

13
2ef.



**Universidad Nacional Autónoma
de México**

Facultad de Química



**EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA**

**"USO DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL
EN LA DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS DE TRABAJO
PARA LA FORJA EN DADOS CERRADOS"**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO
P R E S E N T A:
NAVARRETE MENA JOSÉ



FACULTAD DE QUIMICA

México D.F.

1997.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

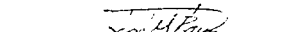
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.


Jurado asignado

Presidente	Prof. BERNARDO CAMPILLO ILLANES
Vocal	Prof. TERESITA ROBERT NUÑEZ
Secretario	Prof. GERARDO ARAMBURO PEREZ
1er. suplente	Prof. SERGIO GARCÍA GALÁN
2do. suplente	Prof. JOSÉ GUADALUPE RAMÍREZ VIEYRA

Sitio donde se desarrollo el tema: Laboratorio 110 Edificio "D", Facultad de Química, U.N.A.M.


Teresita del Niño Jesús Robert Nuñez
Asesor del tema


José Guadalupe Ramírez Vieyra
Supervisor técnico


José Navarrete Mena
Sustentante

A LA MEMORIA DE
JOSÉ NAVARRETE RODRÍGUEZ
POR LA INTENSIDAD CON QUE VIVIÓ
Y ME ENSEÑO A HACERLO

A
LIC. CELIA MENA MEDINA
ARQ. GERMAN NAVARRETE MENA
DRA. MARCELA NATALIA NAVARRETE MENA
SRITA. ABRIL NAVARRETE MENA
PORQUE A ELLOS DEBO MIS VIRTUDES
Y QUE ME PERDONEN POR LO DEMÁS.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a la M en I **Teresita Robert Nuñez** por la confianza y sabia orientación que me ha brindado. También quiero agradecer al Ing **José Guadalupe Ramírez Vieyra** su valiosa colaboración ya que sin ella no hubiera sido posible la realización de este trabajo. Finalmente agradezco infinitamente al Dr. **Joan Genescá Llongueras**, no sólo por sus enseñanzas y decidida ayuda, sino porque para mí es un ejemplo a seguir.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1 ANTECEDENTES	3
1.1.- Métodos analíticos.....	4
1.1.1.- Método del trabajo ideal.....	4
1.1.2.- Métodos de bloques.....	6
1.1.2.1.- Método de bloques modular.....	11
1.1.3.- Método de líneas de deslizamiento.....	12
1.1.4.- Método del límite superior.....	14
1.1.4.1.- Método elemental del límite superior.....	15
1.2.- Métodos empíricos	17
1.3.- Métodos semiemprícos	18
1.3.1.- Método de la viscoplasticidad	19
CAPITULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	23
2.1.- Tensión de fluencia	23
2.2.- Efecto de la temperatura sobre la fluencia	25
2.3.- Influencia de la velocidad de deformación	28
2.4.- Influencia de la geometría	29
2.5.- Fricción	31
2.5.1.- Fricción viscoplástica	31
2.5.2.- Efectos de la fricción en la forja.....	32
2.5.3.- Lubricación	32
2.6.- Tráferencia de calor	34
2.7.- Influencia de la rebaba	34
2.7.1.- Efecto rebaba	35
2.8.- Parámetros de la carga de trabajo	36
CAPITULO 3 ANÁLISIS DIMENSIONAL	38
3.1.- Teorema PI de Buckingham	38
3.2.- Determinación de los parámetros Π	39

CAPITULO 4 DESARROLLO EXPERIMENTAL	41
4.1.- Análisis dimensional	41
4.2.- Procedimiento experimental	46
CAPITULO 5 RESULTADOS OBTENIDOS	49
CAPITULO 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
CAPITULO 7 CONCLUSIONES	63
APENDICE.....	64
REFERENCIAS	86

INTRODUCCIÓN

Actualmente la forja en dados cerrados o forja en molde es una tecnología ampliamente utilizada en la fabricación de diversos productos metálicos, tales como: herramientas, tornillos, autopartes, componentes aeronáuticos y del espacio; artículos deportivos, maquinaria, motores eléctricos y de combustión interna; armamento, piezas para auto transportes y de ferrocarriles; equipo petrolero etc. Esto le ha dado a la forja en dados cerrados una gran importancia dentro de la industria manufacturera y metalúrgica, lo que ha hecho surgir la necesidad de mejorar y optimizar continuamente sus procesos.

Una operación de forja en dados cerrados consiste en deformar plásticamente un determinado metal de partida, entre dos semimoldes (llamados también troqueles, estampas, matrices o dados) con el fin de que dicho metal adquiera la forma completa del molde al aproximar ambos semimoldes. En la planeación de esta operación, los técnicos deben conocer la tensión requerida para conseguir la deformación plástica del metal, a lo que se le conoce como carga de trabajo. Evidentemente esta carga de trabajo se tiene que determinar con el mayor grado de precisión posible a partir de los parámetros del proceso, esta información permite a los técnicos seleccionar adecuadamente la capacidad de la máquina de forja que se habrá de requerir. Esta selección deberá tomar en cuenta además, la necesidad de minimizar tanto los consumos energéticos como las inversiones.

Planteamiento del problema

El cálculo de las cargas de trabajo por métodos analíticos, obtienen resultados precisos para un reducido número de operaciones de forja en dados cerrados, además las soluciones analíticas tienden a ser especializadas y de difícil lectura para quienes se ocupan de la forja desde el punto de vista práctico. Los métodos empíricos, por su parte, permiten obtener las cargas de trabajo de una manera más sencilla y se pueden aplicar con precisión a un mayor número de operaciones de forja, siempre y cuando los datos experimentales, en los que se basen, hayan sido obtenidos bajo condiciones similares a las del problema en cuestión. Esto, en muchas ocasiones puede resultar muy costoso o prácticamente imposible, lo cual ha hecho surgir la necesidad de desarrollar métodos semiempíricos más generales y sencillos, que permitan obtener resultados precisos para la mayoría de los casos y que no estén restringidos a la discusión de condiciones específicas ó de datos particulares.

Objetivo:

Establecer un método semiempírico general, que permita cuantificar con precisión las cargas de trabajo requeridas en operaciones de forja en dados cerrados:

Hipótesis:

Para generalizar la información obtenida mediante datos experimentales específicos de forja en dados cerrados y desarrollar un método semiempírico general, podríamos recurrir al análisis dimensional de los parámetros involucrados en dicha forja.

El análisis dimensional permitiría además presentar los resultados de la investigación en forma mas compacta empleando un mínimo de gráficas.

CAPITULO 1 ANTECEDENTES

Uno de los propósitos principales de los estudios de la forja en dados cerrados es el de predecir la magnitud de la tensión, que provocara que el metal a forjar se deforme plásticamente bajo ciertas condiciones. La dificultad de esta predicción estriba en que, en la mayoría de las operaciones, actúan simultáneamente, al menos dos tensiones sobre un elemento del metal en la zona de deformación. De aquí que la fluencia dependa de la combinación de las tensiones que actúan y se tenga que predecir en función de las relaciones entre ellas.

Se han sugerido diversos tipos de criterios de fluencia; el de mayor aceptación lo propuso von Mises ¹, el cual establece, que el flujo plástico comienza cuando la energía de deformación debida a los esfuerzos cortantes, alcanza un valor determinado. La magnitud de esta energía se expresa en función de las tensiones principales.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = K_1 \quad (1.1)$$

donde: σ_1 , σ_2 y σ_3 son las tensiones principales.

Hencky, ² interpreto el criterio de von Mises como que el flujo plástico tiene lugar cuando la energía de deformación cortante, alcanza un valor critico, es decir:

$$\frac{1}{6G} \left\{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right\} = K_2 \quad (1.2)$$

donde G, es el modulo de rigidez; $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$.

E = Modulo de Young
 ν = Modulo de Poisson

La energía de deformación cortante es la energía elástica de distorsión, y el criterio que se sigue es que la energía elástica asociada con el cambio de volumen no tiene efecto sobre la fluencia ³. Bridgman ⁴ ha confirmado experimentalmente, que la presión hidrostática prácticamente no influye en el sistema de tensiones.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES

Uno de los propósitos principales de los estudios de la forja en dados cerrados es el de predecir la magnitud de la tensión, que provocara que el metal a forjar se deforme plásticamente bajo ciertas condiciones. La dificultad de esta predicción estriba en que, en la mayoría de las operaciones, actúan simultáneamente, al menos dos tensiones sobre un elemento del metal en la zona de deformación. De aquí que la fluencia dependa de la combinación de las tensiones que actúan y se tenga que predecir en función de las relaciones entre ellas.

Se han sugerido diversos tipos de criterios de fluencia; el de mayor aceptación lo propuso von Mises ¹, el cual establece, que el flujo plástico comienza cuando la energía de deformación debida a los esfuerzos cortantes, alcanza un valor determinado. La magnitud de esta energía se expresa en función de las tensiones principales.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = K_1, \quad (1.1)$$

donde: σ_1 , σ_2 y σ_3 son las tensiones principales.

Hencky,² interpreto el criterio de von Mises como que el flujo plástico tiene lugar cuando la energía de deformación cortante, alcanza un valor critico, es decir:

$$\frac{1}{6G} \left\{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right\} = K_2 \quad (1.2)$$

donde G, es el modulo de rigidez; $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$.

E = Modulo de Young
 ν = Modulo de Poisson

La energía de deformación cortante es la energía elástica de distorsión, y el criterio que se sigue es que la energía elástica asociada con el cambio de volumen no tiene efecto sobre la fluencia ³. Bridgman ⁴ ha confirmado experimentalmente, que la presión hidrostática prácticamente no influye en el sistema de tensiones.

Las tensiones principales se definen como aquellas perpendiculares entre sí que actúan sobre ciertos planos en la pieza, que están orientados, de manera que ninguna tensión cortante actúa sobre ellos ⁵. Dos de las tensiones principales son la mayor y la menor que actúan sobre la pieza. La mayor parte de la teoría del conformado de metales se puede expresar en función de las tensiones principales, sin necesidad de recurrir al análisis tensorial.

El valor de la constante "K" en la expresión 1.2, no ha sido todavía especificada para la mayoría de los sistemas y solo se conoce para los ensayos mecánicos mas comunes, donde los sistemas de tensiones son simples ⁶. En forja en dados cerrados los sistemas de tensiones son complejos, de aquí que tengan que emplearse otros métodos, que pueden ser de carácter analítico, empírico o semiempírico para determinar el valor de la constante "K" y así la combinación de tensiones que producirá la fluencia.

1.1.- Métodos analíticos.

Los métodos analíticos utilizados para la predicción de cargas de trabajo, no son capaces de dar solución exacta a todos los problemas de forja en dados cerrados, ni siquiera a la mayoría en términos precisos cuantitativos. A pesar de todo, el estudio completo de las versiones simplificadas de los procesos reales y las formas idealizadas proporcionan información que puede ser importante para predecir la influencia de las variables reales sobre la carga de trabajo y la fluencia del metal, lo cual nos puede orientar hacia las condiciones apropiadas que deberán manejarse en el proceso. Esto reducirá substancialmente el número de ensayos empíricos necesarios, para de poner a punto un proceso de fabricación ⁷.

1.1.1.- Método del trabajo ideal

Para la compresión axisimétrica de un disco (Fig. 1.1) Hosford y Caddell ⁸ obtienen una estimación de la carga de trabajo, considerando el trabajo necesario para la deformación de un elemento por unidad de volumen del metal. En ausencia de fricción o de cualquier otra cosa que consuma energía, el total de este trabajo debe ser suministrado por fuerzas exteriores.

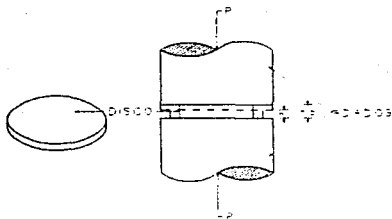


Fig. 1.1 Compresión de un disco entre dos dados planos

$$\frac{W_{ext}}{V} = \frac{W_{det}}{V} \quad (1.3)$$

$$\frac{W_{det}}{V} = W_t = \int_0^{\epsilon} \sigma^o d\epsilon = \frac{F_{ext} \Delta h}{V} = p \quad (1.4)$$

donde ϵ es la deformación natural, $\epsilon = \ln(h_0/h_1)$ *

σ^o es la tensión media de fluencia del material que se deforma**
 p es la carga de trabajo requerida para la deformación.

* La deformación natural para un disco de espesor h_0 que es comprimido hasta un espesor h_1 se define como $\epsilon = \ln(h_0/h_1)$.

** La tensión de fluencia σ^o se define como la fuerza capaz de producir una deformación plástica en un material, entre el área instantánea donde se aplica dicha fuerza. La tensión de fluencia media de un material se definirá como el promedio de las tensiones de fluencia antes y después de la deformación.

De la ecuación 1.4, observamos que la carga es igual al área de la curva de tensiones deformaciones *, apropiada para la deformación sufrida.

Esta manera de determinar la carga supone una deformación homogénea y ausente de fricción, por lo que la carga obtenida será una carga por defecto, lo que proporciona un valor mínimo el cual, no concuerda convenientemente con lo que ocurre en una operación real de forja en dados cerrados ya que:

$$W_R = W_f + W_i + W_r \quad (1.5)$$

donde W_R = trabajo real por unidad de volumen, que se tiene que desarrollar para la deformación

W_f = trabajo por unidad de volumen, que consume la fricción entre los dados y el material a deformar

W_r = trabajo redundante por unidad de volumen **.

Por tal motivo, Hosford y Caddell mismos hacen la siguiente corrección al valor del trabajo ideal que obtuvieron.

$$W_R = \frac{W_i}{\eta} \quad (1.6)$$

donde η es un factor de la eficiencia del proceso misma que deberá establecerse para las condiciones de operación de la planta a partir de mediciones de la carga que desarrollan los equipos en operación.

1.1.2.- Métodos de bloques.

Para tomar en cuenta el efecto de la fricción sobre la carga de trabajo del problema planteado en la sección anterior, Schroeder y Webster⁹ utilizaron el método de bloques, que consiste en plantear un equilibrio dinámico de las fuerzas, en las direcciones que actúan sobre un elemento diferencial, en la zona de deformación de la pieza, que en este caso es el disco completo de la figura 1.1. El equilibrio que plantearon incluye por supuesto, a las fuerzas de fricción en las caras planas como lo muestra la figura 1.2; es decir $\sum F_x = 0$; $\sum F_z = 0$; $\sum F_y = 0$; y a partir de aquí, obtuvieron las ecuaciones diferenciales, cuyas soluciones toman en cuenta las condiciones iniciales impuestas por el proceso, y el criterio de fluencia de von Mises, dando los siguientes resultados:

* La curva tensiones deformaciones es la gráfica de σ vs ϵ .

** El trabajo redundante es el consumido en procesos de cizalladura internos durante la deformación que producen una distorsión interna más allá de la estrictamente necesaria para el cambio de forma.

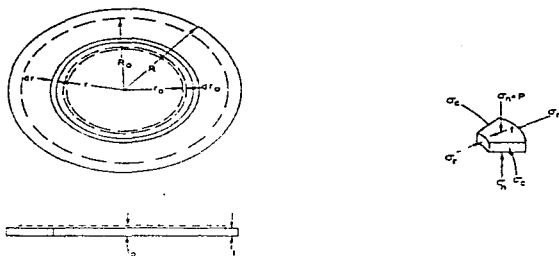


Fig.1.2 Nomenclatura correspondiente al disco por deformar y al elemento diferencial elegidos por Schroeder y Webster¹⁰.

Caso 1.- Cuando el deslizamiento del material, ocurre en toda la superficie entre los dados y el disco excepto en el punto del centro geométrico.

Condición : $\mu \ll k$ y $p/\sigma^a < k/\mu$

$$\text{Solución: } p = m\sigma^a \quad m = \frac{2}{C^2} (e^c - C - 1) \quad (1.7)$$

(El coeficiente de fricción es mas pequeño que 0.1 y la relación R/t es pequeña)

Caso 2.- Cuando el deslizamiento ocurre en la zona anular del disco, pero no en su zona central.

Condición : $\mu < k$ y $p/\sigma^a > k/\mu$ el coeficiente de fricción toma un valor entre 0.1 y 0.5

$$\text{Solución: } p = m\sigma^a \quad m = \frac{2}{C^2} [(D+1)e^{c-D} - C - 1] + \frac{D^2}{C^2} \left(\frac{k}{\mu} + \frac{2}{3} \frac{r_0}{t} \right) \quad (1.8)$$

Caso 3.- Cuando no ocurre deslizamiento entre las superficies del disco y las de los dados, la deformación proviene de esfuerzos cortantes paralelos a la superficies planas del disco

Condición $\mu \geq k$

$$\text{Solución : } p = m \sigma^* \quad m = 1 + \frac{2k}{3} \frac{R}{t} \quad (1.9)$$

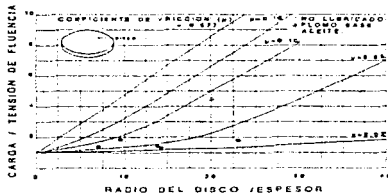
donde: p = carga de trabajo
 m = factor de fricción *
 σ^* = esfuerzo de fluencia medio del disco
 μ = coeficiente de fricción viscoplástica **
 k = constante = 0.577
 R = radio del disco
 t = espesor del disco.

$$C = 2\mu \frac{R}{t}$$

$$D = 2\mu \frac{r_c}{t}$$

$$\frac{r_c}{t} = \frac{R}{t} - \frac{1}{2\mu} \ln\left(\frac{k}{\mu}\right)$$

A partir de estas ecuaciones, se construyeron las gráficas mostradas en las figuras 1.3 y 1.4. En las que se comparan los resultados analíticos, con mediciones de carga utilizando diferentes lubricantes a temperatura ambiente y a temperatura elevada respectivamente. Dichas gráficas muestran que las ecuaciones 2.7, 2.8 y 2.9 son válidas para discos de muy poco espesor.



