

---

# METALURGIA FÍSICA

# TECNOLOGIA DA CONFORMAÇÃO PLÁSTICA

Tecnologia em Materiais

Prof. Luis Fernando Maffeis Martins

# Principais processos de conformação plástica dos metais

- Laminação
- Extrusão
- Trefilação
- Estampagem
- Forjamento



# Estampagem

Estampagem consiste em todas as operações de corte e conformação de materiais metálicos planos, a fim de lhe conferir a forma e a precisão desejada, sem a presença de defeitos superficiais (Ex: rugosidades ou riscos) ou estruturais (Ex: trincas).

A matéria-prima para a estampagem é sempre fornecida na forma de bobinas do material. A primeira operação consiste na preparação deste material para a estampagem, que envolve a segmentação da bobina em:

**CHAPAS PLANAS** = onde as bobinas são cortadas transversalmente, através de guilhotinas ou tesouras planas, gerando os “fardos”;

**TIRAS** = onde as bobinas são cortadas longitudinalmente através de tesouras rotativas, gerando os “sliters”.

# Estampagem

As operações de estampagem podem ser classificadas em:

**ESTAMPAGEM DE CORTE OU PUNÇIONAMENTO** = neste caso o material é estampado em ferramentas de corte e é necessariamente rompida por cisalhamento (Ex: obtenção de uma arruela ou um disco plano);

**ESTAMPAGEM DE CONFORMAÇÃO** = onde o material é conformado plasticamente a fim de se obter o formato da peça final e neste caso não pode absolutamente sofrer ruptura. Utilizado para produção de peças rasas (Ex: porta ou capô de um carro);

**ESTAMPAGEM DE REPUXO** = é uma conformação mais intensa, onde o material sofre um estiramento, ou seja, tem sua espessura diminuída, a fim de se conseguir a forma desejada da peça. Nesta operação o material deve ter requisitos superiores, principalmente a ductilidade, para que não se rompa durante a operação.

**DOBRAMENTO** = neste caso a matéria-prima, ou seja, a chapa plana, é simplesmente dobrada para se conseguir forma final da peça (Ex: carcaça de uma geladeira).

# Estampagem

Corte ou puncionamento



Conformação Leve



Conformação Profunda (Repuxo)

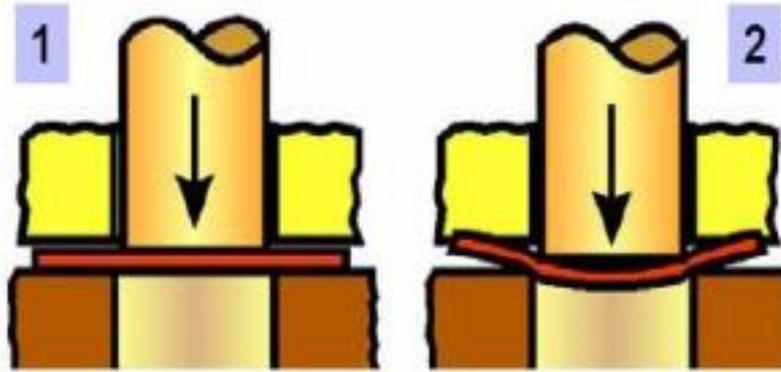


Dobramento



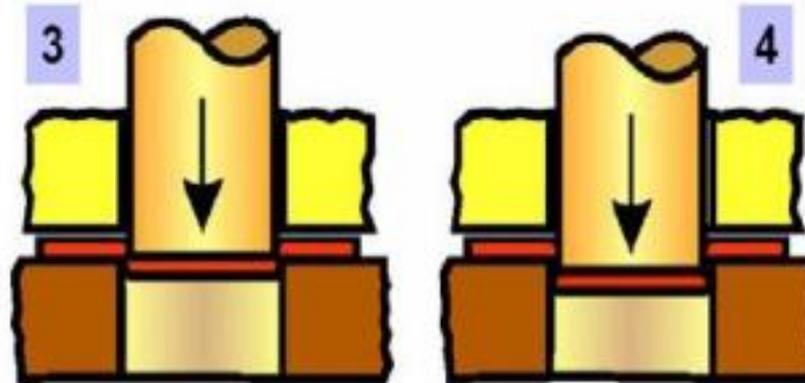
# Corte

Aplicação de  
força no  
punção



Deformação  
elástica e  
plástica

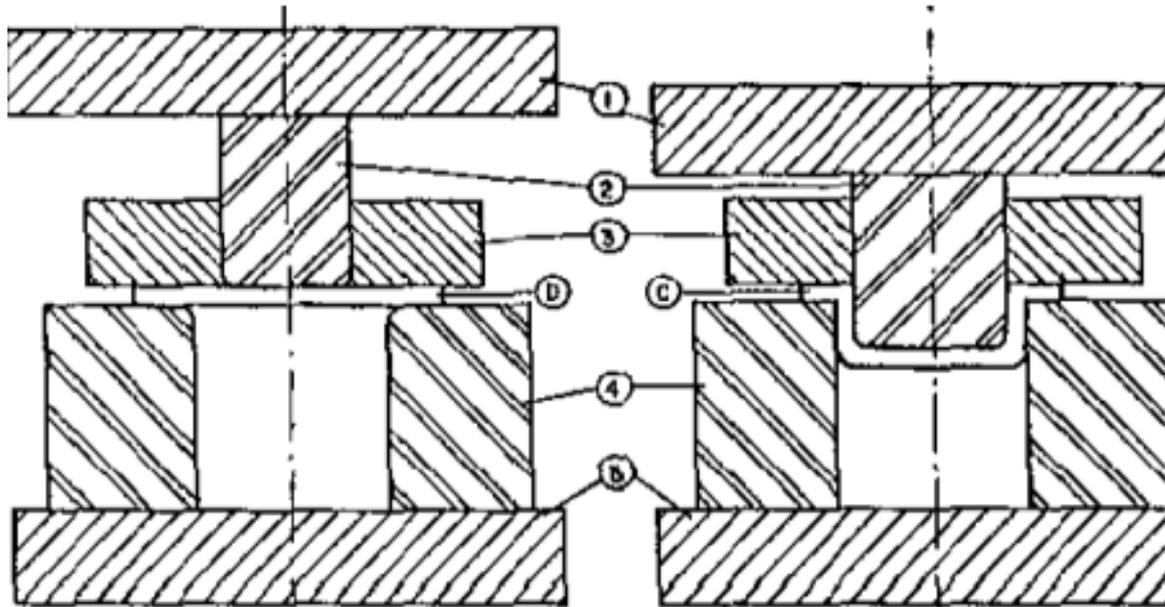
Cisalhamento  
e expansão  
da trinca



Separação  
total

Etapas típicas no processo de conformação de corte

# Embutimento



## COMPONENTES DA FERRAMENTA:

- 1 - SUPORTE DE PUNÇÃO
- 2 - PUNÇÃO
- 3 - PRENSA-CHAPAS OU SUJEITADOR
- 4 - MATRIZ
- 5 - SUPORTE DA MATRIZ
- D - DISCO ( PEÇA INICIAL NO PROCESSO )
- C - COPO ( PEÇA PARCIALMENTE CONFORMADA )

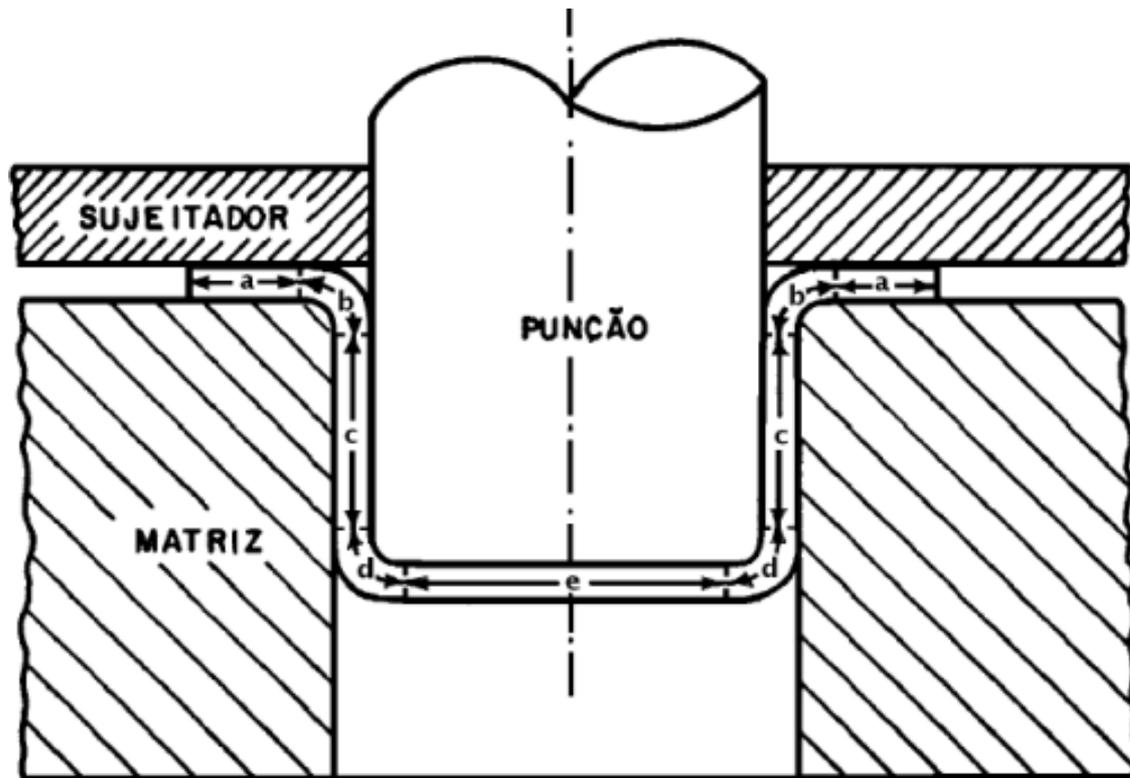
# Estampagem “rasa” x “profunda”

maffeis

A distinção entre estampagem rasa (shallow) e profunda é arbitrária. A estampagem rasa geralmente se refere à conformação de um copo com profundidade menor do que a metade do seu diâmetro com pequena redução de parede. Na estampagem profunda o copo é mais profundo do que a metade do seu diâmetro.

