

18
208917

UNIVERSIDAD PANAMERICANA

ESCUELA DE INGENIERIA

Incorporada a la Universidad Nacional Autónoma de México



**ANALISIS DE LA DEFORMACION Y DE LOS ESFUERZOS
EN EL PROCESO DE FORJA ABIERTA**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

T E S I S P R O F E S I O N A L

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

Area Mecánica Electrica

P R E S E N T A

GERARDO MIGUEL OLLIVIER SANCHE

Director de Tesis:

Ing. Alfonso G. Leal Guajardo

MEXICO, D. F.

1990.



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

INDICE

| | página |
|---|--------|
| Introducción | 1 |
| <u>Capítulo 1</u> | |
| - La FORJA - | |
| 1.0 - Definición | 3 |
| 1.1 - Antecedentes históricos | 3 |
| 1.2 - Principios Metalúrgicos | 6 |
| 1.3 - Tipos de máquinas | 8 |
| 1.4 - Procesos de forja | 15 |
| 1.5 - Metales y aleaciones convenientes | 22 |
| 1.6 - Defectos de forja | 25 |
| <u>Capítulo 2</u> | |
| - Análisis del comportamiento de la deformación - | |
| - y de los esfuerzos en el proceso de forja abierta - | |
| 2.1 - Análisis teórico de la deformación y esfuerzos | 27 |
| 2.1.1 - Análisis de deformación | 28 |
| 2.1.2 - Análisis de esfuerzos | 31 |
| 2.2 - Consideraciones iniciales del análisis | 37 |
| 2.2.1 - Factor material y temperatura | 37 |
| 2.2.2 - Factor geometría | 38 |
| 2.2.3 - Factor reducción del espesor | 38 |
| 2.2.4 - Factor relación de agarre | 38 |
| 2.3 - Diseño y construcción de la herramienta | 40 |
| 2.3.1 - Condiciones y limitantes de trabajo | 40 |
| 2.3.2 - Elección del metal de la herramienta | 42 |

| | |
|--|----|
| 2.3.3 - Cálculos y dibujos de las herramientas | 43 |
| 2.4 - Descripción de la etapa de ensayos de forja | 48 |
| 2.4.1 - Preparativos para los ensayos | 48 |
| 2.4.2 - Fundición del plomo | 50 |
| 2.4.3 - Ensayos de forja | 51 |
| 2.5 - Medición de deformaciones y fuerzas | 54 |
| 2.5.1 - Efecto de "abarrilamiento" | 54 |
| 2.5.2 - Método para el cálculo de ancho final prom. | 55 |
| 2.5.3 - Medición de la deformación en las probetas | 61 |
| 2.5.4 - Medición de los esfuerzos en las probetas | 67 |
| 2.6 - Análisis experimental de la deformación | 72 |
| 2.6.1 - Procesamiento de los datos | 72 |
| 2.6.2 - Aproximación funcional del coeficiente S en el rango limitado por el estudio | 74 |
| 2.6.3 - Comportamiento general del coeficiente de ensanchamiento S | 78 |
| 2.6.4 - Discusión sobre los resultados | 80 |
| 2.7 - Análisis experimental de los esfuerzos | 86 |
| 2.8 - Conclusiones del análisis | 90 |
| 2.8.1 - Abarrilamiento | 90 |
| 2.8.2 - Generales | 91 |
| Bibliografía | 92 |

INTRODUCCION

A nivel nacional, poco se ha investigado sobre el comportamiento de la deformación y de los esfuerzos en los procesos de forja abierta con datos de superficies planas.

La forja es probablemente la madre de todos los procesos de conformado de materiales debido a su vasta historia y a su amplia aplicación en los procesos de manufactura. El estudio de los procesos de forja es también una parte fundamental de la preparación profesional de todo Ingeniero Mecánico. De aquí surge el gran interés por la investigación sobre este tema.

En la literatura, se encuentran algunos autores a nivel internacional que han profundizado sus estudios en los procesos de forja abierta, se puede mencionar principalmente a Tomlinson y Stringer, Wistreich y Shutt, Alexander y Takahashi, Watts y Ford. Estos autores han enunciado ecuaciones o condiciones de operación que definen el comportamiento de la deformación y de los esfuerzos.

En términos generales, el objetivo de la tesis es:

HACER UNA SERIE ORDENADA DE ENSAYOS DE FORJA PARA ANALIZAR EMPIRICAMENTE, COMPROBAR Y , EN CASO DE SER POSIBLE, MEJORAR Y AMPLIAR LA INFORMACION MENCIONADA EN LA LITERATURA SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LA DEFORMACION Y ESFUERZOS EN EL PROCESO DE FORJA LIBRE O ABIERTA.

La tesis está dividida en 2 capítulos:

En el primero, como preparación al análisis, se exponen :

- 1 - La definición de forja.
- 2 - Los principios metalúrgicos de forja.
- 3 - Las máquinas y procesos de forja.
- 4 - Los materiales y defectos de forja.

El segundo capítulo, que es la parte importante de la tesis, contiene todo el desarrollo:

- 1 - Análisis teórico de la deformación y esfuerzos
- 2 - Consideraciones iniciales del análisis
- 3 - Diseño y construcción de la herramienta
- 4 - Descripción de la etapa de ensayos de forja
- 5 - Medición de deformaciones y fuerzas
- 6 - Análisis empírico de la deformación
- 7 - Análisis empírico de los esfuerzos
- 8 - Conclusiones del análisis

CAPITULO 1

- La forja -

1.0 Definición

La FORJA es una operación de conformado de materiales que consiste en deformar un metal aplicando esfuerzos de compresión aprovechando las propiedades plásticas del metal. Para que un metal sea forjable debe presentar condiciones de plasticidad, ya sea en frío o en caliente.

La plasticidad es una propiedad que tienen algunos materiales al aceptar desplazamientos atómicos sin perder cohesión, como por ejemplo el plomo.

1.1 Antecedentes históricos de la forja.

La forja es uno de los métodos de conformado más antiguos. Por medio de ésta, los herreros fabricaban herramientas, armas, herraduras, y otros utensilios para el hogar.

En un principio, el método más usual que practicaba el herrero era calentar la pieza de trabajo con la ayuda de un fuelle. Después recurrió a calentar en una cama llamada fragua en donde se quemaba carbón a fogón abierto. Cuando la pieza alcanzaba la temperatura deseada, el herrero la martillaba en el yunque. El yunque es una maza de acero con una superficie plana en la parte superior, a un lado tiene un cuerno en forma de cono para hacer superficies curvas de diferentes radios y en el centro tiene un agujero para acomodar varios tipos de herramientas de forja.

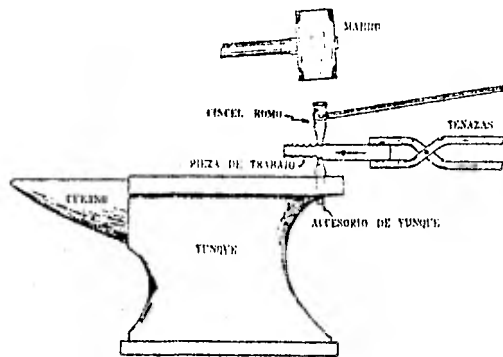


Fig. 1 - El yunque y sus accesorios

Durante el forjado, la pieza de trabajo se sujeta con un par de tenazas. Las herramientas que se usan como utensilios de forja no son las que golpean directamente a la pieza, éstas se ponen en contacto con la pieza y otra persona golpea la herramienta con un marro. El cincel romo es una herramienta para estirar la pieza mediante la acción de deformación ejercida por el cincel romo por un lado y la reacción del yunque por el otro.

El herrero puede cortar metal utilizando cinceles y hacer agujeros mediante punzones. También puede soldar piezas de hierro, limpiando las superficies de contacto y aplicando un fundente, como lo es la arena, y luego golpeando una pieza contra la otra.

Hasta el siglo XIII, la forja a mano fue el único método de trabajar metales y aleaciones sólidas. La primera evidencia documental del uso de potencia hidráulica para la forja fue en 1323, donde en Moyeuve Francia, se usó una rueda con alabes para accionar fuelles y para impulsar martinetes.

A principios del siglo XIX, el vapor se aplicaba ya en el proceso de forja. En 1838 un ingeniero escocés llamado James Nasmyth perfeccionó el martinete de vapor de doble efecto, en el cual el martillo se conectaba directamente a un émbolo que trabajaba en un cilindro de vapor. Sin embargo fue hasta la mitad del siglo XIX, cuando la mayor parte de los trabajos de forja se hacían todavía con martillo y yunque, que comenzaron a construirse dados de metales duros con impresiones simples en sus caras.

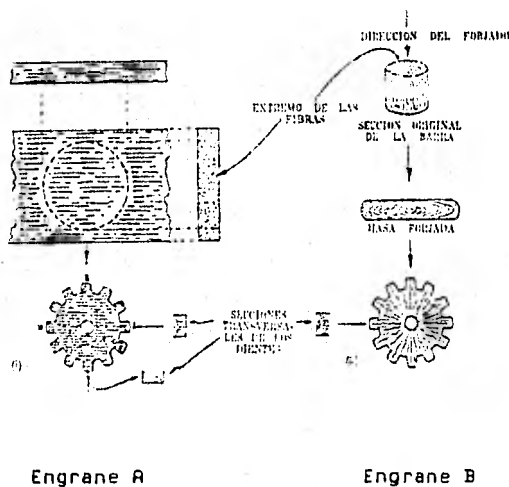
Hoy en día los forjados modernos se hacen comprimiendo el metal caliente en un juego de dados, para obtener una forma específica producida por la cavidad gravada en los dados. Este tipo de forja se llama 'Forja de dado cerrado' o 'Forja en estampa' y requiere el uso de dados maquinados y de equipos de transmisión de potencia muy alta.

1.2 Principios metalúrgicos de la forja.

Generalmente la materia prima en los trabajos de forja viene en forma de palanquillas (bilets), barras o placas trabajadas por laminación en caliente. Las impurezas del metal laminado en caliente tienden a formar una estructura fibrosa en la dirección de laminado, y por lo tanto la pieza deja de ser isotrópica y por consecuencia presenta diferentes características mecánicas en la dirección de las fibras que perpendicularmente a ellas.

Cuando se hace un diseño de forja es importante que la dirección de la fibra sea paralela a los esfuerzos normales grandes y sea perpendicular a los esfuerzos cortantes grandes.

Por ejemplo se puede mencionar el caso de un engrane A maquinado a partir de una placa laminada y un engrane B maquinado a partir de una pieza forjada (Fig. 2) :



- Figura 2 -

1.3 Tipos de máquinas para forjar.

Existen dos tipos principales de máquinas para efectuar un proceso de forja: el MARTILLO y la PRENSA.

El MARTILLO, también llamado martinete o martillo pilón, es versátil y rápido, es la versión tecnológicamente más moderna del martillo y yunque del herrero. Este consiste en una maza que se deja caer o se impulsa hacia abajo para golpear la pieza de trabajo montada en un yunque.

Hay varios tipos de martillos. El primero que se usó fue el martillo llamado "Martinete de báscula", éste tenía una maza unida al extremo de una viga articulada. La viga se elevaba por medio de un mecanismo de levas impulsado hidráulicamente y se dejaba caer efectuando así un movimiento circular.

Posteriormente surgen los MARTILLOS DE SIMPLE EFECTO en los cuales la energía de golpeo se debe únicamente a la fuerza de gravedad. Hay dos tipos principales de martillos de simple efecto:

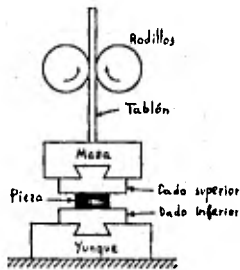
A - EL MARTILLO DE TABLON (Fig. 4): La maza superior está sujeta a uno o más tablones que son impulsados hacia arriba por medio de rodillos de fricción motrices. A cierta altura, ajustada mecánicamente, los rodillos liberan los tablones dejándolos caer junto con la maza superior. La capacidad de estos martillos es de 250 a 5000 Kg. de fuerza aproximadamente.

B - EL MARTILLO DE GRAVEDAD (Fig. 5) con levantamiento neumático:

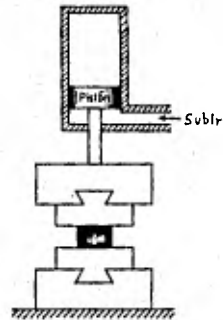
La maza superior está sujeta al vástago de un pistón que funciona con aire comprimido (antiguamente se usaba vapor). La altura de la maza es controlada por unas argollas móviles de control de carrera que accionan un brazo oscilante y éste libera la presión de aire en el cilindro. Estos martillos tienen la misma capacidad que los martillos de tablón y están clasificados como de nivel ligero en cuanto a la magnitud de los procesos de forja. La energía desarrollada por un martillo de simple efecto es: $E = m \cdot g \cdot h$ donde m : masa de la maza - Ec. 1 -

g : aceleración de la gravedad

h : altura de la caída de la maza



- Figura 4 -



- Figura 5 -

Los MARTILLOS DE DOBLE EFECTO (Fig. 6) funcionan con un cilindro que se puede accionar la maza hacia arriba o hacia abajo por medio de presión de vapor. En estos martillos se puede controlar la intensidad del golpe por medio de dos parámetros:

1. La altura de la maza
2. La presión en el cilindro

Para absorber adecuadamente la fuerza del golpe transmitido por el martillo, el yunque debe pesar entre diez y veinte veces más que la maza. Generalmente el yunque está soportado independientemente de la estructura de la máquina, éste se monta sobre una base de acero que a su vez se monta sobre soportes de roble en cimentaciones macizas de hormigón.

La capacidad de estos martillos es de 500 a 12000 Kg de fuerza.

La energía desarrollada por el martillo de doble efecto es:

$$E = m \cdot g \cdot h + p \cdot A \cdot h \quad \text{en donde} \quad - \text{Ec. 2} -$$

p : presión del fluido (constante)

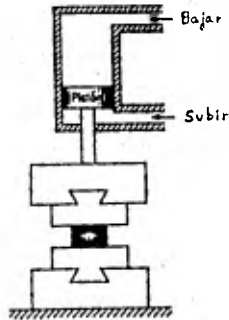
A : área del cilindro

m : masa de la maza

g : aceleración de la gravedad

h : altura de la caída de la maza

El primer factor de esta ecuación representa la energía potencial de la maza y el segundo la energía suministrada por la presión del fluido en el cilindro.



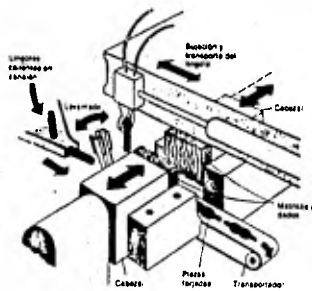
- Figura 6 -

En el MARTILLO DE CONTRAGOLPE o DUPLEX, el yunque y la maza son móviles por lo tanto tienen el mismo peso. Las fuerzas de golpe se contrarrestan internamente y no hay necesidad de hacer cimentaciones macizas. Hay dos tipos de martillos de contragolpe:

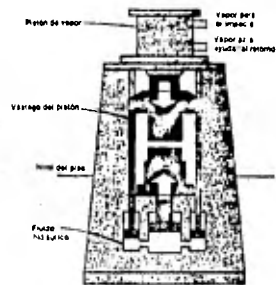
A. Los horizontales (Fig.7) B. Los verticales (Fig.8) .

Los martillos verticales tienen un sistema de impulsión de aire comprimido aplicado al cabezal superior. Este está sujeto a unos pistones secundarios que funcionan hidráulicamente. Al bajar, estos pistones accionan el cabezal inferior hacia arriba y se produce entonces el contragolpe. Después del impacto, el peso del cabezal inferior es suficiente para forzar, por acción hidráulica, el retroceso del cabezal superior.

Los martillos de contragolpe horizontales funcionan con cabezales simétricos unidos a dos pistones colineales. Generalmente se usan estos martillos en procesos automáticos para producciones en serie. La capacidad de estos martillos es de 1500 a 3500 Kg. de fuerza de golpeo.



- Figura 7 -



- Figura 8 -

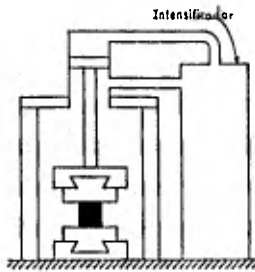
Martillos de Contragolpe

La PRENSA se usa para forjar piezas de gran tamaño , su operación es lenta, más precisa que el martillo y generalmente la pieza de trabajo debe recalentarse varias veces durante el proceso. Como en la prensa la deformación de la pieza es lenta, se lleva a cabo una deformación uniforme en todo el volumen de la pieza. Los dados en una prensa tienen una vida mayor que en un martillo porque éstos aguantan más la acción de compresión que la de golpeo.

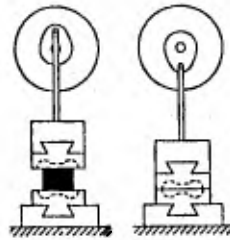
Las prensas de forja son de operación hidráulica o mecánica:

Las PRENSAS HIDRAULICAS (Fig.9) son para trabajos pesados y se usan capacidades de 500 hasta 50000 toneladas en casos excepcionales. Generalmente las prensas hidráulicas operan con bombas que aumentan la presión de aceite y, por medio de uno o varios pistones de gran tamaño, elevan o empujan hacia abajo la maza de la prensa. La diferencia principal entre las prensas y los martillos de doble efecto es que las prensas son de funcionamiento lento y de capacidad grande y los martillos son rápidos y de menor capacidad pero ambos funcionan mediante un sistema cilindro-pistón.

La energía suministrada por la prensa hidráulica está dada por la misma ecuación que la del martillo de doble efecto pero en este caso el factor preponderante es la energía de presión del pistón.



- Figura 9 -



- Figura 10 -

La PRENSA MECANICA (Fig.10) es de menor capacidad que la hidráulica (300 a 12000 T) y es de acción más rápida. La maza es forzada hacia abajo por medio de un mecanismo de excéntrico-manivela, de cuñas o de tornillo vertical, todos accionados por motores eléctricos.

La energía de una prensa mecánica está dada por la ecuación:

$$E = \frac{1}{2} * I * (w_i^2 - w_f^2) \quad - \text{Ec. 3 -}$$

$$\text{o } E = \frac{1}{2} * I * (\pi/30)^2 * (n_i^2 - n_f^2) \quad - \text{Ec. 4 -}$$

en donde I : momento de inercia de la manivela

w_i : velocidad angular inicial (rad/seg)

w_f : velocidad angular final (rad/seg)

n_i : RPM inicial

n_f : RPM final

Dentro de las máquinas de forja hay varios tipos de máquinas menos importantes que los martillos o las prensas pero que se usan con frecuencia en la industria:

Las MAQUINAS DE FORJA son prensas mecánicas de tipo excéntrico-biela colocadas horizontalmente sobre uno de sus lados. El tipo más común de máquinas de forja son las recaladoras horizontales.

Las MAQUINAS DE FORJA CON RODILLOS se emplean principalmente para operaciones de preforjado. Estas reducen la sección transversal de los lingotes o barras al pasarlos entre las ranuras de los rodillos. Mientras el peso de la pieza lo permita, esta operación puede ser manual. De lo contrario, la pieza se sujeta con una grúa de tal manera que pueda bascular.

Las máquinas ROLADORAS DE ANILLOS producen anillos sin costura de dimensiones y sección transversal especificada, comprimiendo el material entre dos o más rodillos formadores rotatorios.

Las MAQUINAS HERF son máquinas de forja de alta energía. El metal es deformado a velocidades muy altas: mientras que en los martillos de gravedad más rápidos se alcanzan 9 m/seg, las máquinas HERF golpean la pieza a velocidades de 6 a 24 m/seg. La fuerza que impulsa a las máquinas HERF es un gas a muy alta presión: usualmente el nitrógeno. Este se encuentra en un recipiente a alta presión y es liberado súbitamente. Debido a que los golpes son contrarrestados, no se transmite impacto al piso.

1.4 Procesos de forjado

En la forja moderna hay cuatro procesos principales:

- 1 - Forja libre o abierta
- 2 - Forja con dados cerrados o en estampa
- 3 - Forja circular
- 4 - Forja por recalcado

La FORJA LIBRE es una extensión de la antigua forja del herrero ya que se utilizan herramientas de geometría sencilla para darle forma a la pieza de trabajo, la diferencia es que ahora se usan martillos o prensas mecánicas para dar la fuerza de compresión .

Este método de forja se aplica para: piezas de gran tamaño, producciones pequeñas o para el preformado de piezas. Cuando se trabaja adecuadamente en forja abierta se puede obtener un trabajo mecánico más uniforme que en un proceso de laminado en caliente.

La forja libre más sencilla es la reducción del espesor de una pieza cilíndrica: 'taco' o 'billet' utilizando dos dados con caras planas.

En la forja libre abierta hay dos coeficientes importantes:

- El coeficiente de ensanchamiento: relaciona el aumento del ancho con respecto a la reducción del espesor de la pieza.
- El coeficiente de elongación: relaciona el aumento de la longitud con respecto a la reducción del espesor de la pieza.

La FORJA DE DADO CERRADO consiste en comprimir un metal caliente entre útiles de trabajo denominados como 'dados' o 'estampas' y obligar al metal a ocupar todo el espacio de la cavidad formada por los dados. Por el costo que este proceso representa, es recomendable usarlo cuando se requiera una producción grande. En este método se usan tanto los martillos como las prensas.

La forja de dado cerrado es un proceso complicado y se requiere experiencia y habilidad para realizarlo. El fabricante de los dados debe saber como se comporta el metal en caliente, cuales son los esfuerzos de flujo y las condiciones de fricción.

Los dados se fabrican a partir de lingotes forjados. Las impresiones del dado se hacen con la ayuda de fresas de diversas formas. La operación de fresado puede ser manual, con un punzón que sigue el perfil de un patrón maestro o también es muy común efectuar el proceso con la ayuda de una electro-erosionadora. Cuando la forma de la impresión dentro del dado es correcta, ésta se pule para obtener una superficie lisa y permitir un buen deslizamiento del metal fundido. Por último se temple el dado para incrementar su dureza y así alargar su vida de trabajo.

Debido a que los dados de impresión están sujetos a esfuerzos grandes y deben resistir al desgaste, se usan generalmente aceros níquel-cromo-molibdeno y en el caso de aleaciones no ferrosas se usan aceros cromo-vanadio.

Un ejemplo típico de forjado con dados cerrados es la biela de un automóvil. A continuación se muestra el dibujo de un dado con todos los elementos necesarios para la fabricación de la biela:

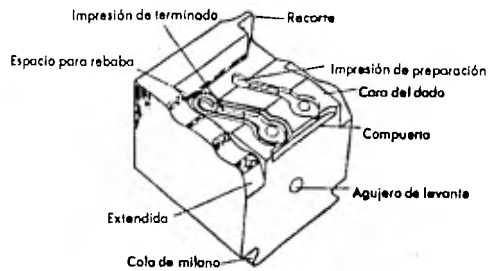


Fig. 11 - Dado para forja cerrada

Para el diseño de los dados de forjado se deben considerar cuatro puntos importantes:

Primer punto - Dimensiones y peso de la pieza de trabajo.

Cuando se calculan las dimensiones del dado en base a las de la pieza hay que considerar sobre-espesores por:

- maquinados posteriores a la forja.
- dilatación térmica.

Para facilitar el diseño de los dados se han hecho clasificaciones de las piezas según su geometría:

- piezas compactas (cúbicas o esféricas)
- piezas planas
- piezas alargadas

Estos 3 tipos de piezas están subdivididos en varias clasificaciones según la simetría y la complejidad de la pieza.

Con esta clasificación se puede estimar el costo de fabricación de la pieza y además facilita los diseños de preformado.

Segundo punto - Número de preformados y su forma geométrica.

