U.T.N

REGIONAL HAEDO

Guía Ejercicios de Procesos Industriales

Trabajo Práctico 4

ORDENANZA 1549 U.T.N. 9/2016.

Departamento: INGENIERIA INDUSTRIAL

Nivel: 4º CUARTO AÑO

Especialidad: INDUSTRIAL

AÑO 2024

Equipo Docente:

Ing. SUCHOWIERCHA JOSE HECTOR (Director de Cátedra)

Ing. Carlos José Díaz (Jefe de Trabajos Prácticos)

Ing. Ariel Torne (Ayudante de Trabajos Prácticos)

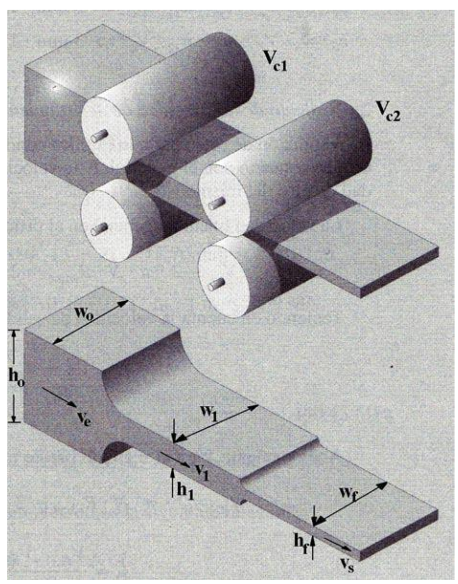
Ejercicio Nº 1 (ejemplo resuelto):

Mediante un proceso de laminado se reduce una chapa de acero de 3 mm de espesor a 1 mm en un tándem formado por 4 cilindros, como se muestra en la figura, de forma que la reducción sea la misma en cada par de rodillos.
El diámetro de los rodillos es de 700 mm, la velocidad de giro del primer par de rodillos es de 60 rpm y la del segundo de 120 rpm, siendo la velocidad de entrada al primer par de rodillos de 120 m/min.

Nota w=1 m (Anchura de la chapa).

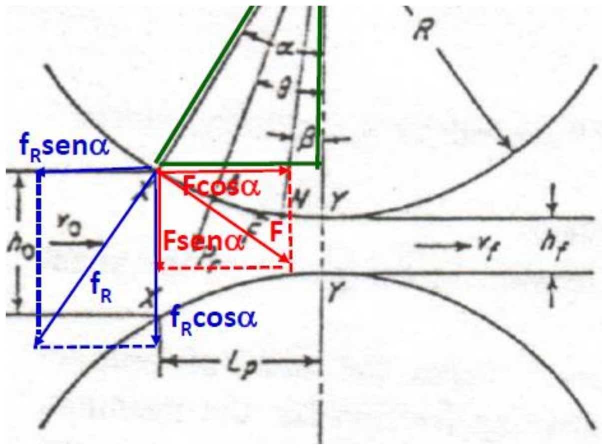
Determinar:

1) **Velocidad de salida del material de cada par de rodillos suponiendo que la anchura de la chapa permanece constante**
2) **Velocidad del deslizamiento del material en cada par de rodillos**
3) **Si el coeficiente de rozamiento mínimo requerido es μ=0.12, ¿Será posible la reducción?. En caso afirmativo, ¿qué espesor máximo se podría reducir?.**
4) **Fuerza ejercida y momento torsor para cada par de cilindros, siendo K = 500 y n = 0.15.**
5) **Potencia en cada cilindro y potencia total empleada en la laminación**



Para un laminado correcto, la barra debe entrar en la canal sin dificultad. Esto implica ciertas relaciones entre el diámetro y posición de los cilindros por una parte, y el espesor de la barra, así como la aspereza de los cilindros por otra. También hay que tener en cuenta la relación entre el ancho de la barra y el ancho de la canal, así como la velocidad de laminado.
En el caso de que no existiese rozamiento, la dirección de la fuerza entre los dos cuerpos coincidiría con la normal común, que en este caso es el radio (fR). Si no hubiese rozamiento, la barra no podría entrar nunca, pues sería rechazada por la componente de la acción radial.

Para que el proceso pueda efectuarse debe superarse una fricción crítica entre los cilindros y la chapa, de modo que sea posible el ingreso (y el tránsito) de esta.
El coeficiente de fricción crítico μc surge de comparar las componentes horizontales de fr (Fueza normal) y de F (Fuerza de fricción) para el máximo valor del ángulo de contacto α. Para que la chapa pueda ingresar a la garganta del tren, la componente horizontal de la fuerza de fricción debe ser mayor o igual que la que la componente horizontal de la fuerza normal.



La condición límite se expresa como:

$$F\cos\alpha \geq f_R \operatorname{sen}\alpha \qquad \rightarrow \mu f_R \cos\alpha \geq f_R \operatorname{sen}\alpha \;;\; \mu \geq tg\alpha$$

$$F = \mu f_R \qquad tg\alpha = \frac{L}{R-\left(\Delta h/2\right)} = \left(R \gg \Delta h\right) = \frac{L}{R}$$

En este caso la fricción es necesaria. Como esta depende fuertemente del ángulo de contacto, cuando la geometría no provee la condición suficiente, se utilizan rodillos acanalados para aumentar el valor efectivo de μ.

RESOLUCIÓN:

1. **Velocidad de salida del material de cada par de rodillos suponiendo que la anchura de la chapa permanece constante:**

Se tiene que: Qm1=Qm2=Qm3 **y como la densidad es la misma**: Qv1=Qv2=Qv3

Luego: S1v1=S2v2= S3v3 luego; w1e1v1= w2e2v2= w3e3v3

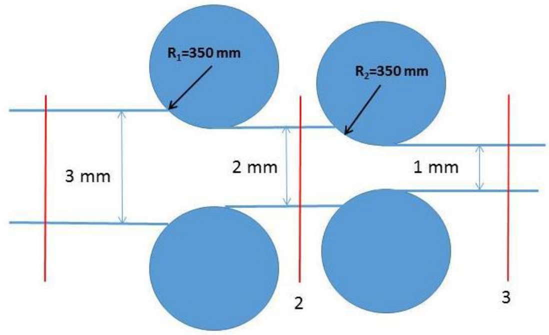
y como: w1= w2= w3 **se tiene**: e1v1= e2v2= e3v3

Es Dato, v1=120 m/min ω1= 60 rpm

NOTA: Como se puede apreciar por los datos al ingresar la chapa en el primer par de rodillos se produce un cambio de velocidad lineal, ya que V1= 120 m/min y la velocidad tangencial del cilindro es de 132 m/min. Esto se debe a que el rodillo debe traccionar la chapa y además hay un efecto de resbalamiento debido al coeficiente de fricción.

e1v1= e2v2; v2= (e1v1)/e2 e1v1= e3v3; v3= (e1v1)/e3 v2= (3x120)/2 = 180 m/min

v3= (3x120)/ 1 = 360 m/min



2. Velocidad del deslizamiento del material en cada par de rodillos:

Los rodillos entran en contacto con el material de trabajo, a lo largo de un arco de contacto definido por el ángulo θ . Cada rodillo tiene un radio R y su velocidad de rotación, tiene una velocidad superficial vr.

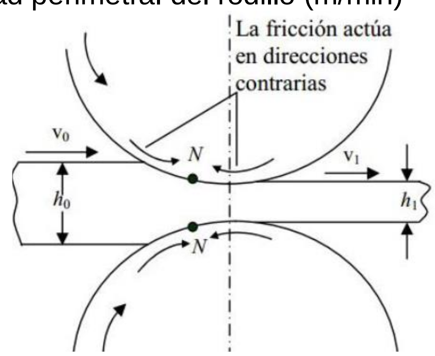
Esta velocidad es mayor que la velocidad de trabajo v0 y menor que la velocidad de salida vf .

Como el flujo de metal es continuo, hay un cambio gradual en la velocidad del material de trabajo entre los rodillos, Sin embargo, existe un punto a lo largo del arco donde la velocidad de trabajo se iguala la velocidad del rodillo.

Este punto se llama punto de no deslizamiento, también conocido como punto neutro. A cualquier lado de este punto, ocurren deslizamientos con fricción entre el rodillo y el material de trabajo.

La cantidad de deslizamiento entre los rodillos y el material de trabajo puede medirse por medio del deslizamiento hacia adelante, este término se usa en laminado y se define como:

$\boxed{S = (vf – vr) / vr}$; Donde S= deslizamiento hacia adelante.
Vf= Velocidad final de trabajo (salida del rodillo) (m/min)
Vr= Velocidad perimetral del rodillo (m/min)



Rodillo 1:

Calculo de la velocidad perimetral del rodillo con ω1= 60 rpm

$$v_1 = \omega_1 R_1 = 2\pi w_1 (rpm) R_1 = 2\pi x 60 x 0.35 = 131.95 \ m / \min$$

Calculo de la velocidad de salida de la chapa del primer rodillo (Vf2):

e1= 3 mm; V1=120 m/min; e2= 2mm

e1v1= e2v2; v2= (e1v1)/e2 v2= (3x120)/2 = 180 m/min

Calculo del deslizamiento hacia adelante S

$$S_1 = \frac{v_2 - v_{d1}}{v_{d1}} = \frac{180 - 131.95}{131.95} = 0.364$$

Rodillo 2:
DATO: ω2= 120 rpm

Calculo de la velocidad perimetral del rodillo con ω2= 120 rpm

$$v_2 = \omega_2 R_2 = 2\pi w_2(rpm) R_2 = 2\pi x 120 x 0.35 = 263.89\ m/\min$$

Calculo de la velocidad de salida de la chapa del 2º rodillo (Vf2):

e2= 2 mm; V1=120 m/min; e3= 1mm

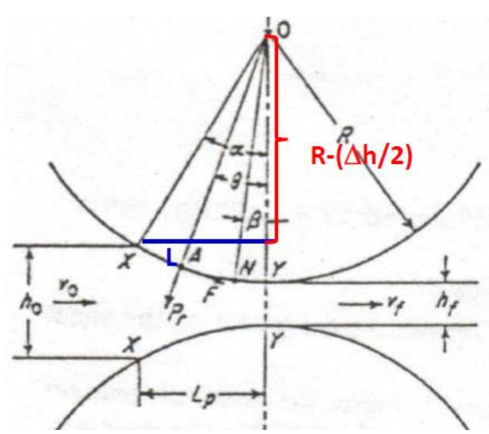
e1v1= e3v3; v3= (e1v1)/e3 v2= (3x120)/1 = 360 m/min

Calculo del deslizamiento hacia adelante S

$$S_2 = \frac{v_3 - v_{d2}}{v_{d2}} = \frac{360 - 263.89}{263.89} = 0.364$$

3. **Sabiendo que el coeficiente de rozamiento mínimo requerido es μ=0.12,**
   a. **¿Será posible la reducción?.**
   b. **En caso afirmativo, ¿qué espesor máximo se podría reducir?.**

La máxima reducción teórica posible se puede obtener si se considera que la fuerza que provoca la entrada del material a los rodillos debe ser mayor y en el límite, igual a la que se opone al paso de éste.



