

Fundamentos do Atrito



ATRITO:

É o mecanismo pelo qual se desenvolvem forças de resistência superficiais ao deslizamento de dois corpos em contato. Estas forças aparecem devido à interação de irregularidades microscópicas presentes nas superfícies e que apresentam resistência ao cisalhamento. Estas forças podem também se originar como resultado de um processo de “arar” o metal mais duro sobre a superfície do mais mole.

TRIBOLOGIA

É a ciência e a tecnologia da interação de superfícies cujo entendimento envolve atrito, desgaste e lubrificação.



EFEITOS DO ATRITO NA CONFORMAÇÃO

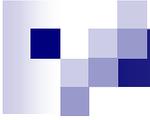
- Alteração, geralmente desfavorável, dos estados de tensão necessários para a deformação;**
- Produção de fluxos irregulares de metal durante o processo de conformação;**
- Aparecimento de tensões residuais no produto;**
- Influência sobre a qualidade superficial do produto;**
- Elevação da temperatura do material a níveis que podem comprometer as propriedades mecânicas;**
- Aumento do desgaste das ferramentas;**
- Aumento do consumo de energia necessária à deformação.**



DESGASTE

Define-se desgaste como a perda de material provocado pelo deslizamento das superfícies em contato, este pode assumir várias formas nomeadamente:

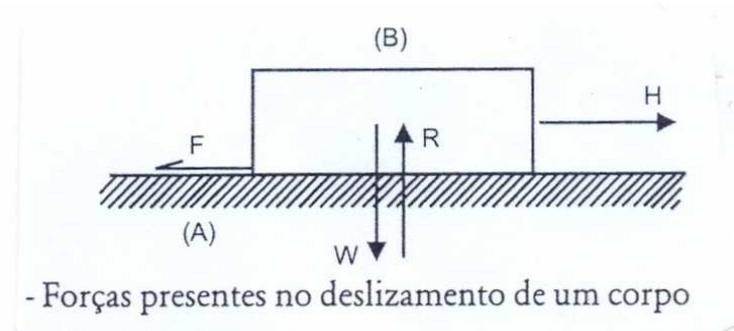
- Desgaste por fadiga, quando é provocado por esforços repetitivos entre superfícies em contato (ex: dentes de engrenagens).
- Desgaste por abrasão, quando a película material entre superfícies é constituída por partículas duras, levando á penetração de asperidades do material duro no material macio, em superfícies em movimento relativo.
- Desgaste por erosão, quando o desgaste é provocado pelo impacto de partículas em suspensão em meio gasoso ou líquido.
- Desgaste por cavitação, quando o desgaste é provocado pelo fluxo de líquidos.
- Desgaste por corrosão, quando a película material é formada por ataque químico das superfícies em contato.
- Desgaste por impacto, quando este é provocado por impacto entre sólidos.
- Desgaste por adesão, quando estão presentes entre as superfícies altas pressões e velocidades, provocando a fusão dos materiais em contato.



Atrito e Lubrificação sob condições de conformação

- Grandes forças e pressões são necessárias para deformar um material
- Para alguns processos, a energia gasta para superar o atrito pode chegar a **50%**.
- Mudanças na **lubrificação** podem alterar o fluxo de material, criar ou eliminar defeitos, alterar o acabamento superficial e precisão dimensional, e modificar as propriedades do produto.

Noções de Atrito



- A força de atrito desenvolvida na superfície de contato entre dois corpos é proporcional à força normal atuante sobre ela, e é independente da área desta superfície:

$$F = \mu R$$

μ - coeficiente de atrito estático.

- Uma vez iniciado o deslizamento, a força H necessária para manter o corpo em movimento uniforme é menor que a força necessária para iniciar este movimento:

$$F' = \mu' R < F$$

μ - coeficiente de atrito dinâmico.

- Teorias mais recentes com base numa interpretação elasto-plástica supõem, como resultado de um contato a nível macroscópico dos metais, que são produzidas soldas microscópicas nas irregularidades superficiais.

