

LUIS FERNANDO FOLLE

DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DE ATRITO ATRAVÉS DE DIFERENTES EN-
SAIOS MECÂNICOS

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Lirio Schaeffer

Porto Alegre
2004



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DE ATRITO ATRAVÉS DE DIFERENTES ENSAIOS
MECÂNICOS

LUIS FERNANDO FOLLE

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS RE-
QUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Eng. Flávio José Lorini
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Porto Alegre
2004

de modo especial, à pessoa do *Eng. Sergio Eglan Silveira Netto* que tornou este trabalho possível de ser realizado e prestou toda a ajuda necessária, se mostrando mais do que um profissional, e sim, um amigo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à *Universidade Federal do Rio Grande do Sul* que me disponibilizou estudo público gratuito e de qualidade inquestionável durante estes quatro anos e meio de curso de Engenharia Mecânica.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Eng. Lirio Schaeffer* que sempre esteve presente e nunca negou qualquer ajuda solicitada.

aos meus pais *Dirceu Folle e Clair Zenni*, que apesar das dificuldades e ausências necessárias, sempre foram meus amigos e incentivadores de meus estudos.

aos colegas de aulas *Marcelo Dall'onder Michelin e Martin Geier* pelo auxílio na realização desse trabalho.

ao colega de laboratório *Gustavo de Almeida Mundstock* pela ajuda e apoio dado na parte elétrica desse trabalho.

ao *Prof. Eng. Nixon Malveira* que sempre esteve presente para esclarecer todas as dúvidas e ajudar nos ensaios necessários.

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:

- LdTM/UFRGS – Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- LAFUN/UFRGS – Laboratório de Fundição da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- LACER/UFRGS – Laboratório de Cerâmica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- REXAM BEVERAGE CAN AMERICAS – Unidade de Águas Claras

FOLLE, L. F. **Determinação e Análise de Atrito Através de Diferentes Ensaio Mecânicos**. 2004. 23f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar o atrito para dois diferentes ensaios. Um é através da curva coeficiente de atrito vs. pressão de contato entre superfícies metálicas e o outro é através do ensaio de anel. Foi dado enfoque para a obtenção da curva com diferentes materiais, aço ABNT 1004, ABNT 1006 e liga de alumínio AA3104-H19 assim como para a verificação do lubrificante óleo hidráulico. O ensaio de anel foi realizado com a liga de alumínio AA3104-H19. Foram feitos alguns ensaios e constatou-se que o sistema de avaliação de atrito usado para se obter a curva coeficiente de atrito vs. pressão de contato fornece bons resultados. Constatou-se também que o atrito é um parâmetro dependente do processo de fabricação ao qual ele atua.

PALAVRAS-CHAVE: Alumínio, Aço, Curva Coeficiente de Atrito Vs. Pressão de Contato, Ensaio de Anel.

FOLLE, L. F. **Determination and Analysis of Friction through Different Mechanic Tests.** 2004. 23f. Monograph (Conclusion Work for Mechanical Engineer course) – Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

ABSTRACT

This paper has for objective to evaluate the friction for two different tests. One is through the curved coefficient of atrium vs. contact pressure between metallic surfaces and the another is through the ring rehearsal. Focus was given for the obtaining of the curve with different materials, steel ABNT 1004, ABNT 1006 and it aluminum alloy AA3104-H19 as well as for the verification of the lubricating hydraulic oil. The ring compression test was accomplished with the aluminum alloy AA3104-H19. Some were made rehearsals and it was verified that the evaluation system of friction used to obtain the curved coefficient of atrium vs. contact pressure supplies good results. It was also verified that the friction is a dependent parameter of the production process to which he acts.

KEYWORDS: Aluminum, Steel, Coefficient of Friction vs. Pressure of Contact Curve, Ring Compression Test.

SUMÁRIO

ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	11
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	11
4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE ATRITO	11
4.1.1 PARTE MECÂNICA	11
4.1.2 PARTE HIDRÁULICA	13
4.1.2 PARTE ELÉTRICA	13
4.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO NO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE ATRITO	14
5. RESULTADOS E ANÁLISES	15
5.1 CURVA COEFICIENTE DE ATRITO VS. PRESSÃO DE CONTATO	15
5.2 ATRITO NO ENSAIO DE ANEL	19
6. CONCLUSÕES	22
7. REFERÊNCIAS	23
8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	23

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo determinar coeficiente de atrito para dois tipos de ensaios diferentes onde se obtém o atrito para cada processo de fabricação referente a esses ensaios. Um dos ensaios consiste em se determinar o coeficiente de atrito vs. pressão de contato entre uma superfície metálica e uma chapa através de uma máquina construída especialmente para isso. O projeto de construção dessa máquina, para medição de atrito, teve como objetivo principal o estudo do processo de fabricação de estruturas providas de chapas metálicas. Os modelos de atrito conhecidos, “Coulomb” e “Modelo do Fator de Atrito”, divergem quando utilizados em situações de lubrificação deficiente e elevados níveis de pressão (forjamento a quente em matriz fechada, por exemplo).

Coulomb diz que há uma tensão cisalhante, necessária para provocar movimento relativo entre superfícies em contato, proporcional a pressão de contato, o coeficiente de atrito é a constante que torna esta proporção em igualdade. Quando o nível de pressão torna-se elevado, esta tensão cisalhante passa a ser a tensão limite de escoamento sob cisalhamento, ver equação 1.

$$\mu = \frac{k}{P_c} \quad (1)$$

onde μ é o coeficiente de atrito, k [MPa] é a tensão limite de escoamento sob cisalhamento e P_c [MPa] é pressão de contato ou tensão normal.

Analisando esta teoria para níveis altíssimos de pressão, significa dizer que com o aumento da pressão de contato, onde há uma aderência total entre as superfícies da peça e matriz, quanto maior a pressão aplicada menor o atrito, o que fisicamente parece ser impossível.

A curva coeficiente de atrito vs. pressão de contato, determinada com ensaios feitos no sistema de avaliação de atrito (máquina mencionada acima) vem a preencher esta lacuna nos programas de simulação numéricos. Por serem baseados em modelos ideais não tem a capacidade de avaliar o comportamento real ou físico do material. Paralelo a isso, com o mesmo equipamento é possível avaliar ou qualificar a eficiência de lubrificantes largamente utilizados nos processos de estampagem.

O tema proposto é de grande importância para o desenvolvimento do conhecimento profissional. A obtenção do gráfico coeficiente de atrito vs. pressão de contato é de grande valia para aplicações em programas de simulação numérica e cálculos mais precisos das forças envolvidas nos processos de fabricação que utilizam chapas metálicas.