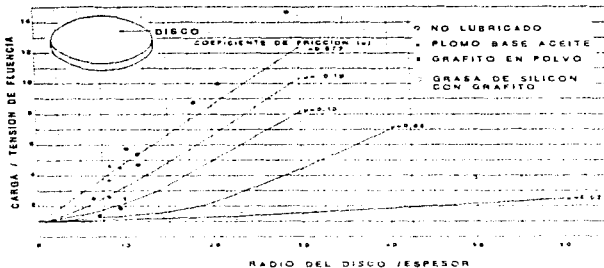


Fig. 1.4 Comparación gráfica adimensional de los resultados calculados por las ecuaciones 1.7, 1.8 y 1.9 con datos experimentales obtenidos utilizando diferentes lubricantes, a elevada temperatura.

Sabroff, Bouiger y Hennig¹², sugieren que es adecuado utilizar las ecuaciones de Schroeder y Webster, para calcular la carga de una operación de forja en molde, despreciando la forma geométrica de la pieza y calculando la carga necesaria para la deformación de un disco de espesor igual al de la rebaba de la pieza y radio igual a:

$$R = \sqrt{\frac{A_0}{\pi}} \quad (1.10)$$

donde: A_0 es el área proyectada de la pieza incluyendo el área de la rebaba que se produce.

La sugerencia de Sabroff y sus colaboradores¹³, es adecuada en cierta medida solo para pieza axisimétricas muy sencillas con rebabas cuyos espesores sean muy delgados.

Utilizando también el método de bloques sobre el elemento diferencial de la figura 1.5a, el cual es deformado bajo condiciones de deformación plana*, Subramanian y Altan¹⁴, plantearon los equilibrios de las fuerzas que actúan sobre el elemento: $\sum F_x = 0$; $\sum F_y = 0$ en el plano x-y, considerando que $\tau = \mu\sigma = m\sigma/\sqrt{3}$. Con lo cual estimaron la carga de trabajo para la forja en dados cerrados de piezas axisimétricas y longitudinales sencillas, en las que de acuerdo a la figura 1.5b, $x = w = R-r$.

Para pieza axisimétricas

$$P_{ca} = 2\pi r \left(\frac{m}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_c}{3} \frac{r}{H} + \frac{\sigma_{ca}}{2} \right) \quad (1.11)$$

$$P_{ca} = 2\pi \sigma_c \left[-\frac{2}{3} \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{1}{t} (R^3 - r^3) + \left(1 + 2 \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{R}{t} \left(\frac{R^2 - r^2}{2} \right) \right) \right] \quad (1.12)$$

donde: $\sigma_{ca} = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} m \frac{w}{t} + 1 \right) \sigma_c$

σ_c = tensión de fluencia del metal en la zona de la cavidad.

σ_r = tensión de fluencia del metal en la zona de la rebaba.

$\sigma_y = \sigma^0$ = tensión de fluencia promedio del material.

$\mu = m/\sqrt{3}$

Para pieza longitudinales

$$P_{lp} = \frac{2}{\sqrt{3}} w \sigma_c \left(2 + \frac{mw}{t} \right) \quad (1.13)$$

$$P_{lp} = \left(\sigma_{cp} + \frac{L}{2H} \frac{m}{\sqrt{3}} \sigma_c \right) L \quad (1.14)$$

donde: $L=2r$

* La deformación plana es aquella en la cual, se supone que no existe deformación en una dirección y todo alargamiento o contracción tiene lugar en planos perpendiculares a dicha dirección.

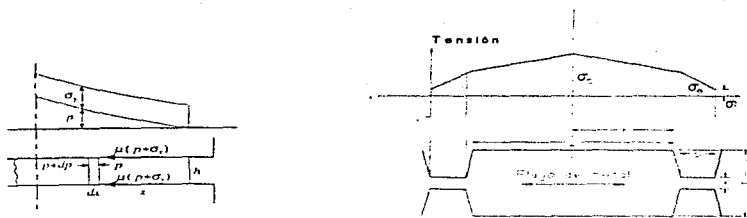


Fig. 1.5 (a) Distribución de tensiones en el elemento diferencial considerado para aplicar el método de bloques, (b) geometría de la pieza a considerar ¹⁵.

Las expresiones 1.11, 1.12, 1.13 y 1.14 predicen una distribución de los esfuerzos, mostrada en la figura 2.5b, a lo largo del eje horizontal x . Con lo cual establecen que, para obtener la carga de trabajo total P_t , es necesario tomar en cuenta la carga sobre la rebaba como lo hicieron Sabroff y sus colaboradores ¹⁶, y además sobre la pieza; es decir $P_D = P_D + P_{cb}$ y $P_A = P_A - P_{ca}$ lo que proporciona una mejor estimación de la carga total para piezas axisimétricas y piezas longitudinales respectivamente. En este método es necesario que tanto la pieza como la rebaba sea muy delgada para que sus resultados concuerden convenientemente con el proceso real.

1.1.2.1.- Método de bloques modular

Altan ¹⁷ utilizó el método de bloques, para piezas axisimétricas del tipo de la figura 1.6, pero en las zonas de deformación identificó a tres elementos diferenciales en lugar de uno, como también lo muestra la figura 1.6. Sobre estos elementos, planteo los equilibrios adecuados para diferentes etapas de la deformación con los cuales obtuvo las respectivas ecuaciones diferenciales cuyas soluciones proporcionan las cargas parciales necesarias en cada zona de deformación, la suma de dichas cargas parciales corresponde a la carga total. Este método es muy laborioso pero bajo condiciones adecuadas puede proporcionar resultados más precisos que los anteriores, para piezas axisimétricas mas complejas.

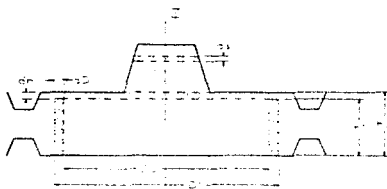


Fig. 1.6 Tipo de piezas para las cuales Altan utilizó el método de bloques modular y los elementos diferenciales que consideró ¹⁸.

Biswas y Rooks ¹⁹, utilizaron el método modular, planteado por Altan ²⁰, para simular con ayuda de una computadora el proceso de deformación de forja de piezas un poco más complicadas que las que Altan consideró pero del mismo tipo. Con lo cual no solo obtuvieron las cargas de trabajo y las energías de deformación sino también los campos de deformaciones.

Los métodos de bloques, en general, tienen la limitante de que solo consideran deformaciones homogéneas, despreciando el trabajo redundante que es el consumido en procesos de cizalladura internos durante la deformación, que producen una distorsión interna más allá de la estrictamente necesaria para el cambio de forma. Por esta razón, los métodos de bloques solo son adecuados para piezas forjadas muy sencillas, de secciones delgadas y producidas mediante deformaciones muy moderadas.

1.1.3.- Método de líneas de deslizamiento

Cuando se forjan piezas con secciones y rebabas de mayor espesor ($b/h < 4$), es necesario que los modelos tomen en cuenta la configuración de la fluencia del metal por su geometría, ya que las tensiones en la dirección b varían con respecto a la altura h . Esto ha hecho surgir las soluciones del campo de líneas de deslizamiento las cuales son válidas únicamente para condiciones de deformación plana ²¹.

El campo de líneas de deslizamiento es un diagrama vectorial en dos dimensiones que representa las direcciones de los esfuerzos cortantes máximos, identificados con las direcciones de deslizamiento para cualquier punto. Siempre existen dos direcciones ya que un esfuerzo cortante, va siempre acompañado de un esfuerzo cortante complementario a 90° . Entonces el campo de líneas de deslizamiento es una red de líneas que interactúan unas con otras en un ángulo recto, y se construye mediante un proceso de tanteo, basado en una experiencia anterior, cumpliendo siempre con las condiciones de equilibrio en los contornos del campo. Se deben satisfacer también las condiciones de continuidad y de velocidad, dentro del metal que se deforma²². La figura 2.7 muestra un campo de líneas de deslizamiento construido por Rowe²³, para $b = 3.6h$ y utilizando una red de 15° . La tensión vertical se calcula por la resolución de las fuerzas que actúan a lo largo de AC1D obteniendo los siguientes resultados.

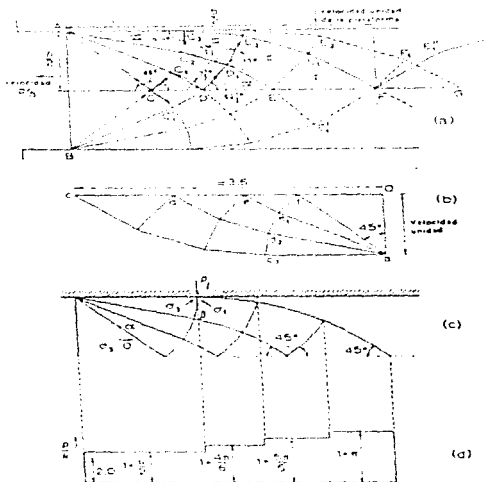


Fig. 1.7 Solución aproximada obtenida mediante un campo de líneas de deslizamiento, utilizando una red de 15° para compresión entre plataformas planas con fricción de adherencia para $b=3.6h$ ²⁶.

b/h	1.0	1.6	3.6	6.6
p/2k	1.0	1.1	1.65	2.41

Hill ²⁴, ha demostrado que la presión media se puede obtener mediante la ecuación:

$$\frac{p}{2k} = \frac{3}{4} + \frac{b}{4h} \quad (1.15)$$

donde: $b > h$

La ecuación 1.15 proporciona valores de las presiones algo mas bajos que los dados por las ecuaciones 1.7, 1.8 y 1.9 pero a medida que la relación b/h decrece y la fricción se hace mayor se obtienen resultados más precisos que con dichas ecuaciones. El inconveniente de la solución de líneas de deslizamiento estriba por un lado en lo laborioso que es y que depende de la experiencia de quien lo aplique, y por el otro que solo es válido para condiciones de deformación plana. Todo esto ha hecho que se aplique muy poco a la forja en dados cerrados.

1.1.4.- Método del límite superior.

Johnson y sus colaboradores ²⁵, han aplicado métodos mas sencillos que la técnica de líneas de deslizamiento, los cuales pueden aplicarse a diversos problemas, para obtener estimaciones de la carga de trabajo. Dichos métodos, determinan los valores de la carga que están por encima y por debajo del valor real. La carga estará entre un límite superior y uno inferior pero, para fines de proyecto y de operación, es mas importante conocer el valor por exceso, ya que este asegurara que la operación practica se pueda realizar sin fallos mediante la carga calculada.

El método del limite superior ha sido utilizado por Steck, Schmid y Adler ²⁶ para obtener ecuaciones que permitan calcular la carga de operaciones de forja para piezas del tipo que muestra la figura 1.8.

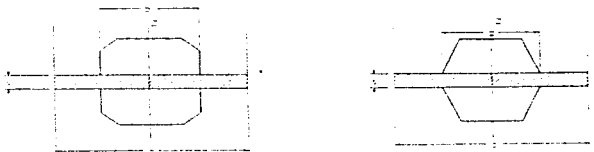


Fig. 1.8 Nomenclatura y zonas de deformación consideradas por las expresiones 1.16 y 1.17

Bajo condiciones de deformación plana.

$$F_{\max} = \sigma^2 L \left[\frac{2}{\sqrt{3}} a + \frac{b^2 c}{2\sqrt{3}s} + \frac{\mu}{2s} (a^2 - b^2 c) \right] \quad (1.16)$$

Para piezas sencillas axisimétricas

$$F_{\max} = \sigma^2 L \left[\frac{a}{4} + \frac{d^2}{12\sqrt{3}s} + \frac{2}{3} \mu (a^3 - a^2) / 8s \right] \quad (1.17)$$

Las expresiones 1.16 y 1.17 consideran el campo de deformaciones, con un espesor igual al espesor de la rebaba y con una anchura igual a la de la pieza. Incluyendo la rebaba. Esta simplificación, aunada al hecho de que dichas expresiones fueron obtenidas por medio del método del límite superior, hace que haya una diferencia entre las cargas teóricas así calculadas y las cargas reales requeridas. Dicha diferencia será más importante conforme se incremente la complejidad geométrica de la pieza.

1.1.4.1.- Método elemental del límite superior

Bramley y McDermott²⁹ aplicaron a forjas axisimétricas en dados cerrados el método elemental del límite superior, en el cual se divide toda la geometría de la pieza en n elementos individuales, en tal forma como aparece en la figura 1.9 de los cuales se determinan su velocidad de disipación de energía interna mediante la expresión obtenida por Hill²³.

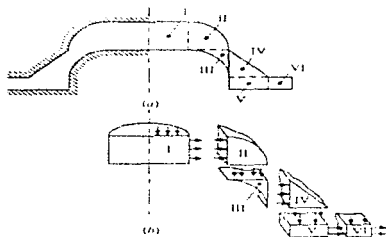


Fig. 1.9 Seccionamiento en regiones de una pieza axisimétrica²⁹.

$$\dot{E} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma^0 \int \left(v_R^2 + v_\theta^2 + v_z^2 + \frac{1}{2} \gamma_{Rz}^2 \right) dV + \sigma^0 \int m S ds \quad (1.18)$$

donde: E = La velocidad de disipación de energía interna
 σ^0 = La tensión de fluencia promedio del metal
 v_R = La velocidad de deformación en la dirección radial R
 v_θ = La velocidad de deformación en la dirección circunferencial θ
 v_z = La velocidad de deformación en la dirección axial z
 γ_{Rz} = La rapidez de deformación cortante en el plano R-z
 m = El factor de fricción en las fronteras del elemento
 S = La rapidez de deslizamiento relativo en las fronteras del elemento
 s = La superficie de velocidad discontinua
 V = Volumen de la pieza considerada

$$v_R = \frac{\partial u}{\partial R} \qquad v_z = \frac{\partial w}{\partial R} \qquad v_\theta = \omega (v_R + v_z)$$

$$\gamma_{Rz} = \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial R} \right)$$

donde: $u = du/dt$, $w = dw/dt$ son las velocidades de desplazamiento del material en las direcciones radial y axial respectivamente.

Para determinar la energía total de disipación de una pieza con n elementos individuales se utiliza la expresión

$$E_1 = \sigma^0 \sum_{i=1}^n e_i A_i V_i \quad (1.19)$$

donde: $e_i = \frac{E}{\sigma^0 A_i V_i}$ = El coeficiente de disipación interna de energía para la región i.

A_t = El área total de presión
 A_i = El área de presión de la región i
 V_i = La velocidad de presión de la región i
 n = Número total de regiones unitarias

Finalmente la carga se obtiene por medio de la expresión.

$$\frac{P}{\sigma^0} = \frac{E_1}{(\pi D_1^2 / 4) V_1} \quad (1.20)$$

El método elemental del límite superior, al igual que el método del límite superior, calcula cargas mayores de las que realmente operan, pero a diferencia de este último, el primero se puede aplicar a piezas axisimétricas más complejas que las consideradas por el primero.

1.2.- Métodos empíricos

Los métodos empíricos de cálculo de carga para forja de dados cerrados, son un ajuste estadístico de los datos obtenidos mediante mediciones de la carga, hechas en laboratorio o con equipos en operación bajo ciertas condiciones particulares. Muchos de estos ajustes son por lo regular de la forma.

$$p = a + bA + cB + dAB + eA^2 + \dots \quad (1.21)$$

donde: a, b, c, d, ... son constantes obtenidas por medio del ajuste estadístico de los datos, para determinadas condiciones.

A, B son parámetros del proceso, como pueden ser, área proyectada de la pieza, forma geométrica, temperatura, etc.

Balogun³⁰, asistido por Thomas y Bannister³¹, han obtenido las siguientes ecuaciones empíricas:

$$\text{Para forjas axisimétricas } p = 362 + 32.78A - 565.66S - 0.53T \quad (1.22)$$

$$\text{Para forjas longitudinales } p = 786 + 35.73A - 57.85S - 0.30T \quad (1.23)$$

donde A = Área proyectada de la pieza excluyendo la rebaba

S = Factor que se define como la altura h de la pieza dividida entre la altura de un cilindro que envuelva a la pieza.

T = La temperatura de forja en °C

La Drop Forging Research Association (DFRA)³², establece que la mayoría de los datos de carga para forja en dados cerrados, pueden correlacionarse convenientemente, con sus parámetros geométricos mediante una expresión de la forma.

$$p = a(h_m)^2 \left(\frac{W}{h_r} \right)^2 (A_r) \quad (1.24)$$

donde h_m = es el espesor más delgado de la pieza excluido la rebaba.

W = anchura del falso

h_r = espesor de la rebaba

A_r = Área proyectada de la pieza incluyendo a la rebaba en pulgadas cuadradas

a, p, q y r son constantes que dependen de las condiciones del proceso.

Tomando en cuenta que $p = f(\sigma_r, A_t)$, la DFRA³³, ha establecido que mediante el ajuste de datos experimentales la ecuación 1.24 puede expresarse:

$$\text{para forjas simples} \quad p = \sigma_r A_t = 21.06 \left(\frac{W}{h_1 h_m} \right)^{0.0225} \quad (1.25)$$

$$\text{para forjas complejas} \quad p = \sigma_r A_t = 33.45 \left(\frac{W}{h_1 h_m} \right)^{0.009} \quad (1.26)$$

$$\text{para forjas axisimétricas} \quad p = \sigma_r A_t = 8.391 h_m^{0.1154} \left(\frac{W}{h_1} \right)^{0.5082} A_t^{1.178} \quad (1.28)$$

Las limitantes de los métodos empíricos son:

1.- Requieren de mediciones hechas bajo condiciones muy particulares que muchas ocasiones son difíciles, costosas o imposibles de efectuar.

2.- Requieren de engorrosos métodos estadísticos o de la aplicación de computadoras para la regresión de los datos .

3.- No son generales.

1.3.- Métodos semiempíricos.

Los métodos semiempíricos de calculo de carga en forja en dados cerrados basan sus resultados tanto en datos experimentales como en la teoría del conformado mecánico. Se pueden entender como correcciones a los métodos teóricos para que se ajusten convenientemente a los valores reales.

