

# Influência da lubrificação na simulação numérica do sistema tribológico no processo de estampagem

POR **IBSON HÄRTER - ROGÉRIO J. MARCZAK - DIEGO TOLOTTI**  
**DANIELA BERTOL - ANGÉLICA P. DE OLIVEIRA - ILTON DESSBESELL**

A qualidade de uma peça estampada pelo processo de conformação de chapas é diretamente ligada à tribologia e às condições de atrito que atuam no processo. As condições de atrito são dependentes do material da chapa, material da ferramenta, lubrificante, rugosidade das superfícies, forças normais, velocidade de deformação entre outros. Esta combinação de fatores é conhecida como sistema tribológico. A tribologia é definida como a ciência e a tecnologia de interação entre superfícies com movimento relativo entre si e dos fenômenos dela decorrente segundo Jost, 1966 [1], relatando ainda que é algo que está presente em praticamente todas interfaces onde acontecem movimentos, inclusive no contato do ar contra a superfície de um automóvel em movimento.

Estudos recentes indicam que os custos associados ao atrito representam cerca de 5% do valor final de produção da peça [2]. Em 1966, Jost [1] relatou que a tribologia engloba várias áreas, como a química, física, mecânica dos sólidos, transferência de calor, ciência dos materiais dentre outros. A literatura afirma ainda que o estudo da tribologia é essencial tanto por razões econômicas como por razões ambientais e cita que, em torno de 10% do consumo mundial de petróleo é utilizado para superar o atrito. Holmberg et al., 2017 [3] realizaram um estudo para avaliar a influência da tribologia no consumo de energia, custos e emissões a nível global. O estudo englobou os setores

de transporte, indústrias, residências e prestação de serviços. Eles concluíram que 23% do consumo global de energia é originado em contatos tribológicos, sendo que, 20% é usado para superar o atrito e 3% para fabricação de novos componentes para substituir os desgastados. Relatam ainda que, com novas tecnologias em tratamentos superficiais, materiais e lubrificantes será possível reduzir o consumo de energia com as perdas relacionadas ao atrito em 40% num período de 15 anos e 18% em 8 anos.

Os primeiros modelos numéricos de atrito começaram a ser estudados na década de 1980, quando Bin e Luo, 1988 [4] aplicaram o método dos elementos finitos no seu estudo para prever a distribuição de tensão e atrito aparente, provando ainda a existência dos fenômenos através de experimentos. Hol et al., 2015 [5] apresentaram um modelo de atrito para utilização em larga escala no âmbito de simulações de conformação baseado nas mudanças micrométricas da superfície. Atualmente, *softwares* propõem uma nova tecnologia para simular as condições tribológicas em um processo de conformação, atribuindo parâmetros para as ferramentas, material da chapa e do lubrificante, gerando assim superfícies mais realísticas. A partir do movimento relativo e interação entre estas superfícies, ocorre a deformação das asperezas e obtém-se os coeficientes de atrito para utilização em *softwares* de simulação de conformação.

Dentro do contexto apresentado, o

objetivo deste trabalho é levar à discussão alguns trabalhos desenvolvidos no departamento de P&D da Bruning Tecnometal com objetivo de preencher uma lacuna relacionada ao atrito na simulação, trazendo à tona modelos tribológicos mais realísticos e, portanto, complexos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização do sistema tribológico

Neste estudo, o material da ferramenta utilizado para a simulação do sistema tribológico foi o aço AISI D2 temperado e revenido, com uma dureza aproximada de  $59 \pm 1$  HRC, de composição conforme Tabela 1. A ferramenta foi polida manualmente e tratada com revestimento de CrAlN, sendo este muito utilizado em ferramentas de conformação. A chapa utilizada na simulação numérica foi um aço da classe CR4 laminado a frio e galvanizado a quente, com diâmetro inicial de 160 mm e 0,65 mm de espessura, de geometria final ilustrada na Figura 1.

Para a caracterização mecânica deste material, foi utilizado o corpo de prova nº 5 da norma JIS Z 2201:1998. Na Tabela 2, observa-se os resultados obtidos do ensaio de tração nas três direções em relação ao sentido de laminação da chapa: 0°, 45° e 90°.

