



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Conformação Plástica de Tubos

(Curso de especialização em Engenharia de
Fabricação e Máquinas Ferramentas)

AUTOR:
OTTO ALFREDO REHDER

COORDENADOR:
ROSALVO TIAGO RUFFINO

SÃO CARLOS
2020

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LABORATÓRIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS

"CONFORMAÇÃO PLÁSTICA DE TUBOS"

Dr. Eng^o. OTTO ALFREDO REHDER

Curso de especialização em Engenharia de Fabricação e Máquinas Ferramentas.

Coord.: Dr. Eng^o. R.T. RUFFINO

São Carlos
1980

CONFORMAÇÃO DE TUBOS

R 271c
e. 1

1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA

No fim do século 19 várias indústrias se dedicaram à fabricação de tubos. Os irmãos Mannesmann analisando o aparecimento de um vazão que se forma no centro de um bloco cilíndrico, quando este sujeito a um esforço de compressão radial e rotatório, idealizaram o processo de laminação de tubos sem costura.

Consta este processo em rolar uma barra cilíndrica entre dois rolos cônicos que ao mesmo tempo comprimiam a barra e a rolava dando um pequeno avanço axial, vide fig. 1.

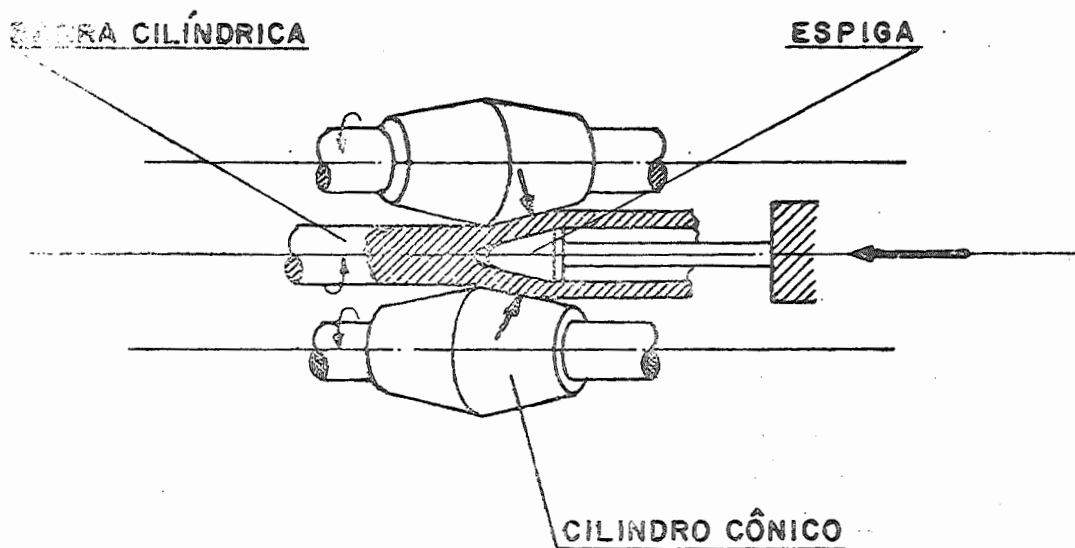


Fig. 1 - Laminação de abrir tubos.

Para não formar uma superfície interna irregular, introduziu-se uma espiga que pressionada contra os cilindros cônicos, garantindo um alinhamento da superfície interna. No entanto, este processo foi desenvolvido para a conformação a quente, isto é, acima da temperatura de recristalização.

Logo após desta descoberta de fabricação de tubos, Ehrhardt idealizou um outro processo que se baseia na compressão de um bloco prismático em uma matriz cilíndrica por meio de um punção cilíndrico, cujo diâmetro corresponde ao diâmetro interno do tubo a ser fabricado, vide fig. 2.