La carga para forja ya sea en matriz cerrada o en matriz abierta, se puede calcular según Schey³⁴, de la siguiente manera:

$$p = \sigma^c A c \quad (1.29)$$

Donde: σ^c = Esfuerzo de cedencia promedio durante la deformación

A = Área proyectada por la pieza perpendicular al desplazamiento de la estampa

c = Es un valor que dependerá de las características del proceso tomando valores que van de 3 a 8 en forjas en estampa de piezas simples y de 8 a 12 en forjas en estampa de piezas complejas.

1.3.1.- Método de la viscoplasticidad

Del Río ³⁵, basado en los trabajos de Charmouard ³⁶, establece que, la carga de trabajo requerida para la forja de una pieza puede ser obtenida de las curvas de umbrales de plasticidad, mostradas en la figura 1.10 que son obtenidas midiendo la carga de estricta fluencia, en probetas cilíndricas de diferentes $K=h/D$ para un determinado material y una determinada temperatura.

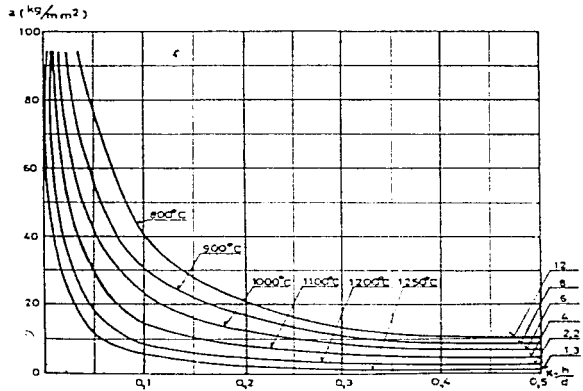


Fig. 1.10 Curvas de umbrales de plasticidad de aceros de bajo carbono ³⁷.

Para la aplicación del método de la viscoplasticidad ²³, se comienza por definir a los planos meridianos o los planos de sección recta según la geometría de la pieza, Fig. 1.11, que son planos que interceptan una sección transversal. Se elige aquella que implique una mayor dificultad de llenado, de entre todas las posibles. Esta sección se divide, a su vez, en dos partes por el eje vertical que separa el deslizamiento del material a ambos lados del mismo. De estas dos partes, la que resulte de mayor dificultad de llenado es la única que debe tomarse en consideración. De esta semisección, se considerará solo el cuarto de sección que resulte de mayor dificultad de llenado, por arriba o por abajo de la línea de llenar será la que decida la presión motriz. En la figura 1.12 se muestran secciones verticales típicas y sus elementos constitutivos más característicos (radios, alturas, longitudes, diámetros etc.). Una vez completado este proceso de selección, Del Río ²¹ obtiene P1 de las curvas de umbrales de plasticidad con la abscisa:

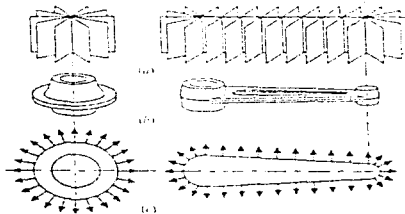


Fig. 1.11 Planos de sección recta de piezas axisimétricas y longitudinales.

$$K_0 = \frac{r_1}{L} \text{ ó } \frac{2r_1}{D} \quad (1.30)$$

P2 la obtiene de la formula:

$$P_2 = (m - \alpha) \left[1 - \ln \left(\frac{A_0}{A_1} \right) \right] e^{K_1 K_2} + a_m + r_m + \alpha + \Delta p \quad (1.31)$$

Donde: m = Umbral de plasticidad de $K = r/2l$

a = Umbral de plasticidad de $K = h/l$

A_0, A_1 son las áreas de entrada y del fondo de la cavidad ciega considerada respectivamente.

μ = coeficiente de fricción viscoplastico correspondiente.

$K_1 = h/l_{med}$

$\alpha + a_m + r_m = 21 \text{ Kg/mm}^2$ para aceros a 1000°C

$\alpha + a_m + r_m = 16.5 \text{ Kg/mm}^2$ para cobre a 875°C

$\alpha + a_m + r_m = 9.7 \text{ Kg/mm}^2$ para aluminio a 525°C

$\alpha + a_m + r_m = 10 \text{ Kg/mm}^2$ para latón a 675°C

Δp es un factor que toma en cuenta la posición de la cavidad respecto al eje de separación de los deslizamientos. En la tabla 2.1 se dan valores de Δp para ciertos materiales.

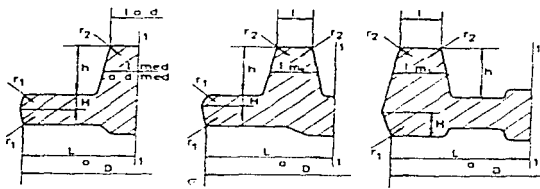


Fig. 1.12 Secciones mas características y sus elementos constitutivos ³⁹.

Una vez calculados los valores P_1 y P_2 , aquel que resulte mas elevado será el valor de la carga de trabajo para fabricar sin fallos la pieza en cuestión.

El método de la viscoplasticidad es adecuado, únicamente cuando se trabaja a alta temperatura y dado que se basa en las tensiones de estricta fluencia (umbrales de plasticidad), no considera deformaciones importantes; es decir que para que pueda aplicarse, el material debe cambiar poco de forma durante la operación, por lo que es mas aplicable a procesos que cuentan con varias etapas de deformación.

Como podemos ver todos los métodos de obtención de carga, anteriormente descritos muestran ventajas y desventajas muy particulares de manera que no existe un método general que pueda aplicarse indistintamente a cualquier caso de forja en dados cerrados. Esto ha acentuado la búsqueda de métodos cada vez mas amplios. Tal es el caso del método de los elementos finitos MFE⁴⁰, cuyo uso se generaliza cada vez más, a medida que se cuentan con computadoras de mayor capacidad. Este método también depende en gran medida de la experiencia de quien lo aplique quien además deberá contar con una preparación especializada.

Nosotros creemos que dados los recursos tecnológicos y humanos con que cuentan las plantas industriales de forja en México, sería de mucha utilidad, el desarrollo de un método semiempírico general que tenga un alto grado de precisión y de fácil aplicación aun para aquellas personas que solo cuenten con los conocimientos básicos al respecto. El presente trabajo tiene por objetivo desarrollar las bases de dicho método.

CAPITULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para que un determinado metal pueda ser forjado en troqueles cerrados, es necesario que dicho metal fluya en estado viscoplástico, a través de las cavidades de las que consten los semimoldes y las invada completamente. Dicho flujo será producto una tensión cuya magnitud depende de: la tensión de fluencia del metal, la geometría del flujo, la fricción generada en la interfase metal-herramienta y la transferencia de calor entre el metal que fluye y los troqueles ⁴¹.

2.1.- Tensión de fluencia

Para que un metal pueda fluir, en estado viscoplástico, es necesario que sea sometido a una tensión mayor que la de su tensión de fluencia. La magnitud de esta tensión depende del grado de deformación que se le confiera, de la velocidad con la cual es deformado y de la temperatura a la que se encuentre en el momento de la operación.

La tensión de fluencia de un metal se determina a través de las curvas de tensión real (σ) vs deformación real (ϵ), las cuales son construidas con datos proporcionados por ensayos mecánicos, en las cuales la tensión real (σ) se define como la fuerza que provoca la deformación del metal dividida entre el área donde se aplica a cada instante dicha fuerza (F/A_i) y la deformación natural (ϵ) en función del incremento de la deformación. Para el caso de un ensayo de tracción tendremos que $d\epsilon = \frac{dl}{l}$; entonces

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (2.1)$$

Para un ensayo de compresión las relaciones correspondientes se expresan en función de una altura inicial h_0 :

$$\epsilon = \int_{h_0}^h \frac{dh}{h} = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad (2.2)$$

En el conformado de metales la deformación viene dada con frecuencia por la fracción o porcentaje de la reducción de área de la sección transversal

$$r = \frac{A_0 - A}{A_0}, R = \left(\frac{A_0 - A}{A_0}\right) 100 \quad (2.3)$$

como el volumen permanece constante a través de la operación de conformado de metales estos valores se pueden relacionar con la deformación natural de la siguiente manera:

$$A_l = A_o L_o \quad (2.4)$$

$$r = 1 - \frac{A}{A_o} \cdot \frac{L}{L_o} = 1 - r \quad (2.5)$$

$$\epsilon = \ln\left(\frac{l}{l_o}\right) = \ln\left(\frac{A_o}{A}\right) = \ln\left(\frac{1}{1-r}\right) \quad (2.6)$$

Las curvas tensión real (σ) vs deformación natural (ϵ) de la mayoría de los metales exhiben dos tendencias; una lineal correspondiente a la deformación elástica o temporal del material y otra de forma curva correspondiente a la deformación plástica o permanente las cuales pueden ser observadas en la figura 2.1. En la parte correspondiente a la deformación plástica denominaremos acritud⁴², al valor :

$$\text{Acritud} = \left(\frac{d\sigma}{d\epsilon}\right) \quad (2.7)$$

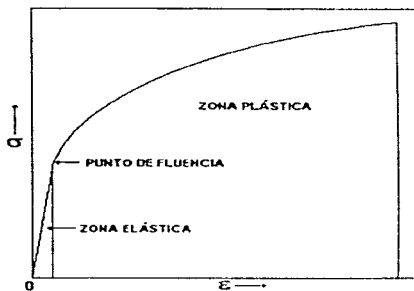


Fig. 2.1 Curva esquemática tensión real (σ) vs deformación natural (ϵ) de los metales formables.

Para la mayoría de los metales la acritud es positiva a temperatura ambiente, lo cual indica que sufren un incremento en su resistencia a medida en que se deforman plásticamente. En otras palabras, sufren un endurecimiento por deformación; que puede ser explicado por la interacción y acumulación de dislocaciones en la red cristalina, producto del deslizamiento de los planos en dicha red⁴³. Dicho deslizamiento es el mecanismo más importante mediante el cual los metales se deforman plásticamente⁴⁴. Pero para efectos de forjado solamente es necesario considerar la variación de las propiedades mecánicas según el grado de deformación (ϵ)⁴⁵.

2.2.- Efecto de la temperatura sobre la fluencia

Cuando se incrementa la temperatura de un metal, previamente deformado, este se comienza a recrystalizar. Este fenómeno de recrystalización se le define como: la nucleación de granos nuevos sin deformación y el consumo gradual de la matriz trabajada mecánicamente debido al crecimiento de estos granos⁴⁶. La densidad de dislocaciones en los nuevos granos formados durante recrystalización es baja lo que da como resultado un ablandamiento del metal⁴⁷.

Si la temperatura de un metal que se está deformando plásticamente es lo suficientemente elevada, el ablandamiento producido por la recrystalización empieza a competir con el endurecimiento por deformación ya que en este caso ambos fenómenos se producen simultáneamente, lo que recibe el nombre de recrystalización dinámica. Esto da como resultado que la tensión de fluencia del metal en cuestión no se incrementa durante la deformación o se incrementa muy poco y en algunos casos incluso descienda, dependiendo de la temperatura alcanzada.

El tiempo requerido para recrystalizar 95% del volumen de un metal se determina con bastante exactitud por medio de la ecuación⁴⁸.

$$t_{0.95} = \left(\frac{2.85}{NG^3} \right)^{0.25} \quad (2.8)$$

donde N y G son la velocidad de nucleación y de crecimiento de granos nuevos respectivamente. N y G dependen de la temperatura en la forma de una ecuación de Arrhenius.

$$N = N_0 e^{(-Q/RT)} \quad (2.9)$$

y

$$G = G_0 e^{(-Q/RT)} \quad (2.10)$$

En donde Q es la energía de activación, R es constante, T es la temperatura y N_0, G_0 son las rapidezces iniciales de nucleación y crecimiento respectivamente en características del metal y que se incrementaran conforme se incrementa el grado de deformación inicial (ϵ). Sustituyendo las ecuaciones 2.9 y 2.10 en la ecuación 2.8 obtenemos la expresión

$$t_{0.95} = \left(\frac{2.85}{N_0 G_0 e^{4(-Q/RT)}} \right)^{0.25} \quad (2.11)$$

La cual muestra que el tiempo requerido para recrystalizar 95% del volumen del metal varie con la temperatura según se muestra en la figura 2.2.

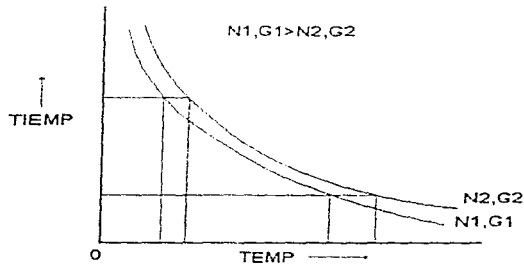


Fig. 2.2 Verificación del tiempo de recrystalización según la temperatura ⁴⁹

Para la mayoría de los metales que han sido muy trabajados mecánicamente, la temperatura a la cual recrystalizan dinámicamente es mucho mas elevada que la temperatura ambiente sin embargo algunos metales como el plomo lo hace a temperatura ambiente y el aluminio y el cobre a temperaturas ligeramente elevadas ⁵³. Debido a esto se ha adoptado el criterio de la temperatura homologa la cual se define como:

$$T_{\text{homologa}} = \left(\frac{T_{\text{Fena}}}{T_{\text{Fusión}}} \right) \quad (2.12)$$

donde las temperaturas (T) de forja y de fusión se toman en °K.

La mayoría de los metales recrystalizan a una temperatura aproximadamente de la mitad de su temperatura de fusión, debido a esto se dice que un proceso de deformación es en caliente, cuando la temperatura a la que se deforma es mayor que su temperatura de recrystalización o que su temperatura homóloga sea mayor o igual que 0.6. Esto ha originado una gran división del conformado mecánico de los metales, en procesos de conformado en frío y en procesos de conformado en caliente. Y como ya vimos los parámetros que gobiernan la tensión de fluencia en estos dos tipos de proceso difieren y los ensayos mecánicos necesarios para obtener la tensión de fluencia se deben realizar de acuerdo a ellos.

Cuando se trabaja en caliente la recrystalización dinámica permite que el grado de deformación no afecte a la tensión de fluencia ya que, el incremento de la tensión de fluencia llega a ser insignificante o independiente de la deformación en la zona plástica y dependiente del tiempo. Pudiendo conseguir así, deformaciones ilimitadas. La figura 2.3 muestra, esquemáticamente la tendencia de las curvas tensión real (σ) vs deformación natural (ϵ) para la mayoría de los metales, cuando son deformados a diferentes velocidades (ϕ) a una temperatura homóloga mayor a 0.7.

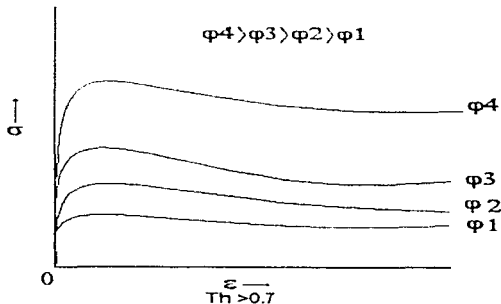


Fig. 2.3 Curvas esquemáticas de tensión real vs deformación natural de la mayoría de los metales formables para diferentes velocidades de deformación a una temperatura homóloga mayor de 0.7 ⁵¹.

2.3.- Influencia de la velocidad de deformación

Si se incrementa la rapidez con la cual un metal es deformado ($\dot{\varphi}$) en caliente, entonces será mayor la rapidez de formación de dislocaciones que la formación de granos nuevos por recristalización, lo que dará como resultado la acumulación neta de dichas dislocaciones, incrementando la tensión de fluencia del metal como muestra la figura 2.3.

En la forja en dados cerrados las velocidades de deformación deberán ser tales que permitan completar la operación antes de que el metal se enfrie por debajo de la temperatura que le confiere al metal las propiedades de plasticidad más adecuadas, lo cual requiere de altas velocidades de deformación. De aquí que para la forja en caliente la tensión de fluencia muestre variaciones substanciales dentro de los rangos de velocidades de deformación ($\dot{\varphi}$) que se manejan industrialmente ¹². En este caso los ensayos mecánicos para obtener la tensión de fluencia se deben realizar de modo, que se igualen estos parámetros con los que operan en los procesos reales, lo cual frecuentemente resulta muy difícil de conseguir porque en el proceso las diferentes partes de la pieza pueden estar sometidas a diferentes velocidades de deformación y aun un elemento de la pieza puede ser deformado a diferentes velocidades durante el transcurso de la operación. La temperatura de la pieza variará por pérdidas de calor por radiación y por conducción al entrar en contacto con las herramientas que se encuentran más frías que esta, por lo cual se deben elegir valores medios adecuados.

En conclusión, podemos decir que el valor de la tensión de fluencia (σ^0) de un determinado metal formable depende: Del grado de deformación que se le confiera ($\dot{\varphi}$), de la temperatura (T) a la que se encuentre y de la velocidad de deformación ($\dot{\varphi}$). Podemos expresar esto en términos matemáticos de la siguiente forma:

$$\sigma^0 = f_1(T, \dot{\varphi}) \quad (2.13)$$

y por lo tanto la acritud dependerá también de estos mismos parámetros

$$\frac{d\sigma}{d\dot{\varphi}} = f_2(\dot{\varphi}, T, \sigma) \quad (2.14)$$

Pero como ya hemos indicado si un metal es trabajado en caliente el endurecimiento por deformación que experimentará no es significativo y en este caso consideraremos que su tensión de fluencia solo dependerá de su temperatura y de la velocidad con que es deformado. En términos matemáticos lo anterior se expresa como:

$$\sigma_{caliente}^0 = g(T, \dot{\varphi}) \quad (2.15)$$

2.4.- Influencia de la geometría

La geometría de las piezas fabricadas mediante forja en dados cerrados es muy diversa y en base a esta se han clasificado de la siguiente manera:

Tipo 1 Formas Compactas	SUB Grupo	101	102	103	104
		Sin Elementos Adicionales	Con Elementos Adicionales Laterales	Con Elementos Adicionales Rotacionales	Con Elementos Adicionales Laterales y Rotacionales
 Esféricas Y Cúbicas					

Tipo 2 Forma Cilíndrica	SUB grupo	Sin elementos	Con alto relieves	Con alto relieves y horadaciones	Con bajo relieves o anillos	Con alto y bajo relieves
		forma del grupo				
 Partes con caras oculares Paralelas y con iguales contor- nos	21	211	212	213	214	215
En forma de disco con elementos sobre uno de los cantos						
Piezas cilíndricas de poca altura con un diámetro amplio	22	222	223	224	225	
En forma de disco con elementos laterales en ambos cantos						

Fig. 2.4 Clasificación de las piezas forjadas según su geometría ⁵³.

