O outro ensaio é feito através de um anel com dimensões pré determinadas, onde esse é conformado a frio para uma deformação específica e suas medidas de diâmetro interno e altura inicial e final são usadas para obter-se o atrito com a ajuda de um programa de simulação numérica. Esse método é usado para se saber o atrito envolvido no processo de fabricação de peças por forjamento e o atrito é considerado constante durante todo o processo. Esse ensaio será melhor descrito no próximo tópico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atrito é a distribuição de forças na superfície de contato entre dois corpos, que previne ou impede o movimento de deslizamento de um corpo em relação ao outro (SHAMES, 2002). 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 causado pela pressão de contato entre matriz e peça. Por isso, o

atrito é fundamental na determinação de defeitos internos e superficiais, tensões na matriz, carga e energia requerida.

Existem três tipos de lubrificação que governam as condições de atrito em conformação de metais.

1. Condições “a seco”, nas quais não existe lubrificação na interface e somente estão presentes camadas de óxidos na matriz ou no componente. Condição usada, por exemplo, na laminação a quente de chapas.
2. Condições “hidrodinâmicas”, 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 “de contorno” 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 atrito seco e lubrificação hidrodinâmica. É a situação mais amplamente encontrada em conformação de metais.

Existem métodos de medida do fator de atrito, f , ou o fator de cisalhamento de atrito, m , como, por exemplo, teste de compressão do anel plano, como mencionado acima. No teste do anel, um corpo de prova em forma de anel com faces planas é comprimido para uma redução conhecida (figura 2.1).

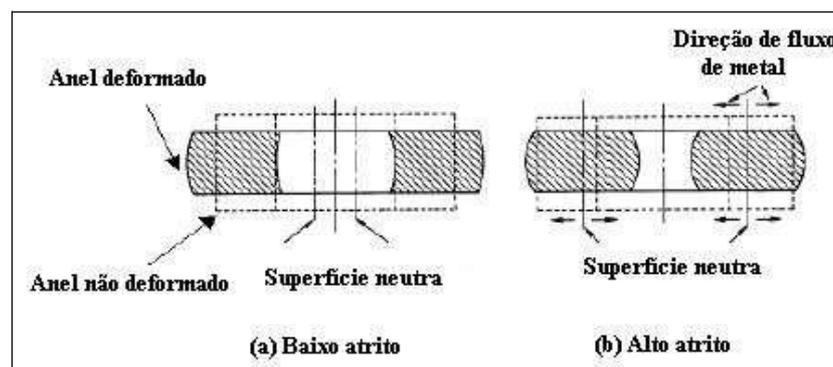


Figura 2.1 escoamento do metal no teste de compressão do anel (Fonte: ALTAN, 2004).

A mudança no diâmetro interno e externo do anel forjado é bastante dependente do atrito na interface ferramenta/corpo de prova. Se o atrito fosse igual à zero, o anel se deformaria da mesma forma que um disco sólido, com cada elemento fluindo radialmente para fora numa taxa proporcional à sua distância do centro. Com o aumento da deformação, o diâmetro interno do anel diminui se o atrito for alto e aumenta se o atrito for baixo. Portanto, a mudança no diâmetro interno representa um método simples de estimar o atrito na interface (ALTAN, 1999).

Baseando-se na Teoria do Limite Superior (AVITZUR, 1968), podem-se construir curvas de calibração usando programas de simulação conforme visto na figura 2.2. Com o auxílio dessas curvas pode-se definir o valor do coeficiente de atrito (μ) ou do fator de cisalhamento de atrito (m).

As geometrias (relação do diâmetro externo, diâmetro interno a altura do anel) mais difundidas para o teste de anel são (6:3:2), (6:3:1) e (6:3:0,5). Mas através dos modelos matemáticos pode-se escolher outras geometrias.

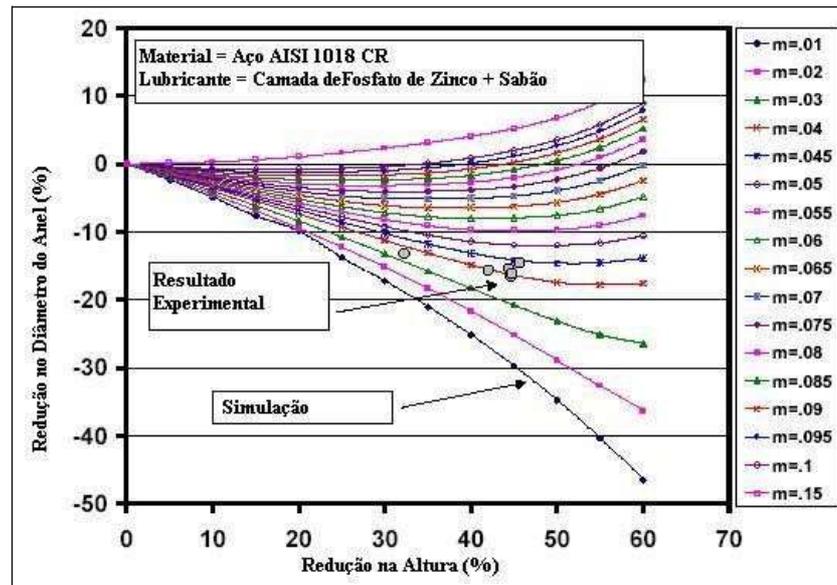


Figura 2.2 Curva de calibração típica obtida por simulação numérica (Fonte: ALTAN, 2004).

O atrito obtido através do sistema de avaliação de atrito é um processo muito novo, portanto, não encontrado com frequência nos livros que descrevem o processo de estampagem. Porém, ele será bem descrito neste trabalho.

Existem outros estudos relacionados à medição de atrito, porém, todos eles são obtidos de forma indireta, ou seja, através da medição de outros parâmetros e com fórmulas e equações é estimado o atrito. Chang (1997), por exemplo, em seu estudo sobre a influência dos parâmetros no processo de fabricação de latas de alumínio para bebidas, utiliza a medida da pressão de contato entre o copo e a matriz como parâmetro para estimar o atrito, através de equações válidas somente para esse processo.

3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O objetivo inicial deste trabalho é avaliar o coeficiente de atrito entre chapas metálicas em função da pressão de contato, por uma máquina desenvolvida unicamente para isso (ver figura 4.1). Com isso pode-se determinar uma curva para diferentes materiais (alumínio, aço e suas ligas). Paralelo a isso, com o mesmo equipamento avaliar-se-á a eficiência de lubrificantes utilizados nos processos de estampagem.