El diseño de los dados para los preformados es el más difícil en la etapa de diseño. Ciertas consideraciones son importantes, como por ejemplo:

- 1 - El área del preformado en cualquier sección perpendicular a la dirección del golpe debe ser menor o igual al área de la sección transversal de la pieza acabada más la de la rebaba.
- 2 - Todos los radios del preformado deben ser superiores a los de la pieza acabada.
- 3 - La pieza preformada debe ser más alta y angosta que la pieza acabada.

Tercer punto - Dimensiones de la cavidad para rebaba en el preformado y forjado final.

Para asegurar el llenado completo del metal fundido en las cavidades de los dados es necesario tener un excedente en el volumen de la pieza inicial. El dado deberá tener una cavidad adicional para el alojamiento de la rebaba. Generalmente la cavidad para rebaba se encuentra distribuida alrededor de la cavidad principal y su espesor depende de la forma de la pieza, de la cantidad de metal excedente y del tipo de material que se esté forjando. Si el espesor de la cavidad es muy pequeño, el metal no podrá fluir por la cavidad y los esfuerzos en el dado se verán aumentados produciendo un desgaste excesivo y en casos críticos una fractura. Si el espesor de la cavidad es grande, el metal tenderá a irse muy fácilmente por la cavidad de rebaba y no a llenar por completo la impresión del dado.

Cuarto punto - Fuerza y energía para forjar la pieza.

Para calcular los esfuerzos necesarios para forjar una pieza se usan 3 enfoques según la exactitud que se quiera obtener.

El primero y más sencillo es estimar los esfuerzos en base a información especificada en tablas de piezas del mismo material y de forma similar.

El segundo enfoque es más exacto porque es una aproximación empírica. Schey define la fuerza de forja como:

$$F = \sigma \cdot A \cdot C \quad \text{en donde} \quad - \text{Ec. 5} -$$

σ : esfuerzo teórico promedio.

A : area transversal de la pieza incluyendo la de rebaba.

C : factor que depende de la forma de la pieza.

- para forja abierta de una pieza con caras planas.

$$C = 1.2 \text{ a } 2.5$$

- para forja de piezas simples con dados cerrados.

$$C = 3 \text{ a } 8$$

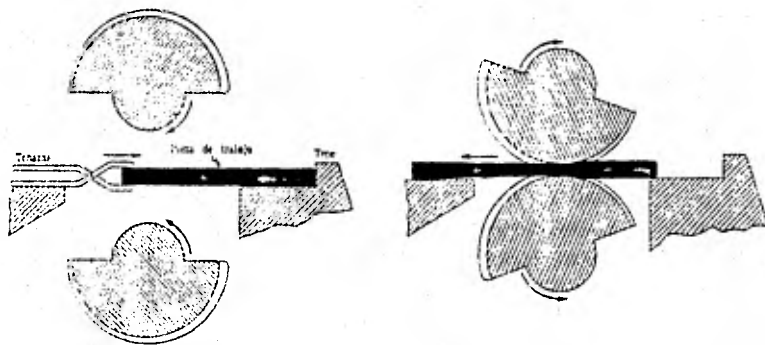
- para forja de piezas complejas con dados cerrados.

$$C = 8 \text{ a } 12 .$$

El tercer enfoque es conocido como análisis de bloques y se usa para piezas con superficies complejas. Este método consiste en dividir la pieza en formas geométricas simples, llamadas bloques, de las cuales se conocen con anterioridad sus fuerzas de forja. La fuerza de forja total necesaria es la sumatoria de las fuerzas de cada uno de los bloques que forman la pieza.

EL FORJADO CIRCULAR consiste en introducir la pieza de trabajo entre dos rodillos en movimiento. Los rodillos son semi-cilindricos y están ranurados para darle una forma específica a la pieza de trabajo.

La forja por rodillos se hace cuando se requiere estirar una pieza con sección transversal no uniforme en su eje principal. Con este proceso se pueden fabricar: flechas de automóviles, ejes o palancas de velocidades. Pero su aplicación principal es el preformado de componentes que serán acabados en forjado por estampa. En la siguiente figura se muestra la operación del forjado circular:



- Figura 12 -

El proceso de FORJADO POR RECALCADO fue creado para cabecear pernos, pero ahora se utiliza para producir una gran variedad de componentes aprovechando las propiedades mecánicas obtenidas durante el proceso de forjado.

En este proceso se emplean máquinas o prensas de recalado. Estas máquinas tienen en la parte fija un par de pinzas semi-circulares maquinadas de tal manera que sujetan firmemente la pieza. En la parte móvil se localiza el dado que golpea y da forma a la pieza. Cuando se hace un diseño de dados para forjado por recalado se tienen que tomar en cuenta tres reglas fundamentales formuladas por E.R. Frost:

- Para evitar el pandeo de la pieza, la longitud de metal que sobrepase el extremo del dado fijo tiene que ser menor a tres veces el diámetro de la pieza.

- El máximo aumento que se puede obtener en la sección transversal con un solo golpe es de una y media veces el diámetro de la pieza.

- Si el metal sobrepasa el extremo del dado fijo con una longitud superior a tres veces el diámetro, se puede forjar con la condición de usar un dado que limite el aumento del diámetro a una y media veces el diámetro inicial.

El rango de piezas forjadas por recalado va desde 30 gr. hasta 230 Kg. Además de cabecear clavos y tornillos se pueden hacer engranes ya que se obtienen buenas propiedades de resistencia a los esfuerzos transversales en los dientes.

1.5 Metales y aleaciones convenientes para la forja.

La selección del material adecuado para forjar en aplicaciones particulares es un procedimiento complejo, combina los conocimientos e interrelaciones de varias tecnologías tales como: mecánica, metalurgia, teoría y práctica de resistencia de materiales y costos de producción.

Los metales más fácilmente forjables son:

- 1 - Plomo a temperatura ambiente.
- 2 - Aluminio y sus aleaciones entre 300 y 550 °C.
- 3 - Magnesio y sus aleaciones entre 280 y 550 °C.
- 4 - Cobre y sus aleaciones 590 y 890 °C.
- 5 - Aceros dulces entre 800 y 1300 °C.

A continuación se mencionarán algunas características de forjabilidad de estos metales.

EL Plomo.

La aplicación de este metal en la industria es muy limitada por ser altamente dúctil y no presentar una dureza conveniente. Por consecuencia no es nada común utilizar el plomo en un proceso de forja. Sin embargo, este metal tiene a temperatura ambiente, las características ideales de deformación plástica que tienen otros metales a temperaturas más elevadas.

El Aluminio y sus aleaciones.

Este material puede ser forjado rápidamente en formas complejas y precisas. Sus aleaciones son dúctiles y forjables en troqueles a una temperatura muy cercana a la del metal puro, las presiones de forja son bajas pero varían con la composición de la aleación. Se recomienda forjar con prensa cuando se requieren deformaciones intensas. A continuación se muestran algunas aleaciones con sus rangos respectivos de temperaturas de forja:

- Tabla 1 -

| Aleación | Temp. Forja (°C) | Forjabilidad |
|----------|------------------|-----------------------|
| 1100 | 310 - 560 | e/e → prensa/martillo |
| 2014 | 370 - 480 | e/e e: excelente |
| 2024 | 370 - 480 | e/e b: buena |
| 2025 | 420 - 480 | e/e r: regular |
| 2218 | 370 - 480 | e/b m: mala |

El Magnesio y sus aleaciones.

Las aleaciones se pueden forjar en prensas hidráulicas de acción lenta, sin embargo se agrietan en los martillos debido a la deformación rápida, por lo cual es común que las piezas sean extruidas antes de ser forjadas.

- Tabla 2 -

| Aleación | Temp. Forja (°C) | Forjabilidad |
|----------|------------------|--------------|
| ZK21A | 290 - 370 | b/m |
| AZ31B | 290 - 420 | b/m |
| AZ61A | 310 - 420 | b/m |
| ZK60A | 270 - 400 | e/m |
| AZ80A | 290 - 410 | b/m |

El Cobre y sus aleaciones.

Esta familia de materiales es altamente dúctil a temperatura ambiente y su forjabilidad no es afectada por un incremento de la velocidad de deformación. Se recomienda forjar con martillo ya que la temperatura de la pieza de trabajo se mantiene más fácilmente. Ciertas aleaciones no pueden ser forjadas debido a que se agrietan y otras son difíciles de forjar por sus altas temperaturas de forja.

- Tabla 3 -

| Aleación | Temp. Forja (°C) |
|------------------------------|------------------|
| Cobre comercialmente puro | 760 - 870 |
| 377 bronce forjable | 650 - 760 |
| 182 bronce-cromo | 650 - 760 |
| 670 bronce-magnesio-aluminio | 590 - 700 |

Los aceros.

Los aceros de bajo y medio carbono son fácilmente forjables. El aumento de velocidad en el forjado produce calor y mejora las condiciones de trabajo. Por lo contrario, un enfriamiento rápido del flujo del metal en las matrices puede limitar la complejidad y los espesores de la pieza. En general los aceros inoxidable son más difíciles de forjar que los aceros al carbono y aleados.

- Tabla 4 -

| Aleación | Temp. forja (°C) |
|----------|------------------|
| 1010 | 1300 |
| 1015 | 1300 |
| 1020 | 1250 |
| 1070 | 1200 |

1.6 Defectos de forja.

Los defectos en la operación de forja se deben a varias causas:

- Fallas en la estructura de la pieza.
- Fallas en la composición de la aleación.
- Fallas en el proceso de precalentamiento.
- Fallas en la técnica de forjado.
- Fallas de diseño en los dados.

Las FALLAS EN LA ESTRUCTURA provienen de impurezas, inclusiones o segregaciones fuertes en la estructura de la pieza.

Las FALLAS EN LA COMPOSICION de la aleación provocan que el metal se comporte de una manera diferente a la especificada. Un ligero cambio en las proporciones de los compuestos varía la temperatura de recristalización, la plasticidad, la fricción con los dados y otras propiedades ocasionando inevitablemente un desperfecto en el forjado.

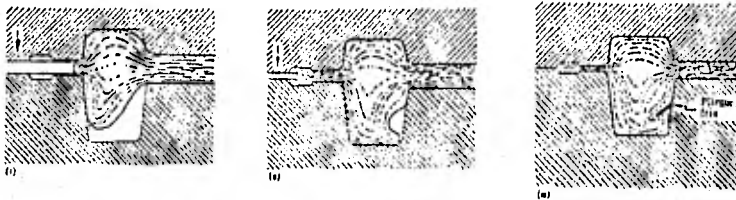
Las fallas en el PROCESO DE PRECALENTAMIENTO se deben a un sobre-calentamiento o a un reposo prolongado de la pieza a altas temperaturas antes del forjado. Esto propicia el crecimiento del grano así como la oxidación superficial de la pieza.

Una falla común en la TECNICA DE FORJADO ocurre cuando la deformación de la pieza se lleva a cabo en las capas externas, dejando la estructura de fundición frágil en el centro. Esto sucede generalmente cuando se usan los martillos.

Otra falla en la TECNICA DE FORJADO es la obtención de grano grande porque la temperatura de fin de forja es más alta que la de recristalización. Esto trae como consecuencia una reducción de la tenacidad de la pieza.

La mayoría de las fallas de forjado se deben a un MAL DISEÑO DE LOS DADOS. La formación de pliegues fríos ocurre cuando se tienen cambios bruscos en la geometría del dado: reducciones, ampliaciones o ángulos rectos. El metal fluye rápidamente sin llenar todo el espacio disponible en la cavidad y después regresa a menor temperatura formando un pliegue o una grieta. Este fenómeno ocurre también cuando dos superficies de metal a diferentes temperaturas chocan y no se unen por soldadura. En ciertos casos se forman grietas en las rebabas que se extienden hasta el cuerpo de la pieza. Para evitarlo se puede aumentar el espesor de la cavidad para rebaba o se puede reubicar esta última a una zona donde los esfuerzos sean menores.

A continuación se muestra la formación de un pliegue frío:



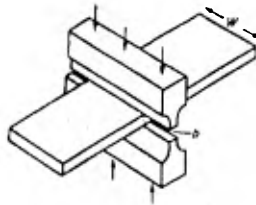
- Figura 13 -

- CAPITULO 2 -

- Análisis de la deformación y de los esfuerzos -
- en el proceso de forja abierta con superficies planas. -

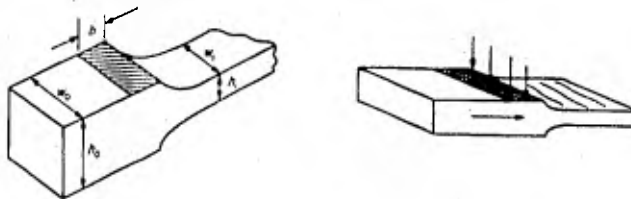
2.1 Análisis teórico de deformación y esfuerzos.

Dentro de los procesos de forja abierta, la operación más sencilla y común es el 'Aplanado' o 'Espigado'. Esta operación (Fig.14) consiste en reducir, de principio a fin, el espesor de una placa haciéndola pasar gradualmente a través de un martillo con un juego de dados de superficies planas.



- Figura 14 -

El área sombreada representa el lugar donde golpea el dado:



- Figura 15 -

2.1.1 Análisis de deformación

La reducción del espesor implica forzosamente un aumento en el ancho y/o la longitud de la pieza. Es imposible calcular teóricamente y con precisión cuales serán los valores de deformación en el ancho y en la longitud de la pieza, pero éstos ya se han determinado de manera empírica.

Para evaluar de manera sencilla esta variación longitudinal y transversal, relacionándola con la disminución del espesor, se definen los coeficientes de ensanchamiento y elongación mencionados en el capítulo 1.

El coeficiente de ensanchamiento se define como:

$$S = \frac{\text{deformación ancho}}{\text{deformación espesor}} \quad - \text{ Ec. 6 -}$$

La deformación se define como: $\Delta E = \Delta x / x$ - Ec. 7 -

tomando los incrementos como diferenciales: $\delta E = \delta x / x$ - Ec. 8 -

Integrando entre la dimensión inicial y final tendremos:

$$x_0 \int \delta E = x_0 \int_{x_0}^{x_1} (1/x) \delta x \quad - \text{ Ec. 9 -}$$

$$E = \ln (x_1) - \ln (x_0)$$

$$E = \ln (x_1 / x_0) \quad - \text{ Ec. 10 -}$$

Regresando al coeficiente S:

$$S = \frac{\ln (W_1 / W_0)}{\ln (H_0 / H_1)} \quad - \text{ Ec. 11 -}$$

donde W_0 : Ancho inicial

W_1 : Ancho final

H_0 : Espesor inicial

H_1 : Espesor final

Debido a que el Volumen inicial = Volumen final:

$$H1*W1*L1 = H0*W0*L0 \quad - \text{ Ec. 12 -}$$

en donde $L0$: Longitud inicial $L1$: Longitud final

$$(H1*W1*L1)/(H0*W0*L0) = 1$$

$$\text{Ln}[(H1*W1*L1)/(H0*W0*L0)] = 0$$

$$\text{Ln}(H1/H0) + \text{Ln}(W1/W0) + \text{Ln}(L1/L0) = 0 \quad - \text{ Ec. 13 -}$$

La ecuación 13 relaciona las deformaciones en 3 dimensiones.

Si dividimos la ecuación 13 entre $\text{Ln}(H0/H1)$ considerando que:

$$H0 > H1 \rightarrow \text{Ln}(H1/H0) < 0 .$$

$$(-1) + [\text{Ln}(W1/W0)/\text{Ln}(H0/H1)] + [\text{Ln}(L1/L0)/\text{Ln}(H0/H1)] = 0 \quad - \text{ Ec. 14 -}$$

incluyendo la ecuación 11 en la ecuación 14:

$$E = 1 - S = \frac{\text{Ln} (L1 / L0)}{\text{Ln} (H0 / H1)} \quad - \text{ Ec. 15 -}$$

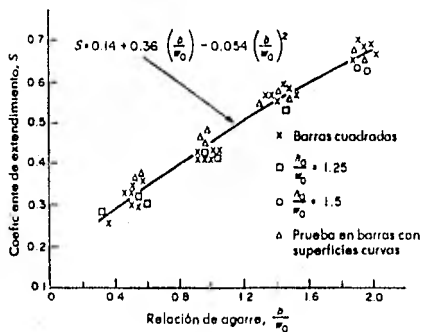
Al coeficiente E ($E = 1 - S$) se le llama coeficiente de elongación y la suma de éste más el coeficiente de ensanchamiento siempre es igual a 1. Si el valor S es 1, toda la deformación será en el ancho de la pieza y si S es 0 será a lo largo.

En el libro con Ref. -2- en la bibliografía se menciona el estudio realizado por Tomlinson y Stringer sobre el comportamiento del coeficiente S . Estos encontraron que el valor de S se relaciona principalmente con el coeficiente de agarre o mordedura. Este coeficiente se define como la razón:

$$m = B/W0 \quad - \text{ Ec. 16 -}$$

B : Porción de longitud de la pieza golpeada por el dado.

$W0$: Ancho de la pieza.



- Figura 16 -

Según el estudio de Tomlinson y Stringer, el comportamiento de S está dado por la fórmula :

$$S = 0.14 + 0.36(B/W_0) - 0.054(B/W_0)^2 \quad - \text{Ec. 17} -$$

Esta fórmula es el ajuste a un polinomio de segundo grado de varios ensayos de forja.

Otra aproximación mencionada en los libros es:

$$S = \frac{B/W_0}{1 + B/W_0} \quad - \text{Ec. 18} -$$

2.1.2 Análisis de esfuerzos

Para hacer el estudio de esfuerzos necesarios al forjar un disco se deben hacer las siguientes consideraciones:

- A - El disco tiene un espesor uniforme.
- B - Con el fin de simplificar el estudio se considera que el espesor es muy pequeño comparado a la base del disco, por lo cual no ocurre el efecto de abarrilamiento y además el esfuerzo normal σ es constante en todo el espesor.

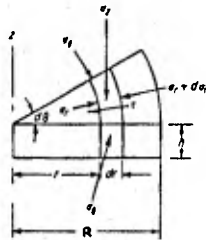
C - Las condiciones de fricción se rigen por la Ley de Coulomb:

$$\tau = \mu * p \quad - \text{Ec. 19} -$$

Esta ecuación es aplicable únicamente cuando ocurre fricción con deslizamiento en la interfase de la pieza con la herramienta.

D - Se considera el criterio de energía máxima de distorsión de Von Mises para determinar el esfuerzo en el cual ocurre fluencia del metal: $\sigma_0 = (1/\sqrt{2}) * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}$ - Ec. 20-

A continuación se muestran los esfuerzos que actúan sobre un sector formado a partir de diferenciales.



- Figura 17 -

r : radio del centro del disco a δr .

δr : diferencial de radio.

R : Radio del disco.

h : altura del disco.

$p = \sigma_z$: esfuerzo ejercido por la herramienta.

σ_r, σ_θ : esfuerzos normales de compresión radial y angular.

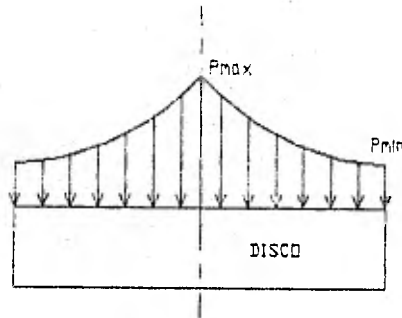
σ_0 : esfuerzo normal máximo a la cedencia.

τ : esfuerzo cortante debido a la fricción entre el disco y la herramienta.

Partiendo del diferencial de volumen mostrado en el dibujo, haciendo el equilibrio de fuerzas y aplicando las consideraciones anteriormente mencionadas, G.E.Dieter, en el libro con Ref. -1- en la bibliografía, desarrolla la ecuación del esfuerzo normal de presión en la interfase:

$$p = \sigma_0 \exp[2\mu(R-r)/h] \quad - \text{Ec. 21} -$$

La gráfica de esta ecuación es comúnmente llamada "Loma de fricción" y tiene la siguiente forma:



- Figura 18 -

La presión máxima se localiza en el centro del disco:

$$r = 0 \rightarrow p = \sigma_0 \exp[(2\mu R)/h] \quad - \text{Ec. 22} -$$

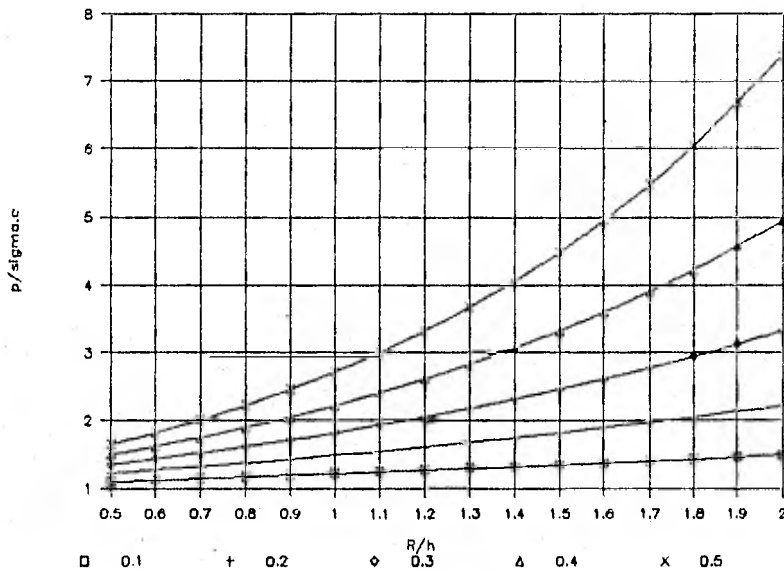
La presión mínima se localiza en la circunferencia externa:

$$r = R \rightarrow p = \sigma_0 \quad - \text{Ec. 23} -$$

La relación R/h juega un papel muy importante en la ecuación de presión. Entre más grande es esta relación, mayor será el esfuerzo máximo en el centro, sin embargo la presión en los bordes se conserva constante. Gráficamente hablando, la loma de fricción toma una forma más puntiaguda en el centro. Al igual que R/h , la fricción μ incrementa el valor de p máximo.

Figura 19 - Variaciones de $p(\max)/\sigma_0$ con respecto a R/h y μ .

(rango: $0.5 < R/h < 2$, $\mu = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$)



Integrando la ecuación de presión en toda la superficie del disco se obtiene el promedio de p :

$$p_{\bar{p}} = \frac{R \int_0^R p(2\pi r) \delta r}{\pi R^2} \quad - \text{ Ec. 24 -}$$

$$p_{\bar{p}} = (\sigma_0/2) * (h/\mu R)^2 * [\exp(2\mu R/h) - (2\mu R/h) - 1] \quad - \text{ Ec.25 -}$$

Hasta ahora se ha considerado que la fricción se rige por la ley de Coulomb que se aplica generalmente al forjado en frío donde existe fricción con deslizamiento. En los procesos de forjado en caliente, ocurre adherencia entre la pieza y la herramienta por lo cual la ley de Coulomb se vuelve obsoleta.

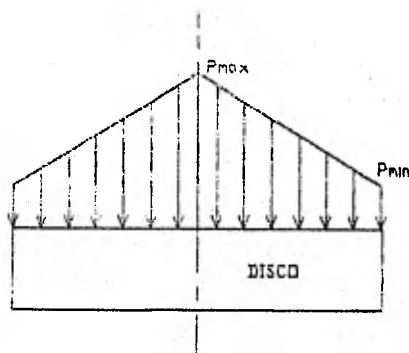
En estas condiciones de trabajo la fricción se iguala con el esfuerzo máximo cortante a la cedencia: $\tau = \tau_0$.