Utilizando as normas DIN EN ISO10113 e ASTM E-517 determinou-se

C	Si	Cr	Mo	V
1,5	0,3	12,0	0,95	0,90

**Tabela 1:** Composição química do aço ferramenta AISI D2.

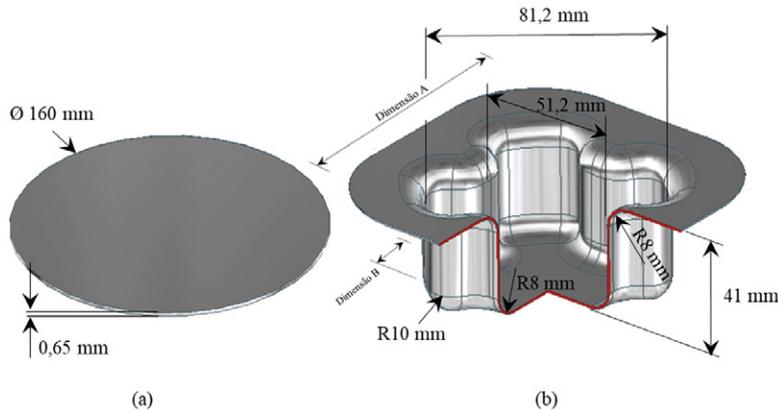


Figura 1: Dimensões e geometria da chapa (a) e da peça final (b), respectivamente.

os índices de anisotropia plástica e expoente de encruamento, os resultados são apresentados na Tabela 3.

Assim como as propriedades mecânicas, foi necessário caracterizar as superfícies da chapa/ ferramenta para utilizar como dado entrada na simulação do sistema tribológico. Para tanto, estudos anteriores desenvolvidos na Bruning Tecnometal encontraram valores médios de rugosidade da ferramenta de 1,3 µm com desvio padrão de 0,04 µm, e rugosidade da chapa de 1,6 µm com desvio padrão de 0,09 µm [6]. Karapannasamy et al., 2014 [7] utilizaram uma rugosidade superficial de 0,08 µm para uma ferramenta lapidada e

Hol et al., 2016 [8] obtiveram em seus experimentos rugosidade de 1,35 µm para uma chapa galvanizada a quente. Portanto, definiu-se uma rugosidade fixa de ferramenta em 1,3 µm.

Hol et al., 2016 [8] utilizaram quantidades de 0,5 g/m<sup>2</sup> e 1,2 g/m<sup>2</sup> em um ensaio de atrito do tipo tracionamento de tiras enquanto que, Sigvant et al, 2018 [9], utilizaram 2 g/m<sup>2</sup> em um estudo de caso envolvendo componentes automotivos estampados realizando assim, uma avaliação numérica e experimental. Hol et al., 2017 [10] utilizaram quantidades de 0,6 g/m<sup>2</sup> e 2 g/m<sup>2</sup> em cada lado da chapa analisando a influência da quantidade de lubrificante na

qualidade final do produto.

Utilizando as referências citadas anteriormente, foram adotadas as quantidades de 0,5 g/m<sup>2</sup>, 1,2 g/m<sup>2</sup> e 2 g/m<sup>2</sup> de lubrificante para simulação nos estudos de caso.

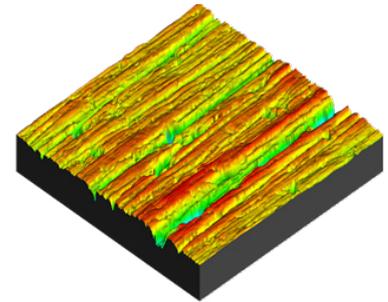


Figura 2: Topografia da superfície da ferramenta com rugosidade de 1,3 µm gerada pelo Triboform®.

## 2.2 Planejamento do experimento

O estudo contempla uma rugosidade superficial da chapa fixa em 1,6 µm para todos os estudos de caso e rugosidade superficial de ferramenta de 1,3 µm. Foram definidas três classes de lubrificação do sistema, conforme detalhado na Tabela 4. Além das três condições estudadas, utilizou-se ainda o coeficiente de Coulomb constante de 0,15 para fins de comparação.

Corpo de prova	Límite de resistência médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Tensão de escoamento médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Alongamento uniforme médio (%)	Desvio padrão (%)
CP0°	281	6,34	149	2,98	26,68	1,52
CP45°	294	7,21	156	3,01	26,24	2,06
CP90°	287	6,05	147	2,52	22,9	1,23

Tabela 2: Propriedades mecânicas do material.