Outro objetivo é avaliar o atrito para o processo de fabricação por forjamento através do ensaio de anel. Isso será feito para se ter uma idéia de como o atrito é influenciado diretamente pelo processo de fabricação usado para se confeccionar uma peça.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE ATRITO

4.1.1 PARTE MECÂNICA

A máquina de ensaio de atrito, ver figuras 4.1 e 4.3, projetada no LdT^M é similar as encontradas em TU Dresden, TU Darmstadt e na empresa ThyssenKrupp em Dortmund – Alemanha. A configuração em triângulo tem como vantagem a diminuição da influência da vibração dando mais estabilidade para transmitir altas forças, de até 50 kN, durante o ensaio. No

vértice esquerdo há um cilindro hidráulico, onde é acoplada a garra que prende o corpo de prova. A função deste cilindro é tracionar o corpo de prova o que pode ser feito variando ou mantendo a velocidade do pistão constante, ver figura 4.4. No vértice direito há outro cilindro hidráulico que tem a função de prender o corpo de prova durante o ensaio.

No vértice superior da máquina há um cilindro que pode ser apoiado com ou sem rolamentos, ver figura 4.4. Sobre esse cilindro é fixo o corpo de prova com ângulo de dobra α .



Figura 4.1 Sistema de avaliação de atrito.

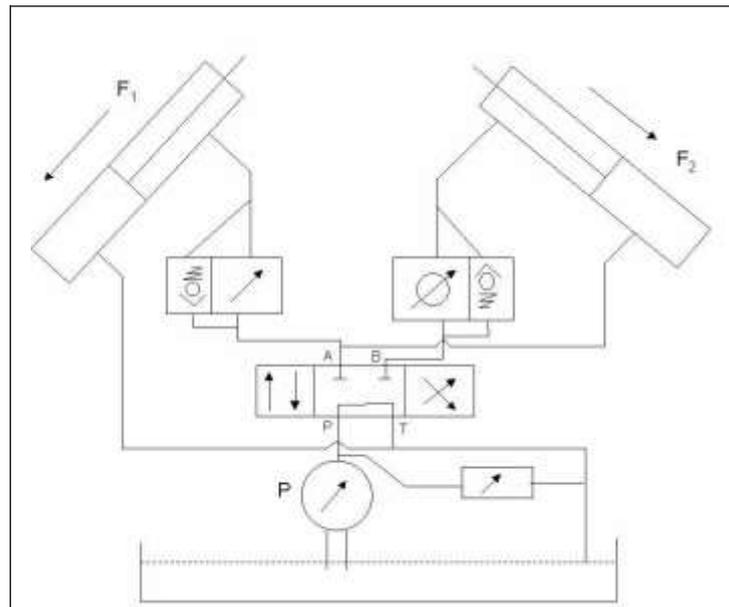


Figura 4.2 Diagrama hidráulico do sistema de avaliação de atrito.

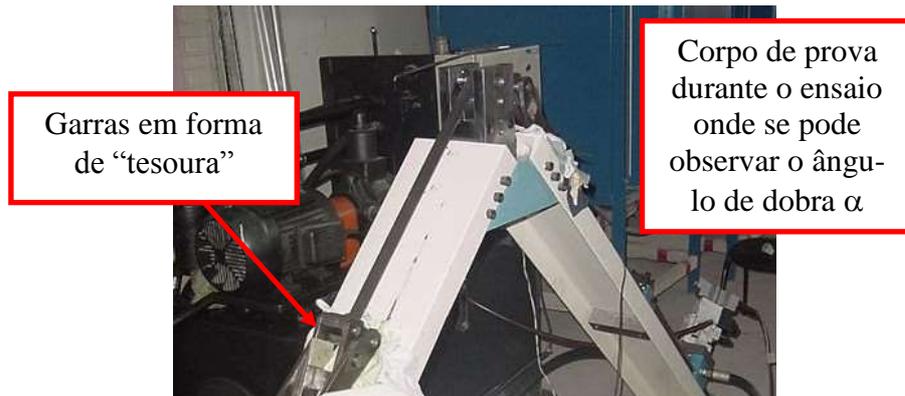


Figura 4.3 Máquina de atrito durante o ensaio.



Figura 4.4 Chapa de aço sendo ensaiada. Material aço ABNT 1004.

As garras da máquina de atrito são em forma de “tesoura”, ver figura 4.3. Essa forma faz com que quanto mais força se aplique mais força de prensamento é submetida a chapa.

Há dois tipos de blocos de rolamento na máquina onde a chapa desliza. Um é um cilindro livre, ou seja, pode rodar livremente, tendo por função medir força de dobra, sem atrito por estar essa livre, no mesmo ensaio. O outro cilindro é fixa, para medir a força de atrito mais a força de dobra (força de atrito = força total – força de dobra). Ver figura 4.4.

4.1.2 PARTE HIDRÁULICA

Para dar o movimento de avanço e recuo é utilizado uma bomba Racine com capacidade de 83 L/min de fluxo de óleo e pressão máxima de 100MPa. O movimento de avanço e retorno é dado pela válvula 1, que dá o fluxo para o cilindro 1 e a força durante o ensaio é dada pela válvula 2, que dá o fluxo para o cilindro 2. Ver figura 4.1. Na figura 4.2 é mostrado o diagrama hidráulico simplificado da máquina.

4.1.2 PARTE ELÉTRICA

Na figura 4.5 é mostrado o esquema de conexões da parte elétrica que comanda a máquina. Os dados são obtidos através de uma placa de aquisição PC-30Fax_ADV da Eagle Electric com duas saídas para as duas válvulas e duas entradas para as duas forças. Há uma placa amplificadora para a válvula 1 com uma entrada de 0 a 10V pelo PC e uma entrada de 24V/3A pela fonte. Há ainda um amplificador para as duas forças dadas pelas células de carga (ver anexo B) que é ligado ao PC. Por último tem uma fonte de tensão e corrente de 24V e 3A com duas saídas.