Según el criterio de Von Mises: $\tau = \tau_0 = \frac{1}{2}(2\sigma_0/f_3) = \sigma_0/f_3$ -Ec.26-

Con el mismo procedimiento realizado para fricción con deslizamiento, Dieter determina que la ecuación de presión es:

$$p = \sigma_0 \left[1 + \frac{2(R-f)}{f_3 \cdot h} \right] \quad - \text{Ec. 27} -$$

La gráfica de esta ecuación es una loma de fricción similar a la de fricción con deslizamiento a diferencia que ésta es de crecimiento lineal:



- Figura 20 -

Es común tener simultáneamente condiciones de fricción con adherencia en el centro del disco y fricción con deslizamiento en los bordes del disco. Para facilitar el cálculo de presión en la interfase, se utiliza un factor de fricción que relaciona el esfuerzo cortante máximo a la cedencia (τ_0) con la fricción en la interfase (τ_i): $m = \tau_i / \tau_0$. El caso particular de adherencia pura ocurre cuando $m = 1$, para cualquier otro caso ocurre adherencia y deslizamiento simultáneamente.

Incluyendo el factor m , la ecuación de presión en la interfase es

$$p = \sigma_0 \left[1 + \frac{2m(R-r)}{f_3+h} \right] \quad - \text{Ec. 28} -$$

G.E. Dieter no menciona cual es la fórmula de la presión media en la interfase, pero ésta se puede deducir de la misma forma que en el caso de fricción con deslizamiento :

$$p_{\frac{1}{2}} = \frac{\int_0^R p(2\pi r) \delta r}{\pi R^2} \quad - \text{Ec. 29} -$$

$$p_{\frac{1}{2}} = \frac{\int_0^R [\sigma_0(1 + (2m(R-r)/(f_3+h)))](2\pi r) \delta r}{\pi R^2}$$

$$p_{\frac{1}{2}} = \frac{2\pi\sigma_0 \int_0^R [r + (2m(rR-r^2)/(f_3+h))] \delta r}{\pi R^2}$$

$$p_{\frac{1}{2}} = \frac{2\sigma_0 \left[\int_0^R r \delta r + (2m/f_3h) \int_0^R (rR-r^2) \delta r \right]}{R^2}$$

$$\rho_{\frac{1}{2}} = \frac{2\sigma_0 \left[\int_0^R r \delta r + (2m/f^3h) \left(R \int_0^R (r) \delta r \right) - \int_0^R (r^2) \delta r \right]}{R^2}$$

$$\rho_{\frac{1}{2}} = \frac{2\sigma_0 \left[R^2/2 + (2m/f^3h) \left(R(R^2/2) \right) - R^3/3 \right]}{R^2}$$

$$\rho_{\frac{1}{2}} = \frac{2\sigma_0 \left[R^2/2 + (2m/f^3h) \left(R^3/6 \right) \right]}{R^2}$$

$$\rho_{\frac{1}{2}} = \frac{2\sigma_0 \left[R^2/2 + mR^3/(3f^3h) \right]}{R^2}$$

$$\rho_{\frac{1}{2}} = \frac{R^2 \sigma_0 \left[1 + (2mR)/(3f^3h) \right]}{R^2}$$

| |
|--|
| $\rho_{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \left[1 + \frac{2mR}{3f^3h} \right]$ |
|--|

- Ec. 30 -

2.2 - Consideraciones iniciales del análisis

Dentro de las consideraciones iniciales hay varios factores que afectan los resultados del estudio, por lo cual se tratarán individualmente cada uno de ellos.

2.2.1 - Factor MATERIAL y TEMPERATURA de forjado de la pieza:

Ya que cada metal tiene un rango de temperaturas óptimas para ser forjado, el parámetro de 'Temperatura' de la pieza depende directamente del material. De acuerdo al capítulo anterior, los 5 metales más forjables son el:

- 1 - Plomo a temperatura ambiente.
- 2 - Aluminio y sus aleaciones entre 300 y 550 °C.
- 3 - Magnesio y sus aleaciones entre 280 y 550 °C.
- 4 - Cobre y sus aleaciones 590 y 890 °C.
- 5 - Aceros dulces entre 800 y 1300 °C.

Aún cuando el Plomo no sea utilizado en los procesos de forja, la ventaja de este metal es que, a temperatura ambiente, se comporta de manera similar a los 4 metales mencionados anteriormente cuando éstos se encuentran en sus temperaturas óptimas de forjado. No hay necesidad de calentar y mantener la pieza, durante el proceso, a una temperatura elevada de tal manera que se facilita y agiliza el forjado. Por otro lado el plomo es un metal muy accesible en el mercado, bajo diferentes tamaños y formas. Por estas razones el material elegido para el estudio es el PLOMO.

2.2.2 - Factor GEOMETRIA de la pieza: H_0/W_0 .

El estudio realizado por Tomlinson y Stringer, mencionado en el libro con Ref. - 2 - en la bibliografía, incluye barras con relación Espesor/Ancho (H_0/W_0) de 1 , 1.25 , 1.5 . Para efectos de comparación con dicho estudio se conservarán las 3 relaciones contempladas por Tomlinson y Stringer.

2.2.3 - Factor REDUCCION del ESPESOR: H_1/H_0 .

Como la contracción del material se hace solo en una parte de la pieza, es probable que aparezcan abombamientos en su superficie. Wistreich y Shutt determinaron una deformación crítica en la cual aparecen estos abombamientos, y recomiendan que la reducción del espesor (H_1/H_0) no sea inferior a 0.77 .

Con el fin de tener condiciones de deformación variadas, respetando el criterio Wistreich y Shutt, se tomarán las relaciones de reducción: $H_1/H_0 = 0.9$, 0.85 y 0.8 .

2.2.4 - Factor RELACION DE AGARRE:

La relación de agarre está definida por: $m = B/W_0$

En su estudio, Tomlinson y Stringer consideran un rango que va de 0.5 a 2 con intervalos de 0.5 .

Para variar esta relación se puede:

- 1 - Variar el ancho de la probeta (W_0)
- 2 - Variar la porción de longitud a deformar (B).

(Longitud de la herramienta)

En vista de no tener costos elevados, se usará solamente una herramienta. Por lo tanto el valor B es fijo y el valor W_0 será variable.

La siguiente tabla muestra todas las combinaciones de la relación de agarre y forma geométrica que se harán en el estudio:

- Tabla 5 -

| B/W0 | B(mm) | W0(mm) | H0/W0 | | |
|------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 1 | 1.25 | 1.5 |
| | | | H0(mm) | H0(mm) | H0(mm) |
| 0.5 | 20 | 40 | 40 | 50 | 60 |
| 1 | 20 | 20 | 20 | 25 | 30 |
| 1.5 | 20 | 13.3 | 13.3 | 16.7 | 20 |
| 2 | 20 | 10 | 10 | 12.5 | 15 |

De acuerdo a los datos anteriores y tomando una longitud estándar de 100 mm, Las medidas de las probetas por orden de magnitud son:

(Ancho x Altura x Longitud → W0 x H0 x L0)

- Tabla 6 -

| | | |
|-------------|---------------|---------------|
| 40x60x100 | 40x50x100 | 40x40x100 |
| 20x30x100 | 20x25x100 | 20x20x100 |
| 13.3x20x100 | 13.3x16.6x100 | 13.3x13.3x100 |
| 10x15x100 | 10x12.5x100 | 10x10x100 |

2.3 - Diseño y construcción de la herramienta

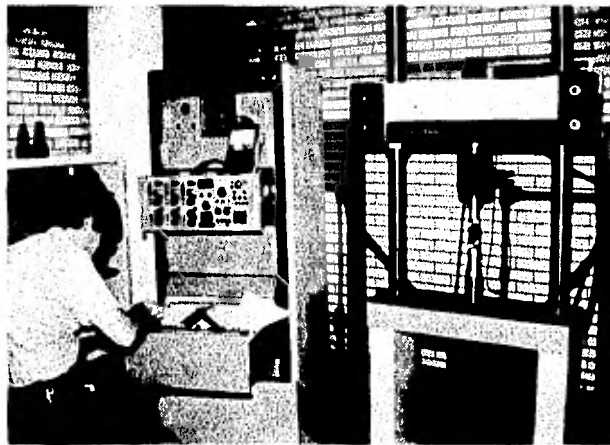
2.3.1 - Condiciones y Limitantes de trabajo

Las pruebas de forja se harán con una máquina "Instron" para efectuar ensayos de tensión, compresión y fatiga de materiales.

Algunas de las características técnicas de esta máquina son:

- Capacidad máxima: 10 Ton. de Fuerza y 2 Plg (50.8 mm) de desplazamiento.
- Control manual o automático de fuerzas y desplazamientos con pantalla indicadora de valores.
- Graficador.

Figura 21 - Vista general de la máquina Instron



Area máxima teórica forjable en base a una capacidad de 10 Ton:

$$\rho \frac{1}{2} = \sigma_0 \left[1 + \frac{2R}{3f_3 h} \right]$$

- Ec.31 - (considerando condiciones de fricción con deslizamiento, $m=1$)

Esfuerzo de Cedencia a la tensión del Plomo : $\sigma_0 = 140 \text{ Kg/cm}^2$

Consideraciones: $R/h = \frac{1}{2}$, $P = 10 \text{ Ton}$, $B = 2 \text{ cm}$.

$$P = \rho \frac{1}{2} * A \quad - \text{ Ec. 32 -}$$

$$P = A \sigma_0 (1 + 1/3f_3)$$

$$A = P / (1.19 \sigma_0)$$

$$A \text{ max} = 10000 \text{ Kg} / (1.19 * 140 \text{ Kg/cm}^2)$$

$$A \text{ max} = 60 \text{ cm}^2$$

$$A \text{ max} = B * W_0 \text{ max}$$

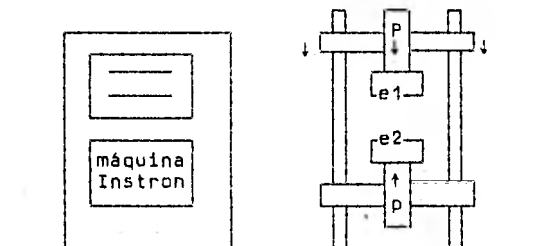
$$W_0 \text{ max} = 60 \text{ cm}^2 / 2 \text{ cm}$$

$$W_0 \text{ max} = 30 \text{ cm} \quad - \text{ Ec. 33 -}$$

La máquina tiene capacidad para forjar probetas con ancho hasta 30cm. Si se compara con la probeta de mayor ancho mencionada en el inciso anterior ($W_0 = 4 \text{ cm}$) se comprueba que la máquina tiene capacidad de sobra.

El desplazamiento máximo de 50.8 mm. es suficiente ya que la probeta más grande tiene un desplazamiento de $60 * 0.8 = 12 \text{ mm}$.

Figura 22 - Esquema de la máquina



La máquina posee dos uniones roscadas (p) para sujetar a las herramientas (e1 y e2). Los requerimientos para que las herramientas se puedan fijar son:

Herramienta superior

diámetro exterior del tornillo = 25.4 mm (1 plg)

Longitud del tornillo = 27 mm

paso de la rosca = 14 hilos/plg

tipo de rosca : estándar

Herramienta inferior

diámetro exterior del tornillo = 31.8 mm (1.25 plg)

Longitud del tornillo = 27 mm

paso de la rosca = 12 hilos/plg

tipo de rosca : estándar

2.3.2 Elección del metal de la herramienta

El metal elegido es: Acero 1045 (SAE)

Composición del 1045: Fe con 0.45% C, 0.25% Si, 0.65% Mn.

Las razones de tal elección son:

A - El metal de la herramienta debe tener una tenacidad y dureza mucho mayor a la del plomo. El acero 1045 (según SAE) es un acero típico para construcción de maquinaria y no para herramientas de corte. Sin embargo, como se va a forjar plomo, el 1045 satisface perfectamente todos los requisitos de tenacidad y dureza. Prueba de ello es la comparación de los esfuerzos de cedencia:

$$\sigma(1045) \approx 63 \text{ Kg/mm}^2 \quad \sigma(\text{plomo}) = 1.4 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma(1045) = 45 * \sigma(\text{plomo})$$

B - Por ser muy comercial, el acero 1045 es muy accesible y de bajo costo.

2.3.3 Cálculos y dibujos de las herramientas

Las herramientas están divididas en dos partes (ver dibujos en las páginas siguientes).

A - un eje de forma hexagonal con un tornillo en un extremo y con un perno centrador en el otro (1 y 2 en el dibujo de conjunto).

B - una maza con orificio para el centrador (3 y 3' en el dibujo de conjunto).

Capacidad máxima de la máquina: 10 Ton

Factor de seguridad: 1.25

$$\sigma(1045) = 63 \text{ Kg/mm}^2$$

El área mínima transversal de la herramienta para que no ocurra cedencia es:

$$A_{\min} = \frac{10000 \text{ Kg} * 1.25}{63 \text{ Kg/mm}^2} \quad - \text{ Ec. 34} -$$

$$A_{\min} = 198 \text{ mm}^2$$

Las herramientas satisfacen en toda su longitud la condición de área mínima.

La deformación elástica del eje de la herramienta superior cuando está es sometida a 10 Ton. de fuerza es:

$$A = 0.866(1.25 * 25.4)^2 = 873 \text{ mm}^2 \quad - \text{ Ec. 35} -$$

$$\delta = \frac{F * L}{A * E} = \frac{10000 \text{ Kg} * 80 \text{ mm}}{873 \text{ mm}^2 * 2.1 * 10^4 \text{ Kg/mm}^2} = 0.043 \text{ mm} \quad - \text{ Ec. 36} -$$

Esta deformación es muy pequeña para ser tomada en cuenta al momento de forjar.

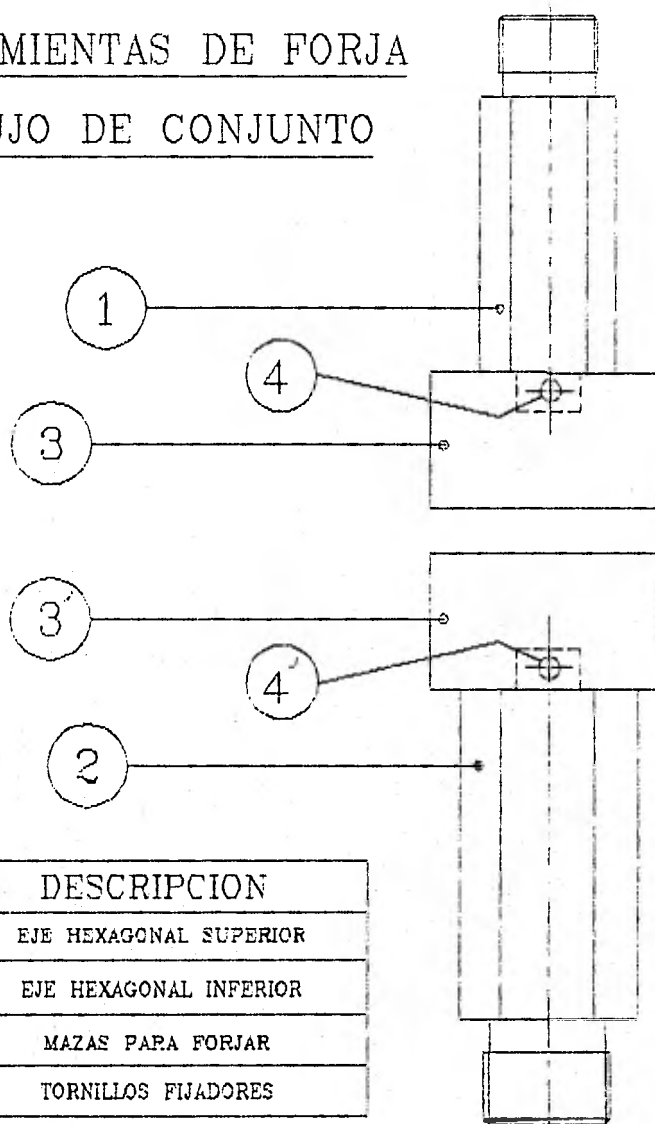
Existe la posibilidad de pandeo si $\sigma_{cr} \approx \sigma$ ($= 63 \text{ Kg/mm}^2$)

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 * E}{(L_c/r)^2} = \frac{\pi^2 * 2.1 * 10^4 \text{ Kg/mm}^2}{(40 \text{ mm} / 25.4 \text{ mm})^2} = 83600 \text{ Kg/mm}^2 \quad - \text{ Ec. 37} -$$

Como $\sigma_{cr} \gg \sigma$ no existe posibilidad de pandeo.

HERRAMIENTAS DE FORJA

DIBUJO DE CONJUNTO

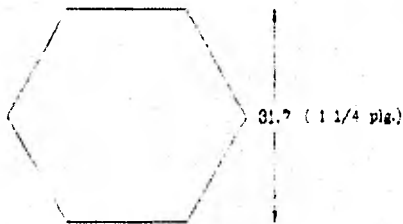


| | DESCRIPCION |
|---|------------------------|
| 1 | EJE HEXAGONAL SUPERIOR |
| 2 | EJE HEXAGONAL INFERIOR |
| 3 | MAZAS PARA FORJAR |
| 4 | TORNILLOS FIJADORES |

- FIGURA 23 -

PIEZA No. 1

MATERIAL : 1045



TODAS LAS MEDIDAS EN MM.

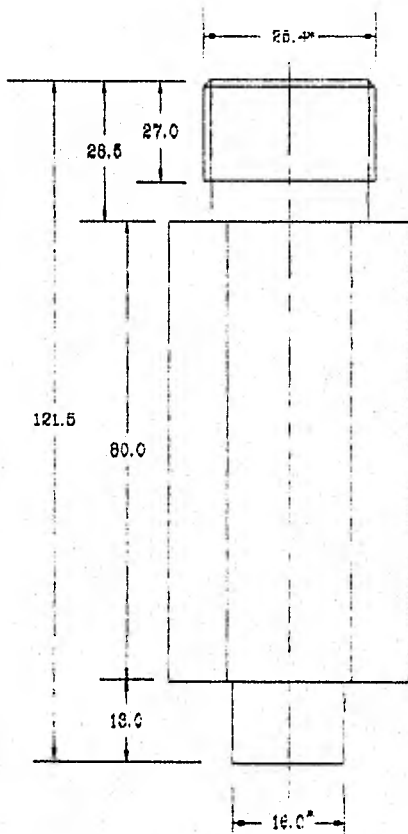
TOLERANCIAS

PARA LAS MEDIDAS MARCADAS CON * -0.08
-0.08

PARA LAS DEMAS MEDIDAS ± 0.2

TORNILLO

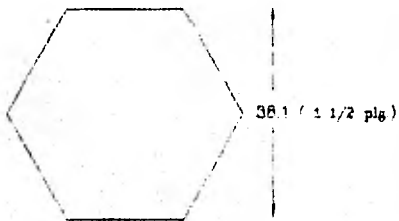
ROSCA EST. 14 HILOS/PLG



- FIGURA 24 -

PIEZA No. 2

MATERIAL : 1045



TODAS LAS MEDIDAS EN MM.

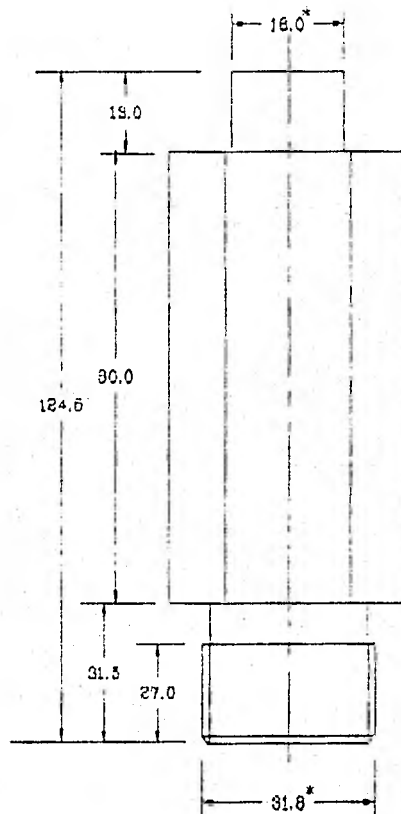
TOLERANCIAS

PARA LAS MEDIDAS MARCADAS CON * :
-0.02
-0.08

PARA LAS DEMAS MEDIDAS : ± 0.2

TORNILLO

ROSCA EST. 12 HILOS/PLG



- FIGURA 25 -

PIEZA No. 3

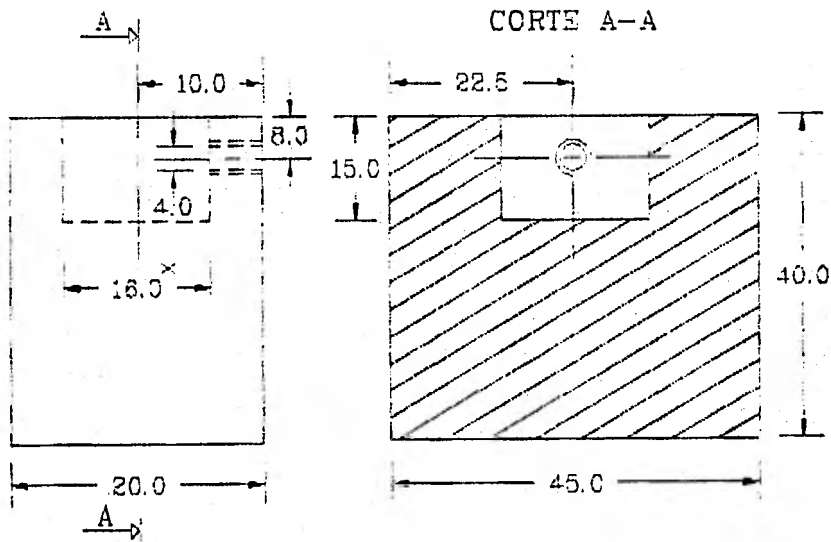
MATERIAL : 1045

TODAS LAS MEDIDAS EN MM.

TOLERANCIAS

PARA LAS MEDIDAS MARCADAS CON * : $\begin{matrix} +0.05 \\ \pm 0.0 \end{matrix}$

PARA LAS DEMAS MEDIDAS : ± 0.2



- FIGURA 26 -

2.4 Descripción de la etapa de ensayos de forja

Las pruebas se efectuaron entre los meses de Mayo y Junio de 1989, en el laboratorio de pruebas mecánicas de la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

2.4.1 Preparativos para las pruebas:

A - Fabricación de las herramientas de forja según los dibujos mostrados en el inciso anterior.

B - Compra de 16 Kgs. de Plomo afinado virgen y de un cucharón de fierro para la fundición.

C - Fabricación de 3 juegos de lingoteras (ver dibujo en la siguiente página).

El objetivo de dichas lingoteras es el moldeo de las probetas. Las lingoteras fueron diseñadas para tener movimiento entre sus partes y así poder fabricar probetas de diferentes medidas:

- Tabla 7 -

| | Lingotera 1 | Lingotera 2 | Lingotera 3 |
|----------|-------------|-----------------|-------------|
| probetas | 40x60x100 | 20x30x100 | 10x15x100 |
| probetas | 40x50x100 | 20x25x100 | 10x12.5x100 |
| probetas | 40x40x100 | 20x20x100 | 10x10x100 |
| | | 13.3x20.0x100 | |
| | | * 13.3x16.6x100 | |
| | | * 13.3x13.3x100 | |

* Requirieron maquinado

En la hoja siguiente se muestran los dibujos y especificaciones de las lingoteras.