Às vezes, o diâmetro do "blank" é muito superior ao diâmetro da peça a estampar, sendo que esta deve atingir uma profundidade de copo muito elevada. A fabricação poderá exigir uma sequência de operações de estampagem, utilizando uma série de ferramentas, com diâmetros decrescentes (da matriz e do punção). O número de operações depende do material da chapa e das relações entre o disco inicial e os diâmetros das peças estampadas.

# Estampagem profunda



- a = Região da aba do copo
- b = Região do dobramento da matriz
- c = Região lateral do copo
- d = Região do dobramento no punção
- e = Região no fundo do copo

Na região da aba ocorre uma redução gradativa da circunferência do disco, à medida que sua região central penetra na cavidade da matriz. Nessa região atuam esforços, na direção das tangentes dos círculos concêntricos à região central, denominados de compressão circunferencial e que tendem a enrugar a chapa. Para evitar esse enrugamento, aplica-se uma tensão de compressão, através do sujeitador, denominada pressão de sujeição.

### ABA DO COPO



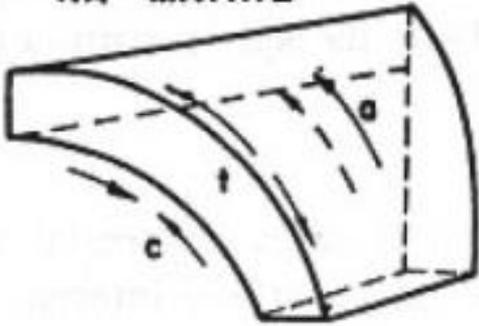
A pressão de sujeição deve ser suficientemente baixa para permitir o movimento da aba do disco em direção à região central e suficientemente alta para evitar o aparecimento das rugas. Ainda na aba atuam os esforços de tração, que trazem essa parte para a região central, denominados como tensões de estiramento radial, e também os esforços de atrito que dependem do nível da tensão de sujeição, dos estados das superfícies (da chapa, da matriz e do sujeitador quanto à rugosidade superficial) e do tipo de lubrificante empregado.

Para as chapas finas a tensão de sujeição é maior do que para as chapas mais espessas, e para as chapas grossas não há necessidade de utilizar sujeitador, pois não ocorre o enrugamento da aba.

O disco inicial sofre um, estiramento, e esse fato pode ser demonstrado verificando-se que uma dada linha traçada, segundo um diâmetro do disco inicial, apresentará um comprimento maior quando medida ao longo da secção do copo depois de conformado. A deformação plástica ocorrida, entretanto, não é devida somente à ação de estiramento, mas também de extrusão causada pela compressão do sujeitador e pela compressão circunferencial. A ação da tensão circunferencial tende a aumentar a espessura da chapa nessa região, mas isso ocorre apenas em pequena intensidade diante da ação restritiva da pressão do sujeitador.

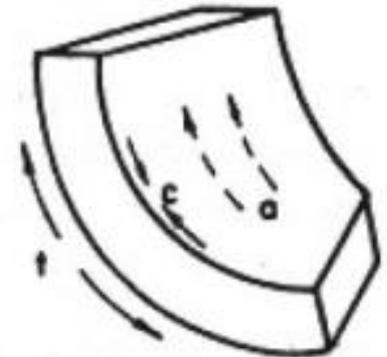
REGIÃO DE DOBRAMENTO

NA MATRIZ

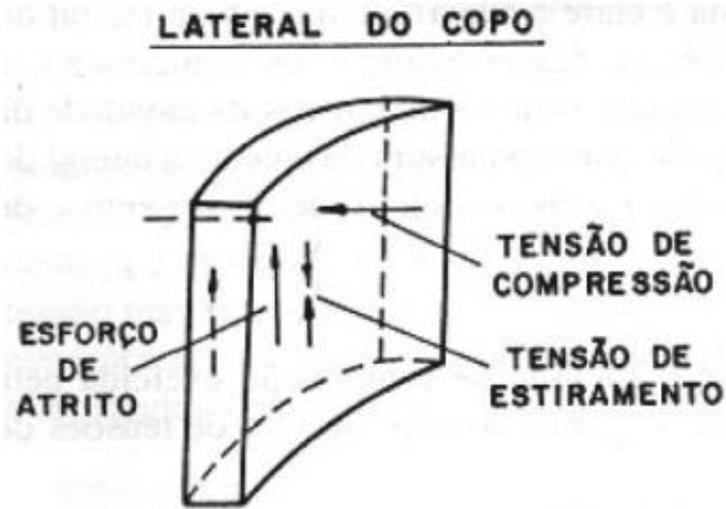


TENSÃO DE TRAÇÃO (t)  
TENSÃO DE COMPRESSÃO (c)  
TENSÃO DE ATRITO (a)

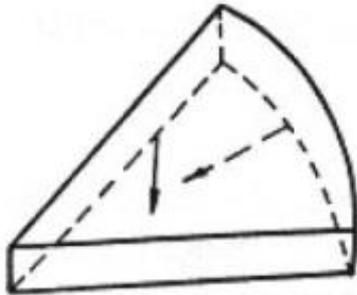
NO PUNÇÃO



Nas regiões de dobramento na matriz e no punção, agem tensões de tração na superfície externa das regiões dobradas e tensões de compressão na superfície interna. A essas tensões se associam os esforços de atrito.



Nas laterais do copo atuam as tensões de tração, ao longo dessas laterais (que provocam o estiramento das paredes do copo) e também tensões de compressão, perpendiculares à superfície das laterais (que provocam um afinamento da espessura da parede). Agem ainda nessa região os esforços de atrito entre a superfície externa da lateral do copo e a da cavidade da ferramenta e entre a superfície interna da lateral do copo e a da lateral do punção. A existência desses esforços de compressão, e conseqüentemente de atrito, depende da folga existente entre as dimensões da cavidade da matriz e do punção. Se a folga existente for maior do que a espessura da chapa na lateral do copo que penetra na cavidade da matriz, então não ocorrerá o efeito de afinamento e de atrito.

**FUNDO DO COPO**

**TENSÃO DE COMPRESSÃO PREDOMINANTE  
(ASSOCIADA A PROVÁVEL  
ESFORÇO DE ATRITO)**

No fundo do copo, o esforço predominante é a tensão de compressão exercida pela extremidade do punção, que é transmitida às demais partes do copo através de tensões de tração radiais.

A maior parte dos esforços de atrito se origina entre o seu sujeitador e a aba, e entre esta e a superfície superior da matriz. O esforço total exercido pelo punção, ou seja, o esforço de estampagem é igual à soma dos esforços atuantes em todas as partes do copo. Se o esforço de estampagem provocar em qualquer parte do copo uma tensão superior ao limite de resistência do material da chapa, ocorrerá a fissura desta nessa parte.

A força máxima de estampagem exercida pelo punção ocorre logo no início da operação de estampagem para, logo a seguir, assim que o punção começa a penetrar na matriz, cair visivelmente de intensidade. Portanto, a condição de tensão máxima ocorre no início do processo de conformação, e aí devem surgir os efeitos de enrugamento da aba ou de fissuramento da lateral em formação, que dificilmente ocorrem nos estágios finais da operação.

Em decorrência dos diversos estados de tensão nas diversas partes do copo, ao longo da operação de estampagem, as paredes do copo conformado, com ou sem flange, apresentam-se com espessuras diferentes. Nota-se que geralmente o fundo mantém a mesma espessura do disco inicial, e as laterais apresentam-se mais espessas na borda, e na parte inferior, junto à dobra de concordância com o fundo, menos espessa. Na borda superior age a maior tensão de compressão e na parte inferior da lateral a maior tensão de tração (**Figura 5.4**).