Corpo de prova	Expoente de encruamento médio (n)	Desvio padrão	Índice de anisotropia médio (r)	Desvio padrão
CP0°	0,245	0,015	2,41	0,12
CP45°	0,250	0,02	2,23	0,08
CP90°	0,246	0,01	2,48	0,13

Tabela 3: Coeficiente “n” e “r” para cada direção de laminação.

Condição	Sa – Chapa (µm)	Sa – Ferramenta (µm)	Quantidade lubrificante (g/m <sup>2</sup> )
#01	1,6	1,3	0,5
#02			1,2
#03			
Coeficiente de atrito de Coulomb			
#04	0,15		

Tabela 4: Planejamento do sistema tribológico simulado.

As análises numéricas empregadas neste estudo de caso foram realizadas utilizando o software Triboform® em combinação com o Autoform®. Por fim, a metodologia e o sistema tribológico simulado seguiu o fluxograma da Figura 3.

**3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados da simulação avaliados nesse estudo foram o coeficiente de atrito e lubrificação do sistema, e a influência da interação destes fatores no sistema tribológico. A Figura 4 contém os modelos tribológicos dos estudos de caso #01, #02 e #03, onde a rugosidade da ferramenta é igual a 1,3 µm e a rugosidade da chapa é igual a 1,6 µm. Os três modelos são diferenciados pela quantidade de lubrificante utilizado em cada caso, sendo 0,5 g/m<sup>2</sup>, 1,2 g/m<sup>2</sup> e 2 g/m<sup>2</sup>.

Pode se observar que para estes casos, há uma variação no coeficiente de atrito entre 0,01 e 0,25. Essa variação é expressiva se tratando de um processo de conformação. O fator de maior impacto no atrito nestas três condições é a pressão de contato, ao contrário da velocidade, que influenciará muito pouco nos resultados finais deste estudo. Os resultados obtidos na simulação foram compilados e são apresentados na Tabela 5.

Através dos resultados da Tabela 5 pode-se concluir que, quanto maior a lubrificação do sistema, menor foi a força máxima do punção, menor o afinamento obtido e, conseqüentemente, maior a espessura final. Pode-se verificar também que, com o aumento da lubrificação, há uma menor restrição na corrida do material, resultando em fluxo maior de material.

Com relação ao coeficiente de atrito obtido nos modelos simulados, observamos os resultados dos casos #01 (a), #02 (b) e #03 (c) na Figura 5, onde o coefi-

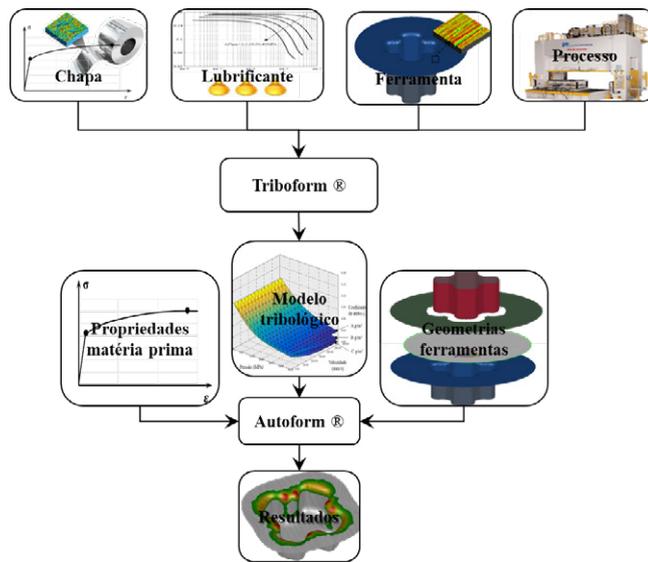


Figura 3: Metodologia de estudo.

