

TEMA 4

LAMINACIÓN

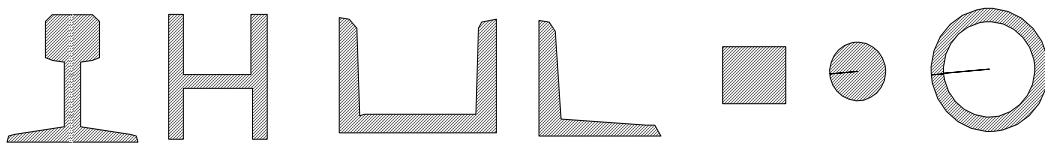
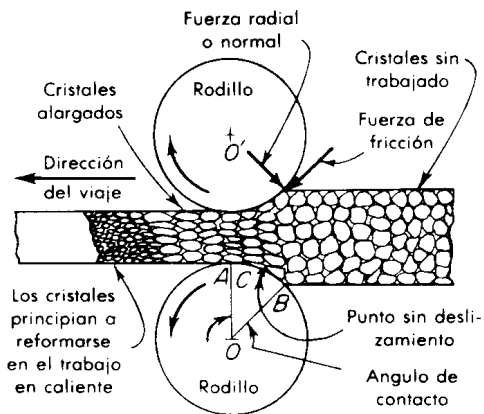
Introducción.

Es usual que el material de fundición pase directamente por una fase inicial de laminación, para posteriormente ser empleado en los procesos de forja, de forma que la laminación puede ser incluida en el proceso de colada continua.

La laminación es el proceso de deformación plástica que más se emplea, radicando sus ventajas en que se obtiene una alta productividad, siendo a su vez fácilmente controlable.

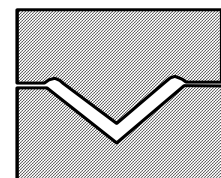
Básicamente se trata de reducir el espesor del material con que se alimenta, haciéndolo pasar entre dos cilindros que lo comprimen y estiran.

Con este procedimiento se pueden obtener igualmente los distintos perfiles comerciales (carriles, ángulos, vigas en I, barras de sección circular o cuadrada, etc) partiendo de un material caliente (originado en la fundición).



Así, por ejemplo, para obtener una L se emplearán unos rodillos que tengan grabada la siguiente figura:

El proceso de laminación sigue los siguientes pasos:



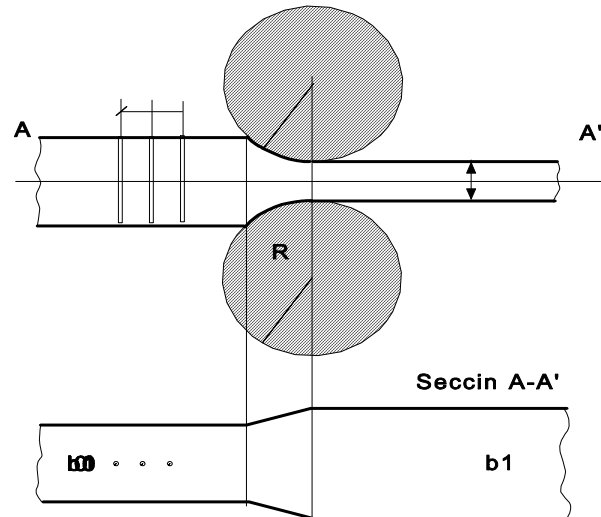
La laminación puede realizarse en caliente o en frío. En el primer caso las fibras se orientan bien en el sentido de trabajo, eliminándose las sopladuras y las inclusiones. A pesar de requerir mayores cargas, el conformado en frío es muy utilizado por mejorar las cualidades superficiales y mecánicas. Se emplea para el paso de acabado, en láminas ya preconformadas en caliente y para chapas de poco espesor.

Deformación en el laminado con cilindros lisos.