$F\cos\alpha = f_R \operatorname{sen}\alpha \rightarrow tg\alpha = (F/f_R)$

F = Fuerza tangencial a la superficie del rodillo
f_R = fuerza radial

$f_R = p_R dA$
p_R= presión radial p $\qquad \mu = tg(\alpha)$
$F = \mu f_R$

El ángulo formado por el plano de entrada y el ángulo que contiene los ejes de rotación de los rodillos, se denomina ángulo de mordedura (α) y está dado por:

$$tg\alpha = \frac{L}{R - \left(\Delta h / 2\right)} = \left(R \gg \Delta h\right) = \frac{L}{R} \qquad \mu = tg(\alpha) = \frac{L}{R} = \frac{\sqrt{R\Delta h}}{R} = \frac{\sqrt{\Delta h}}{\sqrt{R}} \rightarrow \Delta h = \mu^2 R$$

$$\Delta h_{Max} = \mu^2 R$$

De esta ecuación se deduce que la máxima reducción está limitada por el coeficiente de fricción y el radio de los rodillos, razón que justifica los grandes diámetros de éstos en el desbaste.

El Дhmax posible para el coeficiente de fricción dado es:

$$\Delta h_{Max} = \mu^2 R = 0.12^2 x350 = 5.04 \ \ mm$$

La reducción del espesor d que se intenta en esta operación de laminado es de 1 mm en cada una de las pasadas. Como el adelgazamiento permisible máximo excede la reducción que se pretende.

<u>ES POSIBLE LA OPERACIÓN DE LAMINADO</u>.

$$\Delta h = \mu^2 R \rightarrow \mu^2 = \frac{\Delta h}{R} \rightarrow \mu = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} = \sqrt{\frac{h_i - h_f}{R}} = \sqrt{\frac{2-1}{350}} = \sqrt{\frac{1}{350}} = 0.0534$$

Coeficiente de rozamiento que necesitaría. Como el que existe es 0.12,

<u>SÍ QUE ES POSIBLE LA REDUCCIÓN.</u>

4. Fuerza ejercida y momento torsor para cada par de cilindros, siendo K = 500 y n = 0.15.

Esfuerzo a la fluencia: Es el esfuerzo necesario para iniciar el flujo plástico en el material que se está deformando. El esfuerzo a la fluencia promedio en un metal dúctil, a temperatura ambiente (Deformación en frío), es igual a:

$$\overline{Y}_f = \frac{K\varepsilon^n}{n+1}$$

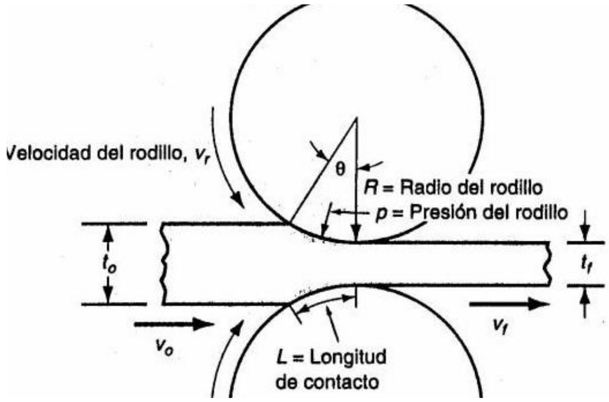
ε = Deformación real máxima alcanzada durante la laminación
K= Coeficiente de resistencia, constante propia de cada material
n = Exponente de endurecimiento por deformación, constante propia de cada material.

El esfuerzo de fluencia promedio será útil para calcular las estimaciones de fuerza y potencia en laminado.

$$\varepsilon = Ln\left(\frac{h_i}{h_f}\right)$$

La deformación real, experimentada por el material de trabajo, se basa en el espesor del material antes y después del laminado.

Fuerza del rodillo: Dado un coeficiente de fricción suficiente para realizar el laminado, la fuerza F requerida para mantener la separación entre los dos rodillos se puede calcular integrando la presión unitaria de laminado (mostrada como p en la figura) sobre el área de contacto rodillo-material de trabajo. Esto se puede expresar como sigue:



$$F = w\int_0^L p\,dL$$

F = fuerza de laminado (N)
w = ancho del material de trabajo que se está laminando, (m)
p = presión de laminado, (MPa);
L = longitud de contacto entre el rodillo y el material de trabajo, (m).

Los rodillos aplican presión sobre el material para poder reducir el espesor, por lo cual se necesita una fuerza perpendicular al arco de contacto, o perpendicular al plano de la lámina, ya que el arco es muy pequeño en relación al tamaño del rodillo.

La fuerza que debe generar el rodillo laminador en el laminado plano es:

$$F = L\omega\overline{Y}_f; \quad L = \sqrt{R\Delta h}$$

L = Longitud de contacto entre el rodillo y la lamina

R = Radio del cilindro de laminación
w = Ancho de la lamina
Yf = Esfuerzo de fluencia promedio de la lámina en el espacio de laminación.

Esta ecuación es válida para una situación donde no hay fricción, por lo tanto entre mayor fricción entre la lámina y los rodillos, mayor será la divergencia, o sea la longitud de contacto, por lo cual la fuerza real del rodillo será mayor a la fuerza teórica calculada.

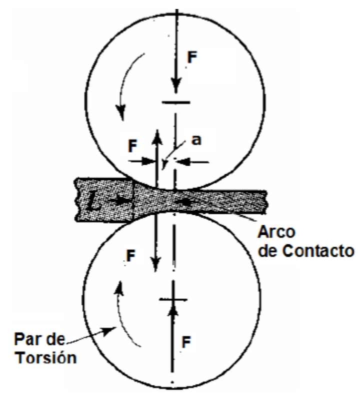
Potencia requerida: Para calcular la potencia requerida en cada rodillo nos basaremos en la Figura.
Se puede considerar a = L/2

La potencia requerida para mover cada rodillo es el producto del momento de torsión y la velocidad angular.
La velocidad angular es πN/30 , donde N = velocidad de rotación del rodillo en (rev/min).

$\boldsymbol{Potencia}$ = (Momento torsor)*(V$elocidad\ angular$); P = T w

El momento de torsión (T) en laminado se puede estimar suponiendo que la fuerza ejercida por los rodillos se centra en el material de trabajo, conforme pasa entre ellos y actúa con un brazo de palanca de la mitad de la longitud de contacto L.
Entonces, el momento de torsión para cada rodillo es:

$$T = 0.5FL$$



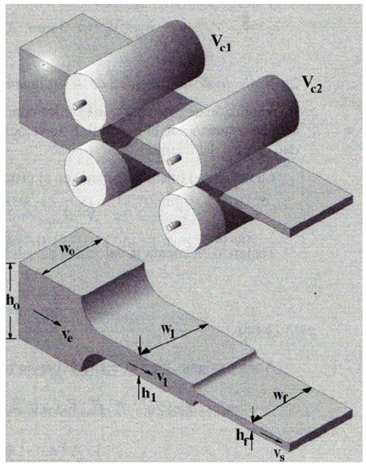
$$P' = \frac{\pi NT}{30} = \frac{0.5\pi NFL}{30}$$

Como hay dos rodillos, obtenemos la siguiente expresión

$$P = \frac{\pi NFL}{30}$$

P= Potencia (w)
T = Momento torsor (N.m)
N= Velocidad de giro del rodillo (rpm)
F= Fuerza perpendicular del rodillo (N)
L= Longitud de contacto (m)

$$F = L\omega\overline{Y}_f; \quad L = \sqrt{R\Delta h} \qquad \overline{Y}_f = \frac{K\varepsilon^n}{n+1} \qquad \varepsilon = Ln\left(\frac{h_i}{h_f}\right)$$



ETAPA 1 de reducción; ho = 3 mm ; h1 = 2 mm

$$\varepsilon = Ln\left(\frac{h_i}{h_f}\right) = Ln\left(\frac{3}{2}\right) = 0.405$$

$$\overline{Y}_f = \frac{K\varepsilon^n}{n+1} = \frac{500x(0.405)^{0.15}}{0.15+1} = 379.66\ MPa$$

$$F = \omega\overline{Y}_f\sqrt{R\Delta h} = \overline{Y}_f\,\omega\sqrt{R\Delta h} = 379.66x10^6x1x\sqrt{0.35x0.001} = 7102788\ N\ (\approx 7.1\ \mathrm{MN})$$

LA FUERZA EJERCIDA PARA EL PAR DE CILINDROS ETAPA 1 ES DE 7.1 MN.

CALCULO DEL MOMENTO DE TORSIÓN PARA EL RODILLO 1

T = 0,5 F.L = 0,5 (7102788 N) (0,0187 m) = 6644 Nm

EL MOMENTO DE TORSIÓN PARA EL RODILLO 1 ES DE 6644 Nm

ETAPA 2 de reducción; h1 = 2 mm ; hf = 1 mm

$$\varepsilon = Ln\left(\frac{h_i}{h_f}\right) = Ln\left(\frac{2}{1}\right) = 0.693$$

$$\bar{Y}_f = \frac{K\varepsilon^n}{n+1} = \frac{500x(0.693)^{0.15}}{0.15+1} = 411.51\ MPa$$

$$F = \omega \bar{Y}_f \sqrt{R\Delta h} = \bar{Y}_f \sqrt{R\Delta h} = 411.51x10^6 x1x\sqrt{0.35x0.001} = 7698647\ N\ (\approx 7.7\ MN)$$

La Fuerza ejercida para el par de cilindros etapa 2 es de 7.7 MN.