# Dobramento

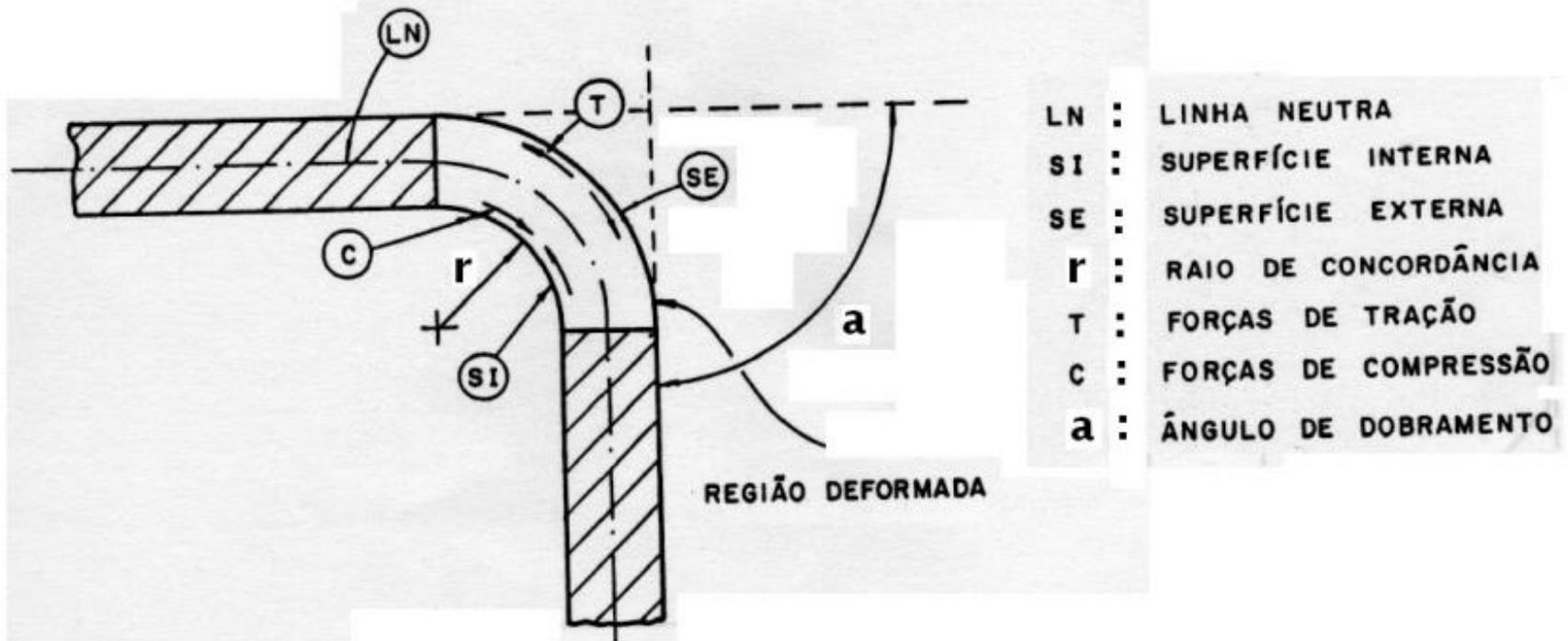


Figura 5.5 - Esforços atuantes e linha neutra no dobramento

# Dobramento

No dobramento de uma peça inicial na forma de uma tira, os esforços são aplicados em duas direções opostas para provocar a flexão e a deformação plástica conseqüente, mudando a forma de uma superfície plana para duas superfícies concorrentes, em ângulo, e formando, na junção, um raio de concordância (**Figura 5.5**). Os esforços de conformação se concentram na região de concordância das duas superfícies. Na parte interna da região de concordância, surgem esforços de compressão e, na externa, de tração. A eventual fratura da peça ocorre na parte externa e o possível enrugamento na parte interna

# Dobramento

Como a parte externa atua uma força num sentido (de tração) e na interna em outro sentido (de compressão), existe um ponto, ao longo de uma linha perpendicular à chapa - portanto, na direção do raio -, em que as tensões são nulas. Este ponto é denominado ponto neutro. A linha de união de todos os pontos neutros ao longo da chapa (em um corte feito pelo plano transversal e que contenha as forças e o raio de curvatura) é denominada linha neutra. O comprimento da linha neutra, antes e após o dobramento, é admitido permanecer o mesmo. As linhas correspondentes aos cortes, porém, entre as superfícies externa e interna e o plano transversal, não mantêm o mesmo comprimento inicial: a linha correspondente à superfície externa tem seu comprimento aumentado após o dobramento e a correspondente à superfície interna diminuído. A linha neutra é utilizada como referência - pois o seu comprimento não varia na conformação, para a verificação do desenvolvimento da peça conformada, ou seja, para a determinação das dimensões do esboço inicial que atingem, depois de conformado, as dimensões da peça considerada. Antes da conformação, a posição da linha neutra coincide com a linha de simetria, que divide a espessura da chapa em duas partes iguais. Após a conformação, no entanto, a linha neutra se desloca em direção à superfície interna.

# Dobramento

A deformação plástica que surge na região do dobramento causa aí uma redução de espessura da chapa, devido à ação das tensões de tração; as tensões de compressão, por outro lado, tendem a aumentar a largura da chapa. Como a largura é muito maior que a espessura, o efeito de deformação plástica é desprezível num sentido, concentrando-se quase que somente ao longo da espessura, e causando pequenas distorções na secção transversal da chapa.

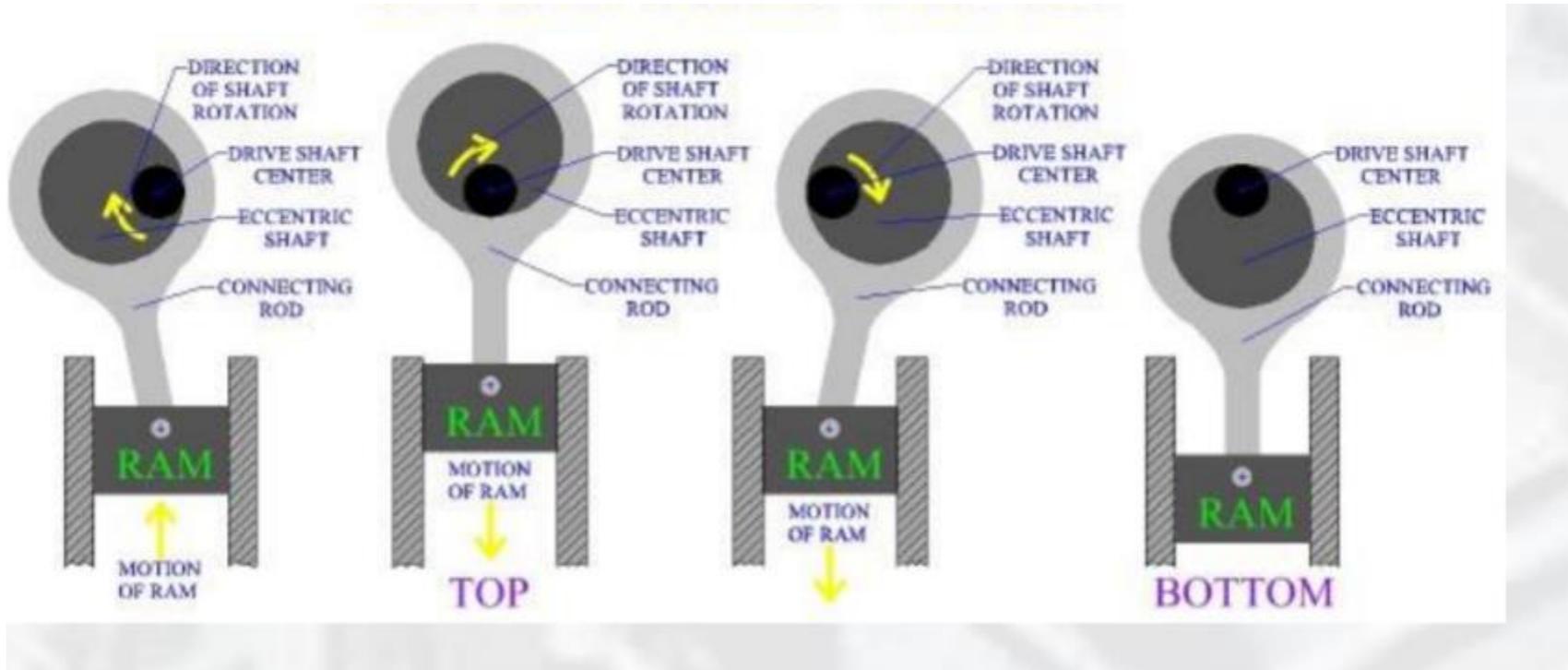
A possibilidade do fissuramento na superfície externa existe se as tensões nessa região ultrapassam o limite de resistência à tração do material da chapa; na parte interna existe a possibilidade de surgimento de enrugamentos devido à ação dos esforços de compressão principalmente para as chapas de espessuras menores. Obtêm-se menores níveis de deformação plástica no dobramento da chapa quando se tem: maior raio de curvatura de dobramento, menor espessura de chapa e menor ângulo de dobramento.

# Dobramento

O ângulo de dobramento tem que ser maior na operação de conformação do que o determinado para a peça conformada, em virtude da recuperação da deformação elástica, que é tanto maior quanto maior for o limite de escoamento do material da chapa, quanto menor for o raio de dobramento, quanto maior for o ângulo de dobramento e quanto mais espessa for a chapa. O método usual de compensar a recuperação elástica, durante as operações de conformação, é a aplicação de uma intensidade de dobramento maior, ou seja, a adoção de um ângulo de dobramento maior.

A força de dobramento, medida na matriz, aumenta quase instantaneamente quando o punção toca o esboço, decrescendo posteriormente até o nível zero, quando se completa o dobramento e o punção se retira. A rápida queda de nível da tensão de compressão na matriz é seguida do surgimento de tensões de tração, que também ocorrem após as operações de corte de chapas, mas não surgem nas operações de estampagem. Na operação de estampagem, o decréscimo da tensão de compressão na matriz, ao contrário do que ocorre nas operações de dobramento e corte, é mais lento, não causando o efeito de retrocesso rápido do nível de tensão, que provoca, por sua vez, redução da vida da ferramenta devido a fadiga.

