois assim seria possível separar o atrito que é aplicado no prensa chapas do atrito gerado no raio da matriz.

O acabamento das matrizes e do pino também foi um fator importante na determinação do atrito, no presente trabalho fica claro que a lixa de menor granulometria (1200) foi a que gerou os menores valores de atrito, aliado, obviamente, a um bom lubrificante. No entanto, seria importante em trabalhos futuros, verificar até onde essa rugosidade gera resultados satisfatórios e isso deverá ser feito com uma pressão variável para melhor constatar o efeito do acabamento sobre a capacidade de conformação da chapa. Nesse sentido, é importante que fique claro que a medição do atrito para várias pressões é necessário e deve ser contemplado sempre que possível. Isso traz um melhor entendimento da atuação do atrito e pode, igualmente, servir de dados de entrada em *softwares* de simulação em estampagem no que acredita-se deixar a simulação mais realista.

5. CONCLUSÕES

Algumas conclusões podem ser feitas a cerca do trabalho realizado:

Com relação aos ensaios de estampagem:

À medida que há um aumento na força máxima devido às condições superficiais aplicadas às ferramentas de estampagem, há também um aumento progressivo da contribuição das forças de atrito, o que podem gerar rupturas prematuras da peça. Por outro lado, se for diminuído muito o atrito entre a chapa e as ferramentas, pode-se estar gerando graus de liberdade favoráveis para que o material apresente enrugamentos indesejados.

A simulação através do software DYNAFORM apresenta uma boa concordância com os ensaios práticos, porém à medida que se aumentam as forças de atrito e, portanto o coeficiente de atrito, o software tem a tendência a se distanciar da realidade. Isso acontece principalmente porque o software considera o atrito como uma constante durante todo o processo e, estudos em medições através de ensaios práticos do coeficiente de atrito indicam que isso não ocorre. Porém, se for possível identificar quais são os parâmetros que influenciam o atrito e carregar isso no software, é bem possível que ele consiga prever o que acontecerá nas peças simuladas com um mínimo de erro.

Através das simulações e também das medições das deformações geradas em uma peça, observou-se que para a maioria das condições de atrito houve deformações acima da curva limite de conformação (CLC) sem que haja ruptura da peça. Isso acontece devido à forma como a CLC é obtida. Nos ensaios Nakajima com a gravação de uma grade circular, as medições nunca atingem a parte de ruptura da chapa fazendo com que a CLC esteja posicionada, com relação ao eixo das ordenadas, um pouco abaixo da real capacidade do material.

Com relação aos ensaios DST:

A atuação de 4 lubrificantes foi avaliado usando-se a medição das forças nos dois lados da chapa, a medição do torque e a força vertical no pino no ensaio DST. O coeficiente de atrito também foi calculado usando-se as diversas equações propostas. Os resultados observados são:

A medição do torque traz uma melhora na visualização do desempenho dos lubrificantes visto que os menores torques gerados sempre estão associados aos melhores lubrificantes além de deixar o ensaio mais simples por não ter a necessidade de se ensaiar com o pino livre. Já na medição da força em cada lado da chapa isso fica difícil de ser constatado, pois as curvas se sobrepõem umas a outras.

O lubrificante S apresentou o melhor desempenho seguido dos outros. Nesse caso o melhor desempenho se refere ao lubrificante que gerou o menor atrito.

Na medição da força vertical no pino houve uma inversão de posições, ou seja, o melhor lubrificante gerou uma força alta. Isso se deve ao fato que uma boa lubrificação gerar uma equalização das forças prevenindo tensões localizadas muito altas.

No cálculo dos coeficientes de atrito, constatou-se que as maiores diferenças ocorreram quando o torque é contabilizado na equação. As equações (9), (11) e (12) apresentaram coeficientes de atrito praticamente iguais entre si. O mesmo aconteceu para as equações (13) e (16) entre si. Porém as equações (13) e (16) apresentaram valores diferentes das (9), (11) e (12) por considerarem o torque no cálculo. O cálculo com a equação (8) gerou resultados diferentes por contabilizar a força de dobramento da chapa, por isso não deve ser considerada para fins de cálculo do coeficiente de atrito.