Tipo 3	Sub	Sin elementos	Con elementos	Con elementos	Con elementos	Con dos o
Piezas de forma	Grupo		elementos	elementos	elementos	mas elementos
Rectangular			paralelos al	forjados en	asimetricos al	mas elementos
			eje	pedos	e.e principal	similares de
			principal mas	cerrados		tamaño similar
			largo			
	Forma del grupo					
Partes mas largas que anchas Longitud de los grupos 1- Cortos $l > 2w$ 2- Medios $l < 3w & l > w$ 3- Largos $l > 3w & l > w$ 4- Muy largos $l > 15w$	31	311	312	313	314	315
	Con elementos rectos con respecto al eje principal					
	32	321	322	323	324	325
	Con elementos curvos sobre un plano y con respecto al eje principal					
33	331	332	333	334	335	
Con elementos curvos sobre varios planos sobre el eje principal						

Fig. 2.4 Clasificación de las piezas forjadas según su geometría (continuación)

La geometría de la pieza que se forja influye en la tensión necesaria para conseguir el flujo viscoplastico del metal, debido a que dicha geometría determina los campos de velocidades y tensiones que se generan en el interior del mismo. Más específicamente, lo que determina la magnitud de la carga requerida es la geometría de la parte del semimolde de forja que oponga una mayor dificultad al flujo viscoplastico.⁵⁴

2.5.- Fricción

En las operaciones de forja el flujo viscoplástico también estará influenciado por la fricción entre el metal y los troqueles dicha fricción se describe de la siguiente manera: cuando un sólido es obligado a deslizarse sobre una superficie como indica la figura 2.5, por una fuerza tangencial F y sobre dicho sólido a su vez actúa otra fuerza N ortogonalmente a la superficie sobre la cual se desliza, tenemos que $F = \mu N$, donde μ es el coeficiente de fricción y no depende del área de superficie ni de los valores de N solo de las condiciones superficiales y de la naturaleza de los sólidos en contacto pero aumenta con la temperatura ¹⁵.

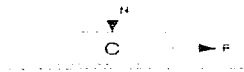


Fig. 2.5 fricción

2.5.1.- Fricción viscoplástica

Si el esfuerzo normal aplicado al sólido anterior es superior a la tensión de fluencia se producirá una deformación plástica del mismo lo que ocasiona que se produzca una adherencia entre las superficies de contacto y entonces la expresión $F = \mu N$ no es válida y es necesario corregir el valor de μ de fricción viscoplástica, ya que en este caso no aumenta con la temperatura sino que disminuye y también dependerá del área de contacto, de acuerdo con lo mencionado por Del Rio.

En este caso la tensión tangencial se limita a un valor igual al límite de fluencia por corte (k) del material que se desliza y puesto que el valor mínimo de la tensión normal que puede causar deformación plástica es la tensión de fluencia uniaxial σ^* , el valor máximo del coeficiente de rozamiento para condiciones de rozamiento de adherencia total viene dado por la relación k/σ^* ¹⁵. Estas cantidades están relacionadas por el criterio de fluencia de von Mises $2k=1.155\sigma^*$ de lo que se obtiene que

$$\mu_{\text{máx}} = \frac{k}{\sigma^*} = 0.577 \quad (2.16)$$

Los coeficientes viscoplásticos para un proceso de conformado mecánico están influenciados por diversos factores como pueden ser; las condiciones químicas, la geometría de la superficie, el espesor de la película lubricante, la temperatura las condiciones superficiales de los moldes (rugosidad), la velocidad, el grado de deformación, el medio ambiente etc. De aquí que la medición del coeficiente viscoplástico de fricción debe simular lo más posible las condiciones reales de operación lo cual indica que los únicos datos útiles serían los obtenidos a partir de las mediciones hechas durante la operación real. Pero dado que el rozamiento contribuye de un 10 a un 20% a la fuerza necesaria para la operación, los valores aproximados del coeficientes de rozamiento medidos en ensayos simulados normalmente son suficientes.

2.5.2.- Efectos de la fricción en la forja

La fricción viscoplástica en las operaciones de forja, puede tener como consecuencias:

- 1.- Incrementar la carga de forja o carga de trabajo
- 2.- Producir deformaciones heterogéneas dando como resultado defectos internos y externos
- 3.- Generar transferencia de metal de la pieza al dado o viceversa.

2.5.3.- Lubricación

Con el fin de disminuir los efectos de la fricción se deposita entre la pieza y el molde un lubricante, que es un material que tiene un límite de fluencia por corte muy bajo y que además es capaz de mantener separadas a las superficies del molde y el metal que se desliza. La tabla 2.5 muestra algunos de los lubricantes mas utilizados en la forja.

Tabla 2.1 Lubricantes usados comúnmente en forja y valores típicos de fricción ⁵⁷

Material	Lubricante para forja en caliente	μ	m	Lubricantes para forja en frío/ extrusion	μ
Aceros	Ninguno	FA	1.0	Solución jabonosa	0.2
	Solución salina(en el troquel)	0.4	0.7	EM (A.M. + grasa)	0.2
	Jabones (en el troquel)	0.3	0.5	EM (A.M. + grasa + Ad)	0.2
	GR en agua (en el troquel)	0.2	0.4	A.M (20-800 + grasa + Ad)	0.15
	Con vehículo aglutinante (en el troquel)	0.2	0.4	Compuesto A.M + GR o MoS2	0.15
				Con aceite de sulfuro unido	0.1
				Aglutinante + compuesto base aceite	0.1
				Cobre + compuesto base aceite	0.1
				Fosfato + jabón	0.05
				Fosfato + jabón + MoS2	0.05
Aceros inoxidables y aleaciones de níquel	GR en agua (en troquel)	0.2	0.4	A.M (20-800) + Ad	0.2
	Vidrio (10-100 Pa-s) + GR (en troquel)	0.05	..	Aglutinante + aceite compuesto	0.15
				Cobre + aceite compuesto	0.1
Al y Mg	Jabón (en dado)	FA	1.0	Polímeros	0.05
				Oxalato + jabón	0.05
aleaciones	GR en agua	0.3	0.5	A.M. (10-100) + vehículo untante	0.15
	GR con aglutinante	0.2	0.4	Lanolina, jabón de sapa limite	0.07
Cu y aleaciones	Jabón	0.3	0.5	Fosfato + jabón	0.05
	GR en agua	0.15	0.3	Solución jabonosa	0.1
Ti aleaciones				EM (A.M. + grasa)	0.1
				EM (grasa)	0.1
				AM (20-400) + grasa (+ Ad)	0.1
				Grasa; lanolina)	0.07
				Jabón (estearato de Zn)	0.05
				GR o MoS2 en grasa	0.07
				A.M. (20-800) + Cl Ad	0.2
				Polímeros	0.05
				Oxidos más lubricantes	0.15
				Pintura Cu o Zn + lubricante	0.1
			Fluoruro-fosfato + jabón	0.05	
Metales refractarios	+ lubricante	0.2			
	GR en agua (en troquel)	0.2			
	Vidrio + GR (en troquel)	0.05			

FA = Fricción adherente. GR = Grafito. Vidrio líquido para forjas a altas temperaturas. EM = Emulsión, AM = Aceite mineral. Viscosidad en cST a 40 C son indicados en el paréntesis. Ad = Aditivo (S, Cl, P, grasas y sulfuros clorinados).

2.6.- Transferencia de calor

La transferencia de calor entre las piezas y los troqueles en las operaciones de forja depende del tiempo de contacto, del gradiente de temperatura y de la geometría. Pero dadas las altas velocidades de deformación requeridas para las operaciones de forja en dados cerrados, el tiempo de contacto es muy pequeño por lo que para efectos prácticos no suele tomarse en cuenta la transferencia de calor salvo para los casos de piezas con secciones muy delgadas o de aristas muy agudas. Sin embargo hay que tener en cuenta que, en los últimos momentos de la forja de una pieza cuando la presión matriz es muy elevada y las aristas se llenan de material, las zonas de las piezas próximas a estas aristas se enfrían más rápidamente por estar en contacto con las paredes frías del troquel y por tener una masa menor. Esto provoca que el metal incremente su resistencia a la deformación en estas zonas y dificulte un completo llenado. Por tal motivo las aristas de los troqueles se deben maquinar con un radio lo mas grande posible y no ser demasiado agudas⁵⁸.

Lo mismo sucede en las zonas de rebaba ya que al ser de espesor pequeño las pérdidas de calor son importantes por lo que los gradientes de temperatura en esta zona entre la pieza y su rebaba generalmente son significativos.

El flujo de metal es afectado también por la naturaleza del metal su estructura metalúrgica (fases, tamaño de grano, tensiones a las que estuvo sometido, segregación, presencia de impurezas o inclusiones etc.) y por supuesto, su composición química. Pero en última instancia su influencia neta será sobre el valor de la tensión de fluencia⁵⁹.

2.7.- Influencia de la rebaba

Los troqueles de forja acabadores, tienen maquinado un hueco alrededor de los bajo relieves que funciona como formador de rebaba con el material que sobre al completar la operación y una vez que se han llenado completamente las cavidades de los troqueles.

En los troqueles se denomina cordón de matriz y sigue el contorno de la pieza definiéndose por su espesor (e) y su anchura (λ), en las piezas se denomina cordón de rebaba y dado que es conformado por el cordón de matriz también estará definido por su espesor y su anchura tal como lo muestra la figura 2.5

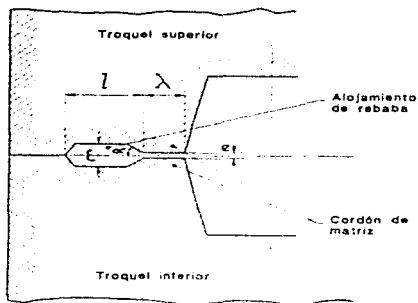


Fig. 2.6 Definiciones en la zona de rebaba ⁶⁰.

El cordón de matriz se comporta mecánicamente como un dique de contención del material viscoplástico y al mismo tiempo permite evacuar el que sobra al completar la operación.

2.7.1.- Efecto rebaba

Si hacemos la experimentación que muestra la figura 2.6, en donde D es mucho mayor que d y H es pequeña con respecto a D podemos apreciar que, aunque no existe retención es decir una pared que se oponga al crecimiento de D , se iniciará el flujo a través del orificio debido:

- La fricción con las superficies planas de los troqueles
- El efecto de tracción del disco de diámetro D que se opone al crecimiento del mismo.

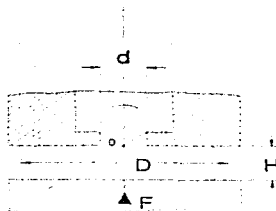


Fig. 2.7 Fluencia por efecto rebaba ⁵¹

Esto dos factores producen un efecto de retención, denominado efecto rebaba que origina el reflujó de las presiones necesarias para la fluencia del material a través del orificio.

El efecto rebaba hace posible que, en la forja en dado cerrado en troqueles acabadores, el metal fluya para que llene por completo las cavidades.

Debido a esto los valores de espesor y anchura del cordón de rebaba deben ser tales que propicien la suficiente fricción entre el material y el cordón de matriz en los momentos finales de la deformación y haga aumentar la presión motriz para que se llenen los huecos más difíciles de la geometría de la pieza, son valores normales de $1\text{mm} < e < 6\text{mm}$; $8 < 2\lambda/e < 14$ ⁵².

2.8.- Parámetros de la carga de trabajo

De todo lo anteriormente expuesto podemos establecer que: la carga de trabajo (p) de una operación de forja en dados cerrados depende de la geometría de la pieza, caracterizada por su área proyectada (A_0) (que incluye al área de la rebaba que rodea a la pieza de anchura λ) y las dimensiones de la cavidad del troquel que implique una mayor dificultad de forjado; la tensión de fluencia media (σ^0) bajo las condiciones impuestas por la operación de temperatura, grado de deformación y velocidad de deformación; el coeficiente de fricción viscoplástico (μ) y el espesor de la rebaba (e). Expresando esto en términos matemáticos tenemos

$$p = f(\sigma^0, A_0, \mu, e, \Psi_0, \Psi_i, h) \quad (2.17)$$

donde: Ψ_0 es función de la forma de la entrada de la cavidad en el troquel de mayor dificultad de llenado

Ψ_i es función de la forma del fondo de la cavidad de mayor dificultad de llenado

h = profundidad de la cavidad.

Por lo que, en pocas palabras, la finalidad de este trabajo es determinar experimentalmente la forma de la función f . Pero, dada la cantidad de variables de las cuales depende f , (siete) esto sería prácticamente imposible de llevar a cabo sin la herramienta del análisis dimensional que permite disminuir el número de variables de f y generalizar los datos obtenidos.

CAPITULO 3

ANÁLISIS DIMENSIONAL

El análisis dimensional es una herramienta matemática que encuentra su fundamento en el teorema Pi de Buckingham.

3.1.- Teorema Pi de Buckingham ⁶³.

Dado un problema físico en el cual el parámetro dependiente es una función de $n-1$ parámetros independientes podemos expresar la relación entre las variables en forma funcional como

$$q_1 = f(q_2, q_3, \dots, q_n) \quad (3.1)$$

donde q_1 es el parámetro dependiente y q_2, q_3, \dots, q_n son los $n-1$ parámetros independientes. Matemáticamente podemos expresar la relación funcional en la forma equivalente

$$g(q_1, q_2, \dots, q_n) = 0 \quad (3.2)$$

donde g es una función no especificada diferente de f .

El teorema Pi de Buckingham establece que dada una relación entre los n parámetros de la forma

$$g(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n) = 0 \quad (3.3)$$

entonces los n parámetros pueden agruparse en $n-r$ razones adimensionales independientes Π_i , lo que se puede expresar en forma funcional de la siguiente manera

$$G(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-r}) = 0 \quad (3.4)$$

o bien

$$\Pi_1 = G_1(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-r}) = 0 \quad (3.5)$$

donde r es igual al rango de la matriz dimensional.

El teorema no predice la forma funcional de G o G_1 . La relación funcional entre los parámetros Π_i dimensionales independientes debe determinarse de manera experimental. Los $n-r$ parámetros Π_i independientes no son únicos. Si se conocen $n-r$ parámetros Π_i independientes, entonces se puede obtener el término

$\Pi_n = \Pi_1^a \Pi_2^b \dots \Pi_n^w$, donde a, b, ..., w son exponentes escogidos a voluntad lo que producirá un nuevo parámetro. Entonces $\Pi_n, \Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$, constituirá un nuevo conjunto. Se puede continuar este proceso para encontrar otros conjuntos posibles.

El teorema anterior permite generalizar la información obtenida de pruebas experimentales específicas. Debido a que la función G1, deducida del análisis dimensional, correlaciona razones adimensionales de parámetros (q) independientes en el problema físico que se este experimentando y cuyos valores serán independientes de las magnitudes de dichos parámetros permitiendo describir el problema mas ampliamente, dado que el dominio de la función G1 no estará restringido por las magnitudes experimentadas de los parámetros (q).

3.2.- Determinación de los parámetros Π ⁶⁴.

Para obtener los parámetros Π se puede proceder de la siguiente manera:

- 1 - Liste todos los parámetros $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ implicados (Sea n al numero de parámetros).
- 2.- Seleccione un conjunto de dimensiones fundamentales es decir masa M, longitud L, y tiempo t o fuerza F, longitud L y tiempo t.
- 3 - Liste las dimensiones de todos los parámetros en términos de las dimensiones primarias de la siguiente manera:

$$\{q_1\} = M^{a_{11}} L^{a_{12}} t^{a_{13}}$$

$$\{q_2\} = M^{a_{21}} L^{a_{22}} t^{a_{23}}$$

$$\{q_3\} = M^{a_{31}} L^{a_{32}} t^{a_{33}}$$

$$\{q_4\} = M^{a_{41}} L^{a_{42}} t^{a_{43}}$$

$$\{q_n\} = M^{a_{n1}} L^{a_{n2}} t^{a_{n3}}$$

- 4.- Construya la matriz dimensional de la forma siguiente.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} & \dots & a_{n1} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} & \dots & a_{n2} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} & \dots & a_{n3} \end{bmatrix}$$

- 5.- Obtenga el rango de la matriz dimensional cuyo valor es igual a r.

6.- Elija de la lista de parámetros un número de parámetros de repetición igual al número r e incluya todas las dimensiones primaria. Ningún par de parámetros repetidos puede tener las mismas dimensiones netas diferenciándose únicamente por el exponente por ejemplo una longitud y una área no pueden ser parámetros de repetición al mismo tiempo ya que sus dimensiones son L, L^2 respectivamente .

7.- Establezca ecuaciones dimensionales combinando los parámetros de repetición elegidos con cada uno de los parámetros restantes para formar los $n-r$ parámetros Π .

8.- Compruebe que cada grupo obtenido sea adimensional.

9.- Si alguno(s) de los parámetros q son de naturaleza adimensional entonces será(n) por sí mismos parámetros Π ⁶⁵.

CAPITULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para obtener la función, $f(\sigma^o, A_o, \mu, e, \psi_o, \psi_i, h) = p$; recurrimos primeramente al análisis dimensional de las variables $p, \sigma^o, A_o, \mu, e, \psi_o, \psi_i$ y h a fin de establecer una función que dependa de un menor número de parámetros pero que al mismo tiempo correlacione todas las variables involucradas. Una vez hecho esto, se determinará experimentalmente la forma de la función obtenida.

4.1.- Análisis dimensional

Para hacer el análisis dimensional, primero debemos establecer las variables medibles más importantes involucradas en la operación y aplicar el teorema Pi de Buckingham.

