

10



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

SIMULACION DEL TRATAMIENTO TERMICO DE  
UNA CORONA DE MOLINO POR MEDIO DEL  
METODO DE ELEMENTO FINITO

288980

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO  
P R E S E N T A

PABLO RODRIGO OROZCO OROZCO



DIRECTORES DE TESIS :

ING. UBALDO EDUARDO MARQUEZ AMADOR  
Dr. MIGUEL MARTINEZ MADRID



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## AGRADEZCO

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO por permitirme realizar mis estudios profesionales en sus aulas.

A mis padres por apoyarme durante toda mi vida y mis estudios, por haberme motivado y amparado para seguir siempre adelante. Por ser, ambos un ejemplo para mí.

A Zoila Hernández por su apoyo, cariño y comprensión, por haberme impulsado siempre a seguir adelante durante toda mi carrera.

Al M.I. Alfonso por su apoyo para la realización de esta tesis.

Al Dr. Miguel Martínez y al Ing Ubaldo Márquez por su guía, consejos y apoyo para la elaboración del presente trabajo.

Al M.I. Raúl Lesso por su valiosa y desinteresada colaboración para la realización del proceso de modelación y simulación.

Al M.C. Carlos Poblano por su desinteresada colaboración y apoyo para la realización del presente trabajo. Por brindarme su amistad.

A todos mis hermanos por su apoyo.

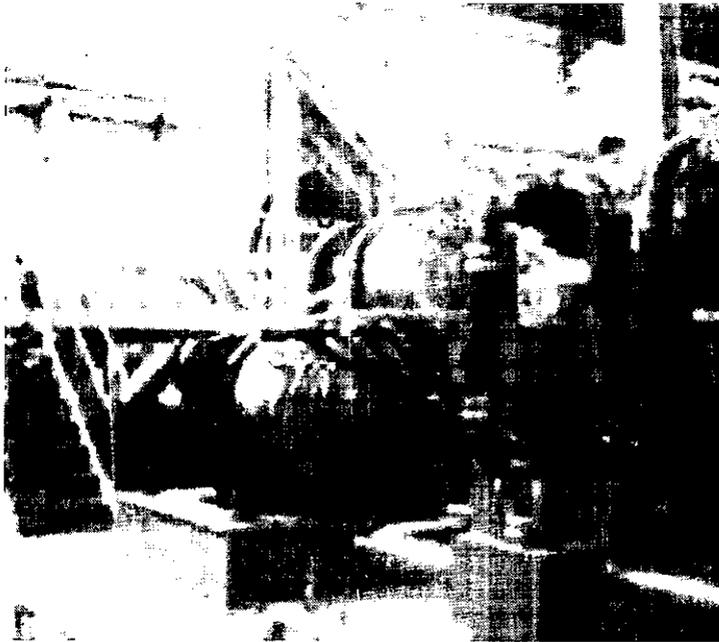
Y a todos aquellos que de una u otra manera colaboraron en la realización de la presente tesis.

## INDICE TEMATICO

CAPITULO 1. INTRODUCCION.	1
1.1- Descripción del problema	1
1.2- Alcances del trabajo	7
1.3- Descripción del trabajo	7
1.4- Objetivo	9
CAPITULO 2. MARCO TEORICO DE LOS TRATAMIENTOS TERMICOS.	10
2.1- Tratamientos térmicos	10
2.2- Procesos de transferencia de calor	20
2.3- Medios de temple	31
CAPITULO 3. ELEMENTO FINITO.	35
3.1- Método del elemento	35
3.2- Breve descripción del manejo del programa ANSYS	40
CAPITULO 4. SIMULACION.	51
4.1- Características del acero	51
4.2- Características de los fluidos de temple y revenido	52
4.3- Simulación por elemento finito	57
CAPITULO 5. RESULTADOS.	60
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.	68
BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS.	70

## Capítulo 1

### INTRODUCCION



#### 1.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA

En los ingenios es donde se lleva acabo la molienda de la caña para la elaboración del azúcar. Un ingenio consta básicamente de una serie molinos montados en unos rodillos, con los cuales se lleva a cabo la extracción de la sabia de la caña triturándola. Estos rodillos son impulsados por su motor.

La potencia del motor es transmitida por medio de una flecha acoplada a éste, y es transmitida a los rodillos por medio de unos engranes de dimensiones considerables llamados "coronas".

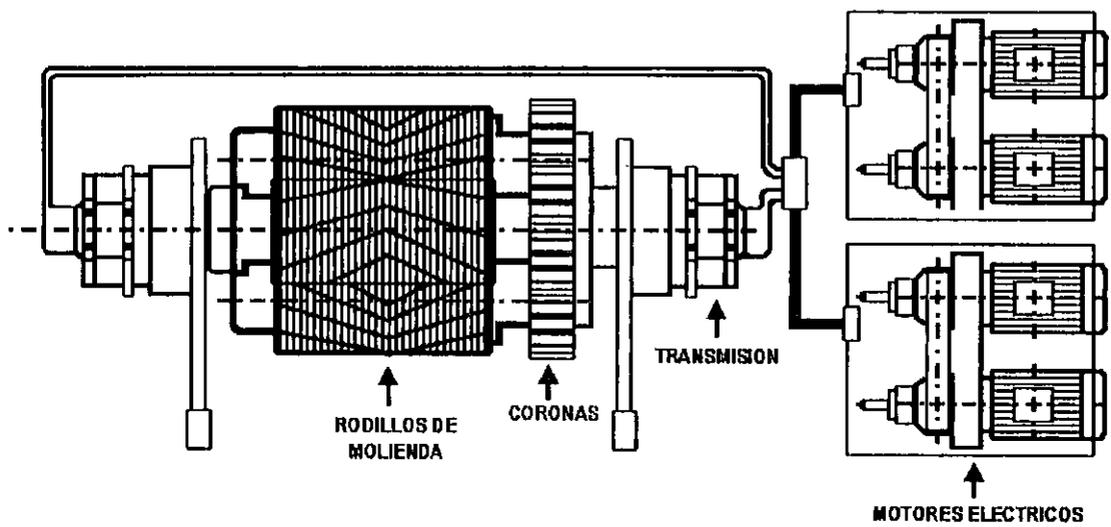


Fig. 1 Esquema de un Ingenio Azucarero impulsado por motores eléctricos.

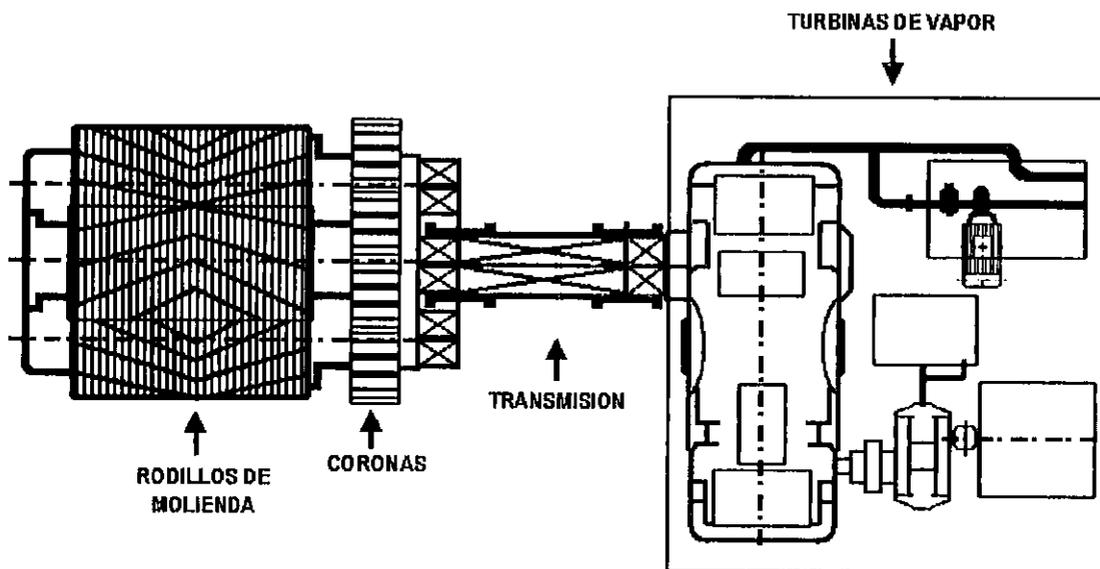


Fig. 2 Esquema de un Ingenio Azucarero impulsado por turbinas de vapor.

Las coronas utilizadas para transmitir la potencia de la flecha de transmisión, a los rodillos de molienda en algunos de los ingenios de la Industria Azucarera Mexicana

presentan las siguientes características:

Diámetro  $\approx$  1.5 m

Sección de trabajo de los dientes  $\approx$  0.5 m

Peso total  $\approx$  2600 Kg.

Velocidad de rotación: 6-8 R.P.M.

Potencia promedio transmitida: 400 – 800 HP

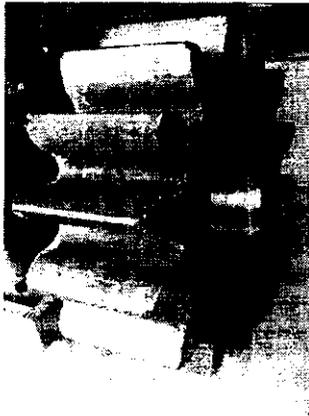


Fig. 3 Coronas de molino sin maquinado.

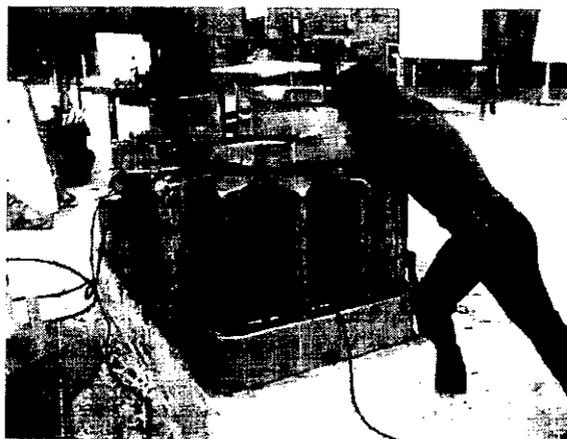


Fig. 4 Maquinado a las dimensiones finales.

Los esfuerzos operacionales a los que están sujetas las coronas durante su operación, no son homogéncos, ni tampoco bien distribuidos, debido a que la caña se

introduce a los molinos sin ser limpiada y contiene toda clase de objetos ajenos, provocando con esto que los rodillos de molienda trabajen de una forma no homogénea y que a su vez existan cargas desiguales en la transmisión. Debido a este tipo de cargas al que se sujetan, los dientes de estas, trabajan bajo condiciones de esfuerzos extremos de contacto, con una alta fricción entre dientes, que provocan que los mismos se fracturen con frecuencia. Por tal motivo en un proyecto conjunto entre la UNAM y el CIATEQ\*, se llevó a cabo un estudio para encontrar un material que presentara las características necesarias para resistir con mayor éxito las condiciones de trabajo, que el acero utilizado hasta ese momento (acero AISI 1045).

Debido a que los aceros con mas del 0.3% de carbono son proclives a fallar por agrietamiento en caliente durante su proceso de solidificación, su tenacidad final se ve seriamente disminuida y el funcionamiento de la corona se ve comprometido. Esto debido a que el carbono, a elevadas concentraciones, es responsable de propiciar la ocurrencia de un fenómeno conocido como segregación, que no es más que la concentración o presencia localizada de una especie química en el baño metálico (y en consecuencia en el sólido). Debido a que durante el enfriamiento se tienen gradientes de concentración de líquido y sólido en la pieza, se tienen también por tanto gradientes de concentración de carbono o de carburos (cementita) lo cual tiene como consecuencia un fenómeno de segregación.

Un cambio de estado, en este caso de líquido a sólido genera cambios en el volumen (contracciones) y por tanto genera esfuerzos, los cuales al encontrar una zona rica en carburos o carbono, con propiedades de resistencia muy limitadas, genera la presencia de grietas nocivas para la pieza. Este fenómeno se da de forma más marcada en piezas de gran tamaño (como lo sería este caso) ya que los cambios dimensionales son importantes y la distribución de los aleantes y del carbono no siempre es homogénea en toda la pieza.

Hay que recordar, que la formación de martensita o la templabilidad de un acero, no solo depende del contenido de carbono (aunque sí es cierto que es el factor más importante al respecto), si no que también depende de otros factores como, la

---

\* CIATEQ: Centro de Investigación de alta Tecnología del Estado de Querétaro

presencia de algunos elementos de aleación, la sección de pieza, volumen, etc. En este caso se sustituye el efecto del carbono por el del boro, el cual es un elemento que favorece en gran medida la templabilidad de los aceros y así, disminuimos el contenido de carbono que es nocivo para el caso de estas piezas (por ser de dimensiones considerables). Por tanto se busco una aleación con un contenido de carbono menor al 0.3%.

Como estas coronas comúnmente fallan en la raíz de los dientes debido a una resistencia al desgaste insuficiente y poca tenacidad, produciendo fallas catastróficas, provocando que las coronas se sustituyeran por completo.

Por todo lo anterior, el citado estudio concluyó que se necesitaba de una aleación ferrosa que presentara las siguientes características:

1. - Al momento de colar la pieza no presentara agrietamiento en caliente.
2. - Que alcanzara una dureza inicial, después del temple, de 250 BHN.
3. - Que fuese lo suficientemente tenaz para resistir los grandes impactos que se generan en los rodillos de molienda, y los esfuerzos normales de corte.
4. - Que fuese endurecible por deformación hasta alcanzar valores de 450 – 550 BHN.
5. - Que fuese posible su reparación y que contara con un buen acabado superficial.

Con las características anteriores se busco utilizar una serie de aleaciones de acero base AISI 86XX, con 0.2% y 0.3%C, y se le agregó B, Ti, Ni y V como aleantes en diferentes proporciones. Después se realizaron todas las pruebas necesarias, como dureza, resistencia a la tracción, resistencia a la compresión, fatiga, etc. Basándose en estos resultados se llegó a determinar la utilización de aceros AISI 8620 y 8630, debido a que con el tratamiento térmico adecuado pueden incrementar su dureza hasta valores cercanos a los 340 BHN con una resistencia a la tracción de 1000 MPa y un limite elástico de 860 Mpa <sup>(5)</sup>. Este estudio concluyó con la recomendación y aceptación del acero AISI 8620, modificado con B, Ti y Ni, endurecible por deformación.

Se le agregó boro debido a que este elemento minimiza la formación de grietas en caliente al sustituir al carbono, durante el momento de solidificación, además de

incrementar de forma importante, el endurecimiento y la templabilidad sin sacrificar ductilidad o maquinabilidad de los aceros en condiciones de recocido.

El titanio se le adicionó para afinar el tamaño de grano y favorecer el endurecimiento del acero y actuar como desoxidante.

El níquel se le agregó debido a que favorece la extensión de la región plástica del acero y así su endurecimiento por deformación, incrementa la templabilidad.

El vanadio en pequeñas cantidades actúa como desoxidante e inhibe el crecimiento de grano durante el tratamiento térmico, además de dar templabilidad y dureza, pero en este caso se observó que las propiedades no mejoraban notablemente, y que la presencia del titanio era suficiente para refinar el tamaño de grano.

Después de realizadas las pruebas a todas estas aleaciones, los resultados arrojados por estas, llevaron a la conclusión de que el acero que cumplía mejor con las características deseadas era el AISI 8620 modificado con B, Ti y Ni.