Com relação a medição da pressão de contato com o filme Pressurex®:

O filme de Pressurex® se mostrou eficiente para prever as pressões associadas ao contato da chapa com o pino, que está em pleno acordo com os resultados obtidos por outros autores. A constatação da pressão de contato através do filme de Pressurex® mostrou que a medição da força vertical no pino está mais próxima dos valores reais que as equações usadas até então para isso.

Outra contribuição importante é que o filme de pressão mostra qual é a área exata de atuação da chapa no pino e que sempre vai ser menor do que a área calculada geometricamente não importando o nível de pressão aplicado. Isso traz uma contribuição importante na tentativa de se medir corretamente a pressão de contato.

Além disso, nas medições com o filme de Pressurex® constatou-se que coeficiente de atrito permaneceu praticamente constante para as diversas equações nos três níveis de pressão. Isso sugere que um lubrificante de ótimo desempenho não é necessariamente aquele que gera os menores níveis de atrito mas sim aquele que consegue manter o atrito constante com a variação da pressão aplicada. Essa informação poderá trazer melhorias no desenvolvimento de lubrificantes pois a partir daqui o importante não é tanto a redução ao máximo nos níveis de atrito mas sim o seu controle durante o processo, prevenindo a quebra da camada do filme de lubrificante para altas pressões, onde o material poderá sofrer defeitos gerados pelo excesso de atrito na interface chapa/matrizes.

Com relação às medições com pressão variável no ensaio DST:

Foi possível observar que as medições com uma máquina hidráulica não conseguem pegar as situações de pressão muito baixas pois a própria inércia do óleo dos cilindros hidráulicos gera uma pressão mínima para ser movimentada. Seria necessário fazer uso de uma máquina pneumática para se obter uma curva que inicie do zero e aumente gradualmente.

Para pressões altas o coeficiente de atrito calculado pela equação (16) vai diminuindo gradativamente não importando o lubrificante que se use. Isso está de acordo com as teorias mais recentes sobre o comportamento do coeficiente de atrito em conformação mecânica. Entretanto para baixas pressões não se tem esses resultados.

É importante ressaltar que a medição do torque representa um melhoramento em relação à medição com o pino livre, pois gera resultados mais limpos (com pouca oscilação) e reduz o número de ensaios necessários. Nesse sentido as equações que melhor se aplicam para calcular o coeficiente de atrito são as que aplicam o torque (equação (13) e (16)). Qualquer um das duas podem ser aplicadas, pois geram valores muito próximos e tem as mesmas variáveis. Assim como o torque, a medição da força vertical também representa um melhoramento, pois ela permite que se meça com maior exatidão a pressão de contato atuante no pino. Outra importante conclusão é que a medição do torque com pressão variável é fundamental para descrever bem o atrito durante o processo, pois em uma estampagem convencional a pressão de contato pode assumir diversos valores e isso deve ser mostrado no ensaio DST.

6. RECOMENDAÇÕES TECNOLÓGICAS SOBRE O ATRITO E LUBRIFICAÇÃO EM ESTAMPAGEM

Ao longo dos estudos feitos sobre atrito e lubrificação em estampagem, foram observados vários efeitos que são importantes ressaltar aqui, para que outros pesquisadores e para que a indústria em geral possam se beneficiar das informações geradas. Serão comentados a seguir alguns conhecimentos que devem ser observados por profissionais quando no uso de processos de fabricação por estampagem de chapas.