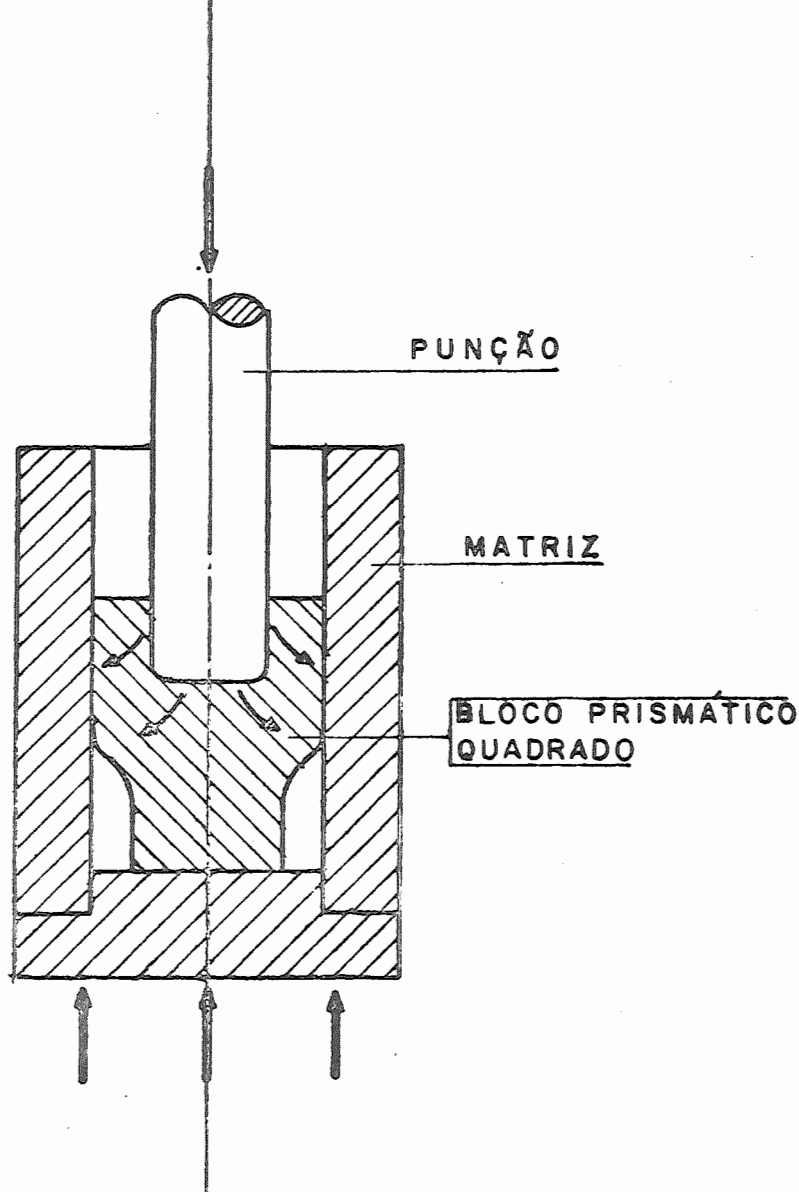


Fig. 2 - Conformação de tubos por compressão.

A barra prismática é comprimida a quente, dilatando lateralmente e preenchendo a matriz, tornando-se cilíndrica, ao mesmo tempo que é furada, crescendo axialmente.

A laminação de tubos iniciou-se com um processo descontínuo a quente em que a barra oca montada sobre uma espiga que, com um movimento de vai e vem, entrando nos sulcos excêntricos dos cilindros de um laminador permite o afinamento das paredes do tubo, vide fig. 3.

Modernamente procura-se laminar continuamente o tubo, colocando-se em série, várias gaiolas de lâminação com uma redução relativamente pequena em cada uma e com uma pequena tração axial entre elas, evitando-se assim, a espiga.

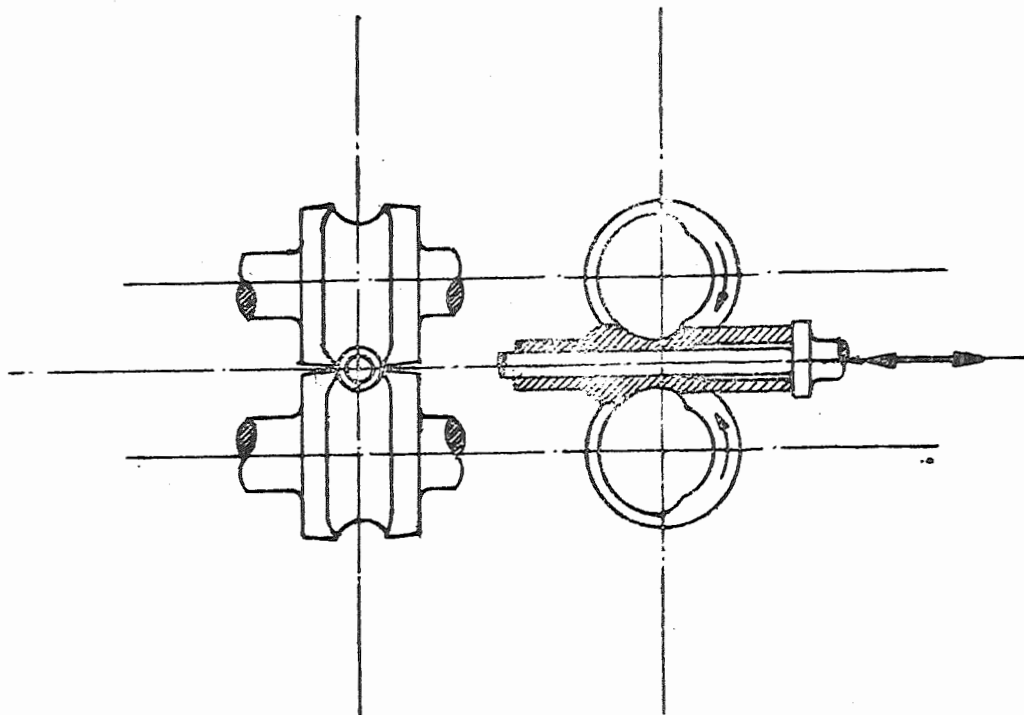


Fig. 3 - Processo de lâminação de tubos por cilindros excentricos.

Mais tarde, já no século 20, com o aperfeiçoamento das máquinas hidráulicas aparece o processo de extrusão, desenvolvido mais para os metais não ferrosos. Neste processo um tarugo cilíndrico é aquecido suficientemente e prensado num recipiente encostado numa matriz que, com a espiga central guiada pelo pistão de compressão, permite a saída do material comprimido em forma de tubo, vide fig. 4.