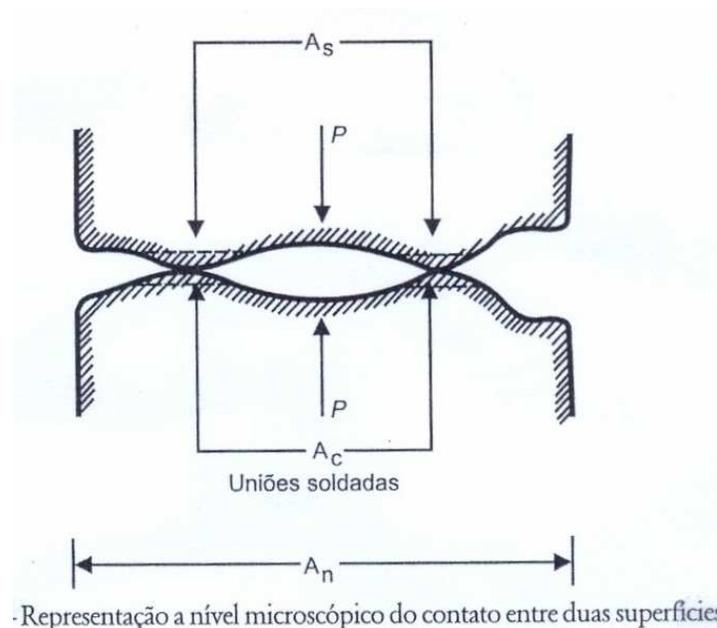
$$F = k \cdot A_S \quad (1)$$

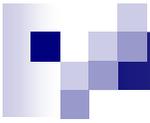
F - Força de atrito;

A_S – Área de cisalhamento;

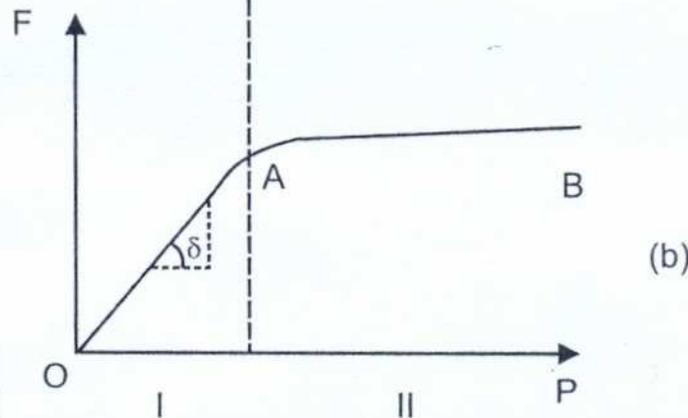
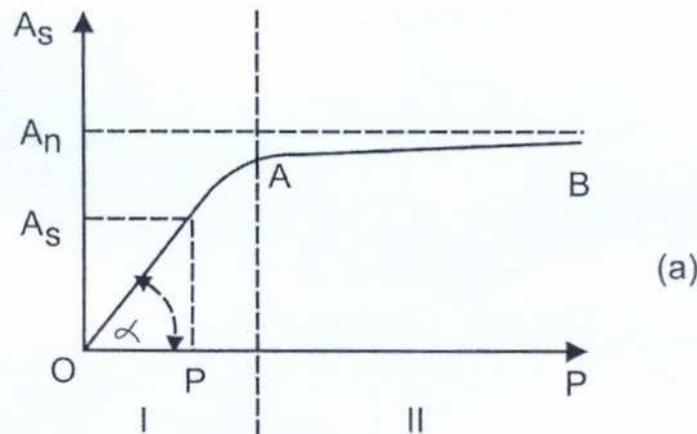
k – Resistência ao cisalhamento das superfícies unidas.

P ↑ **A_S** ↑ e assim **A_S** ⇒ **A_n**





- Até as proximidades do ponto A μ é constante, na região II μ varia. Nesta região II é onde geralmente são realizados os processos de conformação mecânica.