Ya hemos indicado en la expresión 2.17 que:

$$f(\sigma^o, A_o, \mu, e, \psi_o, \psi_i, h) = p$$

donde: p = carga de trabajo.

σ^o = tensión de fluencia media del metal.

ψ_o, ψ_i ; dependen de la forma de la cavidad del semimolde que implique mayor dificultad de llenado

A_o = Área proyectada de la pieza incluida la correspondiente al cordón de rebaba

μ = coeficiente de fricción viscoplástico.

e = espesor de la rebaba

h = profundidad de la cavidad considerada.

Entonces si consideramos la pieza a forjar como la que se muestra en la figura 4.1⁶⁶, tendremos que $\psi_o = D_o$, $\psi_i = D_i$. Como en el análisis dimensional debemos solo considerar variables medibles A_o se caracterizara por L , que es la mayor longitud horizontal de la sección transversal considerada; que en este caso es el mayor diámetro de la pieza incluyendo la rebaba. De este modo:

$$p = f(\sigma_o, \mu, L, D_o, D_i, e, h) \quad (4.1)$$

o

$$G(p, \sigma_o, \mu, L, D_o, D_i, e, h) = 0 \quad (4.2)$$

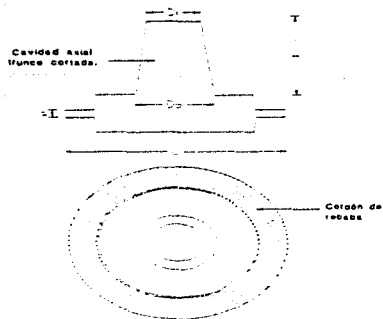


Fig. 4.1 Designación de los parámetros geométricos ⁶⁷.

tenemos entonces que $n=8$ parámetros implicados.

Las dimensiones de los parámetros implicados en términos de las dimensiones primarias son las siguientes:

$$[p] = \frac{M}{Lt^2}$$

$$[\sigma_0] = \frac{M}{Lt^2}$$

$$[L] = [D_0] = [D_1] = [h] = [e] = L$$

$$[\mu] = \text{ADIMENSIONAL}$$

Construyendo la matriz dimensional a partir de los exponentes de las dimensiones primarias obtenemos :

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

que es una matriz cuyo rango r es igual a 2, r=2, por lo tanto tenemos que n-r=8-2=6 parámetros adimensionales.

Se han elegido como parámetros de repetición a σ^0 y L para obtener los parámetros adimensionales, lo cual se hace procediendo de la siguiente manera:

$$\Pi_1 = \sigma_0^a L^b P$$

$$\Pi_1 = \left(\frac{M}{L^2}\right)^a (L)^b \left(\frac{M}{L^2}\right) = M^0 L^0 t^0 \quad a+1=0; -a+b-1=0; a=-1; b=0.$$

$$\Pi_1 = \frac{P}{\sigma_0}$$

$$\Pi_2 = \sigma_0^c L^d D_0$$

$$\Pi_2 = \left(\frac{M}{L^2}\right)^c (L)^d (L) = M^0 L^0 t^0 \quad \text{entonces } c=0; d+1=0; d=-1$$

$$\Pi_2 = \frac{D_0}{L}$$

$$\Pi_3 = \sigma_0^e L^f D_1$$

$$\Pi_3 = \left(\frac{M}{L^2}\right)^e (L)^f (L) = M^0 L^0 t^0 \quad e=0; f+1=0; f=-1$$

$$\Pi_3 = \frac{D_1}{L}$$

$$\Pi_4 = \mu$$

$$\Pi_5 = \sigma_0^g L^h$$

$$\Pi_5 = \left(\frac{M}{L^2}\right)^g (L)^h (L) = M^g L^{g+h} \quad g=0; i+1=0, i=-1$$

$$\Pi_5 = \frac{h}{L}$$

$$\Pi_6 = \sigma_0^k L^m e$$

$$\Pi_6 = \left(\frac{M}{L^2}\right)^k (L)^m (L) = M^k L^{k+m} \quad k=0; m+1=0; m=-1$$

$$\Pi_6 = \frac{e}{L}$$

entonces, agrupando los parámetros adimensionales de la siguiente manera, se tiene:

$$\Pi_1 = G_1(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6) \quad (4.3)$$

Si determinamos un conjunto alternativo de parámetros adimensionales del modo siguiente

$$\Pi_1 = \Pi_2^2 \Pi_3^3 \Pi_4^2 \Pi_5^2 \Pi_6^2 = \frac{\Pi_1}{\Pi_3} = \frac{D_0 L}{D_1 L} = \frac{D_0}{D_1}$$

entonces

$$\Pi_1 = G_2(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6) \quad (4.4)$$

Si despreciamos el parámetro $\Pi_3 = \frac{D_1}{L}$, entonces

$$\Pi_1 = G_2(\Pi_2, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6) \quad (4.5)$$

$$\frac{P}{\sigma_0} = G_3\left(\frac{D_0}{D_1}, \mu, \frac{h}{L}, \frac{e}{L}\right) \quad (4.6)$$

La carga de trabajo se incrementa de un 10 a 25% por efecto de la fricción. Por otro lado, en forja los coeficiente de fricción adquieren valores que normalmente caen dentro de un rango de 0.1 a 0.3⁶⁹. Por tal motivo es razonable suponer que la carga es directamente proporcional al factor $(1 + \mu)$. Por lo que, la ecuación 4.6 puede ser expresada de la siguiente forma:

$$p = \sigma_0(1 + \mu)G_4 \left(\frac{D_0}{D_1}, \frac{h}{L}, \frac{e}{L} \right) \quad (4.7)$$

Cuando la operación de forja se realiza en caliente, ya establecimos que $\sigma = f(T, \dot{\phi})$, donde T = temperatura y $\dot{\phi}$ = velocidad de deformación. Debido a lo cual, se deberán tomar valores promedio de σ^0 .

Cuando la operación de forja se realiza en frío la característica más importante del metal a deformar es el endurecimiento por deformación, por lo que la tensión de fluencia cambiará durante la deformación¹⁹. Una buena aproximación de la tensión de fluencia para la mayoría de los metales es

$$\sigma_s = Y_0 + K\epsilon^n \quad (4.8)$$

donde Y_0 = límite de fluencia del metal

K = constante característica del metal

ϵ = deformación natural = $\ln(h_0/h_1)$ y donde h_0, h_1 son las alturas inicial y final del metal respectivamente

n = coeficiente de endurecimiento característico del metal²⁰.

En la expresión 4.7, la forma de la función G_4 se tiene que determinar experimentalmente, pero; notese que es una función mas sencilla que la función f original en la expresión 2.17, pues solo depende de tres parámetros y es más general que ésta ya que no dependerá de D_0, D_1, h, e y L sino de $D_0/D_1, h/L$ y e/L .

Para determinar la forma de la función G_4 hemos recurrido al procedimiento experimental que se describe en la siguiente sección.

4.2.- Procedimiento experimental

1.- Se elaboraron 24 cilindros de 15 mm de diámetro y 20 mm de altura de acero H13, y sobre una de sus caras planas se maquinaron cavidades troncocónicas con un diámetro de entrada (Do) de 10mm y profundidades (H) variables de 2, 4, 6, 8 y 10 mm con ángulos de inclinación variables de 10, 15, 20, 25 y 30° para cada profundidad. Obteniéndose el conjunto de dados mostrado en la figura 4.1. Es importante mencionar que no fue posible construir un dado cuya cavidad tuviera una inclinación de 30° y una profundidad de 10mm debido a que las paredes laterales de la cavidad hubieran convergido a una profundidad menor.

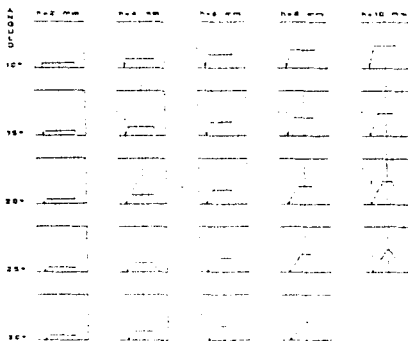


Fig. 4.1 Esquema de los dados utilizados para las pruebas mecánicas.

2.- Fueron construidas 3 probetas cilíndricas por cada dado, con aluminio 1100 de 6.3mm de diámetro y diferentes alturas según el dado con el cual fueron deformadas. La tabla 4.1 indica las alturas, de las probetas correspondientes para cada geometría de la cavidad del dado.

Tabla. 4.1 Alturas de las probetas utilizadas en las pruebas mecánicas

Cavidad del dado		Altura de la probeta
profundidad(mm)	ángulo de inclinación	(mm)
2	10	19
2	15	17.2
2	20	17.8
2	25	16.2
2	30	16.7
4	10	23.5
4	15	20.4
4	20	22.1
4	25	21.4
4	30	20.4
6	10	25.7
6	15	25.7
6	20	24.7
6	25	24.5
6	30	24
8	10	28.3
8	15	28.5
8	20	27.9
8	25	26.4
8	30	26.5
10	10	28.4
10	15	28.3
10	20	31.2
10	25	30.2

Cabe señalar que las alturas de las probetas fueron obtenidas de tal forma que le permitan tener un volumen 30% mayor que el volumen de la cavidad donde se ensayaran para asegurar la formación de rebaba con el exceso de material.

3.- Se montaron los dados tal y como muestra la figura 4.2 en una maquina universal de ensayos mecánicos MTS modelo 810.

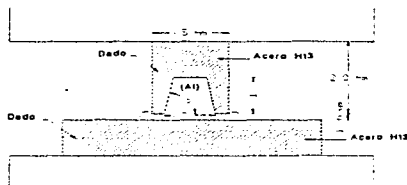


Fig. 4.2 Dispositivo utilizado para la deformación de las probetas

4.- Se ajustó el recorrido del pistón de la maquina para que dejara una separación final entre los dados de 1.5mm.

5.- Cada una de las probetas fue deformada a temperatura ambiente, con sus correspondientes dados, a una velocidad de deformación de 10mm/s usando polvo de grafito como lubricante.

6.- Se midió la carga desarrollada cada 0.5mm de recorrido del cabezal.

CAPITULO 5

RESULTADOS OBTENIDOS

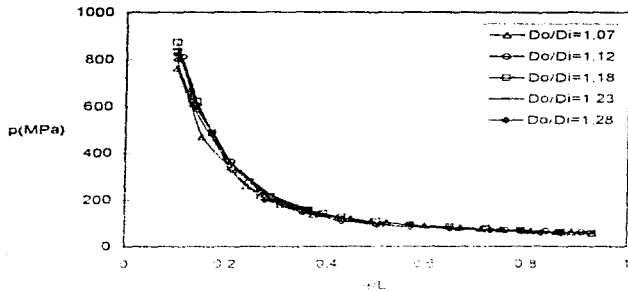
Los resultados experimentales se registraron en tablas; cuyo ejemplo es la tabla 5.1. Dicha tabla muestra la fuerza requerida para el desplazamiento (Desp) del pistón de la máquina de ensayos mecánicos MTS, durante la deformación de una probeta de altura inicial $h_0 = 17\text{mm}$ por medio del dado cuya cavidad que tiene una profundidad de 2mm y una inclinación de 10° , lo que determina que $D_o/D_i = 1.07$ y $h/L = 0.13$. En ella también se muestran los valores obtenidos de la carga (p) correspondientes al parámetro e/L . En el anexo 1 son mostradas todas las tablas obtenidas de la misma manera que la tabla 5.1 y correspondiente a los ensayos hechos con cada uno de los dados.

Al graficar los valores de p con sus correspondientes e/L para los dados cuyos valores de h/L sean iguales pero que difieran en el valor de D_o/D_i , se obtuvieron las gráficas 1,2,3,4 y 5.

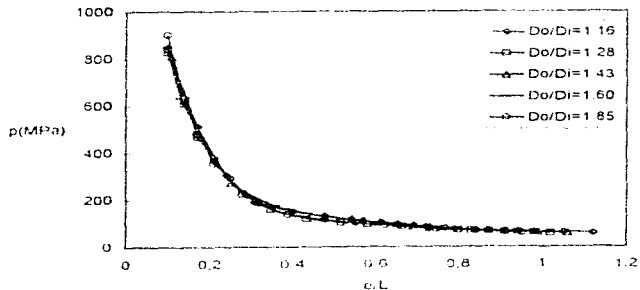
Tabla 5.1 Ejemplo de la forma como fueron registrados los datos obtenidos en los ensayos mecánicos. En este caso para $h/L=0.13$, $Do/Di=1.07$ y $ho=17mm$

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	$e=(ho-DESP)$	e/L
0.0	0.0	0.0	17.0	1.13
5.3	30.8	1.9	15.1	1.01
9.0	52.3	2.6	14.4	0.96
9.8	57.0	3.0	14.0	0.93
10.7	62.2	3.7	13.3	0.89
11.0	64.0	4.1	12.9	0.86
11.7	68.0	4.8	12.2	0.81
12.1	70.3	5.2	11.8	0.79
12.8	74.4	5.6	11.2	0.75
13.4	77.9	6.3	10.7	0.71
14.3	83.1	7.0	10.0	0.67
15.7	91.3	8.0	9.0	0.60
16.5	95.9	8.5	8.5	0.57
17.8	103.5	9.2	7.8	0.52
18.7	108.7	9.6	7.4	0.49
20.3	118.0	10.3	6.7	0.45
21.5	125.0	10.7	6.3	0.42
23.8	138.4	11.4	5.6	0.37
31.0	180.2	12.4	4.6	0.31
37.4	217.4	12.9	4.1	0.27
44.4	258.1	13.4	3.6	0.24
81.0	470.9	14.7	2.3	0.15
131.6	765.1	15.5	1.5	0.10

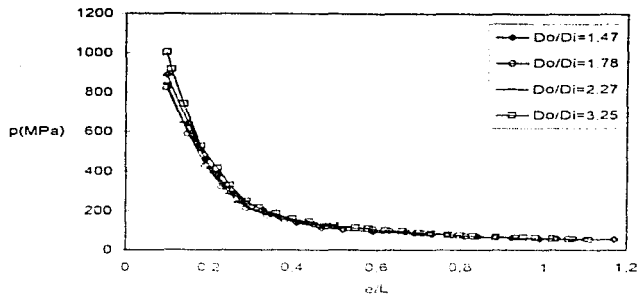
$h/L=0.13$
 $Do/Di=1.07$



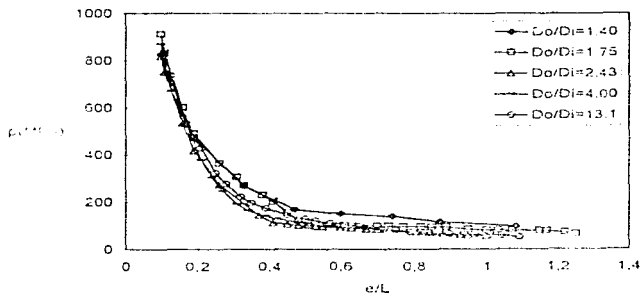
Gráfica 1. Curvas carga (p) vs e/L obtenidas por los ensayos de forja, con los datos de cavidades de 2mm de profundidad, $h/L=0.13$.



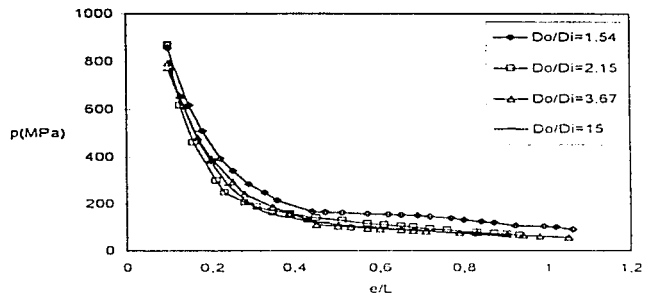
Gráfica 2. Curvas carga (p) vs e/L obtenidas por los ensayos de forja con los datos de cavidades de 4mm de profundidad, $h/L=0.26$.



Gráfica 3. Curvas carga (p) vs e/L obtenidas por los ensayos de forja con los dados de cavidades de 6mm de profundidad, $h/L=0.4$.



Gráfica 4. Curvas carga (p) vs e/L obtenidas mediante los ensayos de forja con los dados de cavidades de 8mm de profundidad lo que proporciona $h/L=0.53$



Gráfica 5. Curvas carga (p) vs e/L obtenidas mediante los ensayos de forja los dados de cavidades de 10mm de profundidad lo que proporciona $h/L=0.66$

CAPITULO 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La gráfica 1 muestra que sus diferentes curvas prácticamente siguen el mismo comportamiento confundándose unas de otras, presentando una diferencia máxima de 109 MPa entre la curva correspondiente a $D_o/D_i=1.07$ y la que corresponde a $D_o/D_i=1.28$ en el valor de $e/L=0.1$. La gráfica 2, al igual que en la gráfica 1, las curvas también siguen prácticamente la misma tendencia y difieren 72 MPa como máximo entre las curvas $D_o/D_i=1.43$ y $D_o/D_i=1.55$ en el valor de $e/L=0.1$. La gráfica 3, es similar a las gráficas 1y 2 solo que muestra una diferencia máxima de 158 MPa entre las curvas $D_o/D_i=1.73$ y $D_o/D_i=3.25$ también en $e/L=0.1$. La gráfica 4, muestra una mayor dispersión de las curvas que las tres gráficas anteriores en todo el rango de e/L existiendo una diferencia máxima de 108 MPa entre $D_o/D_i=1.75$ y $D_o/D_i=4.00$ para $e/L=0.3$, pero aun así la tendencia sigue siendo la misma para todas las curvas. Lo mismo ocurre en la gráfica 5 donde la dispersión se hace mayor en el rango de 0.14 a 0.3 alcanzando un valor máximo de 135 MPa entre $D_o/D_i=1.54$ y $D_o/D_i=2.15$.