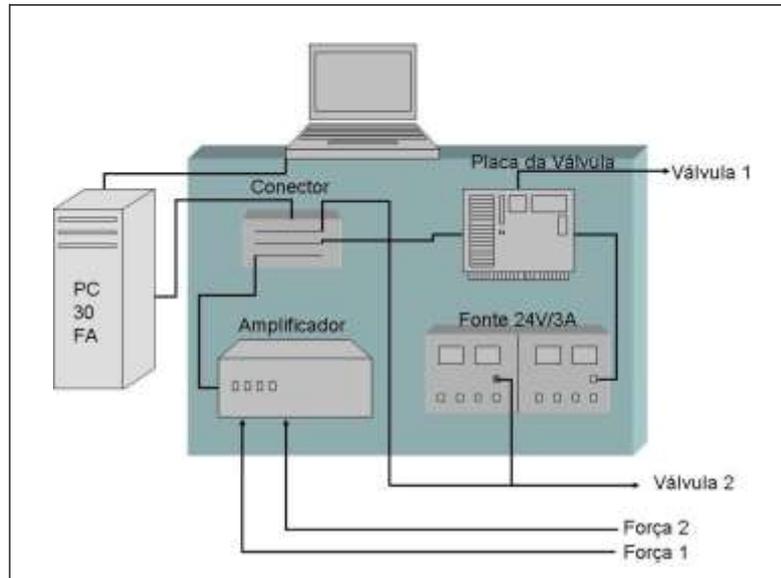


Figura 4.5 Esquema de conexões da parte elétrica que comanda a máquina.

4.2 DESCRISÃO DO ENSAIO NO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE ATRITO

A força trativa que atua no corpo de prova é dita F_1 . A outra força atuante é a F_2 que tem a função de prender o corpo de prova, é a força feita pelo cilindro do lado. A primeira parte do ensaio consiste em medir essas forças com o cilindro fixo por rolamento. Nesta condição é dito que o atrito é praticamente nulo, sendo a resultante destas forças a força de dobra atuante no corpo de prova.

Na segunda etapa faz-se o mesmo procedimento com o cilindro fixo, isto é, sem rolamento. Quando troca-se o dispositivo fixador do cilindro por um sem rolamento mede-se na verdade a força de dobra mais a força de atrito. Da primeira etapa se conhece a força de dobra resultante, extrai-se a mesma da força resultante medida na segunda etapa sendo essa diferença a força de atrito.

Mede-se as forças F_1 e F_2 através do programa de aquisição de dados Diadem versão 8.0 instalado num Pentium Intel MMX 64,0MB RAM no qual há uma placa de aquisição de dados PC-30Fax_ADV da Eagle Eletric. O ângulo de dobra α é constante para todos os ensaios e é aproximadamente igual a $0,5\pi$ rad (90 graus). Torna-se fácil saber o valor do coeficiente de atrito uma vez que o mesmo é função dos três parâmetros já citados.

$$\mu = \mu(F_1, F_2, \alpha) \quad (2)$$

Além desses três parâmetros, o atrito depende da rugosidade da superfície e da temperatura, porém o ensaio é realizado a temperatura ambiente, que acaba sendo sempre a mesma, ou seja, constante e, portanto não influenciando no atrito. A rugosidade é considerada de forma semelhante, ou seja, para cada ensaio é determinada a rugosidade do corpo de prova, portanto, o coeficiente de atrito obtido vale somente para a condição de rugosidade especificada.

Tem-se então o coeficiente de atrito entre a superfície de contato e o corpo de prova através da equação 3, Beer (1990).

$$\mu = \frac{\ln \left| \frac{F_1}{F_2} \right|}{\alpha} \quad (3)$$

onde α [rad] é o ângulo de dobra, F_1 [kN] é força trativa atuante no corpo de prova e F_2 é força que se opõe a F_1 [kN] atuante no corpo de prova.

Outra possibilidade, mais proveitosa, é fornecer como resultado uma função do coeficiente de atrito ao longo do ensaio. Para o projeto de uma peça obtida por estampagem é necessário conhecer a superfície de contato entre punção e chapa e entre matriz e chapa. Logo, saber o coeficiente de atrito é um resultado importante, mas pode ser ampliada a gama de informações se puder ser fornecido um gráfico do atrito em função de outro parâmetro envolvido no processo, por exemplo, a pressão de contato.

A pressão de contato também é função das forças F_1 e F_2 e da área de contato A_c entre o corpo de prova e o eixo do cilindro. Divide-se o módulo do vetor força resultante das forças F_1 e F_2 pela área da superfície onde a chapa está em contato e assim, com força sobre área, tem-se a pressão normal ou pressão de contato da chapa no cilindro.

$$P_c = P_c(F_1, F_2, A_c) \quad (4)$$

onde A_c [mm²] é área de contato.

A equação utilizada para cálculo da pressão de contato é:

$$P_c = \frac{\sqrt{(F_1^2 - F_2^2)}}{\alpha \cdot R \cdot L} \quad (5)$$

onde R [mm] é raio de dobramento (raio do cilindro) e L [mm] é a largura do corpo de prova em contato com o cilindro.

Vale ressaltar que o atrito obtido por esse método é apenas um dos três atritos atuantes no processo de estampagem que é gerado no dobramento da chapa plana através da matriz. Os outros dois atritos são gerados pela força de deslizamento entre a chapa e a matriz e a força na diminuição do diâmetro da chapa.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 CURVA COEFICIENTE DE ATRITO VS. PRESSÃO DE CONTATO

Fez-se 5 ensaios para cada curva com material ABNT 1004 fornecido pela empresa Panatlântica S. A.. Cada corpo de prova foi cortado com 1000mm de comprimento e 30mm de largura, a chapa original tinha 1mm de espessura, com rugosidade $R_a = 0,67\mu\text{m}$ e $R_{\text{max}} = 5,7\mu\text{m}$ (de acordo com a norma DIN). Uma vez que a própria máquina é algo novo não há uma norma que estabeleça a dimensão dos corpos de prova, então, optou-se por esta configuração para os corpos de prova. O diâmetro do cilindro (fixo e móvel) utilizado foi de 20mm.

O ensaio foi feito com óleo hidráulico entre corpo de prova e o cilindro móvel, para garantir condição de atrito “nulo”, figura 5.1. Após trocar o dispositivo fixador do cilindro (eixo fixo sem rolamento) fez-se mais 5 ensaios, ver curva mais acima da figura 5.1. A diferença entre estas duas curvas é a curva atrito vs. pressão de contato, válido para óleo hidráulico.

