

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**EFFECTO DE LA RUTA DE CARBURIZADO SOBRE CARACTERÍSTICAS  
METALÚRGICAS, ESFUERZOS RESIDUALES Y DISTORSIÓN EN FLECHAS  
DE TRANSMISIÓN**

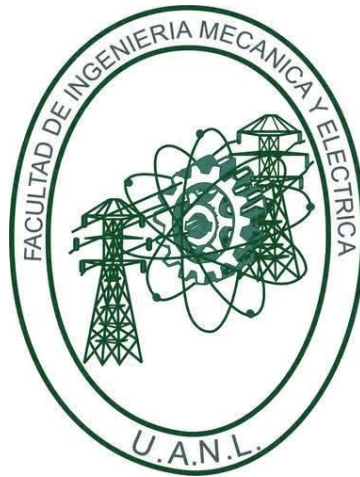
**PRESENTA**

**M.C. MARCO ANTONIO DELGADO LOPEZ**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERÍA DE MATERIALES**

**ABRIL, 2023**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**EFFECTO DE LA RUTA DE CARBURIZADO SOBRE CARACTERÍSTICAS  
METALÚRGICAS, ESFUERZOS RESIDUALES Y DISTORSIÓN EN FLECHAS  
DE TRANSMISIÓN**

**PRESENTA**

**M.C. MARCO ANTONIO DELGADO LOPEZ**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERÍA DE MATERIALES**

**ABRIL, 2023**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

**ABRIL 2023**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LLÓN**

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Posgrado**

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Efecto de la ruta de carburizado sobre características metalúrgicas, esfuerzos residuales y distorsión en flechas de transmisión.”, realizada por el estudiante Marco Antonio Delgado López, con número de matrícula 1651387, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería de Materiales.

**El Comité de Evaluación de Tesis**

Dr. Rafael Colás Ortiz  
Director

Dr. Sergio Haro Rodríguez  
Co-director

Dr. Arturo Juárez Hernández  
Revisor


Dr. Nelson Federico Garza Montes de Oca  
Revisor

Dr. Rene de Jesús Cerda Rojas  
Revisor

Dr. Francisco Aurelio Pérez González  
Revisor

Dr. Javier Humberto Ramírez Ramírez  
Revisor

Vo.Bo.

  
Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001  
Programa 122608  
Acta Núm. 321

Ciudad Universitaria, a 28 de Abril de 2023

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi esposa Gaby e hijo Ulises por la paciencia mostrada durante todo este tiempo de arduo trabajo. quiero que sientan que el objetivo logrado también es de ustedes y que la fuerza que me ayudo a conseguirlo fue su apoyo.

A mis padres Antonio Delgado y Maricela López, sabiendo que no existirá una forma de agradecer una vida de sacrificio y esfuerzo, gracias por todo el amor, por los principios y valores inculcados y por su apoyo incondicional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado durante el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Rafael Colás por la oportunidad de pertenecer en su equipo de trabajo, por todas sus enseñanzas, su guía, retroalimentación, amistad y confianza brindada, me llena de orgullo y satisfacción el haber podido trabajar con usted durante este periodo.

Al Dr. Sergio Haro, ya que fue el quien me impulso y motivo a tomar el camino de la investigación, gracias por la confianza otorgada, por las horas dedicadas al proyecto y sobre todo gracias por su amistad.

Al Dr. Imre Felde por el apoyo y tiempo dedicado durante mi estancia de investigación en la Universidad de Óbudai, gracias por su enseñanza, orientación y amistad.

A mis sinodales, muchas gracias por todo su apoyo y por la disposición mostrada para avanzar en el proceso de titulación, agradezco todo su tiempo invertido en la revisión de este trabajo, sin duda alguna cada uno de sus comentarios y observaciones enriquecieron la calidad del mismo.

Agradezco a SISAMEX por la oportunidad de poder llevar a cabo este trabajo de investigación, en especial al Ingeniero Ismael García quien fue el vínculo con la UANL para el desarrollo de esta investigación. Del mismo modo agradezco al Ingeniero Herbert Mehnert y Francisco Camacho por su confianza y apoyo total.

A mis amigos y compañeros de trabajo, gracias por todo el apoyo, por sus observaciones, consejos, apoyo técnico, retroalimentación, criticas, etc. cada uno de ustedes fue parte importante en el desarrollo de este proyecto.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	9
CAPITULO I.....	11
INTRODUCCIÓN .....	11
1.1    Objetivos .....	14
1.2    Hipótesis.....	14
CAPITULO II .....	16
ANTECEDENTES.....	16
2.1    Tratamiento térmico de carburizado .....	16
2.2    Aceros utilizados para carburizado .....	16
2.3    Clasificación de los procesos de carburizado.....	18
2.4    Fuentes de carbono.....	19
2.5    Equipos de carburizado .....	19
2.5.1    Hornos tipo caja .....	19
2.5.2    Horno continuo .....	20
2.6    Variables de proceso .....	20
2.6.1    Temperatura .....	20
2.6.2    Tiempo .....	21
2.6.3    Potencial de carbono .....	21
2.6.4    Difusión de carbono .....	21
2.6.5    Gas para atmósferas de carburizado.....	22
2.7    Carburizado al vacío .....	24
2.7.1    Calentamiento y homogenización .....	24
2.7.2    Etapa de saturación .....	24
2.7.3    Difusión.....	25
2.7.4    Enfriamiento.....	25
2.7.5    Ventajas del tratamiento térmico de carburizado al vacío .....	26
2.8    Tipos de medios de temple.....	26
2.8.1    Clasificación general y comparación de medios de temple .....	27
2.8.2    Aceites minerales .....	27