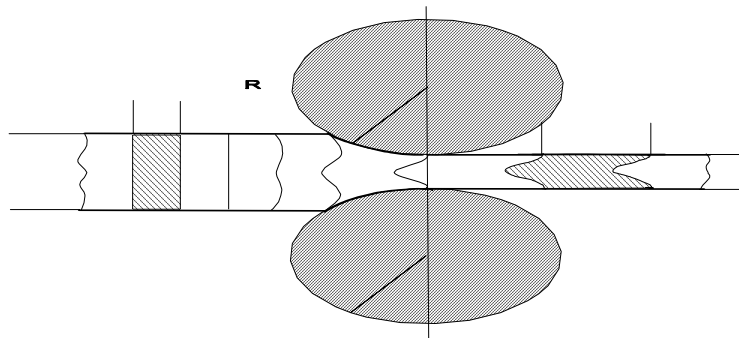
El estudio de la deformación que se origina en la laminación se puede iniciar mediante la inserción de unas varillas de otro material que, una vez producida la conformación, se podrán observar definiendo la deformación correspondiente a la sección del corte:

De forma general y, puesto que se cumple la igualdad de volumen a través de la deformación, por originarse una disminución de la sección, habrá de producirse un alargamiento y un ensanchamiento del material, que pasa de:

$$\begin{aligned}
 l_0 &\rightarrow l_1 & l_0 < l_1 \\
 b_0 &\rightarrow b_1 & b_0 < b_1 \text{ de forma que } l_0 b_0 h_0 = \\
 h_0 &\rightarrow h_1 & h_0 > h_1 \\
 l_1 b_1 h_1 &= \text{cte.}
 \end{aligned}$$



A la entrada de los cilindros hay un proceso de *recalcado* (arrastre de material hacia atrás), al que sigue una deformación como la que muestra la figura:



donde se puede apreciar que las secciones rectas no permanecen rectas.

Si bien $b_1 > b_0$, si la velocidad es la adecuada (a partir de una crítica) se puede considerar que $b_1 \approx b_0$, luego la igualdad de volumen significaría:

$$\begin{aligned}
 l_0 h_0 &= l_1 h_1 \\
 \frac{h_0}{h_1} &= \frac{l_1}{l_0} = \lambda
 \end{aligned}$$

donde λ se define como el *grado de reducción*, y por la ecuación de continuidad:

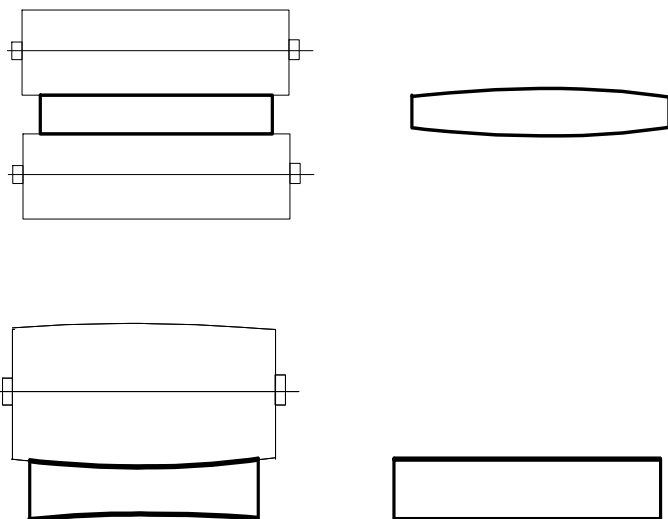
$$v_0 < v_1$$

$$h_0 b_0 v_0 = h_1 b_1 v_1$$

$$h_0 v_0 = h_1 v_1$$

$$v_1 = \lambda v_0$$

existiendo un punto muerto de equilibrio de velocidades.



Tras la laminación se produce una recuperación elástica en el centro de la sección, como consecuencia de que, debido a las altas presiones, los cilindros de laminación se deforman elásticamente, por lo que las caras de la chapa obtenida no resultarán planas.