CALCULO DEL MOMENTO DE TORSIÓN PARA EL RODILLO 2

T = 0,5 F.L = 0,5 (7698647 N) (0,0187 m) = 7201 Nm

EL MOMENTO DE TORSIÓN PARA EL RODILLO 2 ES DE 7201 Nm

5. **Potencia en cada cilindro y potencia total empleada en la laminación.**

Etapa 1 de reducción, h0 = 3 mm , h1 = 2 mm

$$P = \frac{\pi NFL}{30}$$

P= Potencia (w)
T = Momento torsor (N.m)
N= Velocidad de giro del rodillo (rpm)
F= Fuerza perpendicular del rodillo (N)
L= Longitud de contacto (m)

$$P_1 = \frac{\pi NFL}{30} = \frac{\pi NF\sqrt{R\Delta h}}{30} = \frac{\pi x 60 x 7102788\sqrt{0.35x0.001}}{30} = 834916\ w\ (\approx 835\ kw)$$

Etapa 2 de reducción, h1 = 2 mm , h2 = 1 mm

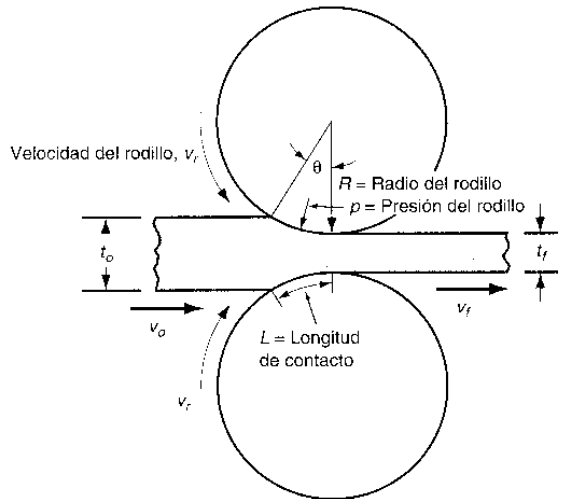
$$P_2 = \frac{\pi NFL}{30} = \frac{\pi NF\sqrt{R\Delta h}}{30} = \frac{\pi x 120 x 7698647\sqrt{0.35x0.001}}{30} = 1809915\ w\ (\approx 1810\ kw)$$

Potencia total: **PT = P1+P2 = 835+1810 = 2645 kW**

Ejercicio Nº 2

Dado el laminado plano que se ilustra, sabemos que tenemos los siguientes datos:

Los anchos del trabajo antes y después del laminado (mm), wo = wf = 600 mm
El espesor inicial to = 50 mm
El espesor que se busca es un Tf = 38 mm
Mientras que el largo inicial de la chapa Lo = 50 m.
La velocidad de entrada en el primer par de cilindros laminadores Vo = 10 m/min.
Velocidad del rodillo ω1= 4 rpm
El ángulo Φ = 9º
Coeficiente de rozamiento es μ=0.18
Cada rodillo tiene un radio R = 500 mm
El esfuerzo de fluencia promedio Yf = 25 Kg/mm2.
Temperatura de trabajo rango entre 680ºC, y 650ºC.

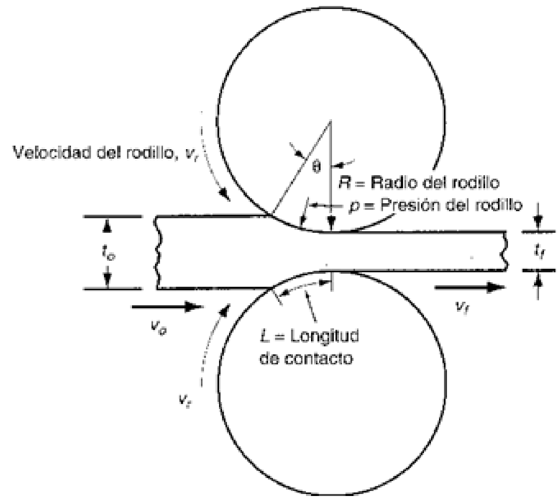


Considerando que el coeficiente de rozamiento es el adecuado, y despreciando las pérdidas por fricción, CALCULAR:

- ✓ **Calcular la longitud de contacto cilindro/chapa L.**
  - ➢ **Hacer el cálculo con la formula** $L = \sqrt{R(h_o - h_f)}$
  - ➢ **Hacer el cálculo tomando la parte Φ del perímetro del cilindro, en que están en contacto la chapa y el cilindro.**
  - ➢ **Comparar resultados y explicar los mismos.**
- ✓ **La velocidad superficial/perimetral del rodillo Vr en m/min.,**
- ✓ **Calcular el DESLIZAMIENTO hacia adelante S.**
- ✓ **Cuánto se incrementa el largo de la chapa.**
- ✓ **La fuerza de laminado F.**
- ✓ **Deformación real máxima alcanzada durante la laminación por el trabajo laminado ε.**
- ✓ **El momento de torsión en laminado T.**
- ✓ **Potencia en cada rodillo P.**

Ejercicio Nº 3

Tomando los datos del resultado de laminación resuelto en el ejercicio anterior, sabemos que tenemos los siguientes datos:
Los anchos del trabajo antes y después del laminado (mm), wo = wf = 600 mm
El espesor inicial to = 38 mm
El espesor que se busca es un Tf = 25 mm
Velocidad del rodillo ω2= 6 rpm
Mientras que el largo inicial (ahora) de la chapa Lo = será dato del ejercicio anterior.
La velocidad de entrada en el segundo par de cilindros laminadores Vo = será dato del ejercicio anterior.
El ángulo Φ = 9
Cada rodillo tiene un radio R = 500 mm
El esfuerzo de fluencia promedio Yf = 29 Kg/mm2.
Temperatura de trabajo rango entre 640ºC, y 600ºC.



Considerando que el coeficiente de rozamiento (μ=0.18) es el adecuado, y despreciando las pérdidas por fricción, CALCULAR:

- ✓ **La velocidad superficial/perimetral del rodillo Vr en m/min.,**
  - ➢ **Analizar: si igual, mayor , o menor que la Vf de salida del ejercicio anterior?.**
  - ➢ **Justificar la respuesta.**
- ✓ **Calcular el DESLIZAMIENTO hacia adelante S.**
- ✓ **Cuánto se incrementa el largo de la chapa.**
- ✓ **La fuerza de laminado F.**
- ✓ **Deformación real máxima alcanzada durante la laminación por el trabajo laminado ε.**
- ✓ **El momento de torsión en laminado T.**
- ✓ **Potencia en cada rodillo P.**

Ejercicio Nº 4

Determinar la potencia en HP que requiere el tren de laminación según los datos que se indican.

$K = 30\ Kg/mm^2$ (coeficiente de resistencia)

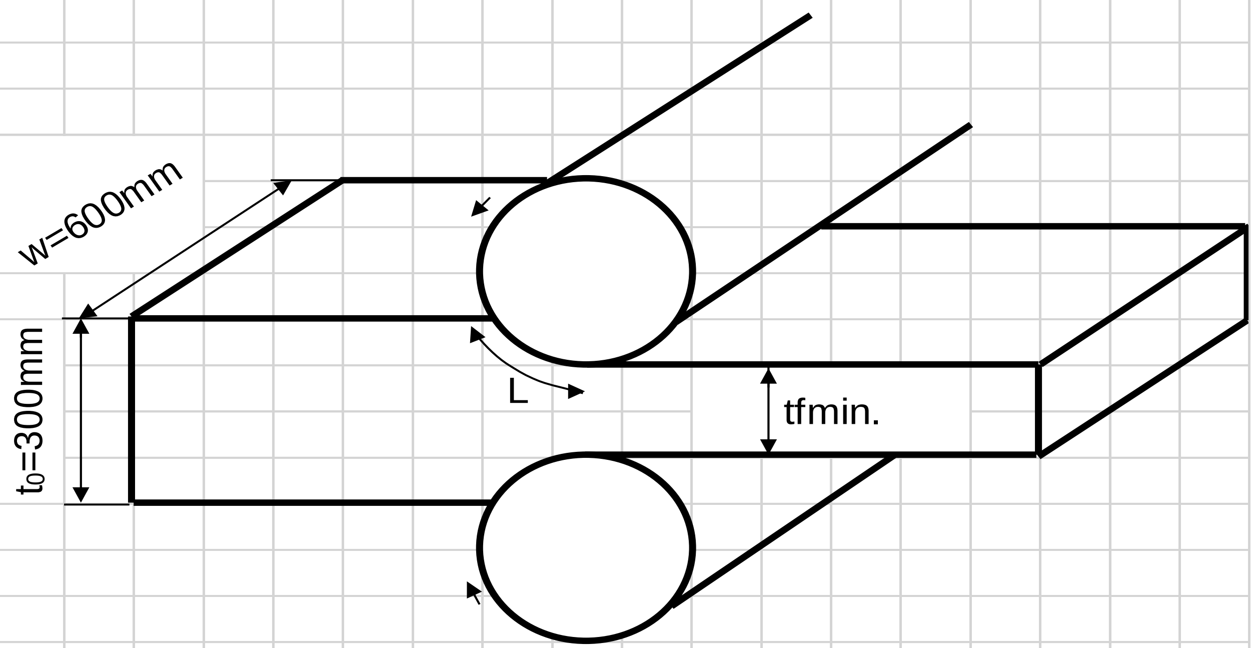
$n = 0{,}15$ (exponente de endurecimiento por deformación)

$\mu = 0{,}2$ (coeficiente de rozamiento rodillos-material)

$N = 9$ RPM (Velocidad del rodillo de laminación)

$R = 500$ mm (Radio del rodillo)

$\pi = 3{,}14$



$d_{max} = \mu^2 \times R$ (draft máximo)

$t_{fmin} = t_0 - d_{max}$ (espesor final mínimo)