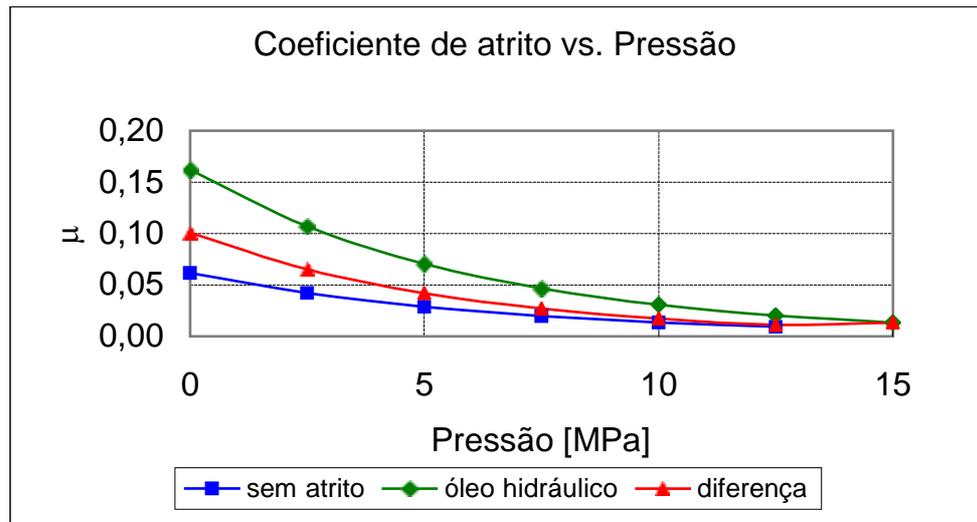


Figura 5.1 Diferentes condições de atrito. Material: aço ABNT 1004.

Nota-se que a medida que aumenta a pressão de contato o atrito diminui, esse fenômeno se dá pela interpenetração da camada do óxido mais dura (mais externa) na camada de óxido mais mole (que funciona como lubrificante), isto fisicamente significa que diminui o atrito (MARU, 2003) o que pode ser visto na figura 5.1.

Foram feitas iguais medidas para a mesma chapa, porém, sem nenhum lubrificante. O resultado é mostrado na figura 5.2, onde apenas é mostrada a diferença entre atrito com cilindro móvel e atrito sem cilindro móvel.

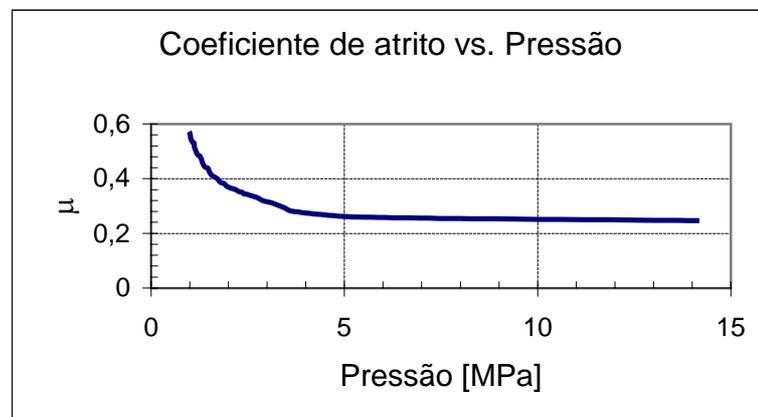


Figura 5.2 Coeficiente de atrito sem lubrificante. Material: aço ABNT 1004.

Como pode-se observar o valor do atrito aumenta muito em relação ao feito com óleo hidráulico. Isso pode ser notado no momento do ensaio, pois ao se retirarem os corpos de provas, aqueles que não foram lubrificadas apresentaram um aquecimento razoável na região deformada.

De forma semelhante foram feitos 5 ensaios em uma chapa de aço ABNT 1006, de 1,4mm de espessura, com rugosidade $R_a = 1,29\mu\text{m}$ e $R_{max} = 9,6\mu\text{m}$. Primeiramente foram feitos ensaios a seco e após testou-se o mesmo óleo hidráulico. Os resultados são mostrados nas figuras 5.3 e 5.4.

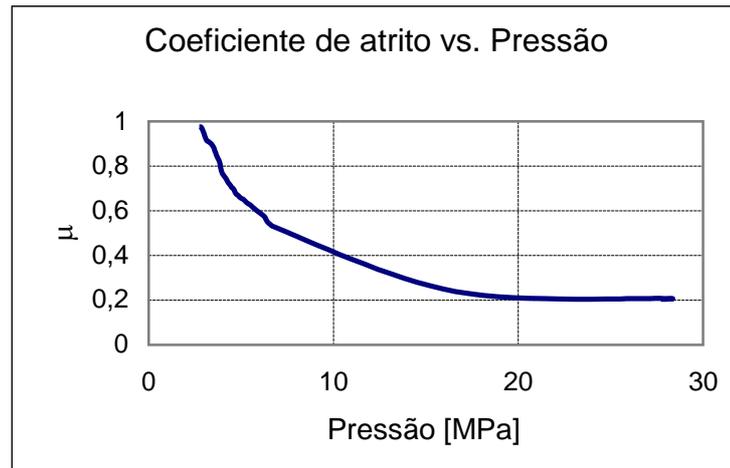


Figura 5.3 Coeficiente de atrito sem lubrificante. Material: aço ABNT 1006.

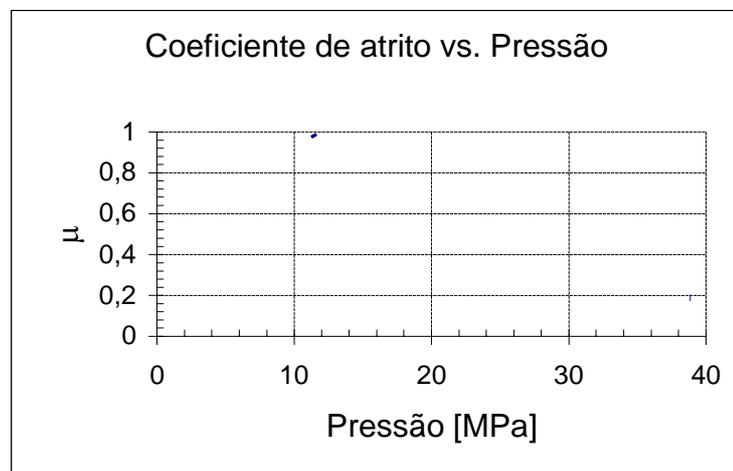


Figura 5.4 Coeficiente de atrito com lubrificante. Material: aço ABNT 1006.

Nota-se através dos gráficos que o coeficiente de atrito é maior sem o lubrificante do que com ele. Isso pode parecer inconsistente, porém no dia do ensaio, o corpo de prova com lubrificante foi colocado do lado onde havia pequenas ranhuras na chapa, o que ocasionou uma danificação no cilindro fixo onde a chapa desliza (figura 5.5), a chapa apresentou também uma danificação por causa disso, ver figura 5.6.