Una vez elegida la mejor aleación para la fabricación de estas coronas, entonces se buscó optimizar el proceso de manufactura de las mismas, debido a que durante el proceso de colada fue detectada la presencia de oquedades (grietas) en las zonas últimas de solidificación, las cuales crecieron al efectuar el maquinado final. Se piensa que el crecimiento de dichas oquedades se debió principalmente a esfuerzos residuales, producidos durante el proceso de tratamiento térmico de temple mal realizado, además, se sospechó de una posible fragilización producto del revenido.

Con el propósito de eliminar la posible fragilización causada por el revenido, así como la presencia de los esfuerzos residuales debidos al temple, se replantearan dichos procesos:

Las coronas después de ser coladas fueron sometidas a un tratamiento térmico con el fin de incrementar y homogeneizar sus propiedades mecánicas. Dicho tratamiento constó de una austenitización a una temperatura de 900°C, posteriormente un templado

en aceite, y finalmente un revenido a 650°C. Con este tratamiento se logra habilitar las coronas ya coladas. Estas se encuentran funcionando en los molinos sin mayores contratiempos.

## 1.2 ALCANCES DEL TRABAJO

El análisis detallado del tratamiento térmico idóneo para las coronas y modelar con base en las conductividades térmicas (del acero y de los fluidos de temple y revenido), el proceso en su totalidad.

## 1.3 DESCRIPCION DEL TRABAJO

Este trabajo se desarrolla en 6 capítulos. En el primero “Introducción” se presenta una descripción del problema que motivo el presente trabajo, así como los alcances del mismo.

En el capítulo dos, “Marco teórico de los tratamientos térmicos”, se presenta un panorama general de los tratamientos actuales, medios de temple, principios de la transferencia de calor por convección y conducción.

En el capítulo tres, “Método de elemento finito” se esbozan los principios del método de elemento finito como herramienta de análisis.

En el capítulo cuatro, “Simulación del tratamiento térmico por elemento finito”, se presentan los datos del material así como los del medio de temple, y se presenta la simulación por medio del método de elemento finito, obteniéndose los perfiles de temperatura, así como el tiempo requerido para que dichos procesos se lleven a cabo de manera adecuada.

En el capítulo cinco, "Resultados", se presentarán los resultados que se obtuvieron de la modelación por el método de elemento finito, así como las gráficas e imágenes respectivas, del comportamiento de la pieza, durante la simulación de los procesos.

En el capítulo seis, "Conclusiones", se exponen los comentarios finales a los que se han llegado después de analizar los resultados de las simulaciones, especificando las características que deberán tener los procesos reales para que estos sean los óptimos.

Por último se mencionan las "Referencias y Bibliografía" consultada para la realización de este trabajo.

## 1.4 OBJETIVO

Modelar el proceso de transferencia de calor en una corona de molino durante los tratamientos térmicos de temple y revenido, por medio del método del elemento finito, para optimizar el proceso, tomando en cuenta las dimensiones masivas de las piezas en estudio. Obteniéndose el tiempo de austenización, de temple y revenido respectivamente, y los perfiles de temperatura correspondientes.

## Capítulo 2

### MARCO TEORICO DE LOS TRATAMIENTOS TERMICOS

#### 2.1 TRATAMIENTOS TERMICOS

El tratamiento térmico es una operación, o combinación de operaciones, que involucran el calentamiento y enfriamiento de metales y aleaciones en estado sólido en intervalos de tiempo determinado, con el propósito de modificar sus propiedades mecánicas originales.

El ciclo de un tratamiento térmico consiste de tres fases que son:

1. - Calentamiento de la pieza a una temperatura conveniente.
2. - Mantener la pieza a la temperatura apropiada por el tiempo requerido.
3. - Enfriar a la velocidad adecuada.

Como se muestra en la figura 5

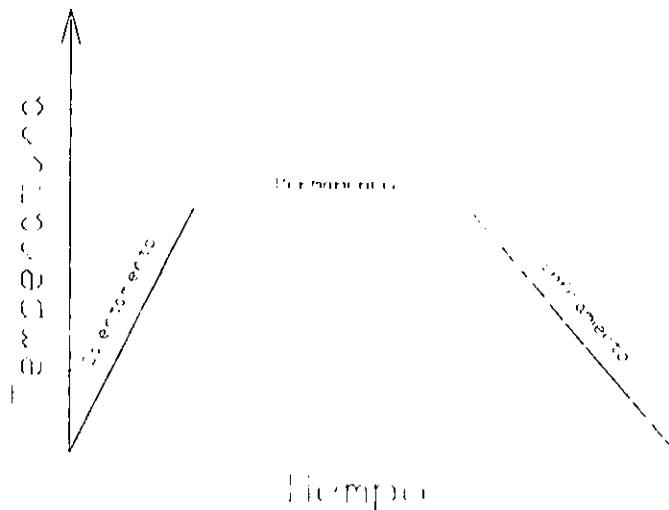


Fig. 5 Representación gráfica de un ciclo de tratamiento térmico.

Aunque, este proceso puede realizarse en varias etapas, como se muestra en la figura 6.

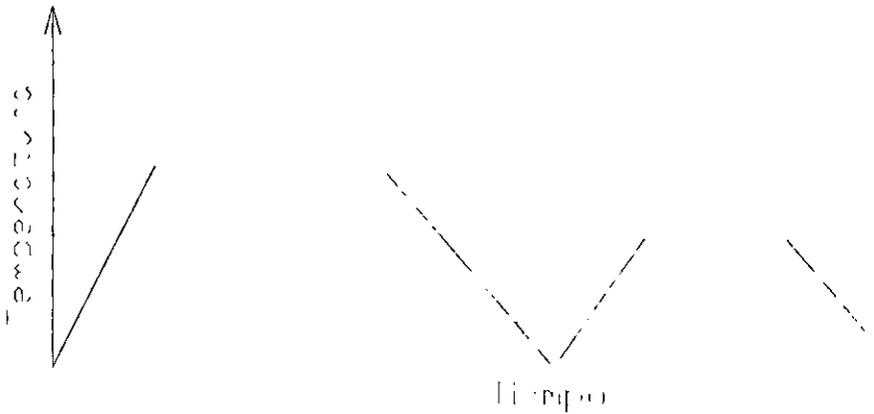


Fig. 6 Proceso de tratamiento térmico en dos ciclos.

Por razones de economía y tiempo es deseable que el proceso de calentamiento sea lo más rápido posible, pero en términos reales, si el proceso es llevado a cabo demasiado rápido el material sufre de una dilatación descontrolada, debido a que en piezas de gran tamaño pueden encontrarse gradientes de temperatura demasiado elevados provocando una distorsión en el material, debido a las diferencias de temperatura entre la superficie y el centro de la pieza, dando por resultado que la pieza pueda fracturarse.

El tiempo de permanencia a la temperatura apropiada, es una parte muy importante en el proceso de tratamiento térmico, pues es en esta etapa donde se determina el tipo de estructura (tamaño de grano, transformación de fase, etc.) que se producirá en toda la pieza. Determina también que los cambios de fase sean completos o incompletos.

En la etapa del enfriamiento se necesita de un control del tiempo y de la temperatura, porque este proceso genera la estructura final del material. Un enfriamiento muy lento quizá es esencial para obtener un estado cercano al equilibrio.

Un enfriamiento más rápido produce estructuras meta-estables. Un enfriamiento muy rápido puede ser usado para retener fases que se tienen presentes a altas temperaturas, a la temperatura ambiente, o precipitar otras nuevas muy inestables.

Entre los tratamientos térmicos que con mayor frecuencia se emplean se encuentran:

1. - Recocido
2. - Normalizado
3. - Temple
4. – Temple y revenido
5. – Austempering
6. – Martempering
7. - Tratamientos térmicos superficiales.

En el presente trabajo se describen los tratamientos térmicos inherentes a los aceros, para los cuales resulta conveniente conocer su diagrama de equilibrio.

### BREVE DESCRIPCION DEL DIAGRAMA Fe-Fe<sub>3</sub>C

El diagrama hierro-carburo de hierro, muestra la porción de interés del sistema de aleación hierro-carbono. Esta es la parte entre hierro puro y un compuesto intersticial, llamado carburo de hierro (Fe<sub>3</sub>C), el cual contiene hasta 6.67% de carbono en peso.

Este no es en realidad un verdadero diagrama de equilibrio, debido a que equilibrio implica que haya cambio de fase en un tiempo de enfriamiento infinitamente lento; pero debido a que es un hecho que el compuesto carburo de hierro se descompone en hierro y carbono (grafito), lo cual toma un tiempo muy prolongado a temperatura ambiente, y aun por arriba de los 700°C tarda varios años formar el grafito, el diagrama Fe – Fe<sub>3</sub>C es considerado un diagrama meta-estable.

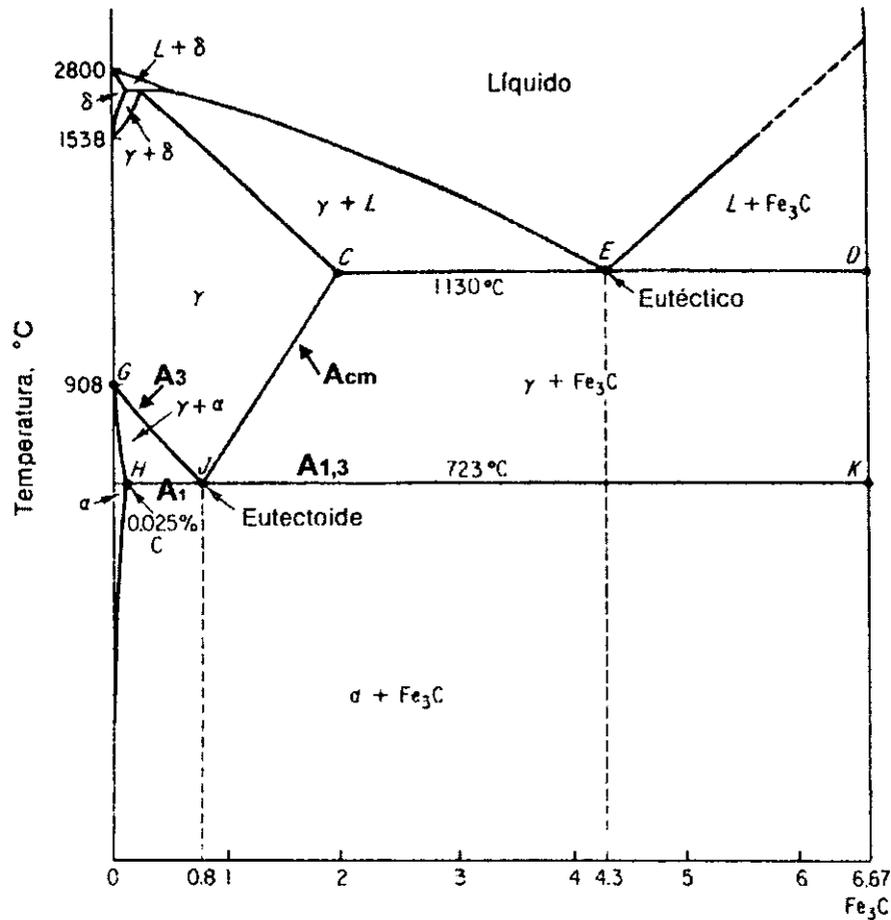


Fig. 7 Diagrama Hierro - Carburo de hierro.

El diagrama está constituido de tres líneas horizontales las cuales indican las reacciones isotérmicas, las otras líneas indican solubilidad del  $Fe_3C$  en la fase respectiva. Las letras griegas representan las soluciones sólidas. Es común que se les den nombres especiales a la mayoría de las estructuras que aparecen en el diagrama.

Estructuras presentes en el diagrama son:

**Martensita:**

Es una solución sólida intersticial sobresaturada de carbono en hierro, con una red tetragonal centrada en el cuerpo. Su microestructura se caracteriza por presentar una forma de aguja. Presenta una dureza de 50 a 68 HRc.

**Cementita o carburo de hierro ( $Fe_3C$ ):**

Contiene 6.67% de C por peso. Es un compuesto

intermetálico duro y frágil de baja resistencia a la tracción, pero de alta resistencia compresiva. Es la estructura más dura presente en el diagrama, y su estructura cristalina es ortorrómbica. Presenta una dureza superior a 68 HRC.

#### Austenita:

Es el nombre dado a la solución sólida ( $\gamma$ ). Es una solución sólida intersticial de carbono disuelto en hierro con una estructura cristalográfica del tipo cúbica centrada en las caras (fcc). La máxima solubilidad es del 2% de C a 1130°C. No es magnética y es la más dúctil de todas al presentar muchos planos de deslizamiento. Presenta una dureza de aproximadamente 40 HRC.

#### Ledeburita:

Es la mezcla eutéctica de austenita y cementita; contiene 4.3% de C y se forma a 1130°C y es la reacción eutéctica del diagrama.

#### Ferrita:

Es el nombre dado a la solución sólida ( $\alpha$ ). Es una solución sólida que contiene una pequeña cantidad de carbono disuelto en hierro cúbica centrada en el cuerpo (bcc). La máxima solubilidad es de 0.025% de C a 723°C, y disuelve solo 0.008% de C a temperatura ambiente. Es la estructura más suave a temperatura ambiente que se tiene en el diagrama. Presenta una dureza menor a 90 HR<sub>B</sub>.

#### Perlita:

Es la mezcla eutectoide que contiene 0.8% de C y se forma a 723°C. Es una mezcla muy fina, tipo placa de ferrita y cementita. La base o matriz ferrítica blanca contiene delgadas placas de cementita. Presenta una dureza de entre 90 a 100 HR<sub>B</sub>.

#### Bainita:

Es una mezcla de ferrita y carburo de hierro. Esta transformación requiere de difusión del carbono y de tiempo, es por esto, que esta fase se parece más a la perlita que a la martensita, pero cuanto más baja es la temperatura, más tiempo de incubación necesita. Por esto no es un estado de equilibrio, sino que evoluciona hacia una perlita globular, presenta una dureza de 40 a 60 HRC.

## AUSTENITIZADO

Es el primer paso en el tratamiento que consiste en calentar al material a una temperatura en la que se forme la fase austenítica, la cual disuelve la máxima cantidad de carbono. Este proceso no es en sí mismo un tratamiento térmico, pero está presente en la mayoría de ellos.

Esta temperatura se encuentra aproximadamente  $50^{\circ}\text{C}$  por arriba de la temperatura crítica superior ( $A_3$  para aceros hipoeutectoides y entre las líneas  $A_{cm}$  para los hipereutectoides) Si esta temperatura excede este límite, es factible que se presente crecimiento de grano excesivo.

El tiempo exacto de permanencia a la temperatura de austenización dependerá de la composición del acero, y del volumen (sección) a tratar.

## RECOCIDO

Este proceso consiste en calentar el acero a la temperatura de austenizado y luego enfriar lentamente a lo largo del intervalo de transformación, esto es realizado de preferencia dentro del horno. En esta etapa el gradiente de enfriamiento es lo suficientemente lento para que se lleven a cabo los cambios de fase cercanas al equilibrio.

El recocido tiene como propósitos:

1. - Homogeneizar la composición química
2. - Ajustar el tamaño de grano
3. - Proporcionar ablandamiento
4. - Mejorar las propiedades eléctricas y magnéticas
5. - Alterar la maquinabilidad
6. - Eliminar esfuerzos

## NORMALIZADO

Es el proceso que se lleva a cabo al calentar aproximadamente  $38^{\circ}\text{C}$  arriba de la temperatura crítica superior (región austenítica, por arriba de las líneas  $A_3$  y  $A_{cm}$ ) seguido de un enfriamiento con aire hasta la temperatura ambiente.

La velocidad exacta de enfriamiento depende del tamaño de la pieza a enfriar, del número de piezas en la carga del horno y de la circulación del aire alrededor de las mismas. Los aceros normalizados tienen una resistencia mecánica más elevada que los aceros recocidos y una ductilidad ligeramente inferior.

