

2.7 – Atrito e Lubrificação

Atrito é o mecanismo pelo qual se desenvolvem forças de resistência superficiais ao deslizamento de dois corpos em contato. A causa primordial para o atrito entre materiais metálicos correlaciona-se com o contato entre pequenas regiões ao longo das superfícies deslizantes, conforme mostrado na figura 2.16. Estas superfícies apresentam irregularidades microscópicas que podem soldar-se pela intensa deformação plástica localizada.

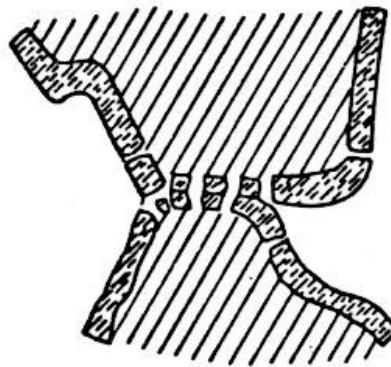
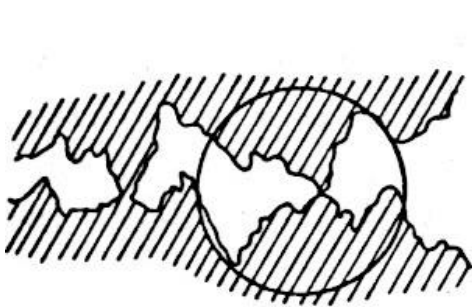


Figura 2.16 – Representação esquemática das regiões de contato verdadeiro entre duas superfícies deslizantes, Helman (1988).

Aparentemente, Helman e Cetlin (1983) apontam que as forças de atrito parecem ter sua origem na resistência ao cisalhamento destas uniões. Estas forças podem também se originar como resultado de um processo de “arar” o metal mais duro sobre a superfície do mais macio. A figura 2.17 mostra um esquema deste processo, assim como um exemplo prático obtido para o caso da trefilação de tubos para a indústria automobilística.

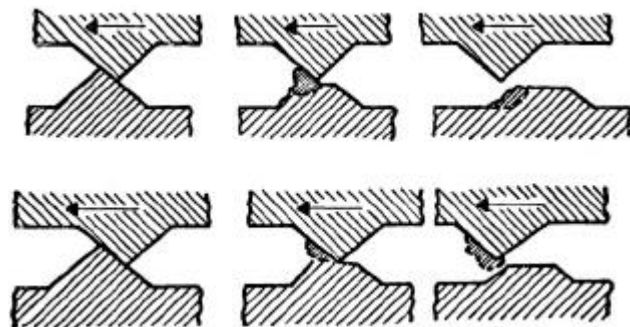
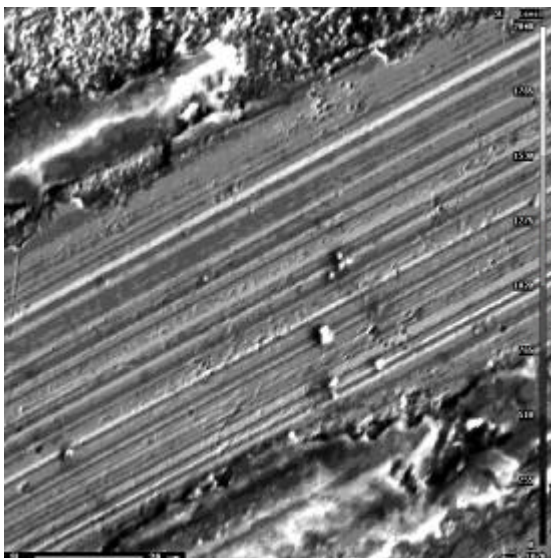


Figura 2.17 – Acima: esquema de arrancamento de material de uma superfície macia a partir de uma microsaliência da superfície mais dura, Helman e Cetlin (1984). Ao lado: região observada no microscópio eletrônico de varredura mostrando uma região “arada” em um tubo para a indústria automobilística.