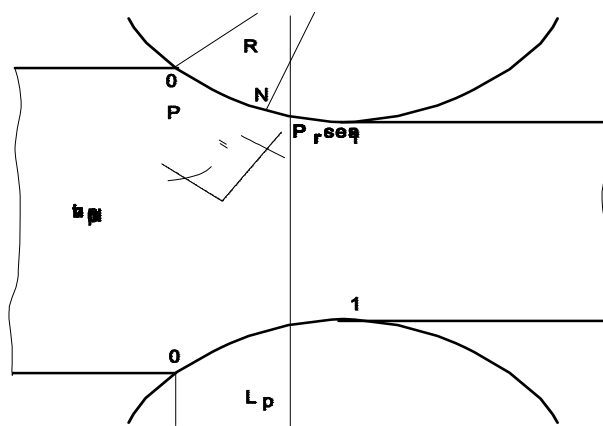
Para evitar esto, los cilindros se construyen con una cierta curvatura que origina una geometría que, tras la recuperación elástica, sea de caras paralelas:

Si bien estos sólo serán válidos en el caso de aplicar la carga para los que han sido diseñados.

Arrastre del material.

Son los propios cilindros quienes, por fricción, arrastran el material para su conformado, de ahí que interese el que posean un alto coeficiente de rozamiento.

En cualquier punto de la superficie de contacto actúa una fuerza de compresión radial P_r y otra fricción tangencial T . La dirección de T variará según se esté antes o después del punto neutro (aquél en el que las velocidades del material y de los cilindros coinciden).



Sólo se conseguirá arrastre si



quedando la condición de arrastre (mordida) como:

$$\text{tg } \alpha_0 < \mu$$

pues interesa en la sección inicial (punto 0).

Para grandes reducciones α debe ser grande, luego μ debe ser también grande.

Como el rozamiento disminuye al aumentar la velocidad periférica del cilindro, se habrán de emplear v_p bajas.

$$\begin{aligned} \mu \uparrow - v_p \downarrow \\ \alpha_o \uparrow - v_p \downarrow \\ \mu \uparrow - \Delta h \uparrow \end{aligned}$$

Veamos esta última relación:

$$\Delta h = h_o - h_1 = f(R, \mu)$$

Consideremos L_p como la proyección del arco de circunferencia de radio R entre 0 y 1. Se verifica que:

$$\begin{aligned} L_p^2 &= R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2 \\ L_p^2 &= R \Delta h - \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2 = \\ &= \frac{\Delta h}{2} \left(2R - \frac{\Delta h}{2}\right) \end{aligned}$$

y como $\frac{\Delta h}{2} \gg R - L_p - R \Delta h$ (1)

Por otra parte, teniendo en cuenta la relación trigonométrica:

$$\begin{aligned} \cos^2 \alpha_o &= \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{\text{subo}}} = \frac{1}{1 + \mu^2} \quad (\mu = \operatorname{tg} \alpha_o) \\ L_p &= R \operatorname{sen} \alpha_o \\ L_p^2 &= R^2 (1 - \cos^2 \alpha_o) \end{aligned}$$

sustituyendo el valor en (1), tendremos:

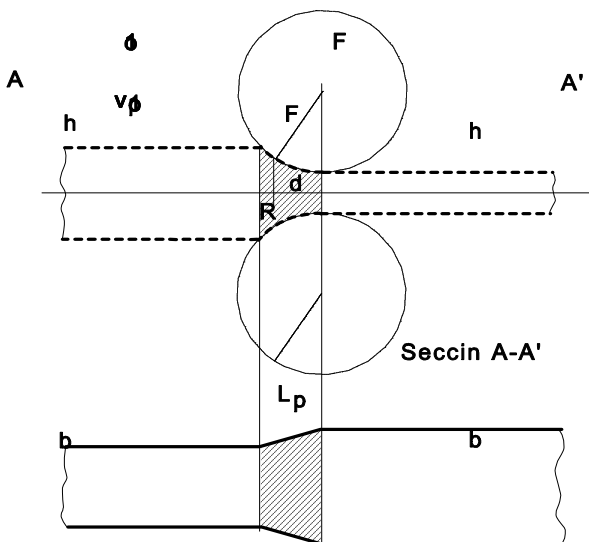
$$R \Delta h = R^2 (1 - \cos^2 \alpha_o)$$