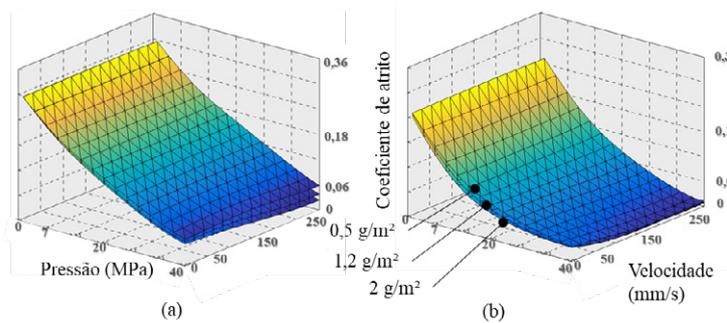


Figura 4: Modelos tribológicos com rugosidade da chapa de 1,6 µm e 1,3 µm para ferramenta e deformações igual a 0 (a) e 0,4 (b).

ciente de atrito no quadrante do raio apresentou resultados na faixa de 0,03 nas três peças, porém, houve um acréscimo significativo nas regiões de flange e parede lateral, ficando em 0,25.

O coeficiente de atrito possui uma relação direta com a pressão de contato, sendo que, quanto mais alta a pressão, menor é o atrito. Na Figura 6, podemos observar que as regiões com as maiores

pressões estão localizados nos raios de entrada da matriz e nos raios do punção.

Conforme os gráficos da Figura 6, podemos observar que a quantidade de lubrificação influenciou positivamente na redução da força necessária no punção, porém teve pouca influência na espessura final e afinamento, especialmente se comparada com o atrito de Coulomb constante em 0,15.

Condição	Rugosidade chapa (µm)	Rugosidade ferramenta (µm)	Quantidade lubrificante (g/m <sup>2</sup> )	Espessura (mm)	Afinamento (%)	Força punção (kN)	Dimensões A - B (mm)
#01	1,6	1,3	0,5	0,440	32,30	64,5	115,36 - 22,32
#02			1,2	0,440	32,30	63,7	115,18 - 22,41
#03			2,0	0,444	31,80	62,5	114,68 - 22,66
#04	-	-	-	0,442	31,90	69,5	113,16 - 23,42

Tabela 5: Resultados da simulação das condições tribológicas em estudo.

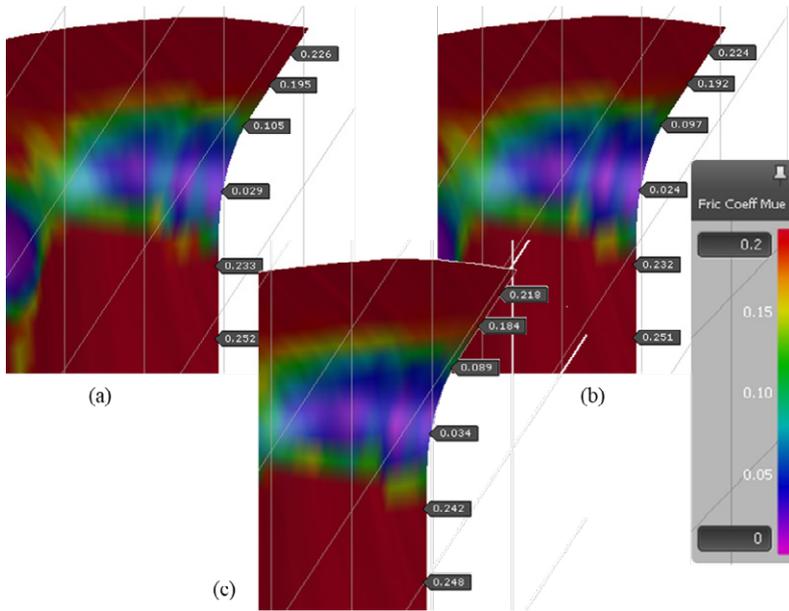


Figura 5: Distribuição do coeficiente de atrito nos raios da matriz para os estudos de caso #01 (a), #02 (b) e #03(c).

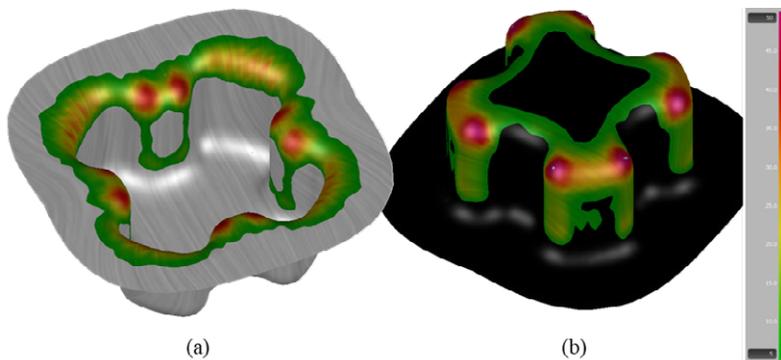


Figura 6: Distribuição da pressão de contato em MPa na matriz (a) e punção (b)