## TRANSFORMACIONES ISOTÉRMICAS

La transformación de la austenita, a temperaturas constantes, fue estudiada por primera vez en 1930 por Bain y Davenport<sup>6</sup>. Los resultados correspondientes se recogen en forma de diagrama. Estos diagramas se conocen como diagramas T-I (transformación isotérmica). También se les llama curvas TTT (transformación, temperatura, tiempo) o curvas S.

La microestructura y las propiedades de un acero tratado térmicamente, dependen de la rapidez de enfriamiento que prevalece durante la operación. Esta relación entre estructura y rapidez de enfriamiento puede ser estudiada para un acero dado con la ayuda de dichas curvas de transformación isotérmica. Estas curvas indican el tiempo necesario para que se lleve a cabo una transformación y la estructura que se producirá cuando se sobre enfría la austenita a cualquier temperatura predeterminada.

Los elementos aleantes presentes en el acero retardan la transformación isotérmica de la austenita. Esto es las curvas T-I se desplazan hacia la derecha.

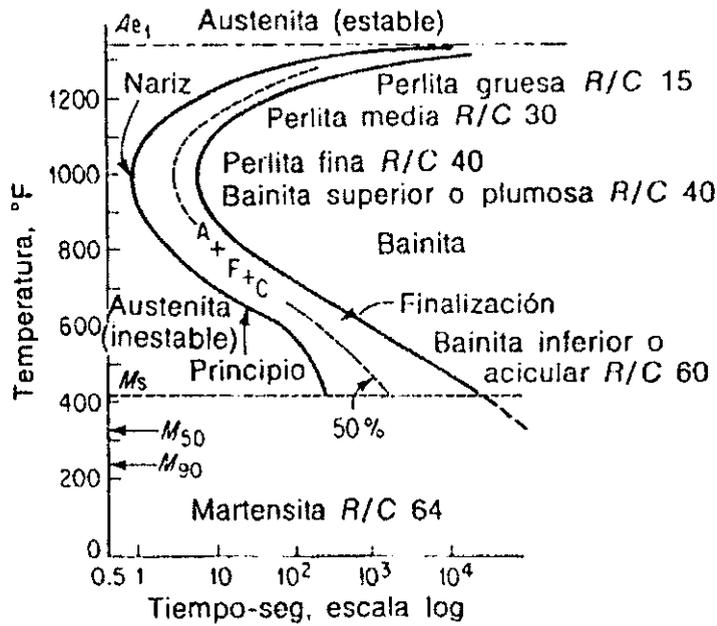


Fig. 8 Diagrama TTT.

### TEMPLE

Es el resultado de calentar los aceros a la temperatura de austenitización para posteriormente enfriar tan rápido como sea posible sin llegar a tocar la nariz de la curva del diagrama TTT para cada uno de los aceros (figura 8), y así obtener la transformación de la austenita en martensita. Ya que la martensita revenida posee, generalmente, las mejores resistencias mecánicas de todas las microestructuras del acero.

### REVENIDO

Una vez realizado el tratamiento térmico de temple, la pieza ha adquirido una condición martensítica que muestra una alta fragilidad en el material, lo que implica que tenemos grandes tensiones residuales para la mayoría de los aceros. Por lo tanto, al proceso de endurecimiento casi siempre le sigue un tratamiento de revenido, el cual consiste en calentar el acero a una temperatura menor a la crítica inferior.

El propósito del tratamiento de revenido es:

1. - Liberar a la pieza de los esfuerzos residuales
2. - Mejorar la ductilidad
3. - Mejorar la tenacidad

Por lo tanto se puede decir que en general, con el proceso de revenido, la tenacidad aumenta y la dureza disminuye conforme se incrementa la temperatura de revenido.

Como al revenir se aplica energía, el carbono se precipita como carburo de hierro y la microestructura tendera a ser más estable.

Volviendo al tratamiento térmico de temple podemos ver que, en velocidades de enfriamiento lentas, los átomos de carbono pueden difundirse hacia el exterior de la estructura de austenita. Esta transformación tiene lugar mediante un proceso de nucleación y crecimiento, el cual depende del tiempo. Con un aumento adicional en la velocidad de enfriamiento, no hay tiempo suficiente para que el carbono se difunda en la solución, y aunque tiene lugar algún movimiento de los átomos de hierro. La estructura no puede llegar a ser (bcc) cubico centrado en el cuerpo, ya que el carbono esta atrapado en la solución. La estructura que resulta se le llama martensita, esta es una solución sólida sobresaturada de carbono atrapado en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo.

Existen diversas características importantes de la transformación de la martensita.

1. - La transformación es sin difusión y no existe cambio alguno en la composición química.
2. - La transformación se lleva acabo solo durante el proceso de enfriamiento y cesa si dicho proceso se ve interrumpido, por lo que, la transformación no es dependiente del tiempo. La temperatura del inicio de transformación de martensita se conoce como

temperatura  $M_s$ , siendo esta la temperatura a la cual da comienzo la transformación a martensita, como esta transformación depende de la composición del acero y no de la velocidad de enfriamiento, esta temperatura se puede calcular a través del siguiente modelo:

$$M_s = 500 - 300(\%C) - 40(\%Mn) - 35(\%V) - 20(\%Cr) - 17(\%Ni) - 10(\%Cu) - 10(\%Mo) - 5(\%W) + 15(\%Co) + 30(\%Al) \text{ } ^\circ\text{C}$$

y la temperatura del final de formación se conoce como  $M_f$ .

3. - La transformación de martensita de una aleación dada no puede eliminarse, ni la temperatura  $M_s$  puede ser modificada al variar la rapidez de enfriamiento.

4. - La propiedad más significativa de la martensita es su potencial de dureza, el cual es muy grande (Puede alcanzar valores superiores a 65HRC).

Es de destacarse que la transformación martensítica no es exclusiva para los aceros, y que también se da en sistemas de aleación como: cobre-zinc, hierro-níquel y cobre-aluminio.

El propósito principal del endurecimiento es producir una estructura totalmente martensítica.

A la mínima rapidez de enfriamiento la cual evitara que se formen productos más suaves de transformación, se le conoce como rapidez crítica de enfriamiento.

Cabe mencionar que el tratamiento térmico de temple normalmente es acompañado de un tratamiento denominado revenido, el cual tiene la función de promover la difusión del carbono retenido en la red y así aliviar las tensiones resultantes del temple. El resultado neto del revenido es una disminución controlada de la dureza de la aleación tratada con su consecuente incremento en la tenacidad. Mas adelante se detalla el revenido como un tratamiento térmico.

## 2.2 PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

### MECANISMOS DE ELIMINACION DE CALOR DURANTE EL TEMPLE

Las características resultantes de un material como: la dureza, resistencia y estructura, después de un proceso de tratamiento térmico, son determinadas por la rapidez de enfriamiento real obtenida durante el proceso de temple. A mayor diferencia entre las dos velocidades de enfriamiento (real y teórica) los productos de transformación serán más blandos y la dureza menor.

En una curva de enfriamiento se distinguen tres etapas que son:

#### 1. - Enfriamiento por medio de una capa de vapor:

En esta primera etapa, la temperatura de la pieza es tan alta que el medio de temple se vaporiza en las zonas cercanas a la superficie de la pieza, formando una película de vapor que rodea a la pieza caliente. Dado que el vapor (o estado gaseoso del medio de temple) tiene un bajo coeficiente de transferencia de calor, la velocidad de enfriamiento es más lenta.

#### 2. - Enfriamiento por transporte de vapor:

Esta es cuando la temperatura de la pieza ha disminuido, y ha obtenido una temperatura tal que la película de vapor ya no es estable, y la transferencia de calor por convección (libre o natural) es mayor, siendo eliminado el calor de la pieza muy rápidamente como calor latente de vaporización.

Calor latente de vaporización:

Representa la cantidad de energía necesaria para vaporizar una masa unitaria.

### 3. - Enfriamiento por medio de líquido:

Esta comienza cuando la temperatura superficial de la pieza alcanza el punto de ebullición del líquido de temple. La velocidad de enfriamiento durante esta etapa se vuelve más lenta.

Los proceso de transferencia de calor entre un medio sólido y un fluido es por medio de convección.

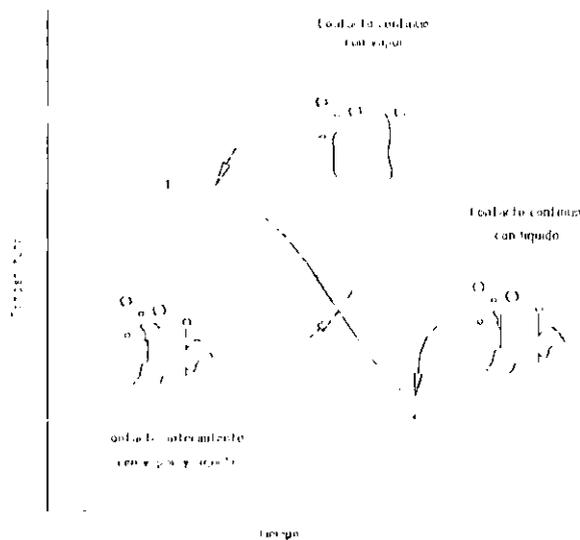


Fig. 9 Etapas en el enfriamiento de una pieza de acero en contacto con medio refrigerante.

### Convección:

La convección es un proceso de transporte de energía térmica por la acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento de mezcla. La convección tiene gran importancia como mecanismo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un fluido.

La transferencia de energía por convección, desde una superficie cuya temperatura es superior a la del fluido que lo rodea, se realiza en varias etapas.

Primero, el calor fluye por conducción desde la superficie hacia las partículas colindantes del fluido. La energía así transferida servirá para incrementar la temperatura y la energía interna de dichas partículas, estas se desplazarán hacia una región con temperatura menor, donde se mezclarán y transferirán en parte su energía a otras partículas del fluido. Por lo que el flujo es de fluido y de energía, en realidad la energía es almacenada en las partículas de fluido y transportada como resultado del movimiento de masa.

La transferencia de calor por convección se clasifica, de acuerdo con la forma de inducir el flujo, en convección libre y convección forzada. Cuando el movimiento del mezclado tiene lugar exclusivamente como resultado de la diferencia de densidades causado por los gradientes de temperatura, se le llama convección natural o libre. Cuando el movimiento de mezclado es inducido por algún agente externo, como una bomba, un ventilador, etc., se le llama convección forzada.

La eficiencia de la transferencia de calor por convección depende básicamente del movimiento de mezclado del fluido, por lo que un estudio de transferencia de calor por convección se basa en el conocimiento de las características del fluido.

Cuando la rapidez del flujo de calor en un sistema no varía con el tiempo, la temperatura en cualquier punto no cambia y prevalecen condiciones de estado estable. Bajo condiciones de estado estable, la rapidez del flujo de calor en cualquier punto del sistema, debe ser igual con la que entra dicho flujo y no puede tener lugar ningún cambio de energía interna.

El flujo de calor en un sistema es transitorio o inestable, cuando las temperaturas de varios puntos del sistema cambian con el tiempo. Dado que un cambio en la temperatura indica un cambio de la energía interna, se concluye que una parte de la energía se almacena y la otra constituye un flujo de calor inestable.

Los procesos de flujo de calor en estado inestable, son más complejos que aquellos en estado estable, y con frecuencia pueden ser estudiados únicamente por métodos de aproximación. Los fenómenos de flujo de calor en estado inestable se

presentan durante los procesos de calentamiento de hornos, calderas y turbinas o en el tratamiento térmico y en la eliminación de esfuerzos de los metales.

La rapidez de transferencia de calor por convección entre una superficie de la pieza y un fluido, puede ser calculada por la relación:

$$q_c = h_c A \Delta T'$$

$$\Delta T' = T_s - T_\infty$$

donde:

$q_c$  = flujo de calor convectivo

$A$  = área de transferencia de calor

$T_\infty$  = temperatura de corriente libre

$T_s$  = temperatura de superficie

$h_c$  = coeficiente convectivo promedio

Esta relación fue propuesta originalmente por Isaac Newton en 1701, y se ha utilizado por mucho tiempo, no obstante que es una definición de  $h_c$  mas que una ley del fenómeno de la convección. La evaluación del coeficiente convectivo es difícil, debido a que la convección es un fenómeno muy complejo.

El valor numérico de  $h_c$  en un sistema, depende de la geometría de la superficie y de las propiedades físicas del fluido así como de su velocidad, y de la diferencia de temperaturas.

Uno de los aspectos más importantes en el análisis hidrodinámico es establecer cuando el flujo es laminar o turbulento.

En el flujo laminar el fluido se mueve en capas y cada partícula de fluido sigue una trayectoria uniforme y continua, estas partículas de fluido conservan una secuencia

ordenada sin pasarse unas a otras.

En contraste al movimiento ordenado del flujo laminar en el flujo turbulento cualquier partícula individual de fluido presenta una trayectoria en zig zag.

Cuando un fluido fluye con movimiento laminar sobre una superficie que se encuentre a una temperatura diferente de la del fluido, el calor se transfiere únicamente por conducción molecular tanto dentro del fluido como en la cara intermedia entre el fluido y la superficie. No existen mezclas turbulentas que transporten, a través de las líneas de corriente, la energía almacenada en las partículas de fluido. El calor es transferido entre capas de fluido por movimiento molecular en una escala submicroscópica.

En el flujo turbulento, el mecanismo de conducción está modificado y ayudado por innumerables remolinos (o vórtices) que acarrear masas de fluido a través de las líneas de corriente. Estas partículas de fluido actúan como transportes de energía la cual transfieren al mezclarse con otras partículas del fluido, por lo que, un incremento en la rapidez de mezclado (o turbulencia) incrementa también la rapidez del flujo de calor por convección.

### Conducción:

Es un proceso mediante el cual fluye el calor desde una región de alta temperatura a una región de baja temperatura dentro de un medio (sólido, líquido o gaseoso) o entre medios diferentes en un contacto físico directo. La energía se transmite por comunicación molecular directa sin desplazamiento apreciable de las moléculas. Cuando las moléculas de una región adquieren una energía cinética media, mayor que las de las moléculas de una región adyacente, lo que se manifiesta por una diferencia de temperaturas, las moléculas que poseen mayor energía transmitirán parte de ella a las moléculas de la región que se encuentra a menor temperatura.

La transferencia de energía podría realizarse por choque elástico (en fluidos) o por difusión de los electrones rápidos desde la región de alta temperatura a la región de

baja temperatura (en los metales, en este caso la corona). El efecto observable de la conducción del calor es un equilibrio de temperaturas. Sin embargo, si las diferencias de temperaturas se mantienen por la adición y remoción de calor en diferentes puntos, se establecerá un flujo continuo de calor de la región más caliente a la región fría.

La conducción es el único mecanismo por el cual puede fluir calor en sólidos opacos. La conducción es también un proceso importante en fluidos, pero en medios sólidos esta generalmente combinada con la convección, y en algunos casos con la radiación.

## AUSTEMPERING

(Austemplado)

Este es un proceso de tratamiento térmico desarrollado para obtener una estructura 100% bainítica, esto se logra calentando en primer lugar la pieza a la temperatura de austenitización propia del material, seguida de enfriamiento en un baño de sal, manteniendo el intervalo de bainita (250 - 350°C), con lo que el acero se transforma directamente de austenita a bainita sin pasar por el estado martensítico totalmente endurecido. El control de endurecimiento se obtiene mediante la selección cuidadosa de la temperatura de transformación de la bainita.