LINGOTERAS

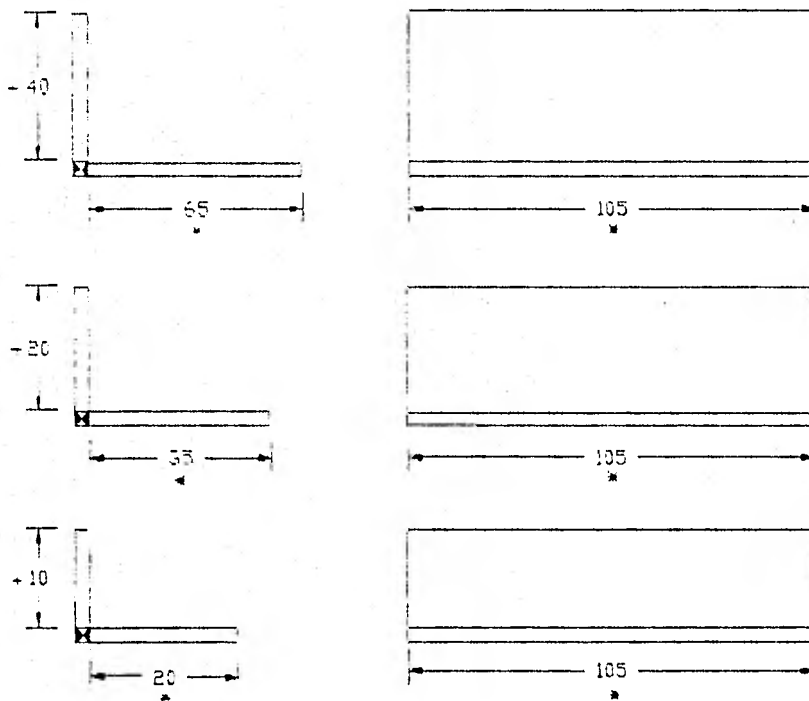
MEDIDAS EN MILIMETROS

ESPESOR DE LA PLACA : 1/8 plg. o 3 mm.

MATERIAL : placa de hierro

TOLERANCIAS : (*) +/- 1 mm.

(+) +/- 0.20 mm.



- FIGURA 27 -

2.4.2 Fundición del plomo

La fundición del plomo se hizo directamente sobre el cucharón. Como método de calentamiento se escogió un soplete de autógena en lugar de un horno porque éste es rápido y de fácil manejo.

Con el soplete se aplicó calor al plomo hasta que alcanzó su temperatura de fusión (327.5 °C). Aún cuando el plomo pareciera estar superficialmente en su estado líquido, la aplicación de calor fue más prolongada para asegurar el adecuado sobrecalentamiento.

El mayor problema de la etapa de fundición fue el precalentamiento de las lingoteras: si no había precalentamiento, el plomo se solidificaba bruscamente en las paredes y no en el centro lo cual producía burbujeo y explosiones. Si el precalentamiento de la lingotera era superior a la temperatura de fusión del plomo, éste no lograba solidificarse y salía de la lingotera por cualquier espacio, por pequeño que sea, lo cual imposibilitaba la fabricación de la probeta.

Otro problema difícil de evitar fueron los rechupes del plomo al solidificarse. Para que éstos fueran pequeños, se procuró mantener un enfriamiento constante en todo el volumen de la probeta. El problema del "rechupe" se debe a la variación del volumen específico cuando el plomo cambia del estado líquido al estado sólido.

2.4.3 Ensayos de forja

La tabla siguiente muestra como fueron organizados los ensayos de forja. La secuencia de los ensayos va de la parte superior a la parte inferior de la hoja y son en total 117.

- Tabla 8 -

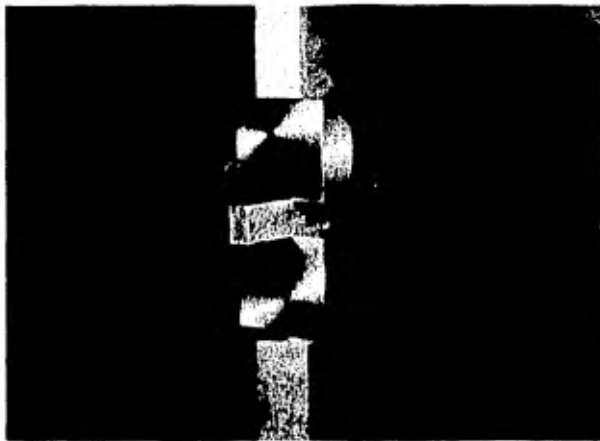
| Coefficiente de agarre $m = b/w_0$ | Forma Geométrica h_0/w_0 | cantidad de deformación h_1/h_0 | No. probeta / No. ensayo (p) |
|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| m = 2 (probetas chicas) | 1 | 0.9 | 1 / 5*p |
| | | 0.85 | 2 / 5*p |
| | | 0.8 | 3 / 5*p |
| | 1.25 | 0.9 | 4 / 5*p |
| | | 0.85 | 5 / 5*p |
| | | 0.8 | 6 / 5*p |
| | 1.5 | 0.9 | 7 / 5*p |
| | | 0.85 | 8 / 5*p |
| | | 0.8 | 9 / 5*p |
| m = 1.5 (probetas medianas) | 1 | 0.9 | 10 / 3*p |
| | | 0.85 | 10,11 / 3*p |
| | | 0.8 | 11 / 3*p |
| | 1.25 | 0.9 | 12 / 3*p |
| | | 0.85 | 12,13 / 3*p |
| | | 0.8 | 13 / 3*p |
| | 1.5 | 0.9 | 14 / 3*p |
| | | 0.85 | 14,15 / 3*p |
| | | 0.8 | 15 / 3*p |
| m = 1 (probetas grandes) | 1 | 0.9 | 16 / 3*p |
| | | 0.85 | 16,17 / 4*p |
| | | 0.8 | 17 / 3*p |
| | 1.25 | 0.9 | 18 / 3*p |
| | | 0.85 | 18,19 / 3*p |
| | | 0.8 | 19 / 3*p |
| | 1.5 | 0.9 | 20 / 3*p |
| | | 0.85 | 20,21 / 3*p |
| | | 0.8 | 21 / 3*p |
| m = 0.5 (probetas extra-grandes) | 1 | 0.9 | 22 / 3*p |
| | | 0.85 | 22,23 / 3*p |
| | | 0.8 | 23 / 3*p |
| | 1.25 | 0.9 | 24 / 2*p |
| | | 0.85 | 24 / 1*p |
| | | 0.8 | 24 / 1*p |
| | 1.5 | 0.9 | 25 / 2*p |
| | | 0.85 | 25 / 1*p |
| | | 0.8 | 25 / 1*p |

El procedimiento de operación fue:

- 1 - Encendido y calentamiento de la máquina.
- 2 - Montaje y alineación de las herramientas.
- 3 - Colocación de la probeta entre las herramientas.
- 4 - Avance de las herramientas hasta que éstas presionen ligeramente a la probeta.
- 5 - Medición de la posición de la herramienta y cálculo de su avance. Para cada ensayo fue necesario calcular la posición final en base a la magnitud de deformación deseada ($d = h_1/h_0$) y a la altura de la probeta(h_0): $h_1 = h_0 * d$.
- 6 - Aplicación gradual de presión hasta que la herramienta alcance la posición final calculada anteriormente.
- 7 - Desalojo de la herramienta y remoción de la probeta.

En la fotografía siguiente se muestra el momento en que la probeta era comprimida por las herramientas.

- Figura 28 -





- Figura 29 -

Fotografía que muestra el conjunto de probetas ya forjadas.

Comentarios acerca de los ensayos.

A - Para obtener un avance gradual de la herramienta, lo óptimo es que éste se efectúe de manera automática. Sin embargo esto no fue posible y se procedió a un avance manual. A pesar de esto, se logró obtener un avance uniforme.

B - Aún al estar trabajando en caliente, el Plomo mostró índices de deformación elástica. Entonces al calcular la distancia de avance de la herramienta fue necesario añadir una deformación extra (alrededor de 5%) para compensar la deformación plástica.

C - En la mayoría de los ensayos fueron graficadas, a lo largo de toda la deformación, las fuerzas de forja. Las gráficas muestran en el eje de las abscisas la distancia avanzada por la herramienta y en el eje de las ordenadas la fuerza aplicada por ésta.

2.5 Mediciones de deformaciones y fuerzas.

2.5.1 Efecto de "abarrilamiento"



Figura 30 - Acercamiento de una probeta forjada fuertemente

El objetivo de esta fotografía es mostrar lo que comúnmente se conoce como efecto de "abarrilamiento" por la semejanza a la superficie externa de un barril. Este efecto tiene varias causas que lo propician, entre ellas están:

- 1 - La deformación excesiva para el tamaño de la pieza
(Según Wistreich y Schutt : $H1/H0 \geq 0.77$)
- 2 - El efecto de la fricción con adherencia en la interfase de la herramienta con la probeta.
- 3 - El factor: Altura/Ancho muy elevado.

Teóricamente el efecto de abarrilamiento no se puede evitar, sin embargo puede ser controlado mediante un buen manejo de los factores que lo propician.

2.5.2 Método para el cálculo de ancho final promedio

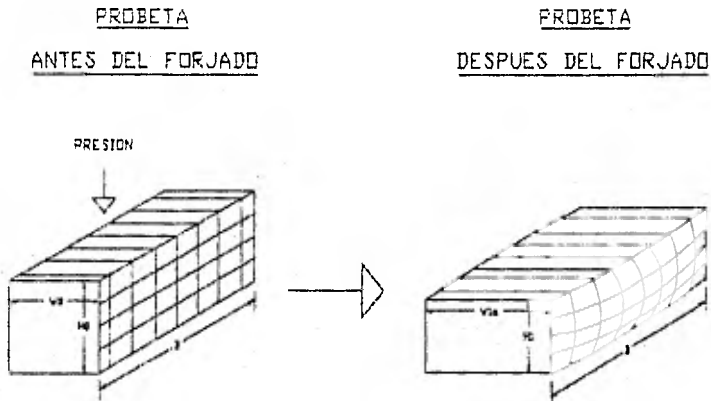


Figura 31 - Forma de la probeta antes y después de forjar.

W_0 = ancho inicial

H_0 = altura inicial

B = agarre de la herramienta

W_{1a} = ancho final en la orilla

H_1 = altura final

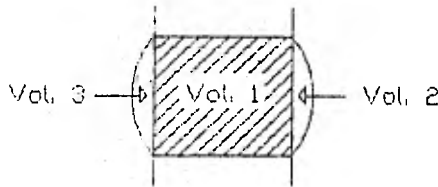
W_{1b} = ancho final en el centro (no mostrado en el dibujo).

Es claro que el ancho después de forjar no es uniforme y cometeríamos un error al tomar como ancho final el ancho en la orilla (W_{1a}) o el ancho en el centro (W_{1b}). El ancho final real se encuentra entre W_{1a} y W_{1b} .

Al observar minuciosamente la probeta se puede apreciar que la superficie abarrilada es la sección de una esfera. Esto implica que los radios de curvatura en las dos direcciones son iguales. Para calcular el ancho promedio será necesario hacer las siguientes consideraciones:

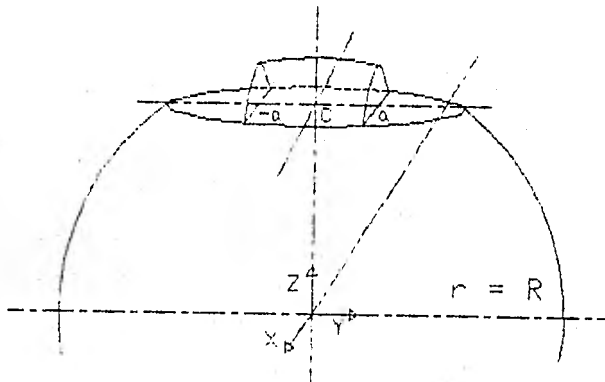
$$W1 \text{ promedio} = \frac{\text{Volumen bajo el área forjada}}{B * H1} \quad - \text{ Ec. 38} -$$

Las dimensiones B y H1 son constantes y se pueden medir fácilmente. El Volumen bajo el área forjada (Fig. 32) está compuesto por la suma de tres volúmenes:



- Figura 32 -

Vol.1 = B x H1 x W1a , Vol.2 (= Vol.3) se calculan como sigue:



- Figura 33 -

Vol.2 (Fig. 33) está delimitado por:

- el plano $Z = c$
- la esfera $x^2 + y^2 + z^2 = R^2$
- Los planos $y = a$ y $y = -a$

El cálculo de Vol.2 se hará mediante una triple integración en coordenadas Cartesianas:

$$\text{Vol.2} = \int_{y=-a}^{y=a} \int_{x=-\sqrt{f(R^2-c^2-y^2)}}^{x=\sqrt{f(R^2-c^2-y^2)}} \int_{z=c}^{z=f(R^2-y^2-x^2)} 1 \cdot dz \, dx \, dy \quad - \text{ Ec. 39 -}$$

$$\text{Vol.2} = 4 * \int_{y=0}^{y=a} \int_{x=0}^{x=\sqrt{f(R^2-c^2-y^2)}} \int_{z=c}^{z=f(R^2-y^2-x^2)} 1 \cdot dz \, dx \, dy$$

$$\text{Vol.2} = 4 * \int_{y=0}^{y=a} \int_{x=0}^{x=\sqrt{f(R^2-c^2-y^2)}} [f(R^2-y^2-x^2)-c] \, dx \, dy$$

$$V.2 = 4 * \int_{y=0}^{y=a} \left[(x/2) * (f(R^2-y^2-x^2)) + \left[\frac{R^2-y^2}{2} \right] * \text{sen}^{-1} \left[\frac{x}{f(R^2-y^2)} \right] \right]_{0}^{f(R^2-c^2-y^2)} dy$$

$$- 4 * \int_{y=0}^{y=a} [c * x]_{0}^{f(R^2-c^2-y^2)} dy$$

$$V.2 = 4 * \int_{y=0}^{y=a} \left[\left[\frac{f(R^2-c^2-y^2)}{2} \right] * (f(R^2-y^2-R^2+c^2+y^2)) + \left[\frac{R^2-y^2}{2} \right] * \text{sen}^{-1} \left[\frac{f(R^2-c^2-y^2)}{f(R^2-y^2)} \right] \right] dy$$

sigue →

$$- 4 * c \left[\int_{y=0}^{y=a} \left[f(R^2 - c^2 - y^2) \right] dy \right]$$

$$V.2 = 2 * c \left[\int_{y=0}^{y=a} \left[f(R^2 - c^2 - y^2) \right] dy \right] + 2 * \overbrace{\left[\int_{y=0}^{y=a} \left[[R^2 - y^2] * \text{sen}^{-1} \left[\frac{f(R^2 - c^2 - y^2)}{f(R^2 - y^2)} \right] \right] dy \right]}^{\text{Integral I}}$$

$$- 4 * c \left[\int_{y=0}^{y=a} \left[f(R^2 - c^2 - y^2) \right] dy \right]$$

$$V.2 = -2 * c \left[\int_{y=0}^{y=a} \left[f(R^2 - c^2 - y^2) \right] dy \right] + 2 * I$$

$$V.2 = -2 * c \left[\left(y/2 \right) * \left(f(R^2 - c^2 - y^2) \right) + \left[\frac{R^2 - c^2}{2} \right] * \text{sen}^{-1} \left[\frac{x}{f(R^2 - c^2)} \right] \right] \Bigg|_0^a + 2 * I$$

$$V.2 = \overbrace{\left[-c \left[a * \left(f(R^2 - c^2 - a^2) \right) + [R^2 - c^2] * \text{sen}^{-1} \left[\frac{a}{f(R^2 - c^2)} \right] \right] \right]}^J + 2 * I$$

$$\boxed{Vol. 2 = J + 2 * I}$$

- Ec. 40 -

La integral I no se puede calcular fácilmente de manera analítica por lo cual se recurre al método de Simpson por ser el más apropiado para calcular integrales numéricamente.

El método de Simpson se define como:

$$\int_a^b f(x)dx = (\Delta x/3)*(f_0+4f_1+2f_2+4f_3+\dots+4f_{n-1}+f_n) \quad \text{- Ec. 41 -}$$

con $f_0=f(a)$, $f_1=f(a+\Delta x)$, $f_2=f(a+2\Delta x)$, ... , $f_n=f(b)$.

donde $f(x)$ es la función a ser integrada.

a es al límite izquierdo de integración.

b es al límite derecho de integración.

Δx es la longitud de cada sub-intervalo.

Para agilizar el cálculo del volumen, se diseñó un programa en lenguaje BASIC.

Las variables de entrada del programa son el Radio de la esfera, la localización del plano $z = c$ y del plano $y = a$.

La variable de salida es el volumen Vol.2 .

El programa ejecuta un algoritmo para evaluar la integral I por el método de Simpson con un número fijo de 20 sub-intervalos.

Además de hacer el algoritmo, el programa calcula el valor de J y finalmente calcula Vol.2 con la fórmula $\text{Vol.2} = J + 2*I$. (Ec. 40)

En la página siguiente se muestra el listado del programa.

```

10 REM -----
20 REM   PROGRAMA PARA CALCULAR EL VOLUMEN BAJO LA SUPERFICIE DEFORMADA
30 REM   DEFORMACION PLANA - FORJA ABIERTA
40 REM   EL PROGRAMA USA EL METODO DE SIMPSON PARA CALCULAR EL VOLUMEN
50 REM   ELABORADO POR: GERARDO OLLIVIER           14 DE AGOSTO DE 1989
60 REM -----
70 REM DEFINICION DE VARIABLES
80 REM AL=LIMITE IZQUIERDO DEL INTERVALO
90 REM BL=LIMITE DERECHO
100 REM FNF(X)=FUNCION A SER INTEGRADA.
110 REM NSI%=NUMERO DE SUBINTERVALOS EN QUE SE DIVIDE A LA REGION
120 REM DX = LONGITUD DEL SUBINTERVALO
130 REM -----
140 REM -----
150 N = 117
160 DIM R(N),C(N),BL(N),V(N)
170 FOR I=1 TO N
180   READ R(I)
190   READ C(I)
200   READ BL(I)
210 NEXT I
220 AL = 0
230 NSI% = 20
240 NSI%=NSI%+2*(NSI%/2-INT(NSI%/2))
250 DEF FNAS(X)=ATN(X/SQR(1-X^2))
260 DEF FNF(X)=(R(I)^2-X^2)*FNAS(SQR(R(I)^2-C(I)^2-X^2)/SQR(R(I)^2-X^2))
270 FOR I= 1 TO N
280   DX=(BL(I)-AL)/NSI%
290   X=AL
300   Y=FNF(X)
310   SUMA=Y
320   X=AL+DX
330   Y=FNF(X)
340   SUMA=SUMA+4*Y
350   FOR N%=2 TO NSI%-1 STEP 2
360     X=AL+N%*DX
370     SUMA=SUMA+2*FNF(X)
380     X=AL+(N%+1)*DX
390     SUMA=SUMA+4*FNF(X)
400   NEXT N%
410   SUMA=SUMA+FNF(BL(I))
420   INTEGRAL=DX*SUMA/3
430   J=-C(I)*(BL(I)*SQR(R(I)^2-C(I)^2-BL(I)^2)+(R(I)^2-C(I)^2)*FNAS(BL(I)/
SQR(R(I)^2-C(I)^2)))
440   V(I)= J+2*INTEGRAL
450 NEXT I
460 FOR I= 1 TO N
470   LPRINT "VOLUMEN (;I;): ";V(I)
480 NEXT I

```

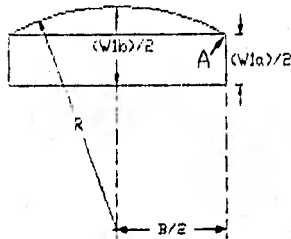

2.5.3 Medición de la deformación en Las probetas

Antes de forjar, se midieron el ancho y la altura de todas las probetas. Las mediciones fueron hechas con un calibrador, a una décima de milímetro de precisión. Para el tamaño de las probetas con la cuales se trabajó (medidas mínimas de 10 mm.) esta precisión es aceptable ya que los valores tienen por lo menos tres cifras significativas correctas y esto representa un error inferior al 1% .

A continuación se muestran las tablas con todos los datos necesarios para la medición de la deformación y el cálculo del coeficiente de ensanchamiento para cada ensayo.

Explicación de los cálculos en las tablas

Radio de curvatura: radio de curvatura de la superficie lateral después de forjar.



- Figura 34 -

coordenadas del punto A (Fig. 34) en el círculo:

$$(R + (W1a/2 - W1b/2))^2 + (B/2)^2 = R^2$$

$$R^2 + 2 * R * (W1a/2 - W1b/2) + (W1a/2 - W1b/2)^2 + (B/2)^2 = R^2$$

$$2 * R * (W1a/2 - W1b/2) = -[(W1a/2 - W1b/2)^2 + (B/2)^2]$$

$$R = \frac{-[(W1a/2 - W1b/2)^2 + (B/2)^2]}{2 * (W1a/2 - W1b/2)}$$

para $H1 \leq B$ - Ec. 42 -

o bien

$$R = \frac{-[(W1a/2 - W1b/2)^2 + (H1/2)^2]}{2*(W1a/2 - W1b/2)} \quad \text{para } H1 > B \quad - \text{ Ec. 43 -}$$

El doble resultado se debe a una consideración para no caer en un absurdo geométrico de la probeta.

$$\text{Valor } c: \quad c = R + (W1a/2 - W1b/2) \quad - \text{ Ec. 44 -}$$

c es la localización del plano $z = c$ que se usa para el cálculo del volumen Vol.2 .

$$\text{Valor } a: \quad a = H1/2 \quad \text{para } H1 \leq B \quad - \text{ Ec. 45 -}$$

$$\text{o bien } a = B/2 \quad \text{para } H1 > B \quad - \text{ Ec. 46 -}$$

A es la localización de los planos $y=a$, $y=-a$ que se usan para el cálculo del volumen Vol.2 .