Figura 5.5 Danificação do eixo fixo da máquina.



Figura 5.6 Danificação na chapa ensaiada.

Pode-se observar também que a pressão de contato e o atrito são maiores que o encontrado na chapa de aço ABNT 1004. Isso se deve ao fato de a chapa ABNT 1006 ter maior espessura, o que aumenta a pressão de contato e ter maior rugosidade, o que aumenta o atrito.

De forma semelhante, através do sistema de avaliação de atrito, fez-se 5 ensaios para duas condições de atrito na liga de alumínio AA 3104 - H19 (de espessura 0,26mm, com rugosidade $R_a = 0,52\mu\text{m}$ e $R_{\text{max}} = 4,9\mu\text{m}$), a seco, figura 5.9, e com óleo hidráulico, figura 5.10.

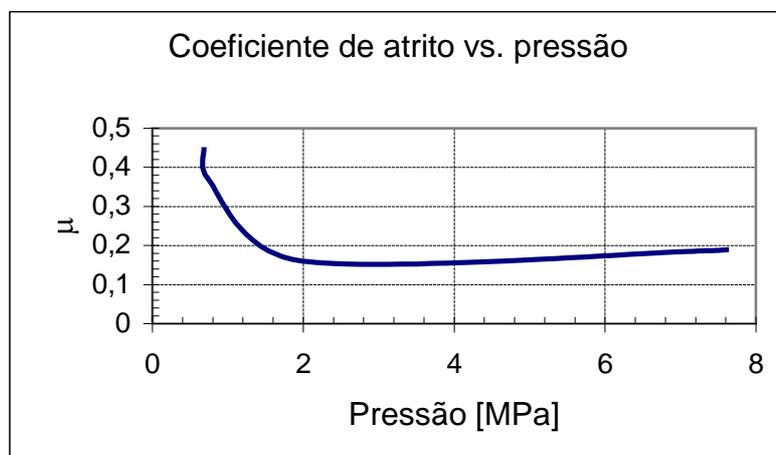


Figura 5.9 Coeficiente de atrito sem lubrificante. Material: alumínio AA 3104 - H19.

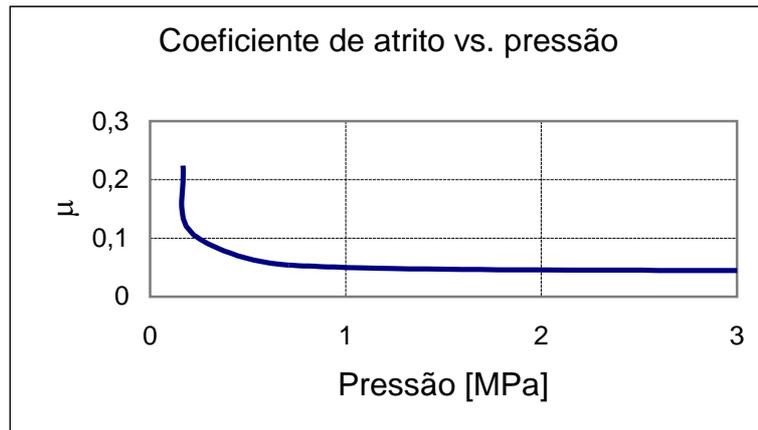


Figura 5.10 Coeficiente de atrito com lubrificante. Material: alumínio AA 3104 - H19.

Pode-se notar que o atrito teve uma diferença grande entre o caso a seco e o com óleo hidráulico. Para uma pressão de contato de 2 MPa, o atrito na situação a seco foi de 0,16 e para o caso com óleo foi de aproximadamente 0,05, o que mostra uma boa eficiência de lubrificação do óleo hidráulico.

5.2 ATRITO NO ENSAIO DE ANEL

Com anéis do material mencionado acima, liga de alumínio AA 3104 - H19, foram feitos dois tipos de ensaios diferente: um com óleo hidráulico e relação do diâmetro externo, diâmetro interno e altura do anel de 6:3:1 e a seco com relação de 6:3:2. A rugosidade dos anéis foram: antes do ensaio, $R_a = 0,65\mu\text{m}$ e $R_{\text{max}} = 6,1\mu\text{m}$ e depois do ensaio, $R_a = 0,5\mu\text{m}$ e $R_{\text{max}} = 4,9\mu\text{m}$. Foram medidas a força e o deslocamento para esse ensaio.

Na figura 5.5 é mostrado gráfico de deslocamento vs. força para um dos ensaios e na tabela 5.1 são mostrados os valores iniciais e finais da força com as suas dimensões (DI é diâmetro interno, DE é diâmetro externo e H é altura).

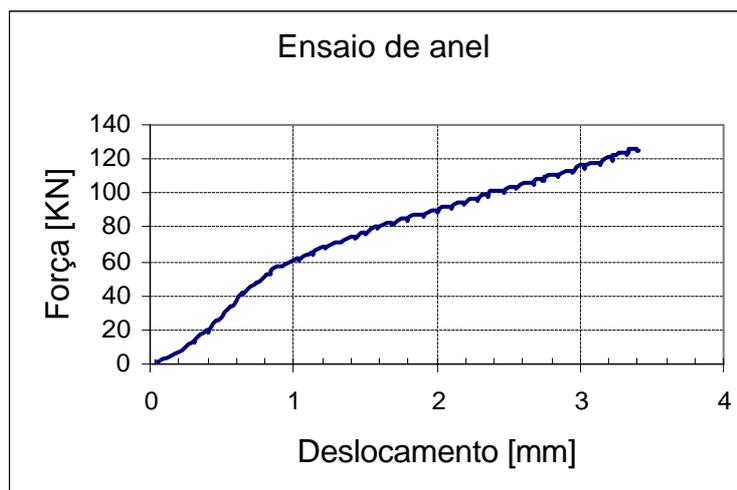


Figura 5.5 Representação gráfica do ensaio de um anel com relação 6:3:2 sem lubrificante.

Tabela 5.1 - Valores do início e fim do ensaio de anel para os corpos de prova.