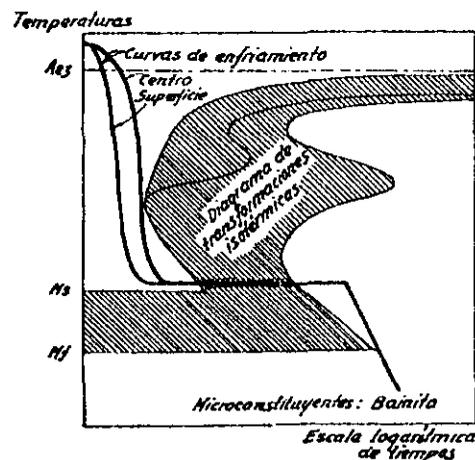


Fig. 10 Representación esquemática del austempering

## MARTEMPERING

(Martemplado)

En este procedimiento se austeniza el acero y seguidamente se temple en aceite caliente o en un baño de sales fundidas manteniendo por encima de la temperatura  $M_s$  del acero. El enfriamiento es más lento que en el temple normal, y, por lo tanto los gradientes de temperatura en el acero son menores. Se deja el acero en el baño caliente hasta igualar su temperatura, pero se retira antes del comienzo de la formación de la bainita. A medida que el acero se enfría con lentitud, normalmente al aire en reposo, la temperatura desciende por debajo de  $M_s$  y se forma gradualmente martensita, más o menos uniformemente, reduciéndose al mínimo, de este modo, las tensiones de transformación que son causa del agrietamiento. A continuación la martensita se reviene.

El resultado neto es que, al permitir que el centro tenga la misma temperatura que la superficie en el baño, evitamos un gradiente de temperatura pronunciado, entre la superficie y el centro de la pieza en el momento en que comienza a formarse la martensita. El centro y la superficie se hacen martensíticos al mismo tiempo, reduciendo así, al mínimo, la tendencia al agrietamiento por el enfriamiento. El éxito de este tratamiento se encuentra en el enfriamiento rápido del acero.

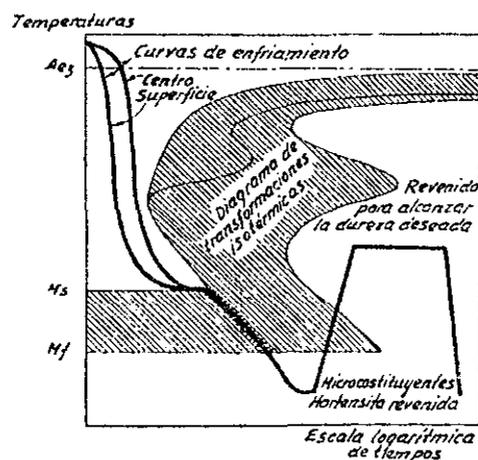


Fig. 11 Representación esquemática del martempering

## TRATAMIENTOS TERMOQUIMICOS

Los tratamientos termoquímicos más comúnmente usados son:

1. - Carburización
2. - Nitruración
3. - Cianuración o carbonitruración

### CARBURIZACION

Consiste en exponer a los aceros que contengan alrededor del 0.2% de carbono en una atmósfera rica en monóxido de carbono para que así a altas temperaturas, se lleve a cabo la siguiente reacción.



Donde  $\text{Fe}_{(\text{c})}$  se disuelve en la austenita formando una capa superficial de alto carbono y donde el centro presenta un bajo contenido de carbono. La ecuación puede ser reversible y, si el acero es calentado en una atmósfera que contenga  $\text{CO}_2$  entonces el material se descarburizará.

Este tratamiento se utiliza cuando se requiere que la pieza posea una superficie dura, resistente al desgaste y una masa tenaz, resistente al impacto.

El tratamiento térmico de carburización solo es aplicable a aceros de grano fino.

Este proceso se utiliza cuando es necesario que un componente de acero posea al mismo tiempo una superficie dura, resistente al desgaste y una masa tenaz resistente al impacto. Se aplica en acero de bajo carbono, que dan las propiedades adecuadas para el núcleo, después se realiza la carburización para endurecer la superficie, y así obtener una dureza mayor en esta.

## NITRURACION

Método aplicable a aceros aleados sobre una atmósfera constituida por una mezcla de gas amoníaco y amoníaco disociado.

El acero se nitrura con gas dentro del horno a temperaturas entre 510 a 565°C con una atmósfera comúnmente de amoníaco, que permea la superficie con nitrógeno. El proceso básico toma un tiempo prolongado. Es necesario un enfriamiento brusco ya que la capa formada en la superficie del material consta de nitruros metálicos inherentemente duros.

El nitrurado se realiza por debajo de la temperatura crítica sin detrimento de la resistencia. La capa es bastante dura (aproximadamente 70 HRC) y es notablemente resistente al desgaste, fatiga, y a la corrosión permaneciendo dura a temperaturas cercanas a los 450°C.

Sólo se aplica a aceros de aleación especial, ya que el endurecimiento depende de la formación de nitruros duros de metales, tales como: aluminio, cromo y vanadio en la superficie de la pieza.

Este proceso se lleva a cabo a temperaturas relativamente bajas, por lo que constituye la operación final en la manufactura de la pieza, habiendo sido realizados previamente, todo el maquinado y proceso de tratamiento del centro.

Las ventajas de este proceso son:

1. - Al no requerirse templado después del proceso de nitruración, se reduce la aparición de grietas o distorsiones, y las piezas pueden maquinarse por completo antes del tratamiento.
2. - Se pueden obtener durezas superficiales del orden de 70 HRC
3. - La resistencia a la corrosión es buena si la superficie se deja sin pulir
4. - Presentan buena resistencia a la fatiga
5. - La dureza se mantiene a temperaturas muy elevada (del orden de 500°C)

6. - El proceso es barato cuando se tratan un gran número de piezas.

## CIANURACION Y/O CARBONITRURACION

El cianuro forma sobre el acero una capa resistente al desgaste. Se realiza por inmersión en un baño de sales de cianuro fundido durante un tiempo, y después enfriando bruscamente. Una capa cianurada rara vez tiene un espesor de más de 0.25 mm, y las capas carburizadas por lo común son más gruesas. Sin embargo, el cianurado requiere temperaturas más bajas, por lo común por debajo de los 870°C y menos tiempo (entre 30 y 60 minutos) que el carburizado.

El carbonitrurado, también conocido como cianurado seco, agrega tanto carbono como nitrógeno a una capa poco profunda en la superficie del acero.

Una de las ventajas principales del endurecimiento por cianuro es que el control de temperatura es mucho más satisfactorio que en un baño líquido. Además, después del tratamiento pueden enfriarse rápidamente las piezas. Esto no solo produce la dureza necesaria, sino que da también una superficie limpia a éstas, el proceso es particularmente útil para obtener pequeñas profundidades de capa (de 0.1 hasta 0.25 mm).

## TRATAMIENTOS TERMICOS SUPERFICIALES

A diferencia de los tratamientos termoquímicos donde se induce un elemento que reacciona con los constituyentes del acero, en los tratamientos térmicos superficiales, solamente se modifica la microestructura del acero a través de elevar la temperatura y después enfriar

Entre los más comunes tenemos:

1. - Endurecimiento por flama

## 2. - Endurecimiento por inducción

### ENDURECIMIENTO POR FLAMA

La superficie de una pieza de trabajo puede calentarse localmente o en forma progresiva por una flama de gas. El endurecimiento resulta cuando la superficie austenitizada se enfría bruscamente por aspersión que sigue a la flama.

La profundidad de la zona endurecida puede controlarse, mediante el ajuste de la intensidad de la flama, el tiempo de calentamiento o velocidad del recorrido.

Después de templada la pieza, ésta debe liberarse de los esfuerzos residuales, calentándola en el intervalo de 177 - 204°C y posteriormente enfriándola con aire.

### ENDURECIMIENTO POR INDUCCIÓN

El calentamiento por inducción se realiza, haciendo pasar una corriente alterna de alta frecuencia a través de una bobina enfriada por agua, situada alrededor de la pieza de trabajo. El campo magnético que se genera induce una corriente alterna, esto eleva la temperatura de la capa superficial por encima de la temperatura crítica, en unos cuantos segundos.

Cuando la corriente alterna de alta frecuencia pasa por la bobina de trabajo (o primario), se forma un campo magnético de alta frecuencia, el cual induce corrientes parásitas de alta frecuencia y corrientes de histéresis en el metal. El calentamiento resulta de la resistencia del metal al paso de la corriente. Las corrientes inducidas de alta frecuencia tienden a viajar por la superficie (efecto de piel), por lo tanto, es posible calentar una capa poco profunda del acero sin calentar el interior. Sin embargo, el calor aplicado a la superficie tiende a fluir por conducción hacia el centro; de este modo, el tiempo de calentamiento es un factor importante para controlar la profundidad de la zona endurecida. La capa superficial se calienta prácticamente en un instante, a una

profundidad que es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia. El intervalo de frecuencias comúnmente utilizado está entre los 10 y 500 KHz.

Puede endurecerse una pieza después del calentamiento por inducción dejándola caer en un medio de enfriamiento rápido o inundándola con una corriente de líquido enfriador.

Este proceso no cambia la composición química del acero. Las áreas seleccionadas de la superficie de un acero se calientan en el intervalo de austenita y luego se templean para formar martensita.

### 2.3 MEDIO DE TEMPLE

El medio ideal de temple debe mostrar una alta velocidad de enfriamiento inicial evitando la transformación en la región de la nariz del diagrama T-I y después una velocidad lenta de enfriamiento para todo el intervalo inferior de temperatura a fin de minimizar la distorsión.

Sin embargo, no existe un medio de temple que presente estas características ideales, pero si existen medios de temple que cumplen con algunas de estas características.

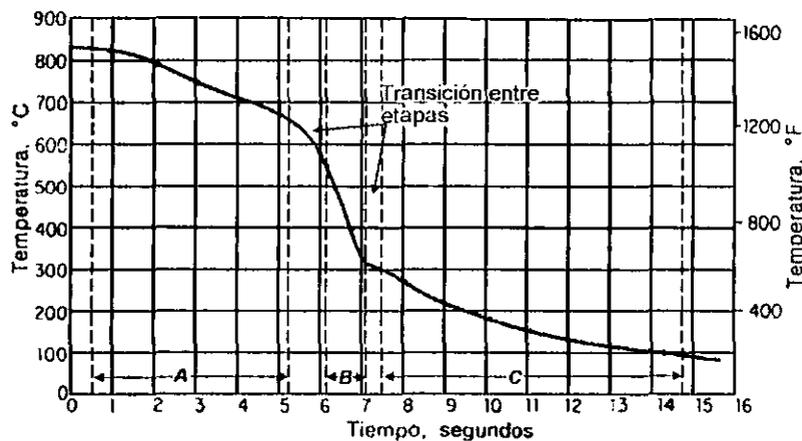


Fig. 12 Curva típica de enfriamiento para un cilindro pequeño templado en agua tibia<sup>6</sup>

Los medios de temple más utilizados son:

1. - Solución acuosa del 10% de cloruro de sodio (llamado salmuera)
2. - Agua
3. - Sales fundidas
4. - Aceites solubles y soluciones acuosas
5. - Aceites
6. - Aire
7. - Soluciones de polímeros
8. - Nitrógeno líquido

De los cuales el agua y las soluciones acuosas de sales inorgánicas tienen altas velocidades de enfriamiento inicial a través de las etapas A y B, pero el inconveniente es que estas persisten a bajas temperaturas, donde la distorsión y el agrietamiento tienden a ocurrir. Por otra parte los aceites de temple convencionales tienen una mayor etapa A y una etapa B más corta.

Los requerimientos esenciales de los aceites para temple son:

1. - Deben proporcionar una velocidad uniforme de enfriamiento
2. - Deben tener baja volatilidad
3. - No deben oxidar o formar sedimentos durante su uso

## TEMPERATURA DEL MEDIO DE TEMPLE

Generalmente, conforme la temperatura del medio de temple aumenta, la velocidad de enfriamiento disminuye, lo cual es debido a un aumento en la persistencia de la capa de vapor sobre la pieza. Esto es cierto cuando se utilizan como medio de temple, agua o salmuera. Las rapidezces óptimas de enfriamiento se obtienen con aceites para templear convencionales en baños a temperaturas entre 42 y 66°C.

Una forma de mejorar la velocidad de enfriamiento, es manteniendo la temperatura del medio de temple constante. Esto se logra agitando la pieza y/o forzando a que el medio de temple circule (mantener en movimiento al fluido). Con esto evitamos que la pieza y el medio de temple este en contacto por más de unos momentos, por lo que la transferencia de calor se ve mejorada al forzar la convección (convección forzada), y evitando que se forme la capa de vapor sobre la superficie.

## CONDICION SUPERFICIAL

Cuando existe la presencia de vapor de agua o de oxígeno dentro del horno, la pieza se ve sometida a una atmósfera de oxidación, provocando que sobre la superficie de la pieza, se forme una capa de óxido de hierro, la cual se le conoce como escama. Se ha podido demostrar que cuando esta capa es delgada (menor a 0.127 mm de profundidad), su efecto sobre la velocidad de enfriamiento tiene un efecto casi nulo, pero si esta capa es más gruesa (más de 0.127 mm de profundidad), provoca que la velocidad de enfriamiento se retarde.

Para evitar la formación de esta escama sobre la superficie de la pieza, se introduce al horno un gas, para formar una atmósfera de protección (este gas es inerte respecto al material), los gases más utilizados para este propósito son hidrógeno, amoníaco disociado y gas quemado.

Otra forma de evitar la formación de esta escama, es sumergiendo a la pieza en un horno de sal líquida, evitando así que, la pieza tenga contacto con atmósferas que contengan oxígeno, impidiendo que el material se oxide.

La razón del área superficial a la masa es un factor importante para determinar la velocidad de enfriamiento real, debido a que a que solo la superficie de la pieza está en contacto con el medio de temple. Por lo que esta razón esta en función de la forma geométrica de la pieza, por lo tanto esta razón es menor para piezas esféricas, y mayor para placas delgadas o cilindros largos y diámetro pequeño.

El calor en el interior de la pieza se elimina por medio de conducción a través del material, alcanzando poco a poco toda la pieza, la temperatura superficial que deberá ser igual a la del medio de temple, por lo que la velocidad de enfriamiento dentro de la pieza se rige por las ecuaciones de conducción, siendo menor la velocidad de enfriamiento respecto a la superficie.

## Capítulo 3

### 3.1 METODO DEL ELEMENTO FINITO

#### PRINCIPIOS DEL METODO DEL ELEMENTO FINITO

Una forma natural de proceder de la mente humana para resolver un problema, consiste en separar los sistemas en sus componentes individuales o elementos básicos cuyo comportamiento puedan conocerse sin dificultad, y después reconstruir el sistema original para estudiarlo a partir de dichos componentes básicos.

En muchas ocasiones se obtienen modelos adecuados utilizando un número finito de componentes bien definidos, a este tipo de problemas se les conoce como discretos. En otro tipo, la subdivisión prosigue hasta el infinito, dando por resultado que el problema solo pueda ser definido haciendo uso de la definición matemática del infinitésimo, lo cual nos conduce a expresiones con un número infinito de elementos implicados, a este tipo de sistemas se les conoce como continuos.

En años anteriores al uso de las computadoras digitales, la solución de uno de estos sistemas continuos presentaba muchas dificultades, por lo que fueron creados métodos para poder obtener una solución lo más cercano posible a la realidad. Estos métodos consisten en transformar al sistema continuo en un sistema discreto.

Fue con el uso de los sistemas computarizados que este problema encontró una manera más rápida de ser resuelto, además de que la solución obtenida se acerca más a la realidad que la obtenida por los métodos anteriormente utilizados, dado que se pueden utilizar un número mayor de elementos.