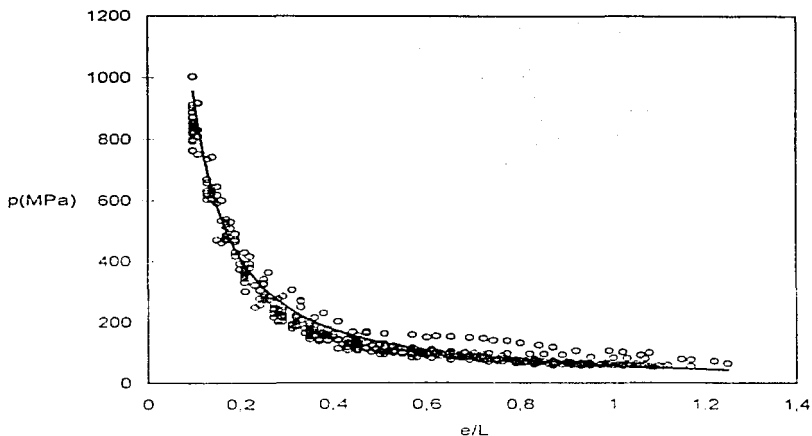
De lo anterior podemos concluir que todas las curvas de las gráficas 1, 2, 3, 4 y 5 siguen la misma tendencia y sería difícil establecer una relación entre la dispersión que muestran y los parámetros D_o/D_i y h/L . Esta dispersión puede ser atribuible a factores no controlables en la experimentación como son: lubricación irregular, heterogeneidad en el material, heterogeneidad en la superficie interna de los dados, pandeo de las probetas etc. Es importante indicar que para los ensayos donde fueron utilizados los dados cuyos valores de h/L fueron de 0.53 y 0.66, hubo necesidad de emplear probetas más altas, que tendían a pandearse fácilmente, lo que pudo influir también en la mayor dispersión de los datos mostrada en la gráficas 4 y 5.

Agrupando en un sólo gráfico todos los datos obtenidos en la parte experimental, se obtiene la gráfica 6. En dicha gráfica se puede apreciar mas claramente que los datos siguen la misma tendencia a pesar de que D_o/D_i varia de 1.07 a 15 y h/L de 0.13 a 0.66, lo que indica de que todos los datos pueden ser ajustados por una sola curva cuya ecuación es:

$$p = 57.881 \left(\frac{e}{L} \right)^{-1.162} \quad (6.1)$$

la cual, muestra un coeficiente de correlación $R^2 = 0.9973$.

Dado que el análisis dimensional establece que, $p = \sigma_y (1 + \mu) D_o$, entonces



Gráfica 6. Ajuste estadístico de todos los datos de carga (p) vs e/L obtenidos en los ensayos de forja de la parte experimental para $0.13 \leq h/L \leq 0.66$ y $1.07 \leq D_o/D_i \leq 15.00$.

si se igualan las expresiones 6.1 y 4.7, tenemos:

$$p = \sigma_o (1 + \mu) G_4 = 57.881 \left(\frac{e}{L} \right)^{-12.182} \quad (6.3)$$

$$\frac{p}{\sigma_o (1 + \mu)} = \frac{57.881 \left(\frac{e}{L} \right)^{-12.182}}{\sigma_o (1 + \mu)} = G_4 \quad (6.4)$$

Si para las condiciones experimentadas $\sigma_o = 200$ MPa es un valor medio adecuado de la tensión de fluencia para Al a temperatura ambiente y $\mu = 0.2$ (valor aproximado), que fue tomado de la tabla 2.1 para forja de Al en frío con grafito como lubricante, entonces

$$\frac{p}{\sigma_c(1+\mu)} = \frac{57.881 \left(\frac{e}{L}\right)^{-1.2182}}{(200 \cdot 1.2)} = G_4 \quad (6.5)$$

de donde obtenemos:

$$\frac{p}{\sigma_c(1+\mu)} = 0.2412 \left(\frac{e}{L}\right)^{-1.2182} \quad (6.6)$$

o

$$\frac{p}{\sigma_c} = (1+\mu) 0.2412 \left(\frac{e}{L}\right)^{-1.2182} \quad (6.7)$$

La expresión 6.7 es un modelo experimental que correlaciona a la variable p/σ_c (variable dependiente o de salida) con las variables e/L y μ . (Variables independientes o de entrada). La representación gráfica de esta expresión se muestra en la figura 6.1.

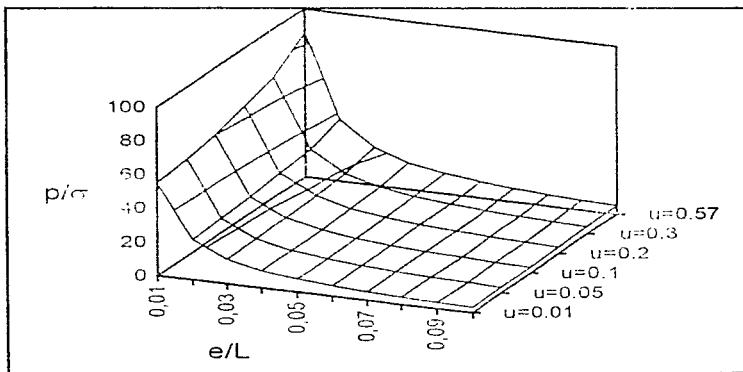


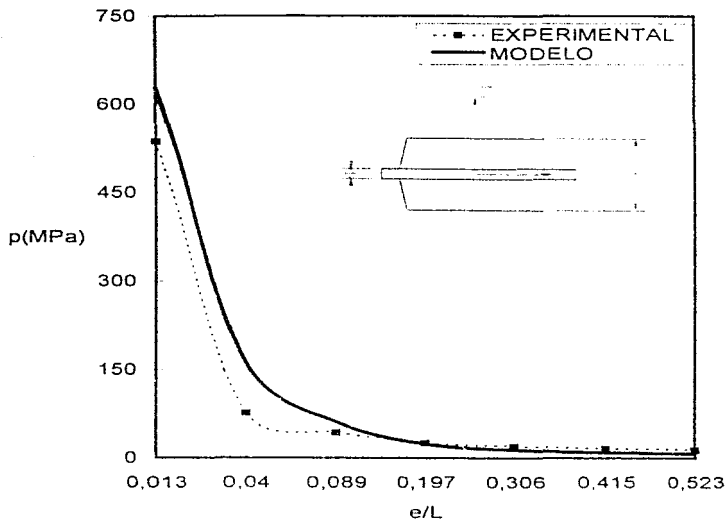
Fig. 6.1 Representación gráfica tridimensional la expresión 6.7

Debido a que tanto e/L como μ son razones de cantidades medibles, sus valores serán independientes de las magnitudes específicas de dichas cantidades. Podríamos suponer entonces, que el modelo obtenido sería adecuado para cuantificar p/σ^n en operaciones de forja cuyos valores de e , L y μ sean diferentes de los que se experimentaron. Para comprobar lo anterior, hemos comparado las cargas de trabajo requeridas para forjar piezas industriales bajo condiciones muy diferentes de las que se experimentaron aquí. Dicha comparación se hizo gráficamente para determinar si las tendencias de los resultados calculados corresponden a los resultados medidos.

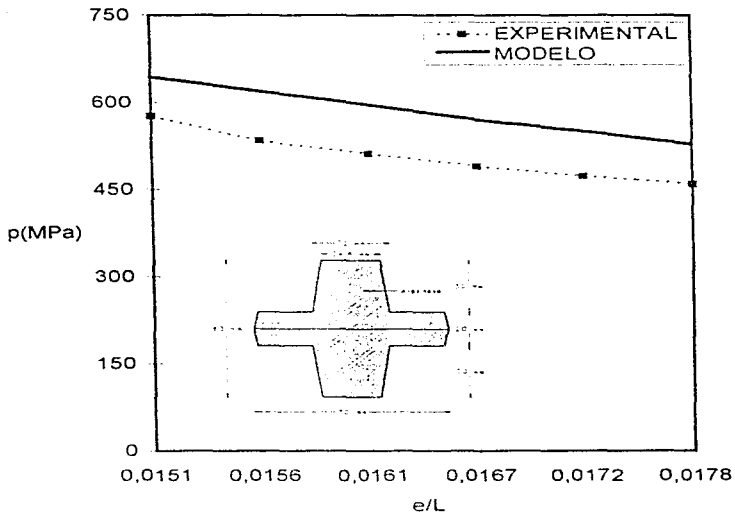
Las gráficas 7, 8, 9, 10 y 11 son comparaciones entre los resultados del modelo y cargas medidas en forjas de piezas reales. Las cargas calculadas por el modelo se obtuvieron multiplicando el p/σ^n calculado por la tensión de fluencia que presenta el material con la cual fue forjada la pieza, a la temperatura y velocidad de deformación de trabajo. Cabe señalar que como el parámetro e/L del modelo se refiere al espesor y anchura de la rebaba formada con el material sobrante, la carga se midió en los últimos momentos de la operación de forja cuando la rebaba ya había sido completamente formada.

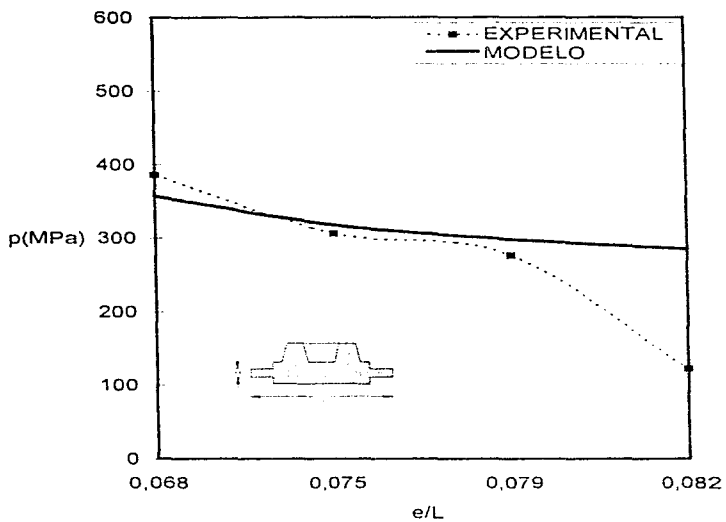
En la gráfica 7 se puede apreciar que los valores cuantificados por el modelo difieren de los datos medidos en ± 91 MPa lo que representa una precisión de $\pm 17\%$. Para la gráfica 8 la discrepancia entre el modelo y los datos medidos es de ± 68 MPa, que le proporciona al modelo una precisión de $\pm 11.8\%$. La gráfica 9 muestra una diferencia entre el modelo y los datos de ± 26 MPa lo que corresponde a una precisión de $\pm 7.5\%$. La gráfica 10 exhibe una diferencia de ± 29 MPa entre las cargas requeridas para la forja de la pieza y la carga calculada por el modelo dándole a este una precisión de $\pm 5\%$. Finalmente en la gráfica 11 hay una diferencia de ± 53 MPa que da una precisión de $\pm 8.7\%$.

Los resultados anteriores muestran que la expresión 6.7 es adecuada para calcular la carga de trabajo de diversos procesos de forja en dados cerrados que generan rebaba con una precisión de alrededor de $\pm 16\%$.

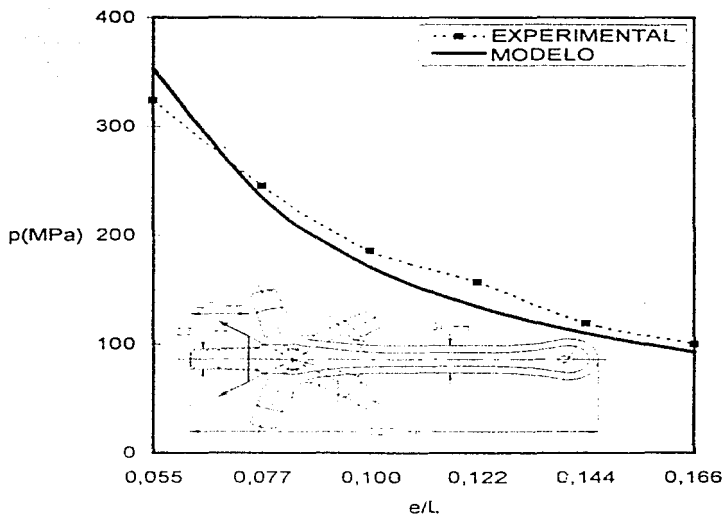


Gráfica 7. Comparación de las cargas de trabajo requeridas en la forja de piezas como la mostrada en la figura, fabricadas en acero 1015 a 1250°C y utilizando grafito como lubricante; con las cargas calculadas mediante el modelo.

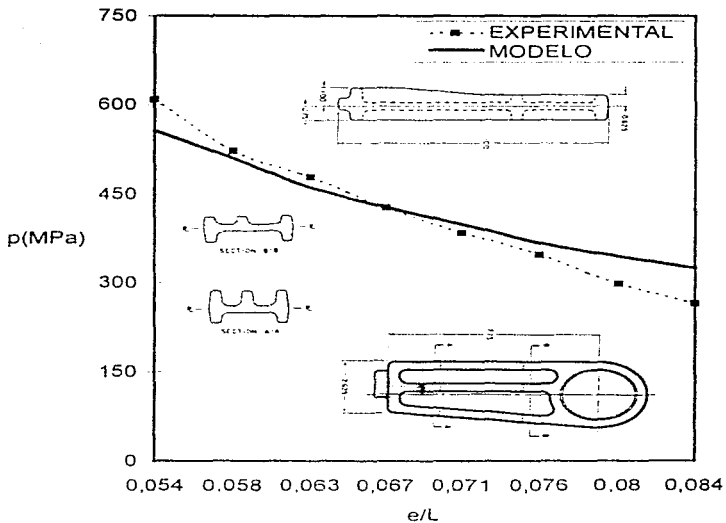




Gráfica 9. Comparación de las cargas de trabajo requeridas en la forja de piezas como las mostradas en la figura, fabricadas con una aleación de aluminio 6061 a 342°C y un coeficiente $\mu=0.25$; con las cargas calculadas mediante el modelo ⁷³.



Gráfica 10 . Comparación de las cargas de trabajo requeridas en la forja de piezas como las mostradas en la figura, fabricadas con una aleación de aluminio 2014 a 400°C y un coeficiente $\mu=0.1$; con las cargas calculadas mediante el modelo ⁷⁴.



Gráfica 11. Comparación de las cargas de trabajo requeridas en la forja de piezas como las mostradas en la figura, fabricadas con una aleación Ti-6Al-4V a 1800°F y utilizando vidrio con grafito como lubricante; con las cargas calculadas mediante el modelo.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES

Por medio del análisis dimensional se pudo desarrollar un método semiempírico general, que permite calcular la carga de trabajo en operaciones de forja en dados cerrados ó forja en estampa, con una precisión aproximada de 5%.

Los parámetros que mas influyen sobre la carga de trabajo son: la tensión de fluencia media del material, a la velocidad de deformación y a la temperatura de trabajo σ^0 ; la relación de el espesor de la rebaba entre la anchura de la sección transversal de la pieza e/L y el coeficiente de fricción viscoplástico μ . De estos el valor de e/L que determina las dimensiones del cordón de rebaba es lo que mas influencia tiene sobre la magnitud de la carga de trabajo.

La geometría de las piezas fabricadas mediante forja en dados cerrados no influye significativamente sobre la carga requerida para fabricar la pieza. Solo en la medida que dicha geometría determina las dimensiones del cordón de rebaba.

APENDICE

Tabla A.1. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 2mm de profundidad y 15° de inclinación lateral, $Do/Di=1.12$ y $h/L=0.13$. Probeta $ho=15.2$ mm.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	e=(ho-DESP)	e/L
0.0	0.0	0.0	15.2	1.01
9.4	54.7	0.6	14.6	0.97
10.6	61.6	1.6	13.6	0.91
11.1	64.5	2.2	13.0	0.87
11.5	66.9	2.6	12.6	0.84
12.1	70.3	3.3	11.9	0.79
12.3	71.5	3.8	11.4	0.76
12.9	75.0	4.4	10.8	0.72
13.5	78.5	5.4	9.8	0.65
14.6	84.9	6.6	8.6	0.57
16.2	94.2	7.6	7.6	0.51
20.6	119.8	8.8	6.4	0.43
27.4	159.3	9.9	5.3	0.35
38.8	225.6	11.0	4.2	0.28
62.8	365.1	12.1	3.1	0.21
107.5	625.0	13.2	2.0	0.13
139.6	811.6	13.6	1.6	0.11
143.9	836.6	13.7	1.5	0.10

$h/L=0.13$

$Do/Di=1.12$

Tabla A.2. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 2mm de profundidad y 20° de inclinación lateral. $D_o/D_i=1.18$ y $h/L=0.13$. Probeta $h_o=15.8$ mm.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	e=(h_o -DESP)	e/L
0.0	0.0	0.0	15.8	1.05
6.3	36.8	0.7	15.1	1.01
8.4	48.8	1.1	14.7	0.98
9.8	57.0	1.8	14.0	0.93
10.8	62.8	2.7	13.1	0.87
11.8	68.6	3.9	11.9	0.79
13.2	76.7	5.0	10.8	0.72
14.7	85.6	6.1	9.7	0.65
16.1	93.6	7.2	8.6	0.57
18.3	106.4	8.3	7.5	0.50
21.9	127.3	9.4	6.4	0.43
24.2	140.7	9.9	5.9	0.39
26.9	156.4	10.4	5.4	0.36
32.3	187.8	11.1	4.7	0.31
39.5	229.7	11.7	4.1	0.27
47.8	277.9	12.1	3.7	0.25
59.3	344.8	12.6	3.2	0.21
83.9	487.8	13.3	2.5	0.17
107.1	622.7	13.7	2.1	0.14
150.5	875.0	14.3	1.5	0.10