$\cos\Phi = 1 - [(t_0 - t_{fmin}) / 2R]$ (arco de contacto)

$L = \Phi rad \times R$ (longitud de contacto)

$S = W \times L$ (área de laminación)

$F = Y_{fluencia} \times S$ (fuerza de laminación)

$Y_{fluencia} = K \times \varepsilon^{n} / (1+n)$ (esfuerzo de fluencia)

$\varepsilon = \ln (t_0/t_f)$ (deformación específica real)

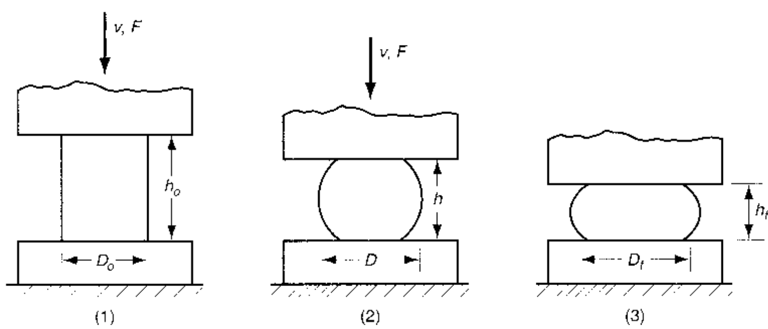
$P = 2\pi \times N \times F \times L / 4560000$ (potencia de laminación en HP)

Ejercicio Nº 5

Forjado (RESUELTO)

Una pieza cilíndrica se somete a una operación de forjado donde su altura inicial es de 75 mm y su diámetro de 50 mm.
En la operación la altura se reduce a 38 mm y el material de la pieza posee una curva de fluencia definida por K = 35 Kg/mm² y n = 0,17 adoptándose un coeficiente de fricción μ = 0,1.
Determinar la fuerza al comienzo del proceso, a alturas intermedias de 63 mm y 50 mm, y a la altura final de 38 mm.

DATOS:
h_0 = 75 mm,
h_1 = 63 mm,
h_2 = 50 mm,
h_3 = 38 mm (longitud de la pieza)
K = 35 Kg/mm² (coeficiente de resistencia)
n = 0,17 (exponente de endurecimiento por deformación)



Calcular F = ? (fuerza de forjado)

ε = ln h0 / h (deformación real)
Yf = K x ε /(1+n) (esfuerzo de fluencia)
Kf = 1 + 0,4 x μ x D / h (factor de forma de forjado)
F = Kf x Yf x S (fuerza de forjado)
ε0 = 0,02 (deformación real para el cálculo de F0)
Volumen de la pieza

V = 0,785 x D_0^2 x h_0 = 0,785 x 50² x 75 = 147188 mm³
147188 mm³ = 0,785 x D_1^2 x h_1 = 0,785 x D_2^2 x h_2 = 0,785 x D_3^2 x h_3

Diámetro de la pieza
D_0 = 50 mm

$D_1^2 = 147188 / (0{,}785 \times 63) = 2976 \rightarrow D_1 = 54{,}55$ mm
$D_2^2 = 147188 / (0{,}785 \times 50) = 3750 \rightarrow D_2 = 61{,}24$ mm
$D_3^2 = 147188 / (0{,}785 \times 38) = 4934 \rightarrow D_3 = 70{,}24$ mm

Área de la pieza
$S_0 = 0{,}785\ D_0^2 = 1964$ mm²
$S_1 = 0{,}785\ D_1^2 = 2337$ mm²
$S_2 = 0{,}785\ D_2^2 = 2946$ mm²
$S_3 = 0{,}785\ D_3^2 = 3875$ mm²

Cálculo de F_0
Deformación real para F_0 (valor adoptado)

$\varepsilon_0 = 0{,}02$

Esfuerzo de fluencia para F_0

$Yf_0 = K x (\varepsilon_0)^n / (1+n) = 35 \times 0{,}02^{0,17} / (1+0{,}17) = 15{,}4$ Kg/mm²

Factor de forma de forjado para F_0

$Kf_0 = 1 + 0{,}4 \times \mu \times D_0 / h_0 = 1 + 0{,}4 \times 0{,}1 \times 50 / 75 = 1{,}027$

Fuerza de forjado F_0

$F_0 = Kf_0 \times Yf_0 \times S_0 = 1{,}027 \times 15{,}4 \times 1964 =$ **31062 Kg.**

Cálculo de F_1

Deformación real para F_1
$\varepsilon_1 = \ln h_0 / h_1 = \ln 75 / 63 = 0{,}174$

$Yf_0 = K x (\varepsilon_1)^n / (1+n) = 35 \times 0{,}174^{0,17} / (1+0{,}17) = 22{,}2$ Kg/mm²

Factor de forma de forjado para F_1

$Kf_1 = 1 + 0{,}4 \times \mu \times D_1 / h_1 = 1 + 0{,}4 \times 0{,}1 \times 54{,}55 / 63 = 1{,}035$

Fuerza de forjado F_1

$F_1 = Kf_1 \times Yf_1 \times S_1 = 1{,}035 \times 22{,}2 \times 2337 =$ **53.697 Kg.**

Cálculo de F_2

Deformación real para F_2

$\varepsilon_2 = \ln h_0 / h_2 = \ln 75 / 50 = 0{,}405$

Esfuerzo de fluencia para F_2

$Yf_0 = Kx(\varepsilon_2)^n/(1+n) = 35 \times 0{,}405^{0{,}17}/(1+0{,}17) = 25{,}7$ Kg/mm²

Factor de forma de forjado para F_2

$Kf_2 = 1 + 0{,}4 \times \mu \times D_2 / h_2 = 1 + 0{,}4 \times 0{,}1 \times 61{,}24 / 50 = 1{,}049$

Fuerza de forjado F_2

$F_2 = Kf_2 \times Yf_2 \times S_2 = 1{,}049 \times 25{,}7 \times 2946 =$ **79.422 Kg.**

Cálculo de F_3

Deformación real para F_3

$\varepsilon_3 = \ln h_0 / h_3 = \ln 75 / 38 = 0{,}679$

Esfuerzo de fluencia para F_3

$Yf_0 = Kx(\varepsilon_2)^n/(1+n) = 35 \times 0{,}679^{0{,}17}/(1+0{,}17) = 28$ Kg/mm²

Factor de forma de forjado para F_3

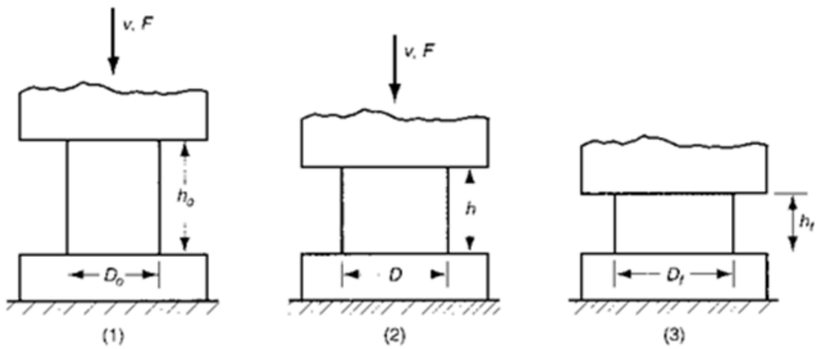
$Kf_3 = 1 + 0{,}4 \times \mu \times D_3 / h_3 = 1 + 0{,}4 \times 0{,}1 \times 70{,}24 / 38 = 1{,}074$

Fuerza de forjado F_3

$F_3 = Kf_3 \times Yf_3 \times S_3 = 1{,}074 \times 28 \times 3875 =$ **116.529 Kg.**

Ejercicio Nº 6

Forjado en dado abierto: se lleva a cabo el siguiente forjado bajo condiciones ideales, sin fricción entre el trabajo y la superficie del dado, con una deformación homogénea y el flujo radial de material es uniforme a lo largo de su altura como se representa en la figura.



La de la figura tiene las siguientes dimensiones:
Diámetro inicial Do = 32 mm
Longitud inicial ho = 50 mm
Longitud final hf = 20 mm

El cilindro es de acero SAE 1010, se trabaja en c aliente, con un límite de fluencia (σf) de 25 Kg/mm^{2}. , el metal es perfectamente plástico (trabajo en caliente).

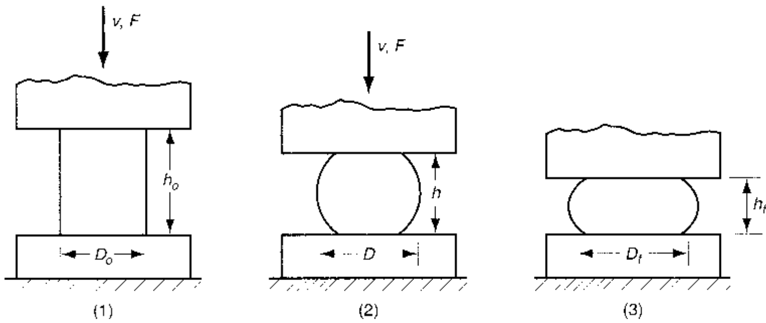
En este caso, el exponente de endurecimiento por deformación n = 0, y el esfuerzo de fluencia σf es igual al esfuerzo de fluencia del metal σ. La fuerza alcanza un valor máximo al final de la carrera de forjado donde el área y el esfuerzo de fluencia llegan a su valor más alto.

Bajo dichas condiciones ideales,

1. **Calcular el Diámetro final Df.**
2. **Determinar la fuerza de recalcado F**

Ejercicio Nº 7

Forjado en dado abierto: se lleva a cabo el siguiente forjado bajo condiciones reales de trabajo en caliente, como se representa en la figura.



La de la figura tiene las siguientes dimensiones:

- ✓ **Diámetro inicial Do = 32 mm**
- ✓ **Longitud inicial ho = 50 mm**
- ✓ **Longitud final hf = 20 mm**
- ✓ **Diámetro de la parte de trabajo que represente la longitud de contacto con la superficie entre la pieza final y la base Df = 41,30 mm.**

Datos complementarios:

- ✓ El coeficiente de fricción se establece como μ=0.18
- ✓ El factor de forma del forjado Kf = 6
- ✓ El cilindro es de acero SAE 1010, se trabaja en caliente a 680 ºC, con un límite de fluencia (σf) de 25 Kg/mm$^{2\cdot}$.