Considerando que os processos de conformação plástica dos metais envolvem o contato entre o metal a ser conformado e as matrizes ou ferramentas de conformação, então se

concluí que o atrito deverá estar sempre presente, em maior ou menor grau. As principais características que o atrito causa no processo são as seguintes:

- alteração, geralmente desfavorável, dos estados de tensão presentes durante a deformação;
- produção de fluxos irregulares (por ex.: limalhas) de metal durante o processo de conformação;
- criação de tensões residuais no produto;
- influência sobre a qualidade superficial (podendo ser benéfica, inclusive);
- elevação da temperatura a níveis capazes de comprometer-lhe as propriedades mecânicas;
- aumento do desgaste de ferramentas;
- facilitar o “agarramento” das ferramentas de conformação com o metal a ser conformado;
- aumento do consumo de energia necessária à deformação, diminuindo a eficiência.

As características das forças de atrito se evidenciam através do esquema mostrado na figura 2.18 e pela equação (2.11) que traduz a relação fixa (μ) que pode ser observada entre a força de contato (R) e a força de atrito (F).

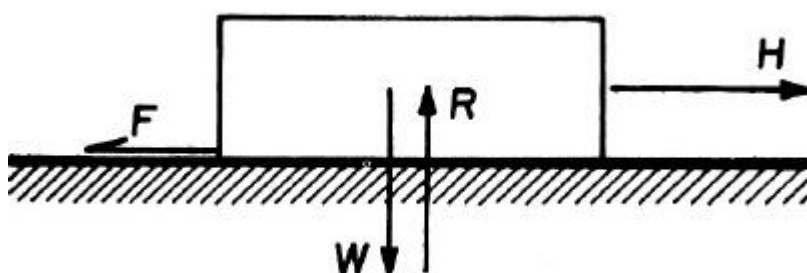


Figura 2.18 – Esquema das forças presentes no deslizamento de um corpo de peso W por meio de uma força H , Helman e Cetlin (1984).

$$\mu = \frac{F}{R} \quad (2.11)$$

onde μ é o coeficiente de atrito estático, que é um número adimensional.

Observou-se (Helman e Cetlin, 1984) que, uma vez iniciado o deslizamento do corpo, a força H para manter o corpo em movimento uniforme é menor do que a força necessária para iniciar este movimento. Em consequência pode-se definir uma fórmula semelhante à (2.11). Em consequência a força de atrito F' será:

$$F' = \mu' R < F \quad (2.12)$$

onde μ' é o coeficiente de atrito dinâmico, que é menor do que o coeficiente de atrito estático.

Pode-se definir um equacionamento para se quantificar o efeito do atrito. Inicialmente, considera-se a figura 2.19. Esta figura representa uma região de contato e de deformação plástica efetiva, cuja área vale A_s . O deslizamento de uma superfície em relação à outra exigirá um esforço de cisalhamento suficiente para romper esta ligação:



$$F = k \cdot A_s \quad (2.13)$$

onde k representa a resistência ao cisalhamento das superfícies unidas.

Considerando que o material aumenta a área de contato linearmente ($A_s = P \cdot \tan \alpha$) até um limite A_n , quando ocorre limitação devido ao encruamento. Assim:

$$\begin{aligned} A_s &= P \cdot \tan \alpha \\ k \tan \alpha &= \text{constante} = \mu \end{aligned} \quad (2.14)$$

Logo a equação (2.13) reduz-se a lei de Coulomb:

$$F = \mu P \quad (2.15)$$

ou dividindo-se pela área nominal A_n , obtém-se a expressão para a lei de Amontons:

$\tau = \mu p$	(2.16)
----------------	--------

Entretanto, nas situações reais não existe uma superfície de contato perfeita onde a resistência ao cisalhamento vale k , nestes casos admiti-se que esta tensão tenha que ser multiplicada por um fator m , menor do que 1:

$$\tau = m k \quad (2.17)$$

Combinando as equações (2.16) e (2.17), obtêm-se:

$$\tau = m k = \mu p \quad (2.19)$$

O valor máximo possível para m é 1 (por definição) e o valor mínimo para a tensão p vale o limite de escoamento geral do material, Y , segundo definido pela equação (2.8). Substituindo estes valores na equação (2.17), verifica-se que o máximo valor do coeficiente de atrito para a condição de aderência total é:

$$m_{\max} = \frac{k}{Y} = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,58 \quad (2.19)$$

onde a relação entre k e Y é calculada com base no critério de von Mises.

As tabelas 2.3 e 2.4 ilustram valores de coeficiente de atrito para alguns materiais e condições de uso. Devido à complexidade do atrito torna-se muito difícil determinar valores de coeficiente de atrito para um processo de conformação específico, para um certo material e condição de conformação.

Um método bastante difundido para a determinação do coeficiente de atrito é o chamado teste do anel (ver Dieter ou Schaeffer), no qual um anel é forçado a se expandir, apoiado sobre uma superfície, e os diâmetros inicial e final são medidos e correlacionados com o coeficiente de atrito presente. Alternativamente podem ser empregados processos de conformação mecânica, por exemplo a trefilação, nos quais se conheçam e/ou meçam todas as variáveis de menos o coeficiente de atrito, o qual pode ser obtido facilmente.



Tabela 2.3 – Valores do coeficiente de atrito m (equação 2.17) para diferentes processos de conformação mecânica, Schaeffer (1999).

Processo de Conformação	Deformações	Aço	Aço Inoxidável (a base de Ni)	Titânio e ligas de Ti	Cobre e ligas de Cu	Alumínio e ligas de Al
Laminação a frio		0,03-0,07	0,07-0,1	0,1	0,03-0,07	0,03
Extrusão a frio	pequenas	0,1	0,1	0,05	0,1	0,05
	grandes	0,05	0,05		0,05	
Forjamento a frio	pequenas	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05
	grandes	0,05	0,05-0,1			
Trefilação	pequenas	0,1	0,1	0,05	0,1	0,03
	grandes	0,05	0,05		0,05-0,1	0,05-0,1
Trefilação de barras		0,1	0,1	0,05	0,05-0,1	0,05-0,1
Trefilação de tubos		0,05-0,1	0,05	0,05	0,05-0,1	0,05-0,1
Estampagem profunda	pequenas	0,05	0,1	0,07	0,1	0,05
	grandes	0,05-0,1			0,05-0,07	
Laminação a quente		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Extrusão a quente		0,02-0,2	0,02	0,02	0,02-0,2	0,02-0,2
Forjamento a quente		0,2	0,2	0,05-0,1	0,1-0,2	0,1-0,2

Tabela 2.5 – Valores do coeficiente de atrito μ (equação 2.16) para diferentes processos, Helman e Cetlin (1984).

Valores de μ para diferentes processos	μ
A — Laminação a frio	
Aço ao C — cilindro de aço polido — lubrificada	0,04-0,05
Aço ao C — cilindro de aço polido — imersão — boa lubrificação	0,05-0,10
Aço ao C — cilindro rugoso ("sand blast")	0,30
Al, Cu e Pb — cilindro de aço polido	0,10
Al, Cu e Pb — cilindro rugoso	0,40
A' — Laminação a quente	
Aço ao C — cilindro de aço — 400-900°C	0,40
Aço ao C — cilindro de aço — -1000°C	0,30
Aço ao C — cilindro de aço — -1100°C	0,20
Aço ao C — cilindro fundido (aprox. 50% maior)	
Alumínio — cilindro de aço — 375°C	0,54
Cobre — cilindro de aço — 750°C	0,35
Níquel e chumbo — cilindro de aço — 900 e 180°C	0,32
Bismuto e cádmio — cilindro de aço — 150 e 180°C	0,25
Estanho e zinco — cilindro de aço — 100 e 110°C	0,17
B — Trefilação	
Aço ao C — matriz CW — diferentes lubrificantes	0,03-0,06
Cobre — matriz CW — lubrif. forçada de óleo	0,06
Latão — matriz de aço — lubrif. forçada de óleo	0,10
Cobre e inox — matriz CW — cera	0,07
Cobre e inox — matriz CW — azeites minerais	0,30
C — Estampagem profunda	
Alumínio — lubrificado com sebo	0,10
Cobre — lubrificado com óleo sob pressão	0,15
Latão — lubrificado com óleo sob pressão	0,08-0,12
Bronze — lubrificado com óleo sob pressão	0,14