# Prensa excêntrica



# Prensa excêntrica

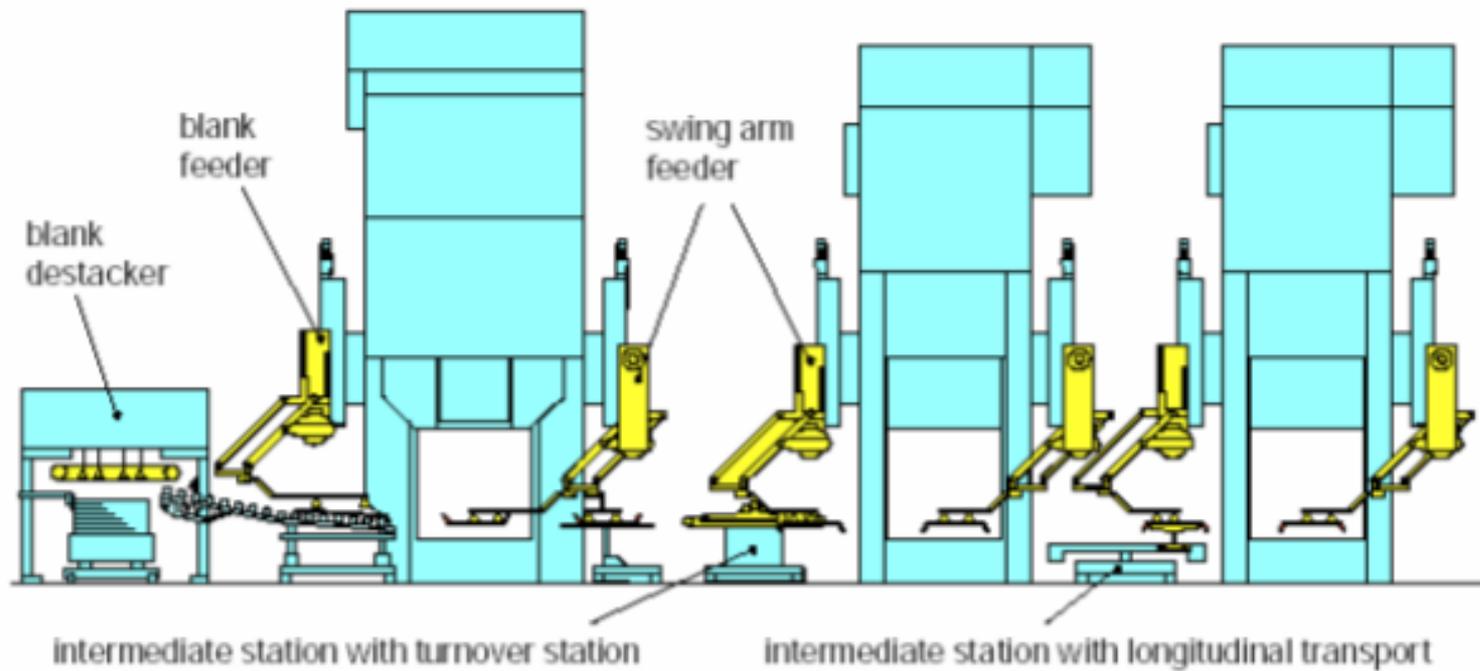


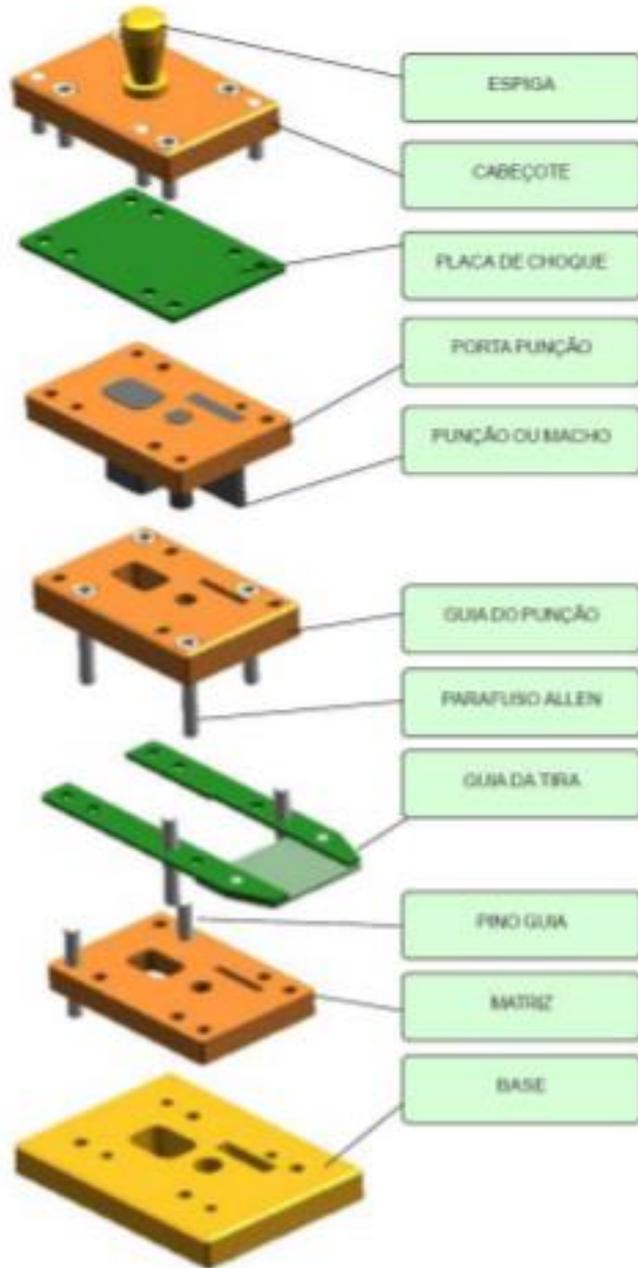
# Prensa excêntrica

maffeis

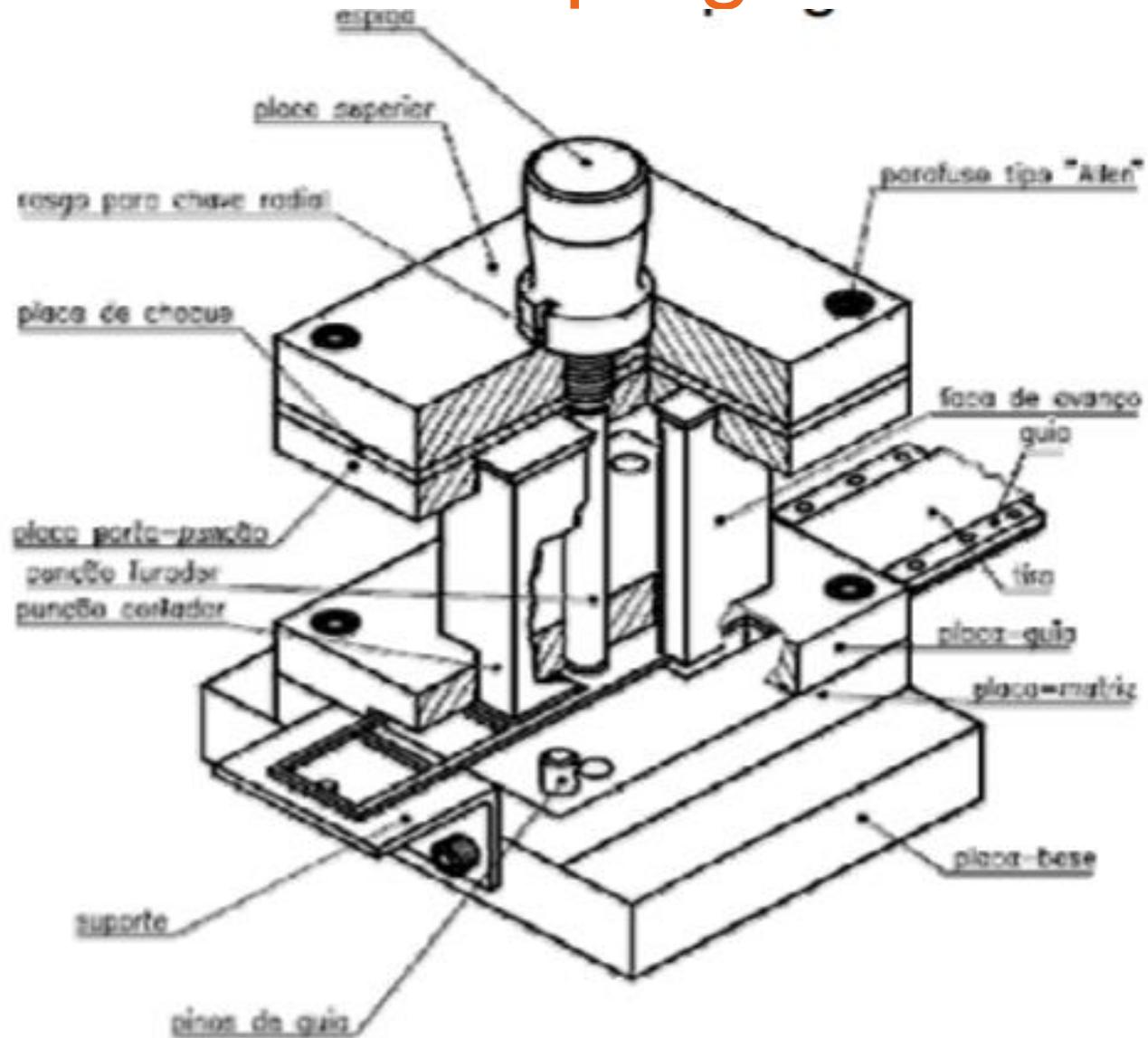


# Linha de prensas automatizada

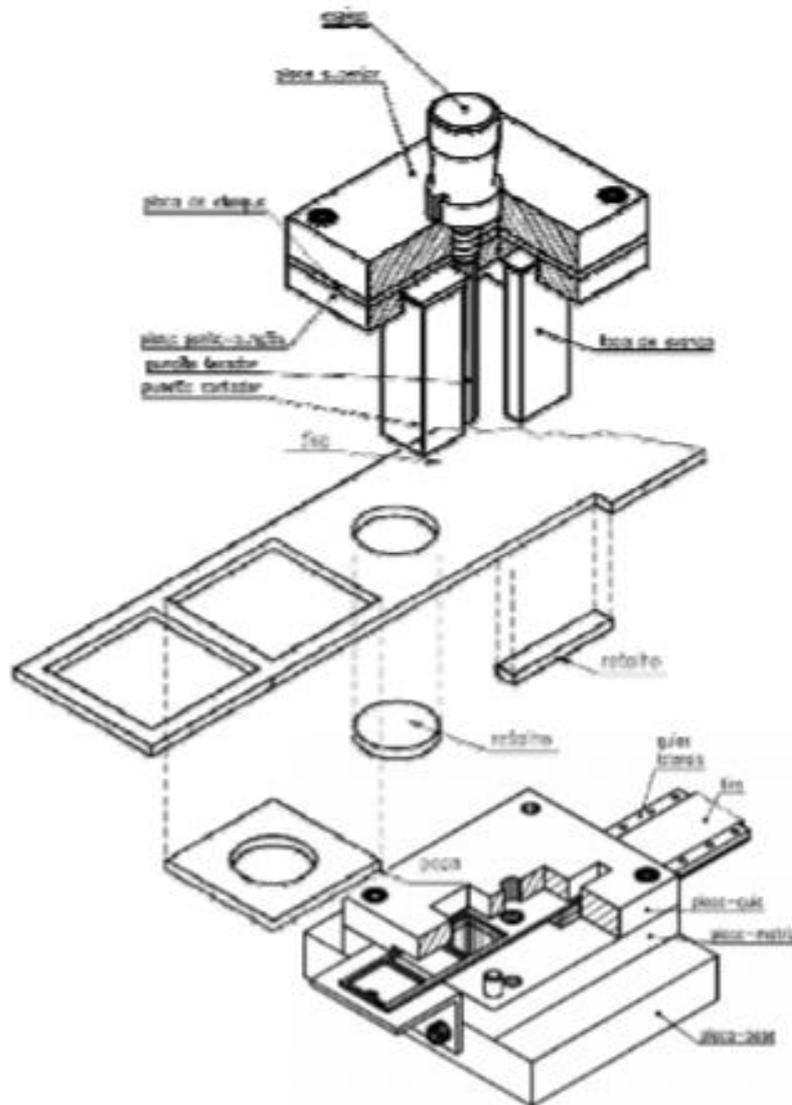




# Ferramenta progressiva



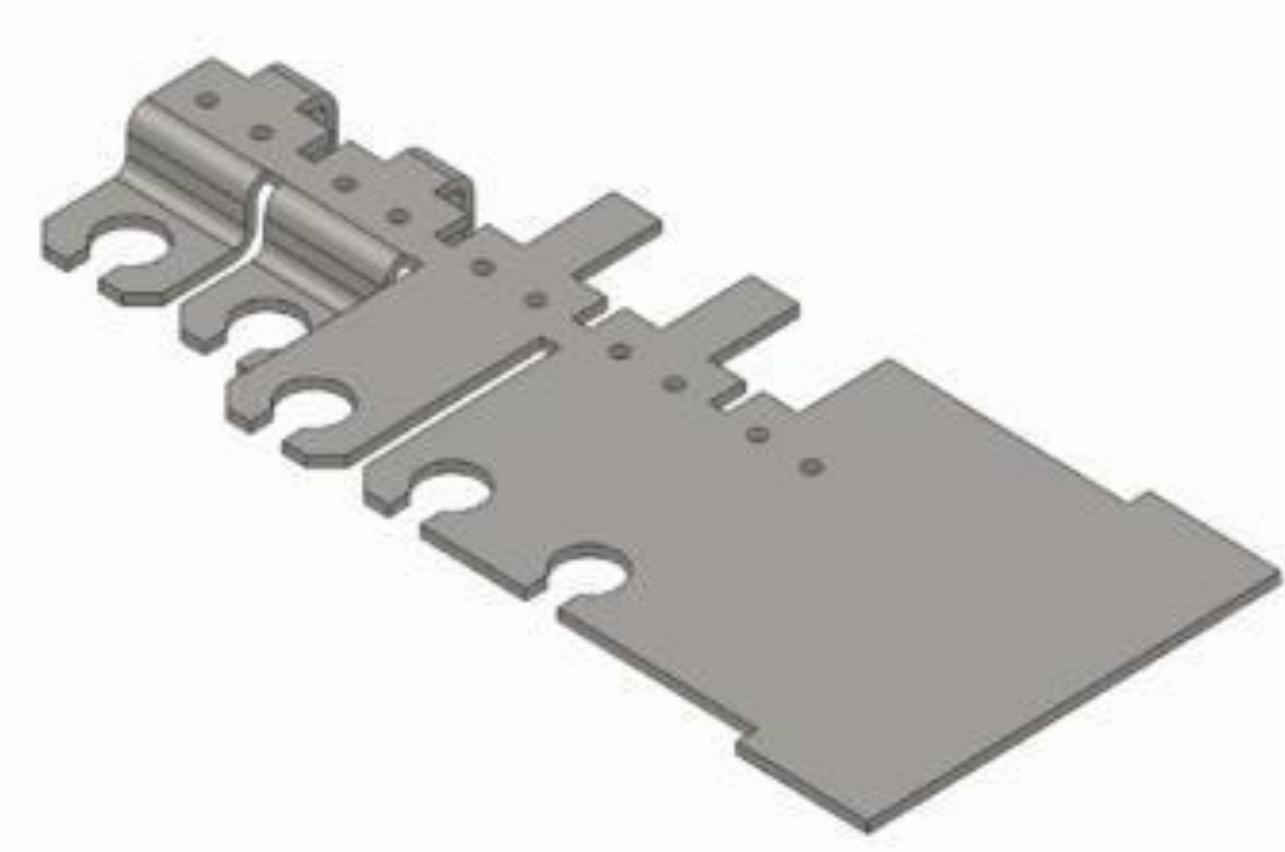
# Ferramenta progressiva



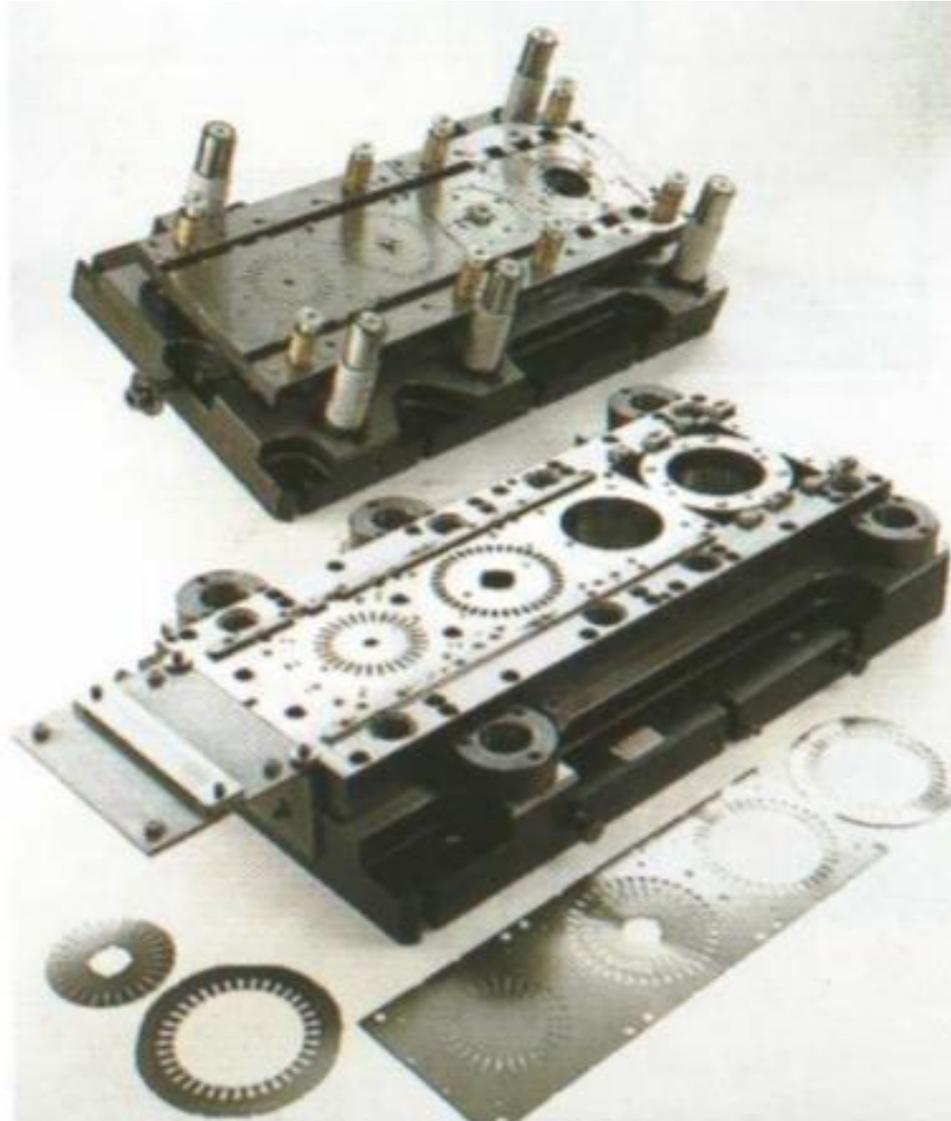
# Ferramenta progressiva



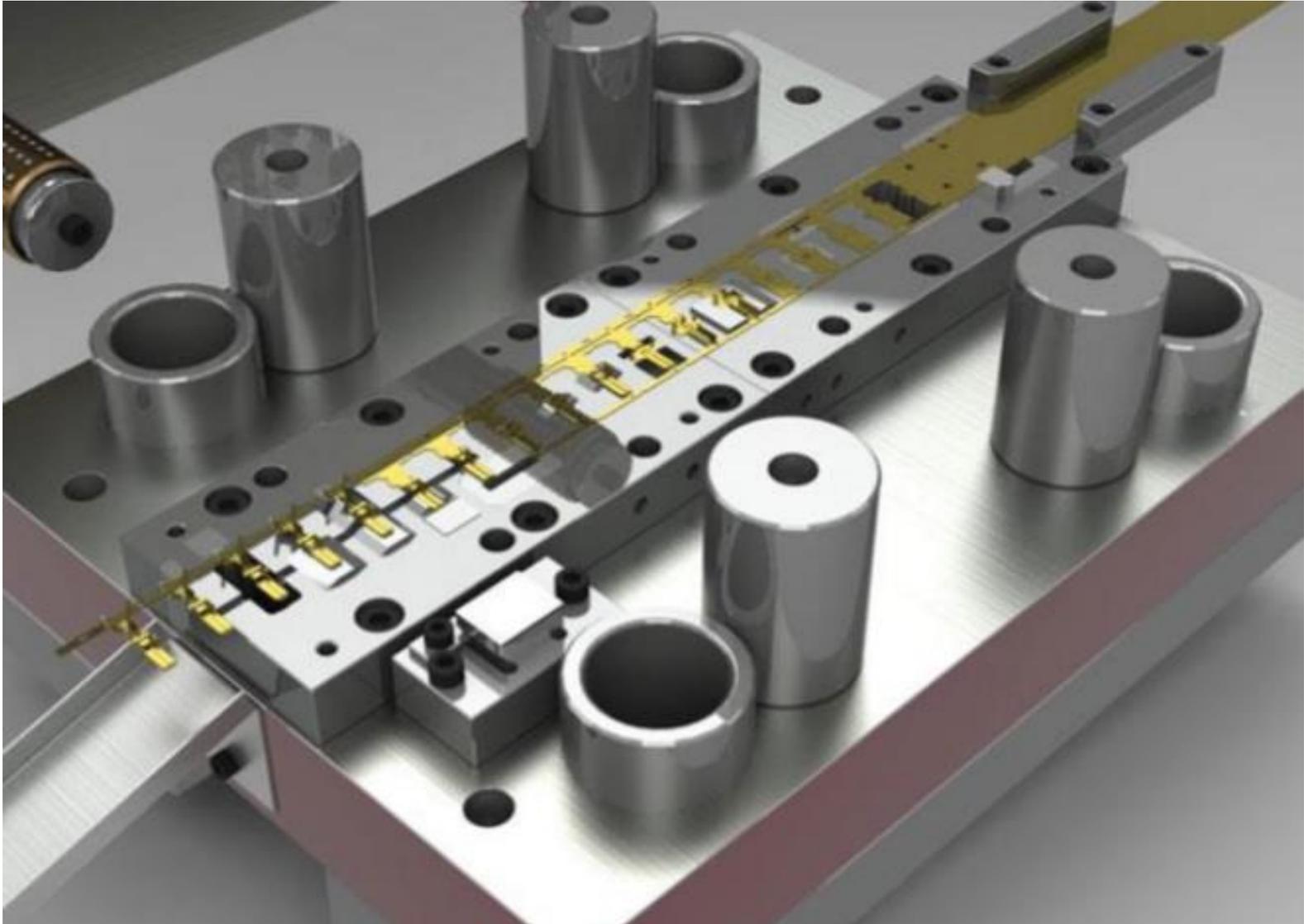