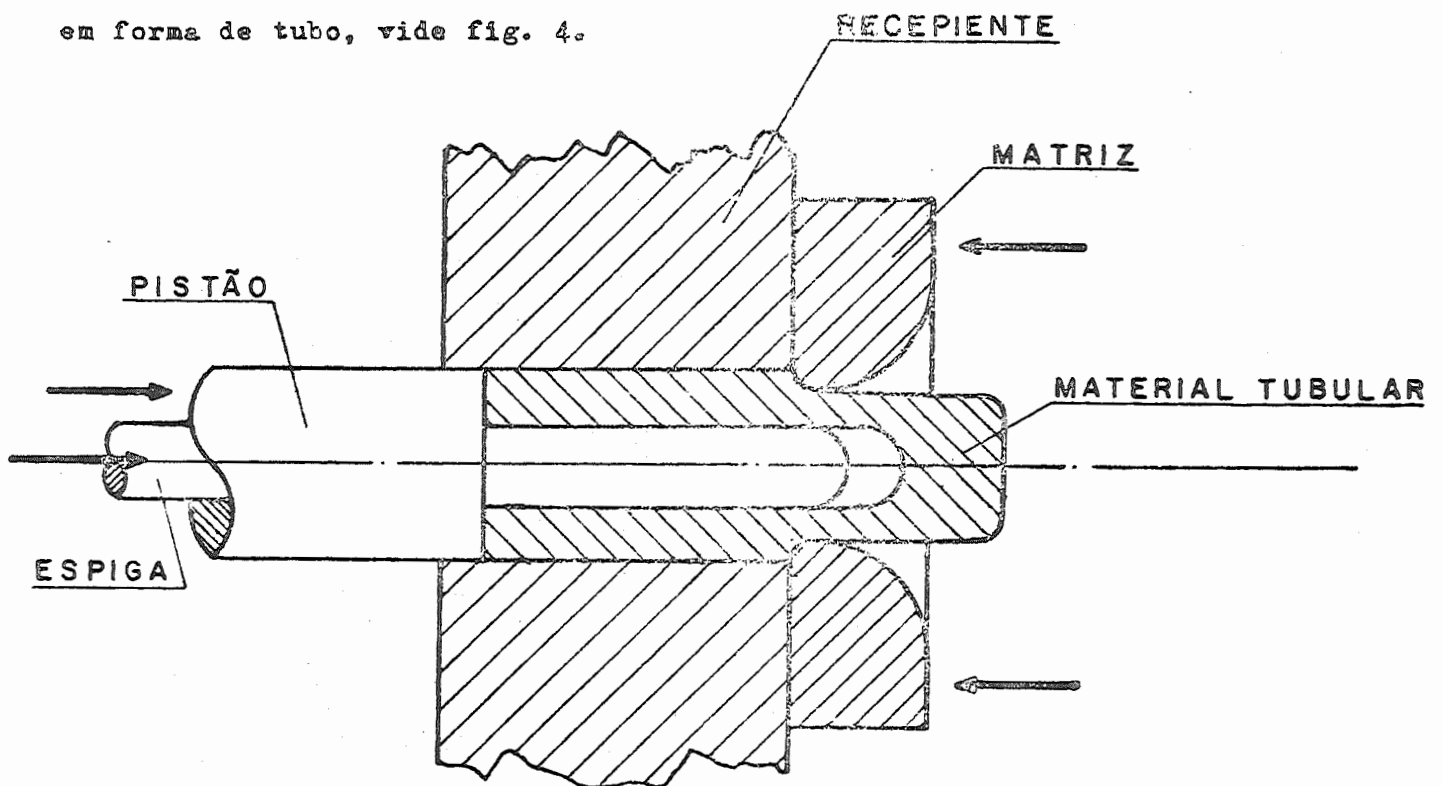


Fig. 4 - Extrusão de tubos.

Neste processo necessita-se de uma prensa de dupla ação no pistão, um para comprimir o tarugo e outra para furar o mesmo, servindo depois de espiga para formar a parede interna do tubo.

Todos estes processos necessitam de uma conformação a frio posterior, para afinar a parede do tubo e melhorar o acabamento superficial do mesmo.

Naturalmente os ferrosos necessitam um tratamento da retirada da casca de oxidação, que poderá ser feito quimicamente, por banhos. A conformação a frio baseia-se na trafilção, que já é mais antiga, somente que, em vez de trafilhar vergalhões ou arames, trafilha-se o tubo.

Para tanto desenvolveu-se praticamente 3 processos distintos, a saber: Trafilação de tubos com redução do diâmetro externo, sem ferramenta interna, que tem como consequência o engrossamento da parede do tubo e a formação da superfície interna rugosa, vide fig. 5.