2.7.1 – Lubrificantes

O recobrimento das superfícies dos materiais em contato com um terceiro material de baixa resistência ao cisalhamento irá induzir o atrito a se concentrar neste material, afetando apenas parcialmente os corpos em contato. A este material que pode ser sólido, líquido ou gasoso, denomina-se lubrificante. As forças de atrito a serem geradas estão diretamente vinculadas às características da película lubrificante. A figura 2.19 ilustra o efeito do uso de lubrificante (óleo) sobre o perfil de deformação obtido em uma experiência de simulação de extrusão realizado em sala de aula.



Figura 2.19 – Diferentes perfis de deformação com o emprego de uma matriz de extrusão com muito lubrificante (esquerda), média quantidade (centro) e pouco (direita).

Neste curso não cabe discutir quais são os diferentes tipos de lubrificantes, a tabela 2.3 ilustra as características de um lubrificante ideal, segundo Helman e Cetlin (1984):

1. manter inalteradas as condições de lubrificação hidrodinâmicas ou lubrificação limite a altas pressões e temperaturas;
2. diminuir o atrito superficial até valores compatíveis com o processo;
3. dissipar eficazmente o calor gerado durante o processo de deformação;
4. impedir a adesão metálica entre a matriz e o metal processado;
5. reduzir a transferência de metal entre a superfície da peça e a ferramenta;
6. eliminar partículas abrasivas da superfície de trabalho;
7. manter condições aceitáveis de acabamento superficial e características metalúrgicas dos produtos acabados;
8. não deixar resíduos ao ser tratado termicamente o material processado;
9. ser de fácil remoção da superfície do produto nas operações de acabamento;
10. não apresentar características tóxicas;
11. possuir condutividade elétrica aceitável para assegurar o desaparecimento de cargas elétricas estáticas produzidas pelo atrito;
12. possuir propriedades físico-químicas que permitam sua adesão à superfície do metal processado e da matriz;
13. ter grande estabilidade química em alta temperatura.
14. possui baixa reatividade e não interagir com outros lubrificantes ou aditivos.

A tabela 2.5 resume os tipos existentes de lubrificantes empregáveis para os processos de conformação mecânica, a descrição de cada qual segue após a tabela.

Tabela 2.5 – Classes de lubrificantes utilizáveis em processos de conformação plástica dos metais, Helman e Cetlin (1984).

água	Óleos minerais		Óleos e ácidos graxos
ceras	sabão		Sólidos minerais
Sólidos metálicos	vidros	Plásticos	Materiais sintéticos