$h/L=0.13$
 $D_o/D_i=1.18$

Tabla A.3. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 2mm de profundidad y 25° de inclinación lateral, Do/Di=1.23 y h/L=0.13. Probeta ho=17.2mm.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	e=(ho-DESP)	e/L
0.0	0.0	0.0	17.2	1.15
0.6	3.5	2.0	15.2	1.01
9.5	55.2	3.1	14.1	0.94
10.3	59.9	3.6	13.6	0.91
10.8	62.8	4.1	13.1	0.87
11.4	66.3	4.8	12.4	0.83
11.7	68.0	5.2	12.0	0.80
12.4	72.1	5.9	11.3	0.75
13.3	77.3	6.9	10.3	0.69
13.6	79.1	7.4	9.8	0.65
14.2	82.6	8.1	9.1	0.61
14.6	84.9	8.5	8.7	0.58
16.2	94.2	9.6	7.6	0.51
20.4	118.6	10.7	6.5	0.43
27.4	159.3	11.8	5.4	0.36
38.6	224.4	12.9	4.3	0.29
61.9	359.9	14.0	3.2	0.21
104.4	607.0	15.1	2.1	0.14
145.5	845.9	15.7	1.5	0.10

h/L=0.13
Do/Di=1.23

Tabla A.4. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 2mm de profundidad y 30° de inclinación lateral, $D_o/D_i=1.28$ y $h/L=0.13$. Probeta $h_o=14.7$ mm.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP(mm)	e=(h _o -DESP)	e/L
0,0	0,0	0,0	14,7	0,98
6,3	36,6	0,6	14,1	0,94
8,5	49,4	1,0	13,7	0,91
9,9	57,6	1,7	13,0	0,87
10,5	61,0	2,2	12,5	0,83
11,1	64,5	2,8	11,9	0,79
12,1	70,3	3,8	10,9	0,73
13,3	77,3	5,0	9,7	0,65
14,5	84,3	6,1	8,6	0,57
16,3	94,8	7,2	7,5	0,50
18,7	108,7	8,3	6,4	0,43
24,9	144,8	9,4	5,3	0,35
34,6	201,2	10,5	4,2	0,28
56,9	330,8	11,6	3,1	0,21
103,9	604,1	12,7	2,0	0,13
137,8	801,2	13,2	1,5	0,10
141,8	824,4	13,2	1,5	0,10

$h/L=0.13$
 $D_o/D_i=1.28$

Tabla A.5. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 4mm de profundidad y 10° de inclinación lateral, $D_o/D_i=1.16$ y $h/L=0.26$. Probeta $h_o=20.5\text{mm}$.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	$e=(h_o-DESP)$	e/L
0.0	0.0	0.0	20.5	1.37
5.5	32.0	2.4	18.1	1.21
10.2	59.3	3.7	16.8	1.12
11.0	64.0	4.7	15.8	1.05
11.4	66.3	5.8	14.7	0.98
12.0	69.8	6.9	13.6	0.91
12.4	72.1	7.5	13.0	0.87
12.7	73.8	7.9	12.6	0.84
13.2	76.7	8.6	11.9	0.79
13.8	80.2	9.0	11.5	0.77
15.1	87.8	9.7	10.8	0.72
15.9	92.4	10.1	10.4	0.69
17.2	100.0	10.8	9.7	0.65
18.1	105.2	11.3	9.2	0.61
19.4	112.8	11.9	8.6	0.57
20.3	118.0	12.4	8.1	0.54
22.7	132.0	13.4	7.1	0.47
26.0	151.2	14.5	6.0	0.40
33.0	191.9	15.8	4.7	0.31
52.5	305.2	16.9	3.6	0.24
88.1	512.2	18.0	2.5	0.17
146.4	851.2	19.0	1.5	0.10

$h/L=0.26$

$D_o/D_i=1.16$

Tabla A.6. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 4mm de profundidad y 15° de inclinación lateral, $D_o/D_i=1.28$ y $h/L=0.26$. Probeta $h_o=16.4$ mm.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	$e=(h_o-DESP)$	e/L
0,0	0,0	0,0	16,4	1,09
8,6	50,0	0,6	15,8	1,05
9,6	55,8	1,1	15,3	1,02
10,5	61,0	1,7	14,7	0,98
10,9	63,4	2,3	14,1	0,94
11,2	65,1	2,8	13,6	0,91
11,5	66,9	3,3	13,1	0,87
12,0	69,8	4,0	12,4	0,83
12,3	71,5	4,4	12,0	0,80
13,3	77,3	5,5	10,9	0,73
15,0	87,2	6,5	9,9	0,66
16,6	96,5	7,7	8,7	0,58
17,8	103,5	8,8	7,6	0,51
20,5	119,2	9,9	6,5	0,43
27,4	159,3	11,1	5,3	0,35
38,4	223,3	12,2	4,2	0,28
63,5	369,2	13,3	3,1	0,21
81,9	476,2	13,8	2,6	0,17
104,7	608,7	14,3	2,1	0,14
144,5	840,1	14,9	1,5	0,10

$h/L=0.26$

$D_o/D_i=1.28$

Tabla A.7. Resultados de los ensayos de ferja para el dado con cavidad de 4mm de profundidad y 20° de inclinación lateral, Do/Di=1.43 y h/L=0.26. Probeta ho=18.1mm.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	e=(ho-DESP)	e/L
0.0	0.0	0.0	18.1	1.21
5.4	31.4	1.1	17.0	1.13
10.0	58.1	2.2	15.9	1.06
10.9	63.4	3.3	14.8	0.99
11.3	65.7	4.0	14.1	0.94
11.5	66.9	4.5	13.6	0.91
12.0	69.8	5.1	13.0	0.87
12.9	75.0	6.1	12.0	0.80
13.8	80.2	6.7	11.4	0.76
14.6	84.9	7.2	10.9	0.73
15.8	91.9	7.8	10.3	0.69
16.6	96.5	8.3	9.8	0.65
17.9	104.1	8.9	9.2	0.61
20.0	116.3	10.0	8.1	0.54
22.6	131.4	11.1	7.0	0.47
26.4	153.5	12.2	5.9	0.39
33.0	191.9	13.3	4.8	0.32
47.1	273.8	14.3	3.8	0.25
80.7	469.2	15.5	2.6	0.17
139.1	808.7	16.5	1.6	0.11
142.6	829.1	16.6	1.5	0.10

n/L=0.26

Do/Di=1.43

Tabla A.8. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 4mm de profundidad y 25° de inclinación lateral, $D_o/D_i=1.60$ y $h/L=0.26$. Probeta $h_o=17.4$ mm.

CARGA (kN)	P (MPa)	DESP (mm)	$e=(h_o-DESP)$	e/L
0.0	0.0	0.0	17.4	1.15
7.8	45.3	1.0	16.4	1.09
10.1	58.7	2.1	15.3	1.02
10.9	63.4	3.2	14.2	0.95
11.6	67.4	4.3	13.1	0.87
12.6	73.3	5.5	11.9	0.79
13.9	80.8	6.5	10.9	0.73
14.8	86.0	7.1	10.3	0.69
16.2	94.2	7.7	9.7	0.65
18.3	106.4	8.7	8.7	0.58
19.6	114.0	9.3	8.1	0.54
20.8	120.9	9.8	7.6	0.51
22.8	132.6	10.4	7.0	0.47
24.5	142.4	10.9	6.5	0.43
27.5	159.9	11.5	5.9	0.39
30.1	175.0	12.0	5.4	0.36
40.9	237.8	13.2	4.2	0.28
62.9	365.7	14.3	3.1	0.21
108.8	632.6	15.4	2.0	0.13
142.7	829.7	15.9	1.5	0.10

$h/L=0.26$
 $D_o/D_i=1.60$

Tabla A.9. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 4mm de profundidad y 30° de inclinación lateral, $D_o/D_i=1.85$ y $h/L=0.26$. Probeta $h_o=16.4$ mm.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	$e=(h_o \cdot \text{DESP})$	e/L
0.0	0.0	0.0	16.4	1.09
5.9	40.1	1.2	15.2	1.01
10.0	58.1	2.2	14.2	0.95
10.7	62.2	2.8	13.6	0.91
11.7	68.0	3.8	12.6	0.84
12.9	75.0	5.1	11.3	0.75
14.4	83.7	6.2	10.2	0.68
15.7	91.3	7.1	9.3	0.62
17.6	102.3	8.2	8.2	0.55
20.0	116.3	9.3	7.1	0.47
24.0	139.5	10.5	5.9	0.39
32.1	186.6	11.6	4.8	0.32
38.0	220.9	12.1	4.3	0.29
50.0	290.7	12.7	3.7	0.25
60.9	354.1	13.2	3.2	0.21
83.9	487.8	13.8	2.6	0.17
108.7	632.0	14.3	2.1	0.14
155.1	901.7	14.9	1.5	0.10

$h/L=0.26$

$D_o/D_i=1.85$

Tabla A.10. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 6mm de profundidad y 10° de inclinación lateral, Do/Di=1.47 y h/L=0.4. Probeta ho=19.7mm.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	e=(ho-DESP)	e/L
0,0	0,0	0,0	19,7	1,31
7,8	45,3	1,0	18,7	1,25
8,8	51,2	1,5	18,1	1,21
9,5	55,2	2,2	17,5	1,17
9,9	57,6	3,2	16,5	1,10
10,1	58,7	4,3	15,4	1,03
10,2	59,3	4,9	14,8	0,99
10,8	62,8	5,9	13,8	0,92
11,5	66,9	6,5	13,2	0,88
12,3	71,5	7,1	12,6	0,84
13,6	79,1	8,1	11,6	0,77
14,2	82,6	8,7	11,0	0,73
14,9	85,6	9,3	10,4	0,69
16,5	95,9	10,9	8,8	0,59
18,0	104,7	11,9	7,8	0,52
19,4	112,8	12,6	7,1	0,47
24,0	139,5	13,6	6,1	0,41
28,5	165,7	14,2	5,5	0,37
35,6	207,0	14,8	4,9	0,33
41,2	239,5	15,3	4,4	0,29
49,1	285,5	15,8	3,9	0,26
65,4	380,2	16,4	3,3	0,22
80,1	465,7	16,8	2,9	0,19
111,1	645,9	17,5	2,2	0,15
152,8	888,4	18,2	1,5	0,10

h/L=0.4

Do/Di=1.47

Tabla A.11. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 6mm de profundidad y 15° de inclinación lateral, $D_o/D_i=1.78$ y $h/L=0.4$. Probeta $h_o=18.7mm$.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	e=(h_o -DESP)	e/L
0.0	0.0	0.0	18.7	1.25
0.8	4.7	0.4	18.3	1.22
7.8	45.3	1.1	17.6	1.17
8.8	51.2	1.5	17.2	1.15
9.6	55.8	2.1	16.6	1.11
10.0	58.1	2.6	16.1	1.07
10.3	59.9	3.3	15.4	1.03
11.0	64.0	4.8	13.9	0.93
11.4	66.3	5.5	13.2	0.90
12.3	71.5	6.5	12.2	0.84
13.2	76.7	7.0	11.7	0.79
14.2	82.5	7.7	11.0	0.73
14.9	85.5	8.1	10.6	0.71
15.8	91.9	8.6	10.1	0.67
17.0	98.8	9.2	9.5	0.63
18.3	106.4	9.9	8.8	0.59
21.4	124.4	11.5	7.2	0.48
22.6	131.4	11.9	6.8	0.45
24.8	144.2	12.6	6.1	0.41
26.7	155.2	13.0	5.7	0.38
30.9	179.7	13.6	5.1	0.34
37.0	215.1	14.3	4.4	0.29
45.5	264.5	14.7	4.0	0.27
55.5	322.7	15.2	3.5	0.23
74.2	431.4	15.8	2.9	0.19
101.7	591.3	16.5	2.2	0.15
141.9	825.0	17.2	1.5	0.10

$h/L=0.4$

$D_o/D_i=1.78$

Tabla A.12. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 6mm de profundidad y 20° de inclinación lateral, $Do/Di=2.27$ y $h/L=0.4$. Probeta $ho=18.5mm$.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	e=(ho-DESP)	e/L
0.0	0.0	0.0	18.5	1.23
4.1	23.8	0.6	17.9	1.19
7.3	42.4	1.1	17.4	1.16
9.4	54.7	2.3	16.2	1.08
10.2	59.3	3.4	15.1	1.01
10.4	60.5	3.9	14.6	0.97
10.6	61.6	4.4	14.1	0.94
11.0	64.0	5.0	13.5	0.90
12.1	70.3	6.0	12.5	0.83
12.9	75.0	6.6	11.9	0.79
13.9	80.8	7.3	11.2	0.75
14.6	84.9	7.7	10.8	0.72
15.8	91.9	8.4	10.1	0.67
18.9	109.9	9.9	8.6	0.57
20.4	118.6	10.6	7.9	0.53
21.6	125.6	11.0	7.5	0.50
23.6	137.2	11.7	6.8	0.45
25.2	146.5	12.1	6.4	0.43
28.3	164.5	12.8	5.7	0.38
30.9	179.7	13.2	5.3	0.35
34.4	200.0	13.7	4.8	0.32
41.6	241.9	14.4	4.1	0.27
48.9	284.3	14.8	3.7	0.25
67.8	394.2	15.4	3.1	0.21
111.1	645.9	16.4	2.1	0.14
145.2	844.2	17.0	1.5	0.10

$h/L=0.4$

$Do/Di=2.27$

Tabla A.13. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 6mm de profundidad y 25° de inclinación lateral, $D_o/D_i=3.25$ y $h/L=0.4$. Probeta $h_o=18\text{mm}$.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	$e=(h_o-DESP)$	e/L
0.0	0.0	0.0	18.0	1.200
1.8	10.5	0.4	17.6	1.173
7.9	45.9	1.1	16.9	1.127
9.8	57.0	2.0	16.0	1.067
10.4	60.5	2.6	15.4	1.027
10.9	63.4	3.3	14.7	0.980
11.2	65.1	3.7	14.3	0.953
11.8	68.6	4.8	13.2	0.880
12.3	71.5	5.5	12.5	0.833
12.8	74.4	5.9	12.1	0.807
13.5	78.5	5.4	11.6	0.773
14.6	84.9	7.0	11.0	0.733
15.4	89.5	7.5	10.5	0.700
16.6	96.5	8.1	9.9	0.660
17.5	101.7	8.6	9.4	0.627
18.8	109.3	9.2	8.7	0.580
19.7	114.5	9.7	8.3	0.553
21.4	124.4	10.4	7.6	0.507
24.9	144.8	11.3	6.7	0.447
27.5	159.9	11.9	6.1	0.407
31.8	184.9	12.6	5.4	0.360
37.0	215.1	13.2	4.8	0.320
43.0	250.0	13.6	4.4	0.293
56.7	329.7	14.2	3.8	0.253
71.8	417.4	14.7	3.3	0.220
91.1	529.7	15.2	2.8	0.187
127.7	742.4	15.8	2.2	0.147
158.0	918.6	16.3	1.7	0.113
172.5	1002.9	16.5	1.5	0.100

$h/L=0.4$

$D_o/D_i=3.25$

Tabla A.14. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 8mm de profundidad y 10° de inclinación lateral, $D_o/D_i=1.40$ y $h/L=0.53$. Probeta $h_o=18.3\text{mm}$.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	$e=(h_o-DESP)$	e/L
0,0	0,0	0,0	18,3	1,22
17,2	100,0	3,1	15,2	1,01
20,2	117,4	5,2	13,1	0,87
24,2	140,7	7,2	11,1	0,74
26,0	151,2	9,3	9,0	0,60
29,2	169,8	11,3	7,0	0,47
46,2	268,6	13,4	4,9	0,33
81,2	472,1	15,4	2,9	0,19
142,2	826,7	16,8	1,5	0,10

$h/L=0.53$

$D_o/D_i=1.40$

Tabla A.15. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 8mm de profundidad y 15° de inclinación lateral, Do/Di=1.75 y h/L=0.53. Probeta ho=20.5mm.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	e=(ho-DESP)	e/L
0.0	0.0	0.0		20.5
0.7	4.1	0.7		19.8
11.2	65.1	1.7		18.8
12.5	72.4	2.2		18.3
13.3	77.3	2.9		17.6
13.6	79.0	3.2		17.2
13.9	80.6	4.4		16.1
14.0	81.4	5.1		15.4
14.1	82.2	5.5		15.0
14.7	85.5	5.2		14.3
16.1	93.6	7.2		13.3
16.4	95.2	7.8		12.7
16.5	95.0	8.2		12.3
16.7	96.9	8.9		11.6
16.8	97.7	9.5		11.0
16.9	98.5	10.0		10.5
16.9	98.5	11.0		9.5
16.9	98.5	11.5		9.0
16.7	96.9	12.2		8.3
17.5	101.7	12.8		7.7
21.0	122.1	13.3		7.2
26.9	156.3	13.7		6.8
34.9	202.7	14.4		6.1
39.6	230.3	14.8		5.7
46.8	271.9	15.5		5.0
52.8	306.9	15.9		4.6
62.7	364.7	16.6		3.9
84.4	490.8	17.6		2.9
103.3	600.7	18.1		2.4
143.1	831.9	18.8		1.7
156.9	912.4	19.0		1.5

h/L=0.53
Do/Di=1.75

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Tabla A.16. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 8mm de profundidad y 20° de inclinación lateral. Do/Di=2.43 y h/L=0.53. Probeta ho=19.9mm.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	e=(ho-DESP)	e/L
0,0	0,0	0,0	19,9	1,33
0,0	0,0	0,5	19,4	1,29
2,9	16,9	1,2	18,7	1,25
5,9	34,3	1,6	18,3	1,22
8,9	51,7	2,8	17,1	1,14
9,2	53,5	3,4	16,5	1,10
9,4	54,7	3,8	16,1	1,07
9,6	55,8	4,5	15,4	1,03
9,8	57,0	4,9	15,0	1,00
10,3	59,9	5,6	14,3	0,95
10,8	62,8	6,0	13,9	0,93
11,5	66,9	6,7	13,2	0,88
12,2	70,9	7,1	12,8	0,85
12,9	75,0	7,8	12,1	0,81
14,6	84,9	9,4	10,5	0,70
14,9	86,6	9,8	10,1	0,67
15,5	90,1	10,5	9,4	0,63
15,9	92,4	10,9	9,0	0,60
16,5	95,9	11,6	8,3	0,55
16,9	98,3	12,0	7,9	0,53
17,7	102,9	12,7	7,2	0,48
18,4	107,0	13,1	6,8	0,45
19,5	113,4	13,8	6,1	0,41
25,0	145,3	14,4	5,5	0,37
47,2	274,4	16,0	3,9	0,26
72,0	418,6	17,0	2,9	0,19
91,9	534,3	17,5	2,4	0,16
129,4	752,3	18,2	1,7	0,11
140,8	818,6	18,4	1,5	0,10