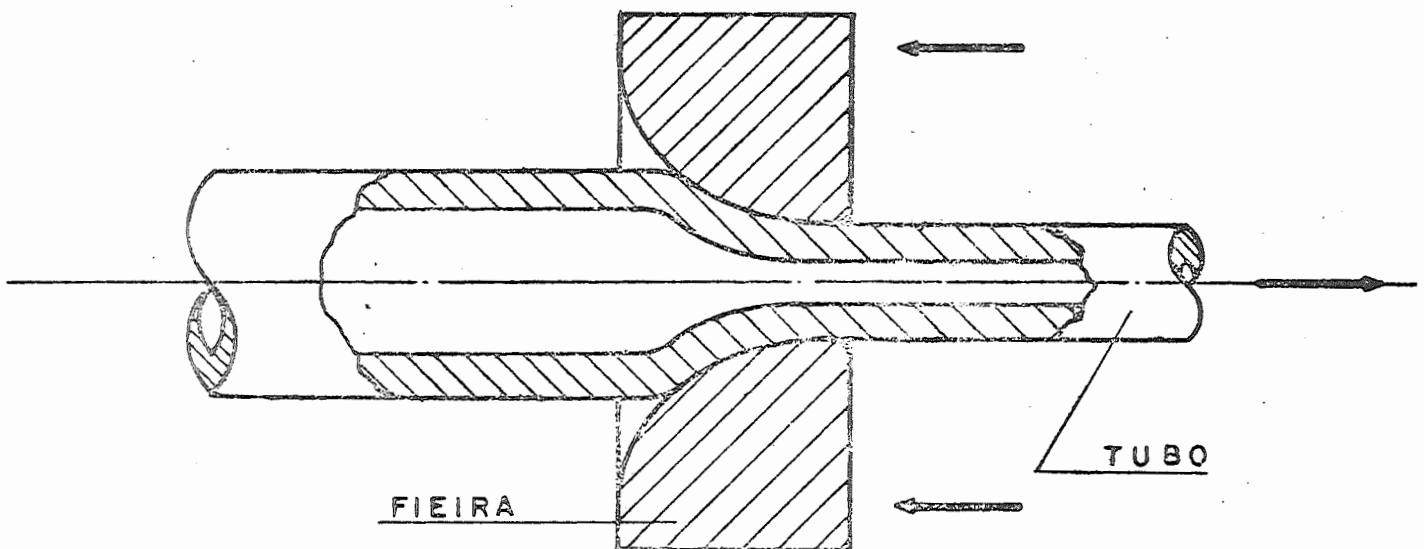


Fig. 5 - Trafilação de tubos sem espiga.

Neste processo consegue-se industrialmente uma redução do diâmetro até 30% e a ferramenta principal é a fieira, que pode ser de aço temperado martensítico, de metal duro encapsulado em aço ou de diamante encapsulado em bronze.

Trafilação de tubos com espiga flutuante que permite um afinamento da parede do tubo e conseqüentemente um melhor acabamento superficial interno, vide fig. 6.

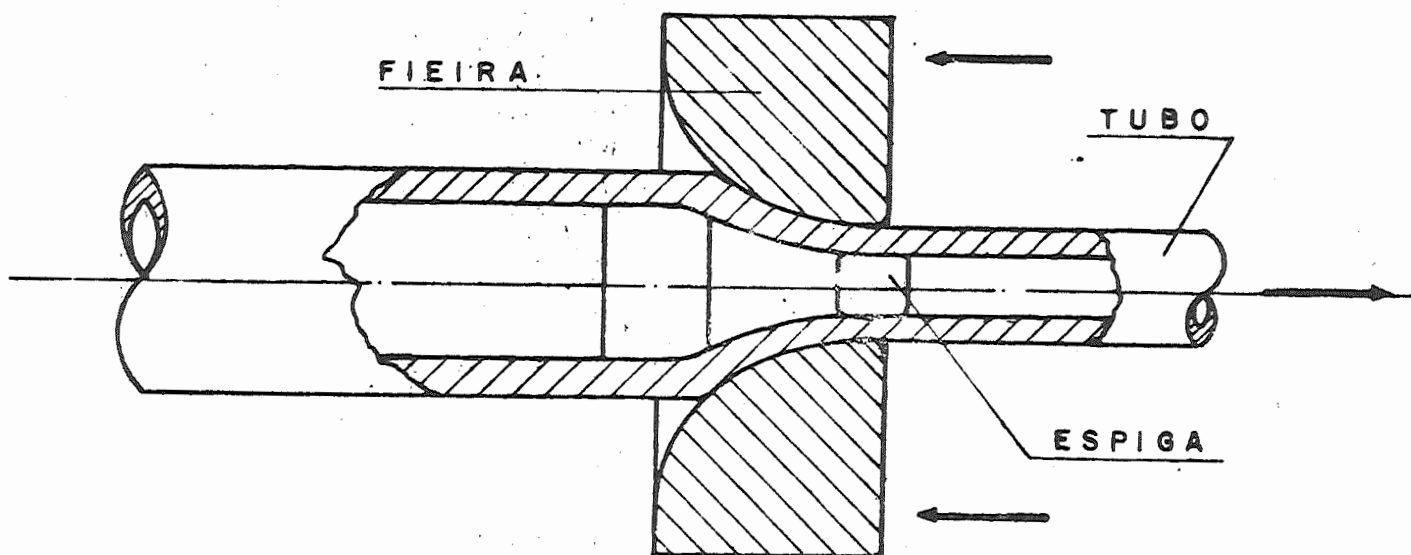


Fig. 6 - Trafilação como espiga flutuante.

Como a espiga é flutuante, ela poderia ser arrastada pelo deslocamento do tubo trafilado ocasionando um travamento. Por isso, a redução de parede do tubo e a diminuição do diâmetro interno são limitados. Normalmente a redução de parede não passa de 10% e a redução de diâmetro interno deve ser maior que 20%.

Trafilação de tubos com espiga fixa permite um bom acabamento superficial interno e a redução do diâmetro interno deve ser pouco maior que zero, vide fig. 7.