$$\Delta h = R \left(1 - \frac{1}{1 + \mu^2}\right)$$

Luego en efecto, si $\mu \gg 1$ Y $\Delta h \gg R$; es decir, en desbastes (grandes reducciones) se emplean cilindros de grandes diámetros, girando a bajas

velocidades. En acabados, diámetros pequeños, mayores velocidades y menores reducciones.

Fuerzas en el laminado en caliente.



En la laminación en caliente, al igual que en todo el trabajo en caliente, es muy importante que toda la masa del metal se caliente uniformemente hasta la temperatura conveniente antes de sufrir la operación. Ello suele hacer necesario un calentamiento prolongado a la temperatura deseada, procedimiento conocido como *resudado*. Si la temperatura no es uniforme, tampoco lo será la deformación y el exterior, más caliente, fluirá mejor que el interior, el cual, al estar más frío, será más resistente. Así pueden aparecer problemas de agrietamiento y rotura.

Denominando v_p a la velocidad periférica, se comprueba experimentalmente que se verifica:

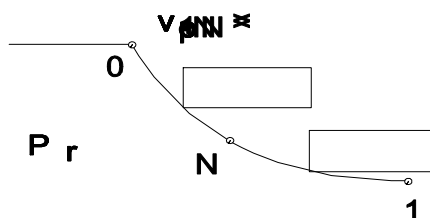
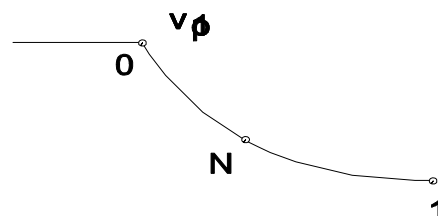
$$v_0 < v_p < v_1$$

(velocidad entrada < velocidad periférica < velocidad salida); luego en el punto N, intermedio, se cumplirá la igualdad:

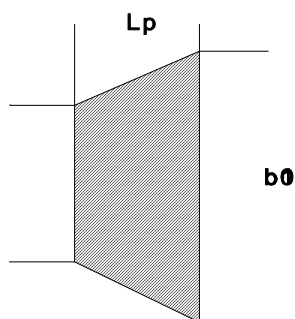
$$v_N = v_p$$

pasando un punto material por los estados:

En el punto neutro no hay diferencia de velocidad entre el material que se deforma y la superficie de los cilindros de laminación, es decir, no se produce deslizamiento. Dependiendo de la zona donde se esté, se tendrá una dirección de las fuerzas de rozamiento:



En el punto neutro hay un cambio en el sentido de la fuerza de rozamiento.



La fuerza resultante F sobre el cilindro, que pasa a una distancia d del eje vertical que une los centros, dependerá de la superficie de contacto y de la resistencia a la deformación del material. Haciendo la aproximación trapezoidal para dicha sección:

$$F = R_d \left(L_p \frac{b_0 + b_1}{2} \right) \quad (2)$$

con $R_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e$ (admitiendo deformación plana).