Para vencer las dificultades que presenta la solución de problemas continuos reales se han ido proponiendo a través de los años diferentes métodos de discretización.

El uso de estos métodos hace necesario efectuar alguna aproximación de tal manera que se acerque tanto más se quiera a la solución continua verdadera, a medida que crece el número de variables discretas.

Se han desarrollado, diferentes técnicas generales aplicables directamente a las ecuaciones diferenciales que rigen el problema, como son las aproximaciones por diferencias finitas <sup>1,2</sup>, diferentes métodos de residuos ponderados <sup>3,4</sup>. Por otra parte se han creado analogías entre elementos discretos reales y porciones finitas de un dominio continuo.

Fue de la posición de “Analogía directa” de donde surgió el nombre de elemento finito. Hoy en día estas dos vertientes la meramente matemática y la analógica coinciden.

El método de los elementos finitos es un procedimiento general de discretización de los problemas continuos planteados por expresiones definidas matemáticamente. Con el transcurso de los años se han desarrollado métodos generales para analizar problemas de naturaleza discreta. El método del elemento finito establece primeramente una relación para cada elemento aislado y después procede a unir el conjunto imponiendo la continuidad. Todos estos análisis siguen un patrón general que puede adaptarse universalmente a todos los sistemas discretos.

Una primera definición del método de los elementos finitos como

procedimiento de aproximación de problemas continuos es:

A. - El continuo se divide en un número finito de partes o elementos, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros.

B. - La solución del sistema completo como ensamblaje de los elementos, sigue precisamente las mismas reglas que se aplican en los problemas discretos. Numerosos métodos matemáticos clásicos de aproximación se incluyen en esta categoría, así como también varios métodos de aproximaciones de naturaleza técnica.

El proceso de aproximar el comportamiento de un continuo mediante elemento finito que se comporta de una manera similar a los elementos reales, "discretos", se puede introducir mediante las aplicaciones físicas específicas o como un concepto matemático general.

Es difícil, ver a primera vista cómo pueden discretizarse los problemas. Esta dificultad puede ser superada de la siguiente manera:

1. - El continuo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias, en un número de elementos finitos.

2. - Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos, a los cuales se les conoce como nodos, estos se encuentran situados en los vértices de cada elemento. El comportamiento de estos nodos serán las incógnitas.

3. - Se toma un conjunto de funciones que definan de manera única el comportamiento de cada elemento finito en función de las variables que intervienen (dependiendo del tipo de estudio requerido).

4. - Estas funciones definirán entonces de manera única el estado dentro del elemento en función de las variables que intervienen en su comportamiento. Estas funciones junto con las propiedades constitutivas del material definirán el estado en todo el elemento y

por consiguiente también en sus contornos.

5. - Se determinan las relaciones entre los estados de cada nodo.

Es evidente que se introducen una serie de aproximaciones, por lo que no siempre es fácil asegurar que las funciones escogidas satisfagan las condiciones de continuidad entre los elementos adyacentes, por lo que esta condición de compatibilidad puede no cumplirse en el contorno de los elementos.

Por otra parte, al concentrar las fuerzas (térmicas, estructurales, etc.) equivalentes en los nodos, las condiciones de equilibrio solo se cumplirán para el conjunto del continuo. Normalmente ocurrirá que tales condiciones no se cumplirán en zonas localizadas dentro y en el contorno de cada elemento.

Será la tarea del modelador escoger la forma de los elementos y de las funciones para cada caso, dependiendo del grado de aproximación que se desee.

Esta generalización de los principios del método de los elementos finitos, permite su aplicación a problemas continuos donde sea posible la formulación variacional, y lo cierto es que ya se dispone de procedimientos generales para discretizar mediante elementos finitos cualquier problema definido por un sistema de ecuaciones diferenciales adecuadamente constituido.

En resumen, el método del elemento finito es un proceso numérico para el análisis de estructuras y continuos. Usualmente el problema es demasiado complejo para ser resuelto por los métodos analíticos clásicos, los problemas concernientes a, análisis de esfuerzos, transferencia de calor. El proceso de elemento finito produce muchas ecuaciones algebraicas simultáneas las cuales son generadas y resueltas en una computadora digital. Cualquier error es disminuido por el proceso de generar más ecuaciones y los resultados son lo suficientemente precisos para los propósitos de ingeniería y son obtenidos a un costo razonable,

El método del elemento finito originalmente surgió como un método para análisis de esfuerzos, hoy en día el elemento finito es usado para analizar problemas de transferencia de calor, flujo de fluidos, lubricación, campos magnéticos y eléctricos, así como muchos otros problemas que eran muy complicados de resolver, ahora son cosa de rutina. El proceso elemento finito es utilizado para el diseño de edificios, motores eléctricos, maquinas térmicas, barcos, naves espaciales. Existen programas de elemento finito para muchos propósitos y mayor o menor precisión y capacidad.

Para un proceso de transferencia de calor como el de este análisis, las ecuaciones básicas que gobiernan cada nodo son, la ley de Fourier para:

conducción

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \partial T \\ \partial x \\ \partial T \\ \partial y \\ \partial T \\ \partial z \end{Bmatrix} \quad \text{en tres dimensiones}$$

convección

$$q = h(T_s - T_f)$$

radiación

$$q = \epsilon\sigma (T_s^4 - T_c^4)$$

## 3.2 BREVE DESCRIPCION DEL MANEJO DEL PROGRAMA

El programa ANSYS tiene una gran capacidad de análisis de elementos finitos, abarcando desde análisis simples, lineales estáticos a complejos (o compuestos), análisis no-lineales transitorios y dinámicos.

Un análisis típico de ANSYS se compone de tres etapas:

1. - Construcción del modelo
2. - Aplicación de las cargas y la obtención de la solución
3. - Revisión de los resultados

### CONSTRUCCION DEL MODELO

La construcción del modelo de elemento finito es la etapa que requiere de más tiempo que cualquiera de las otras etapas del análisis.

Primero se le asigna un nombre de trabajo y un título, después se define el tipo de elementos que se van a utilizar, las propiedades del material y la geometría del modelo.

### DEFINICION DEL NOMBRE DE TRABAJO

El nombre de trabajo es el nombre que identifica el trabajo que ANSYS ha realizado, utilizando el nombre de trabajo de este análisis se asegura que los archivos no se sobre escriban.

## DEFINICION DE UNIDADES

El programa ANSYS no asume un sistema de unidades para el análisis, excepto en análisis magnéticos.

El programa no convierte de un sistema de unidades a otro por lo que se deben de introducir unidades congruentes para así poder obtener resultados correctos.

## DEFINICION DEL TIPO DE ELEMENTOS

La librería de elementos de ANSYS contiene mas de 100 tipos diferentes de elementos. Dependiendo del tipo de análisis que se requiera y el grado de precisión, es como se selecciona el tipo de elemento a utilizar.

Se debe seleccionar el elemento más adecuado para el tipo de análisis, y el grado de precisión que se busque. Establecer los grados de libertad que deberán de tener, dependiendo del tipo de análisis. Además de si este análisis es en dos o tres dimensiones.

Se puede dejar que el programa seleccione el tipo de elemento que este considere más adecuado.

## DEFINICION DE LAS PROPIEDADES DE MATERIAL

Se requiere proporcionarle las propiedades del material al programa, para así asignárselos a cada uno de los elementos.

Dependiendo de la aplicación, las propiedades del material pueden ser:

1. - Lineales o no lineales
2. - Isotópicas o anisotrópicas
3. - A temperatura constante o dependencia de la temperatura

Las propiedades y constantes del material se proporcionan al programa en forma de tablas. Para un mismo análisis se pueden tener varias tablas de materiales, con diferentes propiedades representando distintos materiales y condiciones en cada una, para ser aplicadas a un mismo modelo, el programa ANSYS identifica estas tablas con un número único de referencia, para poderlas llamar cuando se requieran.

Al definir los elementos se indica el número de referencia apropiado para cada material.

### PROPIEDADES LINEALES DEL MATERIAL

Estas pueden ser constantes, dependientes de la temperatura, isotópicas o anisotrópicas.

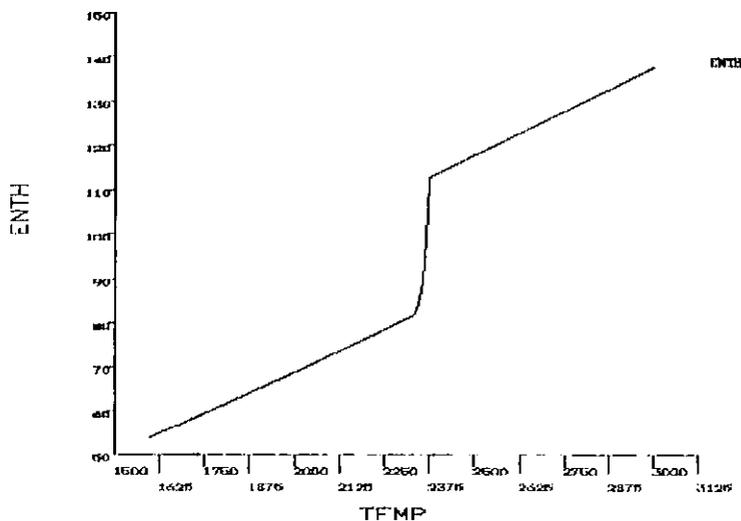


Fig.13 Una muestra de las gráficas que se pueden obtener. Propiedades del material dependientes de la temperatura

El programa toma las propiedades del material que son dependientes de la temperatura para la solución cuando las matrices de los elementos son formuladas. El programa primero calcula temperatura en el centro del elemento, determina los valores correspondientes de las propiedades del material por interpolación lineal tomadas de la tabla de propiedades, y utiliza estos valores para formular las matrices de ecuaciones que gobiernan a cada elemento.

Si la temperatura de los elementos cae debajo o arriba del rango definido para la tabulación de datos, entonces define un valor máximo o mínimo en el extremo respectivamente, para realizar las iteraciones y lograr que converjan las soluciones individuales de cada nodo.

## PROPIEDADES NO LINEALES DEL MATERIAL

Son usualmente datos tabulados del material, como datos de plasticidad, magnéticos, deslizamiento. El primer paso es definir las propiedades no lineales del material para diferentes intervalos, ya sea de tiempo temperatura, etc.

## PROPIEDADES ANISOTROPICAS ELASTICAS DEL MATERIAL

Algunos tipos de elementos aceptan propiedades elásticas anisotrópicas, las cuales usualmente son puestas en forma de matrices (como por ejemplo la plasticidad anisotrópica, la cual requiere diferentes curvas de esfuerzo deformación en diferentes direcciones).

## CREANDO LA GEOMETRÍA DEL MODELO

Una vez que se tienen definidas las propiedades, el siguiente paso en el análisis, es la generación del modelo de elemento finito es decir se divide en n número de elementos que se desca, asignándole los elementos que describen el modelo geométrico.

Las gráficas que se muestran son algunos ejemplos de modelos de elemento finito.

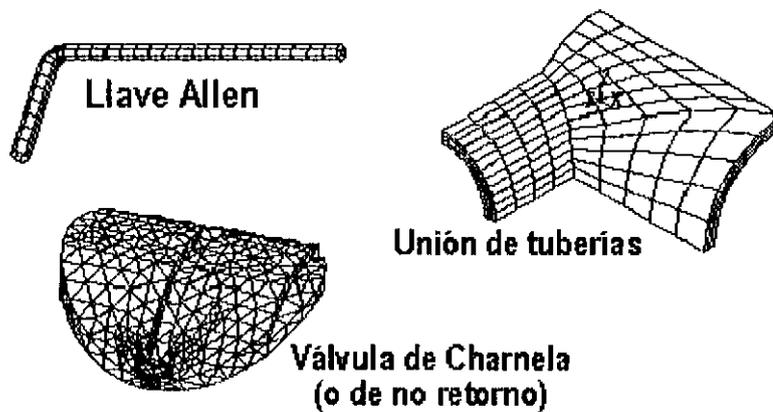


Fig. 14 Algunos ejemplos de modelos de elemento finito.

Hay dos métodos para crear el modelo de elemento finito: modelado sólido y generación directa.

Con la modelación sólida, se puede describir la forma geometría del modelo, después instruir al programa para que automáticamente, elabore el mallado de la geometría con los nodos y los elementos.

La modelación directa es cuando el usuario divide al modelo en el número de elementos que se desea. Se puede controlar el tamaño y la forma de los elementos que crea el programa.

Con la generación directa, se puede, manualmente definir la localización de cada nodo y la conectividad entre los elementos. Se pueden realizar varias operaciones convenientes tales como copiar los modelos, los nodos y elementos ya existentes, la reflexión y simetría de dichos elementos, nodos, etc., es posible.

## APLICACION DE CARGAS Y OBTENCION DE RESULTADOS

En este paso se puede utilizar el procesador de solución para definir el tipo de análisis y la opción de análisis para aplicar las cargas, e iniciar la solución por elemento finito.

### DEFINICION DEL TIPO DE ANALISIS Y OPCIONES DE ANALISIS

Las opciones de análisis permiten personalizar el tipo de análisis. Una opción típica de análisis es, utilizando el método de solución de esfuerzo rígido, encendido o apagado y el método de Newton-Raphson.

Una vez definido el tipo de análisis y la opción de análisis, el siguiente paso es aplicar las cargas.

### APLICACION DE CARGAS

El programa divide a las cargas en distintas categorías. A continuación se muestran algunas de ellas:

Fuerzas  
Cargas de superficie  
Cargas de cuerpo  
Cargas de inercia  
Cargas de campos acoplados

Se pueden aplicar más de una de estas sobre el modelo sólido, o en el modelo de elemento finito.

Dos términos importantes relacionados con las cargas que se necesitan conocer son el paso de cargas y los subpasos. El paso de cargas es una configuración simple de cargas, por las cuales se obtiene la solución. En un análisis estructural, por ejemplo se pueden aplicar cargas por el viento en un paso de cargas y la gravedad en un segundo paso, los pasos de cargas son también útiles para dividir la historia de las cargas en segmentos.

Son los intervalos que toma el programa para realizar los cálculos y lograr la convergencia.

## SOLUCION INICIAL

Una vez realizados los pasos anteriores, se procede realizar el análisis y generar los resultados.

El programa realiza una serie de iteraciones para resolver las ecuaciones en cada nodo, convergiendo en una solución. Obteniéndose así el resultado para cada uno de estos nodos. Estos resultados son presentados en forma gráfica y en una tabla de resultados.

## REVISION DE RESULTADOS

Una vez que se ha calculado la solución se puede utilizar el post procesador para revisar los resultados.

Se pueden obtener gráficas de los resultados datos vs tiempo (o frecuencia) y una lista de tabulaciones.

## CARGAS

La meta principal del análisis por elemento finito es examinar como la estructura y los componentes responden a ciertas condiciones de carga especificando las condiciones correctas de carga, es por consiguiente un paso clave en el análisis, se puede aplicar cargas sobre el modelo en varios caminos en el programa.

## QUE SON LAS CARGAS

La palabra cargas en la terminología del programa ANSYS incluye condiciones de frontera y funciones de fuerzas aplicadas externa o internamente.

Algunos ejemplos de cargas en diferentes disciplinas:

Estructural: desplazamientos, fuerzas, presión, temperatura (esfuerzos térmicos), gravedad.

Térmicos: temperaturas, flujo de calor, convección generación interna de calor, superficies infinitas.

Magnéticos: potenciales magnéticos, flujos magnéticos, segmentos de corrientes, magnéticas, densidad de corriente, superficies infinitas.

Eléctricos: potenciales eléctricos (voltajes), corriente eléctrica, cargas eléctricas, densidad de carga, superficies infinitas.