- Relação qualitativa da variação da área de cisalhamento e da força de atrito com a força normal

Considerando que o material aumenta a área de contato linearmente ($A_s = P.tg\alpha$) até um limite A_n , e substituindo A_s na eq. 1 tem-se:

$$F = k.P.tg\alpha$$

Para esta região, é possível admitir que:

$$k.tg\alpha = \mu = \text{constante}$$

$$F = \mu P$$

Lei de Coulomb

$$\tau = mk$$

Dividindo pela área nominal, obtém-se a expressão para a lei de Amontons:

$$\tau = \mu p \quad (2)$$

- Nas situações reais não existe uma superfície de contato perfeita onde a resistência ao cisalhamento vale k , sendo mais representativo expressar a tensão de atrito sob a forma:

$$\tau = mk \quad (3)$$

m – fator de atrito ou fator de cisalhamento, $0 < m < 1$. Igualando as equações (2) e (3) obtém-se:

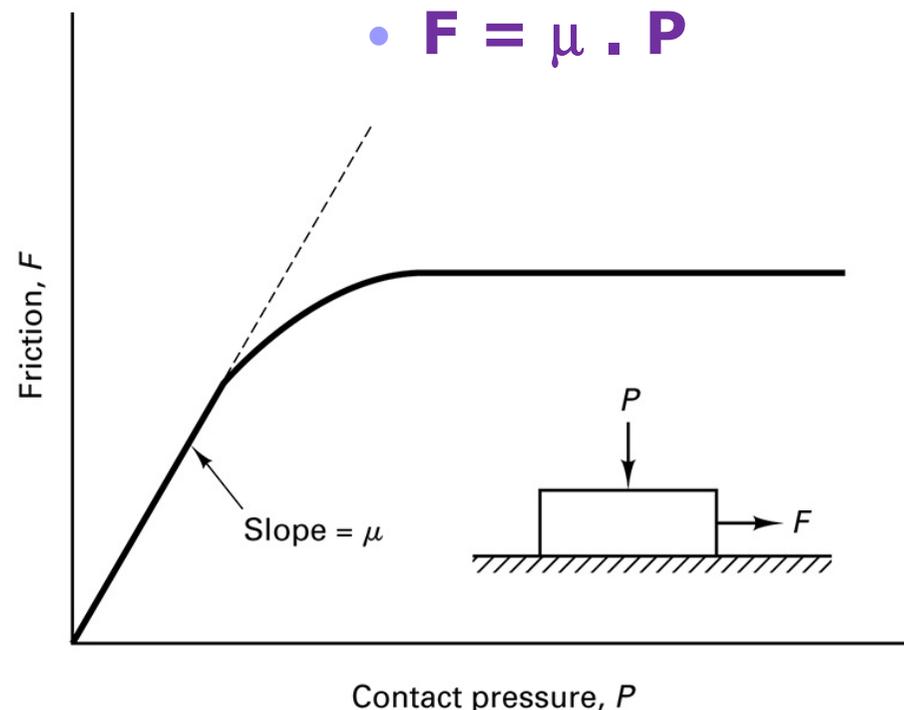
$$\tau = mk = \mu p \quad (4)$$

Para a condição de aderência total ($m=1$), e o valor mínimo de p , que produz escoamento em estado uniaxial, é Y . Conclui-se de acordo com o critério de von Mises que o máximo valor do coeficiente de atrito é:

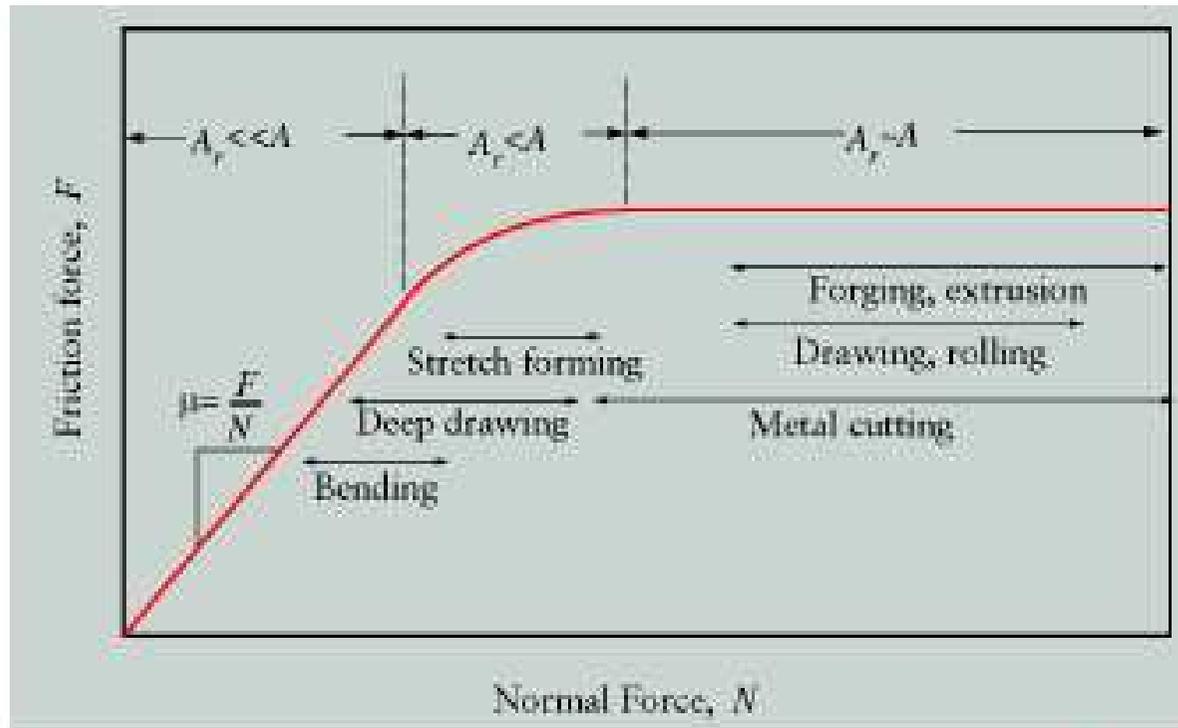
$$\mu_{\max} = \frac{k}{Y} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cong 0,577$$

Condições de Atrito

- Atrito na conformação difere daqueles normalmente encontrados nos dispositivos mecânicos.
- Para cargas elásticas baixas, a resistência ao atrito é proporcional a pressão aplicada.
 - μ é o coeficiente de atrito
- **A altas pressões, o atrito está relacionado a resistência do material mais fraco**



Força de Atrito X Força Normal



Observação: A maioria dos componentes de máquina opera na primeira região. A segunda e terceiras regiões são encontradas nas operações de conformação devido às altas pressões de contato envolvidas entre superfícies deslizantes, isto é, matriz e peça.



➔ Essa condição, conhecida como “sticking”, cria dificuldades para definição do atrito. “Sticking”, em uma interface deslizante não necessariamente significa completa adesão a interface, como solda. Significa que a tensão de atrito na interface atingiu a tensão de cisalhamento do material, K . Como a carga normal P , é aumentada e a força de atrito F permanece constante, por definição μ diminui. Esta situação, a qual é uma anomalia, indica que pode haver uma diferente e mais realista, maneira de expressarem-se as condições de atrito em uma interface. A mais recente tendência é definir o fator de atrito, m

➔ Os valores de “ m ” variam de zero (deslizamento perfeito – “perfect sliding”) à 1 (aderência – “sticking”). O valor de m é independente da força normal ou da tensão normal, visto que a tensão de cisalhamento no escoamento de uma camada fina de material é independente do valor da tensão normal.