Anteriormente se dedujo que:

$$L_p^2 = \frac{\Delta h}{2} \left(D - \frac{\Delta h}{2} \right)$$

$$L_p^2 = R \Delta h - \left(\frac{\Delta h}{2} \right)^2 - R \Delta h$$

$$L_p = \sqrt{\Delta h R} = \sqrt{\Delta h \frac{D}{2}}$$

luego en (2):

$$F = R_d \sqrt{\frac{h_0 - h_1}{2} D} \frac{b_0 + b_1}{2}$$



y como se suele verificar que el ancho es prácticamente invariable:

$$b_1 = b_0 (= b)$$

$$F = R_d \sqrt{\frac{h_0 - h_1}{2}} D b$$

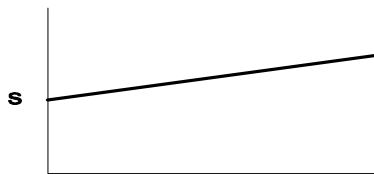
que expresa la fuerza necesaria para producir una reducción dada.

Conocido el diámetro se calculará la fuerza, o conocida la fuerza se determinará el diámetro aconsejable.

El parámetro más difícil de establecer a priori es R_d (resistencia a la deformación en caliente del material), por ser función de la temperatura y de la velocidad de deformación, la cual es a su vez función de la posición a lo largo del arco de contacto. Además, para mayor precisión se habría de conocer la resistencia a la deformación real, sin hipótesis de deformación plana, de ahí que suelen emplearse expresiones del tipo:

$$F = 1.2s \sqrt{\frac{h_0 - h_1}{2}} D b$$

donde s es la tensión de deformación o plastificación del material ($s = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e$).



Laminación en frío



Laminación en caliente

Se añade un coeficiente de mayoración del 20% para reflejar los fenómenos que se producen en la realidad y que no se han tenido en cuenta, aumentando por ello el valor de las fuerzas (hay fricción).

Supongamos que la fuerza F está situada a una distancia d . Podemos determinar el par como:

$$\frac{M}{2} = Fd \quad M = 2Fd$$

El valor del brazo d viene dado por:

$$d = CL_p$$

donde C es un coeficiente que depende de la forma de realizar la laminación y que se obtiene experimentalmente. Se sugiere:

$$C_{\text{caliente}} = 0.50 \text{) } 0.45$$

$$C_{\text{frío}} = 0.40 \text{) } 0.45$$

El valor del par será:

$$M = 2FCL_p (=2Fd)$$

Laminación

y el de la potencia:

$$W = M \omega = 2 F C L_p \frac{2\pi}{60} n = 2 F d \frac{2\pi}{60} n$$

con n en rev/min.

La fuerza total se distribuye en:

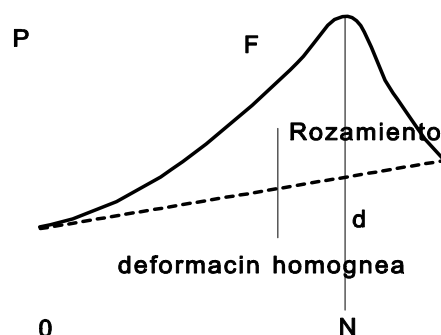
- fuerza necesaria para producir deformación (def. homogénea + rozamiento)
- rozamiento en cojinetes y extremos de transmisiones
- pérdidas eléctricas

Si representamos la distribución de presiones que se producen a lo largo del arco de contacto:

R_d es una resistencia a la deformación pero también se puede ver como la presión a lo largo del arco.

El máximo se produce en el punto neutro N .

Si fuésemos capaces de representar la distribución de presiones, podríamos determinar el centro de gravedad de presiones por donde pasa F , y así podríamos obtener el valor de d con mayor precisión, para calcular el par. Si no existiera rozamiento tendríamos la curva correspondiente a la deformación homogénea. El rozamiento hace que la curva varíe.