Estes processos são geralmente a frio, mas nada impede que sejam executados em temperatura mais altas, como no caso do último, aplicado em tubos de aço perfurados pelo processo Ehrhardt. Aliás, aqui preferiu-se a inversão da posição das peças móveis com as fixas, isto é, a espiga empurra o tubo fechado, como sai do processo Ehrhardt, através da fiação.



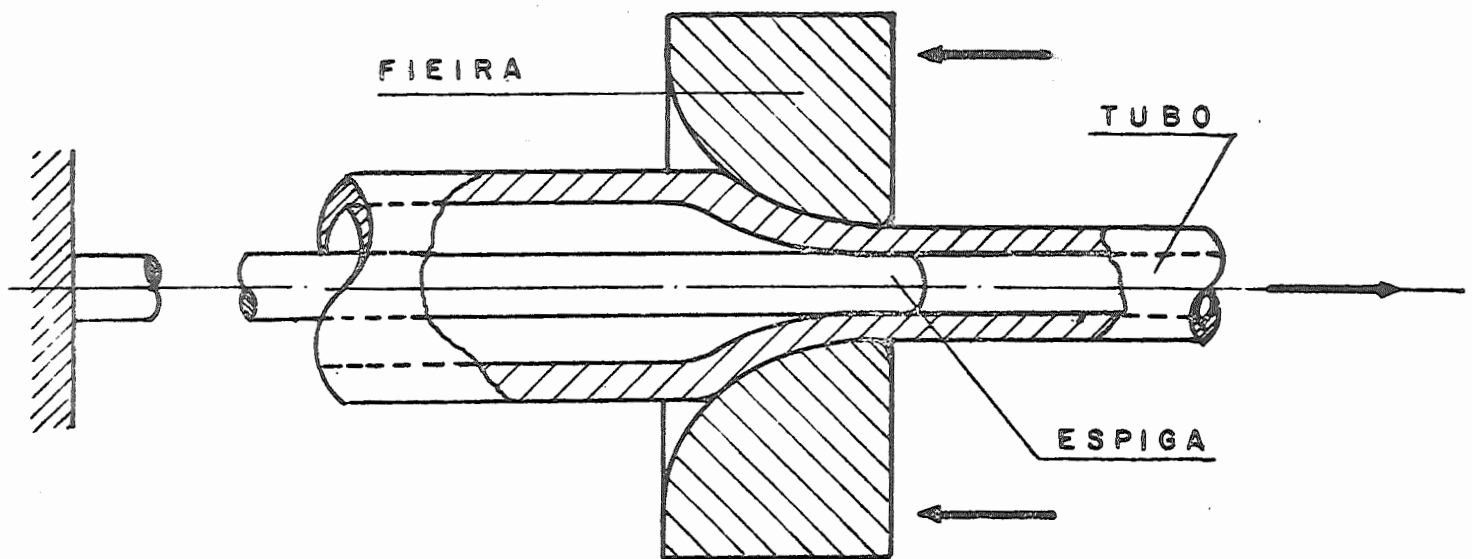


Fig. 7 - Trafilção com espiga fixa.

Com a evolução da solda nos últimos 30 anos, está se introduzindo cada vez mais no mercado, os tubos de chapa enrolada, soldada de topo. Neste processo utiliza-se uma perfiladeira, que de gaiola a gaiola de rolos, curva a tira de chapa até formar o tubo com a junta preparada para a solda. A solda pode ser por caldamento, neste caso o tubo é aquecido, por indução elétrica ou maçarico.

Este tubo também pode ser trafilado, exigindo-se para isso uma solda de alta qualidade. Faltam ainda os processos como: o repuxamento e a estampagem profunda, que só passamos a citar.

2. CONCEITOS TEÓRICOS

Lembrando o critério de Tresca ou da máxima tensão de cisalhamento tem-se:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2\tau_{\max} \quad (1)$$

que segundo Siebel deve corresponder a pressão específica de deformação plástica k_d , portanto:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = k_d \quad (2)$$

Na fabricação de tubos com parede $s \leq 0,2 d_m$ sendo $d_m = \frac{d_{ext} - d_{int}}{2}$,

tem-se a seguinte distribuição de tensões

$$\sigma_1 > \sigma_r > \sigma_t \quad (3)$$

sendo σ_1 a tensão longitudinal, σ_r a tensão radial e σ_t a tensão tangencial.

Dai se conclue que a máxima tensão é a longitudinal e a mínima, é tensão tangencial.

Portanto, a igualdade 2 passa a ser a seguinte:

$$\sigma_1 - \sigma_t = k_d \quad (4)$$

Lembrando-se as equações de plasticidade, segundo Eichinger

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{1}{D} \left[\sigma_1 - 0,5(\sigma_2 + \sigma_3) \right] \\ \phi_2 &= \frac{1}{D} \left[\sigma_2 - 0,5(\sigma_3 + \sigma_1) \right] \\ \phi_3 &= \frac{1}{D} \left[\sigma_3 - 0,5(\sigma_1 + \sigma_2) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

com a tensão média definida por

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (6)$$

fornece as equações:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{3}{2} \frac{1}{D} (\sigma_1 - \sigma_m) \\ \phi_2 &= \frac{3}{2} \frac{1}{D} (\sigma_2 - \sigma_m) \\ \phi_3 &= \frac{3}{2} \frac{1}{D} (\sigma_3 - \sigma_m) \end{aligned} \quad (7)$$

que relacionadas entre si, tomam a expressão

$$\frac{\phi_1}{\sigma_1 - \sigma_m} = \frac{\phi_2}{\sigma_2 - \sigma_m} = \frac{\phi_3}{\sigma_3 - \sigma_m} \quad (8)$$

aqui ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 são as deformações logarítmicas e D é o módulo de plasticidade, análogo ao módulo de elasticidade E .