Fluidos: velocidad, presión.

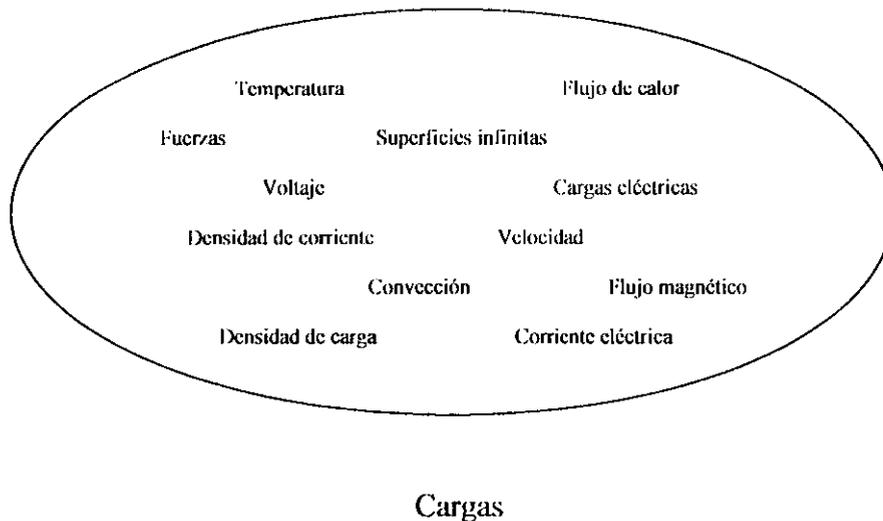


Fig. 15 "cargas" Incluye condiciones de frontera, así como otro tipo de cargas.

Una fuerza es una carga concentrada aplicada en un nodo del modelo. Por ejemplo fuerzas y momentos en un análisis estructural, velocidad del flujo de calor en un análisis térmico, y segmentos presentes en un análisis del campo magnético.

Una carga de superficie, es una carga distribuida aplicada sobre una superficie. Por ejemplos: la presión en un análisis estructural, la convección y el flujo de calor en un análisis térmico.

Una carga de cuerpo es una carga volumétrica o de campo. Ejemplo son temperaturas y holgura en un análisis estructural, la velocidad de generación de calor en

un análisis térmico, y la densidad de corriente presente en un análisis de campo magnético.

Cargas de inercia son aquellas atribuibles a la inercia (matriz de la masa) de un cuerpo, tal como aceleración gravitacional, velocidad angular, y aceleración angular. Se utilizan principalmente en los análisis estructurales.

Cargas de campos acoplados son simplemente un caso especial de uno de las cargas anteriores, donde se utilizan los resultados de un análisis como cargas en otro análisis. Por ejemplo, puede aplicar fuerzas magnéticas en el cálculo de un análisis del campo magnético como cargas (fuerzas) en un análisis estructural.

Las iteraciones de equilibrio son soluciones adicionales calculadas en un subpaso dado por la convergencia propuesta. Son correcciones iterativas utilizadas sólo en análisis no-lineales (estáticos o transitorios), donde la convergencia juega a un papel importante.

Considere, por ejemplo, un análisis magnético estático no-lineal en dos dimensiones. Para obtener una solución exacta, normalmente se deben utilizar dos pasos de cargas.

El primer paso de cargas aplica las cargas gradualmente en cinco a 10 subpasos, cada uno con una iteración para el equilibrio.

El segundo paso de cargas obtiene una solución final la cual converge justo con uno subpaso que utiliza de 15 a 25 iteraciones para alcanzar el equilibrio.

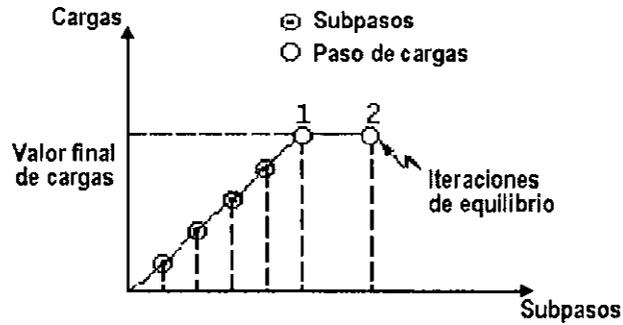


Fig. 16 Pasos de Carga, subpasos, e iteraciones para el equilibrio.

### EL PAPEL DEL TIEMPO EN LA LOCALIZACION

El programa ANSYS utiliza al tiempo como un parámetro de rastreo en todos los análisis estáticos y transitorios, sean o no sean en verdad dependientes del tiempo. La ventaja de esto consiste en que se puede utilizar un "contador" o "seguidor" en todos los casos. Con esto nos puede presentar un historial del análisis a distintos tiempos

Para la simulación de la transferencia de calor, el programa requiere conocer las propiedades del material, las cuales se presentan en el siguiente capítulo.

## Capítulo 4

### SIMULACION

Para llevar acabo la simulación, es necesario contar previamente con algunos datos, los cuales deberán de ser ingresados en el programa para poder llevar acabo las corridas correspondientes.

Los datos que solicita el programa, son:

1. - Propiedades del material.
2. - Propiedades del medio de temple (para este caso aceite).

Es importante conocer la composición química del acero utilizado, para así poder comprender su comportamiento, por lo que esta se muestra en la tabla N° 1.

#### 4.1 CARACTERISTICAS DEL ACERO 8620 MODIFICADO CON, B, Ti y Ni:

Tabla #1

#### COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO

ACERO 8620	
%C	0.20
%Mn	0.75
%Si	0.26
%Ni	0.87
%Cr	0.58
%Mo	0.26
%Ti	0.007
%B	0.0009

Tabla # 2

PROPIEDADES TERMOFISICAS DEL ACERO 8620

T (°K)	K (W/ m °K)	
273	55	$\rho = 7.83(\text{g/cm}^3)$
373	52	$\alpha = 0.148 (\text{cm}^2/\text{s})$
673	42	$C_p = 0.465 (\text{KJ/Kg}^\circ\text{K})$
873	35	
1273	29	

4.2 CARACTERISTICAS DEL FLUIDO DE TEMPLE, Y REVENIDO

A continuación se muestran algunas de las características del aceite de temple y las consideraciones que se hicieron para el revenido, las cuales se presentan en las tablas 3 y 4 respectivamente.

Tabla # 3

PROPIEDADES TERMOFISICAS DEL ACEITE DE TEMPLE

T (°K)	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	$\mu (\text{g/ms})$	k (W/m°K)	$C_p (\text{KJ/Kg } ^\circ\text{K})$	Pr	$\nu (\text{m}^2/\text{s}) \times 10^{-6}$
561	716	2.94	0.114222	2.825	72.6	4.10

Donde :

T = Temperatura

$\rho$  = Densidad

$\mu$  = Viscosidad

<sup>1</sup> Nota: Las propiedades del acero se obtuvieron del estudio INV-DNA/546 del CIATEQ (Desarrollo de un acero baja alcación para la fabricación de coronas de molinos de caña)

$k$  = Conductividad térmica

$C_p$  = Calor específico

$Pr$  = Prantl

$\nu$  = Viscosidad cinemática

$\alpha$  = Difusividad térmica

Otros datos necesarios para llevar a cabo la simulación, son los coeficientes de transferencia de calor por convección, que se calcularon para las condiciones de trabajo especificadas como se muestra a continuación.

#### Condiciones de trabajo

Temperatura inicial de la pieza = 900°C

Temperatura final de la pieza = 150°C

Temperatura de trabajo del aceite = 50°C

Temperatura de revenido = 650°C

Temperatura de película:  $T_f$

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

#### Determinación de los patrones de flujo:

Si el flujo es turbulento se tiene una mayor transferencia de calor, entonces la velocidad esta dada por el Reynols de transición de laminar a turbulento. El cual para este caso es:

$$R_{trans} = 5 \times 10^5$$

donde

$$R_e = \frac{\rho U_\infty L}{\mu} = \frac{U_\infty L}{\nu} \quad \text{-----(1)}$$

$U_\infty$  = velocidad del fluido de temple

$\rho$  = densidad del fluido

$L$  = longitud

$\mu$  = viscosidad del fluido

$\nu$  = viscosidad cinemática

Conociendo las características del fluido, obtenemos la velocidad del flujo forzándolo a que sea turbulento

Entonces de (1)

$$U_\infty = \frac{R_e \mu}{\rho L} = \frac{R_e \nu}{L} \quad \text{-----(2)}$$

$$U_e = \frac{R_e \nu}{L} = \frac{5 \times 10^5 (4.1 \times 10^{-6})}{1.5} = 1.367 \text{ [m/s]}$$

$$U_\infty = 1.367 \text{ [m/s]}$$

Con esta velocidad aseguramos que el flujo es turbulento.

Para la obtención del coeficiente de transferencia de calor por convección, la geometría de la corona se aproximó a un cilindro y sus caras a placas planas.

Se calculó el coeficiente convectivo para cada una de estas aproximaciones, utilizando las correlaciones apropiadas.

Para este caso se utilizaron las siguientes correlaciones:

Para las caras laterales se utilizó

$$N_{U_L} = 0.037 Pr^{1/4} \{ Re^{1/2} - 23550 \} \text{-----}(3)$$

valida para  $0.6 < Pr < 60$

$$N_{U_L} = 0.037 Pr^{1/4} \{ (5 \times 10^5)^{1/2} - 23550 \} = 2541.9895$$

$$N_U = \frac{h_l L}{k} = 2541.9895$$

despejando  $h_l$  tenemos que

$$h_l = \frac{N_U k}{L} = \frac{2541.9895(0.114222)}{1.5} = 193.57 \quad [W/m^2 \cdot K]$$

propiedades evaluadas a la temperatura de película Tf

Para la sección cilíndrica se utilizó la siguiente correlación:

$$N_{U_D} = 0.3 + \left( \frac{0.62 Pr^{1/3} Re_D^{1/2}}{(1 + \frac{0.4}{Pr})^{1/4}} \right) \left( 1 + \left( \frac{Re_D}{282000} \right)^{3/4} \right)^{1/4} \text{-----}(4)$$

Valido para:

$$Re_D, Pr > 0.2$$

$$Nu = \frac{h_2 D}{k} = 4147.956$$

$$h_2 = \frac{Nu k}{D} = 315.86 \text{ [W/m}^2\text{°K]}$$

Tabla # 4

<b>CONSIDERACIONES PARA EL REVENIDO</b>	
Horno con 8 quemadores de 300,000 BTU/h c/u (q =703.2 KW en total)	
Temperatura de flama obtenida por:	
$\Delta H_{298}^{\circ} + \int_{298}^{T_f} \sum m C_{p(\text{prod})} dT = 0 \quad T_f = 3275^{\circ} K$	
Área total de transferencia: 4.616 m <sup>2</sup>	
T <sub>∞</sub> = 150 °C = 323 °K	
Coeficiente de transferencia de calor por convección utilizado en el calentamiento: h = 53.43 (W/m <sup>2</sup> °K) {para los 8 quemadores}	
Nota: la capacidad de los quemadores son datos proporcionados por el fabricante	

donde

$$q = h A_s (T_s - T_{\infty})$$

A<sub>s</sub> = Area de la superficie

T<sub>f</sub> = Temperatura de flama

T<sub>∞</sub> = Temperatura del medio

$$h = \frac{q}{A_s(T_s - T_\infty)} = 53.43 \text{ (W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K)}$$

### 4.3 SIMULACION POR ELEMENTO FINITO

Ya obtenidos los coeficientes de transferencia de calor por convección para la sección cilíndrica y para las caras planas, se procedió a realizar la simulación con ayuda del software ANSYS que utiliza metodología de elemento finito.

Para las corridas se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

En el temple:

Convección forzada con recirculación de aceite considerando un coeficiente convectivo para la sección cilíndrica y otro para las secciones laterales.

En el calentamiento para revenido:

Se utilizó un coeficiente de transferencia de calor por convección calculado a partir de la capacidad de los quemadores.

Para la simulación se aprovechó la simetría geométrica y térmica de la pieza dividiéndola así en cuatro secciones idénticas. El programa generó una malla mapeada tipo solid 70 con 20496 nodos y 18102 elementos, como se muestra en la figura 17 y 18.

Una vez generada la malla se aplicaron las cargas (temperaturas) en el programa y se iniciaron las corridas del modelado, obteniéndose la distribución de temperaturas en función del tiempo, a lo largo del modelo sólido. Las figuras 19 y 20 muestran los vectores de transferencia de calor en las distintas caras de la corona

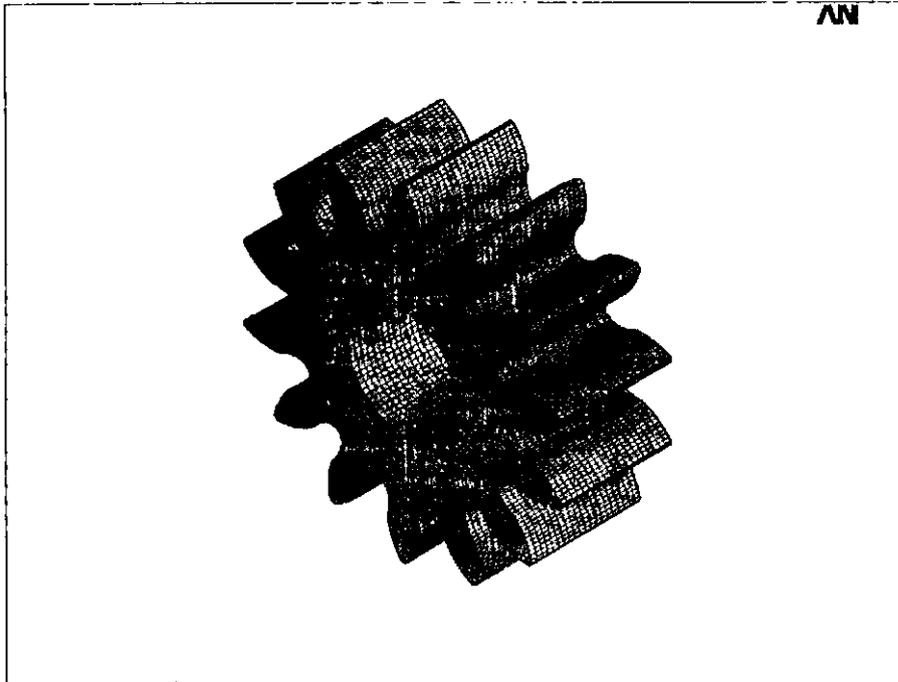


Fig. 17 Corona discretizada en su totalidad

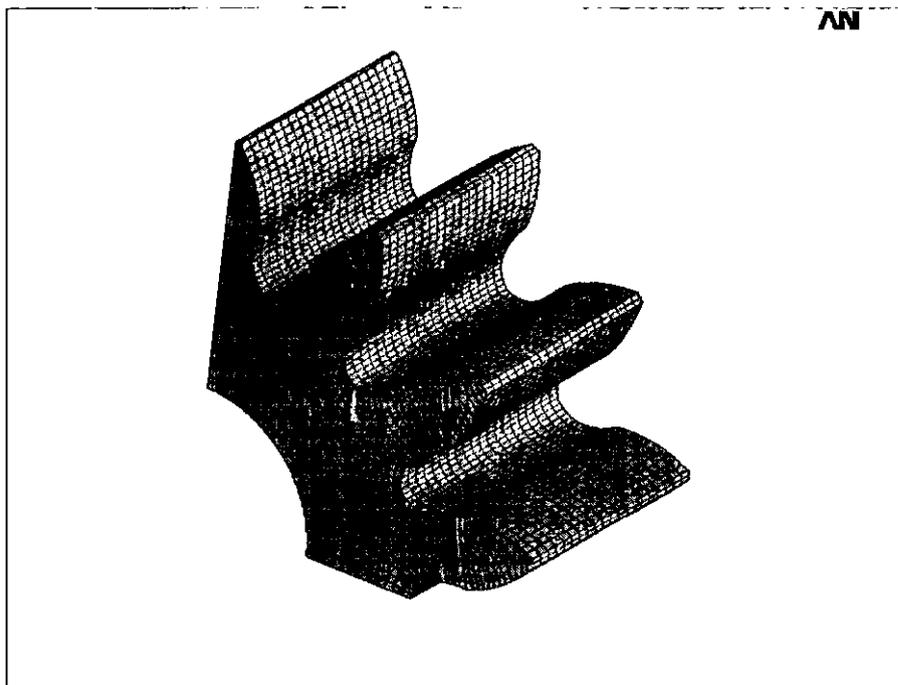


Fig. 18 Sección de corona discretizada.

