



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Incorporación de modelos matemáticos de comportamiento mecánico en caliente para aceros al carbono en procesos de forja

Belinda Quintana

Naguanagua, Agosto del 2009.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Incorporación de modelos matemáticos de comportamiento mecánico en caliente para aceros al carbono en procesos de forja

Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico

Tutor académico:
Ing. Sandra Cabello

Autores:
Belinda Quintana

Naguanagua, Agosto del 2009.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada **“Incorporación de modelos matemáticos de comportamiento mecánico en caliente para aceros al carbono en procesos de forja”**, presentada por la bachiller: **Belinda Mariusly Quintana Hernández**, portadora de la Cédula de Identidad N^o: **15.375.976**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. Ing. Sandra Cabello
Presidente del jurado

Prof. Laura Sáenz
Miembro del jurado

Prof. Gennifer Aparicio
Miembro del jurado

En Naguanagua a los 12 días del mes de Agosto de 2009

Agradecimientos

En primer lugar le agradezco infinitamente a Dios por darme la fortaleza, la constancia y la sabiduría, por ser mi guía y protector, por no dejarme desistir de este que ha sido mi sueño, el primer paso de mi realización académica y profesional.

Quiero expresar, mi más sincero agradecimiento a mi tutora, la Profesora Sandra Cabello por su paciencia, consejos, guía y sugerencias oportunas durante el desarrollo de este trabajo de investigación, el cual no hubiese podido materializar sin la orientación que me brindó en todo momento. De igual manera agradezco al Sr. Jesús Zarate por la valiosa colaboración que me prestó en el proceso de investigación de este trabajo.

A todos mis amigos que estuvieron a mi lado, apoyándome, dándome un buen consejo a lo largo de este camino emprendido.

Dedicatoria

A ti mi Dios amado, dedico este trabajo de grado que ha sido a fin de cuentas logro tuyo porque nunca me abandonaste, por iluminar cada día de mi vida.

A mi madre, que ha sido el pilar fundamental de mi vida, por su amor incondicional, sus consejos, paciencia y dedicación, por ser la persona que más admiro y mí ejemplo a seguir. A ti te debo todo lo que soy y lo que tengo.

A mis hermanos Vanessa y Rafael Augusto, que de alguna u otra forma han estado conmigo en todo momento.

A mi sobrina Victoria Sofía, que ha sido motivo de alegrías y contagiarme de esa inocencia y energía que han transformado los malos momentos en motivos para seguir adelante.

En fin a toda mi familia y amigos, por acompañarme a lo largo de mi carrera, un camino lleno de dificultades y también de muchas satisfacciones.

Resumen

En este trabajo se presenta la incorporación de un modelo matemático de comportamiento mecánico en caliente de aceros a un proceso de forja. Para ello se selecciona un modelo que considera, en la deducción de sus ecuaciones constitutivas, el aporte de los mecanismos de deformación presentes en los aceros a altas temperaturas (endurecimiento por deformación, restauración y recristalización dinámica). Asimismo se selecciona un modelo matemático que abarca el cálculo de los parámetros de deformación de un diseño de proceso de forja (carga, dimensiones, temperatura, velocidad de deformación, grado de reducción). Se incorpora a una estructura de programación la combinación seleccionada de modelos matemáticos mencionados. Para realizar la corrida del programa se utiliza la información suministrada por Puchi (2003) de las constantes de un acero C-Mn, y los datos de los parámetros de un proceso de forja aplicado actualmente en la industria. Los resultados obtenidos permitieron realizar un análisis del comportamiento de las variables que intervienen en el proceso de forja en caliente, donde se pudo constatar que la temperatura influye notablemente en la resistencia a la fluencia de los aceros. Así también se pudo comprobar que a menor contenido de carbono mayor es la resistencia de este material a ser deformado, por lo que se concluyó que el contenido de carbono de los aceros cuando son tratados a altas temperaturas, determina la resistencia del acero en el conformado.

Nomenclatura

Símbolos Arábigos

F: Fuerza

M: Masa

m: Coeficiente de adherencia por efectos de la fricción

n: Exponente de endurecimiento por deformación

Q: Constante de energía de activación aparente

R: Constante universal de los gases

T: Temperatura

V: Velocidad

V_0 : Velocidad inicial del mazo

Y_f : Esfuerzo de fluencia

Z: Parámetro de Zener-Hollomon

Símbolos Griegos

ε : Esfuerzo real

$\dot{\varepsilon}$: Tasa de deformación

ε_p : Deformación de pico.

ε_r : Deformación por relajación.

$\mu(T)$: Módulo de corte elástico

σ : Esfuerzo de fluencia

σ_0 : Esfuerzo de fluencia inicial

σ_s : Esfuerzo de saturación aparente

Índice general

| | |
|---|----------|
| Índice general | i |
| Índice de figuras | iv |
| Índice de tablas | viii |
| Introducción | ix |
| CAPÍTULO 1 Planteamiento del problema | 1 |
| 1.1 Situación problemática | 1 |
| 1.2 Objetivos | 2 |
| 1.2.1 Objetivo general | 2 |
| 1.2.2 Objetivos específicos | 2 |
| 1.3 Justificación | 3 |
| 1.4 Alcance | 3 |
| 1.5 Limitaciones | 4 |
| 1.6 Antecedentes | 4 |
| CAPÍTULO 2 Marco teórico | 8 |
| 2.1 Proceso de Forja | 8 |
| 2.1.1 Forjado en dado abierto ó recalado | 9 |
| 2.1.2 Forjado en dado cerrado ó impresor | 12 |
| 2.1.3 Forjado sin rebaba | 14 |
| 2.1.4 Forjado cilíndrico | 14 |
| 2.1.4.1 Caso de fricción deslizante | 15 |
| 2.1.4.2 Caso de fricción adherente | 15 |
| 2.1.5 Forjado cilíndrico aplicando impacto por caída libre de un mazo | 16 |
| 2.2 Comportamiento mecánico de los aceros en caliente | 18 |
| 2.2.1 Endurecimiento por deformación | 20 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2.2 Mecanismos de ablandamiento..... | 21 |
| 2.2.2 a.- Restauración dinámica..... | 21 |
| 2.2.2 b.- Recristalización dinámica..... | 22 |
| 2.3 Ecuaciones constitutivas de aceros deformados a temperaturas elevadas..... | 23 |
| 2.3.1 Modelo del efecto de la temperatura en el comportamiento esfuerzo-deformación de los aceros | 23 |
| 2.3.2 Modelos propuestos por Kozlowski et al;..... | 26 |
| 2.3.3 Modelo de Medina et al;..... | 30 |
| 2.3.4 Modelo de Cabrera et al;..... | 33 |
| 2.3.5 Modelo de Puchi (2003)..... | 38 |
| CAPÍTULO 3 Marco metodológico..... | 44 |
| 3.1 Descripción de la metodología..... | 44 |
| 3.1.1 Selección del modelo matemático de forja..... | 44 |
| 3.1.2 Selección del modelo matemático de comportamiento mecánico en caliente de los aceros..... | 46 |
| 3.1.3 Elaboración del programa para el cálculo de forja..... | 48 |
| 3.1.4 Aplicación del programa en un caso práctico..... | 55 |
| CAPÍTULO 4 Resultados..... | 57 |
| 4.1 Programa de forja..... | 57 |
| 4.1.1 Constantes del material y datos de entrada..... | 58 |
| 4.1.2 Presentación de la programación correspondiente a los cálculos del proceso de forja..... | 60 |
| 4.1.3 Datos de salida del programa de forja..... | 62 |
| 4.2 Corrida del programa de forja..... | 63 |
| CAPÍTULO 5 Análisis de resultados..... | 65 |
| CAPÍTULO 6 Conclusiones..... | 70 |
| CAPÍTULO 7 Recomendaciones..... | 72 |
| Referencias bibliográficas..... | 73 |
| Glosario de términos..... | 75 |
| Apéndice..... | 76 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Tipos de operaciones de forjado..... | 9 |
| Figura 2.2 Deformación de una pieza de trabajo cilíndrica bajo condiciones ideales en una operación de forjado en dado abierto..... | 11 |
| Figura 2.3 Deformación cilíndrica real de una pieza de trabajo bajo en una operación de forjado en dado abierto mostrando un abarrilamiento pronunciado..... | 11 |
| Figura 2.4 Secuencia en el forjado en dado impresor..... | 12 |
| Figura 2.5 Secuencia en el forjado sin rebaba..... | 14 |
| Figura 2.6 Influencia de la laminación en caliente sobre la estructura cristalina..... | 18 |
| Figura 2.7 Representación esquemática de la recristalización dinámica discontinua en diferentes condiciones de deformación... | 19 |
| Figura 2.8 Representación esquemática de las etapas de endurecimiento de un monocristal..... | 21 |
| Figura 2.9 Diferentes etapas de la restauración dinámica para un material deformado:(a) generación de dislocaciones (b) formación de celdas (c) aniquilación de dislocaciones dentro de las celdas (d) formación de subgranos (e) y su crecimiento..... | 22 |
| Figura 2.10 Curvas de fluencia para un acero al carbono donde se ve el cambio de comportamiento de pico simple a pico múltiple al bajar la velocidad de deformación..... | 23 |
| Figura 2.11 a) Efecto de la velocidad de deformación sobre la resistencia a la fluencia e temperatura de trabajo elevada b) la misma relación graficada en coordenadas log-log..... | 26 |
| Figura 2.12 Curvas esfuerzo-deformación efectivas a 1173 K y diferentes tasas de deformación..... | 40 |
| Figura 3.1 Secuencia de ecuaciones incorporadas al programa | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.1 Constantes del material introducidas en el programa..... | 58 |
| Figura 4.2 Datos de entrada del programa de forja..... | 59 |
| Figura 4.3 Programación correspondiente a los cálculos del proceso de forja..... | 60 |
| Figura 4.4 Ventana de Salida del programa de forja..... | 61 |
| Figura 4.5 Datos de entrada del proceso tomadas de un proceso industrial..... | 62 |
| Figura 4.6 Datos de salida del programa para el caso práctico..... | 63 |
| | |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1 Valores típicos de Kf para varias formas de la pieza en forjado con dado impresor y en dado cerrado..... | 13 |
| Tabla 2.2 Valores típicos del coeficiente de resistencia K y exponente de endurecimiento por deformación n para metales seleccionados..... | 27 |
| Tabla 3.1 Valores de las constantes involucradas en la descripción de las curvas de fluencia a varias temperaturas y esfuerzo de deformación..... | 50 |
| Tabla 3.2 Parámetros involucrados en las ecuaciones constitutivas que describen el comportamiento de σ_0 y σ_s | 50 |
| Tabla 3.3 Parámetros involucrados en las ecuaciones constitutivas del acero C-Mn..... | 51 |

Introducción

La modelización de los procesos de conformado en caliente es una necesidad cada vez mayor desde el punto de vista industrial. En el diseño de los procesos de conformado del acero a elevadas temperaturas, es necesario comprender los modos de deformación que intervienen en el proceso, controlar los parámetros influyentes y tener un conocimiento global de la interacción entre los parámetros del proceso y sus efectos sobre la microestructura y en consecuencia, de las propiedades del material conformado, para poder predecir las condiciones óptimas de procesamiento requeridas para la obtención de piezas dentro de los estándares de calidad. Además de reducir el tiempo de diseño y costos en el desarrollo de nuevos productos en la industria.

El proceso de forja en caliente, es en la actualidad uno de los más utilizados en la elaboración de gran variedad de componentes mecánicos a nivel industrial, tales como, bridas, uniones para tuberías, componentes estructurales para aviones, barras de conexión para motores, engranajes, entre otros, especialmente aquéllos fabricados de aceros al carbono. Sin embargo, el hecho de que este material pueda ser usado con más frecuencia está relacionado con su bajo costo, disponibilidad y propiedades mecánicas.

En un proceso de conformado en caliente, el acero está sometido a varios fenómenos (endurecimiento por deformación, restauración y recristalización dinámica) y el debido control de estos mecanismos de

deformación es lo que va a determinar las propiedades de la pieza conformada.

El objetivo principal de esta investigación, es incorporar un modelo matemático que caracterice el comportamiento mecánico de los aceros cuando son trabajados a altas temperaturas, a un modelo de proceso de forja, con el fin de obtener una relación entre los mecanismos presentes en la deformación en caliente de los aceros y los parámetros que caracterizan a un proceso de forjado.

El presente trabajo esta compuesto por siete capítulos. En el capítulo I, se presenta un bosquejo de el planteamiento del problema, la trascendencia de la investigación, los objetivos planteados para el fin de este trabajo, el alcance y las limitaciones para lograr la realización de este proyecto. El segundo capítulo implica todo lo relacionado con las bases teóricas que sustentan este trabajo de investigación.

El tercer capítulo, involucra la metodología de trabajo, es decir abarca el desglose de los métodos y técnicas llevados a cabo en el desarrollo del trabajo de investigación. El cuarto capítulo comprende los resultados obtenidos luego de la fase de investigación, selección de los modelos más idóneos, el ensamblaje del programa y corrida del mismo.

En el capítulo 5, se presentan los análisis de resultados, que abarca el estudio, observaciones y razonamiento que se esgrimen de los resultados presentados en el capítulo 4. El capítulo 6 se centra en las conclusiones que enlazan los objetivos planteados y resultados obtenidos. Por último, el capítulo 7 incluye las recomendaciones acerca de las mejoras y nuevos planteamientos derivados de este trabajo de investigación.

CAPÍTULO 1

Planteamiento del problema

1.1 Situación problemática

El Forjado es un proceso de deformación en el cual se comprime el material de trabajo entre dos dados, usando impacto o presión gradual, el material es precalentado para reducir la resistencia del material a la deformación.

Uno de los materiales más utilizados en el diseño de un proceso de forja son los aceros al carbono ya que son metales que poseen buena dureza en caliente, esta propiedad los hace útiles para el forjado a altas temperaturas.

Hasta los momentos las ecuaciones para calcular los parámetros que rigen un proceso de forja son expresiones sencillas, con las cuales no se puede estimar el comportamiento real que sufre el material al ser deformado en caliente.

Cuando el acero es trabajado a altas temperaturas aparecen fenómenos que influyen notablemente en las propiedades del material tales como: endurecimiento por deformación que se caracteriza por el incremento de dislocaciones y el aumento de la tensión superficial, la restauración dinámica, que es el mecanismo de regeneración de la estructura en los cuales se reordenan las dislocaciones y la recristalización dinámica que es un fenómeno

2 Incorporación de modelos matemáticos de comportamiento mecánico en caliente para aceros al carbono en procesos de forja

que aparece cuando sigue aumentando la densidad de dislocaciones y alcanza un valor crítico, aproximándose la velocidad con que nuclean y crecen nuevos granos con la velocidad con la cual endurecen por deformación.

La modelización de los procesos de forja en caliente es una necesidad cada vez mayor para lograr el control de todos los parámetros y el equilibrio de los fenómenos que sufre el material al ser deformado a altas temperaturas y mejorar así la calidad del producto y predecir las condiciones óptimas de los procesos de forja.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Incorporar modelos matemáticos de comportamiento mecánico en caliente para aceros al carbono en procesos de forja

1.2.2 Objetivos Específicos

- Revisar los diferentes modelos matemáticos existentes para determinar el comportamiento mecánico de aceros al carbono a altas temperaturas.
- Revisar los diferentes modelos matemáticos existentes para el diseño de un proceso de forja.
- Agrupar por categorías los modelos matemáticos para estudiar el comportamiento mecánico de los aceros al carbono en caliente y el diseño de un proceso de forja.

- Seleccionar la combinación de modelos matemáticos que permitan el diseño de procesos de forja en aceros al carbono, considerando los fenómenos presentes a altas temperaturas.
- Incorporar el modelo matemático seleccionado a una estructura de programación.

1.3 Justificación

Con este estudio se podrá incorporar un modelo matemático del comportamiento mecánico de los aceros al carbono a procesos de forja, esto permite el control de los parámetros de deformación del forjado (temperatura, velocidad de deformación, grado de reducción, dimensiones, carga) y los fenómenos que aparecen cuando los aceros al carbono son trabajados a altas temperaturas (endurecimiento por deformación, recuperación dinámica y recristalización dinámica).

A través de la incorporación de ecuaciones constitutivas que caracterizan al comportamiento del acero en caliente a los procesos de conformados basados en forja, se tendrá un análisis cuantitativo del comportamiento de este material antes de que se lleven a cabo las operaciones en la práctica, por lo que se podrá predecir las condiciones apropiadas en el proceso de forja en caliente.

1.4 Alcance

- La investigación será enfocada a procesos de forja en caliente.
- El material que se tomará como base para el estudio será aceros de bajo carbono.

4 *Incorporación de modelos matemáticos de comportamiento mecánico en caliente para aceros al carbono en procesos de forja*

- La temperatura a la que estará sometido el material en estudio estará comprendida entre (900-1400) °C
- La estructura de programación se enfocará en el cálculo de carga en procesos de forjado.
- El programa computarizado base será Microsoft Excel.

1.5 Limitaciones

- Escasa información a cerca de los modelos matemáticos tanto de los procesos de forja como los de comportamiento mecánico en caliente de los aceros al carbono.
- No se dispone de literatura referente a resultados experimentales de forja en caliente para los aceros considerados.
- El rango de temperaturas considerado para los aceros al carbono está limitado por una investigación previa que lleva por nombre: “**Simple Constitutive Equations for steel at high temperaturas de P.F. Koslowski, 1992**”.