Para a indústria, a preocupação é sempre se obter maior produtividade com o mínimo de desperdício de material e o mínimo de falhas e isso está intimamente ligado a estampabilidade da chapa. Para aumentar essa, é necessário que se aumente a capacidade do material distribuir as tensões na superfície da chapa (e conseqüentemente no seu interior), que por sua vez, depende das condições superficiais (governado pelo atrito) na interface chapa/ferramentas. Nesse sentido, os *softwares* de simulação são muito úteis para prever o comportamento da chapa antes da construção das matrizes, o que promove a redução no tempo de desenvolvimento e custos associados. No entanto, é preciso conhecer o máximo de propriedades do material, pois essa é a primeira fonte de erro desses *softwares* assim como usar um modelo de atrito eficiente que é a segunda fonte de erro. É importante saber que os *softwares* de simulação atualmente não são capazes de dar sugestões de melhorias, essa tarefa deve ser do próprio especialista, o *software* dirá apenas se o que foi planejado irá funcionar. Para isso, o especialista deve saber se os resultados da simulação fazem sentido, caso contrário deve-se procurar por fontes de erros. Estudos recentes, como no trabalho de Hoon Kim, Hyun Sung et al. (2010) e Kim, Sung et al. (2011) foi demonstrado que quando se usa aços de alta resistência, os *softwares* convencionais de simulação tendem a divergir bastante da realidade por não considerarem efeitos como a taxa de deformação do material e a temperatura de aquecimento promovida pelo encruamento. Nesses materiais, o critério de falha mais amplamente usado, a CLC, não é o mais indicado.

Com relação à questão do uso de lubrificantes, os de melhor desempenho são aqueles que conseguem aliar aditivos adequados (anticorrosivos, aditivos para altas pressões, etc.) com uma alta viscosidade. Quanto maior a viscosidade, melhor o desempenho do lubrificante. Entretanto, é importante ressaltar que se o lubrificante tiver viscosidade muito alta, o processo de aplicação se torna difícil e demorado, bem como sua posterior remoção e isso é antiprodutivo. O ideal é que o lubrificante consiga ter um bom desempenho com uma viscosidade mediana. No trabalho feito por

Lee, Keum *et al.* (2002), foi constatado que a viscosidade do lubrificante tem um papel fundamental na redução do atrito, no entanto, eles observaram que o valor cai exponencialmente, ou seja, para viscosidades muito baixas, o atrito é alto, mas a medida que a viscosidade vai aumentando, o atrito vai tendo cada vez menos mudança até não mudar mais. Isso significa que uma alta viscosidade não significa que o lubrificante será muito bom. Pelo trabalho deles, valores entre 50 e 100cSt já são suficientes para reduzir o atrito a níveis baixos. A partir daí, o que irá melhorar ainda mais o desempenho do lubrificante serão os aditivos nele presentes.

É importante notar também, que a textura da superfície da chapa e das matrizes apresentam considerável contribuição no valor do atrito gerado. Isso indica que esse parâmetro deve ser levado em conta durante a preparação das matrizes e da chapa. Estudos mais aprofundados indicam que o formato da superfície das matrizes pode gerar uma redução da quebra da película de óleo, o que melhora o escoamento do material. Nesse caso, a superfície deve ser tal que consiga armazenar lubrificante em “bolsões” regulares. Recobrimentos feitos nas matrizes também podem melhorar bastante o desempenho do lubrificante, como é o caso da aplicação de cromo (ver Figura 19). É importante notar que uma superfície apenas cromada não basta para reduzir o atrito, é necessário se aplicar um lubrificante. Existem alguns tipos de cromo que podem ser usados para recobrimentos como é o caso do Carboneto de cromo (CrC) e do Nitreto de cromo (CrN), porém na pesquisa de Eriksson e Olsson (2011), foi constatado que o recobrimento de Carboneto de Cromo (CrC) juntamente com um substrato mais duro da matriz consegue manter o coeficiente de atrito estável mesmo para grandes deslocamentos do chapa.