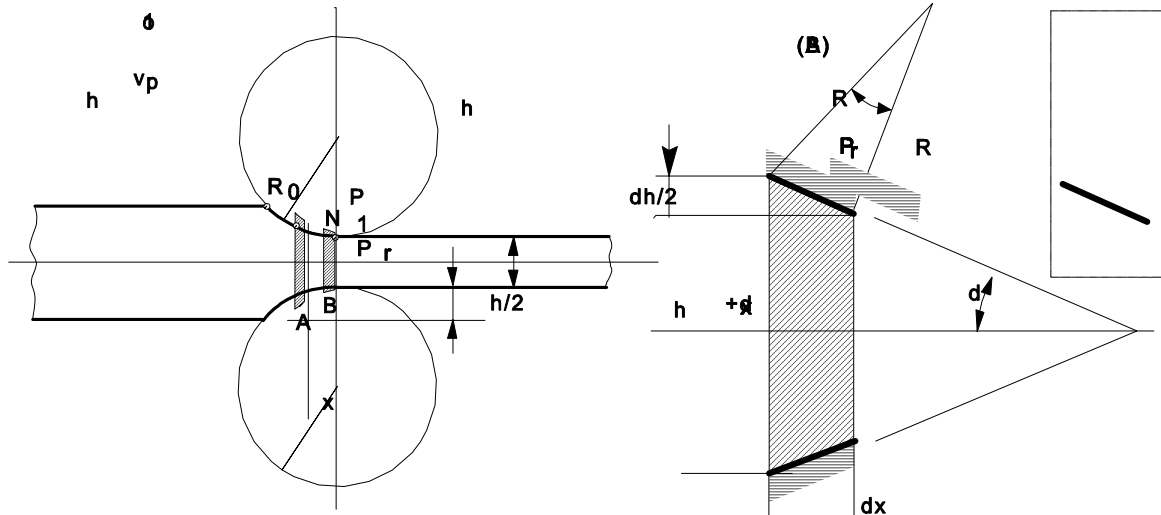
Fuerzas en el laminado en frío.

A la laminación en frío pertenece, con mucho, el mayor tonelaje de todos los productos trabajados en frío. Este proceso permite obtener chapas, bandas, barras y redondos de superficies lisas y dimensiones exactas. En su mayoría este trabajo se realiza en trenes de laminación cuarto, sendzimir o planetarios.

Para el desarrollo de las ecuaciones que caracterizan las teorías de laminado en frío, se van a considerar las siguientes hipótesis:

- 1) Deformación plana (no hay ensanchamiento lateral)
- 2) Deformación homogénea (las secciones verticales se mantienen planas)
- 3) Coeficiente de rozamiento constante en el arco de contacto
- 4) Arco de contacto circular y sin deformación elástica
- 5) Punto neutro N dentro del arco
- 6) Deformación elástica despreciable (despreciar deformación elástica de los cilindros, para así no considerar la recuperación elástica, causa de que los cilindros no se construyan planos)

Si consideramos sendas secciones **A** (antes) y **B** (después) del punto neutro, y en ellas se considera un elemento de longitud dx , podemos establecer las ecuaciones de equilibrio en los ejes X e Y , según el criterio de signos indicados.



Eje X:

teniendo en cuenta que:

$$\frac{dh/2}{dx} = \operatorname{tg} \alpha \quad - \quad \frac{dh}{2} = \operatorname{tg} \alpha \, dx$$

luego sustituyendo y eliminando términos de orden superior:

$$d(h \sigma_x) = -P_r (1 \pm \mu \operatorname{cotg} \alpha) dh \quad \mathbf{(3)}$$

Supuesto que estamos en tensiones principales

$$\sigma_x = \sigma_I$$

$$\sigma_y = \sigma_{III}$$

luego, por el equilibrio en el eje Y:

$$\text{- A: } \sigma_y \, dx = -P_r \frac{dx}{\operatorname{cos} \alpha} \operatorname{cos} \alpha - \mu P_r \frac{dx}{\operatorname{cos} \alpha} \operatorname{sen} \alpha$$

$$\text{- B: } \sigma_y \, dx = -P_r \frac{dx}{\operatorname{cos} \alpha} \operatorname{cos} \alpha + \mu P_r \frac{dx}{\operatorname{cos} \alpha} \operatorname{sen} \alpha$$

y ambos quedan como:

$$\sigma_y = -P_r (1 \pm \mu \operatorname{tg} \alpha)$$

En deformación en frío el ángulo debe ser muy pequeño (pues la deformación admisible es pequeña) y además el coeficiente de rozamiento también es pequeño, por lo que $\mu \operatorname{tg} \alpha \ll 1$ y podemos hacer la aproximación de que: $\sigma_y = -P_r$