Tomando-se um tubo sob pressão interna, tem-se o seguinte equilíbrio entre as tensões radiais e tangenciais, vide fig. 8.

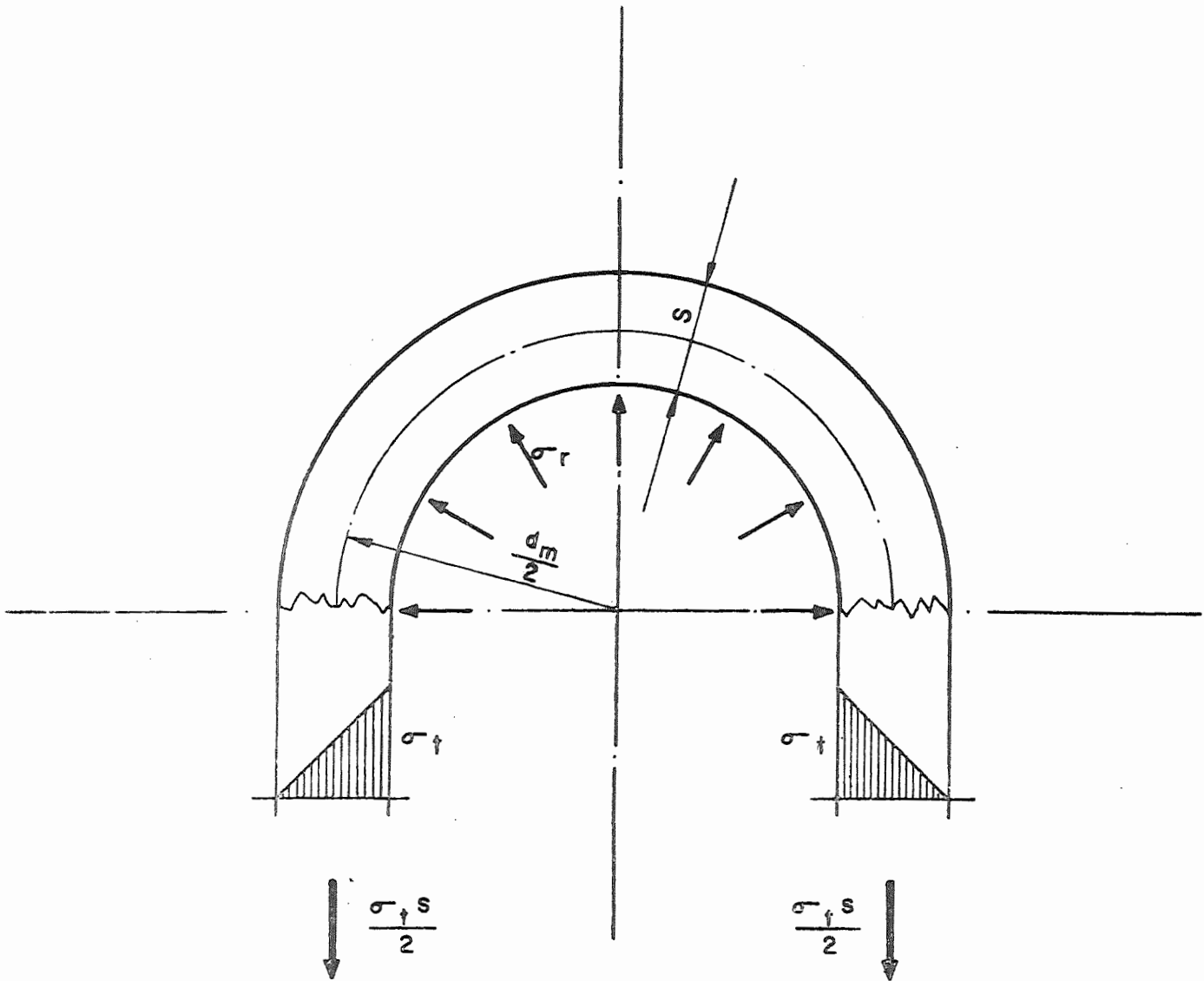


Fig. 8 - Distribuição de tensões internas num tubo.