- i. *água* — apresenta alto calor específico e é o principal constituinte quando se deseja refrigerar e remover contaminadores simultaneamente. Com a finalidade de evitar efeitos químicos secundários, ela deve ser pura (destilada) ou pelo menos tratada;
- ii. *óleos minerais puros* — geralmente pouco usados. São extensamente utilizados quando agregados a óleos e ácidos graxos. Por exemplo, emprega-se óleo mineral com 2 a 3% de óleo graxo para laminar pequenas seções; óleo mineral sulfurado com óleos graxos para estampagem profunda ou extrusão.
- iii. *óleos e ácidos graxos* — os ácidos graxos são os mais usados, formando sabões metálicos devido à ação química sobre o metal. Os óleos graxos são saponificados e combinados com óleos minerais, formando graxas utilizadas na trefilação de arames. Estas graxas se misturam geralmente com cal, para proporcionar capas com pequeno atrito antes de se passar o arame pela matriz.
- iv. *ceras* — as ceras são razoavelmente bons lubrificantes, conseguindo suportar altas pressões, principalmente quando combinadas com ácidos graxos e sabões. Suas propriedades são boas enquanto seu ponto de fusão não é excedido. São formas mais comumente empregadas: ceras parafínicas, ceras amaciadoras, ceras naturais etc. São freqüentemente empregadas na estampagem profunda, extrusão e laminação.
- v. *sabão* — sabão metálico em pó é freqüentemente empregado na estampagem profunda e trefilação de arames. Exemplo: oleato de cálcio, estearato de cálcio etc.
- vi. *sólidos minerais* — podem ser constituídos de componentes ativos e passivos. Os ativos são usados sob a forma de suspensão coloidal, para melhorar as propriedades lubrificantes sob alta pressão e/ou alta temperatura, que se encontram além do intervalo de utilização dos aditivos orgânicos. A grafita e o bissulfeto de molibdênio são exemplos comuns. Os passivos são minerais inertes agregados a outros lubrificantes, que melhoram a adesão ao metal e seu comportamento em condições críticas de trabalho. São geralmente usados: cal, talco, caolim, carbonatos, mica etc.
- vii. *sólidos metálicos* — metais duros podem ser cobertos por metais macios, tais como o chumbo, cádmio, cobre, índio etc., para facilitar os processos de trefilação de barras e tubos etc.
- viii. *vidros* — são usados como capas de baixo atrito em operações que alcançam temperaturas suficientemente altas para que o vidro se torne plástico. Pode ser mencionada a extrusão a quente de aços, trefilação de tubos etc.
- ix. *materiais sintéticos* — formam uma proporção crescente de lubrificantes para serem empregados na conformação mecânica de metais. Incluem materiais tais como o polietilenglicol e o silicone; ambos possuem grande intervalo de temperaturas de trabalho e a vantagem de se queimar sem deixar resíduos.
- x. *plásticos* — materiais como o polietileno, “nylon” e teflon. São freqüentemente empregados sob a forma de lâminas de alguns micra de espessura, em operações de embutimento profundo e estampagem.



2.8 – Bibliografia

Os livros destacados com um ponto (●) são recomendados como livros-texto deste capítulo da disciplina.

- BOYER, H.; **Atlas of stress-strain curves**. ASM International, 2nd printing, Materials Park, 1990.
- CALLISTER, W.D.; **Materials science and engineering: an introduction**. John Wiley & Sons Inc., 4th edition, 1997 (existe uma versão traduzida para o português).
- DIETER, G. E.; **Mechanical Metallurgy**. SI Metric edition. McGraw Hill, Singapore, 1988 (existe uma versão anterior que foi traduzida para o português).
- DOWLING, N.E.; **Mechanical Behavior of Materials**. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1993.
- ENGEL, L.; KLINGELE, H.; **An atlas of metal damage**. Wolfe Publishing, London, 1981.
- HELMAN, H.; CETLIN, P.R.; **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. Editora Guanabara Dois, 1983.
- HELMAN, H.; Curso: **Fundamentos da Laminação - Produtos Planos**, ABM, 1988.
- MOURA BRANCO, C.A.G; **Mecânica dos Materiais**. Fundação Calouste Gulbenkian, 2^a edição, Porto, 1994.
- MEYERS, M.A.; CHAWLA, K.K.; **Principles of Mechanical Metallurgy**. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1984.
- PLAUT, R.L.; **Laminação dos aços: tópicos avançados**. Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1984.
- SCHAEFFER, L.; **Conformação Mecânica**. Imprensa Livre Editora, Porto Alegre, 1999.