El criterio de Von Mises en deformación plana se expresa como:

$$\sigma_I - \sigma_{III} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e = s$$

$$\sigma_x + P_r = s$$

$$\sigma_x = s - P_r$$

y la ecuación **(3)** quedará como:

$$d[h(s - P_r)] = -P_r (1 \pm \mu \operatorname{cotg} \alpha) dh$$

según se puede ver en el dibujo de distribución de esfuerzos.

Luego:

$$\frac{dh}{2} = (Rd\alpha) \operatorname{sen} \alpha$$

que se reduce a:

$$d[h(s - P_r)] = -2R P_r (1 \pm \mu \cot \alpha) d\alpha \operatorname{sen} \alpha$$

$$d\left[sh\left(1 - \frac{P_r}{s}\right)\right] = -2R P_r (\operatorname{sen} \alpha \pm \mu \cos \alpha) d\alpha$$

que, una vez derivado el primer miembro, quedará como:

Bland y Ford sugirieron, en 1948, una simplificación que permite integrar esta ecuación si la tracción hacia atrás no es elevada, ni la velocidad de endurecimiento tiene un valor alto. En efecto, en estas condiciones la variación de la presión en los cilindros con la posición angular es mucho mayor que la variación de la tensión de fluencia. Además, la variación del producto sh será todavía más pequeña que la de s (s se incrementa a medida que h disminuye), de forma que el término:

$$\left(1 - \frac{P_r}{s}\right) \frac{d(sh)}{d\alpha} \text{SIMEQ0}$$

es despreciable y se puede considerar únicamente:

$$sh \frac{d}{d\alpha} \left(1 - \frac{P_r}{s}\right) = -2R P_r (\operatorname{sen} \alpha \pm \mu \cos \alpha)$$

y teniendo en cuenta la simplificación de $\frac{d}{d\alpha} 1 = 0$

$$sh \frac{d}{d\alpha} \left(\frac{P_r}{s}\right) = 2R P_r (\operatorname{sen} \alpha \pm \mu \cos \alpha) \quad (4)$$

Como el ángulo de contacto suele ser pequeño, se pueden realizar las siguientes aproximaciones:

$$\operatorname{sen} \alpha \approx \alpha$$

$$\cos \alpha \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2} \approx 1$$

$$h = h_1 + 2R(1 - \cos \alpha) \approx h_1 + 2R \frac{\alpha^2}{2} = h_1 + R\alpha^2$$

Luego, sustituyendo en (4):

$$s(h_1 + R\alpha^2) \frac{d}{d\alpha} \left(\frac{P_r}{s}\right) = 2R P_r (\alpha \pm \mu)$$

agrupando términos:

$$\frac{d\left(\frac{P_r}{s}\right)}{\frac{P_r}{s}} = \frac{2R(\alpha \pm \mu) d\alpha}{h_1 + R\alpha^2}$$

Los dos términos de esta ecuación se pueden integrar, obteniéndose como solución general:



$$\ln\left(\frac{P_r}{s}\right) = \ln\left(\frac{h_1}{R} + \alpha^2\right) \pm \frac{2\mu}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} \operatorname{arctg} \frac{\alpha}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} + \ln C^\pm$$

que llamando a:

$$H = 2\sqrt{\frac{R}{h_1}} \operatorname{arctg}\left(\sqrt{\frac{R}{h_1}} \alpha\right)$$

se puede expresar como:

o lo que es lo mismo:

$$\frac{P_r^\pm}{s} = C^\pm \frac{h}{R} \operatorname{func} e^{\pm\mu H}$$

Se tiene, de esta forma, dos ecuaciones sobre las que se impondrán las condiciones de contorno antes y después del punto neutro.