$$\sigma_r \cdot d_m = 2 \frac{\sigma_t \cdot s}{2}$$

ou

$$\sigma_r = \sigma_t \frac{s}{d_m} \quad (9)$$

Utilizando-se as equações 4 e 9 em 6, tem-se:

$$\sigma_m = \frac{2}{3} \sigma_1 + \frac{1}{3} \frac{s}{d_m} \sigma_1 - \frac{1}{3} \frac{s}{d_m} k_d - \frac{1}{3} k_d \quad (10)$$

e a expressão 8 passa a ser escrita por

$$\phi_1 : \phi_r : \phi_t = \left[\sigma_1 \left(1 - \frac{s}{d_m} \right) + k_d \left(1 + \frac{s}{d_m} \right) \right] : \left[\sigma_1 \left(2 - \frac{s}{d_m} - 2 + k_d \left(1 - \frac{2s}{d_m} \right) \right) \right] : \left[\sigma_1 \left(1 - \frac{s}{d_m} \right) + k_d \left(\frac{s}{d_m} - 2 \right) \right] \quad (11)$$

introduzindo-se os coeficientes $\lambda = \frac{\sigma_1}{k_d}$ e $\xi = \frac{s}{d_m}$ a expressão (11)

fica simplificada para:

$$\phi_1 : \phi_r : \phi_t = \left[1(1-\xi) + (1+\xi) \right] : \left[1(2\xi - 2) + (1-2\xi) \right] : \left[1(1-\xi) + (\xi - 2) \right] \quad (12)$$

Construindo-se agora um gráfico em que o eixo das ordenadas representa λ e o eixo das abcissas

$$\frac{\phi_r}{\phi_t} \text{ ou } -\frac{\phi_r}{\phi_t} = 1 + \frac{\phi_1}{\phi_t}, \text{ a expressão}$$

(12) é representada por uma família de curvas de ξ , vide fig. 9.

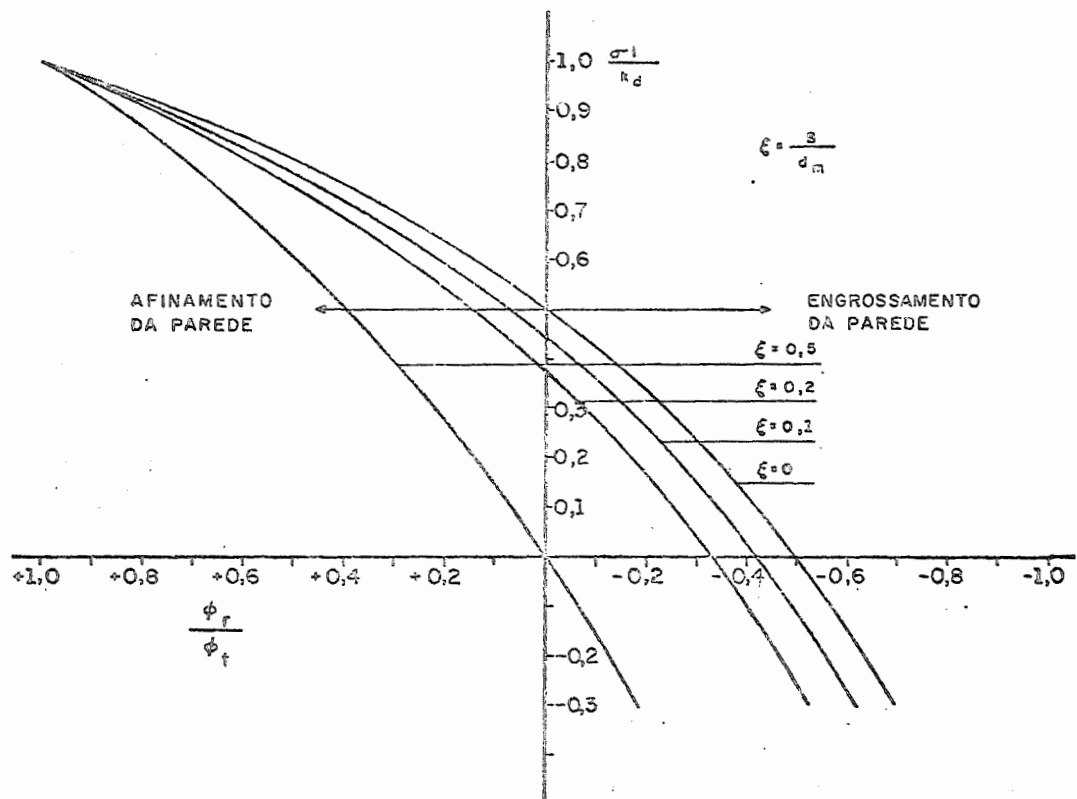


Fig. 9 - Gráfico representativo da expressão da plasticidade de tubos.

Desta forma tem-se um meio de cálculo para estimar as tensões no tubo durante a deformação do mesmo. No entanto, sempre surge o problema de limitar a tensão, que pode ser visualizado analisando-se o limite de tração simples numa barra prismática.

Ao se tracionar uma barra prismática, ela se deforma uniformemente até um ponto crítico quando se forma uma estrição. Lembrando o gráfico de encruamento, tem-se como trabalho elementar

$$dT = k_d d\phi$$

cuja integração representa o trabalho de deformação, vide fig.