Valores de μ para diferentes processos	μ
<i>A - Laminação a frio</i>	
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 (<i>sand blast</i>)	0,30
Al, Cu e Pb - cilindro de aço polido	0,10
Al, Cu e Pb - cilindro rugoso	0,40
<i>A' - Laminação a quente</i>	
Aço ao C - cilindro de aço - 400 - 900 ^o C	0,40
Aço ao C - cilindro de aço - 1 000 ^o C	0,30
Aço ao C - cilindro de aço - 1 100 ^o C	0,20
Aço ao C - cilindro fundido (aproximadamente 50% maior)	
Alumínio - cilindro de aço - 375 ^o C	0,54
Cobre - cilindro de aço - 750 ^o C	0,35
Níquel e chumbo - cilindro de aço - 900 e 180 ^o C	0,32
Bismuto e cádmio - cilindro de aço - 150 e 180 ^o C	0,25
Estanho e zinco - cilindro de aço - 100 e 110 ^o C	0,17
<i>B - Trefilação</i>	
Aço ao C - matriz WC - diferentes lubrificantes	0,03-0,06
Cobre - matriz WC - lubrificação forçada de óleo	0,06
Latão - matriz de aço - lubrificação forçada de óleo	0,10
Cobre e inox - matriz WC - cera	0,07
Cobre e inox - matriz WC - óleos minerais	0,30

Valores de μ para diferentes processos	μ
<i>C - Estampagem profunda</i>	
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

TABLE 4.1

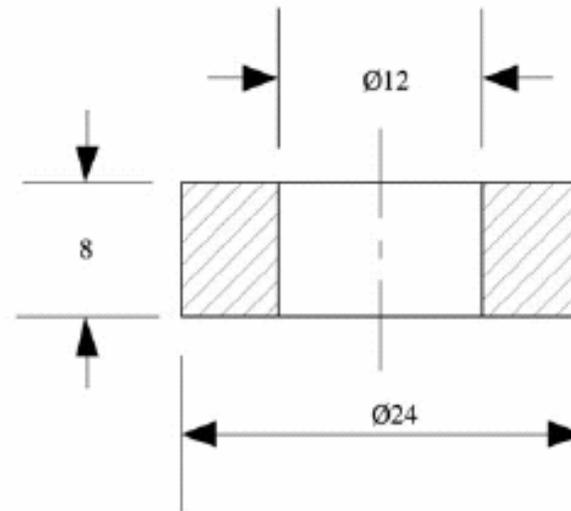
COEFFICIENT OF FRICTION IN METALWORKING PROCESSES

PROCESS	COEFFICIENT OF FRICTION (μ)	
	COLD	HOT
Rolling	0.05–0.1	0.2–0.7
Forging	0.05–0.1	0.1–0.2
Drawing	0.03–0.1	—
Sheet-metal forming	0.05–0.1	0.1–0.2
Machining	0.5–2	—