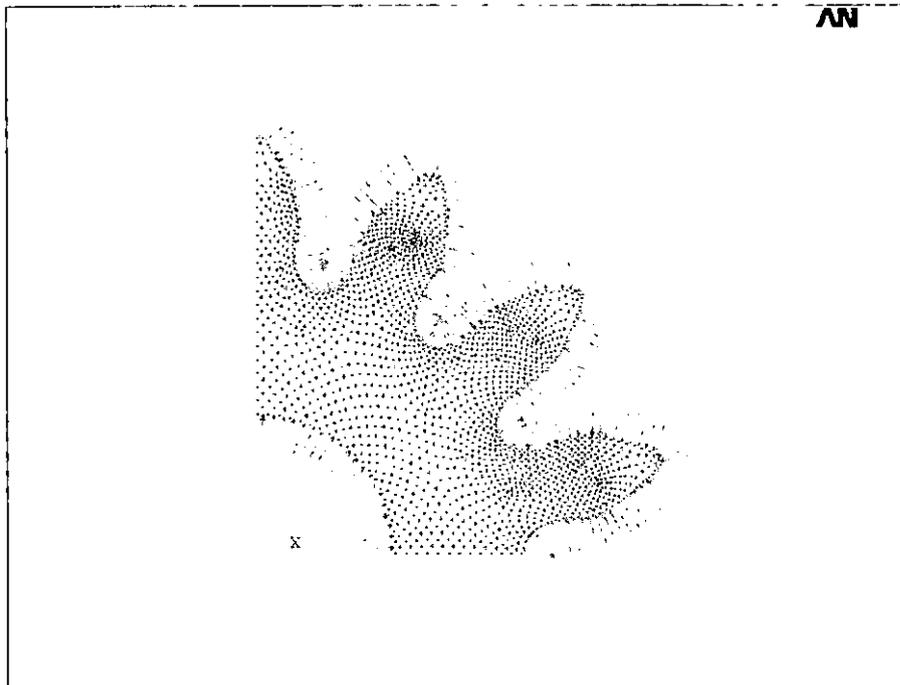


Fig. 19 Vectores indicando 2 condiciones de transferencia de calor.  
(Vista lateral)

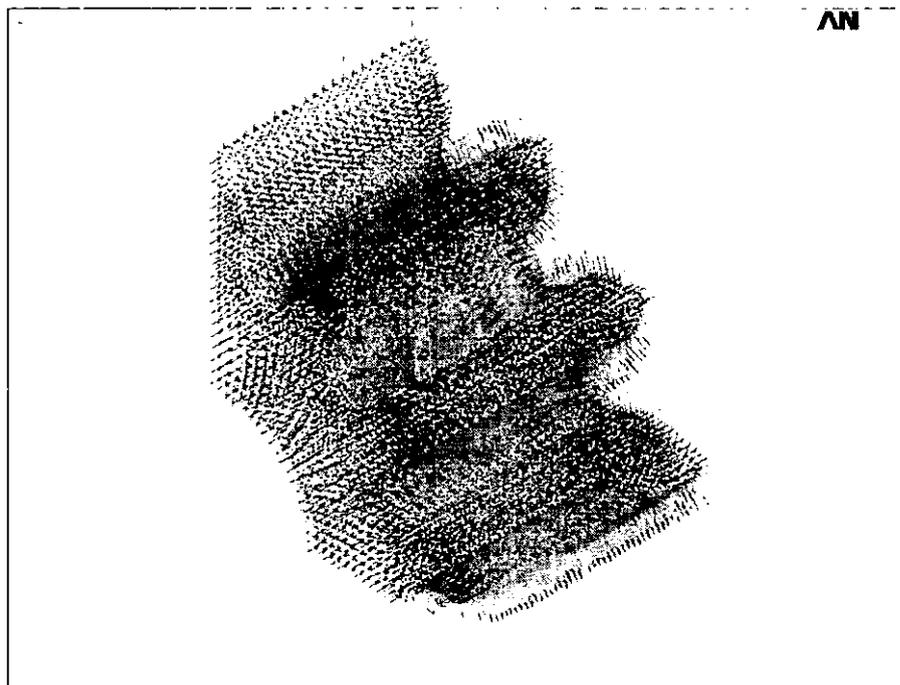


Fig. 20 Vectores indicando dos condiciones de transferencia de calor  
(Otra vista)

## Capítulo 5

### Resultados

Una vez realizadas las corridas correspondientes a la simulación del tratamiento térmico de temple y el de revenido, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación, en las figuras: 21 a 22

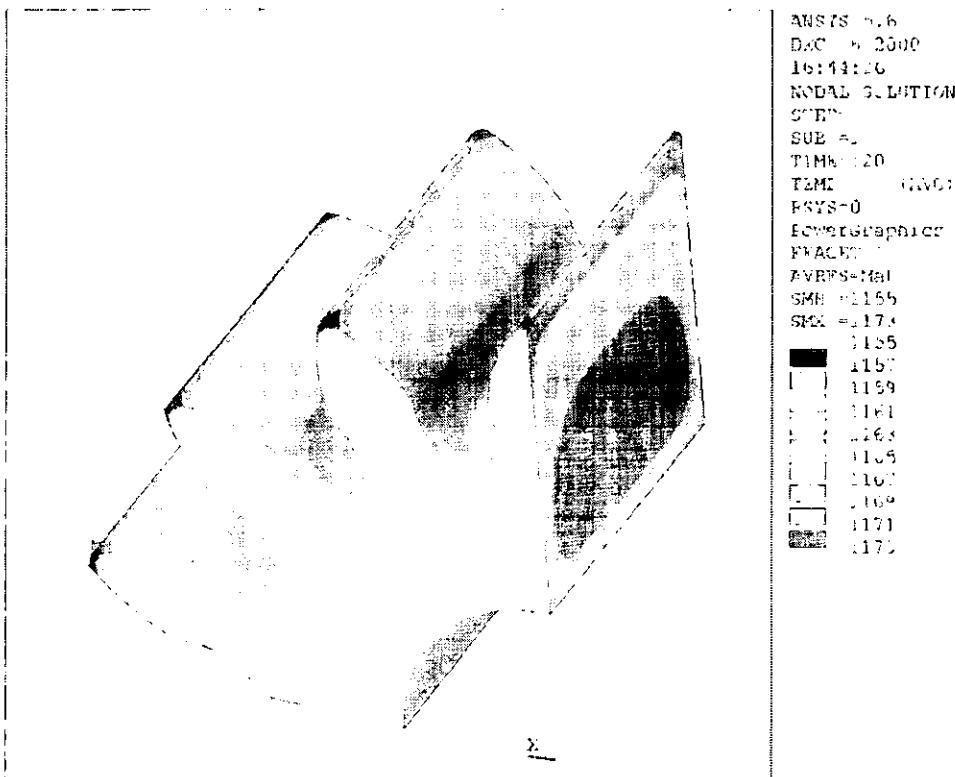


Fig. 21 Perfiles de temperatura durante el proceso de temple en aceite. Primeros instantes.  
 (Tiempo de inmersión 120 s)

Como se puede observar en la figura. 21 después de dos minutos de estar sumergida la corona en el fluido de temple, se presenta un gradiente de temperatura muy

bajo, por lo que no existe la posibilidad de un choque térmico, al momento de introducir la corona en la tina de templado. Como se puede ver en un principio la pieza se esta enfriando de manera uniforme.

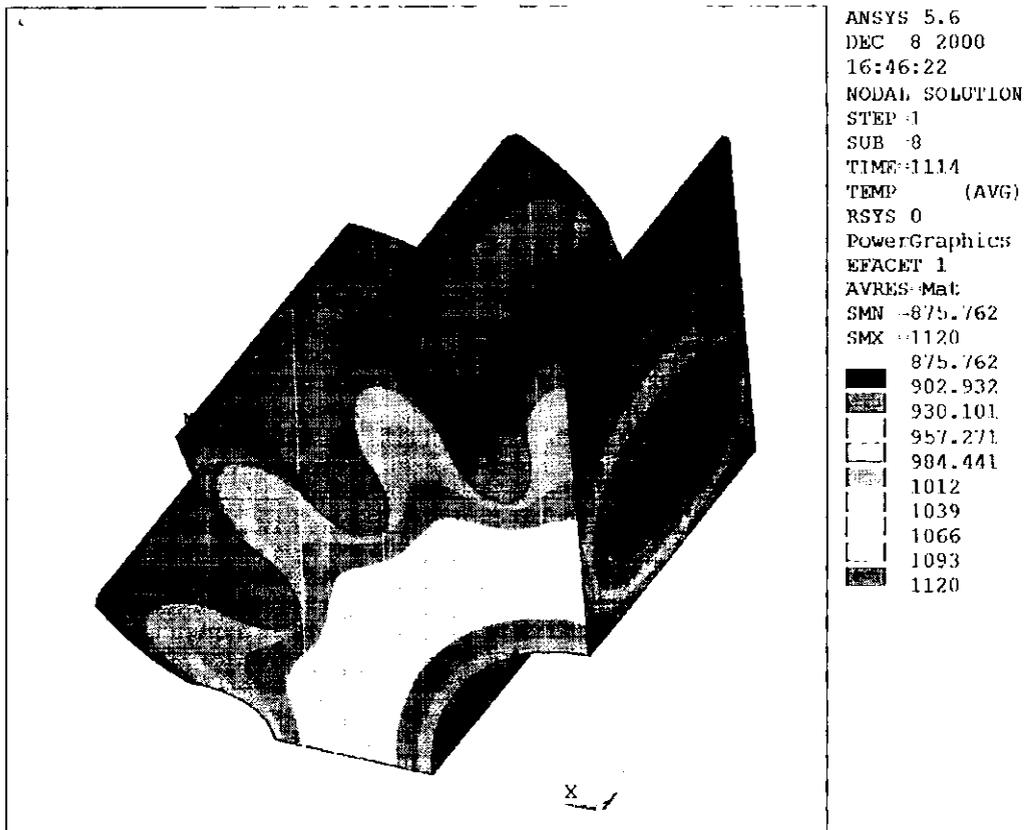


Fig. 22 Corona después de 18 minutos de inmersión.

En la figura 22 se observa que conforme transcurre el tiempo los gradientes de temperatura siguen sin ser demasiado elevados y se continua observando un enfriamiento uniforme.

Como puede observar en las figuras 23 y 24 las secciones que se enfrían con una mayor velocidad, son, las esquinas externas de los dientes. Esto era de esperarse debido a que en estas zonas el área de transferencia es mayor. Esto es, que estas secciones del elemento, tiene un contacto con el fluido de temple, en distintas direcciones, lo cual no sucede en otras partes como las caras o las superficies de los dientes.

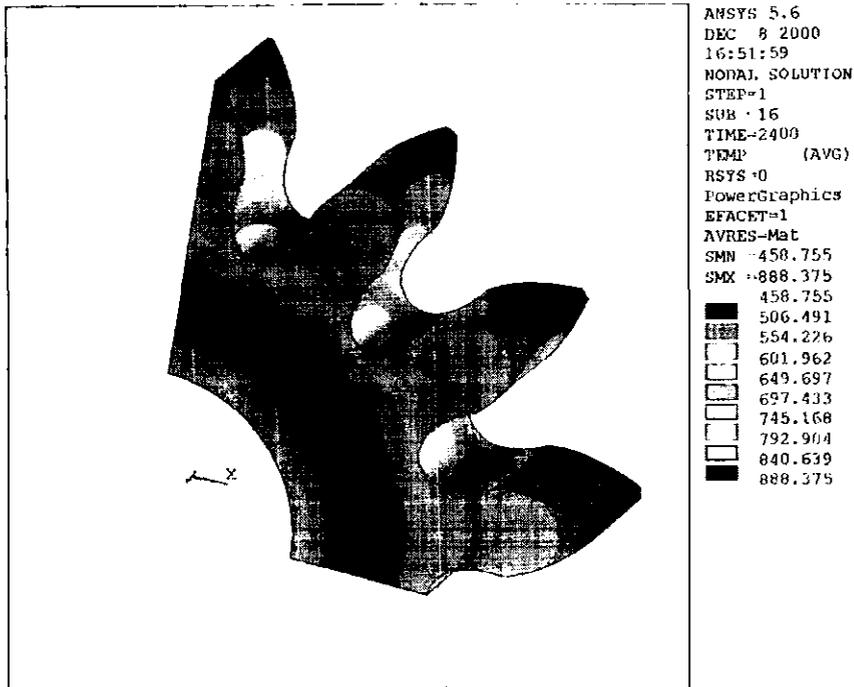


Fig. 23 Temperatura en el interior momentos antes de alcanzar la temperatura de templado.

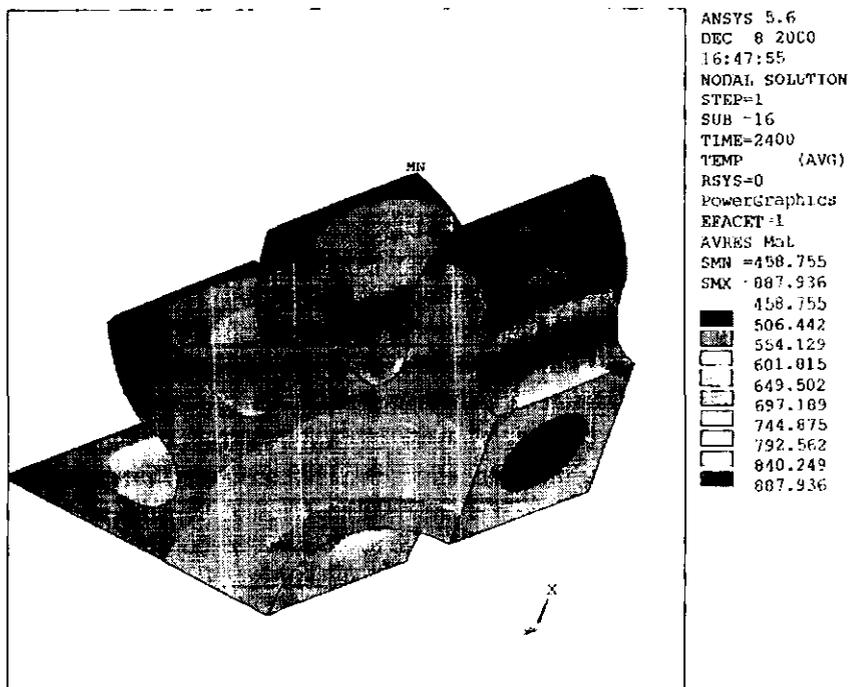


Fig. 24 Perfiles de temperatura en la corona al momento de finalizar el temple.