Um dos fatores que aumentam o atrito em grande escala é a adesão de material, ou seja, o “colamento” (ligação) entre os metais. Esse efeito, segundo Szakaly e Lenard (2010), depende do tempo em que as superfícies ficam em contato. Quando o tempo de contato diminui, o mesmo acontece com o número das adesões geradas e nessa condição o atrito cai. Também segundo Szakaly e Lenard (2010), a quantidade de lubrificante aplicado na chapa influencia o atrito, porém, essa influência ocorre para níveis até, em torno de 5g/m². Após isso, o atrito não decai muito, permanecendo constante, mesmo se a quantidade de lubrificante for aumentada. Isso, para a indústria é bastante benéfico por diminuir os gastos com lubrificante e também com problemas ambientais.

Os principais problemas relacionados à adesão severa de material da chapa nas ferramentas, o chamado “galling”, expressão em inglês para o fenômeno de adesão severa de material e posterior ruptura, ocorre quando o lubrificante não consegue mais formar uma camada que reveste a superfície. Isso promove, entre outros problemas, marcas de desgaste na chapa e até sua ruptura dependendo da severidade desse fenômeno. Quando o lubrificante não consegue mais atuar

revestindo as superfícies, se diz que ocorreu a quebra da película de lubrificante. Mas porque isso ocorre? Uma das causas é o aumento da pressão de contato entre as superfícies que faz com que o lubrificante seja expulso dessas. Outra causa é o aumento da temperatura, o que faz com que o lubrificante perca viscosidade e se descole da superfície. O estudo feito por Andreasen, Olsson *et al.* (2006) mostrou que a 70°C, um lubrificante de base mineral perde totalmente sua capacidade de lubrificação, ou seja, há a quebra da camada da película de lubrificante. No entanto, como os processos de conformação de chapa, na sua maioria, são feitos a frio, onde a temperatura não passa de 45°C, não é difícil imaginar que o lubrificante não aquecerá muito. Entretanto, no estudo feito por Kim, Altan *et al.* (2009) através de uma simulação computacional da estampagem de uma chapa de aço, eles constataram que a temperatura na chapa, na região do raio da matriz pode chegar a 85°C, o que promove essa quebra da película de lubrificante. Alguns trabalhos sugerem que isso poderia ser resolvido através de superfícies que contenham “bolsões” para armazenar lubrificante. No entanto, não há estudos que mostram que para temperaturas acima de 70°C esses bolsões serão eficazes para manter os níveis de atrito baixo.

Em relação ao fenômeno de adesão, que se mostra difícil de combater, muitas vezes e que é um dos fatores que gera alto desgaste das matrizes, a pesquisa de Hou, Yu *et al.* (2010) mostrou que há dois parâmetros que se pode alterar para minimizar a adesão. No trabalho deles, foi mostrado que a força do prensa-chapas e a rugosidade média das matrizes têm forte influencia na adesão e que quanto maior forem esses parâmetros, maior será a chance de ocorrer adesão e, conseqüentemente, desgaste. É importante notar que a força do prensa-chapas é o principal fator que previne o enrugamento da peça, e que se for muito baixa, o desgaste será minimizado mas o enrugamento surge. No entanto, a força do prensa-chapa normalmente pode assumir valores dentro de uma faixa ampla sem que ocorram defeitos, nesse sentido, o seu valor deve ficar sempre o menor possível para diminuir o desgaste e prevenir o enrugamento.

Outro fator que influencia o atrito é a velocidade de deslizamento. É sabido que o atrito diminui com o aumento da velocidade de deslizamento e isso é devido ao aumento da espessura da película de lubrificante. Isso ocorre porque em altas velocidades o lubrificante consegue penetrar nas superfícies em contato, prevenindo a quebra da película de lubrificante, pois nesse caso a condição de lubrificação das superfícies se aproxima da hidrodinâmica onde só as características do fluido lubrificante é que governam o processo. Isso foi comprovado por Striback em 1902 através da curva de mesmo nome. O aumento da viscosidade do lubrificante também aumenta a espessura da película de lubrificante.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como existem muitos detalhes referentes ao ensaio DST que ainda não foram totalmente explorados, abaixo é proposta uma relação de trabalhos que podem ser executados a fim de aumentar os conhecimentos acerca do ensaio e também do atrito em estampagem:

- Analisar a pressão de contato no início da aplicação dessa pressão e comparar com simulações para avaliar o seu efeito no escoamento de material.
- Verificar se um atrito constante e mais alto é mais eficiente para o processo de estampagem que um atrito baixo mas variável.
- Aplicar o cálculo do atrito com as diversas equações para outros materiais.
- Usar o ensaio DST para analisar o efeito do retorno elástico de diversos materiais.
- Verificar se a largura da tira de chapa, no ensaio DST, influencia nos resultados, visto que a borda da chapa pode distorcer os resultados.
- Analisar o efeito de diversos recobrimentos superficiais no atrito pelo ensaio DST.
- Analisar o efeito da velocidade de deformação no coeficiente de atrito.
- Fazer o ensaio DST com redução de largura da tira de chapa para representar melhor o processo de embutimento e verificar se isso gera diferença no coeficiente de atrito.
- Analisar diversos parâmetros de rugosidade superficial como Ra , Ry , Rz , em relação ao atrito.
- Aplicar uma textura superficial na chapa e ver se isso melhora a estampabilidade do material.
- Analisar formatos de pino diferentes do cilíndrico (em forma de elipse, por exemplo) para ver se algum outro formato diminui por si só o atrito.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREASEN, J. L. *et al.* Quantification of galling in sheet metal forming by surface topography characterisation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* [S.I.], v. 38, n. 5-6, p. 503-510, May-Jun 1998.

ANDREASEN, J. L. *et al.* Bending under tension test with direct friction measurement. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture* [S.I.], v. 220, n. 1, p. 73-80, Jan 2006.

AZUSHIMA, A. *et al.* Friction behavior of aluminum-coated 22MnB5 in hot stamping under dry and lubricated conditions. *Journal of Materials Processing Technology* [S.I.], v. 212, n. 5, p. 1014-1021, 2012.

BAY, N. *et al.* Lubricant test methods for sheet metal forming. *Tribology International* [S.I.], v. 41, n. 9-10, p. 844-853, Sep-Oct 2008.

BERGLUND, J. *et al.* Milled die steel surface roughness correlation with steel sheet friction. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [S.I.], v. 59, n. 1, p. 577-580, 2010.

BOWDEN, F. P.; TABOR, D. *The friction and lubrication of solids*. New York: Oxford University Press, 1954.

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

CARLSSON, P. *Surface Engineering in Sheet Metal Forming*. (2005). Ph.D. thesis - Faculty of Science and Technology 7, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala 2005.

CARLSSON, P. *et al.* Tribological behaviour of thin organic permanent coatings deposited on hot-dip coated steel sheet - a laboratory study. *Surface & Coatings Technology* [S.I.], v. 132, n. 2-3, p. 169-180, Oct 23 2000.

CHANDRA MOHAN REDDY, G. *et al.* Finite element analysis of the effect of coefficient of friction on the drawability. *Tribology International* [S.I.], v. 43, n. 5-6, p. 1132-1137, 2010.

CORA, O. N. *et al.* Wear performance assessment of alternative stamping die materials utilizing a novel test system. *Wear* [S.I.], v. 267, n. 5-8, p. 1123-1129, Jun 15 2009.

COUBROUGH, G. J. *et al.* Angle of contact between sheet and die during stretch-bend deformation as determined on the bending-under-tension friction test system. *Journal of Materials Processing Technology* [S.I.], v. 130-131, p. 69-75, 2002.

DA SILVA, M. F. L. P. *et al.* Influence of lubricants in deep drawing of thick steel sheets. *International Journal of Surface Science and Engineering* [S.I.], v. 4, n. 1, p. 55-67, 2010.

DARENDELILER, H. *et al.* Effect of variable friction coefficient on sheet metal drawing. *Tribology International* [S.I.], v. 35, n. 2, p. 97-104, Feb 2002.