Salida (después del punto neutro: punto 1, arco N-1)

$$\alpha_1 = 0 \quad H_1 = 0$$

$$\sigma_{s_1} = 0 \quad \sigma_{x_1} + P_{r_1} = s_1 \quad - \quad P_{r_1} = s_1$$

donde s_1 es la tensión de plastificación en la salida,

ecuación:
$$\frac{P_{r_1}}{s_1} = C^+ \frac{h_1}{R} e^{\mu H_1}$$

luego

$$C^+ = \frac{R}{h_1}$$

Entrada (antes del punto neutro: punto 1, arco 1-N)

$$\alpha_0 \quad H_0 = 2\sqrt{\frac{R}{h_1}} \operatorname{arctg}\left(\sqrt{\frac{R}{h_1}} \alpha_0\right)$$

$$\sigma_{s_1} = 0 \quad \sigma_{x_0} + P_{r_0} = s_0 \quad - \quad P_{r_0} = s_0$$

donde s_0 es la tensión de plastificación en la entrada,

ecuación:
$$\frac{P_{r_0}}{s_0} = C^- \frac{h_0}{R} e^{-\mu H_0}$$

luego

$$C^- = \frac{R}{h_0} e^{\mu H_0}$$

y si los sustituimos en la ecuación general obtendremos:

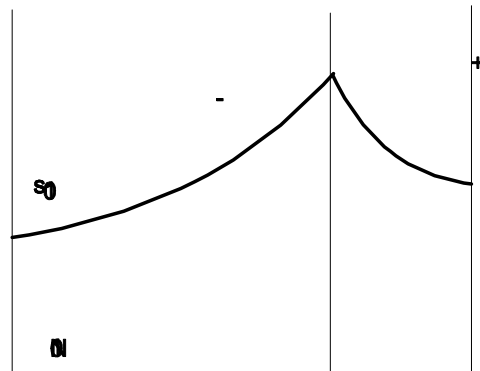
$$\frac{P_r^-}{s} = \frac{h}{h_0} e^{\mu(H_0-H)} \quad (\text{entrada}) \text{ punto neutro}$$

$$\frac{P_r^+}{s} = \frac{h}{h_1} e^{\mu H} \quad (\text{punto neutro}) \text{ salida}$$

Si se representan gráficamente, quedarían de la forma siguiente:

Donde:

- s_0 es conocida (del material antes de la deformación),
- α_N no es conocida y debe estudiarse, corresponde al punto neutro,
- s_1 en principio no se conoce, debe ser estudiada o calcularse.



En el caso de la deformación en caliente no se obtiene un único punto máximo de la curva, como en el caso de deformación en frío, sino que existe una zona de transición.

Si se considerase la existencia de pequeñas fuerzas de tracción, aplicadas para enrollar la banda y enderezarla, las ecuaciones se obtendrían de aplicar las siguientes condiciones de contorno:

Entrada

en $x = x_0$: $\alpha = \alpha_0$ $H = H_0$ $\sigma_x = \sigma_{x_0}$ $P_r = P_r^-$

Salida

en $x = 0$: $\alpha_1 = 0$ $H_1 = 0$ $\sigma_x = \sigma_{x_1}$ $P_r = P_r^+$

quedando finalmente:

$$\frac{P_r^-}{s} = \left(1 - \frac{\sigma_{x_0}}{s_0}\right) \frac{h}{h_0} e^{\mu(H_0-H)} \quad (\text{entrada}) \text{ punto neutro}$$

$$\frac{P_r^+}{s} = \left(1 - \frac{\sigma_{x_1}}{s_1}\right) \frac{h}{h_1} e^{\mu H} \quad (\text{punto neutro}) \text{ salida}$$