TESTE DO ANEL

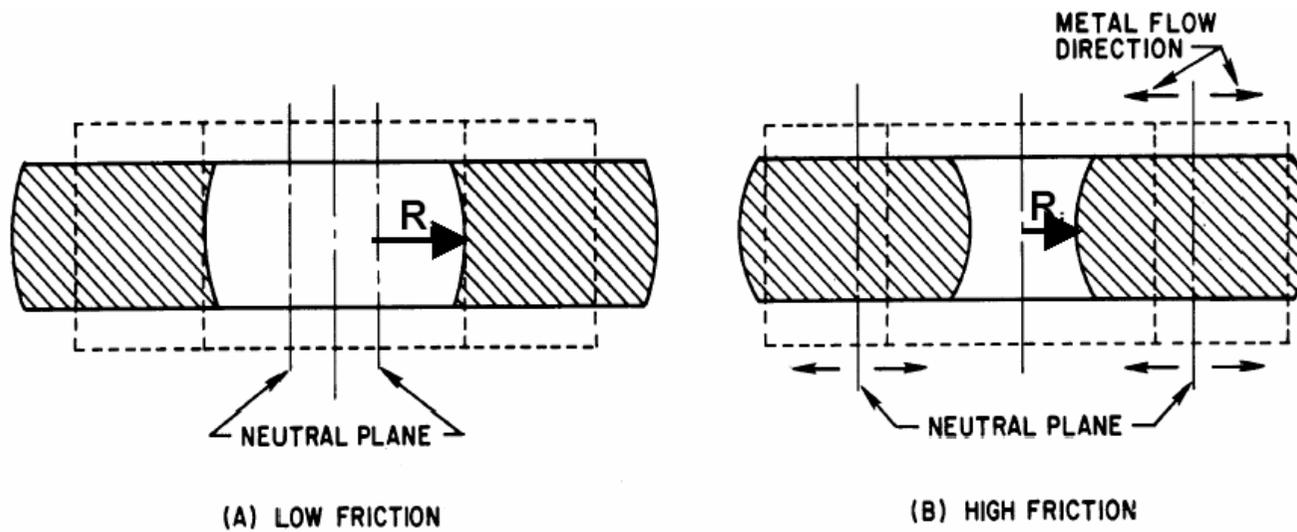
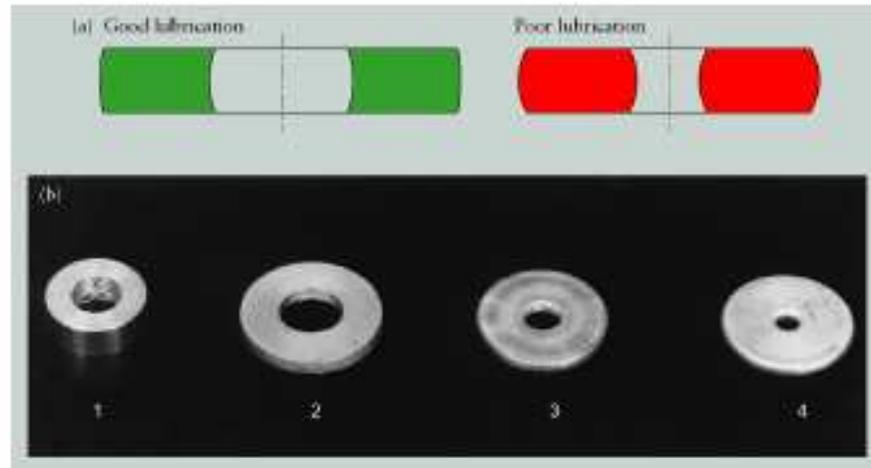
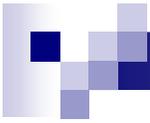
Para determinar o coeficiente de atrito, a redução percentual da espessura em relação à redução percentual do diâmetro interno deve-se comparada com “curvas de calibração”, que representam valores de coeficiente de atrito obtidos por simulação com base em modelos teóricos ou soluções analíticas.

Exemplo



Dimensões do corpo de prova para o ensaio do anel.