DE SOUZA, J. H. C.; LIEWALD, M. Analysis of the tribological behaviour of polymer composite tool materials for sheet metal forming. *Wear* [S.I.], v. 268, n. 1-2, p. 241-248, 2010.

DOEGE, E.; BEHRENS, B. A. *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*. Springer, 2007.

DÖRR, F.; LIEWALD, M. Determination of flow factors for the semi-analytical prediction of friction coefficients. *Production Engineering* [S.I.], v. 6, n. 1, p. 19-27, 2012.

ERIKSSON, J.; OLSSON, M. Tribological testing of commercial CrN, (Ti,Al)N and CrC/C PVD coatings — Evaluation of galling and wear characteristics against different high strength steels. *Surface and Coatings Technology* [S.I.], v. 205, n. 16, p. 4045-4051, 2011.

FERESHTEH-SANIEE, F.; MONTAZERAN, M. H. A comparative estimation of the forming load in the deep drawing process. *Journal of Materials Processing Technology* [S.I.], v. 140, p. 555-561, Sep 22 2003.

FIGUEIREDO, L. *et al.* Experimental study of friction in sheet metal forming. *Wear* [S.I.], v. 271, n. 9-10, p. 1651-1657, 2011.

FRANZEN, V. *et al.* Finishing of Thermally Sprayed Tool Coatings for Sheet Metal Forming Operations by Roller Burnishing. *International Journal of Material Forming* [S.I.], v. 3, n. 0, p. 147-150, 2010.

FRATINI, L. *et al.* A technical note on an experimental device to measure friction coefficient in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* [S.I.], v. 172, n. 1, p. 16-21, Feb 20 2006.

GARCIA, A. *et al.* *Ensaio dos materiais*. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

GEARING, B. P. *et al.* A plasticity model for interface friction: application to sheet metal forming. *International Journal of Plasticity* [S.I.], v. 17, n. 2, p. 237-271, 2001.

GHAZANFARI, A.; ASSEMPOUR, A. Calibration of forming limit diagrams using a modified Marciniak–Kuczynski model and an empirical law. *Materials & Design* [S.I.], v. 34, n. 0, p. 185-191, 2012.

GROCHE, P. *et al.* Numerical analysis of the potential of deep drawing processes with hydrostatic pressure lubrication. *Production Engineering* [S.I.], v. 6, n. 2, p. 157-167, 2012.

GUILLON, O. *et al.* Experimental methodology to study tribological aspects of deep drawing - application to aluminium alloy sheets and tool coatings. *Tribology International* [S.I.], v. 34, n. 11, p. 757-766, Nov 2001.

GUO, B. *et al.* Size effect on friction in scaled down strip drawing. *Journal of Materials Science* [S.I.], v. 45, n. 15, p. 4067-4072, 2010.

HALLQUIST, J. O. LS-Dyna Theory manual. In: CORPORATION, L. S. T. (Ed.). Livermore March 2006. Cap. 680.

HAN, S. S. Influence of tool geometry on friction behavior in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* [S.I.], v. 63, n. 1-3, p. 129-133, Jan 1997.

HANNA, M. D. Tribological evaluation of aluminum and magnesium sheet forming at high temperatures. *Wear* [S.I.], v. 267, n. 5-8, p. 1046-1050, Jun 15 2009.

HAO, S. *et al.* Friction measurement apparatus for sheet metal forming. *Wear* [S.I.], v. 224, n. 1, p. 1-7, Jan 1999.

HOFFMANN, H. *et al.* A new approach to determine the wear coefficient for wear prediction of sheet metal forming tools. *Production Engineering* [S.I.], v. 1, n. 4, p. 357-363, 2007.

HOL, J. *et al.* Advanced friction modeling for sheet metal forming. *Wear* [S.I.], v. 286–287, n. 0, p. 66-78, 2012.

HOON KIM, J. *et al.* Finite element and analytical study of plane strain draw-bend failure of advanced high strength steels. *International Journal of Material Forming* [S.I.], v. 3, n. 0, p. 187-190, 2010.