1.6 Antecedentes

Uno de los procesos de fabricación de componentes mecánicos más utilizados en la industria es la forja en caliente. Este proceso consiste en la compresión del material de trabajo entre dos dados, usando una presión gradual para formar la parte. En la actualidad el forjado es un proceso industrial importante mediante el cual se hacen una variedad de componentes de alta resistencia. La mayoría de los procesos de forja se realizan a altas

temperaturas, por arriba y por debajo de la temperatura de recristalización, con el fin de reducir la resistencia y aumentar la ductilidad del metal (Groover 1997).

El requerimiento fundamental para el análisis cuantitativo de los procesos de deformación en caliente de los distintos metales y aleaciones es el conocimiento preciso de las ecuaciones constitutivas que caracterizan el comportamiento mecánico de dichos materiales bajo las condiciones apropiadas que se encuentran durante las operaciones de conformado empleadas en los procesos de manufactura, particularmente con relación al modelado de los procesos de trabajo en caliente. En los últimos años se han desarrollado una serie de estudios en la materia (Puchi 2003). Todo proceso de conformado en caliente consta fundamentalmente de dos fenómenos que se combinan para determinar el comportamiento final, dichos fenómenos son los de endurecimiento por deformación y los de ablandamiento debido a procesos dinámicos de recuperación (Cabrera y Prado 2003).

Uno de los mayores obstáculos para la modelación de los procesos de trabajo en caliente es la determinación y evaluación de las ecuaciones constitutivas que pudiesen describir de manera adecuada las complejas relaciones que existen entre el esfuerzo de fluencia, tasa de deformación aplicada y microestructura existente (Puchi 2003).

Por otra parte los aceros al carbono son ampliamente usados en los procesos de conformado, especialmente en el forjado. Los aceros para altas temperaturas poseen buena dureza y tenacidad, lo que los hace útiles para el servicio a altas temperaturas (Groover 1997). El interés de los aceros en los procesos de forja se basa en el hecho que no requieren un tratamiento térmico después de que se forma en sus piezas ya que las propiedades mecánicas se obtienen directamente al final del proceso por lo que permiten el

6 *Incorporación de modelos matemáticos de comportamiento mecánico en caliente para aceros al carbono en procesos de forja*

ahorro de costos, energía y hasta se puede llegar a reducir el número de operaciones (Bakkali et al 2007).

Cuando los aceros son deformados a altas temperaturas, aparecen fenómenos en el proceso que van a determinar luego las propiedades mecánicas del material, dichos fenómenos son: endurecimiento por deformación, restauración dinámica y recristalización dinámica. Sobre la descripción de estos fenómenos involucrados en los procesos termomecánicos se han desarrollado varias investigaciones, para el presente estudio se pretende incorporar las ecuaciones constitutivas que describen dichos fenómenos a procesos de forja.

El endurecimiento por deformación aparece en la primera etapa del conformado del acero, es decir al inicio de la deformación. Este fenómeno caracteriza al incremento de la densidad de dislocaciones y al aumento en la tensión superficial (Béjar et al 2001). Con el aumento de la densidad de dislocaciones parecen los fenómenos de ablandamiento que vienen determinados en esta segunda etapa por la restauración dinámica que es el mecanismo que conlleva a la aniquilación de pares de dislocaciones, así como el reordenamiento y la formación de una estructura estable de subgranos, el proceso de restauración dinámica es muy rápido, disminuyendo la velocidad de endurecimiento por deformación por aumento de la velocidad de aniquilación de dislocaciones, es decir se generan tantas dislocaciones como se destruyen, desarrollándose una subestructura a su vez estable. (Cabrera y Prado 2003). Al seguir incrementándose la densidad de dislocaciones con la deformación se alcanza un nivel crítico de eliminación y formación de nuevos granos, dando lugar a un proceso de fluencia estable, es decir un ablandamiento en el material, a este proceso se le conoce como Recristalización Dinámica. (Béjar et al 2001).

El problema más importante que surge en el diseño de procesos de forja, es lograr el control de todos los fenómenos presentes en la deformación en caliente del material descritos anteriormente y los parámetros de control del proceso (temperatura, velocidad de deformación, dimensiones, carga), ya que se necesita tener un conocimiento global de la interacción entre estos (Al Omar et al 2002).

Muchos investigadores han escrito sobre este tema, estudios que los han llevado a proponer modelos matemáticos a través de ecuaciones constitutivas que describa estos fenómenos de endurecimiento y ablandamiento del material, ecuaciones que van a servir de base en esta investigación, entre ellos Kozlowski et al, Medina et al, Cabrera et al, Puchi, Sellars y Tegart, Tener y Hollomon, entre otros.

CAPÍTULO 2

Marco teórico

2.1 Procesos de forja:

El forjado es una operación de conformado de metales mediante la aplicación de fuerzas compresivas ejercidas usando impacto o presión gradual para formar la pieza. Es el método principal para conformar piezas de fundición de gran tamaño y también para mejorar sus propiedades metalúrgicas y mecánicas. Esta técnica precisa de grandes esfuerzos y con frecuencia el equipo es muy pesado. Se pueden necesitar fuerzas de varios miles de toneladas, aun cuando el esfuerzo de fluencia se reduce todo lo posible trabajando a altas temperaturas.

Es la operación más antigua para el conformado de metales y se remonta al año 5000 a.C.. En la actualidad, el forjado es un proceso industrial importante mediante el cual se hacen una gran variedad de componentes de alta resistencia para automóviles, vehículos aeroespaciales y otras aplicaciones. Además, las industrias del acero y de otros metales usan el forjado para fijar la forma básica de grandes componentes que luego se mecanizan para lograr su forma y dimensiones definitivas.

Una manera de clasificar las operaciones de forja es mediante la temperatura de trabajo. La mayoría de las operaciones de forja se realizan en caliente (alrededor de la temperatura de recristalización), dada la deformación que demanda el proceso y la necesidad de reducir la resistencia e incrementar la ductilidad del metal de trabajo. En el forjado se aplica la presión por impacto o en forma gradual. La diferencia depende más del tipo de equipo que de las diferencias en tecnología de los procesos. Una máquina de forjado que aplica cargas de impacto se llama martinete, mientras que la que aplica presión gradual se llama prensa.

Otra diferencia entre las operaciones de forjado es el grado en que los dados restringen el flujo del metal de trabajo. Atendiendo a esta clasificación hay tres tipos de operaciones de forjado: a) forjado en dado abierto, b) forjado en dado impresor y c) forjado sin rebaba.

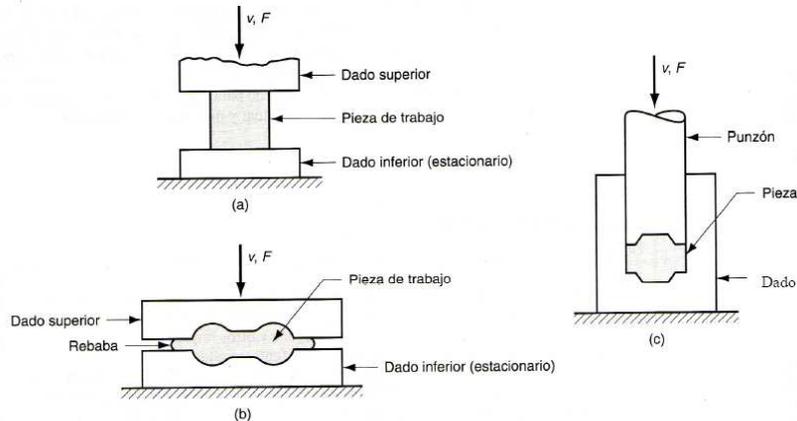


Figura 2.1 Tipos de operaciones de forjado (Groover 1997).

2.1.1 Forjado en dado abierto ó recalado:

Es el caso más simple de forjado y consiste en comprimir el material entre dos dados planos (o casi planos), permitiendo que el material fluya sin restricciones en una dirección lateral con respecto a las superficies del dado. Reduce la altura de trabajo e incrementa su diámetro.

Si el forjado en dado abierto se lleva a cabo bajo condiciones ideales, sin fricción entre el trabajo y la superficie del dado, ocurre una deformación homogénea y el flujo radial de material es uniforme a lo largo de su altura como se muestra en la Figura 2.2. Bajo condiciones ideales, el esfuerzo real que experimenta el material durante el proceso, se puede determinar por:

$$\varepsilon = \ln \frac{h_o}{h} \quad (2.1)$$

Donde h_o = altura inicial del trabajo, h = altura de un punto intermedio en el proceso. Al final de la carrera de compresión, h alcanza su valor final h_f , y el esfuerzo real alcanza su máximo valor.

La fuerza requerida para continuar la compresión a una altura dada h durante el proceso, se puede obtener multiplicando el área correspondiente de la sección transversal por el esfuerzo de fluencia.

$$F = Y_f * A \quad (2.2)$$

Donde F = fuerza, A = área transversal de la parte, Y_f = esfuerzo de fluencia correspondiente a la deformación dada por la ecuación (2.1). El área se incrementa continuamente al reducirse la altura durante la operación. El esfuerzo de fluencia Y_f , se incrementa también como resultado del endurecimiento por trabajo, excepto cuando el metal es perfectamente plástico (trabajo en caliente). En este caso, el exponente de endurecimiento por deformación $n = 0$, y Y_f se iguala al esfuerzo de fluencia del metal (Y). La fuerza alcanza un valor máximo al final de la carrera de forjado donde el área y el esfuerzo de fluencia llegan a su valor más alto.

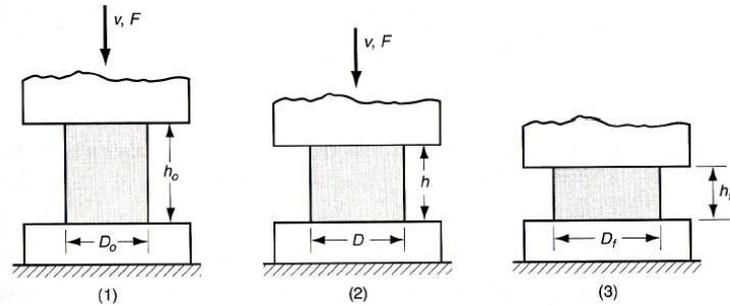


Figura 2.2 Deformación de una pieza de trabajo cilíndrica bajo condiciones ideales en una operación de forjado en dado abierto (Groover 1997).

Una operación real de recalado no ocurre exactamente como se muestra en la figura 2.2, debido a que la fricción se opone al flujo de metal en la superficie de los dados. Esto crea un efecto de abultamiento en forma de barril, llamado *abarrilamiento*, que se muestra en la figura 2.3.

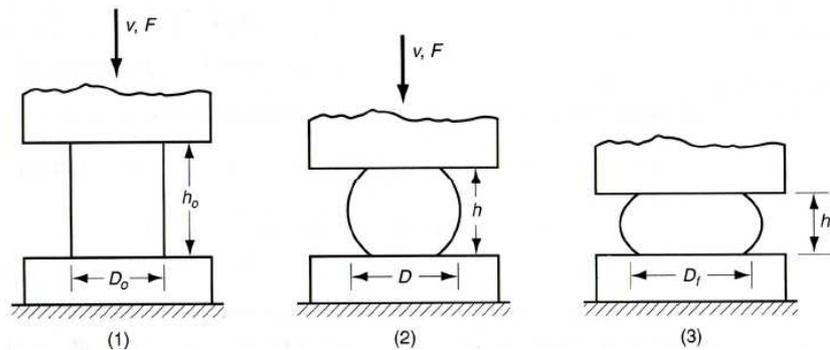


Figura 2.3 Deformación cilíndrica real de una pieza de trabajo bajo en una operación de forjado en dado abierto mostrando un abarrilamiento pronunciado (Groover 1997).

Todos estos factores originan que la fuerza de recalado sea mayor que la pronosticada por la ecuación 2.2. Aplicando un factor de forma a esta última, se puede aproximar los efectos de la fricción y la relación entre el diámetro y la altura.

$$F = K_f * Y_f * A \tag{2.3}$$

Donde F , Y_f y A tienen las mismas definiciones que en la ecuación 2.2; K_f es el factor de forma del forjado, definido como:

$$K_f = 1 + \frac{0.4\mu D}{h} \quad (2.4)$$

Donde μ = coeficiente de fricción, D = diámetro de la pieza de trabajo o cualquier dimensión que represente la longitud de contacto con la superficie y h la altura de la pieza.

2.1.2 Forjado en dado impresor:

Llamado algunas veces forjado en dado cerrado, se realiza con dados que tienen la forma inversa de la requerida para la pieza. En este tipo de operación una parte del metal fluye más allá del dado impresor formando una rebaba. Este proceso se ilustra en una secuencia de tres pasos en la figura 2.4.

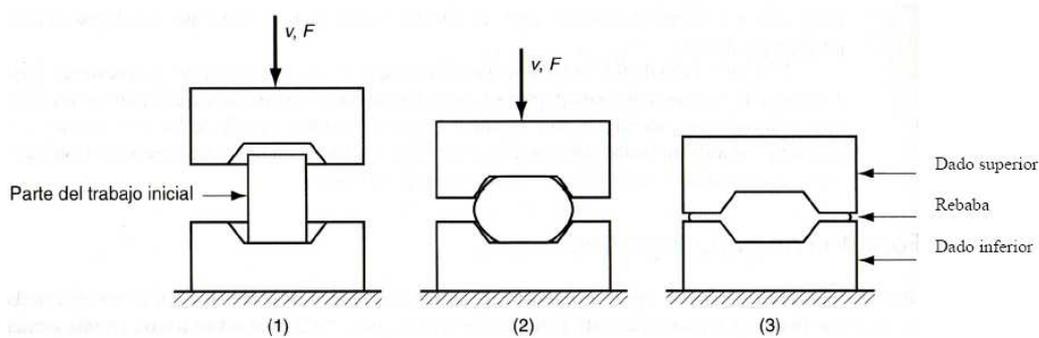


Figura 2.4 Secuencia en el forjado en dado impresor (Groover 1997).

Debido a la formación de rebaba en el forjado con dado impresor y a las formas más complejas de las partes hechas con estos dados, las fuerzas en este proceso son considerablemente más grandes y más difíciles de analizar que en el forjado con dado abierto. Con frecuencia se usan fórmulas y factores de diseño relativamente simples para estimar las fuerzas de forjado con dado impresor. La fórmula de la fuerza es la misma de la ecuación 2.3

para el formado en dado abierto, pero su interpretación es ligeramente diferente:

$$F = K_f * Y_f * A \quad (2.5)$$

Donde F es la fuerza máxima en la operación, A es el área proyectada de la pieza, incluyendo la rebaba, Y_f es el esfuerzo de fluencia del material y K_f es el factor de forma del forjado.

En el forjado en caliente, el valor apropiado de Y_f es la resistencia a la fluencia del metal a temperatura elevada. En la ecuación 2.5, K_f es un factor con el que se intenta tomar en cuenta el incremento de la fuerza requerida para forjar formas complejas. La tabla 2.1 muestra la escala de valores de K_f para diferentes formas de la parte.

Tabla 2.1 Valores típicos de K_f para varias formas de la pieza en forjado con dado impresor y en dado cerrado (Groover 1997)

| Forma de la parte | K_f |
|---|-------|
| Forjado con dado impresor | |
| Formas simples con rebaba | 6.0 |
| Formas complejas con rebaba | 8.0 |
| Formas muy complejas con rebaba | 10.0 |
| Forjado sin rebaba | |
| Acuñado (superficies superior e inferior) | 6.0 |
| Formas complejas | 8.0 |

La ecuación 2.5, se aplica a la fuerza máxima durante la operación, ya que ésta determinará la capacidad requerida de la prensa o martinete que se use en la operación. La fuerza máxima se alcanza al final de la carrera o golpe de forjado donde el área proyectada es más grande y la fricción es máxima.

La ventaja del forjado sobre el mecanizado completo de la pieza son: velocidades de producción más altas, conservación del metal, mayor resistencia y orientación más favorable de los granos de metal.

2.1.3 Forjado sin rebaba:

En el forjado sin rebaba la pieza de trabajo original queda contenida completamente dentro de la cavidad del dado durante la compresión y no se forma rebaba. La secuencia del proceso se ilustra en la figura 2.5.

El forjado sin rebaba impone ciertos requerimientos sobre el control del proceso, más exigentes que el forjado con dado impresor. Más importante es que el volumen del material de trabajo debe igualar al volumen de la cavidad del dado dentro de tolerancias muy estrechas. Si la pieza en bruto inicial es demasiado grande, la presión excesiva puede causar daño al dado o a la prensa. Si la pieza en bruto es demasiado pequeña, no se llenará la cavidad.

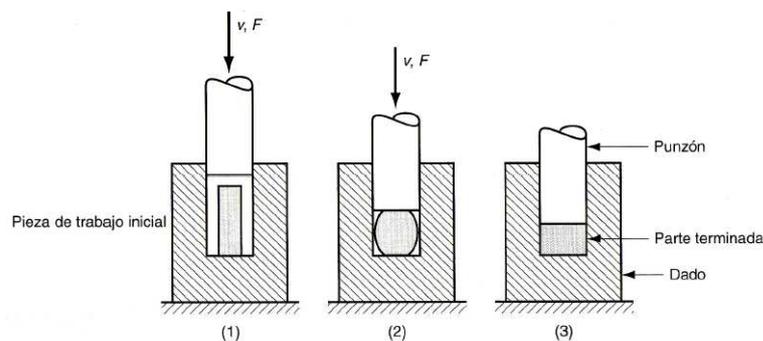


Figura 2.5 Secuencia en el forjado sin rebaba (Groover 1997)

2.1.4 Forjado cilíndrico aplicando presión gradual:

Además de las expresiones para estimar de forma rápida las cargas requeridas para el forjado en dado abierto y sus correcciones con dado impresor, a continuación se mostrará las ecuaciones basadas en diagramas de equilibrio para un diferencial de volumen del material deformado en

operaciones de forjado cilíndrico, tanto en condiciones de fricción deslizando como adherente y adicionalmente se presenta la condición de transición adherencia-deslizamiento.