Volumen Vol.2: Calculado por programa con las fórmulas mencionadas en el parte 2.5.2 .

$$\text{Ancho promedio: } w1 = 2[w1a/2 + \frac{\text{Vol.2}}{B*H1}] \quad - \text{ Ec. 47 -}$$

Para calcular el ancho promedio se divide en primer lugar el Vol.2 entre la altura final (H1) y el avance de la herramienta B para obtener el ancho bajo el Vol.2 . Después se suma la mitad del ancho bajo el Vol.1 y al final se multiplica por 2 para obtener el ancho total (recordando que Vol.2 y Vol.3 son iguales, ver parte 2.5.2) .

$$\text{Coef. de agarre (Ec. 16): } m = B/W0$$

$$\text{Coef. de ensanchamiento (Ec. 11): } S = \frac{\ln(W1/W0)}{\ln(H0/H1)}$$

$$\text{Extensión: } E = \ln(W1/W0) \text{ deformación en el ancho} \quad - \text{ Ec. 48 -}$$

- TABLA NO. 3 -
 MEDICION DE DEFORMACION Y CALCULOS DEL COEFICIENTE DE ENSAMBLAMIENTO

 COEFICIENTE DE AGARRE = 2 NUMERO DE ENSAYOS = 15
 TODAS LAS MEDIDAS ESTAN EN MILIMETROS

| NUMERO ENSAYO | ALTURA INICIAL H0 | ALTURA FINAL H1 | H0/H1 | H1/H0 | ANCHO INICIAL W0 | ANCHO FINAL ORILLA | ANCHO FINAL CENTRO | RADIO DE CURVATURA | VALOR C | VALOR R | VOLUMEN VOL.1 | ANCHO FINAL PROMEDIO | COEF. DE COEFIC. DE | | |
|------------------|-------------------------|-----------------------|-------|-------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------|------------|------------------|----------------------------|---------------------|----------------|------------------|
| | | | | | | | | | | | | | AGARRE D/NO | ENSAMBLA. S | DEFORMACION E |
| 1 | 10 | 8.8 | 1.00 | 0.88 | 10 | 10.3 | 11.3 | 100.3 | 99.8 | 4.10 | 51.2 | 10.1 | 2.00 | 0.677 | 0.087 |
| 2 | 10 | 8.8 | 1.00 | 0.88 | 10 | 10.2 | 11.2 | 100.3 | 99.8 | 4.10 | 53.2 | 10.0 | 2.00 | 0.685 | 0.077 |
| 3 | 10 | 8.5 | 1.00 | 0.85 | 10 | 10.2 | 10.9 | 113.0 | 112.7 | 4.15 | 37.6 | 10.6 | 2.00 | 0.516 | 0.060 |
| 4 | 10 | 9.1 | 1.00 | 0.91 | 10 | 10 | 10.5 | 200.1 | 199.9 | 4.55 | 27.3 | 10.3 | 2.00 | 0.313 | 0.036 |
| 5 | 10 | 9 | 0.97 | 0.96 | 10.3 | 10.7 | 11.2 | 200.1 | 199.9 | 4.50 | 27.1 | 11.0 | 1.94 | 0.625 | 0.066 |
| 6 | 10 | 8.2 | 1.00 | 0.82 | 10 | 10.6 | 12.4 | 67.0 | 66.3 | 4.10 | 75.4 | 11.5 | 2.00 | 0.713 | 0.141 |
| 7 | 10 | 8.6 | 0.97 | 0.86 | 10.3 | 10.7 | 11.7 | 100.3 | 99.8 | 4.30 | 52.2 | 11.3 | 1.94 | 0.615 | 0.083 |
| 8 | 10 | 8.6 | 0.97 | 0.86 | 10.3 | 10.7 | 11.9 | 83.6 | 83.6 | 4.34 | 62.7 | 11.4 | 1.94 | 0.608 | 0.104 |
| 9 | 10 | 8.6 | 0.97 | 0.86 | 10.3 | 10.7 | 11.9 | 93.6 | 93.0 | 4.30 | 62.7 | 11.4 | 1.94 | 0.602 | 0.104 |
| 10 | 10 | 8.5 | 0.97 | 0.85 | 10.3 | 10.7 | 11.0 | 91.2 | 90.6 | 4.25 | 56.9 | 11.4 | 1.94 | 0.600 | 0.099 |
| 11 | 10 | 8.1 | 1.00 | 0.81 | 10 | 10.6 | 12 | 71.0 | 71.1 | 4.05 | 68.6 | 11.5 | 2.00 | 0.617 | 0.136 |
| 12 | 10 | 8.1 | 1.00 | 0.81 | 10 | 10.6 | 12 | 71.4 | 71.1 | 4.05 | 68.6 | 11.5 | 2.00 | 0.611 | 0.136 |
| 13 | 10 | 7.8 | 1.00 | 0.78 | 10 | 10.6 | 12.3 | 59.2 | 58.4 | 3.95 | 62.9 | 11.6 | 2.00 | 0.617 | 0.153 |
| 14 | 10 | 8.1 | 1.00 | 0.81 | 10 | 10.6 | 12.2 | 62.9 | 62.1 | 4.05 | 79.6 | 11.6 | 2.00 | 0.637 | 0.147 |
| 15 | 10 | 8.1 | 1.00 | 0.81 | 10 | 10.6 | 12.2 | 62.9 | 62.1 | 4.05 | 79.6 | 11.6 | 2.00 | 0.637 | 0.147 |
| 17 | 12.65 | 11.6 | 1.27 | 0.92 | 10 | 10.4 | 11 | 166.8 | 166.5 | 5.00 | 39.0 | 10.7 | 2.00 | 0.820 | 0.071 |
| 18 | 12.65 | 11.5 | 1.27 | 0.91 | 10 | 10.4 | 11 | 166.8 | 166.5 | 5.75 | 38.0 | 10.7 | 2.00 | 0.716 | 0.071 |
| 19 | 12.65 | 11.5 | 1.27 | 0.91 | 10 | 10.4 | 11.1 | 163.0 | 162.7 | 5.75 | 45.3 | 10.8 | 2.00 | 0.801 | 0.076 |
| 20 | 12.65 | 11.5 | 1.27 | 0.91 | 10 | 10.4 | 11 | 166.8 | 166.5 | 5.75 | 38.0 | 10.7 | 2.00 | 0.716 | 0.071 |
| 21 | 12.65 | 11.1 | 1.27 | 0.90 | 10 | 10.4 | 10.9 | 200.1 | 199.9 | 5.70 | 32.2 | 10.7 | 2.00 | 0.634 | 0.066 |
| 16 | 12.5 | 10.8 | 1.25 | 0.86 | 10 | 10.5 | 11.6 | 91.2 | 90.6 | 5.10 | 60.2 | 11.1 | 2.00 | 0.233 | 0.107 |
| 22 | 12.5 | 10.7 | 1.25 | 0.86 | 10 | 10.5 | 11.6 | 91.2 | 90.6 | 5.35 | 67.0 | 11.1 | 2.00 | 0.681 | 0.107 |
| 23 | 12.5 | 10.7 | 1.25 | 0.86 | 10 | 10.5 | 11.6 | 91.2 | 90.6 | 5.35 | 67.0 | 11.1 | 2.00 | 0.681 | 0.107 |
| 24 | 12.5 | 10.7 | 1.25 | 0.86 | 10 | 10.5 | 11.6 | 91.2 | 90.6 | 5.35 | 67.0 | 11.1 | 2.00 | 0.681 | 0.107 |
| 25 | 12.5 | 6.3 | 1.25 | 0.50 | 10 | 10.7 | 10 | 31.1 | 28.5 | 3.15 | 132.6 | 16.0 | 2.00 | 0.750 | 0.515 |
| 26 | 12.6 | 9.7 | 1.26 | 0.77 | 10 | 10.8 | 12.7 | 53.1 | 52.2 | 4.85 | 100.2 | 11.9 | 2.00 | 0.673 | 0.174 |
| 27 | 12.6 | 9.9 | 1.26 | 0.79 | 10 | 10.7 | 12.4 | 53.1 | 52.2 | 4.95 | 110.3 | 11.8 | 2.00 | 0.692 | 0.167 |
| 28 | 12.6 | 9 | 1.26 | 0.71 | 10 | 10.7 | 12.6 | 53.1 | 52.2 | 4.50 | 103.1 | 11.8 | 2.00 | 0.583 | 0.169 |
| 29 | 12.6 | 10.1 | 1.26 | 0.80 | 10 | 10.7 | 12.3 | 62.9 | 62.1 | 5.05 | 94.7 | 11.6 | 2.00 | 0.800 | 0.152 |
| 30 | 12.6 | 9.0 | 1.26 | 0.70 | 10 | 10.5 | 12.6 | 44.1 | 47.1 | 4.91 | 121.7 | 11.7 | 2.00 | 0.630 | 0.161 |
| 31 | 15.2 | 13.8 | 1.50 | 0.91 | 10.1 | 10.5 | 14 | 200.1 | 199.9 | 6.90 | 35.9 | 10.0 | 1.90 | 0.655 | 0.063 |
| 32 | 15.2 | 13.4 | 1.50 | 0.88 | 10.1 | 10.5 | 11.1 | 91.2 | 90.6 | 6.70 | 77.9 | 11.1 | 1.90 | 0.735 | 0.093 |
| 33 | 15.2 | 13.4 | 1.50 | 0.88 | 10.1 | 10.5 | 11.5 | 100.3 | 99.0 | 6.70 | 77.0 | 11.0 | 1.90 | 0.690 | 0.080 |
| 34 | 15.2 | 13.5 | 1.50 | 0.89 | 10.1 | 10.5 | 11.3 | 125.2 | 124.0 | 6.75 | 58.0 | 10.9 | 1.90 | 0.653 | 0.071 |
| 35 | 15.2 | 13.1 | 1.51 | 0.86 | 10.1 | 10.5 | 11.3 | 125.2 | 124.0 | 6.70 | 56.0 | 10.9 | 1.90 | 0.621 | 0.070 |
| 36 | 15.1 | 12.9 | 1.50 | 0.85 | 10.2 | 10.7 | 11.3 | 83.0 | 83.0 | 6.45 | 63.2 | 11.3 | 1.90 | 0.678 | 0.106 |
| 37 | 15.1 | 12.9 | 1.51 | 0.85 | 10.2 | 10.7 | 11.0 | 83.0 | 83.0 | 6.45 | 63.2 | 11.3 | 1.90 | 0.678 | 0.106 |
| 38 | 15.1 | 12.9 | 1.50 | 0.85 | 10.2 | 10.8 | 11.9 | 91.2 | 90.6 | 6.45 | 70.3 | 11.1 | 1.90 | 0.707 | 0.110 |
| 39 | 15.1 | 12.7 | 1.51 | 0.84 | 10.2 | 10.7 | 12 | 77.2 | 76.6 | 6.35 | 63.4 | 11.4 | 1.90 | 0.645 | 0.112 |
| 40 | 15.1 | 12.5 | 1.51 | 0.83 | 10.2 | 10.7 | 12 | 77.2 | 76.0 | 6.25 | 60.0 | 11.4 | 1.90 | 0.593 | 0.112 |
| 41 | 15 | 12.2 | 1.43 | 0.81 | 10.1 | 10.6 | 12.4 | 56.0 | 55.1 | 6.10 | 121.0 | 11.6 | 1.90 | 0.681 | 0.130 |
| 42 | 15 | 12.2 | 1.43 | 0.81 | 10.1 | 10.7 | 12.3 | 62.9 | 62.1 | 6.10 | 107.5 | 11.6 | 1.90 | 0.662 | 0.137 |
| 43 | 15 | 12.1 | 1.43 | 0.81 | 10.1 | 10.7 | 12.1 | 59.2 | 58.4 | 6.05 | 113.7 | 11.6 | 1.90 | 0.600 | 0.142 |
| 44 | 15 | 12 | 1.43 | 0.80 | 10.1 | 10.7 | 12.4 | 53.2 | 52.4 | 6.00 | 113.1 | 11.6 | 1.90 | 0.537 | 0.142 |
| 45 | 15 | 12 | 1.43 | 0.80 | 10.1 | 10.7 | 12.6 | 53.1 | 52.2 | 6.00 | 126.5 | 11.6 | 1.90 | 0.600 | 0.152 |

- TABLA NO. 10 -
MEDICION DE DEFORMACION Y CALCULOS DEL COEFICIENTE DE ENSANCHAMIENTO

COEFICIENTE DE AGARRE = 1.5 NUMERO DE ENSAYOS = 27
TODAS LAS MEDIDAS ESTAN EN MILIMETROS

| NUMERO ENSAYO | ALTURA INICIAL H ₀ | ALTURA FINAL H ₁ | H ₀ /H ₁ | H ₁ /H ₀ | ANCHO INICIAL W ₀ | ANCHO FINAL ORILLA W ₁ | ANCHO FINAL CENTRO W ₂ | RADIO DE CURVATURA R | VALOR C | VALOR A | VOLUMEN VOL. 2 | ANCHO FINAL PROMEDIO | COEF. DE AGARRE B/W ₀ | COEF. DE ENSANCH. S | COEF. DE EXTENSION E |
|------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--|--|-------------------------------|------------|------------|-------------------|----------------------------|--|---------------------------|----------------------------|
| 1 | 13.2 | 11.6 | 0.99 | 0.04 | 13.3 | 13.7 | 14.0 | 91.2 | 90.6 | 5.00 | 71.6 | 14.3 | 1.50 | 0.570 | 0.074 |
| 2 | 13.2 | 12 | 0.99 | 0.01 | 13.3 | 13.7 | 14.4 | 143.0 | 142.7 | 6.00 | 16.5 | 14.4 | 1.50 | 0.604 | 0.050 |
| 3 | 13.2 | 11.9 | 0.99 | 0.09 | 13.3 | 13.7 | 14.4 | 143.0 | 142.7 | 5.95 | 46.9 | 14.4 | 1.50 | 0.556 | 0.059 |
| 4 | 13.2 | 11.3 | 0.99 | 0.06 | 13.3 | 13.7 | 15.1 | 71.0 | 71.1 | 5.65 | 89.6 | 14.5 | 1.50 | 0.553 | 0.086 |
| 5 | 13.3 | 11.4 | 0.99 | 0.06 | 13.5 | 13.9 | 15.3 | 71.0 | 71.1 | 5.70 | 90.1 | 14.7 | 1.40 | 0.542 | 0.085 |
| 6 | 13.3 | 11.4 | 0.99 | 0.06 | 13.5 | 13.9 | 15.4 | 67.0 | 66.3 | 5.70 | 96.6 | 14.7 | 1.40 | 0.573 | 0.201 |
| 7 | 13.3 | 10.7 | 0.99 | 0.09 | 13.5 | 14 | 15.7 | 59.2 | 58.4 | 5.35 | 104.9 | 15.0 | 1.40 | 0.470 | 0.104 |
| 8 | 13.3 | 10.7 | 0.99 | 0.09 | 13.5 | 14 | 15.6 | 82.0 | 82.1 | 5.35 | 90.7 | 15.0 | 1.40 | 0.461 | 0.106 |
| 9 | 13.3 | 10.7 | 0.99 | 0.09 | 13.5 | 14 | 15.9 | 53.1 | 52.2 | 5.35 | 117.3 | 15.1 | 1.40 | 0.514 | 0.112 |
| 10 | 16.7 | 15.1 | 1.25 | 0.90 | 13.4 | 13.9 | 14.7 | 125.2 | 124.0 | 7.55 | 59.7 | 14.3 | 1.40 | 0.642 | 0.065 |
| 11 | 16.7 | 14.9 | 1.25 | 0.88 | 13.4 | 13.9 | 14.6 | 143.0 | 142.7 | 7.45 | 52.0 | 14.2 | 1.40 | 0.530 | 0.061 |
| 12 | 16.7 | 15 | 1.25 | 0.90 | 13.4 | 13.9 | 14.6 | 143.0 | 142.7 | 7.50 | 52.1 | 14.2 | 1.40 | 0.571 | 0.061 |
| 13 | 16.7 | 14.3 | 1.25 | 0.86 | 13.4 | 14 | 15.5 | 67.0 | 66.3 | 7.15 | 109.6 | 14.0 | 1.40 | 0.626 | 0.057 |
| 14 | 16.7 | 14.3 | 1.25 | 0.86 | 13.4 | 14 | 15.3 | 77.2 | 76.6 | 7.15 | 95.0 | 14.7 | 1.40 | 0.581 | 0.090 |
| 15 | 16.7 | 14.3 | 1.19 | 0.86 | 14 | 14.7 | 16.2 | 67.0 | 66.3 | 7.15 | 109.6 | 15.5 | 1.43 | 0.642 | 0.100 |
| 16 | 16.7 | 13.5 | 1.19 | 0.81 | 14 | 14.7 | 16.9 | 46.0 | 44.9 | 6.75 | 156.7 | 15.9 | 1.43 | 0.507 | 0.125 |
| 17 | 16.7 | 13.6 | 1.20 | 0.81 | 13.9 | 14.7 | 16.6 | 53.1 | 52.2 | 6.00 | 135.0 | 15.7 | 1.44 | 0.592 | 0.122 |
| 18 | 16.7 | 13.6 | 1.20 | 0.81 | 13.9 | 14.7 | 16.6 | 59.2 | 58.4 | 6.00 | 121.4 | 15.6 | 1.44 | 0.560 | 0.115 |
| 19 | 20.1 | 18.2 | 1.50 | 0.91 | 13.4 | 13.9 | 14.6 | 143.0 | 142.7 | 9.10 | 54.6 | 14.2 | 1.40 | 0.544 | 0.050 |
| 20 | 20.1 | 18.1 | 1.50 | 0.96 | 13.4 | 13.9 | 14.0 | 111.3 | 110.9 | 9.05 | 70.3 | 14.3 | 1.40 | 0.612 | 0.064 |
| 21 | 20.1 | 18 | 1.50 | 0.90 | 13.4 | 13.9 | 14.8 | 111.3 | 110.9 | 9.00 | 70.3 | 14.3 | 1.40 | 0.563 | 0.064 |
| 22 | 20.1 | 17 | 1.50 | 0.85 | 13.4 | 13.9 | 15.2 | 77.2 | 76.6 | 6.50 | 100.7 | 14.5 | 1.40 | 0.460 | 0.070 |
| 23 | 20.1 | 17.3 | 1.56 | 0.86 | 13.4 | 13.9 | 15.4 | 83.6 | 83.0 | 6.85 | 83.2 | 14.4 | 1.40 | 0.450 | 0.075 |
| 24 | 20.1 | 17.3 | 1.56 | 0.86 | 13.4 | 14.6 | 15.9 | 77.2 | 76.6 | 6.65 | 101.0 | 15.2 | 1.40 | 0.623 | 0.125 |
| 25 | 20.1 | 16.1 | 1.50 | 0.90 | 13.4 | 14.6 | 16.7 | 40.1 | 47.1 | 6.05 | 100.7 | 15.6 | 1.40 | 0.605 | 0.152 |
| 26 | 20.1 | 16.2 | 1.50 | 0.81 | 13.4 | 14.6 | 16.4 | 56.0 | 55.1 | 6.10 | 137.9 | 15.5 | 1.40 | 0.600 | 0.142 |
| 27 | 20.1 | 16.2 | 1.50 | 0.91 | 13.4 | 14.6 | 16.3 | 50.2 | 50.4 | 6.10 | 130.2 | 15.4 | 1.40 | 0.646 | 0.130 |

- TABLA NO. 11 -

MEDICION DE DEFORMACION Y CALCULOS DEL COEFICIENTE DE ENSANCHAMIENTO

COEFICIENTE DE AGARRE = 1 NUMERO DE ENSAYOS = 28
 TODAS LAS MEDIDAS ESTAN EN MILIMETROS

| NUMERO ENSAYO | ALTURA INICIAL H0 | ALTURA FINAL H1 | H0/H1 | H1/H0 | ANCHO INICIAL W0 | ANCHO FINAL DRILLA | ANCHO FINAL CENTRO | RADIO DE CURVATURA | VALOR C | VALOR R | VOLUMEN VOL. 2 | ANCHO FINAL PROMEDIO | COEF. DE AGARRE B/W0 | COEF. DE ENSANCHA- S | EXTENSION E |
|------------------|-------------------------|-----------------------|-------|-------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------|------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|
| 1 | 24 | 11.3 | 1.04 | 0.92 | 26 | 20.7 | 21.5 | 125.2 | 124.0 | 9.15 | 62.49 | 21.0 | 1.00 | 0.574 | 0.051 |
| 2 | 19.9 | 10.2 | 1.06 | 0.91 | 29 | 20.3 | 21.4 | 163.0 | 162.7 | 9.10 | 51.63 | 21.0 | 1.00 | 0.546 | 0.043 |
| 3 | 19.9 | 10.2 | 1.00 | 0.91 | 20 | 20.7 | 21.4 | 163.0 | 162.7 | 9.10 | 51.63 | 21.0 | 1.00 | 0.566 | 0.045 |
| 4 | 19.9 | 16.6 | 1.04 | 0.83 | 20 | 21 | 22.7 | 50.2 | 50.4 | 0.30 | 131.03 | 21.1 | 1.00 | 0.473 | 0.066 |
| 5 | 19.0 | 17.1 | 0.99 | 0.86 | 20 | 21 | 22.2 | 77.2 | 76.0 | 0.55 | 100.70 | 21.0 | 1.00 | 0.522 | 0.076 |
| 6 | 20.2 | 17.3 | 1.01 | 0.86 | 24 | 21 | 22.1 | 91.2 | 90.6 | 0.65 | 85.42 | 21.5 | 1.00 | 0.485 | 0.072 |
| 7 | 20.2 | 17.3 | 1.01 | 0.86 | 20 | 21 | 22.3 | 77.2 | 76.6 | 0.65 | 101 | 21.6 | 1.00 | 0.492 | 0.076 |
| 8 | 20.1 | 16 | 1.01 | 0.81 | 20 | 21.2 | 23.5 | 44.1 | 42.9 | 0.60 | 175.01 | 22.3 | 1.00 | 0.477 | 0.109 |
| 9 | 20.1 | 16.3 | 1.01 | 0.81 | 20 | 21.2 | 22.9 | 50.2 | 50.4 | 0.15 | 130.41 | 22.0 | 1.00 | 0.455 | 0.135 |
| 10 | 20.1 | 16 | 1.01 | 0.80 | 24 | 21.2 | 23.3 | 40.1 | 47.1 | 0.80 | 100.41 | 22.2 | 1.00 | 0.450 | 0.104 |
| 11 | 24.9 | 22 | 1.25 | 0.80 | 20 | 21 | 21.0 | 151.4 | 151.0 | 11.00 | 75.55 | 21.3 | 1.00 | 0.525 | 0.065 |
| 12 | 24.9 | 22.5 | 1.25 | 0.80 | 20 | 20.6 | 21.3 | 101.0 | 100.6 | 11.25 | 60.96 | 20.9 | 1.00 | 0.437 | 0.044 |
| 13 | 24.9 | 22.5 | 1.25 | 0.80 | 20 | 20.7 | 21.4 | 101.0 | 100.6 | 11.25 | 61.96 | 21.0 | 1.00 | 0.404 | 0.043 |
| 14 | 24.9 | 21.2 | 1.25 | 0.86 | 20 | 21.1 | 22.1 | 113.7 | 113.2 | 10.65 | 80.71 | 21.5 | 1.00 | 0.460 | 0.073 |
| 15 | 24.9 | 21.2 | 1.25 | 0.86 | 20 | 21.1 | 22 | 126.3 | 125.0 | 10.65 | 79.77 | 21.5 | 1.00 | 0.456 | 0.071 |
| 16 | 25.2 | 21.3 | 1.26 | 0.85 | 20 | 21.1 | 22.7 | 71.3 | 70.5 | 10.65 | 112.30 | 21.0 | 1.00 | 0.354 | 0.045 |
| 17 | 25.1 | 20.2 | 1.26 | 0.84 | 20 | 21.3 | 22.5 | 85.3 | 84.7 | 10.10 | 93.02 | 21.0 | 1.00 | 0.300 | 0.004 |
| 18 | 25.1 | 19.9 | 1.26 | 0.79 | 20 | 21.4 | 23.2 | 56.0 | 55.1 | 9.95 | 130.43 | 22.1 | 1.00 | 0.429 | 0.100 |
| 19 | 25 | 20.1 | 1.25 | 0.80 | 20 | 21.4 | 22.7 | 70.0 | 77.4 | 10.05 | 90.06 | 21.9 | 1.00 | 0.413 | 0.090 |
| 20 | 30 | 26.4 | 1.50 | 0.63 | 20 | 21 | 21.9 | 196.0 | 196.3 | 13.30 | 110.85 | 21.4 | 1.00 | 0.500 | 0.070 |
| 21 | 30 | 26.7 | 1.50 | 0.69 | 20 | 20.7 | 21.2 | 356.0 | 356.3 | 13.35 | 66.29 | 20.9 | 1.00 | 0.390 | 0.046 |
| 22 | 30 | 26.4 | 1.50 | 0.69 | 20 | 20.7 | 21.2 | 350.2 | 350.0 | 13.44 | 66.69 | 20.9 | 1.00 | 0.411 | 0.046 |
| 23 | 30 | 25.1 | 1.50 | 0.84 | 20 | 20.9 | 22 | 143.5 | 142.9 | 12.55 | 131.75 | 21.4 | 1.00 | 0.386 | 0.069 |
| 24 | 30 | 24.6 | 1.50 | 0.82 | 20 | 21.3 | 22.7 | 100.4 | 107.7 | 12.30 | 162.44 | 22.0 | 1.00 | 0.474 | 0.093 |
| 25 | 30 | 24.9 | 1.50 | 0.83 | 20 | 21 | 22.7 | 91.6 | 90.0 | 12.45 | 204.11 | 21.0 | 1.00 | 0.464 | 0.087 |
| 26 | 36 | 23.0 | 1.50 | 0.79 | 20 | 21.3 | 22.6 | 109.3 | 108.1 | 11.90 | 142.11 | 21.9 | 1.00 | 0.381 | 0.091 |
| 27 | 29.9 | 23.5 | 1.50 | 0.79 | 20 | 21.5 | 23.2 | 81.4 | 80.0 | 11.75 | 101.03 | 22.3 | 1.00 | 0.447 | 0.100 |
| 28 | 29.0 | 24 | 1.49 | 0.81 | 20 | 21.7 | 23.7 | 72.5 | 71.5 | 12.00 | 222.10 | 22.6 | 1.00 | 0.570 | 0.123 |