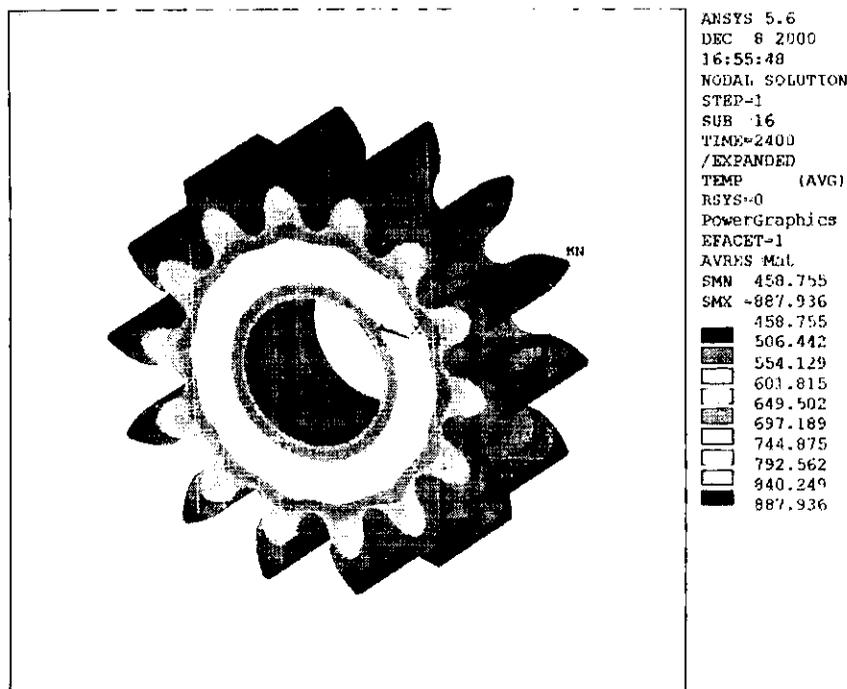


Fig. 25 Distribución de temperaturas sobre toda la corona.

En la figura 25 se observa que después de haber transcurrido 40 minutos aproximadamente el gradiente de temperaturas ha incrementado su rango y aunque la diferencia de temperaturas entre la sección de mayor temperatura y la de menor temperatura es significativa el gradiente sigue siendo uniforme a lo largo de toda la pieza, evitándose así la posibilidad de que exista un choque térmico entre dos secciones en contacto (sobre la pieza).

Es lógico que la diferencia de temperaturas entre la zona más caliente y la más fría se incremente, debido a que la conducción de calor a través de la pieza depende de la geometría de esta y de la cantidad de masa propia de la corona, como se puede observar en la figura 16. La sección media de la pieza, la cual es la parte con mayor cantidad de masa, la temperatura no varía con la misma rapidez que en la parte de los dientes (la cual posee mayor área de transferencia de calor, además de presentar menor masa).

Debido a que la transmisión de calor dentro de la corona depende del coeficiente de conducción de calor propio del material, el cual esta es función de la temperatura, se tiene que esta sea la zona de mayor temperatura.

Este coeficiente conductivo del acero, es mas bajo en las zonas de mayor temperatura, que en las partes más frías (como lo muestra la tabla N° 2).

Las velocidades de enfriamiento se ilustran en la figura 26 para 3 puntos distintos localizados dentro de la corona.

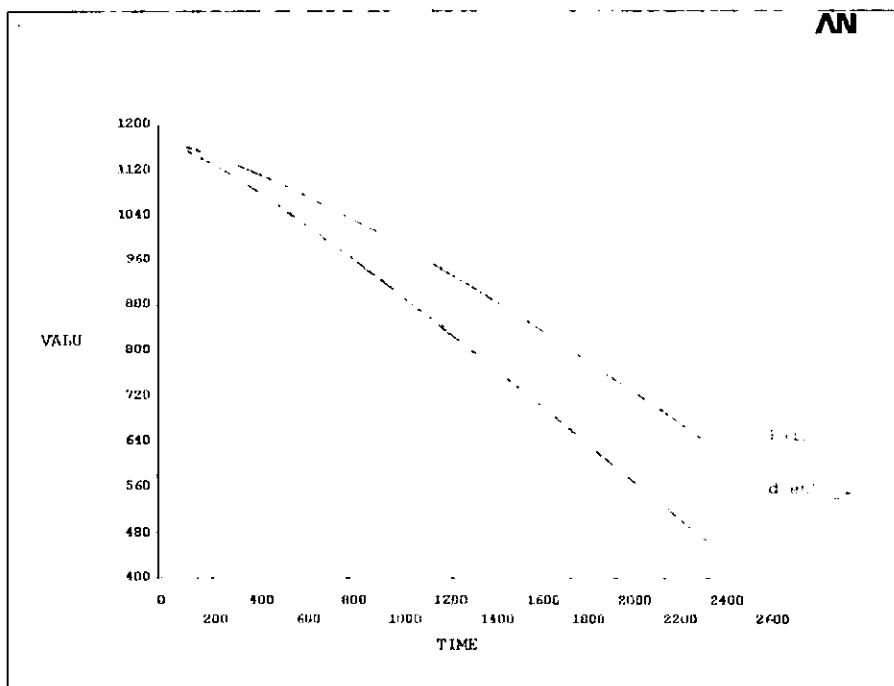


Fig. 26 Gráfica de temperatura vs tiempo para tres puntos distintos sobre la corona.

Aunque la pieza no alcanza una temperatura uniforme de 150 °C, todo el exterior y la totalidad de los dientes si lo logran, por lo que son templados adquiriendo mayor dureza, y obteniéndose en el centro una estructura más suave.

El volumen del aceite necesario para realizar el temple fue calculado tomando como base, el volumen de la tina de templado utilizada y sin considerar la recirculación, de

ahí que se obtuvieran  $25 \text{ m}^3$  de fluido, cantidad que se puede disminuir al considerar el efecto de la recirculación del aceite.

Los coeficientes convectivos de transferencia de calor fueron calculados, como se menciona en el capítulo 4, suponiendo que las caras laterales de la corona son placas planas, y el coeficiente de la sección de los dientes, como si la corona fuera un cilindro. Es certero pensar que los coeficientes variarán si se calculan siguiendo estrictamente la geometría de la pieza, y es posible que no-solo sean dos coeficientes sino más, uno para cada una de las superficies que forman la pieza en su totalidad.

La intención de este trabajo es mostrar los gradientes de temperatura críticos, que sufre la pieza, para verificar que no sufra choques térmicos que nos produzcan defectos posteriores, y verificar que por lo menos la superficie y los dientes sean templados correctamente. Por lo que las suposiciones que se hicieron, así como el grado de aproximación, es suficiente para mostrar estas condiciones críticas a grandes rasgos.

Otra suposición que se hizo, fue, el considerar al material como isotrópico, que en la realidad, no lo es. Pero como ya se mencionó, no se buscaba ese grado de detalle, sino mostrar las condiciones generales, para hacer un modelo general y verificar que los dientes fueran templados, y que este proceso no fuera demasiado severo, para no provocar fracturas debidas a gradientes de temperatura excesivos.

Debido que en la realidad, no se tiene un control preciso del tiempo y de la temperatura, no se puede llegar el grado de aproximación que nos da o podría dar la simulación, en los tiempos ni en las temperaturas, por lo que se manejarán promedios de éstas dándonos un promedio de 30 a 40 minutos para que el proceso de templado se lleve a cabo.

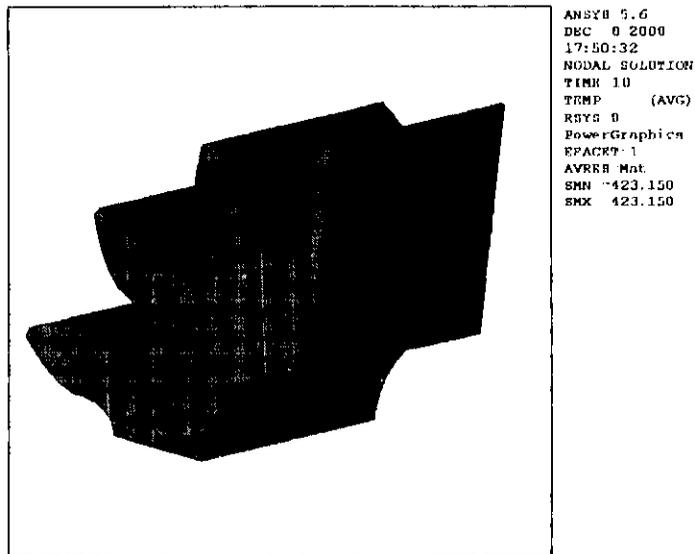


Fig. 27 corona a 150°C después del temple en aceite, lista para el revenido.

En la figura 27 podemos observar a la corona a una temperatura uniforme de 150°C momentos antes de ser sumergida en el aceite. Esto es solo para efectos de la simulación, pues en realidad la pieza no se encuentra a una temperatura uniforme en su totalidad.

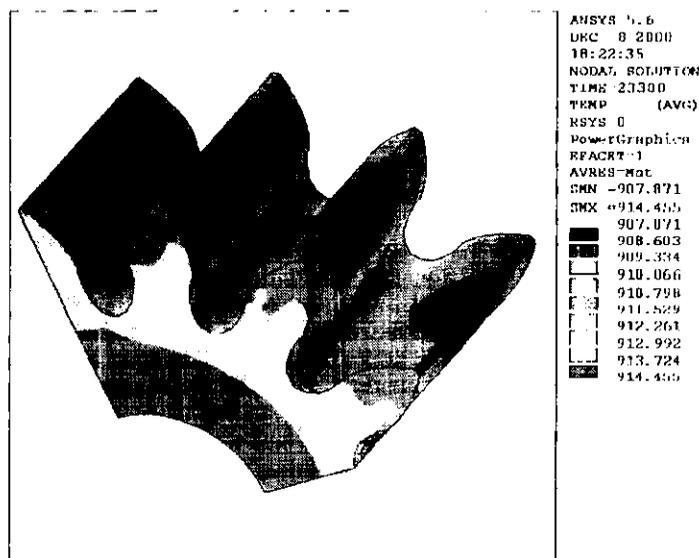


Fig. 28 Perfiles de temperatura sobre la pieza durante el proceso de revenido a 650°C.

La figura 28 nos muestra que en el proceso de revenido, se alcanza la temperatura de tratamiento requerida en el centro de la pieza después de 6.5 horas, bajo las condiciones de calentamiento del horno mostradas en la tabla N° 4.

Es importante mencionar que los efectos de calentamiento por radiación dentro del horno, fueron despreciados para la realización del presente trabajo, por lo que el tiempo de calentamiento (revenido) puede disminuir, pero con este tiempo aseguramos que la pieza alcance en su totalidad los 650 °C.

En este proceso también cabe mencionar, que el tiempo podrá variar un poco debido a que el material es considerado como si fuera totalmente isotrópico, para efectos de la simulación.

## Capítulo 6

### CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Es importante señalar que según el modelo desarrollado, no se encontraron zonas en donde, debido a la geometría se tuvieran diferencias notables en la temperatura, sobre la superficie de la pieza, lo cual, pudiera disminuir la eficiencia del temple en la zona de los dientes.

El volumen del aceite necesario para realizar el temple se verá disminuido al realizar los cálculos tomando en cuenta la recirculación del fluido de temple. Para esto deberá de tomarse en cuenta la velocidad mínima que deberá tener el flujo la cual es mayor a 1.4 m/s para asegurar que se tenga un flujo turbulento, y la transferencia de calor sea la máxima.

Un punto importante que hay que señalar es, que para efectos de la simulación se tomó a la temperatura del medio de enfriamiento (aceite de temple), como una constante.

Esta simulación nos da una idea del tiempo de permanencia de la corona en el proceso de templado (entre 30 y 40 minutos) y en el de revenido (aproximadamente 6.5 horas), logrando con esto la optimización de los costos y tiempos del proceso en su totalidad.

Para fines de la realización del presente trabajo los efectos de calentamiento por radiación fueron despreciados. Si dichos efectos no son despreciados, el tiempo de calentamiento podría verse reducido considerablemente. Así pues es recomendable que se lleven a cabo los cálculos de los efectos de calentamiento por radiación en un estudio posterior.

Como muestra al análisis realizado por medio del elemento finito, con el tratamiento térmico de temple en aceite se obtiene una microestructura homogénea en la zona de los dientes y la superficie exterior de la pieza.

En cuanto al proceso de revenido la simulación nos muestra que el tiempo necesario para realizar éste, entra dentro de los tiempos que son recomendados por la práctica común de tratamientos térmicos, que se menciona en la literatura. Lo cual nos indica, que esta simulación no difiere en demasía con la realidad.

Se recomienda la evaluación de algunas propiedades del material después de ser sometido al proceso de temple en aceite y del revenido. La evaluación de la respuesta al endurecimiento por deformación (que es uno de las características que se desean que posea la pieza), la resistencia a la tracción, a la compresión y a la fatiga.

Otro análisis recomendable sería la simulación del proceso de solidificación, para así poder predecir la presencia de rechupes, y otros defectos que pueden llegar a formarse durante este proceso.

Como ya se mencionó anteriormente, la intención del presente trabajo es obtener los gradientes de temperatura críticos en ambos procesos, para que la pieza no sufra de choques térmicos, y puedan producirse grietas en la mismas u otro tipo de imperfecciones.

Además nos proporciona el tiempo necesario para que estos procesos se lleven a cabo adecuadamente (bajo condiciones ideales, pero nos da una buena aproximación).

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

1. Southwell, R.V. **RELAXATION METHODS PHYSICS**. Ed. Clarendon Press, 1946.
2. - D.N. de G. Allen. **RELAXATION METHODS**. Ed. McGraw-Hill. New York, 1955.
3. - Crandall, S.H. **ENGINEERING ANALYSIS**. Ed. McGraw-Hill, 1956.
4. - Finlayson, B.A. **THE METHOD OF WEIGHTED RESIDUALS AND VARIATIONAL PRINCIPLES**. Ed. Academic Press, 1972.
5. - Honeycombe, R. y Badshia K. Steels. **MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES**. Ed. Arnold. London, 1995.
6. - Avner, Sydney. **INTRODUCCIÓN A LA METALÚRGIA FÍSICA**. 2da ed. Ed. McGraw-hill. México, 1988.
7. - Ozisik, M.N. **HEAT TRANSFER: A BASIC APPROACH**. Ed. McGraw-Hill México, 1985.
8. - Incropera, F.P. y De Witt, D.P. **FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER**. 4ta. ed. Ed. John Wiley and Sons. Nueva York, 1996.
9. - Holman, J.P. **TRANSFERENCIA DE CALOR**. Ed. Cesca. México, 1977.
10. - Kreith, F. **PRINCIPIOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR**. Ed. Herrero Hermanos, 1986.
11. - Isachenko, V. et al. **TRANSMISIÓN DE CALOR**. Ed. Marcombo. España, 1973.
12. - Ozisik, M.N. **HEAT CONDUCTION**. Ed. Wiley. Colombia, 1980.

13. - Kern, D.Q. **PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR**. Ed Ceesa. México, 1990.

14. - Zienkiewicz, O.C. y Taylor, R.L. **EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**. 4ta ed. Ed. McGraw-Hill. España, 1994.

15. - Guy, Albert. **METALÚRGIA FÍSICA PARA INGENIEROS**. Ed Fondo educativo interamericano. México, 1970.

16. - Molera Solá, P. **TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS METALES**. Ed. Marcombo. España, 1991.

17. - Davics, D.J. **THE STRUCTURE, PROPERTIES AND HEAT TREATMENT OF METALS**. 1era ed. Ed. Pitman. Nueva York, 1983.

18. - Higgins, Raymond. **INGENIERÍA METALÚRGICA**. Ed. Ceesa. México, 1984.