# Ferramenta progressiva



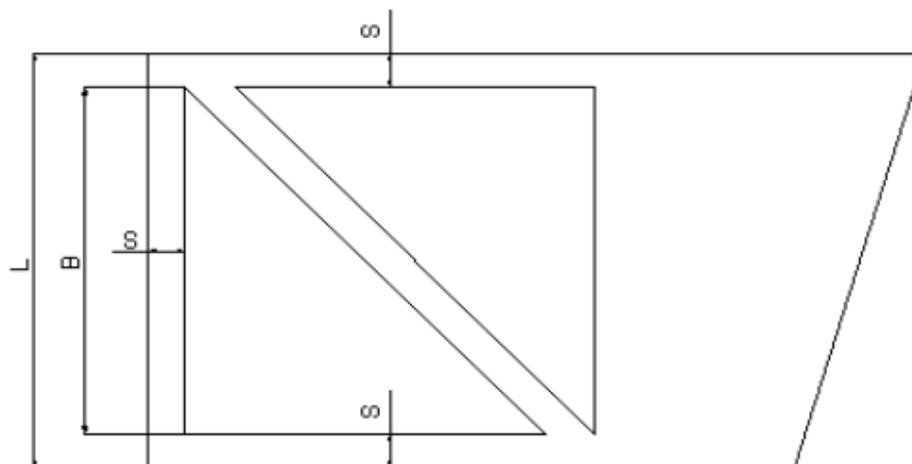
# Ferramenta progressiva



# Ferramenta progressiva



# Refilo



( Cálculo de espaçamento entre peça e bordas)

$S = 0,4e + 0,8 \text{ mm}$
-----------------------------

$S = 2 - 2e$
--------------

$S = 1,5 (0,4e + 0,8 \text{ mm})$
-----------------------------------

$S = 1,5 (2 - 2e)$
--------------------

$B \leq 70\text{mm} ; e \geq 0,5$
-----------------------------------