- ✓ 1 N/mm2 = 0,10197; Kg/mm2 = 1 MPa = 10 Kg/cm2; 1Kg/mm2 = 9,806 N/mm2 = 9,806 MPa

Bajo dichas condiciones reales,

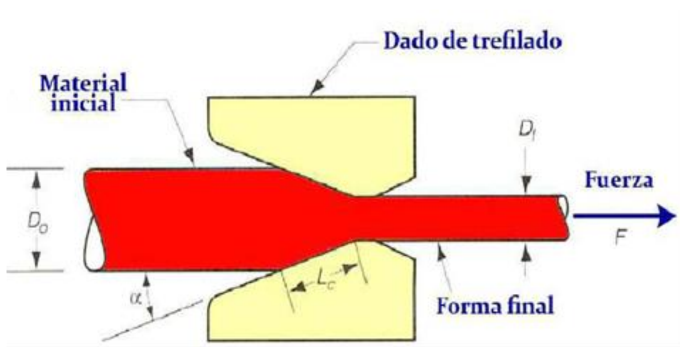
1. **Calcular el área de contacto.**
2. **Determinar la fuerza de recalcado F**

Ejercicio Nº 8

Trefilado (RESUELTO)

Determinar la fuerza de estirado requerida para que el material pueda atravesar la trefila, según los datos siguientes:

$\alpha = 15^{\circ}$ (ángulo del dado)
$D_0 = 2{,}5$ mm (diámetro del material inicial)
$D_f = 2$ mm (diámetro de la forma final)
$\mu = 0{,}07$ (coeficiente de fricción dado-material)
$K = 21$ Kg/mm² (coeficiente de resistencia)
$n = 0{,}2$ (exponente de endurecimiento por deformación)



CALCULAR

F = ? (fuerza de estirado)

$\varepsilon = \ln A_0 / A_f$ (deformación real)
$d = D_0 - D_f$ (draft)
$L_c = d / 2 \operatorname{sen}\alpha$ (longitud de contacto material - dado de estirado)
$D = (D_0 + D_f) / 2$ (diámetro promedio de trabajo durante el estirado)
$\Phi = 0{,}88 + 0{,}12 \times D / L_c$ (factor de deformación)

$Y_f = K x(\varepsilon)^n / (1+n)$ (esfuerzo de fluencia)

$\sigma d = Y_f\, x(1 + \mu / \operatorname{tg}\alpha) \times \Phi \times \varepsilon$ (fuerza unitaria de estirado)
$F = \sigma d \times A_f$ (fuerza de estirado)

Area del material inicial
$A_0 = 0{,}785 \times D_0^2 = 0{,}785 \times 2{,}5^2 = 4{,}91$ mm²

Area de la forma final
$A_f = 0{,}785 \times D_f^2 = 0{,}785 \times 2^2 = 3{,}14$ mm²

Deformación real

$\varepsilon = \ln A_o / A_f = \ln 4{,}91 / 3{,}14 = 0{,}45$

Draft

$d = D_0 - D_f = 2{,}5 - 2 = 0{,}5$ mm

Longitud de contacto material - dado de estirado

$L_c = d / 2 \operatorname{sen}\alpha = 0{,}5 / 0{,}517 = 0{,}967$

Diámetro promedio de trabajo durante el estirado

$D = (D_0 + D_f) / 2 = (2{,}5 + 2) / 2 = 2{,}25$ mm

Factor de deformación

$\Phi = 0{,}88 + 0{,}12 \times D / L_c = 0{,}88 + 0{,}12 \times 2{,}25 / 0{,}967 = 1{,}16$

Esfuerzo de fluencia

$Y_f = K x(\varepsilon)^n / (1+n) = 42{,}2 \times 2{,}5^{0{,}2} / (1+0{,}20) = 14{,}9$ Kg/mm²

Fuerza unitaria de estirado

$\sigma d = Y_f \, x(1 + \mu / \operatorname{tg}\alpha) \times \Phi \times \varepsilon$

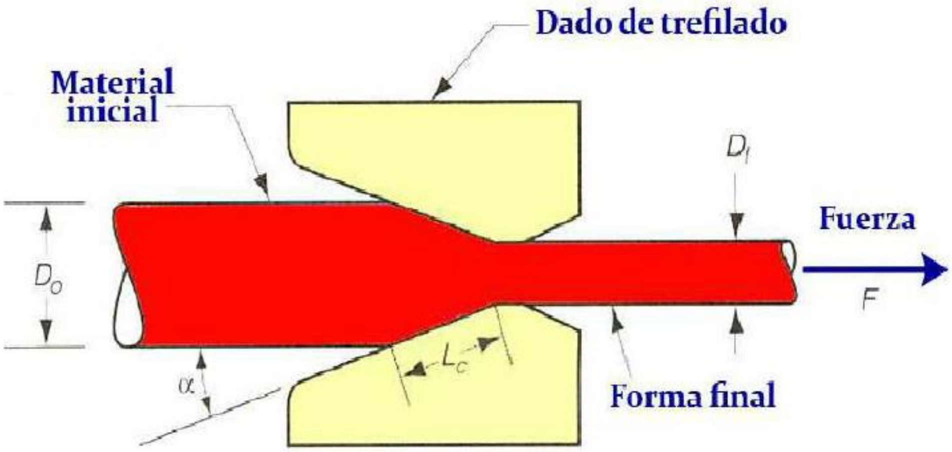
$\sigma d = 14{,}9 \times (1 + 0{,}07 / 0{,}27) \times 1{,}16 \times 0{,}45 = 9{,}79$ Kg / mm²

Fuerza de estirado

$F = \sigma d \times A_f = 9{,}79$ Kg/mm² x 3,14 mm² = **30,74 Kg**

Ejercicio Nº 9

Trefilado sin fricción: para sección circular: bajo condiciones reales de trabajo a temperatura ambiente, como se representa en la figura.
Son datos:
Diámetro del tocho Do = 21 mm
Diámetro final de la varilla redonda buscada Df = 20 mm
Ángulo α= 8 º
Tensión de fluencia (σc) de 56 Kg/mm².,

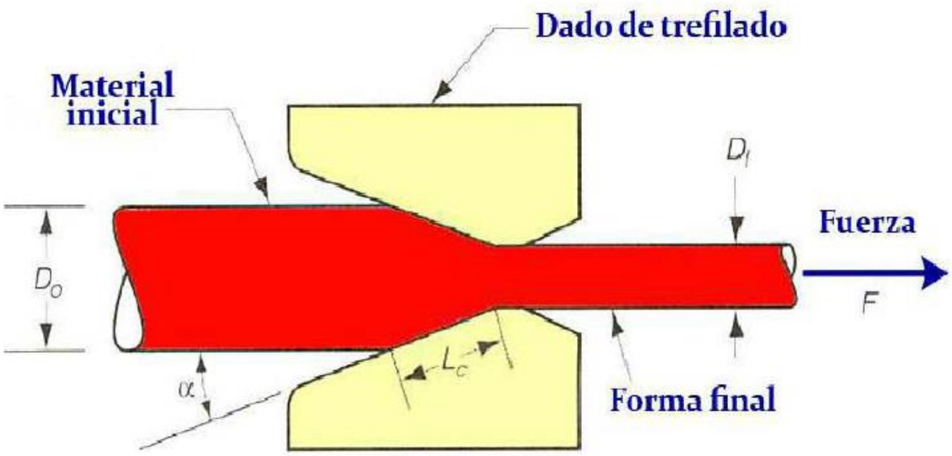


CALCULAR:

- **Reducción Γ**x:
- **Deformación ideal.**
- **Presión de trefilación, σd.**
- **Verificar: comparando la tensión obtenida contra la tensión de rotura del material SAE 1010.**
- **Luego, calcular Fuerza F**

Ejercicio Nº 10

Trefilado con fricción: para sección circular: bajo condiciones reales de trabajo a temperatura ambiente, como se representa en la figura.
Son datos:
Diámetro del tocho Do = 21 mm
Diámetro final de la varilla redonda buscada Df = 20 mm
Ángulo α= 8 º
Tensión de fluencia (σc) de 56 Kg/mm^{2}.,



CALCULAR:

- **Calcular el factor de deformación Ø,**
- **Presión de trefilación (σd) , mediante la fórmula de Schey.**
- **Verificar: comparando la tensión obtenida contra la tensión de rotura del material SAE 1010.**
- **Luego, calcular Fuerza F,**

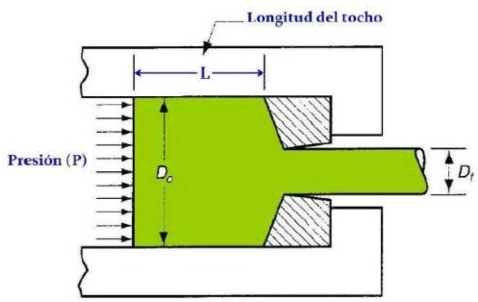
Ejercicio Nº 11
Extrusión (RESUELTO)

Calcular las presiones y potencias requeridas de una extrusión directa, considerando los siguientes datos y condiciones de trabajo.