2.1.4.1 Caso de fricción deslizando:

Ahora bien, como en la práctica es muy improbable obtener una fricción cero, aún con el mejor lubricante, la deformación del cilindro requiere que sus caras extremas se deslicen sobre las superficies de la herramienta, esto origina que el cilindro adopte forma de barril, como se mencionó en secciones precedentes. A objeto de vencer el esfuerzo de fricción se debe ejercer una presión más elevada.

Este régimen de fricción se conoce como “deslizamiento”, y viene dado por la ecuación 2.6, que corresponde a las condiciones de forjado con deslizamiento puro:

$$\frac{P}{Y} = e^{\frac{2\mu}{h} \left(\frac{d}{2} - r \right)} \quad (2.6)$$

2.1.4.2 Caso de fricción adherente:

En el caso extremo, cuando la superficie de la matriz es muy rugosa y no se usa lubricante, el esfuerzo cortante puede alcanzar o exceder el esfuerzo de fluencia por cortante K del material de la pieza de trabajo, y el movimiento de la cara extrema se impide totalmente.

La condición anterior es denominada “adherencia” y se puede describir como:

$$\frac{P}{Y} = 1 + 1.155 \cdot (D/2 - r)/h \quad (2.7)$$

Pudiera existir una condición de transición a lo largo del radio, de tal forma que desde el centro del cilindro hacia un cierto radio r_1 exista adherencia y a partir de r_1 y hasta el borde del cilindro el régimen sea de deslizamiento. En la zona de transición, debería entonces satisfacerse que:
 $\mu_p = K$

Por lo que:

$$\frac{p}{2K} = \frac{1}{2\mu} \quad (2.8)$$

que con las consideraciones respectivas, queda simplificada en la siguiente ecuación:

$$\frac{P}{Y} = 1,155 \left[\frac{1}{2\mu} + \frac{(r_1 - r)}{h} \right] \quad (2.9)$$

El parámetro r_1 limita la condición de fricción de la siguiente forma:

Si $r_1 \leq 0$ \implies Deslizamiento

Si $r_1 \leq D/2$ \implies Adherencia

Si $0 < r_1 < D/2$ \implies Adherencia-Deslizamiento

2.1.5 Forjado cilíndrico aplicando impacto por caída libre de un mazo:

Este método considera la utilización simultánea de tres ecuaciones que definen: 1) La energía de impacto obtenida por la caída libre de un cuerpo de masa M , a una velocidad dependiente de la altura de caída. 2) La definición de esfuerzo aplicado en el recalcado de un cilindro y corregida por efectos de fricción, y 3) El comportamiento mecánico del material, el cual puede ser definido (dependiendo del modelo utilizado) en función de la deformación, temperatura, tasa de deformación, etc.

Las tres ecuaciones de uso simultáneo son las siguientes:

La primera ecuación estima la fuerza que es aplicada por el mazo que cae libremente sobre el material, viene determinada por la masa del mazo y la aceleración que adquiere el mismo en la caída libre.

$$M \frac{dV}{dt} = -F \quad (2.10)$$

Donde M es la masa del mazo, F es la fuerza y el término dV/dt representa la variación de la velocidad con respecto al tiempo.

La segunda ecuación contempla la definición de la fuerza, como una función que depende del esfuerzo de fluencia del material forjado y el área al final del proceso, obtenida mediante conservación de volumen. Adicionalmente, se incorpora el incremento de la fuerza como consecuencia de la fricción mediante un factor de corrección.

$$F = \sigma \cdot \left(\frac{A_0 h_0}{h} \right) \cdot \left[1 + \frac{m}{3\sqrt{3}} \left(\frac{D}{h} \right) \right] \quad (2.11)$$

Donde σ es el esfuerzo de fluencia del material, F = fuerza, A_0 = área inicial del tocho, h_0 = altura inicial del tocho, h = altura final, y $\left[1 + \frac{D}{3\sqrt{3}h} \right]$ es el factor de corrección por efecto de fricción.

Y la tercera ecuación, expresa el esfuerzo como una función que depende de variables como la deformación (ϵ), tasa de deformación ($\dot{\epsilon}$), temperatura (T), entre otros, y viene determinada según el modelo matemático utilizado para representar en forma analítica el comportamiento del material.

$$\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T, m, n, etc) \quad (2.12)$$

2.2 Comportamiento mecánico de los aceros en caliente:

La deformación plástica en caliente o conformado en caliente, se realiza llevando el material a elevadas temperaturas, a fin de obtener deformaciones importantes aplicando esfuerzos relativamente menores. Además, los procesos de conformado en caliente permiten la modificación de la estructura metalográfica y el tamaño de grano.

La figura 2.6, muestra esquemáticamente el caso de conformado en caliente obtenido por laminación, en la que se pone en evidencia las modificaciones estructurales relacionadas con el ciclo térmico y la modalidad de la deformación.

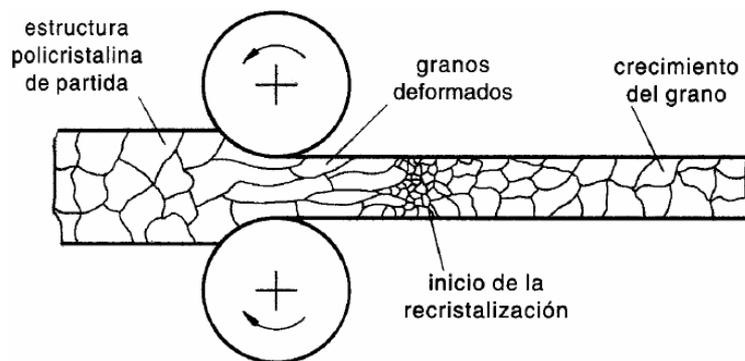


Figura 2.6 Influencia de la laminación en caliente sobre la estructura cristalina (El Wahabi 2003)

Durante el conformado en caliente, independientemente del proceso industrial realizado, se involucran fundamentalmente dos fenómenos que se combinan para determinar el comportamiento final. Dichos fenómenos son los de endurecimiento por deformación y los de ablandamiento debido a procesos dinámicos de recuperación.

A partir de ensayos de compresión uniaxial en caliente, se pueden simular procesos industriales como la forja, laminación, extrusión, etc. A través de los cuales se obtienen las curvas de fluencia que reflejan el comportamiento de un material conformado en caliente. Como se muestra en la figura 2.7, estas curvas se dividen en tres etapas: etapa de endurecimiento y restauración dinámica, etapa de transición, donde se observa una caída del esfuerzo debida a la recristalización dinámica y etapa de saturación. El descenso del esfuerzo observado durante la etapa de transición puede ser de forma continua, y en ese caso se habla de una recristalización dinámica de pico simple, o en forma de oscilaciones, llamada recristalización dinámica de pico múltiple. Ambos dependen de las condiciones de deformación y las propiedades intrínsecas del material.

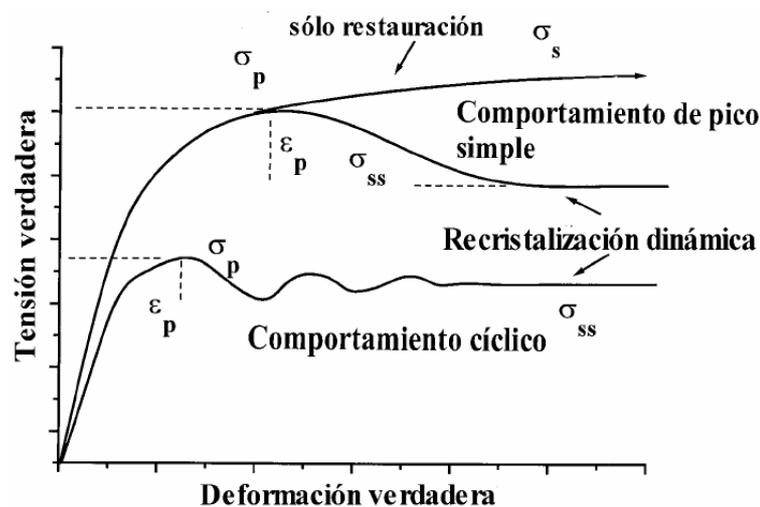


Figura 2.7 Representación esquemática de la recristalización dinámica discontinua en diferentes condiciones de deformación (El Wahabi 2003)

A continuación se detallan los mecanismos involucrados durante el endurecimiento, y durante los procesos dinámicos de ablandamiento. También se presentan las ecuaciones constitutivas descriptivas de tales fenómenos y se introducen las ideas subyacentes en los modos de control de la deformación en caliente.

2.2.1 Endurecimiento por deformación:

A medida que se deforma el material aumenta la resistencia de éste a la deformación, fenómeno que se conoce como endurecimiento por deformación. El endurecimiento de un material, se pone de manifiesto tanto mecánica como microestructuralmente. Desde el punto de vista mecánico ocurre un aumento en la resistencia del metal durante la deformación irreversible cuando el esfuerzo aplicado supera su límite elástico y tiene como consecuencia el aumento de la dureza. A nivel microestructural se manifiesta un aumento de la densidad de dislocaciones, activando las fuentes que generan dislocaciones y la formación de celdas de subgranos. En un monocristal durante el endurecimiento se caracterizan tres etapas diferentes según el valor del esfuerzo aplicado.

Etapa I: Un solo sistema de deslizamiento es activado y pocos obstáculos se oponen al movimiento de las dislocaciones. El endurecimiento es lento.

Etapa II: Se produce una rotación del cristal y dos sistemas de deslizamiento son activados simultáneamente. De la curva se ve que el endurecimiento sigue una línea recta, más conocido como “Endurecimiento Lineal”.

Etapa III: En general más de dos sistemas de deslizamiento están activados; se forman celdas seguidas de una restauración dinámica que es un mecanismo de reordenación y eliminación de dislocaciones formando subceldas o aniquilándose entre ellas, Figura 2.8.

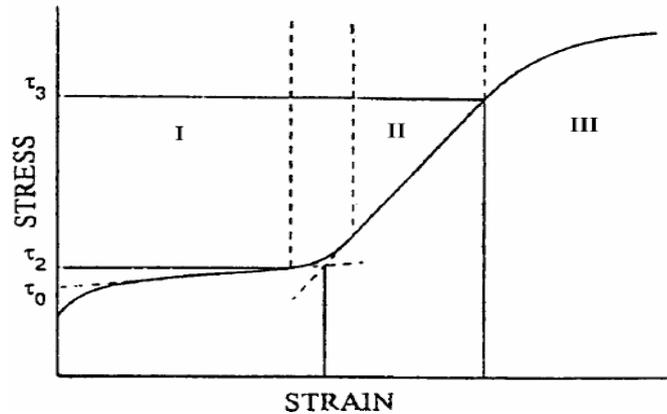


Figura 2.8 Representación esquemática de las etapas de endurecimiento de un monocristal (El Wahabi 2003)

2.2.2. Mecanismos de ablandamiento:

2.2.2 a.- Restauración dinámica:

Conlleva a la aniquilación de pares de dislocaciones, así como su reordenamiento y la formación de una estructura estable de subgranos, que no son más que celdas de densidad de dislocaciones relativamente bajas, rodeados de límites de alta densidad de dislocaciones. Es el llamado enmarañamiento de las dislocaciones. Todo ello sin llegar a formarse verdaderos nuevos granos. Tiene lugar en materiales de alta energía de falla de apilamiento (usualmente los BCC). El proceso de restauración dinámica en tales materiales es muy rápido, disminuyendo la velocidad de endurecimiento por deformación por aumento de la velocidad de aniquilación de dislocaciones, que a su vez es proporcional a la propia densidad. Todo ello da lugar a la fluencia de estado estable, puesto que en otras palabras, se generan tantas dislocaciones como las que se destruyen, desarrollándose una subestructura a su vez estable.

La restauración de dislocaciones no es un solo proceso microestructural sino una serie de micromecanismos que son representados de forma esquemática en la figura 2.9.

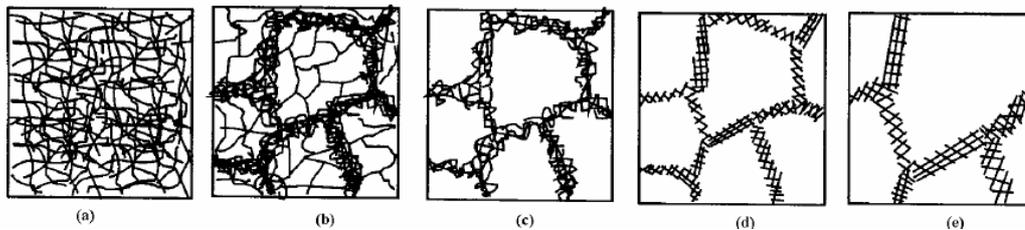


Figura 2.9 Diferentes etapas de la restauración dinámica para un material deformado:(a) generación de dislocaciones (b) formación de celdas (c) aniquilación de dislocaciones dentro de las celdas (d) formación de subgranos (e) y su crecimiento (El Wahabi 2003).

2.2.2. b.- Recristalización dinámica:

La recristalización dinámica también tiene una manifestación tanto mecánica como microestructural. Consiste en la nucleación y el crecimiento de nuevos granos que permite eliminar una parte de las dislocaciones generadas durante la etapa de endurecimiento y restauración dinámica. Su inicio necesita un tiempo de incubación antes de que su efecto ablandador marque la caída del esfuerzo observada en las curvas de fluencia, la cual es considerada la etapa de transición, donde la recristalización dinámica es el mecanismo responsable del ablandamiento producido y esta acompañada de una disminución de las densidades de dislocaciones (Figura 2.10).

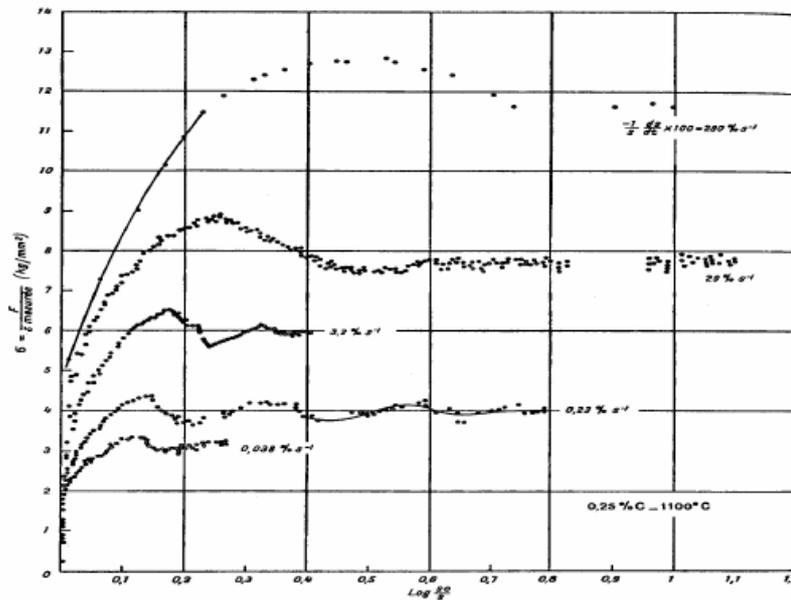


Figura 2.10 Curvas de fluencia para un acero al carbono donde se ve el cambio de comportamiento de pico simple a pico múltiple al bajar la velocidad de deformación (El Wahabi 2003).

La restauración dinámica progresa más lentamente provocando que la densidad de dislocaciones aumente apreciablemente con la deformación; eventualmente, las diferencias locales en densidad son suficientemente altas como para permitir la migración de límites de grano y por tanto permitir la nucleación de la recristalización durante la deformación. El proceso de nucleación es un factor crítico en la determinación del tamaño y la orientación del grano. La recristalización dinámica también provoca la eliminación de gran número de dislocaciones por migración de límites de grano, y esto a su vez da lugar a un proceso de fluencia estable.

2.3 Ecuaciones constitutivas de aceros deformados a temperaturas elevadas:

Uno de los requerimientos fundamentales para el análisis cuantitativo de los procesos de deformación en caliente de los distintos metales y aleaciones es el conocimiento preciso de las ecuaciones constitutivas que caracterizan el comportamiento mecánico de dichos materiales bajo las condiciones apropiadas en las que se encuentran durante las operaciones de conformado empleadas en los procesos de manufactura. Particularmente, con relación al modelado de los procesos de trabajo en caliente, en los últimos años se han desarrollado una serie de técnicas numéricas que contribuyan a reducir significativamente los costos de diseño de tales procesos.

A continuación se presentan algunos modelos matemáticos para la determinación de las ecuaciones constitutivas de los aceros deformados a temperaturas elevadas.

2.3.1. Modelo del efecto de la temperatura en el comportamiento esfuerzo-deformación de los aceros:

En el trabajo en caliente, un acero se comporta teóricamente como un material perfectamente plástico, con un exponente de endurecimiento $n = 0$. Esto significa que una vez que alcanza el nivel del esfuerzo, el acero debe continuar fluyendo bajo el mismo nivel de esfuerzo de fluencia. Sin embargo, un fenómeno adicional caracteriza el comportamiento de los metales durante su deformación, especialmente a las temperaturas elevadas de trabajo en caliente. Este fenómeno es la sensibilidad a la velocidad de deformación.