- TABLA NO. 12 -

MEDICION DE DEFORMACION Y CALCULOS DEL COEFICIENTE DE ENSANCHAMIENTO

COEFICIENTE DE AGARRE = 0.5 NUMERO DE ENSAYOS = 17
 TODAS LAS MEDIDAS ESTAN EN MILIMETROS

| NUMERO ENSAYO | ALTURA INICIAL H0 | ALTURA FINAL H1 | H0/H1 | H1/H0 | ANCHO INICIAL W0 | ANCHO FINAL W1 | ANCHO FINAL CENTRO CUMPUTURA | RADIO DE CURVATURA | VALOR C | VALOR A | VOLUMEN VOL. 2 | ANCHO FINAL PROMEDIO | COEF. DE AGARRE B/W0 | COEF. DE ENSANCHA- MIENTO S | EXTENSION E |
|------------------|-------------------------|-----------------------|-------|-------|------------------------|----------------------|---------------------------------------|--------------------------|------------|------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------|
| 1 | 40 | 35.0 | 1.01 | 0.99 | 39.6 | 40.0 | 44.9 | 291.6 | 291.0 | 17.90 | 223.61 | 41.4 | 0.51 | 0.406 | 0.045 |
| 2 | 40 | 36.3 | 1.01 | 0.91 | 39.6 | 40.3 | 44.4 | 299.7 | 299.2 | 18.15 | 227.76 | 40.9 | 0.51 | 0.310 | 0.033 |
| 3 | 40 | 35.0 | 1.01 | 0.90 | 39.6 | 40.4 | 44.0 | 229.2 | 229.5 | 17.90 | 204.66 | 41.2 | 0.51 | 0.356 | 0.039 |
| 4 | 40 | 34.1 | 1.01 | 0.85 | 39.6 | 40.4 | 42.4 | 102.1 | 101.3 | 17.05 | 104.73 | 41.7 | 0.51 | 0.323 | 0.052 |
| 5 | 40 | 33.0 | 1.01 | 0.85 | 39.6 | 40.0 | 43.1 | 124.0 | 123.6 | 16.90 | 133.07 | 42.1 | 0.51 | 0.301 | 0.061 |
| 6 | 40 | 33.6 | 1.01 | 0.84 | 39.7 | 41.1 | 43 | 169.0 | 168.1 | 16.00 | 154.71 | 42.2 | 0.50 | 0.314 | 0.060 |
| 7 | 40 | 32.2 | 1.01 | 0.81 | 39.7 | 41.1 | 42.3 | 216.3 | 215.7 | 16.10 | 211 | 41.8 | 0.50 | 0.233 | 0.056 |
| 8 | 40 | 32.4 | 1.01 | 0.81 | 39.7 | 41.4 | 42.6 | 219.0 | 218.4 | 16.20 | 212.06 | 42.1 | 0.50 | 0.274 | 0.054 |
| 9 | 40 | 32.3 | 1.01 | 0.81 | 39.7 | 41.1 | 42.5 | 186.7 | 186.0 | 16.15 | 247.29 | 41.9 | 0.50 | 0.240 | 0.053 |
| 10 | 50.5 | 44.7 | 1.27 | 0.89 | 39.9 | 40.0 | 44.4 | 832.7 | 832.4 | 22.35 | 161.44 | 41.2 | 0.50 | 0.255 | 0.051 |
| 11 | 50.4 | 45.3 | 1.26 | 0.90 | 39.9 | 40.0 | 44.5 | 733.1 | 732.7 | 22.65 | 191.34 | 41.2 | 0.50 | 0.306 | 0.033 |
| 12 | 50.4 | 42.0 | 1.26 | 0.85 | 39.9 | 41.5 | 42.7 | 376.4 | 377.6 | 21.30 | 204.56 | 42.2 | 0.50 | 0.335 | 0.056 |
| 13 | 50.3 | 40.4 | 1.26 | 0.80 | 39.9 | 41.5 | 44.3 | 146.4 | 145.0 | 20.20 | 146.05 | 43.1 | 0.50 | 0.369 | 0.004 |
| 14 | 60 | 54.2 | 1.51 | 0.90 | 39.7 | 40.5 | 44.6 | 167.9 | 167.4 | 22.10 | 171.83 | 41.2 | 0.50 | 0.301 | 0.037 |
| 15 | 50.9 | 53.6 | 1.51 | 0.80 | 39.7 | 40.3 | 44.6 | 552.0 | 552.2 | 26.00 | 132.91 | 41.4 | 0.50 | 0.314 | 0.035 |
| 16 | 50.9 | 51.2 | 1.51 | 0.85 | 39.7 | 41 | 42.4 | 410.0 | 409.2 | 25.00 | 505.5 | 42.0 | 0.50 | 0.357 | 0.056 |
| 17 | 50.0 | 40 | 1.51 | 0.80 | 39.7 | 41.6 | 43.9 | 251.0 | 249.3 | 24.00 | 676.17 | 43.0 | 0.50 | 0.304 | 0.000 |

2.5.4 Medición de Los esfuerzos en Las probetas

Para la mayoría de Los ensayos fueron medidas Las fuerzas en toda la etapa de forjado. La fuerza máxima, como es de esperarse, es la que actúa en la parte final del forjado. Las mediciones de Las fuerzas se efectuaron directamente sobre Las gráficas. Estas fueron hechas, dependiendo de la magnitud de la fuerza, a cierta escala para permitir que la gráfica sea clara y medible.

A continuación se muestran Las tablas de medición de esfuerzos.

Explicación de Los cálculos de esfuerzos en Las tablas

Medición gráfica: es la medición de la altura en la gráfica del punto de mayor fuerza de forja (en milímetros).

Fuerza de forja: obtenida a partir de la medición de la altura por la escala de la gráfica, $F(\text{Kg}) = \text{mm} * (\text{Kg}/\text{mm})$ - Ec. 49 -

Área forjada: longitud de la herramienta (B) por ancho final promedio de la probeta (W1), $A = B * W1$ - Ec. 50 -

Radio del círculo equivalente: radio del círculo que tiene La misma área que el área forjada, $R = \sqrt{[B*W1/\pi]}$ - Ec. 51 -

Valor R/H1: utilizado para calcular el esfuerzo teórico de forja.

Valor H1/R: utilizado para relacionar el esfuerzo real con el teórico.

Esfuerzo Real: fuerza de forja entre área forjada,

$$E.R. = F/(B*W1) \quad - \text{Ec. 52} -$$

Esfuerzo Teórico: fórmula de esfuerzo promedio de forja para condiciones de fricción con adherencia y deslizamiento (Ec. 30).

$$E.T. = p\% = \sigma \left[1 + \frac{2mR}{3f3h} \right]$$

Esfuerzo real entre esfuerzo teórico: $E.R./E.T.$ - Ec. 53 -

- TABLA No. 13 -
MEDICIONES Y CALCULOS DE ESFUERZOS DE FORJAZ

COEFICIENTE DE MADUREZA = 2 NUMERO DE MUESTRAS = 45
MEDIDAS EN MM. - FUERZAS EN KG. - ESFUERZOS EN KG./MM²

| NUMERO ENSAJO | ALTURA INICIAL H0 | ALTURA FINAL H1 | H1/H0 | ANCHO INICIAL W | ANCHO FINAL W1 | MEDICION GRAFICA (MM) | MEDICION FUERZA DE FORJAZ | AREA FORJADA BMM | RADIO DE CIRCULO EQUIVAL. | VALOR R/H1 | VALOR H1/R | ESFUERZO REAL E.R. | ESFUERZO TEORICO E.T. | VALOR E.R./E.T. |
|------------------|-------------------------|-----------------------|-------|-----------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------|---------------|---------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 1 | 10 | 8.0 | 0.80 | 10 | 10.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | 10 | 8.0 | 0.80 | 10 | 10.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 | 10 | 8.0 | 0.80 | 10 | 10.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | 10 | 8.1 | 0.81 | 10 | 10.3 | 110 | 591 | 206 | 0.10 | 0.09 | 1.12 | 2.06 | 1.75 | 1.63 |
| 5 | 10 | 9 | 0.90 | 10.3 | 11.0 | 170 | 636 | 220 | 0.37 | 0.93 | 1.00 | 2.95 | 1.77 | 1.67 |
| 6 | 10 | 8.2 | 0.82 | 10 | 11.5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | 10 | 8.6 | 0.86 | 10.3 | 11.3 | 157 | 785 | 226 | 0.40 | 0.99 | 1.01 | 3.47 | 1.79 | 1.94 |
| 8 | 10 | 8.6 | 0.86 | 10.3 | 11.4 | 160 | 800 | 229 | 0.53 | 0.99 | 1.01 | 3.50 | 1.80 | 1.85 |
| 9 | 10 | 8.6 | 0.86 | 10.3 | 11.4 | 155 | 775 | 229 | 0.53 | 0.99 | 1.01 | 3.39 | 1.80 | 1.95 |
| 10 | 10 | 8.5 | 0.85 | 10.3 | 11.4 | 169 | 845 | 227 | 0.51 | 1.00 | 1.00 | 3.72 | 1.80 | 2.01 |
| 11 | 10 | 8.1 | 0.81 | 10 | 11.5 | 161 | 805 | 229 | 0.54 | 1.05 | 0.95 | 3.51 | 1.82 | 1.93 |
| 12 | 10 | 8.1 | 0.81 | 10 | 11.5 | 172 | 860 | 229 | 0.54 | 1.05 | 0.95 | 3.75 | 1.82 | 2.06 |
| 13 | 10 | 7.9 | 0.79 | 10 | 11.6 | 187 | 935 | 233 | 0.61 | 1.09 | 0.92 | 4.01 | 1.83 | 2.19 |
| 14 | 10 | 8.1 | 0.81 | 10 | 11.6 | 180 | 840 | 232 | 0.59 | 1.06 | 0.94 | 3.63 | 1.82 | 1.99 |
| 15 | 10 | 8.1 | 0.81 | 10 | 11.6 | 172 | 860 | 232 | 0.59 | 1.06 | 0.94 | 3.71 | 1.82 | 2.01 |
| 17 | 12.65 | 11.6 | 0.92 | 10 | 10.7 | 916 | 580 | 215 | 0.27 | 0.71 | 1.40 | 2.70 | 1.80 | 1.60 |
| 18 | 12.65 | 11.5 | 0.91 | 10 | 10.7 | 120 | 600 | 215 | 0.27 | 0.72 | 1.39 | 2.79 | 1.80 | 1.66 |
| 19 | 12.65 | 11.5 | 0.91 | 10 | 10.8 | 122 | 610 | 216 | 0.29 | 0.72 | 1.39 | 2.83 | 1.80 | 1.67 |
| 20 | 12.65 | 11.5 | 0.91 | 10 | 10.7 | 116 | 580 | 215 | 0.27 | 0.72 | 1.39 | 2.70 | 1.80 | 1.60 |
| 21 | 12.65 | 11.4 | 0.90 | 10 | 10.7 | 142 | 710 | 214 | 0.25 | 0.72 | 1.30 | 3.32 | 1.80 | 1.69 |
| 16 | 12.5 | 10.0 | 0.80 | 10 | 11.1 | 136 | 680 | 223 | 0.42 | 0.70 | 1.20 | 3.05 | 1.71 | 1.79 |
| 22 | 12.5 | 10.7 | 0.86 | 10 | 11.1 | 140 | 700 | 223 | 0.42 | 0.70 | 1.27 | 3.11 | 1.71 | 1.82 |
| 23 | 12.5 | 10.7 | 0.86 | 10 | 11.1 | 170 | 860 | 223 | 0.42 | 0.70 | 1.27 | 3.10 | 1.71 | 1.81 |
| 24 | 12.5 | 10.7 | 0.86 | 10 | 11.1 | 120 | 600 | 223 | 0.42 | 0.70 | 1.27 | 2.69 | 1.71 | 1.57 |
| 25 | 12.5 | 8.3 | 0.66 | 10 | 10.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 26 | 12.6 | 9.7 | 0.77 | 10 | 11.9 | 144 | 720 | 235 | 0.71 | 0.99 | 1.11 | 3.02 | 1.76 | 1.72 |
| 27 | 12.6 | 9.9 | 0.79 | 10 | 11.0 | 160 | 810 | 236 | 0.67 | 0.80 | 1.16 | 3.55 | 1.75 | 2.03 |
| 28 | 12.6 | 9 | 0.71 | 10 | 11.1 | 176 | 880 | 237 | 0.64 | 0.96 | 1.04 | 3.71 | 1.70 | 2.00 |
| 29 | 12.6 | 10.1 | 0.80 | 10 | 11.6 | 146 | 730 | 233 | 0.61 | 0.85 | 1.17 | 4.00 | 1.74 | 2.30 |
| 30 | 12.6 | 9.0 | 0.70 | 10 | 11.7 | 190 | 950 | 235 | 0.65 | 0.80 | 1.13 | 4.05 | 1.75 | 2.31 |
| 31 | 15.2 | 12.0 | 0.80 | 10.1 | 10.0 | 124 | 620 | 215 | 0.20 | 0.60 | 1.67 | 2.00 | 1.64 | 1.76 |
| 32 | 15.2 | 13.4 | 0.88 | 10.1 | 11.1 | 136 | 670 | 222 | 0.40 | 0.63 | 1.00 | 3.02 | 1.65 | 1.83 |
| 33 | 15.2 | 13.4 | 0.88 | 10.1 | 11.0 | 134 | 670 | 221 | 0.39 | 0.63 | 1.00 | 3.04 | 1.65 | 1.84 |
| 34 | 15.2 | 13.5 | 0.89 | 10.1 | 10.9 | 120 | 640 | 210 | 0.34 | 0.62 | 1.02 | 2.93 | 1.65 | 1.70 |
| 35 | 15.2 | 13.4 | 0.88 | 10.1 | 10.9 | 130 | 650 | 210 | 0.34 | 0.62 | 1.01 | 2.94 | 1.65 | 1.81 |
| 36 | 15.1 | 12.9 | 0.85 | 10.2 | 11.3 | 150 | 750 | 227 | 0.50 | 0.66 | 1.52 | 3.31 | 1.66 | 1.96 |
| 37 | 15.1 | 12.9 | 0.85 | 10.2 | 11.3 | 152 | 760 | 227 | 0.50 | 0.66 | 1.52 | 3.35 | 1.66 | 2.01 |
| 38 | 15.1 | 12.9 | 0.85 | 10.2 | 11.4 | 182 | 780 | 220 | 0.52 | 0.60 | 1.51 | 3.34 | 1.66 | 2.01 |
| 39 | 15.1 | 12.7 | 0.84 | 10.2 | 11.4 | 158 | 790 | 220 | 0.52 | 0.61 | 1.49 | 3.46 | 1.67 | 2.00 |
| 40 | 15.1 | 12.5 | 0.83 | 10.7 | 11.4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 41 | 15 | 12.2 | 0.81 | 10.1 | 11.4 | 166 | 800 | 232 | 0.59 | 0.70 | 1.42 | 3.45 | 1.64 | 2.05 |
| 42 | 15 | 12.7 | 0.84 | 10.1 | 11.6 | 166 | 810 | 232 | 0.59 | 0.70 | 1.47 | 3.50 | 1.60 | 2.13 |
| 43 | 15 | 12.4 | 0.82 | 10.1 | 11.6 | 170 | 850 | 233 | 0.61 | 0.71 | 1.41 | 3.65 | 1.60 | 2.17 |
| 44 | 15 | 12 | 0.80 | 10.1 | 11.1 | 166 | 810 | 233 | 0.61 | 0.72 | 1.39 | 3.50 | 1.60 | 2.14 |
| 45 | 15 | 12 | 0.80 | 10.1 | 11.0 | 162 | 810 | 235 | 0.65 | 0.72 | 1.39 | 3.45 | 1.66 | 2.04 |

- TABLA NO. 14 -
MEDICIONES Y CALCULOS DE ESFUERZOS DE FORDA

COEFICIENTE DE MORDEDURA = 1.5 NUMERO DE MUESTRAS = 27
MEDIDAS EN MM. - FUERZAS EN KG. - ESFUERZOS EN KG./MM²

| NUMERO ENSAYA | ALTURA INICIAL MM | ALTURA FINAL MM | ANCHO H1/H2 | ANCHO INICIAL MM | ANCHO FINAL MM | MEDICION GRAFICA (MM) | MEDICION FUERZA DE FORDA | AREA FORJADA DMM | RADIO DE CIRCULO EQUIVAL. | VALOR R/H1 | VALOR H1/H2 | ESFUERZO REAL E.R. | ESFUERZO TEORICO E.T. | VALOR E.R./E.T. |
|------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|------------------------|----------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------|---------------------------------|---------------|----------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 1 | 13.2 | 11.8 | 0.81 | 13.3 | 14.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | 13.2 | 12 | 0.81 | 13.3 | 14.1 | 155 | 775 | 282 | 9.47 | 0.79 | 1.27 | 2.75 | 1.71 | 1.60 |
| 3 | 13.2 | 11.9 | 0.94 | 13.3 | 14.1 | 165 | 825 | 282 | 9.47 | 0.80 | 1.26 | 2.93 | 1.72 | 1.70 |
| 4 | 13.2 | 11.3 | 0.84 | 13.3 | 14.5 | 180 | 915 | 291 | 9.61 | 0.85 | 1.18 | 3.24 | 1.74 | 1.87 |
| 5 | 13.3 | 11.4 | 0.86 | 13.5 | 14.7 | 204 | 1020 | 291 | 9.67 | 0.85 | 1.18 | 3.47 | 1.74 | 2.01 |
| 6 | 13.3 | 11.4 | 0.86 | 13.5 | 14.7 | 199 | 995 | 295 | 9.69 | 0.85 | 1.18 | 3.37 | 1.74 | 1.94 |
| 7 | 13.3 | 10.7 | 0.80 | 13.5 | 15.0 | 231 | 1155 | 306 | 9.77 | 0.91 | 1.10 | 3.86 | 1.76 | 2.19 |
| 8 | 13.3 | 10.7 | 0.80 | 13.5 | 14.9 | 267 | 1335 | 298 | 9.75 | 0.91 | 1.10 | 3.67 | 1.76 | 1.97 |
| 9 | 13.3 | 10.7 | 0.80 | 13.5 | 15.1 | 276 | 1380 | 302 | 9.80 | 0.92 | 1.09 | 3.64 | 1.77 | 2.04 |
| 11 | 16.7 | 15.1 | 0.90 | 13.4 | 14.3 | 166 | 830 | 284 | 9.54 | 0.85 | 1.52 | 2.90 | 1.65 | 1.74 |
| 11 | 16.7 | 14.9 | 0.92 | 13.4 | 14.2 | 173 | 865 | 285 | 9.52 | 0.86 | 1.56 | 3.04 | 1.65 | 1.85 |
| 12 | 16.7 | 15 | 0.96 | 13.4 | 14.2 | 174 | 870 | 285 | 9.52 | 0.83 | 1.51 | 3.05 | 1.65 | 1.85 |
| 13 | 16.7 | 14.5 | 0.86 | 13.4 | 14.8 | 196 | 980 | 295 | 9.70 | 0.88 | 1.47 | 3.22 | 1.67 | 1.99 |
| 14 | 16.7 | 14.3 | 0.86 | 13.4 | 14.7 | 192 | 960 | 293 | 9.66 | 0.88 | 1.49 | 3.27 | 1.67 | 1.98 |
| 15 | 16.7 | 14.5 | 0.88 | 14 | 15.5 | 203 | 1015 | 309 | 9.92 | 0.89 | 1.44 | 3.28 | 1.68 | 1.96 |
| 16 | 16.7 | 13.5 | 0.81 | 14 | 15.9 | 233 | 1165 | 317 | 10.05 | 0.74 | 1.34 | 3.67 | 1.70 | 2.14 |
| 17 | 16.7 | 13.6 | 0.81 | 13.9 | 15.7 | 229 | 1140 | 314 | 10.00 | 0.74 | 1.36 | 3.50 | 1.69 | 2.07 |
| 18 | 16.7 | 13.6 | 0.81 | 13.9 | 15.8 | 233 | 1165 | 312 | 9.98 | 0.73 | 1.37 | 3.74 | 1.69 | 2.24 |
| 19 | 20.1 | 18.2 | 0.91 | 13.4 | 14.2 | 153 | 765 | 284 | 9.54 | 0.82 | 1.91 | 2.89 | 1.61 | 1.67 |
| 20 | 20.1 | 18.1 | 0.92 | 13.4 | 14.3 | 167 | 835 | 286 | 9.54 | 0.83 | 1.90 | 2.92 | 1.61 | 1.65 |
| 21 | 20.1 | 18 | 0.96 | 13.4 | 14.2 | 166 | 830 | 286 | 9.54 | 0.82 | 1.85 | 2.90 | 1.61 | 1.60 |
| 22 | 20.1 | 18 | 0.85 | 13.4 | 14.5 | 195 | 975 | 296 | 9.64 | 0.87 | 1.77 | 3.31 | 1.63 | 1.87 |
| 23 | 20.1 | 17.5 | 0.94 | 13.4 | 14.4 | 184 | 920 | 285 | 9.55 | 0.85 | 1.84 | 3.12 | 1.62 | 1.82 |
| 24 | 20.1 | 17.3 | 0.81 | 13.4 | 15.2 | 188 | 940 | 304 | 9.83 | 0.87 | 1.76 | 3.18 | 1.63 | 1.83 |
| 25 | 20.1 | 16.1 | 0.80 | 13.4 | 15.6 | 218 | 1090 | 312 | 9.96 | 0.87 | 1.67 | 3.43 | 1.65 | 2.17 |
| 26 | 20.1 | 16.2 | 0.81 | 13.4 | 15.5 | 211 | 1055 | 309 | 9.82 | 0.81 | 1.63 | 3.41 | 1.64 | 2.04 |
| 27 | 20.1 | 16.2 | 0.81 | 13.4 | 15.4 | 221 | 1105 | 308 | 9.84 | 0.81 | 1.64 | 3.59 | 1.64 | 2.14 |