$L0 = 75$ mm, $L1 = 50$ mm, $L2 = 0$ mm (longitud del tocho)
$D0 = 25$ mm (diámetro del tocho)
$rx = 4$ (draft o relación de reducción o extrusión)
$K = 42{,}2$ Kg/mm² (coeficiente de resistencia)
$n = 0{,}18$ (exponente de endurecimiento por deformación)
$\alpha = 60^{\circ}$ (ángulo del dado)
$a = 0{,}7$ y $b = 1{,}3$ (constantes empíricas para el ángulo del dado)
$v = 0{,}002$ m/seg. (velocidad del pistón)

CALCULAR:

$p = ?$ (presión de extrusión)
$F = ?$ (fuerza de extrusión)
$P = ?$ (potencia de extrusión)



$\varepsilon = \ln rx$ (deformación ideal sin fricción)
$\varepsilon x = a + b \times \varepsilon$ (deformación real)
$Yf = K x (\varepsilon)^{n} / (1+n)$
$p = Yf \times (\varepsilon x + 2\,L / D)$ (presión de extrusión)
$F = p \times A0$ (fuerza de extrusión)
$P = F \times v$ (potencia de extrusión)

Area del tocho
$A0 = 0{,}785 \times D0^2 = 0{,}785 \times 25^2 = 491$ mm²

Diámetro de la forma final de trabajo

$rx = A0 / Af = 0{,}785 \times D0^2 / 0{,}785 \times Df^2 = 4 \quad \rightarrow D0 / Df = 2$
$Df = D0 / 2 = 25 / 2 = 12{,}5$ mm

Deformación ideal sin fricción
$\varepsilon = \ln rx = \ln 4 = 1{,}3863$

Deformación real
$\varepsilon x = a + b \times \varepsilon = 0{,}7 + 1{,}3 \times 1{,}3863 = 2{,}5$

Esfuerzo de fluencia

$Yf = Kx(\varepsilon)^{n} /(1+n) = 42{,}2 \times 2{,}5^{0{,}18} /(1+0{,}18) = 42{,}17\ Kg/mm^2$

Presión de extrusión en L0

$p0 = Yf \times (\varepsilon x + 2\ L0 / D0) = 42{,}17 \times (2{,}5 + 150 / 25) =$ **358 Kg/mm²**

Fuerza de extrusión en L0

F0 = p0 x A0 = 358 Kg/mm² x 491mm² = **175.778 Kg**

Potencia de extrusión en L0

P0 = F0 x v = (175778 Kg x 0,002 m/seg.) / 75 = **4,68 CV**

Presión de extrusión en L1

$p1 = Yf \times (\varepsilon x + 2\ L1 / D0) = 42{,}17 \times (2{,}5 + 100 / 25) =$ **274 Kg/mm²**

Fuerza de extrusión en L1

F1 = p1 x A0 = 274 Kg/mm² x 491mm² = **134.534 Kg**

Potencia de extrusión en L1

P1 = F1 x v = (134534 Kg x 0,002 m/seg.) / 75 = **3,58 CV**

Presión de extrusión en L2

$p2 = Yf \times (\varepsilon x + 2\ L2 / D0) = 42{,}17 \times (2{,}5 + 0 / 25) =$ **105 Kg/mm²**

Fuerza de extrusión en L2

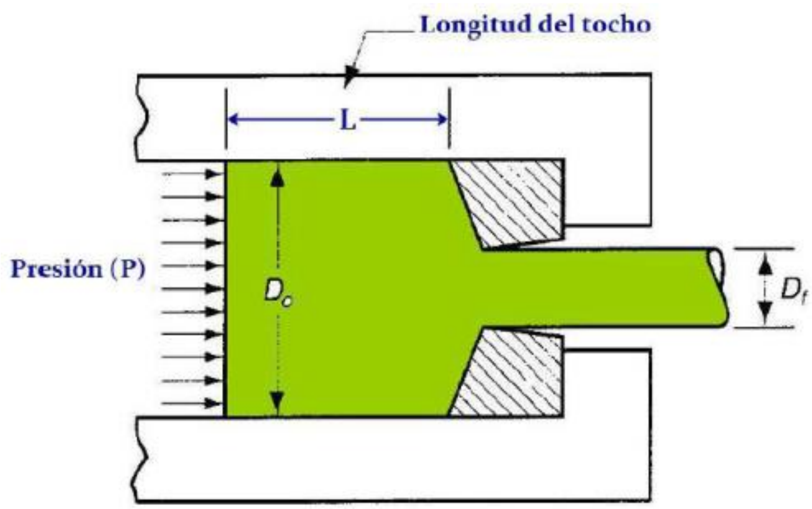
F2 = p2 x A0 = 105 Kg/mm² x 491mm² = **51.555 Kg**

Potencia de extrusión en L2

P2 = F2 x v = (51555 Kg x 0,002 m/seg.) / 75 = **1,38 CV**

Ejercicio Nº 12

Extrusión directa para sección circular: se lleva a cabo el siguiente proceso de extrusión bajo condiciones reales de trabajo en caliente, como se representa en la figura.
Son datos:
Longitud del Tocho L= 500 mm
Diámetro del tocho Do = 127 mm
Diámetro final de la varilla redonda buscada Df = 21 mm
Tensión de fluencia (σf) de 25 Kg/mm^{2}., el metal es plástico (trabajo en caliente).

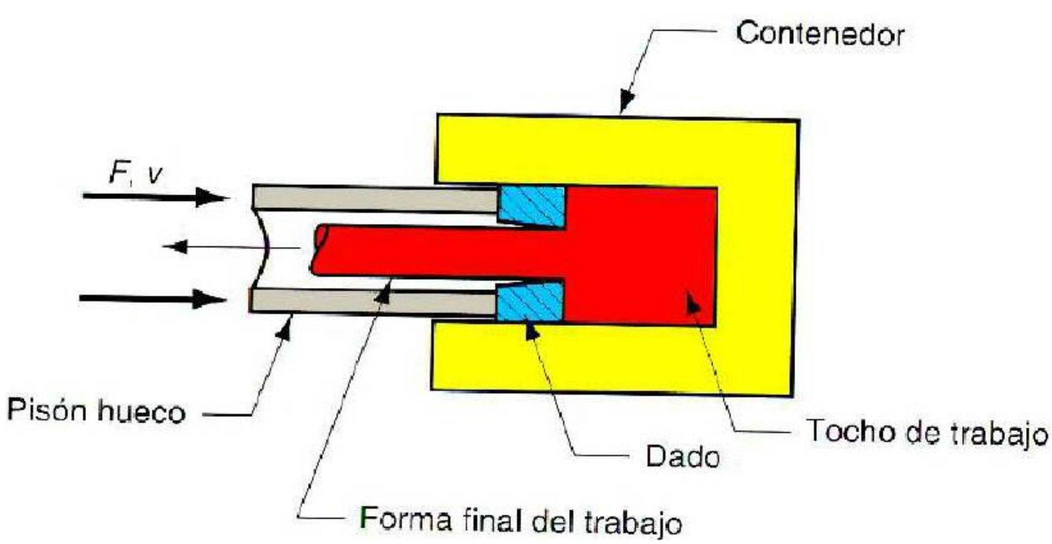


CALCULAR:

- **Reducción Γ**x:
- **Deformación ideal.**
- **Presión de extrusión (sin considerar la fricción) considerando a (σf =σc).**
- **Luego, calcular la Presión (P) empleando la formula empírica de Johnson,**
  - ✓ **Valores de las constantes a= 0.8 , y b= 1.35.**
- **Luego, calcular la Fuerza (F) empleando la formula empírica de Johnson.**

Ejercicio Nº 13

Extrusión indirecta para sección circular: se lleva a cabo el siguiente proceso de extrusión bajo condiciones reales de trabajo en caliente, como se representa en la figura.
Son datos:
Longitud del Tocho L= 500 mm
Diámetro del tocho Do = 127 mm
Diámetro final de la varilla redonda buscada Df = 21 mm
Tensión de fluencia (σf) de 25 Kg/mm^{2}., el metal es plástico (trabajo en caliente).
Considerar la fricción σf =σc.



CALCULAR:

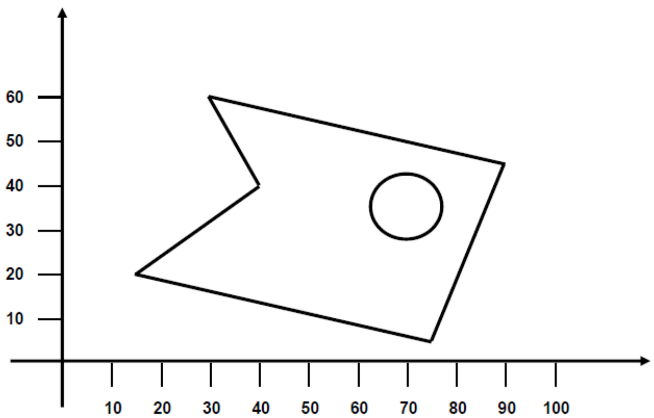
- **Reducción Γ**x:
- **Deformación ideal.**
- **Presión de extrusión empleando la formula empírica de Johnson .**
- **Luego, calcular Fuerza F, empleando la formula empírica de Johnson .**
  - ✓ **Valores de las constantes a= 0.8 , y b= 1.35.**

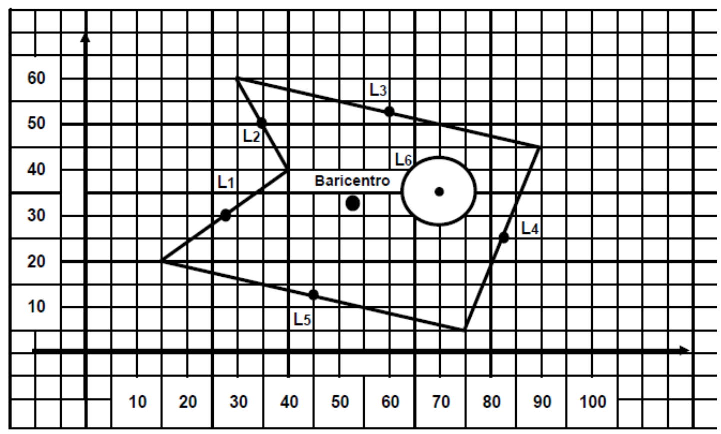
Ejercicio Nº 14

CÁLCULO DEL BARICENTRO PARA ESTAMPADO (RESUELTO).

Determinar el baricentro de la figura en forma analítica.
Datos:

- e = 2 mm (espesor de la chapa).
- σ = 50 Kg/mm² (fuerza unitaria de corte).