h/L=0.53
Do/Di=2.43

Tabla A.17. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 8mm de profundidad y 25° de inclinación lateral, Do/Di=4.00 y h/L=0.53. Probeta ho=18.4mm.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	e=(ho-DESP)	e/L
0.0	0.0	0.0	18.4	1.23
2.8	16.3	0.4	18.0	1.20
7.6	44.2	1.1	17.3	1.15
8.6	50.0	1.6	16.8	1.12
9.5	55.2	2.2	16.2	1.08
9.8	57.0	2.7	15.7	1.05
10.2	59.3	3.3	15.1	1.01
10.3	59.9	3.7	14.7	0.98
10.6	61.6	4.4	14.0	0.93
11.1	64.5	5.5	12.9	0.86
11.6	67.4	6.0	12.4	0.83
12.5	72.7	6.6	11.8	0.79
14.0	81.4	7.6	10.8	0.72
15.0	87.2	8.2	10.2	0.68
16.0	93.0	8.8	9.6	0.64
17.4	101.2	9.8	8.6	0.57
18.4	107.0	10.4	8.0	0.53
19.6	114.0	11.0	7.4	0.49
22.5	130.8	12.1	6.3	0.42
24.5	142.4	12.6	5.8	0.39
28.3	164.5	13.3	5.1	0.34
33.2	193.0	13.7	4.7	0.31
42.7	248.3	14.3	4.1	0.27
52.4	304.7	14.8	3.6	0.24
65.4	380.2	15.3	3.1	0.21
92.6	538.4	15.9	2.5	0.17
115.3	670.3	16.4	2.0	0.13
149.8	870.9	16.9	1.5	0.10

h/L=0.53

Do/Di=4.00

Tabla A.18. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 8mm de profundidad y 30° de inclinación lateral. $D_o/D_i=13.15$ y $h/L=0.53$. Probeta $h_o=18.5\text{mm}$.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	$e=(h_o-DESP)$	e/L
0,0	0,0	0,0	18,5	1,23
0,4	2,3	0,6	17,9	1,19
3,8	22,1	1,1	17,4	1,16
7,9	45,9	1,7	16,8	1,12
9,0	52,3	2,2	16,3	1,09
10,0	58,1	2,9	15,6	1,04
10,4	60,5	3,3	15,2	1,01
10,7	62,2	3,9	14,6	0,97
11,3	65,7	5,0	13,5	0,90
12,1	70,3	6,1	12,4	0,83
12,8	74,4	6,6	11,9	0,79
13,9	80,8	7,2	11,3	0,75
14,8	86,0	7,7	10,5	0,72
16,1	93,6	8,4	10,1	0,67
17,0	98,8	8,8	9,7	0,65
18,4	107,0	9,4	9,1	0,61
19,4	112,8	9,9	8,6	0,57
21,1	122,7	10,6	7,9	0,53
22,5	130,8	11,0	7,5	0,50
25,0	145,3	11,7	6,8	0,45
30,3	176,2	12,7	5,8	0,39
34,0	197,7	13,2	5,3	0,35
38,5	223,8	13,7	4,8	0,32
47,6	276,7	14,3	4,2	0,28
55,8	324,4	14,8	3,7	0,25
73,9	429,7	15,4	3,1	0,21
91,1	529,7	15,9	2,6	0,17
126,7	736,6	16,5	2,0	0,13
157,0	912,8	17,0	1,5	0,10
156,9	912,2	17,0	1,5	0,10

$h/L=0.53$

$D_o/D_i=13.15$

Tabla A.19. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 10mm de profundidad y 10° de inclinación lateral, $D_o/D_i=1.54$ y $h/L=0.66$. Probeta $h_o=18.4$ mm.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	$e=(h_o-DESP)$	e/L
0,0	0,0	0,0	18,4	1,23
1,9	11,0	1,9	16,5	1,10
15,8	91,7	2,5	15,9	1,06
17,5	101,6	3,1	15,3	1,02
18,1	104,9	3,6	14,8	0,99
18,4	107,2	4,6	13,8	0,92
20,5	119,3	5,4	13,0	0,87
21,5	124,8	5,8	12,6	0,84
22,8	132,6	6,4	12,0	0,80
23,9	139,2	6,9	11,5	0,77
25,3	146,9	7,6	10,8	0,72
25,8	150,2	8,0	10,4	0,69
26,2	152,4	8,7	9,7	0,65
26,6	154,7	9,1	9,3	0,62
27,2	158,0	9,8	8,6	0,57
27,9	162,4	10,8	7,6	0,51
28,3	164,6	11,3	7,1	0,47
28,9	167,9	11,8	6,6	0,44
37,1	215,4	13,0	5,4	0,36
42,9	249,7	13,5	4,9	0,33
49,0	285,0	14,0	4,4	0,29
58,9	342,4	14,7	3,7	0,25
67,6	393,3	15,1	3,3	0,22
87,6	509,2	15,7	2,7	0,18
106,4	618,6	16,2	2,2	0,15
147,3	856,1	16,9	1,5	0,10
150,3	873,8	16,9	1,5	0,10

$h/L=0.66$

$D_o/D_i=1.54$

Tabla A.20. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 10mm de profundidad y 15° de inclinación lateral, Do/Di=2.15 y h/L=0.66. Probeta ho=16.3mm.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	e=(ho-DESP)	e/L
0.0	0.0	0.0	16.3	1.09
7.3	42.3	1.2	15.1	1.01
11.6	57.5	2.3	14.0	0.93
12.3	71.6	2.8	13.5	0.90
12.9	74.9	3.3	13.0	0.87
13.7	79.8	3.9	12.4	0.83
15.4	89.5	4.9	11.4	0.76
16.2	94.4	5.5	10.8	0.72
17.4	100.9	6.1	10.2	0.68
18.1	105.0	5.6	9.7	0.65
19.2	111.5	7.2	9.1	0.61
20.0	116.4	7.7	8.6	0.57
22.3	129.4	8.7	7.6	0.51
24.1	140.0	9.5	6.8	0.45
27.3	158.7	10.4	5.9	0.39
29.4	170.9	11.0	5.3	0.35
32.5	188.8	11.6	4.7	0.31
35.6	206.7	12.1	4.2	0.28
43.0	249.9	12.8	3.5	0.23
51.8	301.2	13.2	3.1	0.21
79.5	462.3	13.9	2.4	0.16
106.1	617.0	14.3	2.0	0.13
149.8	870.9	14.8	1.5	0.10

h/L=0.66
Do/Di=2.15

Tabla A.21. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 10mm de profundidad y 20° de inclinación lateral, $Do/Di=3.67$ y $h/L=0.66$. Probeta $ho=21.2mm$.

CARGA (KN)	P (MPa)	DESP (mm)	$e=(ho-DESP)$	e/L
0.0	0.0	0.0	21.2	1.41
0.6	3.5	0.4	20.8	1.39
4.8	27.9	1.1	20.1	1.34
7.5	43.6	1.5	19.7	1.31
9.1	52.9	2.8	18.4	1.23
9.4	54.7	3.9	17.3	1.15
9.4	54.7	4.4	16.8	1.12
9.4	54.7	4.9	16.3	1.09
9.8	57.0	5.5	15.7	1.05
10.9	63.4	6.5	14.7	0.98
11.4	66.3	7.1	14.1	0.94
12.0	69.8	7.7	13.5	0.90
12.9	75.0	8.7	12.5	0.83
13.3	77.3	9.3	11.9	0.79
14.4	83.7	10.5	10.7	0.71
14.8	86.0	11.0	10.2	0.68
15.3	89.0	11.5	9.7	0.65
16.0	93.0	12.2	9.0	0.60
16.5	95.9	12.6	8.6	0.57
17.5	101.7	13.3	7.9	0.53
18.0	104.7	13.7	7.5	0.50
19.2	111.6	14.4	6.8	0.45
22.9	133.1	14.8	6.4	0.43
27.3	158.7	15.3	5.9	0.39
32.3	187.8	15.9	5.3	0.35
41.6	241.9	17.0	4.2	0.28
50.6	294.2	17.5	3.7	0.25
67.6	393.0	18.2	3.0	0.20
82.9	482.0	18.6	2.6	0.17
113.4	659.3	19.2	2.0	0.13
136.6	794.2	19.7	1.5	0.10

$h/L=0.66$
 $Do/Di=3.67$

Tabla A.22. Resultados de los ensayos de forja para el dado con cavidad de 10mm de profundidad y 25° de inclinación lateral, Do/Di=15 y h/L=0.66. Probeta ho=20.2mm.

CARGA (KN)	P (MPa)	DÉSP (mm)	e=(ho-DESP)	e/L
0.0	0.0	0.0	20.2	1.35
0.2	1.2	0.7	19.5	1.30
5.8	33.7	1.7	18.5	1.23
7.5	43.6	2.2	18.0	1.20
8.4	48.8	2.9	17.3	1.15
8.6	50.0	3.3	16.9	1.13
8.9	51.7	4.0	16.2	1.08
9.3	54.1	5.6	14.6	0.97
10.6	61.6	6.8	13.4	0.89
11.3	65.7	7.3	12.9	0.86
11.8	68.6	7.7	12.5	0.83
12.8	74.4	8.4	11.8	0.79
14.2	82.6	9.4	10.8	0.72
14.9	86.6	9.9	10.3	0.69
15.6	90.7	10.4	9.8	0.65
16.5	95.9	11.1	9.1	0.61
17.2	100.0	11.5	8.7	0.58
18.2	105.8	12.2	8.0	0.53
20.4	118.6	13.2	7.0	0.47
21.9	127.3	13.7	6.5	0.43
24.3	141.3	14.4	5.8	0.39
26.5	154.1	14.9	5.3	0.35
30.8	179.1	15.5	4.7	0.31
34.9	202.9	15.9	4.3	0.29
48.0	279.1	16.6	3.6	0.24
64.4	374.4	17.2	3.0	0.20
81.4	473.3	17.7	2.5	0.17
103.7	602.9	18.1	2.1	0.14
131.3	763.4	18.7	1.5	0.10

h/L=0.66

Do/Di=15

REFERENCIAS

- 1.- Von Mises, R., " Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand", Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-phys. Klasse, 582-592, 1913.
- 2.- Hencky, H. Zur., " Theorie plastischer Deformationen und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen", Zeits. Angew. Math. Mech. 4, 323-334, 1924.
- 3.- Rowe G.W., "Conformado de los metales", Ed Urmo, Bilbao, 1972, p. 72.
- 4.- Bridgman, P.W., "Effects of high hydrostatic pressure on the plastic properties of metals", Rev. Mod. Phys. 17., pp. 3-14, 1945.
- 5.- Rowe, G.W., ob. cit., p. 22.
- 6.- Idem., p. 72.
- 7.- Idem., p. 20.
- 8.- Hosford, W., Caddell, R. M., "Metal Forming Mechanics and Metallurgy", 2a Ed, Prentice-Hall, Englewood, 1993., p 54.
- 9.- Schroeder, W., Webster, B., "Press-Forging Thin Section : Effect of Friction, Area, and Thickness on Pressures Required", Journal of Applied Mechanics, September., pp. 289-294. 1940.
- 10.- Idem., p. 289.
- 11.- Idem., p. 291.
- 12.-Sabroff, A. M., Boulger, F. W., Henning, H. J., "Forming Materials and Practices", Reinhold Book Corporation, New York, 1968., pp. 58-59.
- 13.- Subramanian, T. L., and T. Altan., "A Practical Method for Estimating Forging Loads with the Use of a Programmable Calculator" , J Applied Metalworking, Vol 1 no 2 1980 pp 60-68.
- 14.- Mielnik, E. M., " Metalworking Science and Engineering", McGraw-Hill, New York 1991 pp. 563-564.
- 15.- Sabroff, A. M., ob. cit., p. 59.

16.- Altan, T., "Computer Simulation to Predict Load Stress, and Metal Flow in an Axisymmetric Closed Die Forging", Metal Forming., A. L. Hoffmann., Plenum Press, New York, 1971., pp 249-273.

17.- Mielnik, E. M., ob. cit., p. 567.

18.- Biswas, S. K., and B. W. Rooks., "Application of a Computer Simulation Technique to Estimate Load and Energy in Forging", Proc. 13th Int. Mach. Tool Desing and Research Conf., S.A. Tobias (ed), 1972., pp. 371-381.

19.-Altan, T., ob. cit., pp. 249-273.

20.- Rowe, G. W., ob. cit., p. 309.

21.- Idem., p. 27.

22.- Idem., p. 312.

23.- Hill, R., "The Mathematical Theory of Plasticity", Oxford Univ. Press, 1956., pp. 215-230.

24.-Johnson, W., Y Mellor, P. B., "Plasticity for Mechanical Engineers", Van Nostrand, 1962.

25.- Steck, E., Schmid, K., And Adler, G., Bulk-Metal Forming, Forging,pág 11.42-11.43.

26.- McDemott, R. P., and A. N. Bramley., "An Elemental Upper-Bound Technique for General Use in Forging Analysis", Proc. Of 15th Mach. Tool Desing and Res. Conf. 1974, Vol M. S. A. Tobias and F. Koenigsberger., pp. 437-443.

27.-Hill, R., "The Mathematical Theory of Plasticity", Claredon Press, Oxford, 1950.

28.- Mielnik, E. M., ob. cit., p. 553.

29.- Balogun, S. A., " Die Load and Stresses in Press Forging ", PhD Thesis, University of Aston in Birmingham., 1971.

30.- Thomas, A., and I Bannister., "The Accuracy of Forging Load Estmation in Drop Forging", Proc. 17th Int. Mach. Tool Desing and Research Conf. S. A. Tobias (ed), 1976., pp. 343-353.

31.-Mielnik, E. M., ob. cit., p 548.

32.- Idem., p. 549.

- 33.- Schey, J. A., " The More Common Fabrication Prosses", Vol 1 , part 3, Techniques of Metals Research, R. F. Bunshah (ed) Interscience Publishers, 1968., pp. 1472.
- 34.- Del Río, J., "Deformación Plástica de los Materiales. La forja y la laminacion en caliente", Ed GG, Barcelona 1980., pp. 214-226.
- 35.-Chamouard, A., "Estampage et Forge", V.I y II Ed. Dunod , Paris, 1964.
- 36.-Del Río, J., ob. cit., p. 53.
- 37.-Idem., pp. 214-219.
- 38.- Idem., p.217.
- 39.-Zienkiewicz, O.C., Taylor, R. L.," El metodoo de los Elementos Finitos", 4a Ed V1 y 2 McGraw-Hill, Barcelona, 1994.
- 40.-American Machinis Magazine, "Formado de metales ", McGraw-Hill, Mexico 1988., p.194.
- 41.- Del Río, J., ob. cit., p.98.
- 42.-Rowe, G.W.,ob. cit., p.37.
- 43.- Verhoeven, J. D. " Fundamentos do Metalúrgia Física", Ed Limusa, México 1987.
- 44.-Rowe, G. W., ob. cit., p. 37.
- 45.-Verhoeven, J. D., ob. cit., p 348.
- 46.-Idem., p. 375.
- 47.- Idem., p. 371.
- 48.-dem., p. 372.
- 49.- Rowe, G. W., Ob. cit., p. 46.
- 50.- Atlas Stress Curv.
- 51.-Rowe, G. W., ob. cit., p. 47.
- 52.-Altan,T., S. Oh., and H. L. Gegel,," Metal Forming: Fundamentals and Applications", ASM Metals Park Ohio, 1983., p. 149.

- 53.-Del Río, J., ob. cit., p.218.
- 54.-Idem., pp.187-189.
- 55.- Rowe, G. W., Ob cit., p. 337.
- 56.- Schey A. J., "Tribology in Metalworking", 2a Ed, ASM Ohio 1983., p.503.
- 57.-Del Río, J., ob. cit., p. 180.
- 58.- American Machinist Magazine. "Formado de metales", McGraw-Hill, Mexico, 1987., p.194.
- 59.- Del Río, J., ob. cit, p. 179.
- 60.- Vickery, J., Monaghan, J., " An Upper-Bound and Analysis of a Forging-Extrusion Process", Journal of Materials Processing Technology 55 (1995) 103-110., pp. 103-110.
- 61.-Del Río, J., ob. cit., p. 186.
- 62.-Fox, R. W., McDonald, A. T., "Introducción a la Mecánica de Fluidos", 4a Ed McGraw-Hill, México, 1995., pp.318-319.
- 63.-Idem., pp. 319-320.
- 64.-Streeter, V. L., Wylie, E. B., "Macánica de los Fluidos" 8a Ed McGraw-Hill, México, 1988., p. 168.
- 65.- Navarrete, M. J., Robert, N. T., Noguez A., M. E., Ramirez V. J., "Dimensional Analysis for Predicting The Stresses in Forging" Sensors and Modeling in Materials Processing: Techniques and Applications, Edited by Viswanathan, S., Reddy, R. G., Malas, J. C., Symposium The Mineral, Metals, and Materials Society, Orlando Flor. February 9-13 1997, pp. 23-33.
- 66.-Idem., p. 25.
- 67.- Idem. p.26
- 68.- Rowe, G. W., Ob. cit., p.331.
- 69.- Idem., p. 46.
- 70.- Idem., p.44.
- 71.- Chamouard, A., ob cit. p241.

72.- Lange, K , Handbook of Metal Forming . McGraw - Hill New York, 1985. p 11.33

73.- Mielnik, E. M., ob. cit., p 579.

74.- Lee, Rong-Shean Chen, T. C. Pan, Ming-Ching . "Evaluation of the preform desing of a stepped forging part by coupled thermoviscoplastic fine-element analysis and visioelasticity "., Journal of Materials Processing Technology 57 (1996) 278-287.

75.- Altan,T., S. Oh., and H. L. Gegel., ob cit, p 178-182.