$B \leq 70\text{mm} ; e < 0,5$
--------------------------------

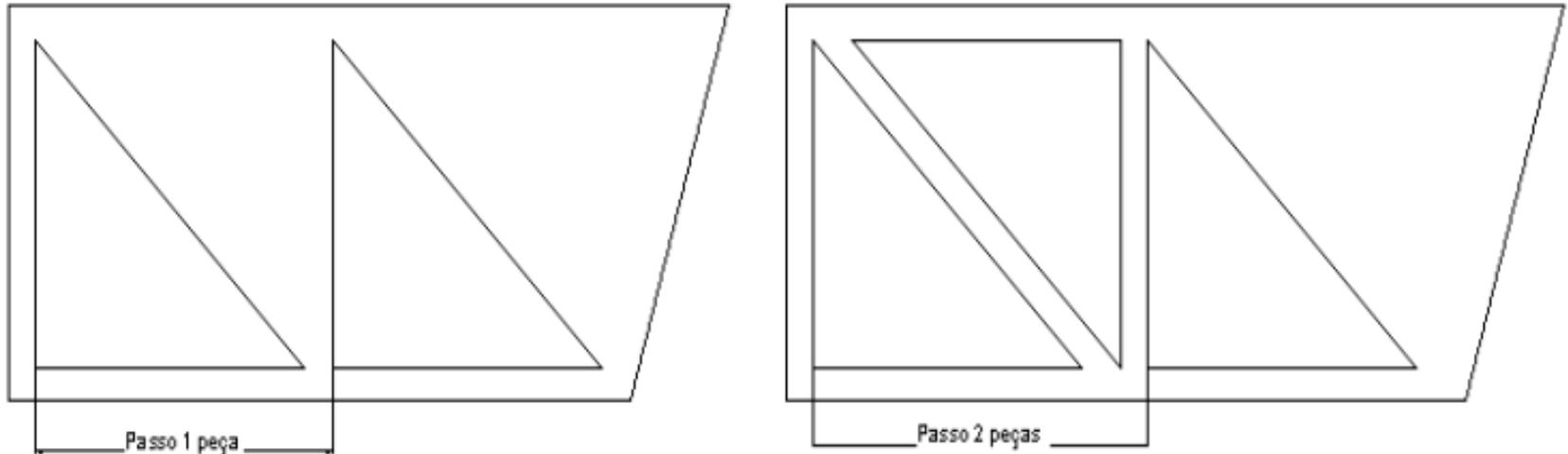
$B \geq 70\text{mm} ; e \geq 0,5$
-----------------------------------

$B \geq 70\text{mm} ; e < 0,5$
--------------------------------

**L = Largura da fita**

**B = Largura aproximada da fita apenas para efeito de cálculo do “S”**

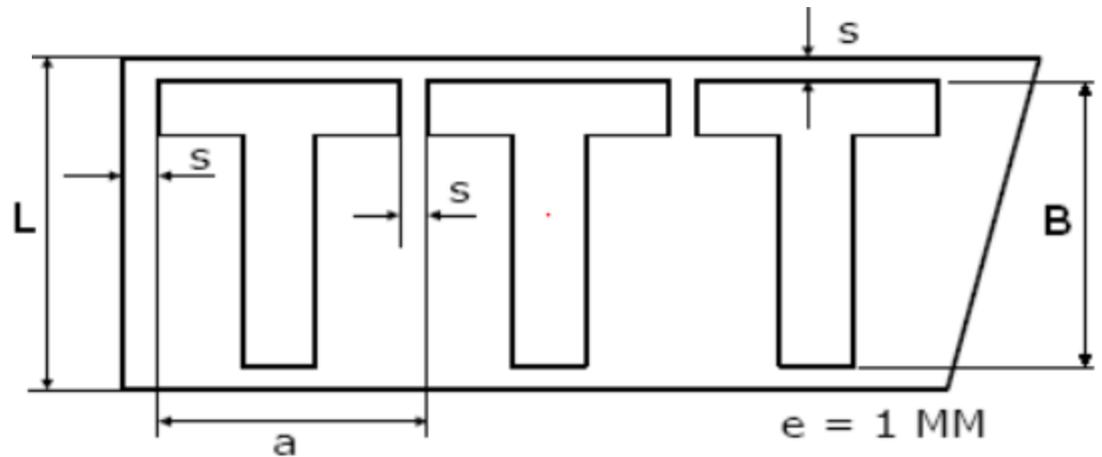
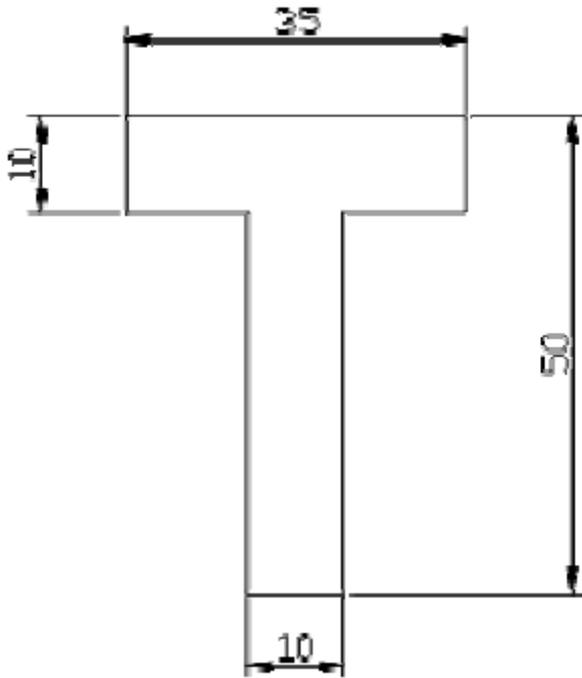
# Rendimento da matéria prima