La rapidez a la que se deforma el acero en un proceso de formado se relaciona directamente con la velocidad de deformación v . En muchas

operaciones de conformado, la velocidad de deformación es igual a la velocidad del punzón o de cualquier otro elemento móvil del equipo. Dada la rapidez de deformación, la velocidad de deformación se define:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{h} \quad (2.13)$$

Donde $\dot{\varepsilon}$ es la tasa de deformación real, (s^{-1}) y h la altura instantánea de la pieza de trabajo que se deforma (mm)

En las temperaturas de trabajo en caliente, el esfuerzo de fluencia depende de la velocidad de deformación. Al aumentar la velocidad de deformación, se incrementa la resistencia a la deformación. Esto se representa usualmente como una línea aproximadamente recta en una gráfica log-log, lo cual conduce a la siguiente relación:

$$Y_f = C \left(\dot{\varepsilon} \right)^m \quad (2.14)$$

Donde C es el coeficiente de resistencia y m es el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación. El valor de C se determina a una velocidad de deformación de 1.0 y m es la pendiente de la curva en la figura (2.11b).

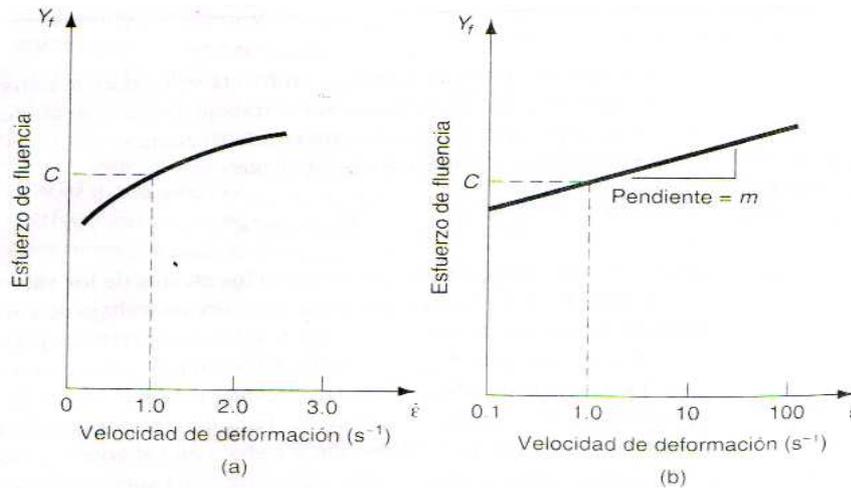


Figura 2.11 a) Efecto de la velocidad de deformación sobre la resistencia a la fluencia e temperatura de trabajo elevada **b)** la misma relación graficada en coordenadas log-log (Groover 1997)

El efecto de la temperatura sobre los parámetros de la ecuación 2.14 es bastante pronunciado. Al incrementar la temperatura, decrece el valor de C y aumenta el valor de m . A temperatura ambiente el efecto de la velocidad de deformación es casi despreciable, e indica que la curva de fluencia es una buena representación del comportamiento del material. A medida que aumenta la temperatura, la velocidad de deformación juega un papel importante en la determinación del esfuerzo de fluencia. Esto es trascendental en el trabajo en caliente porque la resistencia a la deformación del material aumenta drásticamente con el incremento de la velocidad de deformación.

Podemos observar que aunque en el trabajo en frío la velocidad de deformación puede tener un efecto mínimo sobre el esfuerzo de fluencia, en el trabajo en caliente el efecto puede ser significativo. Una expresión más completa para el esfuerzo de fluencia como función de deformación y de la velocidad de deformación es la siguiente:

$$Y_f = A\varepsilon^n \left(\dot{\varepsilon} \right)^m \tag{2.15}$$

Donde A es un coeficiente de resistencia que combina los efectos de los valores previos de K , presentados en la tabla 2.2 y de C . A , n , m podrían ser funciones de la temperatura, y resultaría un enorme trabajo de ensayar y recopilar los valores de estos parámetros.

Tabla 2.2 Valores típicos del coeficiente de resistencia K y exponente de endurecimiento por deformación n para metales seleccionados (Groover 1997)

| Material | Coeficiente de resistencia, K | | Exponente de endurecimiento por deformación, n |
|---|---|------------|--|
| | Lb/pulg.² | Mpa | |
| <i>Aluminio puro cocido</i> | 25.000 | 175 | 0.20 |
| <i>Aluminio aleado recocido</i> | 35.000 | 240 | 0.15 |
| <i>Aluminio aleado endurecido por tratamiento térmico</i> | 60.000 | 400 | 0.10 |
| <i>Cobre puro recocido</i> | 45.000 | 300 | 0.50 |
| <i>Cobre aleado: bronce</i> | 100.000 | 700 | 0.35 |
| <i>Acero bajo carbono recocido</i> | 75.000 | 500 | 0.25 |
| <i>Acero alto carbono recocido</i> | 125.000 | 850 | 0.15 |
| <i>Acero aleado, recocido</i> | 100.000 | 700 | 0.15 |
| <i>Acero inoxidable, austenítico, recocido</i> | 175.000 | 1200 | 0.40 |

2.3.2. Modelos propuestos por Kozlowski et al., :

Kozlowski et al., (1992), desarrollaron y compararon cuatro ecuaciones elasto-viscoplásticas diferentes, a fin de cuantificar el comportamiento mecánico del acero al carbono, bajo condiciones típicas de procesamiento a temperaturas elevadas, particularmente durante la colada continua de este

material, es decir, a temperaturas por el orden de (900-1400)°C, tasas de deformación de 10^{-3} – 10^{-6} s⁻¹, deformaciones efectivas pequeñas (<5%), es decir, antes del comienzo de la etapa de recristalización dinámica, contenido de carbono por el orden de 0.005 – 1.54. Dichos modelos tienen en común varios aspectos: Primero, se utiliza una función cuadrática del contenido de carbono, C , como una constante de escalonamiento, considerándose insignificante las interacciones de primer orden entre el contenido de carbono, temperatura y deformación inelástica. En segundo lugar, se considera que la mayoría de los parámetros tienen una dependencia con la temperatura de tipo lineal. Finalmente, tres de los modelos han sido formulados para manejar cambios arbitrarios en las condiciones de deformación inelásticas negativas, características de deformaciones cíclicas.

El primer modelo propuesto por estos autores expresa la tasa de deformación inelástica en función del esfuerzo, temperatura y contenido de carbono, lo que físicamente implica que la estructura del material permanece constante durante el proceso de deformación, aspecto característico del comportamiento mecánico durante la fluencia lenta de estado estacionario. Dicha formulación tiene la ventaja de su simplicidad y facilidad de integración, y la misma se puede expresar de tres maneras distintas:

$$\dot{\epsilon}_p = C \left(\frac{-Q}{T} \right) \quad (2.16)$$

$$\dot{\epsilon}_p = C \left(\frac{-Q}{T} \right) \sinh (a_\sigma \sigma) \quad (2.17)$$

$$\dot{\epsilon}_p = C \left(\frac{-Q}{T} \right) [\sinh (a_\sigma \sigma)]^n \quad (2.18)$$

En estas expresiones, $\dot{\epsilon}_p$, representa la deformación de pico ó valor de deformación crítica, antes de este valor comienza la recristalización dinámica

pero es después de la deformación crítica que se produce el ablandamiento a una escala mayor, Tanto C como n presentan una dependencia cuadrática del contenido de carbono y de la temperatura respectivamente y Q mantiene un valor constante. La mayor deficiencia de estas ecuaciones radica en la consideración de que todo el endurecimiento proviene del esfuerzo (o la deformación elástica) y la carencia de un término que describa la tasa de endurecimiento por deformación inelástica.

El segundo modelo propuesto por Kozlowski et al., representa una mejora de los modelos anteriores, lo que se logra mediante la adición de un término de “endurecimiento temporal”, asumiéndose de esta manera que la estructura evoluciona con el tiempo desde el comienzo de la deformación. Es un modelo muy fácil de integrar y se puede expresar como:

$$\dot{\epsilon}_p = C \left(\frac{-Q}{T} \right) \sigma^{n_t m} \quad (2.19)$$

Bajo condiciones de tasa de deformación constante, el tiempo t se puede reemplazar por la relación $\frac{\epsilon_p}{\dot{\epsilon}_p}$ lo cual lleva a una expresión del tipo:

$$\dot{\epsilon}_p = C^{\frac{1}{(m+1)}} \exp\left(\frac{-Q}{(1+m)T}\right) \sigma^{\frac{n}{(m+1)}} \epsilon^{\frac{m}{(m+1)}} \quad (2.20)$$

Donde nuevamente la constante C presenta una dependencia cuadrática del contenido de carbono y de la temperatura, n y m también una dependencia cuadrática pero sólo de la temperatura.

El tercer modelo propuesto por Kozlowski et al., caracteriza la evolución microestructural a través de la deformación inelástica, lo que hace que la evaluación numérica microestructural del mismo sea más difícil que los modelos anteriores. Dicho modelo considera que la tasa de deformación

depende de la diferencia entre el esfuerzo aplicado y el término que contiene a la deformación inelástica, y se expresa de la siguiente manera:

$$\dot{\varepsilon}_p = C \left(\frac{-Q}{T} \right) (\sigma - a_\varepsilon \varepsilon_p^{n_e})^n \quad (2.21)$$

Al igual que en los casos anteriores, C presenta una dependencia cuadrática del contenido de carbono, Q es una constante y los parámetros a_ε , n_e y n dependen linealmente de la temperatura. El nuevo término que aparece dentro del segundo paréntesis representa la existencia de un cierto umbral de esfuerzo requerido para mover las dislocaciones a través de la microestructura y producir una deformación plástica permanente.

El cuarto modelo propuesto por los autores ya mencionados emplea la deformación inelástica como el tiempo para caracterizar la microestructura, llevando a una formulación que resulta mucho más difícil de integrar que los modelos previos. Dicho modelo se expresa como:

$$\dot{\varepsilon}_p = C \left(\frac{-Q}{T} \right) (\sigma - a_\varepsilon \varepsilon_p^{n_e} + a_t t^{n_t} \sigma^{n_\sigma})^n \quad (2.22)$$

Donde C de nuevo presenta una dependencia cuadrática del contenido de carbono, Q es una constante, a_ε , n_e y n presentan una dependencia lineal de la temperatura, a_t y n_t son constantes y n_σ también presenta una dependencia cuadrática de la temperatura. La inclusión del término en el corchete permite explícitamente el fenómeno de la recuperación dinámica que tiene lugar durante la deformación y el cual da lugar a una reducción de la pendiente de la curva esfuerzo-deformación mediante la aniquilación de dislocaciones que se forman debido al endurecimiento por deformación.

2.3.3. Modelo de Medina et al., :

Medina et al., han desarrollado un modelo para predecir las curvas esfuerzo-deformación tanto de aceros de baja aleación como los aceros microaleados deformados en la región austenítica. Dicho modelo consiste básicamente en dos expresiones de esfuerzo en función de la deformación, temperatura, tasa de deformación y composición química del acero. La primera expresión predice la región dominada por endurecimiento y recuperación dinámica y la segunda expresión predice el ablandamiento causado por la recristalización dinámica. De esta manera, la suma algebraica de ambas expresiones predice la curva esfuerzo-deformación completa. Los parámetros involucrados en el modelo se expresan en función de un parámetro adimensional, Z/A , donde Z representa el parámetro de Zener-Hollomon y A una constante, de acuerdo al modelo propuesto por Sellars y Tegart.(1972) En este modelo, dicho parámetro no sólo se expresa en términos de la temperatura y tasa de deformación sino también en función de la composición química del acero, lo que permite utilizar el modelo para el análisis de un conjunto de aceros deformados a temperaturas elevadas.

Medina et al. llevaron a cabo su estudio en muestras que fueron recalentadas a una temperatura de 1230°C a fin de que todos los precipitados de carburos y nitruros de V y Nb fuesen completamente disueltos, encontrándose sólo los nitruros de Ti parcialmente disueltos. Las muestras fueron deformadas en torsión a temperaturas de 900°C, 1000°C y 1100°C, y tasas de deformación de 0.544, 1.451, 3.628 y 5.224 s⁻¹, condiciones en las que no ocurrió precipitación durante la deformación.

Para la descripción de la región de endurecimiento y recuperación dinámica de la curva de fluencia, estos autores utilizaron una expresión de la forma:

$$\sigma_e = B[1 - \exp(-C\eta)]^m \quad (2.23)$$

Los parámetros B y C dependen de la tasa de deformación y temperatura y particularmente el parámetro B representa el valor límite del esfuerzo de fluencia cuando la deformación aplicada tiende a ser infinitamente grande. El parámetro C interviene en la descripción precisa de la curva de fluencia en la región de endurecimiento y deformación dinámica, el exponente de endurecimiento por deformación, m , se asumió que es una función de las condiciones de deformación y de la composición química del acero.

En este modelo, la ecuación utilizada para predecir la reducción del esfuerzo a deformaciones superiores a la deformación a la cual se alcanza el esfuerzo máximo o pico, ε_p , debido al efecto de la recristalización dinámica, es una ecuación tipo Avrami que tiene la forma siguiente:

$$\Delta\sigma = B' \left\{ 1 - \exp \left[-k \left(\frac{\varepsilon - a\varepsilon_p}{\varepsilon_p} \right)^{m'} \right] \right\} \quad (2.24)$$

$$\varepsilon > a\varepsilon_p \quad (2.25)$$

Donde B' , k , y m' también dependen de las condiciones de deformación. Por lo tanto, la curva de fluencia viene dada por la ecuación 2.23 si $\varepsilon < a\varepsilon_p$, y por la suma de las ecuaciones (2.23) y (2.24) en caso contrario, por lo que el modelo requiere la determinación de ocho parámetros, a saber: B , C , m , B' , a , ε_p , de los cuales sólo a se considera una constante mientras que el resto es una función de las condiciones de deformación y la composición química del acero. De esta forma, haciendo uso de una versión modificada del método de Gauss-Newton, se determinó que:

$$B(MPa) = \left(9.5326 + 0.6196 \ln \frac{Z}{A} \right)^2 \quad (2.26)$$

$$C = 3.9201 \left(\frac{Z}{A} \right)^{0.0592} \quad (2.27)$$

$$m = 0.3449 \exp \left[0.0139 \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/2} \right] \quad (2.28)$$

$$B' (Mpa) = 26.0310 \exp \left[26.0310 \left(\frac{Z}{A} \right)^{-1/2} \right] \quad (2.29)$$

$$k = 0.5974 \exp \left[1.2333 \left(\frac{Z}{A} \right)^{-1/2} \right] \quad (2.30)$$

$$m' = 1.0901 \exp \left(0.264 \sqrt{\frac{Z}{A}} \right) \quad (2.31)$$

$$a = 0.95 \quad (2.32)$$

Así mismo, la deformación correspondiente al esfuerzo máximo o pico viene dada por:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{p0} D_0^{0.195} \left(\frac{Z}{A} \right)^{p1} \quad (2.33)$$

Donde D_0 represente el tamaño del grano inicial de la austenita y ε_{p0} y $p1$ son constantes que dependen de la composición química del acero.

Finalmente, el esfuerzo máximo o pico de la curva de esfuerzo-deformación se modeló por medio de la ecuación:

$$\sigma_p = \frac{1}{0.0111875} \ln \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{1/4.458} + \sqrt{\left(\frac{Z}{A} \right)^{2/4.458} + 1} \right] \quad (2.34)$$

De acuerdo con los autores, cuando este conjunto de ecuaciones se introduce en las ecuaciones (2.23) y (2.24), se predicen las curvas de fluencia con buena precisión, independientemente de la temperatura, tasa de deformación y composición química del acero, para todos los aceros de bajo carbono y aceros microaleados que fueron analizados de acuerdo a este modelo.

2.3.4. Modelo de Cabrera et al. :

Cabrera et al. analizaron el comportamiento a la fluencia de un acero de 0.34% C microaleado al V y Ti, a través de la realización de un conjunto de experimentos de compresión axial a temperaturas del orden de 1123-1423K y tasas de deformación de 10^{-4} - 10 s⁻¹ y un tamaño de grano menor 30 μm.

Los autores partieron de la consideración que durante la recuperación dinámica la densidad de dislocaciones, ρ, que resulta del balance entre generación y almacenamiento de dislocaciones durante el endurecimiento por deformación, y aniquilación durante la recuperación dinámica, viene dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon} = \left(\frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon} \right)_{almacenadas} - \left(\frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon} \right)_{restauradas} \quad (2.35)$$

Esta ecuación combinada con una expresión capaz de describir la tasa de endurecimiento por deformación, da la forma:

$$\theta = \left(\frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon} \right)_{\varepsilon, T} \quad (2.36)$$

Y con otra expresión clásica que relaciona el esfuerzo de fluencia con la densidad de dislocaciones, tal como:

$$\sigma = \alpha' \mu b \sqrt{\rho} \quad (2.37)$$

Permitiría obtener un conjunto completo de ecuaciones para la descripción de la evolución de la densidad de dislocaciones durante la deformación. En las expresiones anteriores, α' representa una constante, μ el módulo de corte elástico y b el vector de Burgers.