Calculo de los L(i):

$L1^2 = 25^2 + 20^2 = 625 + 400 = 1025\ mm^2 \rightarrow L1 = 32{,}01\ mm$
$L2^2 = 10^2 + 20^2 = 100 + 400 = 500\ mm^2 \rightarrow L2 = 22{,}36\ mm$
$L3^2 = 15^2 + 60^2 = 225 + 3600 = 3825\ mm^2 \rightarrow L3 = 61{,}85\ mm$
$L4^2 = 15^2 + 40^2 = 225 + 1600 = 1825\ mm^2 \rightarrow L4 = 42{,}72\ mm$
$L5^2 = 15^2 + 60^2 = 225 + 3600 = 3825\ mm^2 \rightarrow L5 = 61{,}85\ mm$
$L6 = \pi \times D = \pi \times 15\ mm = 47{,}12\ mm$

Calculo de la Fuerzas F(i):

$F1 = L1 \times e \times \sigma = 32{,}01\ mm \times 2\ mm \times 50\ kg/mm^2 = 3201\ kg$
$F2 = L2 \times e \times \sigma = 22{,}36\ mm \times 2\ mm \times 50\ kg/mm^2 = 2236\ kg$
$F3 = L3 \times e \times \sigma = 61{,}85\ mm \times 2\ mm \times 50\ kg/mm^2 = 6185\ kg$
$F4 = L4 \times e \times \sigma = 42{,}72\ mm \times 2\ mm \times 50\ kg/mm^2 = 4272\ kg$
$F5 = L5 \times e \times \sigma = 61{,}85\ mm \times 2\ mm \times 50\ kg/mm^2 = 6185\ kg$
$F6 = L6 \times e \times \sigma = 62{,}83\ mm \times 2\ mm \times 50\ kg/mm^2 = 4712\ kg$

Calculo de la fuerza F total:

$FT = F1 + F2 + F3 + F4 + F5 + F6 = 26791\ kg$

Calculo de la distancia del baricentro en x:

dx = 27,5x3201+35x2236+60x6185+82,5x4272+45x6185+70x4712 =
=26791

$$dx = \frac{88027{,}5 + 78260 + 371100 + 352440 + 278325 + 329840}{26791} = \frac{1407992{,}5}{26791}$$

dx = **52,55 mm**

Calculo de la distancia del baricentro en y:

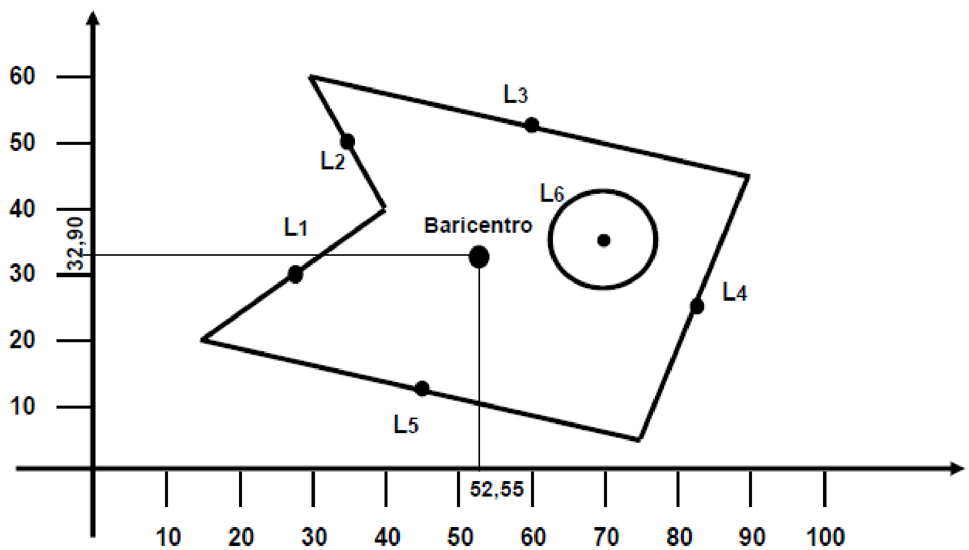
$$dy = \frac{30x3201+50x2236+52{,}5x6185+25x4272+12{,}5x6185+35x4712}{26791} =$$

$$dy = \frac{96030 + 111800 + 324712{,}5 + 106800 + 77312{,}5 + 164920}{26791} = \frac{881575}{26791}$$

dy = **32,90 mm**

El baricentro de la figura estará ubicado en el punto determinado por las coordenadas 52,55 mm en el eje x; y 32,90 en el eje y.

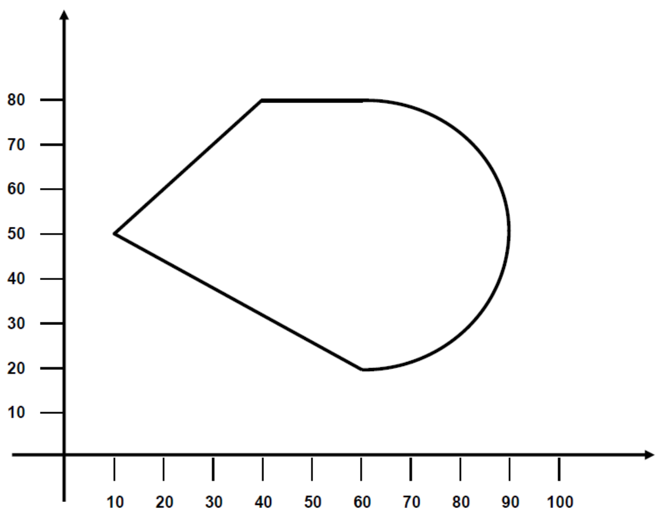
Por ese punto de la figura, deberá pasar el eje de la matriz, y en ese punto se deberá concentrar la fuerza de corte para el estampado; FT = 26.791 Kg.

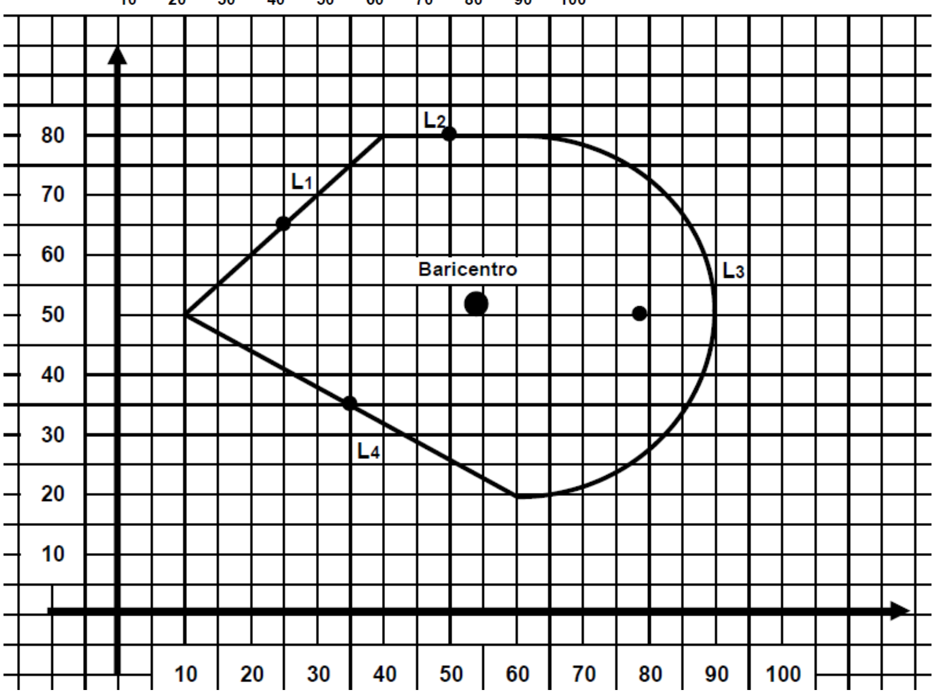


Ejercicio Nº 15

Determinar el baricentro de la figura en forma analítica.
Datos:

- el punto de aplicación de L3 = (79,08; 50)
- e = 2 mm (espesor de la chapa)
- σ = 50 Kg/mm² (fuerza unitaria de corte)