- TABLA NO. 15 -
MEDICIONES Y CALCULOS DE ESFUERZOS DE FORJA

COEFICIENTE DE MORDEDURA = 1 NUMERO DE MUESTRAS = 24
MEDIDAS EN MM. - FUERZAS EN KG - ESFUERZOS EN KG./MM²

| NUMERO ENSAYO | ALTURA INICIAL HO | ALTURA FINAL HS | H/HO | ANCHO INICIAL MO | ANCHO FINAL MI | MEDICION GRAFICA (MM) | MEDICION FUERZA DE FORJA | ABERA FORJADA B=MI | RADIO DE CIRCULO EQUIVAL | VALOR V/HI | VALOR H/HI | ESFUERZO REAL E.R. | ESFUERZO TEORICO E.T. | VALOR E.R./E.T. |
|---------------|-------------------|-----------------|------|------------------|----------------|-----------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|------------|------------|--------------------|-----------------------|-----------------|
| 1 | 20 | 18.3 | 0.92 | 28 | 21.0 | 114 | 1425 | 421 | 11.57 | 6.63 | 1.58 | 3.39 | 1.65 | 2.05 |
| 2 | 19.9 | 18.2 | 0.91 | 28 | 21.4 | 116 | 1439 | 420 | 11.56 | 6.64 | 1.57 | 3.45 | 1.65 | 2.04 |
| 3 | 19.9 | 18.2 | 0.91 | 28 | 21.0 | 114 | 1288 | 420 | 11.56 | 6.64 | 1.57 | 3.34 | 1.65 | 2.04 |
| 4 | 19.9 | 18.6 | 0.93 | 28 | 21.4 | 124 | 1550 | 436 | 11.76 | 6.74 | 1.44 | 3.56 | 1.64 | 2.14 |
| 5 | 19.8 | 17.1 | 0.86 | 28 | 21.6 | 139 | 1736 | 432 | 11.72 | 6.68 | 1.44 | 4.02 | 1.67 | 2.40 |
| 6 | 20.2 | 17.3 | 0.86 | 28 | 21.3 | 135 | 1687 | 430 | 11.70 | 6.58 | 1.44 | 3.93 | 1.67 | 2.35 |
| 7 | 20.2 | 17.3 | 0.86 | 28 | 21.4 | 144 | 1825 | 432 | 11.72 | 6.60 | 1.44 | 4.23 | 1.67 | 2.53 |
| 8 | 20.1 | 18 | 0.90 | 28 | 22.3 | 143 | 1865 | 446 | 11.84 | 6.74 | 1.38 | 4.10 | 1.70 | 2.46 |
| 9 | 20.1 | 18.2 | 0.91 | 28 | 22.0 | 142 | 1775 | 444 | 11.83 | 6.72 | 1.38 | 4.03 | 1.69 | 2.39 |
| 10 | 20.1 | 18 | 0.90 | 28 | 22.2 | 145 | 1831 | 444 | 11.85 | 6.74 | 1.35 | 3.74 | 1.70 | 1.95 |
| 11 | 20.1 | 22 | 0.90 | 28 | 21.3 | 185 | 1811 | 427 | 11.66 | 6.57 | 1.49 | 3.37 | 1.64 | 1.95 |
| 12 | 20.1 | 22.5 | 0.90 | 28 | 20.9 | 100 | 1354 | 440 | 11.54 | 6.54 | 1.95 | 3.23 | 1.60 | 2.04 |
| 13 | 20.1 | 22.5 | 0.90 | 28 | 21.0 | 121 | 1513 | 420 | 11.56 | 6.51 | 1.95 | 3.60 | 1.60 | 2.24 |
| 14 | 20.3 | 21.3 | 0.95 | 28 | 21.3 | 116 | 1450 | 430 | 11.70 | 6.55 | 1.92 | 3.37 | 1.65 | 2.39 |
| 15 | 20.3 | 21.3 | 0.95 | 28 | 21.5 | 114 | 1425 | 429 | 11.69 | 6.55 | 1.92 | 3.37 | 1.62 | 2.35 |
| 16 | 20.2 | 21.3 | 0.95 | 28 | 21.0 | 122 | 1525 | 435 | 11.77 | 6.55 | 1.84 | 3.50 | 1.62 | 2.16 |
| 17 | 20.1 | 20.7 | 0.90 | 28 | 21.3 | 134 | 1675 | 435 | 11.77 | 6.50 | 1.72 | 3.45 | 1.63 | 2.36 |
| 18 | 20.1 | 19.9 | 0.99 | 28 | 22.1 | 132 | 1650 | 442 | 11.86 | 6.40 | 1.80 | 3.15 | 1.64 | 2.20 |
| 19 | 20 | 20.1 | 0.90 | 28 | 21.9 | 129 | 1736 | 436 | 11.80 | 6.53 | 1.70 | 3.37 | 1.63 | 2.43 |
| 20 | 20 | 20.6 | 0.95 | 28 | 21.4 | 104 | 1267 | 429 | 11.60 | 6.44 | 2.29 | 2.94 | 1.54 | 1.87 |
| 21 | 20 | 20.7 | 0.95 | 28 | 20.0 | 103 | 1294 | 419 | 11.53 | 6.43 | 2.34 | 3.07 | 1.57 | 1.95 |
| 22 | 20 | 20.3 | 0.93 | 28 | 20.5 | 107 | 1271 | 419 | 11.55 | 6.47 | 2.32 | 3.04 | 1.57 | 1.94 |
| 23 | 20 | 20.1 | 0.95 | 28 | 21.4 | 120 | 1413 | 425 | 11.60 | 6.47 | 2.15 | 3.76 | 1.59 | 2.37 |
| 24 | 20 | 20.4 | 0.92 | 28 | 22.4 | 105 | 1363 | 439 | 11.82 | 6.40 | 2.00 | 3.10 | 1.59 | 1.95 |
| 25 | 20 | 21.5 | 0.93 | 28 | 21.0 | 127 | 1500 | 436 | 11.70 | 6.47 | 2.11 | 3.64 | 1.59 | 2.29 |
| 26 | 20 | 23.4 | 0.97 | 28 | 21.3 | 137 | 1713 | 470 | 11.84 | 6.56 | 2.02 | 3.81 | 1.60 | 2.15 |
| 27 | 20.9 | 22.5 | 0.78 | 28 | 22.3 | 137 | 1713 | 445 | 11.94 | 6.51 | 1.97 | 3.84 | 1.60 | 2.40 |
| 28 | 20.4 | 24 | 0.91 | 28 | 22.6 | 133 | 1663 | 453 | 12.04 | 6.50 | 2.04 | 3.67 | 1.56 | 2.34 |

- TABLA NO. 16 -
MEDICIONES Y CALCULOS DE ESFUERZOS DE FORJA

COEFICIENTE DE MORDIDURA = 0.5 NUMERO DE MUESTRAS = 17
MEDIDAS EN MM. - FUERZAS EN KG. - ESFUERZOS EN KG./MM²

| NUMERO ENSAYO | ALTURA INICIAL H0 | ALTURA FINAL H1 | H1/H0 | ANCHO INICIAL W0 | ANCHO FINAL W1 | MEDICION GRAFICA (MM) | MEDICION FUERZA DE FORJA | AREA FORJADA MM ² | RADIO DE CIRCULO EQUIVAL. | VALOR R/H1 | VALOR H1/R | ESFUERZO REAL E.R. | ESFUERZO TEORICO E.T. | VALOR E.N./V.S.T. |
|------------------|-------------------------|-----------------------|-------|------------------------|----------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------|---------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------|
| 1 | 40 | 35.8 | 0.89 | 39.6 | 41.4 | 106 | 2850 | 320 | 16.21 | 0.45 | 2.21 | 3.20 | 1.50 | 2.52 |
| 2 | 40 | 36.3 | 0.91 | 39.6 | 40.9 | 116 | 2800 | 319 | 16.16 | 0.44 | 2.25 | 3.54 | 1.50 | 3.25 |
| 3 | 44 | 35.8 | 0.80 | 39.6 | 41.2 | 124 | 3100 | 324 | 16.19 | 0.45 | 2.21 | 3.76 | 1.50 | 2.30 |
| 4 | 40 | 34.1 | 0.85 | 39.6 | 44.7 | 137 | 3425 | 334 | 16.29 | 0.40 | 2.09 | 4.11 | 1.50 | 2.50 |
| 5 | 40 | 33.1 | 0.83 | 39.6 | 42.1 | 131 | 3275 | 342 | 16.37 | 0.40 | 2.07 | 3.89 | 1.50 | 2.44 |
| 6 | 40 | 33.6 | 0.84 | 39.7 | 42.2 | 134 | 3350 | 343 | 16.38 | 0.40 | 2.05 | 3.97 | 1.50 | 2.49 |
| 7 | 40 | 32.2 | 0.81 | 39.7 | 44.0 | 148 | 3725 | 359 | 16.30 | 0.51 | 1.97 | 4.16 | 1.60 | 2.74 |
| 8 | 40 | 32.4 | 0.81 | 39.7 | 42.1 | 152 | 3600 | 341 | 16.36 | 0.51 | 1.98 | 4.52 | 1.60 | 2.62 |
| 9 | 40 | 32.3 | 0.81 | 39.2 | 44.9 | 146 | 3650 | 337 | 16.33 | 0.51 | 1.98 | 4.36 | 1.60 | 2.72 |
| 10 | 50.5 | 44.7 | 0.89 | 39.9 | 41.2 | 115 | 2875 | 323 | 16.19 | 0.36 | 2.76 | 3.49 | 1.50 | 2.26 |
| 11 | 50.4 | 45.3 | 0.90 | 39.9 | 41.2 | 125 | 3125 | 324 | 16.20 | 0.36 | 2.80 | 3.79 | 1.50 | 2.46 |
| 12 | 50.4 | 42.6 | 0.85 | 39.9 | 42.7 | 144 | 3600 | 344 | 16.39 | 0.38 | 2.60 | 4.26 | 1.50 | 2.74 |
| 13 | 50.3 | 40.4 | 0.80 | 39.8 | 43.1 | 135 | 3375 | 363 | 16.57 | 0.41 | 2.44 | 3.91 | 1.50 | 2.50 |
| 14 | 60 | 54.2 | 0.90 | 39.7 | 41.2 | 97 | 2425 | 324 | 16.19 | 0.30 | 3.35 | 2.34 | 1.50 | 1.90 |
| 15 | 59.9 | 53.6 | 0.89 | 39.7 | 41.1 | 127 | 3175 | 322 | 16.18 | 0.30 | 3.31 | 3.86 | 1.50 | 2.54 |
| 16 | 59.9 | 51.2 | 0.85 | 39.7 | 42.0 | 145 | 3625 | 340 | 16.35 | 0.32 | 3.13 | 4.32 | 1.50 | 2.83 |
| 17 | 59.8 | 48 | 0.80 | 31.7 | 43.0 | 156 | 3900 | 360 | 16.55 | 0.34 | 2.90 | 4.53 | 1.50 | 2.95 |

2.6 Análisis experimental de la deformación.

2.6.1 Procesamiento de los datos.

En las tablas mostradas anteriormente, se muestran los cálculos de los coeficientes de ensanchamiento (S) para cada ensayo de forja. Tomlinson y Stringer enuncian que dicho coeficiente se relaciona directamente con el coeficiente de agarre (m) y no con respecto a la forma de la pieza ni a la magnitud de deformación. Entonces al forjar una muestra de probetas con el mismo coeficiente de agarre, se espera obtener un coeficiente de ensanchamiento similar en todas ellas. Sin embargo, existen ciertas variaciones en dicho coeficiente debidas a parámetros aleatorios en las condiciones de forjado, como por ejemplo: malformaciones del plomo al interior de las probetas o deformaciones irregulares en el ensanchamiento de la pieza.

Entonces se puede considerar que la medición del coeficiente de ensanchamiento de una muestra de ensayos con el mismo coeficiente de agarre tiene el comportamiento de una distribución normal de probabilidad continua.

Con el fin de desechar los ensayos que dieron resultados notablemente irregulares y que puedan falsear el análisis de deformación, se escoge un intervalo de confianza de: $I = \mu \pm 2\sigma$.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \rightarrow z = \frac{I - \mu}{\sigma} \rightarrow z = \frac{(\mu \pm 2\sigma) - \mu}{\sigma} \rightarrow z = \pm 2$$

Según las tablas de áreas bajo la curva normal, la probabilidad de que los datos se encuentren en dicho intervalo es:

$$P(-2 < z < 2) = 0.977 - 0.023 = 0.954 = 95.4\%$$

La elección de este intervalo es adecuada ya que restringe considerablemente el rango de los datos sin embargo la probabilidad de rechazar un dato cuando en realidad es válido (llamado error α) es solamente de: $\alpha = 1 - 0.954 = 0.046 = 4.6\%$.

Muestra 1: $m = 2.0$ No. muestras = 45

Promedio de $S = \mu = 0.664$

Desviación estándar de $S = \sigma = 0.079$

Máximo S aceptado = $\mu + 2\sigma = 0.821$

Mínimo S aceptado = $\mu - 2\sigma = 0.506$

Número de datos rechazados = 2

Muestra 2: $m = 1.5$ No. muestras = 27

Promedio de $S = \mu = 0.584$

Desviación estándar de $S = \sigma = 0.075$

Máximo S aceptado = $\mu + 2\sigma = 0.733$

Mínimo S aceptado = $\mu - 2\sigma = 0.435$

Número de datos rechazados = 1

Muestra 3: $m = 1.0$ No. muestras = 28

Promedio de $S = \mu = 0.472$

Desviación estándar de $S = \sigma = 0.056$

Máximo S aceptado = $\mu + 2\sigma = 0.584$

Mínimo S aceptado = $\mu - 2\sigma = 0.361$

Número de datos rechazados = 0

Muestra 4: $m = 0.5$ No. muestras = 17

Promedio de $S = \mu = 0.326$

Desviación estándar de $S = \sigma = 0.047$

Máximo S aceptado = $\mu + 2\sigma = 0.420$

Mínimo S aceptado = $\mu - 2\sigma = 0.232$

Número de datos rechazados = 1

2.6.2 Aproximación funcional del coeficiente S dentro del rango limitado por el estudio.

A continuación se muestra una tabla de promedios de los ensayos de forja (sin contar los rechazados) que se efectuaron con:

- 1 - El mismo coeficiente de agarre ($m=B/W_0$).
- 2 - La misma magnitud de deformación (H_1/H_0).
- 3 - La misma forma geométrica de la probeta (H_0/W_0).

TABLA 17 - PROMEDIOS DEL COEFICIENTE DE ENSANCHAMIENTO S

| B/W ₀ | H ₁ /H ₀ | H ₀ /W ₀ | S | EXT. |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|
| 1.985 | 0.900 | 1.000 | 0.606 | 0.073 |
| 1.953 | 0.850 | 1.000 | 0.664 | 0.100 |
| 2.000 | 0.800 | 1.000 | 0.667 | 0.144 |
| 2.000 | 0.900 | 1.250 | 0.732 | 0.071 |
| 2.000 | 0.850 | 1.250 | 0.713 | 0.107 |
| 2.000 | 0.800 | 1.250 | 0.639 | 0.156 |
| 1.980 | 0.900 | 1.500 | 0.674 | 0.073 |
| 1.961 | 0.850 | 1.500 | 0.658 | 0.109 |
| 1.980 | 0.800 | 1.500 | 0.661 | 0.142 |
| 1.504 | 0.900 | 1.000 | 0.577 | 0.058 |
| 1.489 | 0.850 | 1.000 | 0.558 | 0.086 |
| 1.481 | 0.800 | 1.000 | 0.484 | 0.105 |
| 1.493 | 0.900 | 1.250 | 0.584 | 0.062 |
| 1.471 | 0.850 | 1.250 | 0.616 | 0.096 |
| 1.435 | 0.800 | 1.250 | 0.580 | 0.120 |
| 1.493 | 0.900 | 1.500 | 0.593 | 0.062 |
| 1.493 | 0.850 | 1.500 | 0.483 | 0.093 |
| 1.493 | 0.800 | 1.500 | 0.664 | 0.141 |
| 1.000 | 0.900 | 1.000 | 0.555 | 0.049 |
| 1.000 | 0.850 | 1.000 | 0.488 | 0.078 |
| 1.000 | 0.800 | 1.000 | 0.463 | 0.103 |
| 1.000 | 0.900 | 1.250 | 0.482 | 0.053 |
| 1.000 | 0.850 | 1.250 | 0.476 | 0.076 |
| 1.000 | 0.800 | 1.250 | 0.410 | 0.091 |
| 1.000 | 0.900 | 1.500 | 0.463 | 0.046 |
| 1.000 | 0.850 | 1.500 | 0.440 | 0.078 |
| 1.000 | 0.800 | 1.500 | 0.469 | 0.099 |
| 0.505 | 0.900 | 1.000 | 0.367 | 0.039 |
| 0.505 | 0.850 | 1.000 | 0.343 | 0.057 |
| 0.504 | 0.800 | 1.000 | 0.261 | 0.054 |
| 0.501 | 0.900 | 1.250 | 0.280 | 0.032 |
| 0.501 | 0.850 | 1.250 | 0.335 | 0.056 |
| 0.503 | 0.800 | 1.250 | 0.369 | 0.081 |
| 0.504 | 0.900 | 1.500 | 0.337 | 0.036 |
| 0.504 | 0.850 | 1.500 | 0.357 | 0.056 |
| 0.504 | 0.800 | 1.500 | 0.364 | 0.080 |

Considerando a los promedios como puntos en una gráfica, el objetivo es encontrar una curva suave que se ajuste al conjunto de puntos.

Criterio de mínimos cuadrados para hacer ajustes :

sea una curva ajustada $y = f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$

el residuo en el punto x_i es: $R_i = f(x_i) - y_i$

donde $f(x_i)$: punto de la curva ajustada

y_i : ordenada real

El método de mínimos cuadrados determina los valores de los coeficientes $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ de tal manera que la suma de los residuos (en todos los puntos a ajustar) sea lo menor posible.

Al derivar parcialmente con respecto a todos y cada uno de los coeficientes e igualando a cero para minimizar, se obtiene el sistema de ecuaciones siguiente:

$$\begin{cases} a_0n + a_1Ex + a_2Ex^2 + \dots + a_nEx^n = Ey \\ a_0Ex + a_1Ex^2 + a_2Ex^3 + \dots + a_nEx^{n+1} = \sum xy \\ a_0Ex^2 + a_1Ex^3 + a_2Ex^4 + \dots + a_nEx^{n+2} = \sum x^2y \\ \vdots \\ a_0Ex^m + a_1Ex^{m+1} + a_2Ex^{m+2} + \dots + a_nEx^{n+m} = \sum x^m y \end{cases}$$

Para encontrar los coeficientes $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ se tiene que resolver dicho sistema de ecuaciones.

Con el objeto de agilizar los cálculos, los ajustes se harán en la computadora con la ayuda del paquete LOTUS. Este paquete además de hacer la aproximación, calcula el coeficiente de correlación para saber que tan bueno es el ajuste. El coeficiente de correlación varía entre 1 y -1; si es 0 no existe correlación, si vale 1 o -1 la correlación es óptima.

De antemano no se puede saber cual es el tipo de función que mejor se ajusta a los datos, por lo cual se escogen algunas funciones típicas y se ajustan. La mejor será la que tiene el coeficiente de correlación más cercano a 1.

Tabla 18 - Funciones ajustadas

| TIPO DE FUNCION | ECUACION MODELO | CAMBIO DE VARIABLES NECESARIO | COEFICI. DE CORREL. OBTENIDO | VALOR DE LOS COEFICIEN. |
|----------------------------------|---|----------------------------------|------------------------------|---|
| polinomio 1 ^{er} -grado | $y = a + bx$ | ninguno | 0.944 | a = 0.234 b = 0.223 |
| polinomio 2 ^{do} -grado | $y = a + bx + cx^2$ | ninguno | 0.948 | a = -0.183 b = 0.325 c = -0.041 |
| polinomio 3 ^{er} -grado | $y = a + bx + cx^2 + dx^3$ | ninguno | 0.948 | a = 0.119 b = 0.528 c = -0.224 d = 0.049 |
| curva exponencial | $\log(y) = a + bx$ $y = cd^x$ | $y' = \log(y)$ $x' = x$ | 0.929 | a = -0.556 b = 0.201 |
| curva de potencias | $\log(y) = a + b \cdot \log(x)$ $y = cx^a$ | $y' = \log(y)$ $x' = \log(x)$ | 0.946 | a = -0.328 b = 0.504 |
| curva logaritmica | $y = a + b \cdot \log(x)$ | $y' = y$ $x' = \log(x)$ | 0.942 | a = 0.488 b = 0.549 |
| curva de inversos A | $y^{-1} = a + bx^{-1}$ $y = x / (b + ax)$ | $y' = y^{-1}$ $x' = x^{-1}$ | 0.927 | a = 1.065 b = 1.000 |
| curva de inversos B | $y = a + bx^{-1}$ | $y' = y$ $x' = x^{-1}$ | 0.908 | a = 0.726 b = -0.206 |
| curva de inversos C | $y^{-1} = a + bx$ $y = (a + bx)^{-1}$ | $y' = y^{-1}$ $x' = x$ | 0.892 | a = 3.354 b = -1.003 |

Mejor ajuste : polinomios de 2^{do} y 3^{er} grado.

Ya que el coeficiente de correlación no mejora al aumentar el grado del polinomio basta con tomar el polinomio de 2do. grado como el mejor ajuste en el rango de estudio (0.5 < m < 2.0).

DEFORMACION PLANA - FORJA ABIERTA

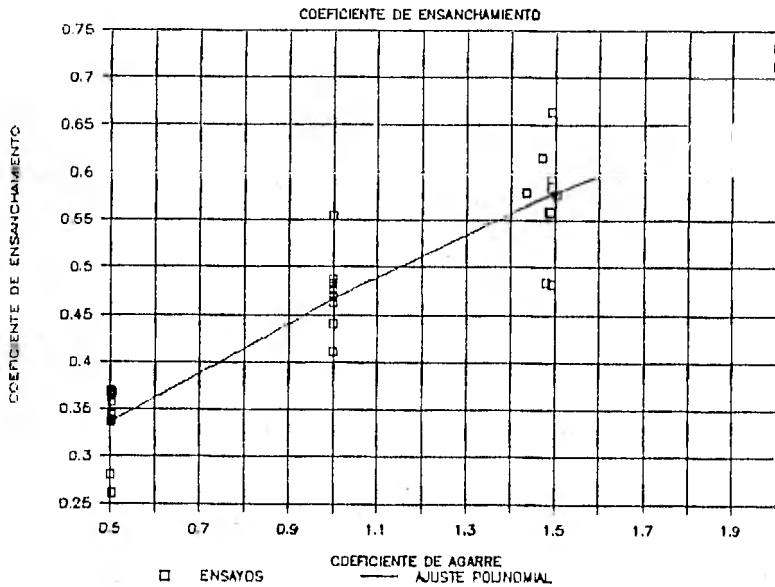


Figura 35 - Coef. de ensanchamiento contra el coef. de agarre

Los puntos corresponden al promedio del ensanchamiento de los ensayos que se hicieron con:

- 1 - El mismo coeficiente de agarre ($m=B/W_0$).
- 2 - La misma magnitud de deformación (H_1/H_0).
- 3 - La misma forma geométrica de la probeta (H_0/W_0).

La curva mostrada en la gráfica es el mejor ajuste al comportamiento del ensanchamiento: (pol. 2^{do} grado)

$$S = 0.183 + 0.325(B/W_0) - 0.041(B/W_0)^2 \quad - \text{Ec. 54} -$$

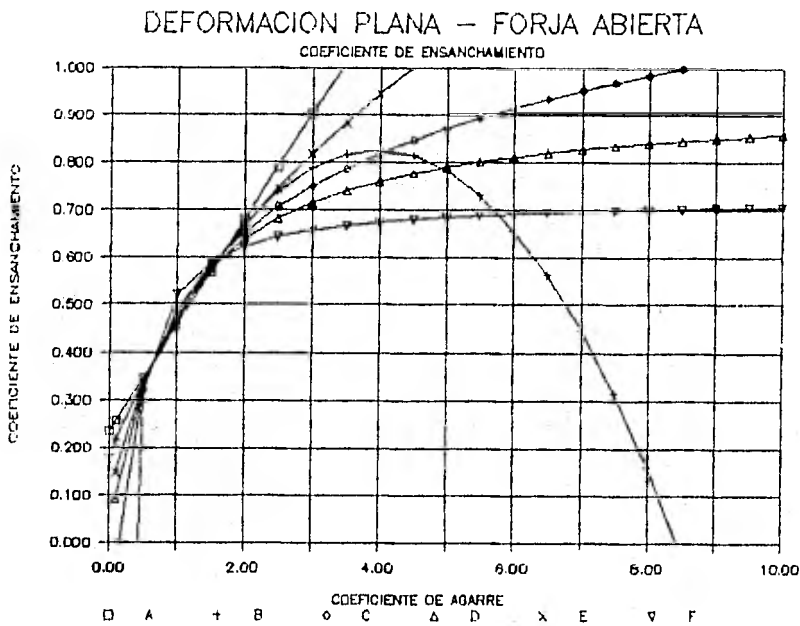
2.6.3 Comportamiento general del coef. de ensanchamiento.

Fórmula del coeficiente de ensanchamiento (Ec. 11):

$$S = \frac{\ln(W1/W0)}{\ln(H0/H1)}$$

De acuerdo a lo enunciado en la ecuación 15, el valor de S únicamente puede estar entre 0 y 1, ya que el coeficiente de ensanchamiento y el coeficiente de elongación deben sumar 1.