Para obtener una expresión, para la evolución de la densidad de dislocaciones, Cabrera et al. hicieron uso de los modelos desarrollados por Estrin y Mecking (1984) y Bergström (1969), lo que permitió representar la ecuación (2.38) como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon} = U - \Omega \rho \quad (2.38)$$

Donde U (tasa de inmovilización o aniquilación de dislocaciones móviles) y Ω (probabilidad de removilización o aniquilación de dislocaciones inmóviles) son los términos asociados al endurecimiento por deformación y ablandamiento respectivamente. Sí se asume que U y Ω son independientes de la deformación, permite desarrollar la siguiente expresión:

$$\sigma^2 = \sigma_{ss}^2 + (\sigma_0^2 - \sigma_{ss}^2) \cdot e^{-\Omega \varepsilon} \quad (2.39)$$

Donde;

$$\sigma_0 = \alpha' \mu b \sqrt{\rho_0} \quad (2.40)$$

y

$$\sigma_{ss} = \alpha' \mu b \sqrt{\frac{U}{\Omega}} \quad (2.41)$$

σ_s representa el esfuerzo de saturación y σ_0 es el esfuerzo de fluencia para las condiciones iniciales ($\epsilon=0$, $\rho=\rho_0$). Por medio de la ecuación de Avrami, se modela la recristalización dinámica, asumiendo que el ablandamiento mecánico es directamente proporcional a la fracción volumétrica recristalizada, quedando la siguiente expresión:

$$\sigma = \sigma_s - (\sigma_s - \sigma_{ss})X \quad (2.42)$$

Donde σ_{ss} representa el esfuerzo de estado estable a deformaciones elevadas y X la fracción volumétrica recristalizada, la cual se expresó a su vez por medio de una ecuación de Avrami,:

$$X = 1 - \exp(-Bt^k) \quad (2.43)$$

Las condiciones bajo las cuales se inicia la recristalización dinámica, viene dada la siguiente expresión:

$$\epsilon_c = 0.8\epsilon_p = K_\epsilon d_0^{n_\epsilon} Z^{m_\epsilon} \quad (2.44)$$

Donde ϵ_p representa la deformación asociada al esfuerzo máximo y K_ϵ , n_ϵ , m_ϵ constantes particulares del material en consideración. Asimismo, para la caracterización del parámetro σ_{ss} , se recurrió a la descripción clásica utilizada tanto para trabajo en caliente como para fluencia lenta:

$$\epsilon = A_1 [\sinh(\alpha_1 \sigma_{ss})]^{n_1} \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2.45)$$

Donde A_1 y n_1 con constantes, α_1 es el inverso del esfuerzo, Q_1 la energía de activación para trabajo en caliente, R la constante universal de los gases y σ_{ss} el esfuerzo de estado estable.

A fin de incluir el efecto real del estado microestructural a través del esfuerzo interno, el coeficiente de difusión dependiente de la temperatura y los parámetros de normalización en la descripción, se pudiera emplear la siguiente ecuación para el esfuerzo máximo:

$$\frac{\varepsilon}{DT} = A \left\{ \sinh \left[\frac{\alpha(\sigma_p - \sigma_{0p})}{ET} \right] \right\}^5 \quad (2.46)$$

En la cual σ_{0p} representa un esfuerzo interno asociado con el esfuerzo máximo, σ_p esta relacionado con el tamaño del grano inicial y ET y DT representa el modulo de elasticidad dependiente de la temperatura y viene dada por la ecuación:

$$DT = D_0 \exp\left(-\frac{Q_{sd}}{RT}\right) \quad (2.47)$$

Por otra parte, existe una relación existente entre el esfuerzo de estado estable y el tamaño del grano recristalizado:

$$\frac{\sigma_{ss}}{\mu} = K_{ss} \left(\frac{d_{rec}}{b} \right)^{m_{ss}} \quad (2.45)$$

Con esta ecuación se puede relacionar los esfuerzos internos desarrollados durante la deformación de estado estable con el tamaño de grano recristalizado, desarrollándose una expresión de la forma:

$$\sigma_{0,ss} = 3.5 + 0.75d_{rec}^{-1/2} \quad (\text{Mpa}) \quad (2.49)$$

Finalmente, a fin de determinar σ_s , se procedió al cálculo de Ω y U , que quedan definidos por las siguientes ecuaciones:

$$(\alpha'b)^2 U = K_u d_0^{n_u} Z^{m_u} \quad (2.50)$$

Donde $K_u = 0.33 \times 10^{-5}$, $n_u = -0.08$ y $m_u = 0.14$, así mismo se utilizó la siguiente expresión para calcular Ω :

$$\Omega = K_\Omega d_0^{n_\Omega} Z^{m_\Omega} \quad (2.51)$$

Donde $K_\Omega = 1829$, $n_\Omega = 0.346$ y $m_\Omega = -0.167$.

2.3.5. Modelo de Puchi (2003):

Puchi en su modelo analiza el comportamiento constitutivo de un acero de grado 430 (C-Mn) deformado bajo condiciones de trabajo en caliente. El

análisis se ha desarrollado mediante las ecuaciones del modelo de Sellars-Tegar-Garofalo, para la descripción de la dependencia del esfuerzo de fluencia inicial, esfuerzo de saturación aparente y esfuerzo de saturación real, de la temperatura y tasa de deformación.

El análisis presentado utilizó una serie de datos esfuerzo-deformación obtenidos en el acero, a partir de ensayos de compresión plana a temperaturas de 1173, 1273, 1373 K, a tasas de deformación de 0.25, 2.5 y 25 s⁻¹. En la figura 2.12 se ilustran las líneas sólidas, una serie de curvas esfuerzo-deformación representativa, determinada en el intervalo de condiciones de deformación.

Para la descripción de los datos de fluencia lenta en trabajo en caliente se utilizó la expresión:

$$Z = \varepsilon \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_1 [\sinh(\alpha\sigma)]^m \quad (2.52)$$

Donde α y m son parámetros de sensibilidad de la tasa de deformación con el esfuerzo, Q la energía de activación aparente y R la constante universal de los gases.

Este parámetro Z , es relevante en el comportamiento mecánico de los aceros, ya que define las fluctuaciones térmicas que sufre el material durante la etapa de recristalización dinámica.

Las curvas que se muestran en la figura 2.12, presentan tres características importantes de aquellos materiales que exhiben recristalización dinámica durante la deformación de alta temperatura. Primero la presencia de endurecimiento por deformación, en segundo lugar el alcance del esfuerzo de fluencia máximo y en tercer lugar una etapa transitoria de ablandamiento por deformación.

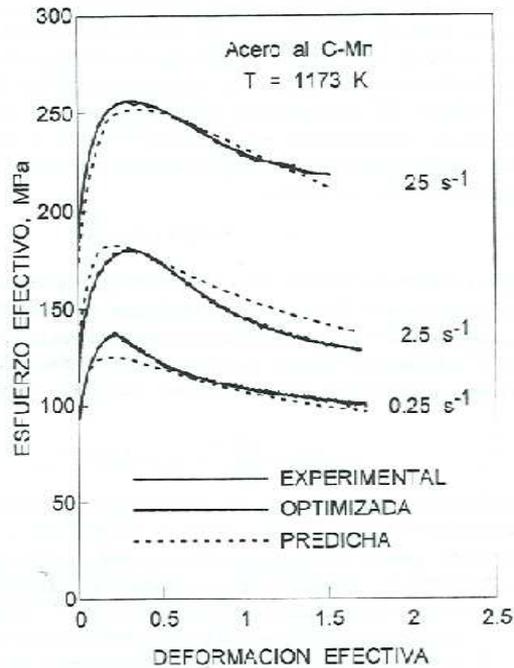


Figura 2.12 Curvas esfuerzo-deformación efectivas a 1173 K y diferentes tasas de deformación. Se presenta para su comparación la curva experimental así como las curvas optimizadas y predichas (Puchi 2003)

A fin de describir el comportamiento esfuerzo-deformación del material se utilizó la ecuación de saturación propuesta por Sah et al., con las modificaciones apropiadas para tomar en consideración la ocurrencia de recristalización dinámica. Esta ecuación, en su forma integrada se puede expresar como:

$$\sigma = \sigma_o + (\sigma_s - \sigma_o) \left[1 + \exp\left(-\frac{\epsilon}{\epsilon_r}\right) \right]^{1/2} \quad (2.53)$$

En la cual σ_o representa el esfuerzo de fluencia inicial al comienzo de la deformación plástica, σ_s el esfuerzo de saturación aparente y ϵ_r la

deformación por relajación, es decir, la deformación a la que la relación $(\sigma_s - \sigma)/(\sigma_s - \sigma_0)$ alcanza un valor de 0.795.

A fin de tomar en consideración la recristalización dinámica, se debe sustraer de la ecuación 2.53, un término que represente la contribución al ablandamiento producto de la operación de dicho proceso, este término viene expresado por:

$$\Delta\sigma = (\sigma_s - \sigma'_s) \left\{ 1 - \exp \left[k' \left(\frac{\varepsilon - f_p \varepsilon_p}{\varepsilon_p} \right)^{m'} \right] \right\} \quad (2.54)$$

Donde σ'_s representa el esfuerzo de estado estable real alcanzado durante la deformación, k' y m' constantes de Avrami en la ecuación cinética, f_p la fracción de la deformación asociada al esfuerzo máximo a la cual comienza la recristalización dinámica y ε_p dicha deformación.

Considerando que: $\Delta\sigma = 0$ Si $\varepsilon < f_p \varepsilon_p$ (2.55)

Se ha propuesto que para describir la dependencia de los parámetros de esfuerzo, de la tasa de deformación y la temperatura, se utilice el modelo cinético propuesto por Kocks, lo cual daría resultado:

$$\sigma_0 = \mu(T) \sigma_{K0} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{k0}} \right)^{\frac{kT}{A_0}} \quad (2.56)$$

Donde σ_o , representa el esfuerzo de fluencia al comienzo de la deformación plástica.

$$\sigma_s = \mu(T) \sigma_{KS} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{KS}} \right)^{\frac{kT}{A_s}} \quad (2.57)$$

σ_s , viene a ser el esfuerzo extrapolado de la curva de fluencia en ausencia de la recristalización dinámica, es decir, la etapa de restauración dinámica en el proceso de deformación y $\mu(T)$, esta dado por la siguiente ecuación:

$$\mu(T) = 88.885 - 0.0373T \quad (\text{GPa}) \quad (2.58)$$

En las expresiones anteriores σ_{k0} , σ_{KS} , $\dot{\epsilon}_{k0}$, A_0 y A_s representan constantes del material.

Por otra parte la caracterización del esfuerzo de estado estable real σ_s' , en términos de la tasa y temperatura de deformación, se lleva a cabo mediante la expresión:

$$\sigma_s' = \frac{\mu(T)}{\alpha_s'} \sinh^{-1} \left[\frac{Z}{A_s'} \right]^{m_s'} \quad (2.59)$$

En este caso, los parámetros σ_s' , Q , A_s' y m_s' se calculan a partir de los datos experimentales esfuerzo-deformación-tasa de deformación-temperatura.

La deformación por relajación viene dada por:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r0} + \varepsilon_{r1}(\dot{\varepsilon})^{m_r} \quad (2.60)$$

Donde los parámetros ε_{r0} , ε_{r1} y m_r también representan constantes del material y ε_p se puede determinar por:

$$\varepsilon_p = A_p Z^{m_p} \quad (2.61)$$

Donde A_p y m_p son constantes que también se deben calcular a partir de los datos experimentales. De esta manera, los parámetros materiales que deben ser determinados a partir de los datos experimentales son: Q , A_s , α_s , m_s , ε_{r0} , ε_{r1} , m_r , k , n , f_p , A_p , m_p . El calcular de estos se llevó a cabo mediante la definición de una segunda suma de los cuadrados, Ω , de la forma:

$$\Omega = \sum_{i=01}^{N_i} \left\{ \bar{\sigma}_i(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) - \sigma_i(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \right\}^2 \quad (2.62)$$

En la ecuación 2.62 $\bar{\sigma}_i(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ representa los valores calculados del esfuerzo de fluencia a través de las ecuaciones, 2.53, 2.54, 2.56 al 2.61, mientras que $\sigma_i(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ representa los valores experimentales del esfuerzo de fluencia a cada deformación, tasa de deformación y temperatura. N_T representa el número total de puntos, es decir la suma de todos los pares individuales esfuerzo-deformación.

CAPÍTULO 3

Marco Metodológico

3.1 Descripción de la metodología

3.1.1 Selección del modelo matemático de forja.

Una vez realizada una revisión de la literatura sobre los modelos matemáticos existentes para el diseño de procesos de forja, se presentan tres modelos en particular; los cuales contemplan las características y parámetros principales del diseño de un proceso de forjado.

El primer modelo a tomar en consideración caracteriza la relación típica de esfuerzo-deformación que tiene lugar en el formado del material, este comportamiento permite describir el proceso de forjado mediante la ecuación 2.3 presentada en el capítulo anterior, que contempla que la fuerza requerida para la compresión del material a forjar, depende de la geometría de la pieza y del esfuerzo de fluencia del material.

El segundo modelo, caracterizado por las ecuaciones 2.9, 2.11 y 2.13, esta basado en diagramas de equilibrio, establecen la influencia de las fuerzas que actúan sobre el material, lo que permite la determinación de la

presión producida por la fuerza en todo el contorno del material, que viene relacionada con la fricción que se presenta entre el material y la herramienta de trabajo.

El modelo anterior describe la distribución de presiones durante el forjado cilíndrico al aplicar presión gradual, en lugar de impactos. Sin embargo, el proceso de forja aplicando presión gradual es un proceso lento, la velocidad de deformación es muy baja, lo que resulta en un mayor tiempo de contacto, lo que puede traer problemas de pérdidas de calor en la pieza de trabajo y deterioro de los dados.

El tercer modelo de forja considera que la energía de impacto es suministrada por un mazo que cae libremente, la fuerza del golpe se determina por la altura de la caída y el peso del mazo, se requiere de varios golpes para lograr la forma final de la pieza.

En este tipo de proceso de forja, en la mayoría de los casos, el material de trabajo es sometido a un tratamiento térmico previo, en el caso de los aceros, éstos se llevan a una temperatura alrededor de los 1100°C. El precalentamiento permite producir deformaciones plásticas sustanciales en los aceros, lo que no es posible en el trabajo en frío. Cabe destacar que los dados también son precalentados antes del proceso a fin de evitar que se fracturen o se deterioren, generalmente se llevan a unos 250 °C aproximadamente. Todo esto da como resultado ciertas ventajas tales como: se requiere menor potencia para deformar el material, se reduce la posibilidad de que el material se fracture, se logra obtener mayores formas debido a que el material es más dúctil y ofrece menor resistencia a la deformación.

Este último modelo se selecciona para efectos de la elaboración del programa, ya que la mayoría de los procesos de forja son llevados a cabo por

impacto, para optimizar tiempos de producción; de ahí que el modelo de presión gradual (segundo modelo) se descarta y el primer modelo queda absorbido por el modelo seleccionado, ya que, además de considerar los efectos de incremento de fuerza requerida como consecuencia de la fricción, también incorpora la fuerza motriz empleada para llevar a cabo la deformación (energía suministrada por un cuerpo en caída libre).

3.1.2 Selección del modelo matemático de comportamiento mecánico en caliente de los aceros.

A partir de la revisión de la literatura sobre los modelos que describen el comportamiento mecánico de los aceros cuando son trabajados a altas temperaturas, estos se pueden agrupar en dos grandes categorías.

La primera, esta constituida por aquellos modelos representados por las ecuaciones 2.14, 2.15 y 2.16 detalladas en el capítulo anterior, que describen el comportamiento de material únicamente a partir de los parámetros: tasa de deformación, coeficiente de resistencia y geometría del material, obviando la relación que existe entre estos parámetros con la microestructura existente bajo condiciones de trabajo a altas temperaturas, que viene a determinar el comportamiento mecánico real de los aceros para el proceso de deformación en caliente, que representa un gran aporte en el mejoramiento de los métodos de conformado, como es el proceso de forja.

Por otra parte, la segunda categoría abarca los modelos que toman en consideración para la deducción de sus ecuaciones constitutivas fenómenos vitales como son el endurecimiento por deformación, la restauración dinámica y la recristalización dinámica. El estudio de estos fenómenos constituye un requerimiento fundamental para el análisis cuantitativo de los procesos de

deformación en caliente ya que representan el comportamiento real del acero en el periodo de deformación que sufre durante el conformado y la influencia de la temperatura en todo este proceso.

Entre los modelos existentes dentro de la segunda categoría se puede destacar los propuestos por Kozlowski et al, Medina et al, Cabrera et al., y el de Puchi. Se puede decir que cada uno de estos modelos parten del mismo principio, en el que la mayoría de los parámetros tienen una dependencia de la temperatura y del tiempo, para la deducción de las ecuaciones constitutivas que los caracterizan, la diferencia radica principalmente en el enfoque que se le da al comportamiento mecánico del acero.

Para la selección del modelo matemático a considerar en esta investigación, se toma en cuenta que algunos de los modelos propuestos, como el de Kozlowski et al., Medina et al y Cabrera; adolecen de ciertas deficiencias fundamentales por lo que no se consideran verdaderas descripciones constitutivas de los aceros, sino solamente funciones de interpolación del esfuerzo de fluencia a ciertos valores de deformación, tasa de deformación y temperatura.

Más crítico aun, es el hecho de que en ninguno de estos enfoques se separen las contribuciones provenientes de los diversos mecanismos de endurecimiento, térmicos y atérmicos, en un término de carácter "estructural", efectivamente libre de los efectos de la activación térmica, el cual sea subsecuentemente extrapolado a las condiciones de temperatura y tasa de deformación de interés para la determinación del esfuerzo de fluencia en tales condiciones.