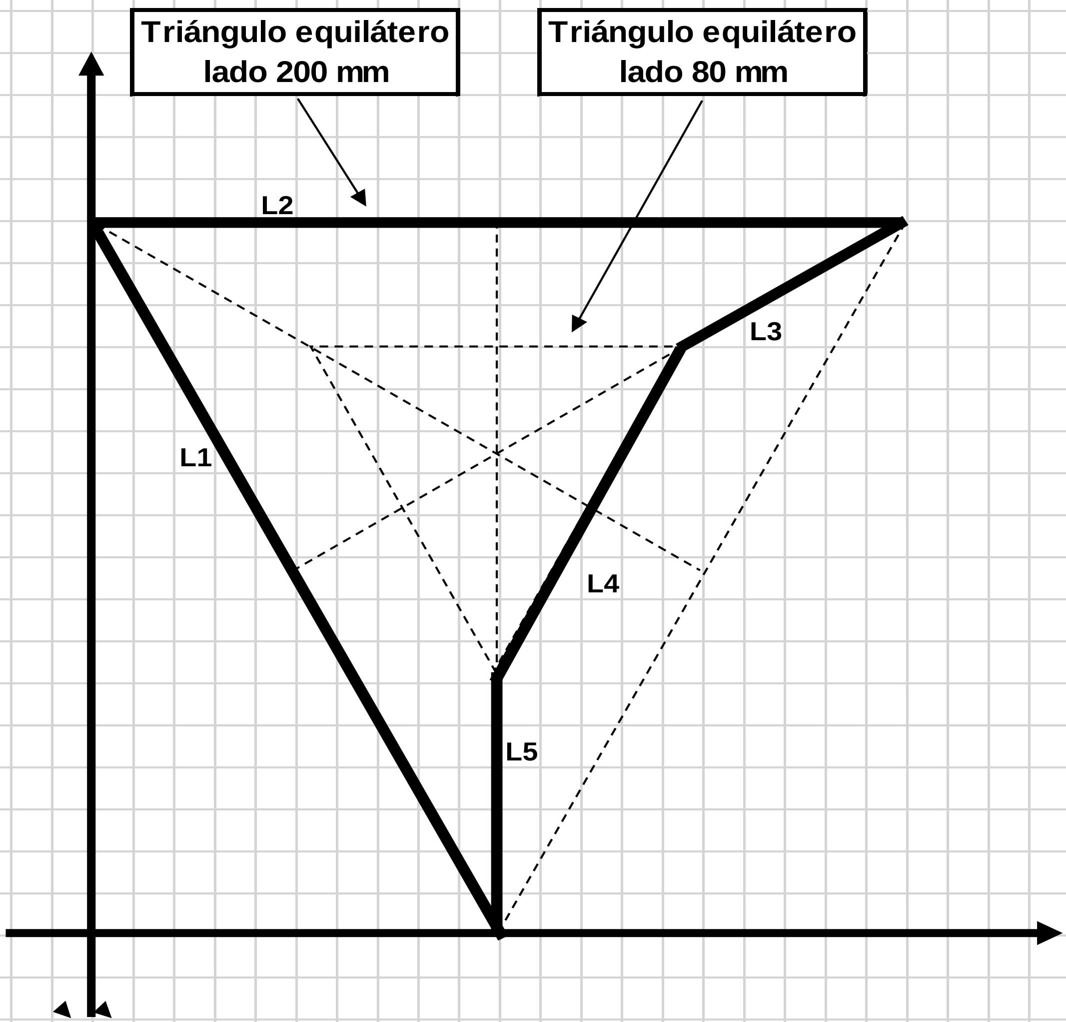




Ejercicio Nº 16

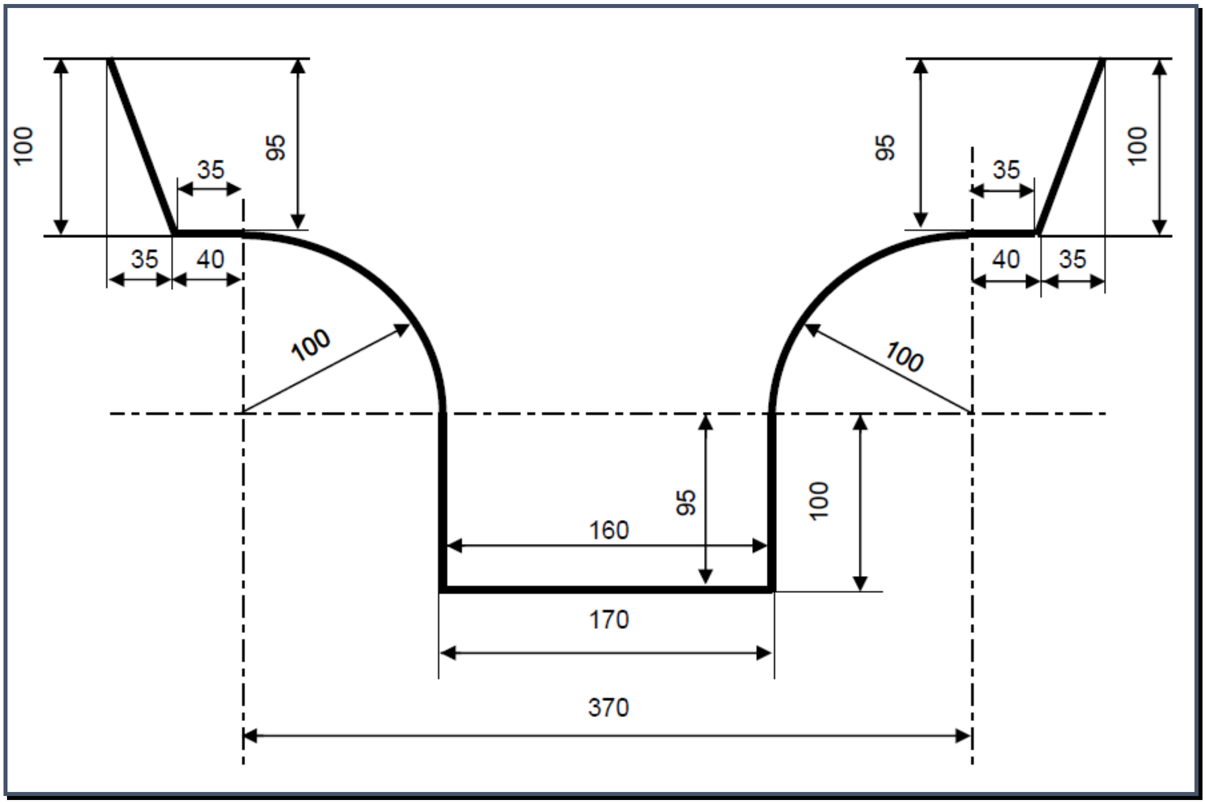
Determinar analíticamente la fuerza de punzonado y la ubicación de su baricentro. Adoptar e = 2 mm y σ = 50 Kg/mm²

Nota: Ejercicio Tomado en Examen Final



FT (kg)	dx (mm)	dy (mm)
Valor entero	1 dígito decimal	1 dígito decimal

Ejercicio Nº 17
CÁLCULO DEL DESARROLLO DE LA FIGURA PARA EL DOBLADO POR ESTAMPA (RESUELTO).



Calcular el desarrollo de la junta del gráfico, considerando la línea neutra en el centro del espesor, la cantidad de chapas necesarias para la fabricación de 100 juntas (CANALETAS) y el porcentaje de desperdicio con relación al peso bruto.

Datos:

Largo de la junta de canaleta = 1,3 m
Espesor de la chapa de junta = 5 mm
Cantidad de Juntas = 100 unidades
Tamño de la chapa de aleación de cobre = 2000 mm x 4000 mm
$\rho = 8{,}73\ Kg/dm^3$ (densidad del material)

Calcular:

Desarrollo= ?
Cantidad de chapas = ?
Desperdicio % = ?

Resolución:

$L1^2 = 97{,}5^2 + 37{,}5^2 = 10912{,}5$ >>>> $L1 = 104{,}5$ mm

L2 = 37,5 mm
L3 = 0,785 x 2 x 102,5 >>>>>>>>> L3 = 160,9 mm
L4 = 97,5 mm
L5 = 165 mm
L6 = 97,5 mm
L7 = 0,785 x 2 x 102,5 >>>>>>>>>> L7 = 160,9 mm
L8 = 37,5 mm
$L9^2 = 97,5^2 + 37,5^2 = 10912,5$ >>>>>L9 = 104,5 mm

Desarrollo perimetral para el doblado:

Desarrollo = L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8 + L9
Desarrollo = 104,5+37,5+160,9+ 97,5+165+97,5+160,9+37,5+104,5
Desarrollo = **965,8 mm**

Cada junta tiene 0,9658 metros de desarrollo en el ancho; en 2 metros de la chapa entran 2 desarrollos de junta a lo ancho.

Cada junta tiene 1,300 metros de largo; en 4 metros de la chapa entran 3 desarrollos de junta a lo largo.

Por lo tanto por cada chapa de 2,00 metros X 4,00 metros caben: Cj= 2x3 = 6 juntas.
Juntas x chapas = 6

Cantidad de chapas necesarias para realizer 100 canaletas/juntas:
Cantidad de chapas > = 100 / 6 = 16,66666 => **17 unidades**

Volumen de la junta = 9,658 x 13 x 0,05 = 6,28 dm^3

Peso de la junta = 6,28 dm^3 x 8,73 Kg/dm^3 = 54,83 Kg
Peso de las 100 juntas = 54,83 Kg x 100 = 5483 Kg

Volumen de la Chapa = 20 x 40 x 0,05 = 40 dm^3

Peso de la chapa = 40 dm^3 x 8,73 Kg/dm^3 = 349,2 Kg
Peso de las 17 chapas = 349,2 Kg x 17 = 5936 Kg

Desperdicio = (Pb - Pn) / Pb = (5936 - 5483) / 5936 = 0,076
Desperdicio % = 0,076 x 100 = **7,6 %.**

Ejercicio Nº 18

Se deben fabricar 100 juntas de dilatación como se indica, calcular:

a) Desarrollo de la junta en base a la línea neutra en el centro del espesor.

b) Cantidad de chapas necesarias y mínimas para las 100 juntas.

c) Porcentaje de desperdicio con relación al peso bruto.

Largo de la junta de dilatación = 1 m

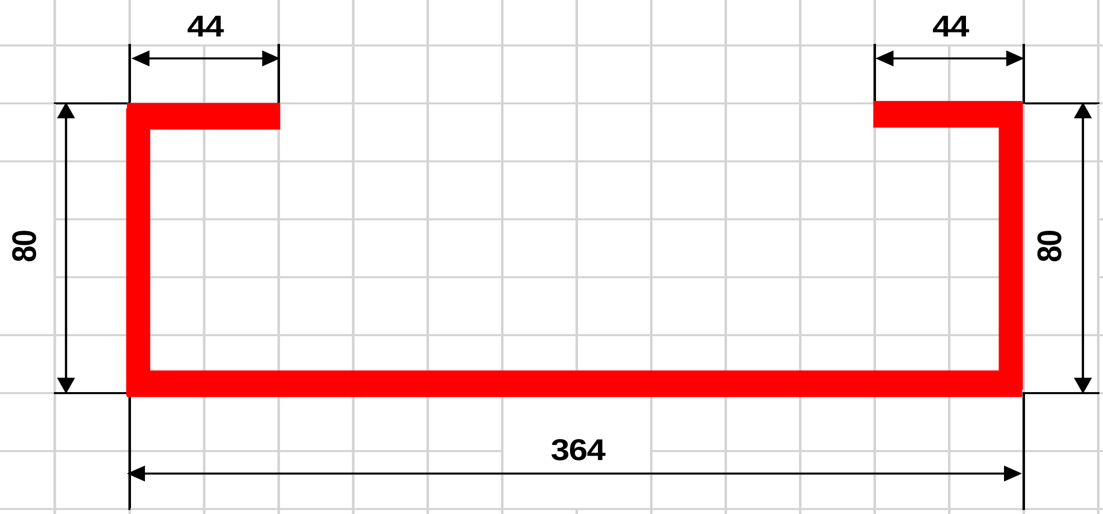
Espesor de la junta = 8 mm

Cantidad de Juntas = 100 unidades

Chapa de aleación de cobre = 1800 mm x 2600 mm

Densidad del material ρ = 10 Kg/dm³

Desperdicio por corte 4 mm



Desarrollo (mm)	Q Chapas (Un.)	Desperdicio (%)