HOU, Y.-K. *et al.* Gallling failure analysis in sheet metal forming process. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)* [S.I.], v. 15, n. 2, p. 245-249, 2010.

JONASSON, M. *et al.* Analysis of surface topography changes in steel sheet strips during bending under tension friction test. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* [S.I.], v. 38, n. 5-6, p. 459-467, May-Jun 1998.

KIM, H. *et al.* Evaluation of stamping lubricants in forming advanced high strength steels (AHSS) using deep drawing and ironing tests. *Journal of Materials Processing Technology* [S.I.], v. 209, n. 8, p. 4122-4133, 2009.

KIM, H. *et al.* Evaluation of stamping lubricants using the deep drawing test. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* [S.I.], v. 47, n. 14, p. 2120-2132, Nov 2007.

KIM, J. H. *et al.* The shear fracture of dual-phase steel. *International Journal of Plasticity* [S.I.], v. 27, n. 10, p. 1658-1676, 2011.

KIM, Y. S. *et al.* A Finite Element Study of Capstan Friction Test, Columbus, Ohio (USA). AIP, 2004. p.2264-2269. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/?APC/712/2264/1>>. Acesso em.

_____. Determination of pressure-dependent friction coefficient from draw-bend test and its application to cup drawing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [S.I.], v. 56, n. 0, p. 69-78, 2012.

LEE, B. H. *et al.* Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* [S.I.], v. 130, p. 60-63, Dec 20 2002.

LOVELL, M. *et al.* Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly lubricants. *Journal of Materials Processing Technology* [S.I.], v. 177, n. 1-3, p. 87-90, Jul 3 2006.

LOVELL, M. R.; DENG, Z. Characterization of interfacial friction in coated sheet steels: influence of stamping process parameters and wear mechanisms. *Tribology International* [S.I.], v. 35, n. 2, p. 85-95, Feb 2002.

MATUSZAK, A. Determination of the frictional properties of coated steel sheets. *Journal of Materials Processing Technology* [S.I.], v. 106, n. 1-3, p. 107-111, Oct 31 2000a.

_____. Factors influencing friction in steel sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology* [S.I.], v. 106, n. 1-3, p. 250-253, Oct 31 2000b.

MENEZES, P. L. *et al.* The role of surface texture on friction and transfer layer formation during repeated sliding of Al–4Mg against steel. *Wear* [S.I.], v. 271, n. 9–10, p. 1785-1793, 2011.

MIELINIK, E. M. *Metalworking Science and Engineering*. McGraw-Hill, 1991.

MIGUEL, V. *et al.* An approach to evaluation of sheet bending force under successive multiaxial stress condition. *Journal of Materials Processing Technology* [S.I.], v. 209, n. 3, p. 1588-1596, Feb 1 2009.

MURAKAWA, M.; TAKEUCHI, S. Evaluation of tribological properties of DLC films used in sheet forming of aluminum sheet. *Surface & Coatings Technology* [S.I.], v. 163, p. 561-565, Jan 30 2003.

NANAYAKKARA, N. K. B. M. P. *et al.* Application of bending under tension test to determine the effect of tool radius and the contact pressure on the coefficient of friction in sheet metal forming. *Materials forum* [S.I.], v. 29, p. 114 - 118, 2005.

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

OLIVEIRA, M. *et al.* Algorithms and Strategies for Treatment of Large Deformation Frictional Contact in the Numerical Simulation of Deep Drawing Process. *Archives of Computational Methods in Engineering* [S.I.], v. 15, n. 2, p. 113-162, 2008.

OLSSON, D. D. *et al.* A quantitative lubricant test for deep drawing. *International Journal of Surface Science and Engineering* [S.I.], v. 4, n. 1, p. 2-12, 2010.

PAUNOIU, V.; NICOARA, V. Simulation of friction phenomenon in deep drawing process. *NATIONAL TRIBOLOGY CONFERENCE*. University “Dunărea de Jos” Galați 2003.