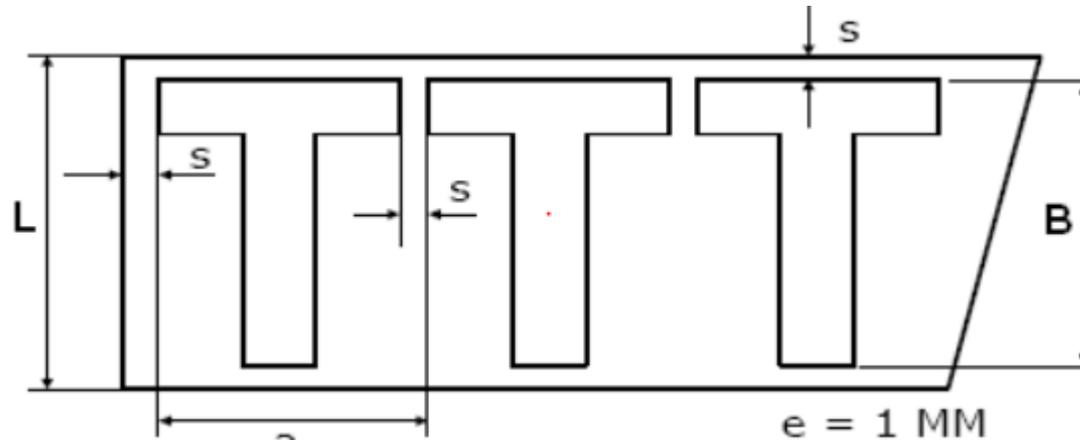
$$\% \text{ Utilização} = \frac{A_p \cdot n}{A_f} \times 100$$

Onde :  $A_p$  = Superfície total da peça em  $\text{mm}^2$ .  
 $n$  = número de peças no passo.  
 $A_f$  = Superfície total da fita em  $\text{mm}^2$ .

# Rendimento da matéria prima



# Rendimento da matéria prima



Cálculo de S : (S)

$$S = 0,4 \cdot E + 0,8 \quad \text{porque } B < 70\text{mm} ; e > 0,5\text{mm}$$

$$S = 0,4 \cdot 1 + 0,8$$

$$S = 1,2$$

Cálculo do Passo: (1)

$$\text{Passo} = 35 + 1,2$$

$$\text{Passo} = 36,2$$

Cálculo da largura da fita: (2B)

$$L = 1,2 + 50 + 1,2$$

$$L = 52,4$$

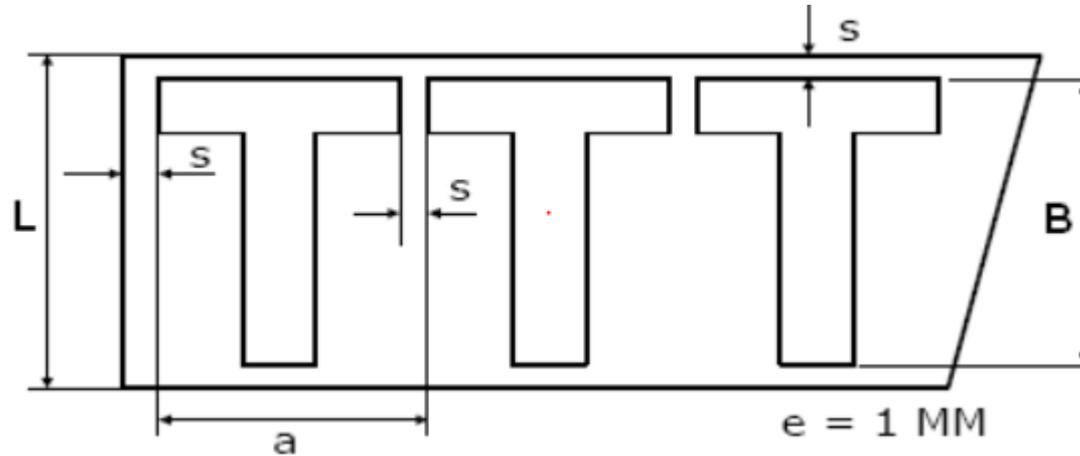
Área da peça: 750 mm<sup>2</sup>

$$\text{Área do Passo: } 36,2 \cdot 52,4 = 1896,88 \text{ mm}^2$$

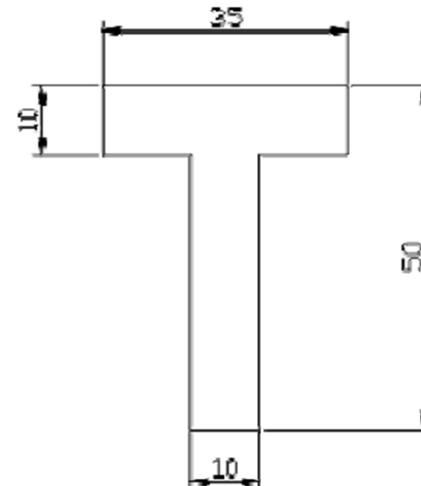
Porcentagem de utilização da Fita

$$\% \text{ Utilização} = \frac{750 \cdot 1 \cdot 100}{1896,88} = 39,5\%$$

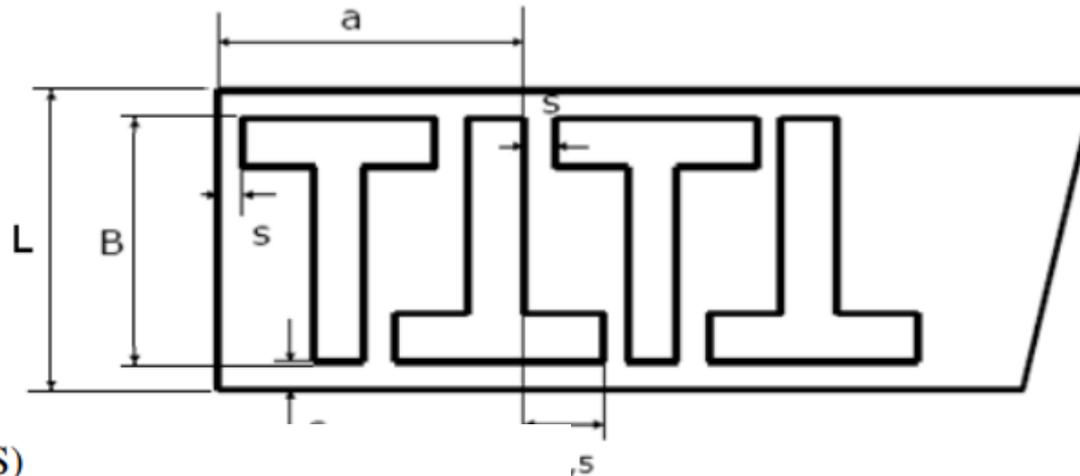
# Exercício



Como melhorar o rendimento da matéria prima para estampar esta peça ?  
 Apresente um novo layout de estampagem e calcule seu rendimento.



# Exercício



Cálculo de S : (S)

$$S = 0,4 \cdot E + 0,8 \quad \text{porque } B < 70\text{mm} ; e > 0,5\text{mm}$$

$$S = 0,4 \cdot 1 + 0,8$$

$$S = 1,2$$

Cálculo do Passo: (1)

$$\text{Passo} = 35 + 10 + 2 \times 1,2$$

$$\text{Passo} = 47,4$$

$$\% \text{ Utilização} = \frac{750,2 \times 100}{2483,76} = 60,4\%$$

Cálculo da largura da fita: (2B)

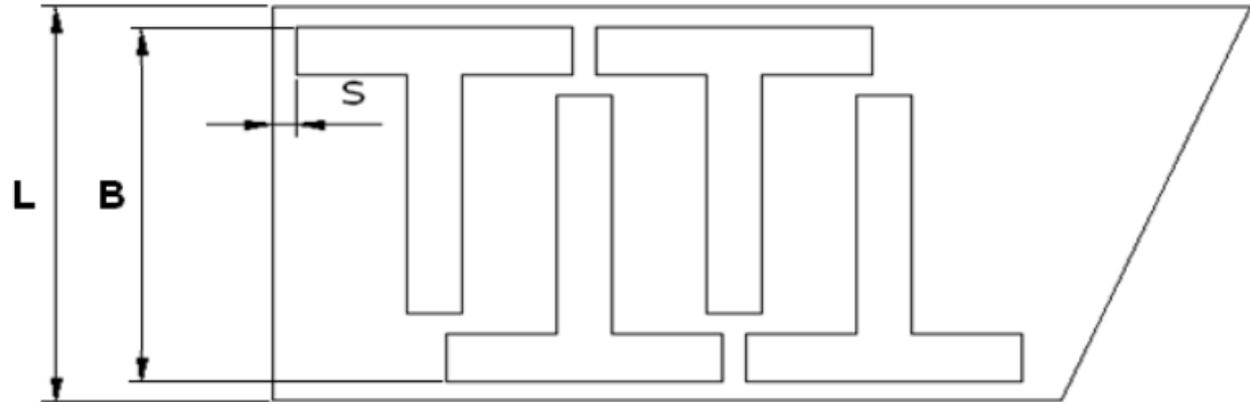
$$L = 1,2 + 50 + 1,2$$

$$L = 52,4$$

Área da peça: 750 mm<sup>2</sup>

Área do Passo: 47,4 \* 52,4 = 2483,76 mm<sup>2</sup>

# Exercício



Cálculo de S: (S)

$$S = 0,4 \cdot E + 0,8 \quad \text{porque } B < 70\text{mm} ; e > 0,5\text{mm}$$

$$S = 0,4 \cdot 1 + 0,8$$

$$S = 1,2$$

Cálculo do Passo: (1)

$$\text{Passo} = 35 + 1,2$$

$$\text{Passo} = 36,2$$

$$\% \text{ Utilização} = \frac{750,2 \cdot 100}{2303,32} = 65,1\%$$

Cálculo da largura da fita: (2B)