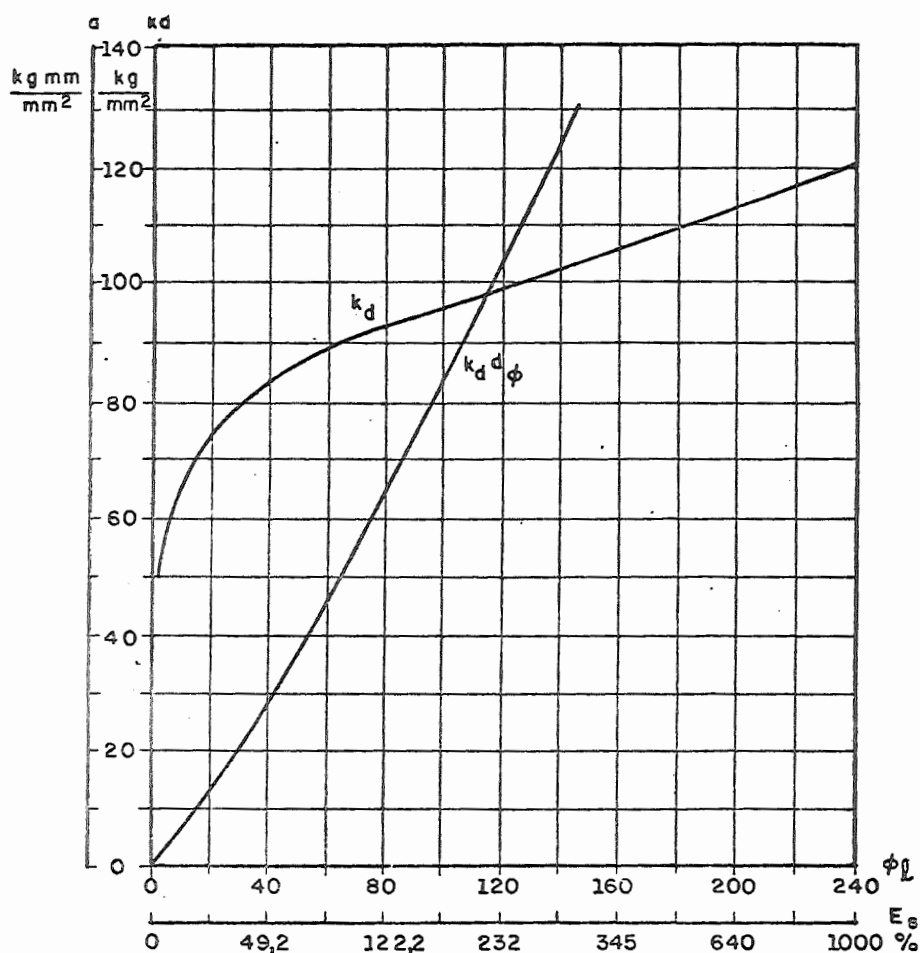


Fig. 10 - Gráfico representativo do trabalho de deformação.

O encontro das duas curvas se dá ao redor de $\phi_1 = 1,2$ e como a tensão de ruptura σ_r é limite de deformação, pode-se admitir que

$$k_d = \sigma_r \quad \text{o que corresponde ao } \phi_1 = 1,2.$$

Más, $k_d = A \phi^n$ que substituindo em (13) dá:

$$dT = A \phi^n d\phi \tag{14}$$

cuja integral é

$$T = A \frac{\phi_1^{n+1}}{n+1}$$

Felo gráfico, para $\phi_1 = 1,2$ tem-se $dT = k_d$ donde resulta:

$$A \frac{\phi_1^{n+1}}{n+1} = A \phi_1^n \quad (16)$$

portanto,

$$\phi_1 = n + 1 \quad (17)$$

isto é, o limite de deformação logarítmica é igual a um mais o índice de encruamento. Para os aços em geral $n = 0,2$ donde a justificativa de termos considerado $\phi_1 = 1,2$.

Este limite de deformação nunca foi atingido pela trafilção, ou onde a tensão de tracionamento do material limita o processo. O limite máximo atingido por trafilção em máquinas especiais é $\phi_1 = 0,7$, muito menor do que o calculado. Esta diferença se explica pelo fato de todo processo prático vir acompanhado de atrito, que dificilmente pode ser avaliado com precisão.

Industrialmente é mais seguro considerar este limite de deformação da ordem de 0,3 ou menor ainda, pois, é muito mais dispendioso iniciar novamente a operação de conformação devido a problemas de ruptura, do que introduzir mais etapas de trafilção.

3. BENEFICIAMENTO DE TUBOS POR CONFORMAÇÃO

Os tubos fabricados a quente, quando ferrosos podem ser limpos por decapagem e endireitados, quando não ferrosos são endireitados e as vezes envelhecidos em fornos especiais.

O endireitamento pode ser feito simplesmente por tracionamento axial, estiramento, ou por roletes alinhados com os respectivos eixos ortogonais



entre si. Os roletes podem ser fixos ou girar em torno do tubo com um pequeno avanço longitudinal, descrevendo uma hélice cilíndrica. Este processo tem o inconveniente de ondular o tubo quando a pressão entre roletes é muito grande.

Para evitar isto, pode-se utilizar uma espiga dentro do tubo.

A conformação a frio, por exemplo a trafilção, também traz como consequência, devido a desuniformidade de material, um curvamento axial no tubo. Portanto, necessita-se também a operação de endireitamento.

O processo é semelhante aos roletes já mencionados, só que o acabamento superficial deve ser, tanto externamente como internamente, bem mais liso. Portanto, os roletes e a espiga devem possuir uma superfície retificada e polida.

4. BIBLIOGRAFIA

- Conformação Plástica em 3 Vol. - Rehder, Otto Alfredo, 1971, ed. EESC-USP.
- Die Formgebung im bildsamen Zustand - Siebel, E., 1932 - Verlag Stahl und Eisen Düsseldorf.