Tomando en consideración el análisis realizado anteriormente, se ha seleccionado para desarrollar esta investigación, el modelo propuesto por

Puchi (2003), ya que en la deducción de las ecuaciones constitutivas de este modelo, además de considerar en su desarrollo las observaciones y propuestas hechas por los modelos anteriores, presenta mejoras a todos los aspectos obviados por aquellos

El modelo que propone Puchi (2003), es fundamentalmente el desarrollo de una serie de relaciones simples que se pudieran implementar fácilmente en cualquier modelo numérico que requiera la interpolación del esfuerzo de fluencia del material a fin de determinar las distribuciones de deformación, tasa de deformación y temperatura en la pieza de trabajo durante la deformación a temperaturas elevadas. Además de aportar toda la información referente a las características del material, es decir, las constantes del material que están implícitas en las ecuaciones constitutivas presentadas en este modelo, por tanto se considera el modelo idóneo para ser incorporado al esquema de diseño de forja seleccionado.

3.1.3 Elaboración del programa para el cálculo de forja.

Una vez seleccionada la combinación de modelos matemáticos que servirán de base en el diseño de procesos de forja en aceros al carbono, considerando los fenómenos presentes en el proceso de conformado a altas temperaturas, se procedió a elaborar el programa.

En primer lugar, habiendo seleccionado el modelo de Puchi como referencia para la descripción del comportamiento mecánico del acero a altas temperaturas, y tomando en consideración la complejidad de la determinación de las constantes del material, se tomaron las constantes del material correspondientes a un acero C-Mn reportadas por el mismo autor (2003) y las

cuales fueron obtenidas por el mismo a través de el método de mínimos cuadrados, cuya composición y parámetros relativos al comportamiento en caliente se presentan en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3.

Tabla 3.1 Valores de las constantes involucradas en la descripción de las curvas de fluencia a varias temperaturas y esfuerzo de deformación (Puchi 2003).

| σ_0 (Mpa) | σ (Mpa) | ϵ_r | σ_s (Mpa) | f_p | K' | n' | ϵ_r (s ⁻¹) | T, K |
|------------------|----------------|--------------|------------------|-------|------|------|---------------------------------|------|
| 79.4 | 143.2 | 0.12 | 96.0 | 0.50 | 0.81 | 0.99 | 0.25 | 1173 |
| 105.1 | 184.1 | 0.13 | 123.9 | 0.39 | 1.32 | 0.91 | 2.41 | 1173 |
| 165.2 | 308.8 | 0.30 | 213.1 | 0.30 | 1.39 | 0.10 | 24.3 | 1173 |
| 64.0 | 103.7 | 0.10 | 73.1 | 0.51 | 0.79 | 0.99 | 0.23 | 1273 |
| 98.6 | 150.8 | 0.14 | 100.1 | 0.57 | 1.00 | 0.97 | 2.34 | 1273 |
| 99.1 | 225.6 | 0.20 | 144.6 | 0.30 | 1.24 | 0.10 | 24.6 | 1173 |
| 47.6 | 124.6 | 1.84 | 1.84 | 50.5 | 0.25 | 0.98 | 0.24 | 1373 |
| 58.2 | 106.5 | 0.25 | 0.25 | 65.1 | 0.46 | 0.86 | 2.47 | 1373 |
| 66.3 | 138.8 | 0.11 | 0.11 | 89.7 | 0.13 | 0.74 | 24.4 | 1373 |

Tabla 3.2 Parámetros involucrados en las ecuaciones constitutivas que describen el comportamiento de σ_0 y σ_s (Puchi 2003).

| | |
|------------------------------------|------------------------|
| σ_{K0} | 4.31×10^{-2} |
| ϵ_{K0} (s ⁻¹) | 6.33×10^{-9} |
| A_0 (J) | 1.24×10^{-19} |
| σ_{KS} | 2.87×10^{-2} |
| ϵ_{KS} (s ⁻¹) | 2.54×10^{-5} |
| A_0 (J) | 1×10^{-19} |

Tabla 3.3 Parámetros involucrados en las ecuaciones constitutivas del acero C-Mn (Puchi 2003).

| | |
|--------------------------------|-------------------------|
| Q (KJ mol⁻¹) | 280 |
| A_p | 8.76 x 10 ⁻³ |
| m_p | 0.166 |
| Ln A_s | 18.95 |
| m_s | 5.68 |
| α_s | 1150.5 |
| ε_{r0} | 0.135 |
| ε_{r1} | 3.02 x 10 ⁻³ |
| m | 1.26 |
| f_p | 0.12 |
| n | 0.89 |
| K | 0.82 |

El segundo aspecto que se tomó en cuenta en el diseño del programa fueron las variables de entrada del proceso, que para el caso particular de la programación diseñada son: la temperatura de la pieza de trabajo, la altura del mazo, la masa del mazo y las dimensiones del tocho inicial. Para efectos del programa, se considera un tocho cilíndrico, para el cual sólo se requiere el diámetro inicial y altura inicial. Estos parámetros de entrada son las variables de control que determinan el proceso en sí e influyen significativamente en la deformación del material.

La carga requerida en el proceso está asociada con la capacidad del equipo mediante la masa del mazo, de ahí que puede considerarse como un parámetro de entrada, ya que a partir de éste, se definirá el número de pasadas y geometrías relacionadas.

Para los datos de salida se definen como parámetros más significativos para el diseño de un proceso de forja los siguientes: Diámetro y altura final de la pieza, número de impactos, velocidad de deformación y porcentajes de reducción.

Para comenzar con la iteración, se selecciona un valor de 20 diferenciales de altura a lo largo de cada impacto, a fin de obtener una buena aproximación en la interpolación llevada a cabo para la obtención de las variables a calcular.

Seguidamente se incorporó el cálculo de la tasa de deformación ($\dot{\varepsilon}$), que implica la relación existente entre la velocidad del yunque y la altura de caída del mismo, mediante la ecuación 2.13.

Para incorporar los aportes de la restauración dinámica al material, en primer lugar se introduce la ecuación que representa el esfuerzo de saturación aparente (σ_s), dado por la ecuación 2.57. En esta ecuación se evidencia la dependencia con la tasa de deformación y la temperatura. Así mismo, se incorpora el cálculo del módulo de corte elástico ($\mu(T)$), mediante la ecuación 2.58, que es un parámetro dependiente de la temperatura y del cual depende (σ_s). Una vez incorporado el cálculo de ($\mu(T)$), se puede determinar el esfuerzo de fluencia (σ_o), a partir de la ecuación 2.56, que depende además de la temperatura y otras constantes del material.

Otro de los parámetros que forma parte de la ecuación constitutiva que define el comportamiento del esfuerzo de fluencia y por tanto es incorporado a la programación, es la deformación de relajación (ε_r) dado por la ecuación 2.60, ésta es una variable que depende de las constantes del material. Para modelar la tasa de deformación, que determina la fluencia del material por efectos de la temperatura se introduce el parámetro (Z) representado en la ecuación 2.52.

La variable (σ'_s) representa el esfuerzo de estado estable real en términos de la tasa y temperatura de deformación que viene dado por la ecuación 2.59 y el término (ϵ) dado por la ecuación 2.1, que caracteriza al esfuerzo real bajo condiciones ideales que experimenta el material durante el proceso de deformación.

Un aspecto importante en la etapa de recristalización dinámica durante la deformación a temperaturas elevadas es el cálculo de la deformación al esfuerzo máximo o pico (ϵ_p), que viene dada en función del parámetro Z y de constantes del material.

Para representar la contribución del ablandamiento al ocurrir la recristalización dinámica durante la operación, se introduce el término $\Delta\sigma$, el cual viene dado por la combinación de la ecuación de σ_1 , que representa la resistencia del material omitiendo el efecto de ablandamiento y la consideración que para $\epsilon < f_p * \epsilon_p$, $\Delta\sigma = 0$. Entonces, se tiene que el valor del esfuerzo de fluencia a tomar en cuenta para los cálculos resulta de la siguiente consideración:

$$\text{Sí } \epsilon < f_p * \epsilon_p \longrightarrow \sigma = \sigma_1$$

$$\text{Sino; } \sigma = \sigma_1 - \Delta\sigma$$

Para el cálculo de la altura final (h_f), se realiza la integración de una ecuación en términos de la deformación, la masa del mazo, la velocidad de deformación con respecto al tiempo y las condiciones iniciales del material, que viene dada por el área bajo la curva definida por la función J, que define el comportamiento del material a lo largo de la deformación. El parámetro J viene determinado por la siguiente ecuación:

$$J = A_0 h_0 k \int_{h_0}^h \left[\ln \left(\frac{h}{h_0} \right) \right]^n \cdot \left[\frac{1}{h^{m+1}} + \frac{0.217 (A_0 h_0)^{1/2}}{h^{2.5+m}} \right] \cdot dh \quad (3.1)$$

Esta función resulta de la combinación de las condiciones de forja determinadas por las ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12:

Hay que destacar que la ecuación 2.11, se ha modificado al considerar lo siguiente:

- Como la condición es de forja en caliente, se asume adherencia total:
m = 1

Bajo esa consideración la fuerza queda definida por la siguiente ecuación:

$$F = \sigma \frac{A_0 h_0}{h} \left[1 + \frac{D}{3\sqrt{3}h} \right] \quad (3.3)$$

Donde σ viene dado por la ecuación 2.12, descrita en el capítulo anterior y representa el esfuerzo en un proceso de forja a altas temperaturas. Además se toman en consideración las condiciones típicas del proceso de forja, tales como:

- En el impacto, la velocidad del mazo será nula, entonces $V = 0$
- Como no hay endurecimiento por deformación $n = 0$

El valor de h (altura final), es definido cuando el término J, representado por la ecuación 3.1, se iguala a la condición de deformación de volumen del material determinada por la masa y velocidad con la que cae el mazo:

$$M \left[\frac{V_0^{2-m} - V^{2-m}}{2-m} \right] \quad (3.4)$$

donde V es la velocidad al momento del impacto y V₀ es la velocidad inicial del mazo.

A continuación se presenta la secuencia de ecuaciones incorporadas al programa:

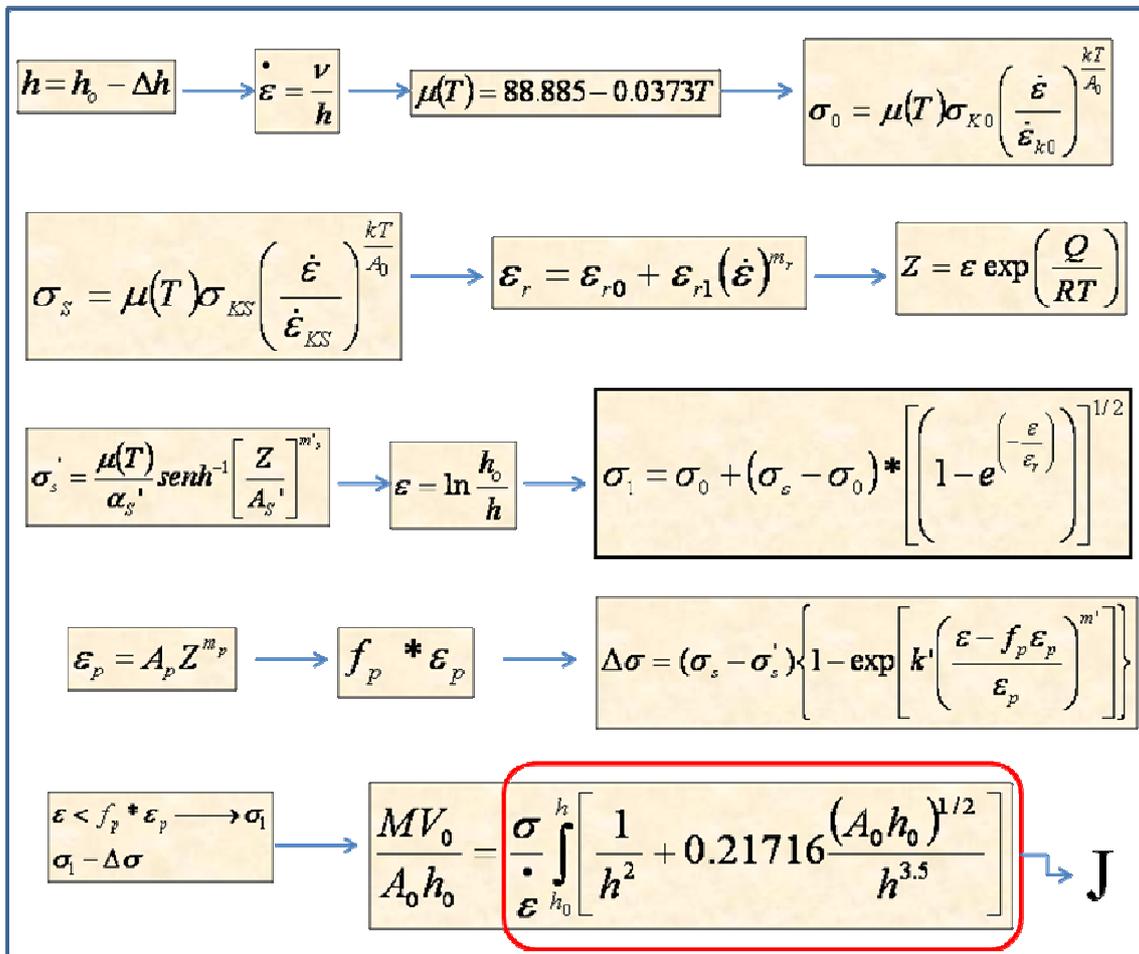


Figura 3.1 Secuencia de ecuaciones incorporadas al programa.

3.1.4 Aplicación del programa en un caso práctico.

A fin de realizar una comparación de los resultados arrojados por el programa con aquellos parámetros puestos en práctica en procesos de forja aplicados a nivel industrial, se tomó como referencia los datos del conformado de una pieza en específico, que forma parte de la gama de productos que en los actuales momentos son fabricados por la empresa Forjas Santa Clara, ubicada un San Joaquín, estado Carabobo.

La manera de obtener los datos aportados por dicha empresa con respecto a uno de sus productos, consistió en una visita a la misma, en la cual fue posible observar el proceso y tomar los datos en campo, además de información aportada por el personal especializado a cargo de la ejecución y supervisión del trabajo.

El proceso para la obtención de la pieza se trata de forja por impacto, a través de un martinete hidráulico y neumático con una energía de impacto de 20000 Kg * m, la masa del martillo es de 12 toneladas y altura de caída del mazo de 0.5 m.

La pieza a obtener es una brida W.N 12" y 300 lb., se cuenta con el plano de la misma, el cual fue facilitado en la empresa y se puede visualizar en el Apéndice, con las dimensiones que debe tener la misma luego del forjado que además fueron verificadas las medidas de la misma con una de las piezas logradas para ese momento. El material utilizado es acero ASTM-105, las dimensiones iniciales del tocho son $d_0 = 230$ mm y $h_0 = 374$ mm de Peso = 122Kg., al cual se le hace un tratamiento térmico que consiste en llevar al material a 1100 °C (media hora por pulgada), para su posterior forjado. Además los troqueles se le hacen un precalentamiento en el cual se llevan los mismos a 250 °C.

El método de evaluación del programa consiste en introducir los datos iniciales del proceso de forjado en el mismo y comparar los resultados con los aplicados en la práctica. Los datos a introducir en el programa son:

Temperatura del material (T) = 1100 °C

Altura del mazo ó yunque: 0.5 m

Masa del Yunque (M): 12 Ton.

Diámetro Inicial del Tocho: 230 mm

Altura inicial del Tocho: 374 mm

Una vez introducidos los datos iniciales, se verifican los resultados que arroja el programa y se realiza una comparación con los valores experimentales que se tienen para posteriormente emitir un juicio de valor, de acuerdo a los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 4

Resultados

4.1 Programa de forja

. El programa de forja se diseñó en cuatro secciones: La primera comprende a las constantes del material, que una vez introducidas permanecen invariables para diferentes piezas y condiciones del proceso: temperatura, altura del mazo, masa del mazo, etc.

La segunda sección consta de los datos de entrada del programa, relacionados con los parámetros necesarios para iniciar el proceso de forja, son las condiciones iniciales del proceso.

La tercera sección esta constituida por el desarrollo de la programación propiamente, esta sección esta estructurada por todas las ecuaciones constitutivas, cálculos, iteraciones, e interpolaciones relativas a cada pasada y arroja los resultados correspondientes.

Por último se presenta la cuarta sección que comprende la presentación de los resultados finales tanto de la pieza como del proceso.

4.1.1 Constantes del material y datos de entrada.

La primera sección corresponde a la introducción de las constantes del material en el programa, aquí se tienen todas las características del material, es decir las constantes del material a tomar en cuenta en las ecuaciones constitutivas incorporadas a la programación, a efectos de este estudio se cuenta con las constantes de un acero al manganeso (C-Mn) reportadas en la literatura antes mencionada, tal como se visualiza en la figura 4.1.

| CONSTANTES DEL MATERIAL A FORJAR | | | | Acero C-Mn | |
|----------------------------------|----------|-----------------------------|--------|-------------------|---------|
| ε_{ro} | 0,135 | σ_{kS} | 0,0287 | k' | 0,82 |
| ε_{r1} | 0,003 | $\varepsilon_{kS} (s^{-1})$ | 254000 | f_p | 0,12 |
| m_r | 1,260 | $A_s (J)$ | 1E-19 | m' | 0,89 |
| σ_{ko} | 0,043 | $\sigma_{s'}^1$ | 1150,5 | A_p | 0,00876 |
| $\varepsilon_{ko} (s^{-1})$ | 6,33E+09 | $Ln A'_s$ | 18,95 | m_p | 0,166 |
| $A_0 (J)$ | 1,24E-19 | m'_s | 5,68 | $Q (kJ mol^{-1})$ | 280 |

Figura 4.1. Constantes del material introducidas en el programa.