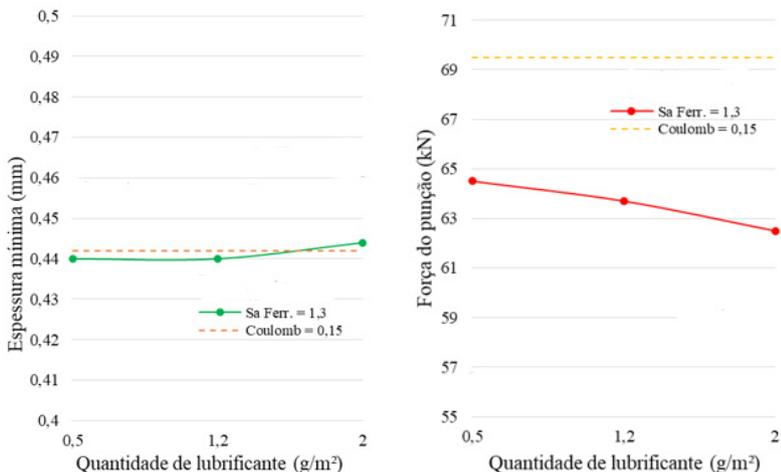


Figura 7: Coeficiente de atrito e pressão de contato ao longo da seção da peça.

4. CONCLUSÕES

Através do presente trabalho, pode-se concluir que, dentre as três condições de lubrificação estudadas para a simulação do processo de conformação, a quantidade de lubrificante de 2 g/m<sup>2</sup> foi a que resultou em uma menor força de conformação. Regiões com maiores pressões de contato foram localizados nos raios de dobra da matriz, e resultaram nos menores valores de coeficiente de atrito. Adicionalmente, para todos casos estudados, observa-se que há diferença nos resultados de força entre o modelo de Coulomb para com os modelos tribológicos.

Este trabalho contou com o apoio da Triboform e Autoform, de forma que os autores agradecem pela parceria e pela colaboração para a realização do estudo.



**Ibsen Ivan Härter:** Engenheiro Mecânico pela UNIJUI e Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS/PROMEC). Responsável pelas simulações de itens estampados, atuando como Especialista

em simulação de ferramentas na Bruning Tecnometal Ltda., Panambi/RS. [ibson@bruning.com.br](mailto:ibson@bruning.com.br)

**Rogério José Marczak:** Engenheiro Mecânico e Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina, Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Atualmente é professor titular do departamento de Eng. Mecânica e membro do GMAP - Grupo de Mecânica Aplicada da UFRGS, e tem se dedicado à pesquisa e desenvolvimento de métodos numéricos para problemas lineares e não-lineares de meios contínuos, bem como técnicas de simulação e análise de veículos. [rato@mecanica.ufrgs.br](mailto:rato@mecanica.ufrgs.br)

**Diego Tolotti de Almeida:** Engenheiro Mecânico pela UNIJUI - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais pela UFRGS. Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais (PPGE3M/UFRGS). Supervisor de Pesquisa e Desenvolvimento na Bruning Tecnometal Ltda., Panambi/RS. [diegot@bruning.com.br](mailto:diegot@bruning.com.br)

**Daniela Bertol:** Engenheira de Materiais e Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais pelo PPGE3M na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Analista Sênior de Pesquisa e Desenvolvimento na Bruning Tecnometal Ltda., Panambi/RS. [daniela.bertol@bruning.com.br](mailto:daniela.bertol@bruning.com.br)

**Angélica Paola de Oliveira Lopes:** Engenheira de Produção pela UNICRUZ - Universidade de Cruz Alta. Técnica em Pesquisa e Desenvolvimento na Bruning Tecnometal Ltda., Panambi/RS. [angelica@bruning.com.br](mailto:angelica@bruning.com.br)

**Ilton Dessbesell:** Acadêmico do curso de Engenharia Mecânica pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI). Analista de simulação de itens estampados na Bruning Tecnometal Ltda., Panambi/RS. [ilton@bruning.com.br](mailto:ilton@bruning.com.br)



Utilize o QR Code ao lado para acessar as referências bibliográficas do artigo