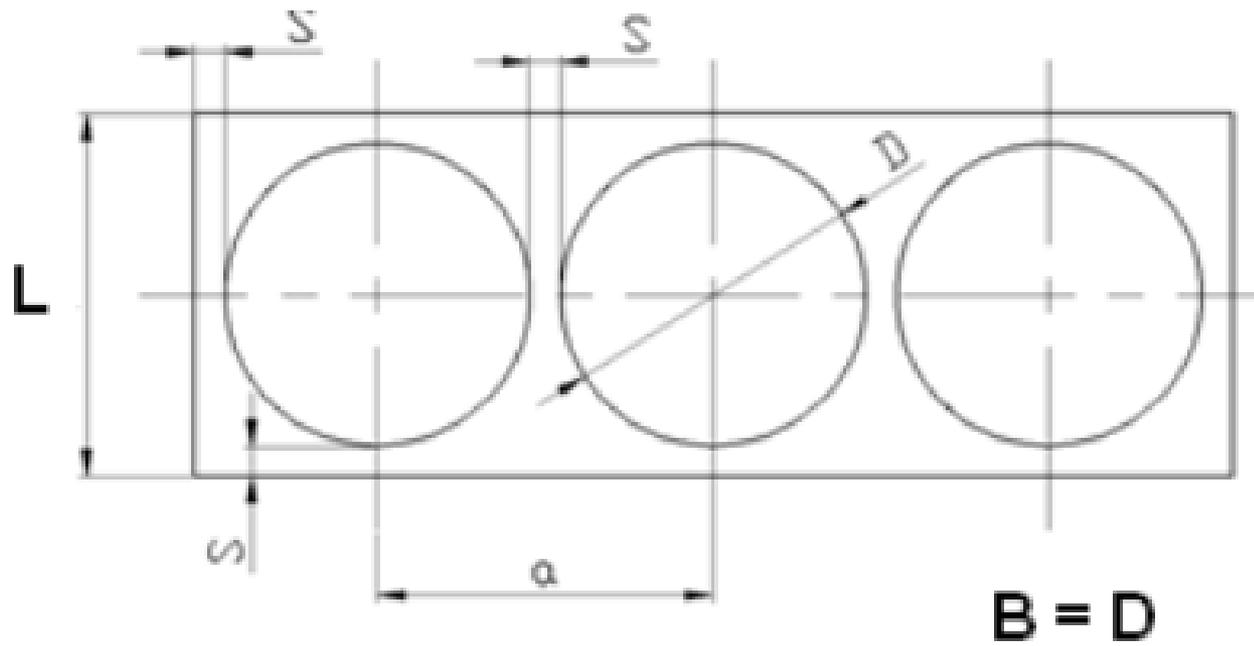
$$L = 1,2 + 50 + 1,2 + 10 + 1,2$$

$$L = 63,6 \text{ mm}$$

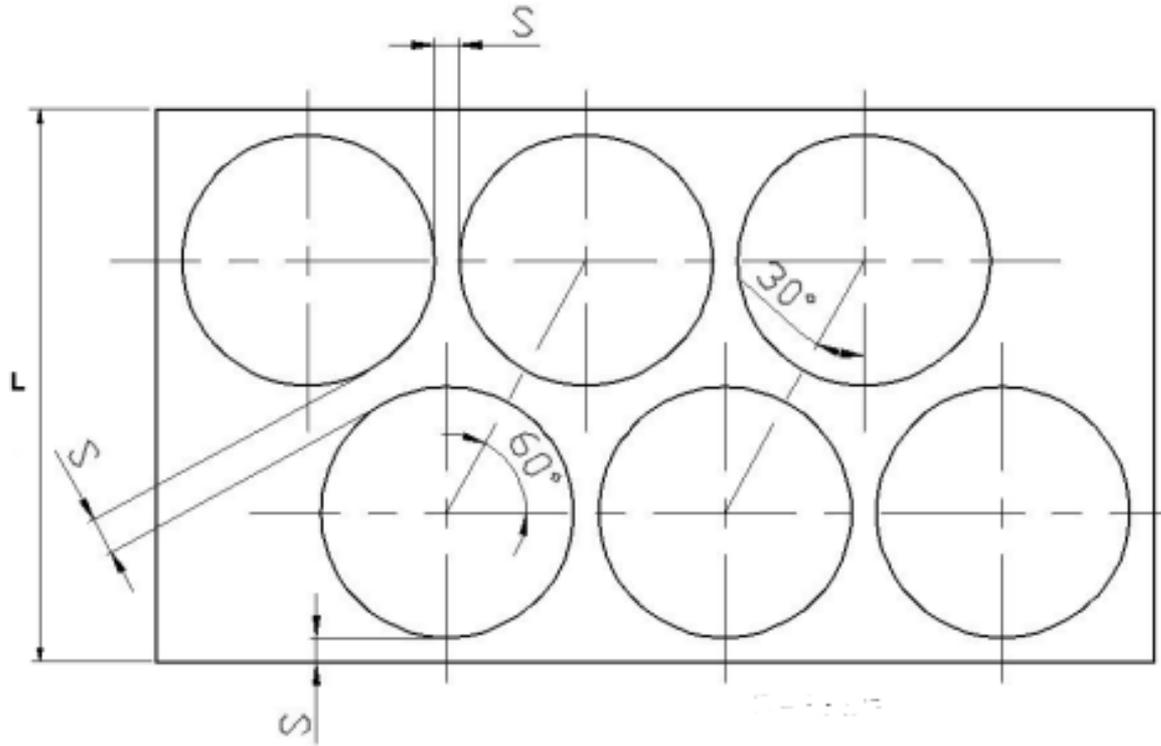
Área da peça: 750 mm<sup>2</sup>

Área do Passo: 36,2 \* 63,6 = 2303,32 mm<sup>2</sup>

# Exercício



# Exercício



# Peças estampadas



# Peças estampadas



# Peças estampadas



# Peças estampadas



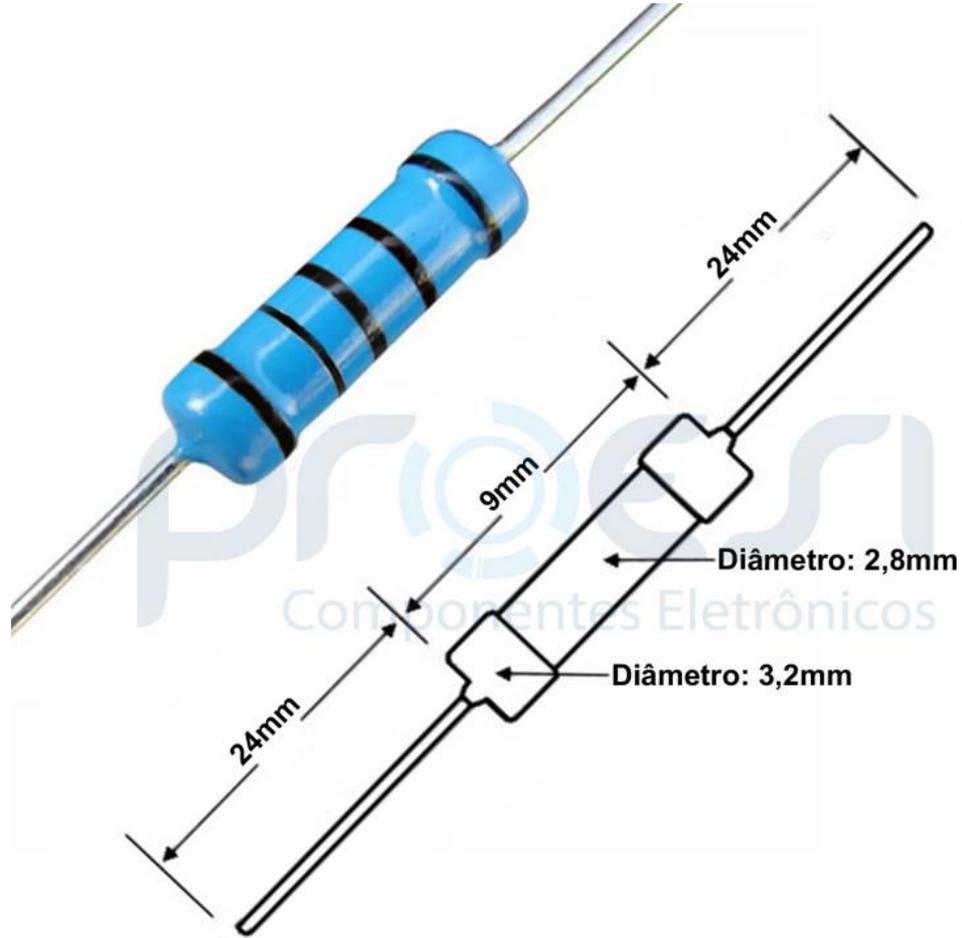
# Peças estampadas



# Peças estampadas



# Peças estampadas



# Peças estampadas



# Peças estampadas