	DI [mm]	DE [mm]	H [mm]	F [kN]
Início	12,16	24,00	7,60	3,22
Fim	12,00	25,10	6,60	91,80

Início	12,10	24,34	7,54	2,38
Fim	11,40	27,10	5,60	137,67
Início	12,46	23,86	7,76	0,68
Fim	9,40	30,75	3,86	232,51
Início	12,30	24,40	3,74	4,58
Fim	11,60	25,25	3,30	138,00
Início	12,36	24,36	3,86	2,80
Fim	10,00	27,40	2,36	216,64
Início	11,90	23,80	3,86	0,77
Fim	6,00	30,50	1,90	381,22

Para se obter o atrito pelo do ensaio de anel foram construídas curvas de calibração usando o software de simulação MSC.SUPERFORGE 2004 e com os parâmetros obtidos através do gráfico da figura 5.6, que foi obtido experimentalmente através do ensaio de compressão para o mesmo material. Os resultados são mostrados na figura 5.7 e 5.8.

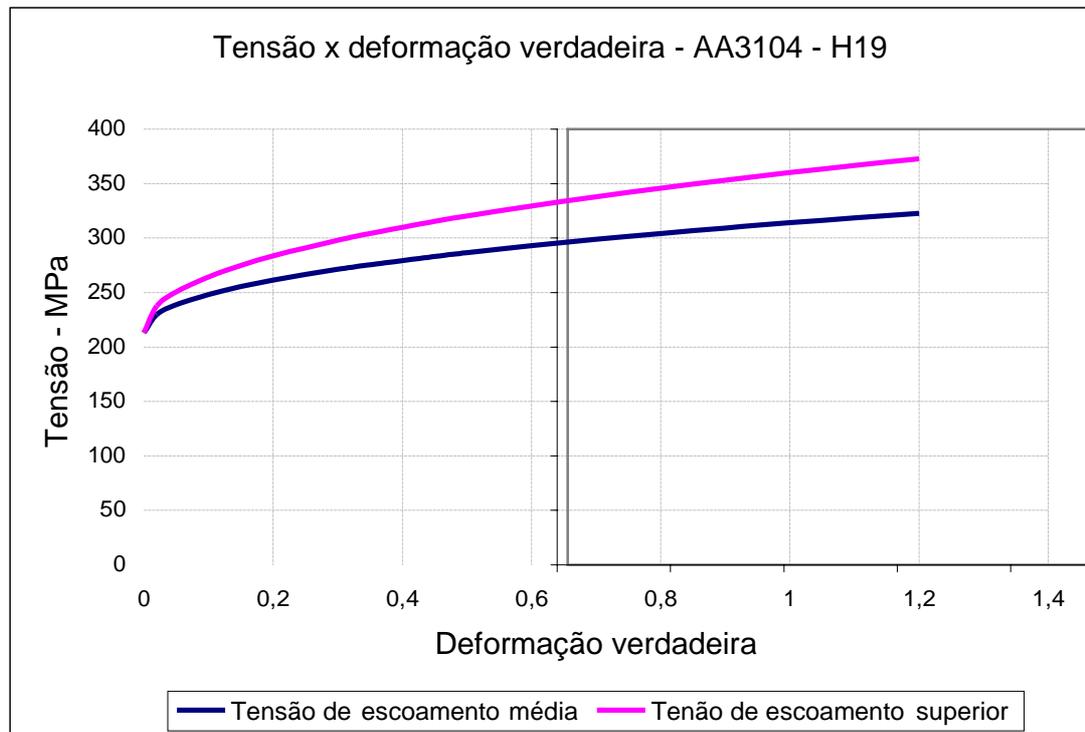


Figura 5.6 Gráfico de tensão vs. Deformação verdadeira para ensaio de compressão onde obteve-se os parâmetros desejados para a curva de calibração do ensaio de anel.

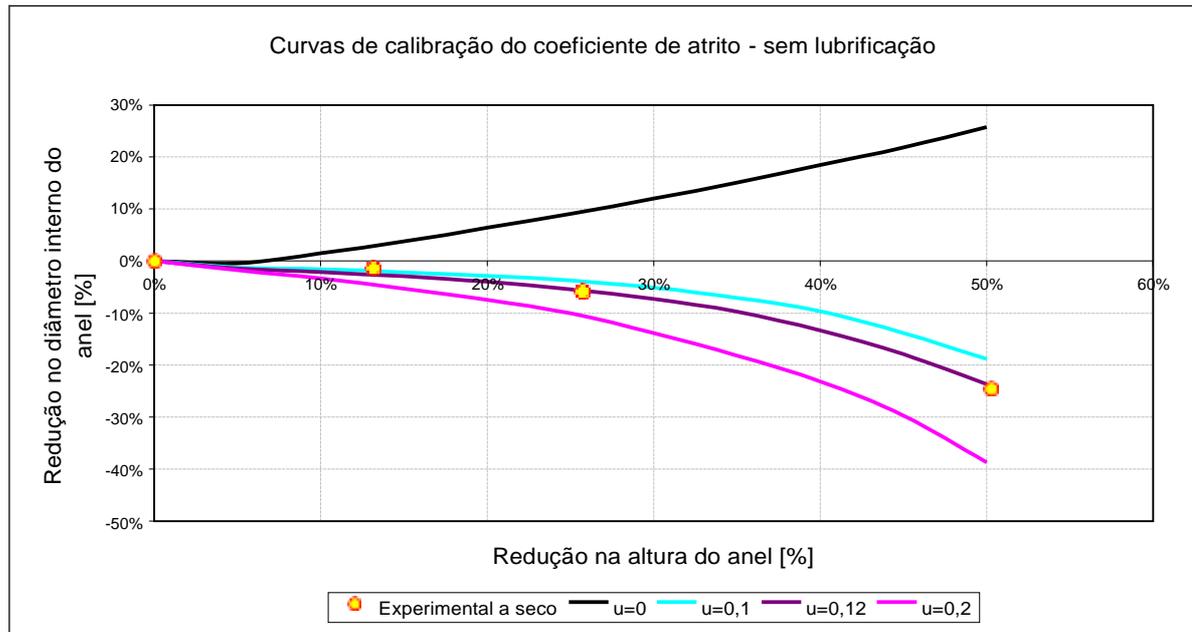


Figura 5.7 Curva de calibração do coeficiente de atrito para relação de 6:3:2 a seco.