Proporção: 6 : 3: 2



- The reduction of inner diameter (R_i) indicates the friction on ring surface

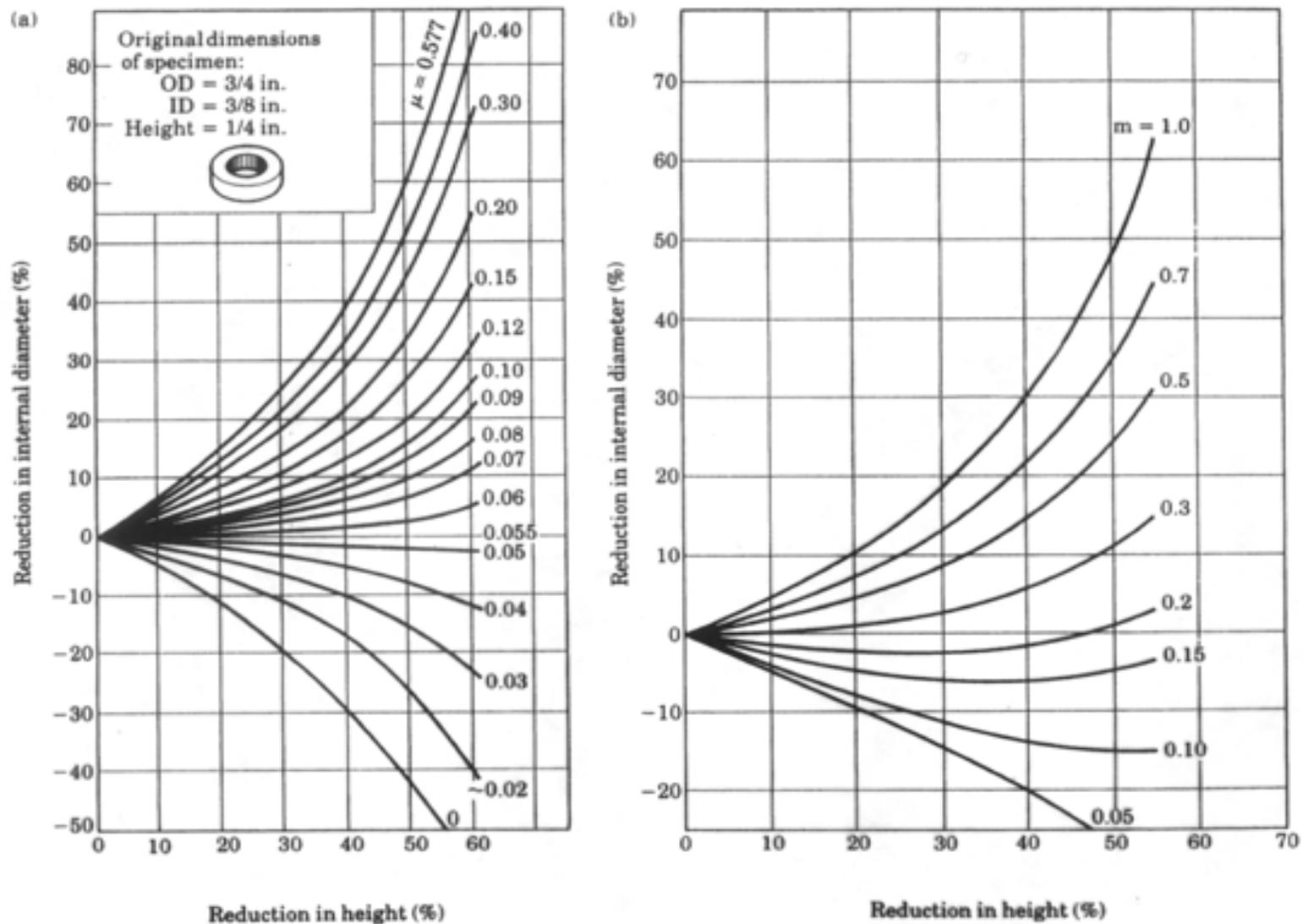


FIGURE 4.8 Charts to determine friction in ring compression tests: (a) coefficient of friction μ ; (b) friction factor m . Friction is determined from these charts from the percent reduction in height and by measuring the percent change in the internal diameter of the specimen after compression.

Exercício: Em um ensaio de compressão de um anel, a amostra de 10mm na altura, com diâmetro externo (D_e)= 30mm e diâmetro interno (D_i)= 15 mm é reduzida na espessura em 50%. Determinar o coeficiente de atrito μ e o fator de atrito m ; se o diâmetro externo (D_e) após deformação é 38mm.

Solução: cálculo do novo D_i . Do volume constante,

$$\frac{\pi}{4} (30^2 - 15^2) 10 = \frac{\pi}{4} (38^2 - D_i^2) 5 \quad \therefore D_i = 9,7 \text{ mm}$$

cálculo de ΔD_i (variação do diâmetro interno)

$$\Delta D_i = \frac{15 - 9,7}{15} \times 100\% \Rightarrow \Delta D_i \cong 35\% \quad (\text{diminui } \phi)$$

Da Figura 54, para uma redução na altura de 50% e uma redução no diâmetro interno de 35%, os seguintes valores são obtidos:

$$\mu = 0,21 \quad \text{e} \quad m = 0,72$$



Referências Adicionais

- HELMAN, H. e CETLIN, P. R., **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**, Ed. Artliber, 2005.
- RODRIGUES, J. **Tecnologia Mecânica**. Volumes 1 e 2, Ed. Escolar, 2005.