PEREIRA, M. P. *et al.* Contact pressure evolution at the die radius in sheet metal stamping. *Journal of Materials Processing Technology* [S.I.], v. 209, n. 7, p. 3532-3541, 2009.

PEREIRA, M. P. *et al.* Contact pressure evolution and its relation to wear in sheet metal forming. *Wear* [S.I.], v. 265, n. 11-12, p. 1687-1699, 2008.

_____. Wear at the die radius in sheet metal stamping. *Wear* [S.I.], v. 274–275, n. 0, p. 355-367, 2012.

PEREIRA, M. P. *et al.* Sliding distance, contact pressure and wear in sheet metal stamping. *Wear* [S.I.], v. 268, n. 11-12, p. 1275-1284, May 12 2010.

RIAH, A. R. *et al.* Effect of magnesium content on the high temperature adhesion of Al-Mg alloys to steel surfaces. *Surface & Coatings Technology* [S.I.], v. 203, n. 14, p. 2030-2035, Apr 15 2009.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. *Tecnologia Mecânica Vol. I - Tecnologia da Deformação Plástica*. Lisboa: ESCOLAR EDITORA, 2005.

SAHA, P. K. *et al.* Influence of surface topography on the frictional characteristics of 3104 aluminum alloy sheet. *Wear* [S.I.], v. 197, n. 1-2, p. 123-129, Sep 1996.

SANCHEZ, L. R. Modeling of springback, strain rate and Bauschinger effects for two-dimensional steady state cyclic flow of sheet metal subjected to bending under tension. *International Journal of Mechanical Sciences* [S.I.], v. 52, n. 3, p. 429-439, Mar 2010.

SEVERO, V. *et al.* Tribological behaviour of W-Ti-N coatings in semi-industrial strip-drawing tests. *Journal of Materials Processing Technology* [S.I.], v. 209, n. 10, p. 4662-4667, Jun 1 2009.

SIEBEL, E.; PANKNIN, W. Das tiefziehens im anschlag. *Werkstattstechnik und maschinenbau* [S.I.], v. 46, n. 7, p. 321-326, 1956.

SILVEIRA NETTO, S. E. *Desenvolvimento do Processo de Construção de Curvas Limite de Conformação*. (2004). Master's Degree - Escola de Engenharia, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre, 2004.

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* [S.I.], v. 66, n. 1-3, p. 216-223, Apr 1997.

SUBE, D. Possibilities and Results of Numeric and Experimental Simulation of Sheet Metal Forming Processes. In: SCHAEFFER, L. (Ed.). *3º Conferência Nacional de Conformação de Chapas*. Porto Alegre 2000.

SZAKALY, E. D.; LENARD, J. G. The effect of process and material parameters on the coefficient of friction in the flat-die test. *Journal of Materials Processing Technology* [S.I.], v. 210, n. 6-7, p. 868-876, 2010.

TER HAAR, R. *FRICITION IN SHEET METAL FORMING, the influence of (local) contact conditions and deformation*. (1996). Ph.D. thesis, University of Twente, Enschede, 1996.

WANG, X. Z.; MASOOD, S. H. Investigation of die radius arc profile on wear behaviour in sheet metal processing of advanced high strength steels. *Materials & Design* [S.I.], v. 32, n. 3, p. 1118-1128, 2011.

WICHERN, C. M.; VAN TYNE, C. J. Frictional behavior of the sliding interface between an A2 steel die and zinc-coated steel sheet. *Journal of Materials Engineering and Performance* [S.I.], v. 8, n. 5, p. 571-576, Oct 1999.

WIHLBORG, A.; GUNNARSSON, L. A frictional study of uncoated EBT steel sheets in a bending under tension friction test. *Wear* [S.I.], v. 237, n. 1, p. 129-136, Jan 2000.

YANG, T. S. Investigation of the strain distribution with lubrication during the deep drawing process. *Tribology International* [S.I.], v. 43, n. 5–6, p. 1104-1112, 2010.