A continuación se grafican algunas de las curvas mencionadas en el punto anterior por analizar su comportamiento en un rango mucho mayor al del estudio.



- Figura 36 -

A: pol. grado 1 B: pol. grado 2 C: logarítmica
D: inversos A E: potencias F: inversos B

Como se puede observar en la gráfica, la mayoría de las curvas elegidas para el ajuste salen del dominio permitido para el coeficiente S. Solamente las curvas de inversos A y B son asintóticas a 1 y a 0.726 respectivamente y permanecen siempre en el dominio de S. De estas dos, la que mejor refleja el comportamiento de S es la curva de inversos A porque el coeficiente de ensanchamiento es también asintótico a 1. De esta manera se puede hacer la siguiente proposición:

- ECUACION 55 -

$$S = 0.183 + 0.325(B/W0) - 0.041(B/W0)^2 \rightarrow \text{para } 0.5 < B/W0 < 2.0$$

- ECUACION 56 -

$$S = \frac{1}{1.065 + 1.0*(B/W0)^{-1}} \quad (\text{ecuación inversos A})$$

multiplicando toda la fracción por B/W0

$$S = \frac{B/W0}{1.0 + 1.065*(B/W0)} \rightarrow \begin{array}{l} \text{para } B/W0 > 2.0 \\ \text{o } B/W0 < 0.5 \end{array}$$

La ecuación 56 se aplica también para B/W0 < 0.5 porque cuando B/W0 tiende a cero, el coeficiente de ensanchamiento debe tender a cero.

79
ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

2.6.4 Discusión sobre los resultados

J.N. Harris en el libro con Ref. -2- en la bibliografía menciona el estudio que realizaron Tomlinson y Stringer acerca del comportamiento del coeficiente de ensanchamiento.

Estos enuncian que:

- 1 - El coeficiente de agarre es el factor más importante que influye sobre el coeficiente de ensanchamiento.
- 2 - La ecuación que rige el comportamiento de ensanchamiento es (Ec. 17): $S = 0.14 + 0.36(B/W0) - 0.054(B/W0)^2$.

G.E. Dieter en el libro con Ref. -1- en la bibliografía menciona que el coeficiente de ensanchamiento se define por (Ec. 18):

$$S = \frac{B/W0}{1 - B/W0}$$

Tabla 19 - Comparación de ecuaciones

| B/W0 | S1 Harris | S2 Dieter | S3 obtenida | S1-S3 % Var. | S2-S3 % Var. |
|------|--------------|--------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 0.5 | 0.307 | 0.333 | 0.335 | 8.3% | 0.6% |
| 1.0 | 0.446 | 0.500 | 0.467 | 4.5% | 7.1% |
| 1.5 | 0.559 | 0.600 | 0.578 | 3.3% | 3.8% |
| 2.0 | 0.644 | 0.667 | 0.669 | 3.7% | 0.3% |

Relación con la ecuación de J.N. Harris

Al comparar con la ecuación enunciada por Harris, los porcentajes de variación con respecto a la ecuación obtenida en este análisis oscilan alrededor del 5%. Es importante mencionar que Harris no especifica el material ni la temperatura de forja.

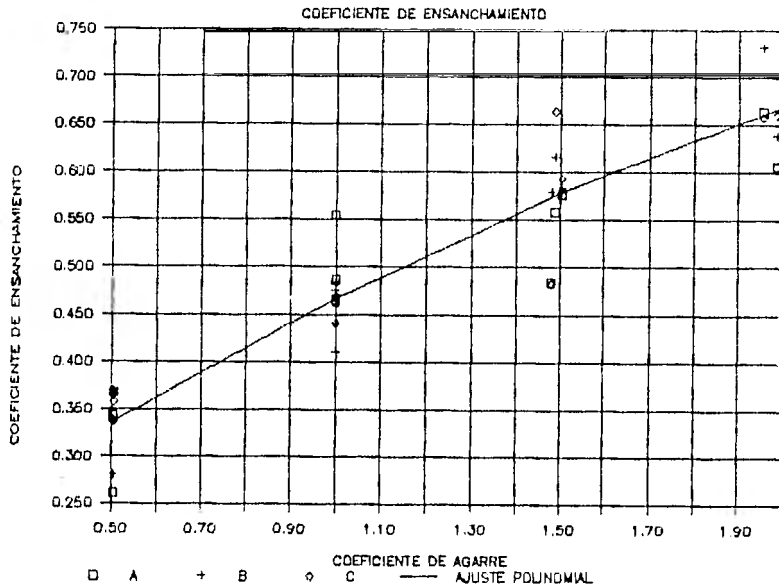
Estos factores son fundamentales ya que las características de deformación son diferentes en un metal con una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (CCuC) que en uno con estructura centrada en las caras (CCaC) como la del plomo.

Por otro lado, como ya se ha mencionado anteriormente, la temperatura de forja determina si se trabaja en caliente o en frío. Estas dos condiciones de trabajo influyen fuertemente sobre el tipo de deformación: el trabajo en caliente, debido a una fricción elevada entre la pieza y la herramienta, tiende a provocar una resistencia elevada a la deformación (reflejada en el efecto de abarrilamiento), en contrapartida el metal es mucho más dúctil en caliente que cuando se trabaja en frío.

Sin la información del metal y la temperatura es difícil esperar que la ecuación de Harris y la del presente análisis coincidan exactamente, sin embargo una variación de 5% es relativamente aceptable y además se han comprobado factores muy importantes:

- 1 - El perfil de las 2 gráficas (Figuras 16 y 35) son iguales en el rango estudiado: crecientes y con concavidad negativa.
- 2 - Al igual que Tomlinson y Stringer, en el presente análisis se encontró que el coeficiente de agarre es el factor más importante que influye sobre el coeficiente de ensanchamiento y esto se puede observar en las 2 gráficas de las siguientes hojas:

DEFORMACION PLANA — FORJA ABIERTA



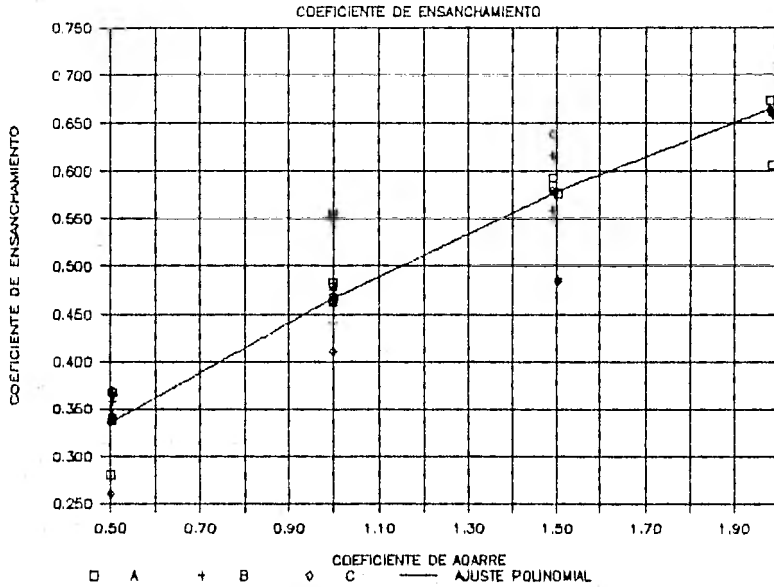
- Figura 37 -

En esta gráfica se clasifican en grupos los ensayos que se efectuaron con la misma forma geométrica de la probeta:

A: $H_0/W_0=1.0$ B: $H_0/W_0=1.25$ C: $H_0/W_0=1.5$

Al observar detalladamente la gráfica se confirma que los ensayos del mismo grupo se encuentran aleatoriamente distribuidos con respecto a la media representada por la línea. Entonces se puede deducir que los grupos no tienen un comportamiento estable y que no hay una ecuación que defina tal comportamiento por lo cual el factor "forma geométrica" queda descartado como un factor que influye sobre el coeficiente de ensanchamiento.

DEFORMACION PLANA – FORJA ABIERTA



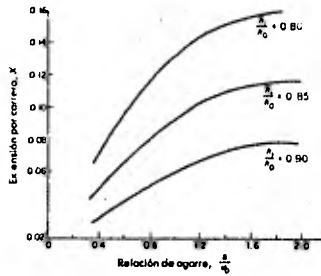
- Figura 38 -

En esta gráfica se hace el razonamiento análogo con la magnitud de la deformación:

A: $H1/H0=0.9$ B: $H1/H0=0.85$ C: $H1/H0=0.8$

Al igual que en la gráfica 1, el factor "magnitud de deformación" queda descartado como influyente sobre el coeficiente de ensanchamiento por no presentar un comportamiento estable.

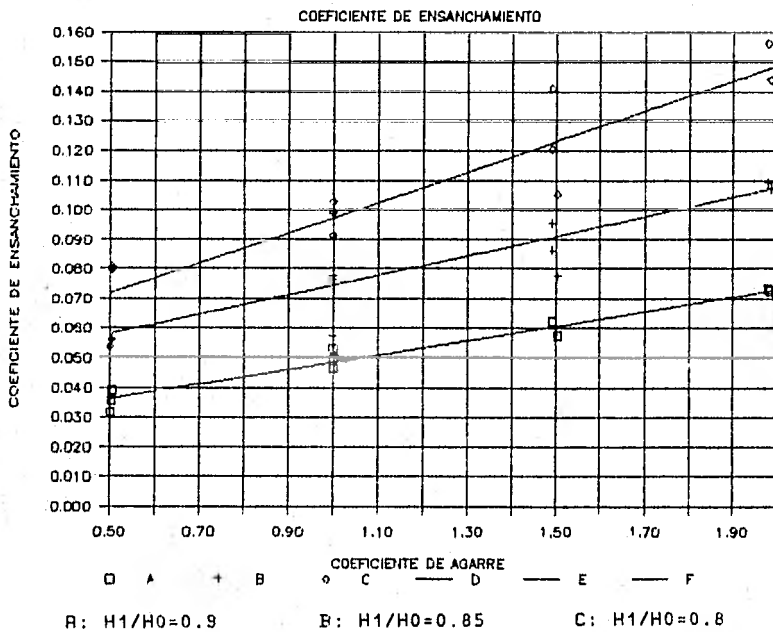
Extensión: J.N. Harris muestra que la extensión E (Ec. 48), depende del coeficiente de agarre y de la reducción de la altura:



- Figura 39 -

En el presente análisis se encontró:

DEFORMACION PLANA - FORJA ABIERTA



- Figura 40 -

El mejor ajuste al comportamiento del ensanchamiento son líneas rectas que dependen de la reducción del espesor. Según la gráfica de Harris el comportamiento es curvo y asintótico lo cual no es posible ya que el ensanchamiento no es asintótico a un valor específico. Las ecuaciones que relacionan el ensanchamiento con la reducción del espesor y con el coeficiente de agarre en el rango de $0.5 < B/W0 < 2.0$ son:

$$E = 0.046 + 0.051*(B/W0) \text{ para } H1/H0=0.8 \quad - \text{ Ec. 57 -}$$

$$E = 0.042 + 0.033*(B/W0) \text{ para } H1/H0=0.85 \quad - \text{ Ec. 58 -}$$

$$E = 0.024 + 0.025*(B/W0) \text{ para } H1/H0=0.8 \quad - \text{ Ec. 59 -}$$

Relación con la ecuación de Dieter

Con respecto a la ecuación de Dieter los porcentajes de variación oscilan alrededor del 3%, notablemente mejor que el 5% de Harris. La ecuación de Dieter es conceptualmente buena ya que respeta el dominio permitido para el coeficiente de ensanchamiento, pero no es exacta en el rango del análisis. Para comprobarlo se puede analizar el punto $B/W0 = 1$, en este punto el área a forjar es cuadrada. Según Dieter el coeficiente de ensanchamiento debe ser 0.5, esto es únicamente válido para un cilindro en donde la deformación es igual en todas las direcciones perpendiculares a la fuerza de forja. Sin embargo en el proceso de espigado cuando se empieza a forjar el área es cuadrada, pero el incremento en el ancho hace que el área se vaya volviendo cada vez más rectangular y por lo tanto es más fácil que la pieza se elongue a que se ensanche. Por esta razón, en el presente estudio y en el estudio de Harris el valor del coef. de ensanchamiento es menor a 0.5 cuando el coef. de agarre es 1.

2.7 Análisis experimental de esfuerzos

En las tablas mostradas en el punto 2.5.4 se muestran las mediciones y cálculos de los esfuerzos teóricos y reales de forja para cada ensayo.

Para el cálculo de esfuerzos teóricos es importante elegir que fórmula se va a usar dependiendo de si la deformación se hizo en frío o en caliente. Por un lado se sabe que la temperatura de recristalización del Plomo es -4°C aproximadamente y que a 20°C se está trabajando en caliente. Por otro lado, la prueba de que se trabaja en caliente es que, como existe fricción con adherencia, la deformación de la probeta en la interfase con la herramienta debe ser nula. Sin embargo, como si hubo deformación en las probetas mientras se estaba trabajando en caliente, se puede deducir que la fricción fue con deslizamiento y adherencia simultáneamente. Regresando al punto 2.1.2, se puede utilizar el factor de fricción que relaciona el esfuerzo cortante máximo a la cedencia (τ_0) con la fricción en la interfase (τ_i) para determinar que tanta deformación se efectuó con adherencia.

$$m = \frac{\tau_i}{\tau_0} \rightarrow m = \frac{\mu * p}{(2/f_3) * (\sigma_0/2)} \rightarrow m = \frac{\mu * \sigma_0}{\sigma_0 / f_3} \quad - \text{Ec.60} -$$

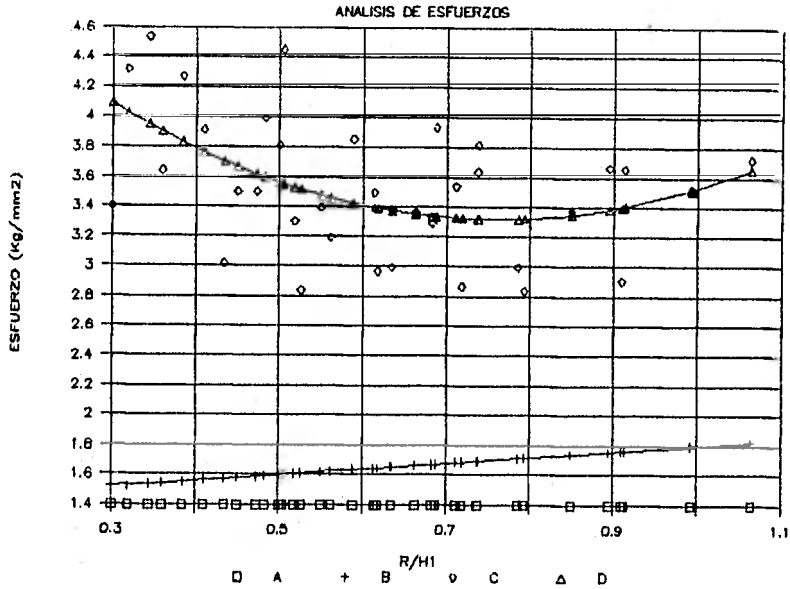
$$m = \mu * f_3 = 0.43 * f_3 = 0.74$$

Entonces para calcular el esfuerzo teórico se use la fórmula de esfuerzo normal promedio:

$$p_h = \sigma_0 \left[1 + \frac{2mR}{3f_3h} \right] \quad \text{con } \sigma_0 = 1.4 \text{ Kg/mm}^2, m = 0.74.$$

En la siguiente página se grafican los esfuerzos reales y los esfuerzos teóricos con respecto a la relación R/H1:

DEFORMACION PLANA — FORJA ABIERTA



- Figura 41 -

Como se puede ver en la gráfica no existe una relación aparente entre el esfuerzo real y el esfuerzo teórico.

G.E. Dieter menciona que el esfuerzo real para forjar una pieza con superficies planas puede calcularse con la fórmula :

$$F = \sigma_2 * A * C \quad - \text{Ec. 61} -$$

donde σ_2 es el esfuerzo teórico , A es el área de forja,

C es un factor que considera la no-homogeneidad en la deformación. El factor depende de la relación H/B, esto quiere decir que una pieza alta y angosta tiende a producir una mayor deformación no-homogénea (reflejada en el efecto de abarrilamiento) que una pieza ancha y baja.

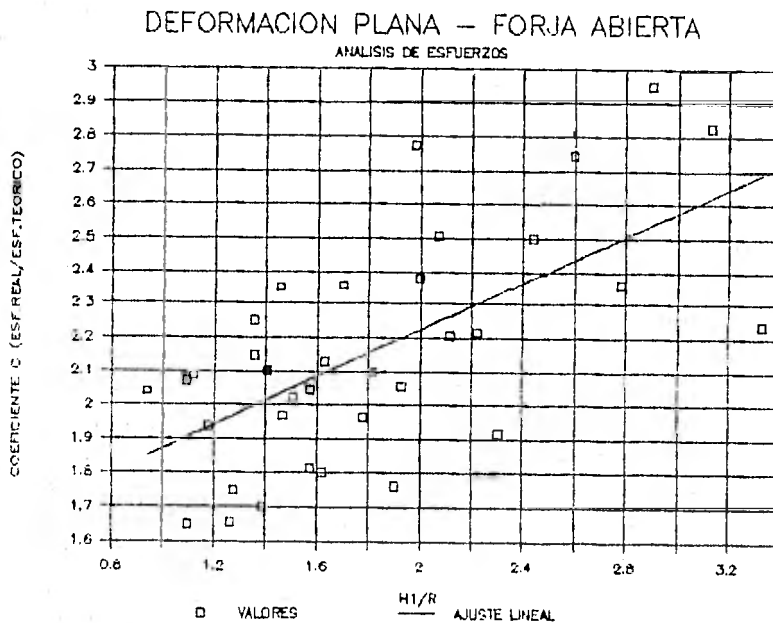
Dieter menciona que el factor C se define con la ecuación :

$$C = 0.8 + 0.2*(H/B) \quad - \text{Ec. 62} -$$

Con el fin de encontrar una relación entre el esfuerzo teórico y el práctico, se puede hacer un razonamiento análogo al que menciona Dieter a partir de la ecuación 61: $F = \sigma_z * A * C$. Despejando la C:

$$C = \frac{(F/A)}{\sigma_z} = \frac{\text{Esfuerzo real}}{\text{Esfuerzo teórico}} \quad - \text{Ec. 63} -$$

Si se grafica y se ajusta el factor C (Esf. real / Esf. teórico) contra el factor H1/R se puede determinar, una ecuación que defina al factor C con respecto a H1/R.



- Figura 42 -

El mejor ajuste es un polinomio de primer grado (línea recta):

$$C = 1.52 + 0.35 * (H1/R) \quad - \text{Ec. 64} - \quad (\text{coef. de correlación ajuste} = 0.65)$$

En conclusión, para calcular la fuerza (F) necesaria al forjar una pieza, cuando ocurren condiciones de fricción con adherencia y deslizamiento de manera simultánea, se debe usar la fórmula:

$$F = \sigma_{\frac{1}{2}} * A * C \quad (\text{Ec.61})$$

considerando

$$\sigma_{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \left[1 + \frac{2mR}{3f3h} \right] \quad (\text{Ec.30})$$

A = área forjada

$$C = 1.52 + 0.35*(H1/R) \quad (\text{Ec.64})$$

Aunque este coeficiente C no puede ser comparado con el coeficiente C mencionado por Dieter, ya que éste fue desarrollado considerando que no hay ensanchamiento y el del presente estudio considera el ensanchamiento y la elongación, la razón de ser de estos coeficientes se debe a la misma causa. Ambos elevan el valor de la fuerza de forja debido la resistencia que presenta la no-homogeneidad en la deformación.

2.8 Conclusiones

2.8.1 Abarrilamiento

En el presente análisis, la magnitud del efecto de abarrilamiento que se presentó en los ensayos fue un factor inesperado. El abarrilamiento complicó bastante el cálculo del ancho final promedio ya que se tuvo que recurrir a integrales triples para el cálculo de volúmenes. Las razones por las cuales se debió tal efecto fueron:

1 - La manera en que se elaboraron los ensayos propició al abarrilamiento porque cada vez que se forjaba, el área a forjar era adyacente a una área forjada anteriormente. En otras palabras el avance de la herramienta entre cada ensayo fue igual a la longitud de ésta. En la práctica, el avance de la herramienta en cada ciclo de forjado es inferior a la longitud de esta con el objetivo de uniformizar los abombamientos y abarrilamientos.

2 - El Plomo tiene un coeficiente de fricción muy alto y propicia a que haya deformación con adherencia en la interfase con la herramienta. La adherencia crea resistencia al avance del Plomo y propicia el abarrilamiento. Hubiera sido posible disminuir el abarrilamiento lubricando la interfase para disminuir el coeficiente de fricción o usando un material que tenga menor coeficiente de fricción.

En el presente estudio, es importante mencionar que todos los resultados obtenidos se relacionan a condiciones de forja sin lubricación donde existe fricción con adherencia y deslizamiento simultáneamente.

2.8.2 Generales

A grandes rasgos los pasos que se tomaron para la elaboración del presente análisis son:

- 1 - La elaboración de ensayos de forja bajo una variedad de factores que afectan la deformación y el esfuerzo de forja.
- 2 - La eliminación de ensayos que mostraron resultados fuera de lo esperado.
- 3 - El cálculo del mejor ajuste de los ensayos según el criterio de mínimos cuadrados para encontrar una ecuación empírica que defina a la deformación y al esfuerzo.
- 4 - El análisis racional de las ecuaciones para determinar su rango de validez.

Todos estos factores hacen que el presente análisis sea más concreto y fundamentado que los que están presentados en los libros de Ingeniería Mecánica. De acuerdo a la introducción, el objetivo de la tesis era comprobar, mejorar y ampliar la información mencionada en los libros, por lo cual el objetivo de la tesis está cumplido. Sin embargo, esto no quiere decir que los demás estudios y enunciados sean desplazados, sino que son enriquecidos y complementados por el presente. Es muy importante mencionar que cualquier investigación o profundización sobre un tema debe tener como objetivo mejorar el estado de conocimiento actual y no opacarlo.

Todo el material contenido en el presente estudio es una aportación a la Ingeniería. Ya que dicho material es completamente confiable y comprobable, puede ser utilizado como material de uso didáctico o como referencia y ayuda en cualquier otra investigación posterior relacionada con el mismo tema.

BIBLIOGRAFIA

- 1- Dieter, George . Mechanical Metallurgy, Third Edition .
McGraw-Hill, E.U.A. , 1986.
- 2- Harris, John Noel . Trabajo Mecánico de Los Materiales,
Teoría y Práctica . CECSA, México, 1987.
- Higgins, Raymond . Ingeniería Metalúrgica, Tomo II .
CECSA, México, 1980.
- Rowe, G.W. . Elements of Metalworking Theory .
Edward Arnold, E.U.A. .
- Avner, Sydney . Introducción a La Metalurgia Física, Segunda
Edición . McGraw-Hill, México, 1974 .
- Van Vlack, L. . Materiales para Ingeniería .
CECSA, México, 1984.
- Beer, F. . Mecánica de Materiales .
Johnston, R. McGraw-Hill, México, 1982 .
- American Machinist Magazine . Formado de Metales .
Limusa, México, 1984 .
- Ruiz Mijares, A . Trabajos de Forja . Representaciones y
servicios de Ingeniería . México D.F.
- Walpole, R.E. . Probabilidad y Estadística para Ingenieros .
Myers, R.H. Segunda Edición. Interamericana, México, 1985.
- Luthe, Rodolfo . Métodos Numéricos .
Olivera, Antonio Limusa, México. 1984 .
Schutz, Fernando
- Spiegel, Murray . Manual de Fórmulas y Tablas Matemáticas .
Schaun, McGraw-Hill, México, 1970 .