En segunda sección se presentan las variables de entrada del proceso, es decir son los datos que se deben introducir para iniciar la corrida del programa, que además corresponden a los utilizados en un proceso de forja aplicado a la industria y están conformados por las condiciones iniciales del tocho, tales como diámetro inicial y altura inicial, es decir; las medidas del tocho que se requiere para lograr la pieza. Otro dato importante inicial a introducir es la temperatura con la que sale el tocho después de aplicarle el tratamiento térmico y por último las características del martinete, que son masa del yunque o mazo y la altura a la que esta el mismo de la base del martinete. Esta sección se ilustra en la figura 4.2

| VARIABLES DEL PROCESO | | | |
|-----------------------|----------------------|----------|----------------------|
| T (K): | <input type="text"/> | do (mm): | <input type="text"/> |
| H(m): | <input type="text"/> | ho (mm): | <input type="text"/> |
| M (Ton): | <input type="text"/> | | |

Figura 4.2. Datos de entrada del programa de forja.

4.1.2. Presentación de la programación correspondiente a los cálculos del proceso de forja

Esta tercera sección corresponde a los cálculos de las variables y parámetros relacionados con las ecuaciones constitutivas deducidas de la combinación de los modelos matemáticos seleccionados para la caracterización del comportamiento de los aceros a altas temperatura.

En esta sección se presentan dichos cálculos e iteraciones por bloques que representan cada pasada del proceso, correspondientes a los datos introducidos inicialmente en el programa y que han sido previamente descritos en el capítulo anterior.

| PASADA1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------------|--------------|---------------|-------------------|-------------|------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------|----------|-----------|----------|---------|-----------|--------|--------|
| K (J/K) 1,4E-23 | | Ao(m^2) 0,041548 | | delta h 0,0187 | | INTERPOLACIÓN | | Ijsup 4E+06 | | | | | | | | | | | | |
| R (JK) 8,31 | | Mvo/Aoho 2418787 | | VMAZO (mm/s): 3132,09 | | | | Ijinf 2E+06 | | hfinal (m) 349,57 | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | hsup 0,3366 | | d final (m) 237,90232 | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | hinf 0,3553 | | | | | | | | | | | | |
| h(m) | ϵ (s ⁻¹) | μ (T) (Gpa) | σ_o (Mpa) | σ_s (Mpa) | ϵ_r | Z | σ_s' (Mpa) | ϵ | σ_1 (MPa) | ϵ_p | $\Delta\sigma$ (MPa) | $f_p \cdot \epsilon_p$ | σ (MPa) | J | Int | Lim sup | Lim inf | hsup | hinf | |
| 1 | 0,374 | 8,37458 | 37,6721 | 71,264616 | 152,7877 | 0,178948 | 3,809E+11 | 67,705 | 0 | 71,26462 | 7,327E-01 | 0,000 | 0,088 | 71,26462 | 68037288 | 0 | - | 0 | - | 0,374 |
| 2 | 0,355 | 8,81534 | 37,6721 | 71,82577 | 154,2809 | 0,181882 | 4,010E+11 | 67,992 | 0,05 | 112,7003 | 7,390E-01 | 0,000 | 0,089 | 112,7003 | 114218080 | 1704088 | - | 1704087,7 | - | 0,3553 |
| 3 | 0,337 | 9,30509 | 37,6721 | 72,422054 | 155,8707 | 0,185187 | 4,233E+11 | 68,294 | 0,11 | 127,389 | 7,456E-01 | 2,306 | 0,089 | 125,0834 | 135091798 | 4035135 | 4035135 | * | 0,3366 | * |
| 4 | 0,318 | 9,85244 | 37,6721 | 73,057813 | 157,5692 | 0,188935 | 4,481E+11 | 68,613 | 0,16 | 137,2484 | 7,527E-01 | 8,608 | 0,090 | 128,6401 | 148708825 | 6688671 | 6688671 | * | 0,3179 | * |
| 5 | 0,299 | 10,4682 | 37,6721 | 73,738227 | 159,3909 | 0,193217 | 4,762E+11 | 68,952 | 0,22 | 144,6237 | 7,603E-01 | 14,328 | 0,091 | 130,296 | 162035964 | 9594135 | 9594135 | * | 0,2992 | * |
| 6 | 0,281 | 11,1661 | 37,6721 | 74,469532 | 161,3534 | 0,198148 | 5,079E+11 | 69,314 | 0,29 | 150,5048 | 7,685E-01 | 19,815 | 0,092 | 130,6894 | 175861265 | 12753474 | 1,3E+07 | * | 0,2805 | * |
| 7 | 0,262 | 11,9637 | 37,6721 | 75,259334 | 163,4781 | 0,203884 | 5,442E+11 | 69,700 | 0,36 | 155,4425 | 7,774E-01 | 25,200 | 0,093 | 130,243 | 190934925 | 16183018 | 1,6E+07 | * | 0,2618 | * |
| 8 | 0,243 | 12,884 | 37,6721 | 76,117025 | 165,7914 | 0,210626 | 5,860E+11 | 70,116 | 0,43 | 159,7911 | 7,870E-01 | 30,560 | 0,094 | 129,2315 | 208058117 | 19913603 | 2E+07 | * | 0,2431 | * |
| 9 | 0,224 | 13,9576 | 37,6721 | 77,054386 | 168,3269 | 0,218651 | 6,349E+11 | 70,565 | 0,51 | 163,8022 | 7,975E-01 | 35,960 | 0,096 | 127,8423 | 228213925 | 23992747 | 2,4E+07 | * | 0,2244 | * |
| 10 | 0,206 | 15,2265 | 37,6721 | 78,086454 | 171,127 | 0,228343 | 6,926E+11 | 71,053 | 0,6 | 167,6697 | 8,091E-01 | 41,462 | 0,097 | 126,2079 | 252732594 | 28489597 | 2,8E+07 | * | 0,2057 | * |
| 11 | 0,187 | 16,7492 | 37,6721 | 79,232827 | 174,2477 | 0,240254 | 7,619E+11 | 71,589 | 0,69 | 171,5562 | 8,220E-01 | 47,132 | 0,099 | 124,4241 | 283550144 | 33503840 | 3,4E+07 | * | 0,187 | * |
| 12 | 0,168 | 18,6102 | 37,6721 | 80,51968 | 177,7637 | 0,255197 | 8,465E+11 | 72,181 | 0,8 | 175,6121 | 8,365E-01 | 53,050 | 0,100 | 122,5619 | 323666378 | 39181315 | 3,9E+07 | * | 0,1683 | * |
| 13 | 0,150 | 20,9364 | 37,6721 | 81,983016 | 181,7784 | 0,274426 | 9,523E+11 | 72,844 | 0,92 | 179,9923 | 8,531E-01 | 59,318 | 0,102 | 120,6742 | 378029132 | 45742168 | 4,6E+07 | * | 0,1496 | * |
| 14 | 0,131 | 23,9274 | 37,6721 | 83,674201 | 186,4396 | 0,299974 | 1,088E+12 | 73,597 | 1,05 | 184,8757 | 8,722E-01 | 66,075 | 0,105 | 118,8011 | 455390056 | 53534637 | 5,4E+07 | * | 0,1309 | * |
| 15 | 0,112 | 27,9153 | 37,6721 | 85,66996 | 191,9694 | 0,33534 | 1,270E+12 | 74,466 | 1,2 | 190,4928 | 8,948E-01 | 73,522 | 0,107 | 116,9706 | 572595220 | 63146299 | 6,3E+07 | * | 0,1122 | * |
| 16 | 0,094 | 33,4983 | 37,6721 | 88,091976 | 198,7219 | 0,387078 | 1,524E+12 | 75,496 | 1,39 | 197,1713 | 9,223E-01 | 81,977 | 0,111 | 115,1941 | 765793574 | 75660235 | 7,6E+07 | * | 0,0935 | * |
| 17 | 0,075 | 41,8729 | 37,6721 | 91,149668 | 207,3104 | 0,46892 | 1,905E+12 | 76,758 | 1,61 | 205,4181 | 9,571E-01 | 91,980 | 0,115 | 113,4378 | 1,125E+09 | 93338239 | 9,3E+07 | * | 0,0748 | * |
| 18 | 0,056 | 55,8305 | 37,6721 | 95,248855 | 218,9328 | 0,614805 | 2,540E+12 | 78,387 | 1,9 | 216,0737 | 1,004E+00 | 104,576 | 0,120 | 111,4976 | 1,927E+09 | 1,22E+08 | 1,2E+08 | * | 0,0561 | * |
| 19 | 0,037 | 83,7458 | 37,6721 | 101,34126 | 236,4284 | 0,934724 | 3,809E+12 | 80,689 | 2,3 | 230,5494 | 1,074E+00 | 122,220 | 0,129 | 108,3297 | 4,386E+09 | 1,81E+08 | 1,8E+08 | * | 0,0374 | * |
| 20 | 0,019 | 167,492 | 37,6721 | 112,67239 | 269,6363 | 2,050305 | 7,619E+12 | 84,634 | 3 | 250,2307 | 1,205E+00 | 153,338 | 0,145 | 96,89258 | 1,917E+10 | 4,01E+08 | 4E+08 | * | 0,0187 | * |

Figura 4.3. Programación correspondiente a los cálculos del proceso de forja

4.1.3 Datos de salida del programa de forja.

Los datos de salida corresponden a los resultados que arrojados por el programa una vez realizados los cálculos relacionados con los datos de entrada introducidos. Los parámetros calculados a través del programa son dimensiones finales (diámetro y altura final), es decir; las medidas de la pieza requerida. Además, se calcula la velocidad del mazo en cada pasada, y se presentan los porcentajes de reducción alcanzados en cada pasada con respecto a la anterior, así como el porcentaje de reducción acumulado e incluyendo las pasadas preliminares.

Los resultados que se muestran en la ventana de salida del programa, tal como se visualiza en la figura 4.3, son de la pasada 1, 2 y 3 que son las tres primeras pasadas y las 18, 19, 20 que corresponden a las 3 últimas pasadas, a fin de tener una visión del comportamiento del material a lo largo del proceso, sobretodo en las condiciones iniciales y finales, sin embargo el programa permite tener la información de cualquiera de las pasadas, sólo con realizar una revisión de los bloques intermedios de la programación y las ventanas de salida

| SALIDA | | SALIDA | |
|-----------------|----------------------|------------------|----------------------|
| PASADA 1 | | PASADA 18 | |
| h_{f1} (mm): | <input type="text"/> | h_{f18} (mm): | <input type="text"/> |
| d_{f1} (mm): | <input type="text"/> | d_{f18} (mm): | <input type="text"/> |
| V_{01} (m/s): | <input type="text"/> | V_{18} (m/s): | <input type="text"/> |
| %R1: | <input type="text"/> | %R18: | <input type="text"/> |
| %Rac1: | <input type="text"/> | %Rac18: | <input type="text"/> |
| PASADA 2 | | PASADA 19 | |
| h_{f2} (mm): | <input type="text"/> | h_{f19} (mm): | <input type="text"/> |
| d_{f2} (mm): | <input type="text"/> | d_{f19} (mm): | <input type="text"/> |
| V_{02} (m/s): | <input type="text"/> | V_{19} (m/s): | <input type="text"/> |
| %R2: | <input type="text"/> | %R19: | <input type="text"/> |
| %Rac2: | <input type="text"/> | %Rac19: | <input type="text"/> |
| PASADA 3 | | PASADA 20 | |
| h_{f3} (mm): | <input type="text"/> | h_{f20} (mm): | <input type="text"/> |
| d_{f3} (mm): | <input type="text"/> | d_{f20} (mm): | <input type="text"/> |
| V_{03} (m/s): | <input type="text"/> | V_{20} (m/s): | <input type="text"/> |
| %R3: | <input type="text"/> | %R20: | <input type="text"/> |
| %Rac3: | <input type="text"/> | %Rac20: | <input type="text"/> |

Figura 4.4. Ventana datos de salida del programa de forja.

4.2 Corrida del programa de forja.

Para realizar una corrida del programa, primero se introduce la información de las características del material, es decir las constantes del mismo. Como segundo paso, se introducen las variables del proceso: temperatura, altura del mazo, masa del mazo, diámetro y alturas iniciales del tocho.

Es importante corroborar que las unidades de estas variables de entrada correspondan con las requeridas por el programa antes de ser introducidas en el mismo, a fin de evitar incongruencias en los resultados obtenidos. Una vez incorporados al programa todos los datos de entrada inmediatamente se puede visualizar el resultado en las ventanas de salida.

| ENTRADA | | | | | |
|---|----------|-----------------------------|--------|-------------------|---------|
| CONSTANTES DEL MATERIAL A FORJAR | | | | Acero C-Mn | |
| ε_{ro} | 0,135 | σ_{ks} | 0,0287 | k' | 0,82 |
| ε_{r1} | 0,003 | $\varepsilon_{ks} (s^{-1})$ | 254000 | f_p | 0,12 |
| m_r | 1,260 | $A_s (J)$ | 1E-19 | m' | 0,89 |
| σ_{ko} | 0,043 | α_{ε} | 1150,5 | A_p | 0,00876 |
| $\varepsilon_{ko} (s^{-1})$ | 6,33E+09 | $\ln A'_{\varepsilon}$ | 18,95 | m_p | 0,166 |
| $A_o (J)$ | 1,24E-19 | m'_{ε} | 5,68 | $Q (kJ mol^{-1})$ | 280 |
| VARIABLES DEL PROCESO | | | | | |
| T (K): | 1373 | do (mm): | 230 | | |
| H(m): | 0,5 | ho (mm): | 374 | | |
| M (Ton): | 12 | | | | |

Figura 4.5 Datos de entrada del proceso tomadas de un proceso industrial.

Como se explicó en el capítulo anterior, los resultados arrojados por el programa están basados en las dimensiones finales logradas en el conformado de la pieza, la velocidad del mazo y los porcentajes de reducción, que son las variables clave durante todo el proceso para llegar a la pieza requerida. En la figura 4.5 se muestran dichos resultados, donde se pueden evidenciar las tres primeras pasadas y las tres últimas.

| SALIDA | |
|------------------|----------|
| PASADA 1 | |
| h_{f1} (mm): | 349,57 |
| d_{f1} (mm): | 237,90 |
| V_{01} (m/s): | 3,13 |
| %RA1: | 6,53 |
| %Rac1: | 6,53 |
| PASADA 2 | |
| h_{f2} (mm): | 325,89 |
| d_{f2} (mm): | 246,39 |
| V_{02} (m/s): | 3,21 |
| %RA2: | 6,77 |
| %Rac2: | 12,86 |
| PASADA 3 | |
| h_{f3} (mm): | 303,56 |
| d_{f3} (mm): | 255,30 |
| V_{03} (m/s): | 3,28 |
| %RA3: | 6,85 |
| %Rac3: | 18,83 |
| PASADA 18 | |
| h_{f18} (mm): | 118,01 |
| d_{f18} (mm): | 409,45 |
| V_{18} (m/s): | 3,836272 |
| %RA18: | 4,751526 |
| %Rac18: | 68,44599 |
| PASADA 19 | |
| h_{f19} (mm): | 112,72 |
| d_{f19} (mm): | 418,95 |
| V_{19} (m/s): | 3,851296 |
| %RA19: | 4,48564 |
| %Rac19: | 69,86139 |
| PASADA 20 | |
| h_{f20} (mm): | 107,94 |
| d_{f20} (mm): | 428,12 |
| V_{20} (m/s): | 3,864757 |
| %RA20: | 4,235818 |
| %Rac20: | 71,138 |

Figura 4.6. Datos de salida del programa para el caso práctico aplicado.

Se realizó una corrida del mismo, utilizando la información de entrada de un caso que se realiza actualmente a nivel industrial, como se citó anteriormente. Se comparó los resultados del programa con el caso real, en cuanto a medidas iniciales y finales, además del número de pasadas o golpes del martinete para lograr la pieza requerida.

Dado que la geometría de la pieza que se tiene presenta varias diámetros y alturas, para realizar una comparación de las dimensiones de la misma con los resultados arrojados por el programa; se tomó un promedio de alturas y diámetros finales reales de la pieza, ya que el programa sólo se enfoca en piezas cilíndricas donde se requiera conocer el diámetro y la altura. Además se puede conocer la velocidad del mazo en cada pasada y los porcentajes de reducción del material en cada pasada.

Debido a la complejidad de la geometría de la pieza resultante del proceso industrial se tomaron como punto de comparación un diámetro y altura promedio finales reales de la pieza, resultando los siguientes valores:

$$h_{prom} = \frac{136 + 57}{2} = 96.5mm$$

$$V_{tocho} = V_{pieza}$$

$$V_{tocho} = h_{prom} A_{prom}$$

$$V_{tocho} = h_{prom} \frac{\pi D_{prom}^2}{4}$$

$$D_{prom} = \sqrt{\frac{4V_{tocho}}{\pi h_{prom}}} = 452.8 mm$$

Estas dimensiones se ven representadas en el plano de la pieza dispuesto en el apéndice.

CAPÍTULO 5

Análisis de resultados

. Con base en los resultados obtenidos en el capítulo anterior, donde se muestra paso a paso el diseño de la programación, en el que fueron introducidos los dos modelos matemáticos seleccionados ya mencionados, además de presentar una corrida del programa utilizando datos de un proceso que actualmente se realiza a nivel industrial, se hace el análisis presentado en este capítulo.

En primer lugar hay que resaltar que la corrida del programa se realizó con la información correspondiente a un acero C-Mn disponible en la literatura, específicamente en la demostración de un modelo para representar el comportamiento mecánico en caliente propuesto por Puchi (2003) y descrito en capítulos anteriores. La composición del acero presentado en este modelo difiere de la composición del acero utilizado en la práctica industrial, ya que la determinación de las constantes de éste último implica una mayor complejidad, no contemplada en el alcance de este trabajo, aunado a que no se tiene esta información en los datos suministrados en el caso industrial propuesto. Sin embargo, se proporciona un procedimiento para el diseño de procesos de forja en aceros, además de una aproximación del comportamiento de este material en dicho proceso. Asimismo, es importante

destacar que se puede obtener la modelización del proceso de forja para cualquier otro material, si previamente se tiene la información referente a las constantes del mismo, relativa al comportamiento mecánico a elevadas temperaturas.