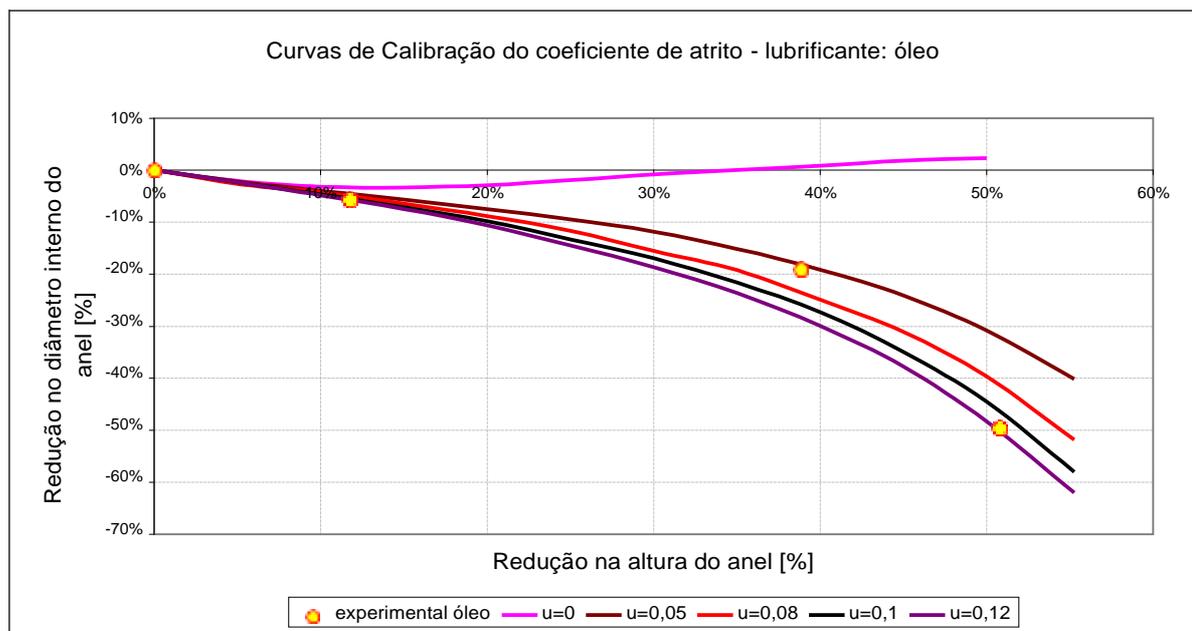


Figura 5.8 Curva de calibração do coeficiente de atrito para relação de 6:3:1 com óleo.

Pode-se observar pelo gráfico da figura 5.7 que o coeficiente de atrito obtido pelo ensaio a seco é de 0,12. Para essa mesma condição, o atrito através do sistema de avaliação de atrito é uma curva, ou seja, ele varia continuamente de acordo com a pressão envolvida, o que não acontece para o ensaio de anel, tendo o atrito um valor constante.

Pelo gráfico da figura 5.8 tem-se que o coeficiente de atrito é 0,05, sendo o último ponto desconsiderado por dar um valor de atrito inconsistente. Da mesma forma, para essa mesma condição o atrito no sistema de avaliação de atrito é dependente da pressão envolvida, o que não ocorre para o ensaio de anel.

6. CONCLUSÕES

O atrito é dependente do modo como se vai obter uma peça. Viu-se que para o forjamento, o atrito é uma constante (apenas para o caso onde se tem deformações plásticas, ou seja, depois do limite de escoamento do material), já na estampagem, onde tem-se dobramento com deslizamento da chapa, o atrito é dependente da pressão normal entre a chapa e o punção, sendo esse apenas um dos três atrito que governam o processo de estampagem. Cada ensaio, através do anel e da máquina estudada acima, é representativo de um processo de fabricação em particular, por isso, para se saber o atrito, antes deve se saber como será feita a peça de estudo.

Pode-se considerar que o ensaio no sistema de avaliação de atrito fornece resultados mais próximos do real, pois não depende de um programa de simulação, o que acontece no ensaio de anel. Todo programa de simulação incorre em um erro, pois usa modelos matemáticos ideais para representar a realidade que não se comporta exatamente como no ideal.

Componentes estruturais confeccionados com chapas metálicas (painéis de automóveis, etc.) devem ter suas características físicas, químicas e tecnológicas conhecidas, para incluir dados dos resultados obtidos experimentalmente em programas de simulação numérica dedicados ao desenvolvimento de peças obtidas por processos de conformação de chapas, reduzindo tempo de desenvolvimento de novas famílias de produtos. A curva coeficiente de atrito vs. pressão de contato vem preencher uma lacuna nos programas de simulação numérica, que por serem baseados em equações matemáticas não tem a capacidade de avaliar o comportamento real ou físico do material. Paralelo a isso, com o mesmo equipamento é possível avaliar ou qualificar a eficiência de lubrificantes largamente utilizados nos processos de estampagem.

Então, ter a capacidade de obter dados experimentais e aplicá-los para melhorar o desempenho de programas de simulação numérica é o grande resultado de interesse para o desenvolvimento do estado.

7. REFERÊNCIAS

- ALTAN, T. **Material Properties and Cold Forging Lubricants**. 2nd Cold and Warm Precision Forging Workshop, Columbus, OH, USA, September 8, 2004.
- ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. L. **Conformação de metais – fundamentos e aplicações**. São Carlos/SP: EESC-USP, 1999.
- AVITZUR, B. **Metal Forming**. New York: McGraw – Hill Book Company, 1968.
- BEER, F. P., JOHNSTON, E. R. JR. **Mecânica Veroial para Engenheiros: Estática**. 5^a ed. São Paulo/SP: Makron, McGraw, 1990.
- CHANG, D. F.; WANG, J. E. Influence of Process Parameters on the ironing of Deep-Drawn Cups. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 119, p. 699-705. 1997.
- DANCKERT, J. Ironing of Thin Walled Cans. **Annals of the CIRP**, v. 50, p. 165-168. 2001.
- FOX, R. W., McDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 5^a ed. Rio de Janeiro/RJ: LCT, 2001.
- KANG, S. H., LEE, J. H., CHEON, J. S., IM, Y. T. The Effect of Strain-Hardening on Frictional Behavior in Tip Test. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 46, p. 855-869. 2004.
- MARU, M., M. **Fundamentos de Tribologia – curso**. CIMATEC, de 17/11/2003 a 26/11/2003.
- SHAMES, I. H. **Mecânica para Engenharia: Estática, vol. 1**. 4^a ed. São Paulo/SP: Pearson Education do Brasil, 2002.

8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- MICHELON, M. D. O. **Análise do Processo de Fabricação de Latas de Bebidas com Liga de Alumínio**. 2004. 27f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- PALMIERI, A., C. **Manual de Hidráulica Básica – Racine-Albarus Hidráulica Ltda**. 7^a ed, Porto Alegre, 1989, 328p.
- SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 1999.
- SCHAEFFER, L. **Conformação dos Metais: metalurgia e mecânica**. Porto Alegre: Rígel, 1995.