En cuanto al comportamiento de cada variable determinante en el proceso de forja, se observó primeramente que el proceso es altamente sensible a la variación de la temperatura, esto se debe a que cuando se realiza trabajos en caliente, el material presenta menor resistencia a la deformación. Los aceros, en este caso, tienen un comportamiento perfectamente plástico, por lo que el exponente de endurecimiento por deformación es $n = 0$.

Por ejemplo, al disminuir la temperatura a la cual se lleva el material en el tratamiento térmico previo de 1100 °C a 900 °C, la altura final de la pieza aumentó de 107.94mm a 160.99mm, lo que quiere decir que presento un aumento de un 32% aproximadamente. El diámetro final disminuyó de 428.12mm a 350.57mm, lo que implica una disminución en un 18% aproximadamente, y los porcentajes finales de reducción disminuyeron a razón de 14% aproximadamente. Éstos resultados ponen de manifiesto el efecto significativo que tiene la temperatura en las propiedades del material, y en consecuencia, en el proceso de conformado. Este comportamiento se debe a que cuando los aceros son trabajados a menores temperaturas, aumenta la resistencia del material a ser deformado, por tanto, las reducciones de área en cada pasada van a ser menores a las obtenidas si el material es conformado a mayores temperaturas, lo anterior esta relacionado con el incremento de dislocaciones sin ningún mecanismo simultáneo de aniquilación, característico del trabajo en caliente.

Por otra parte, al variar la altura desde la cual cae el mazo, específicamente aumentándose esta distancia de 0.5m a 1m, se pudo visualizar la notable disminución de la altura final de la pieza, de 107.94mm a 74.31mm, que representa un aumento de 31% aproximadamente. En cuanto al diámetro, este aumentó en un 17% aproximadamente, y se obtuvieron mayores porcentajes de reducción, esto se debe a la estrecha relación existente entre la altura a la que se deja caer el mazo y la velocidad que adquiere el mismo por efectos de la aceleración de gravedad, lo que determina la fuerza que es aplicada al material para deformarlo, tal como se expresó en los capítulos anteriores. Sin embargo, al variar la masa que posee el mazo, por ejemplo, disminuyéndola, de 12 Ton. a 6 Ton., en cuanto a la altura final de la pieza, esta varió de 107.94mm a 177.24mm, lo que implica un aumento de 39% aproximadamente, esto implica que el tocho sufre menor deformación que si el mazo tuviera una masa mayor. Todo esto se debe a que el mazo adquiere mayor aceleración durante la caída libre si posee mayor masa, por efectos del peso, lo que se traduce en el aumento o disminución de la fuerza de deformación del material.

Aún cuando el tipo de acero utilizado en el caso real no presenta las mismas características del acero correspondiente a las constantes utilizadas en el programa, por las razones expuestas anteriormente, se aprecia que los resultados logrados en el programa, presentan una similitud en la tendencia de los valores tanto en el comportamiento del material como en el proceso característico de forja. Sin embargo, haciendo una comparación en cuanto al número de impactos, se aprecia que hay discrepancia, ya que el proceso industrial consta de menor cantidad de pasadas, con respecto a los resultados que arroja el programa cuando se utiliza como material de trabajo un acero que posee menor contenido de carbono. Este comportamiento puede explicarse sobre la base de los estudios realizados por Wray (1982), donde encontró que cuando los aceros son tratados a altas temperaturas, mientras

mayor sea su contenido de carbono, menor es la resistencia a la fluencia que ofrece este material. Por otra parte, y consistente con la afirmación anterior; a menor porcentaje de carbono, decrecen los niveles de deformación.

En cuanto a la velocidad del mazo, se puede apreciar que presenta un aumento con respecto a cada pasada. Aunque no es un incremento sustancial (menor del 1%), es un aporte significativo para efectos de la reducción de área del tocho de acero (alrededor de 10%), dicho incremento de la velocidad del mazo se atribuye a que la distancia desde donde se deja caer el mazo con respecto a la pieza, sufre una variación a lo largo del proceso de deformación por causa de la disminución de la altura del tocho, la cual se ve reflejada en el aumento de la distancia entre el mazo y el material a deformar y por tanto representa un aporte a la velocidad que adquiere el mazo al caer libremente.

El porcentaje de reducción (%RA), tal como se aprecia en los datos de salida del programa mostrado en la Figura 4.5, se refiere a la reducción que sufre el tocho de acero con respecto a cada pasada. Se puede observar que este presenta un incremento significativo en las primeras pasadas, sin embargo en las últimas pasadas la reducción se hace menos notoria, este comportamiento se puede atribuir al hecho que a medida que evoluciona el proceso de conformado en caliente del acero, se alcanza la condición donde se igualan la velocidad con la cual se forman y crecen nuevos granos, alcanzado un estado estacionario. Por otra parte, a pesar de las altas velocidades de deformación y a las prácticas de precalentamiento de los moldes de forja; el material sufre pérdidas de calor, lo que implica que la temperatura del acero presenta una disminución de 18°C aproximadamente, entre la primera y última pasada, la determinación de la diferencia de temperatura, esta basada en el modelo para estimar la variación de temperatura por causa de pérdidas de calor en un proceso de forja, propuesto por Mielnick (1991). De acuerdo a estos resultados, se pudo constatar a

través del estudio realizado por Cabrera et al. (1997), que al disminuir la temperatura del acero aumenta la resistencia de este material. De esta forma, para las últimas pasadas, la resistencia del material para una deformación equivalente aumenta; como consecuencia de la disminución (aunque ligera) de la temperatura.

En cuanto al porcentaje de reducción acumulada (%Rac), este describe la reducción que presenta el tocho de acero con relación a la primera pasada, esto aporta una información valiosa en cuanto a la reducción real total que se logra en el proceso, con respecto a las condiciones iniciales y los requerimientos finales. Este cálculo permite conocer en que medida se ha avanzado con respecto al porcentaje de reducción total requerida. Este porcentaje de reducción incrementa a medida que se va desarrollando el proceso de formado de la pieza. Este es un comportamiento típico en el proceso de forja, ya que al aumentar el número de impactos la deformación es mayor.

CAPÍTULO 6

Conclusiones

- Las constantes que caracterizan la composición de cada tipo de acero en particular, determinan su comportamiento mecánico, durante el proceso de forja. Por lo tanto el control tanto de la composición química de los aceros como de los parámetros del proceso de forja, permite mejorar las propiedades mecánicas de las piezas elaboradas en el proceso industrial.
- Los aportes de la temperatura, cuando se realizan trabajos en caliente, son determinantes tanto para el proceso de forja como en la obtención de las propiedades mecánicas finales del material, ya que los mecanismos presentes cuando los aceros son sometidos a altas temperaturas y los parámetros del proceso de forja, están estrechamente relacionados y operan simultáneamente.
- El cálculo del porcentaje de reducción final obtenido, permite tener un conocimiento previo de las dimensiones del tocho del material a forjar, para obtener las especificaciones de la pieza requerida y así evitar el desperdicio de material y por tanto ahorro en los costos de producción.

- La distancia entre el tocho de acero y el mazo, determina la velocidad con la que cae el mazo, a mayor distancia mayor será la velocidad adquirida por el mismo, y por tanto mayor será la fuerza aplicada para deformar el acero.
- La disminución del contenido de carbono en los aceros a altas temperaturas, influye en el aumento de la resistencia a la fluencia de este material. Si por el contrario se incrementa el contenido de carbono, disminuye el endurecimiento por deformación y por lo tanto los aceros tienden a ser más dúctiles.
- El porcentaje reducción por cada pasada (%RA), disminuye a medida que avanza el proceso de conformado, por efectos del endurecimiento por deformación que alcanza y puede sobrepasar los efectos de la restauración dinámica, lo cual influye en la disminución la deformación en los aceros.
- El programa diseñado permite tener una referencia previa del efecto de la combinación de los parámetros del proceso en las características finales del producto, permitiendo reducir los tiempos de puesta a punto del proceso productivo.

CAPÍTULO 7

Recomendaciones

- Para hacer la corrida del programa diseñado a cualquier un proceso de forja, se debe tener un conocimiento previo tanto de los modelos matemáticos usados, como del manejo básico de programación, para evitar un mal uso o interpretación de los resultados arrojados por el programa.
- Para determinar el comportamiento de cualquier material y condiciones de proceso, se requiere del conocimiento previo de las características del material, sin embargo esto representa un estudio profundo enfocado solo a la obtención de las constantes del material, sobretodo si se considera que el comportamiento mecánico del acero en caliente está influenciado por procesos de endurecimiento por deformación, recuperación y recristalización dinámica. Por tanto, se recomienda que este sea un tema para futuros trabajos de investigación, a fin de que se hagan aportes adicionales en esta área al proceso industrial.
- El comportamiento del acero a elevadas temperaturas, considerando los efectos de endurecimiento por deformación, recuperación y

recristalización dinámica deberían ser incorporados al contenido de las asignaturas relativas a procesos de conformado, a fin de aportar un conocimiento más profundo sobre los diferentes mecanismos que intervienen cuando estos son tratados a altas temperaturas y como influyen en el proceso de conformado.

Glosario de términos

- **Ablandamiento mecánico:** Es el mecanismo que se pone en marcha durante el proceso de deformación plástica, entonces se producen ciertos fenómenos asociados a la modificación de la estructura metalográfica y el crecimiento de nuevos grano.
- **Deformación:** Es la variación en la geometría y dimensiones que sufre un material, al ser aplicada sobre el una fuerza mayor a la que resiste el material.
- **Dislocaciones:** Es un defecto de línea, en sólidos cristalinos que dan lugar a una distorsión en la red centrada en torno a una línea y pueden formarse por deformación plástica del sólido cristalino.
- **Endurecimiento por deformación:** Este término se refiere a que el material se torna más resistente a medida de el esfuerzo aumenta.
- **Esfuerzo de fluencia:** Es el esfuerzo que es aplicado al material que excede la resistencia a la fluencia del mismo a fin de alterar su forma.
- **Forjado:** Es un proceso de deformación en el cual se comprime el material de trabajo entre dos dados, usando impacto ó presión gradual para forjar la pieza.

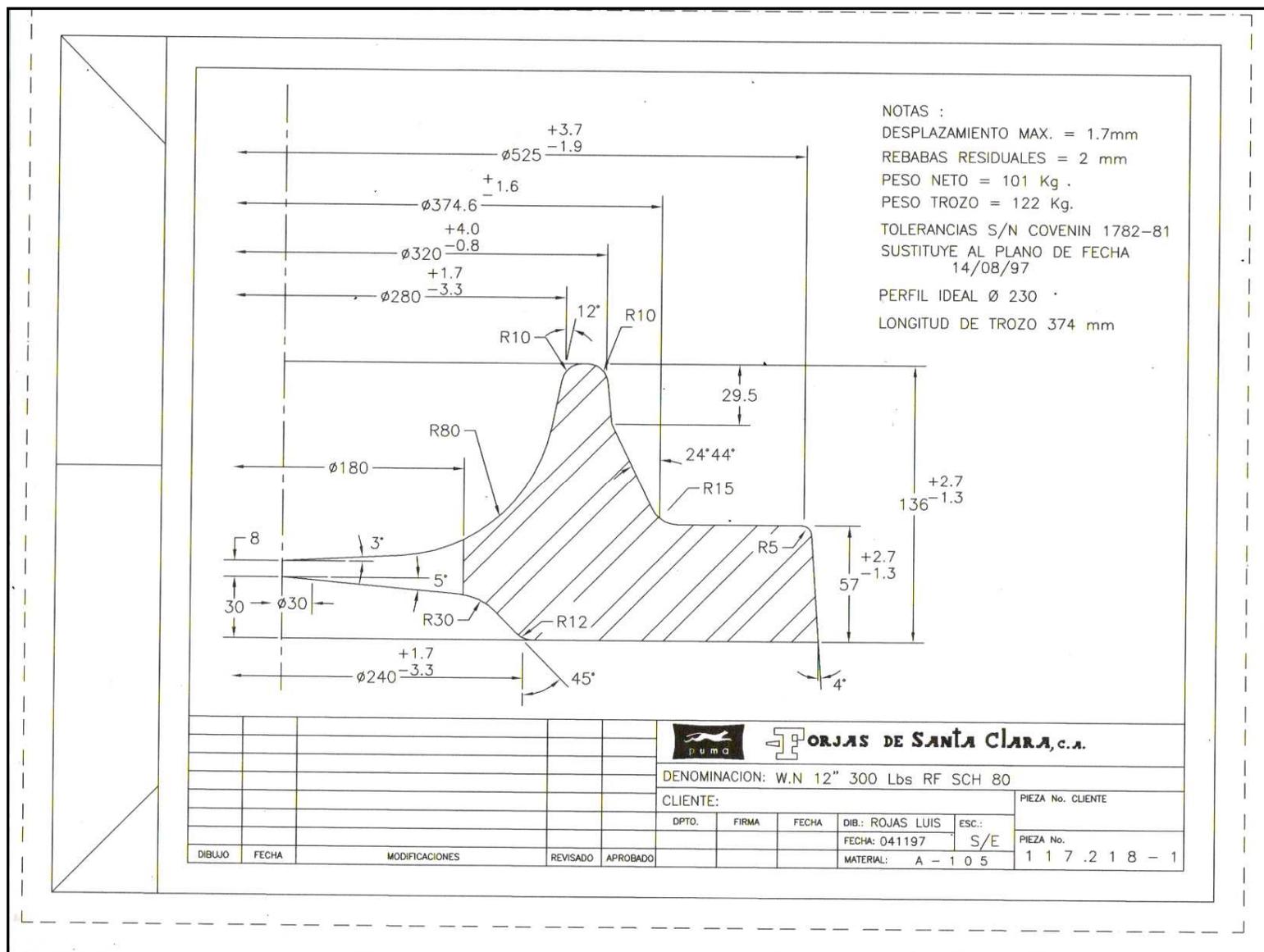
- **Grano:** Es un cuerpo esférico que caracteriza la estructura policristalina de un material
- **Recristalización dinámica:** Es un término asociado a la formación de nuevos granos libre de deformación y es un fenómeno que depende de la temperatura y del tiempo.
- **Restauración dinámica:** Es un mecanismo de deformación que esta asociado a la ausencia de recristalización dinámica, entonces se produce una caída de tensión en las curvas de fluencia del material.
- **Trabajo en caliente:** Es el formado de metales que se realiza por encima de la temperatura de recristalización
- **Tocho:** Trozo de material que es usado para ser deformado en los procesos de conformado, y al cual se le varía la geometría y dimensiones para la obtención de piezas.

Referencias Bibliográficas

- Al Omar, A. y Prado, M. (2001). Características del conformado en caliente de un acero de alta resistencia. **Universidad Politécnica de Cataluña**. España
- Bakkali F. Hassani El., Chenaoui A., Dkiouak R., Elbakkali, Al Omar L, A., (2008). Characterization of deformation stability of medium carbon microalloyed steel during hot forging using phenomenological and continuum criteria. **Journal of materials processing technology**. Pág. 140–149. España
- Béjar L, Hernández C. y Mancilla J. (2001). Cálculo de la tensión de la fluencia en aceros deformados en caliente. **Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. Volumen. 21 No. 2**. Venezuela.
- Béjar L, Hernández C. y Mancilla J. (2001). Modelización de la curva de fluencia de aceros deformados en caliente. **Jornadas SAM 2000 CONAMET ASS. Pág 403-409**. México.
- Cabello S. (2008). **Nociones sobre Conformado de Metales**. Publicaciones de la Universidad de Carabobo. Venezuela.
- Cabrera J. M., Ponce J. y Prado J. M. (2003). Modeling thermomechanical processing of austenite. **Journal of Materials Processing Technology. Páginas 403–409**. España.
- Cabrera J.M., Al Omar, A., Jonas J.J. y Prado J.M. Modeling the flow behavior of a medium carbon microalloyed steel under hot working

conditions. **Metallurgical and Materials Transactions A. Volumen 28A Páginas. 2233-2243.** (España)

- Calvo J., Cabrera J. M. y Prado J. M. (2005). Ductilidad en caliente de un acero de medio carbono. **Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela. Volumen 20 No.1.** Venezuela.
- El Wahabi, Mohammed. (2003). Caracterización termomecánica de aceros inoxidables austeníticos. España
- Groover, M. (1997). **Fundamentos de Manufactura Modernos.** Editorial Prentice Hall.
- Kozlowski et al. (1992). "Simple constitutive equations for steel at elevated temperatures". **Metallurgical and Materials Transactions. Volumen 23A Páginas 903-918**
- Mielnic, Edward. (1991). **Metalworking Science and Engineering.** Editorial McGraw-Hill.
- Puchi-Cabrera E. S. (2002). Simple constitutive relationship for C -Mn steels deformed at elevated temperatures. **Maney for the Institute for Materials. Minerals and Mining.** Venezuela
- Stara M. H. y Cabrera J. M. (2003). **Aceros estructurales. Procedimiento, manufactura y propiedades.** España
- Wray, P.J (1982). "Effect of carbon content on the plastic flow of plain carbon steels at elevated temperatures **Metallurgical and Materials Transactions A. Volumen 13A Páginas 125-134**



Plano con las medidas final de la pieza después del forjado, de un proceso industrial