2.8.3	Clasificación y descripción general de aceites de temple .....	27
2.8.4	Temple en gas con alta presión (HPGQ).....	29
2.9	Curvas de enfriamiento .....	30
2.9.1	Análisis de las curvas de enfriamiento.....	32
2.9.2	Método inverso de conducción de calor.....	33
2.9.3	Transferencia de calor durante el temple .....	33
2.9.4	Cálculo de transferencia de calor .....	34
2.9	Esfuerzos residuales y distorsión en componentes carburizados .....	36
2.10	Esfuerzos residuales compresivos .....	36
2.13	Esfuerzos residuales a tensión.....	36
2.14	Generación de esfuerzos residuales en carburizado y temple .....	36
2.14.1	Método Destructivo.....	38
2.14.2	Método no destructivo .....	38
2.14.3	Método de difracción de rayos-X.....	38
2.14.4	Estado del arte de esfuerzos residuales .....	40
2.15	Distorsión .....	41
2.15.1	Influencia de la forma del componente en la distorsión del tratamiento térmico .....	43
2.15.2	Componente cilíndrico .....	45
2.15.3	Asimetría y pandeamiento.....	47
2.15.4	Influencia del enfriamiento en distorsión.....	48
2.15.5	Factores que afectan la distorsión de piezas carburizadas. ....	49
2.15.6	Estado del arte de distorsión .....	50
CAPITULO III .....		52
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....		52
3.1	Condiciones iniciales .....	52
3.2	Diagrama de flujo experimental.....	54
3.3	Diseño de experimentos .....	55
3.3.1	Diseño de experimentos para rutas de carburizado.....	55
3.3.2	Diseño de experimentos de simulación por elemento finito .....	57

3.4 Medición de distorsión.....	58
3.5 Medición de rayos-X para esfuerzos residuales y austenita retenida.....	59
3.6 Medición de dureza, capa carburizada, y preparación metalográfica .....	60
3.7 Pruebas de tensión.....	63
3.8 Procedimiento experimental para obtener coeficientes de transferencia de calor. 65	
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>68</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>68</b>
4.1 Perfil de carburizado. ....	68
4.2 Capa de carburizado.....	69
4.3 Dureza superficial y núcleo.....	70
4.4 Microestructura .....	71
4.4.1 Oxidación intergranular.....	71
4.4.2 Microestructura en superficie , tamaño de martensita y austenita retenida ....	73
4.4.3 Microestructura de Capa, Transición y Núcleo.....	77
4.4.4 Análisis microestructural .....	81
4.5 Medición de rayos-X para esfuerzos residuales.....	83
4.6 Ensayos de tensión .....	87
4.7 Distorsión .....	89
4.7.1 Excentricidad.....	89
4.7.2 Cambio en diámetros .....	92
4.7.3 Cambio en Longitud.....	93
4.8 Relación entre excentricidad, cambio de longitud, esfuerzos residuales y microestructura.....	95
4.9 Curvas de enfriamiento y coeficientes de transferencia de calor. ....	98
4.10 Velocidad de enfriamiento y coeficientes de transferencia de calor.....	99
<b>CAPITULO V .....</b>	<b>103</b>
<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>103</b>
5.1. Análisis de perfil de carburizado.....	103
5.2. Análisis de capa de carburizado.....	103
5.3. Análisis de dureza superficial y núcleo.....	104

5.4. Análisis y discusión de resultados microestructurales .....	105
5.4.1 Análisis de oxidación intergranular .....	105
5.4.2 Análisis de microestructura en superficie, tamaño de martensita y austenita retenida.....	106
5.4.3 Análisis microestructural de capa, transición y núcleo .....	107
5.4.4 Análisis microestructural .....	107
5.5 Análisis de medición de rayos-X para esfuerzos residuales .....	109
5.7 Distorsión .....	110
5.7.1 Análisis de excentricidad .....	110
5.7.2 Análisis dimensional de diámetros .....	111
5.7.3 Análisis del cambio en longitud.....	112
5.8 Análisis de la relación entre excentricidad, cambio de longitud, esfuerzos residuales y microestructura.....	112
5.9 Obtención de curvas de enfriamiento y coeficientes de transferencia de calor. ..	114
5.10 Velocidad de enfriamiento y coeficientes de transferencia de calor HTC.....	114
CAPITULO VI.....	116
CONCLUSIONES .....	116
RECOMENDACIONES.....	118
LISTA DE FIGURAS .....	123
LISTA DE TABLAS .....	126



## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se analizaron cuatro rutas de tratamiento térmico de enriquecimiento superficial de carbono, los tratamientos en atmósfera endotérmica con enfriamiento en aceite ; 1) carburizado por lotes en horno tipo caja, 2) carburizado en horno continuo y los tratamientos de 3) carburizado a baja presión (LPC, *low pressure carburizing*) con enfriamiento usando gas nitrógeno a alta presión (HPGQ, *high pressure gas quenching*) y 4) LPC con enfriamiento en aceite como medio de temple, esto con el fin de evaluar los cambios dimensionales asociados con la distorsión, el efecto en la microestructura y esfuerzos residuales de la flecha principal de transmisión, la cual se recibe en condición de forja y es de una aleación de acero equivalente AISI 8625, especial para tratamiento de endurecimiento superficial. Dicha flecha de transmisión es utilizada en camiones pesados y tratada térmicamente en una empresa de la localidad.

El estudio consistió en evaluar los cambios dimensionales en los componentes después del tratamiento térmico en diámetros, longitudes, y específicamente la excentricidad, esto se logra al someter a giro el componente, ya que después del tratamiento termoquímico de carburizado los componentes tienen que someterse al proceso de rectificado, donde la excentricidad tiene que cumplir especificaciones mínimas para garantizar el uso adecuado de la herramienta de corte y evitar desgastes prematuros y posibles defectos superficiales de los componentes.

Asimismo se evaluaron las principales características metalúrgicas, como la microestructura en la superficie de capa carburizada, microestructura en núcleo, porcentaje de austenita retenida en capa carburizada y se obtuvieron perfiles de dureza para evaluar la capa efectiva de carburizado (CHD, *case hardening depth*). Todas estas características son clave para determinar si el proceso de carburizado presenta las propiedades que tiene que cumplir el componente para garantizar un buen desempeño.

Se utilizó un difractor de rayos X localizado en el Centro de Desarrollo Tecnológico y Humano (CDTH) de SISAMEX para medir los esfuerzos residuales en tres posiciones a lo largo del componente, esto para determinar la homogeneidad del proceso de temple y garantizar esfuerzos residuales compresivos después del tratamiento térmico, los cuáles incrementan la resistencia al desgaste y a la fatiga del componente.

Los resultados obtenidos muestran que las flechas tratadas en el proceso de carburizado al vacío y enfriadas con gas, presentan mayor distorsión que las flechas que fueron tratadas

ya sea en proceso convencional o al vacío usando aceite como medio de temple. El proceso de carburizado convencional en horno continuo y tratamiento térmico al vacío con temple en aceite mostraron los mejores resultados con baja distorsión y propiedades mecánicas adecuadas para las flechas de transmisión. Los componentes tratados con temple en nitrógeno mostraron en esfuerzos residuales compresivos menores comparadas con aquellas sometidas a enfriamiento con aceite.

Además, con el fin de sentar las bases para el desarrollo de un modelo de simulación de distorsión por método de elemento finito se posicionaron 5 termopares a lo largo de la flecha de transmisión para obtener las curvas de enfriamiento y por medio del método inverso se obtuvieron los coeficientes de transferencia de calor entre la flecha y el medio de temple. Los valores obtenidos fueron validados usando un programa de cálculo multifísico.

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

Los aceros constituyen la categoría de los materiales metálicos que son utilizados ampliamente a nivel mundial, debido a que pueden ser manufacturados en grandes cantidades con especificaciones precisas y sin presentar un elevado costo (1).

El tratamiento térmico de metales y aleaciones metálicas es definido como un proceso de calentamiento y enfriamiento con el objetivo de obtener condiciones o propiedades mecánicas específicas (2).

La reciente tendencia en la manufactura de componentes automotrices es la de incrementar el rendimiento a través de reducir costos en materiales y el procesamiento. El endurecimiento superficial de los aceros al carbono debido al tratamiento térmico de carburizado es uno de los métodos más utilizados para alcanzar este objetivo. Este proceso es un tratamiento termoquímico, en el cual se difunde carbono a la superficie, resultando en la formación de martensita en el enfriamiento subsecuente (3). El objetivo de estos tratamientos de endurecimiento superficial es el de obtener una superficie dura, una buena resistencia al desgaste, mientras se mantiene un suave y tenaz núcleo, el cual brinda una resistencia a la fractura. La dureza es obtenida a través del temple, el cual provee un rápido enfriamiento desde una temperatura por encima de la temperatura de transformación del acero. La ductilidad del acero es obtenida por medio de un revenido (2).

Los métodos de carburizado incluyen, carburizado en gas, carburizado al vacío, carburizado con plasma, carburizado con baño de sal y carburizado en lote (4).

Asimismo existen otros métodos de endurecimiento superficial con difusión de nitrógeno o boro, entre los que destacan el nitruado, carbonitruado, nitroarburizado y boruración (4), sin embargo, este proyecto se enfocó en los procesos antes mencionados.

El carburizado al vacío se lleva a cabo mediante la saturación y difusión de carbono, en donde el austenizado se lleva a cabo en una cámara al vacío, seguido de la carburización en una presión parcial de un gas hidrocarburo y posteriormente de difusión en vacío, para finalizar con temple en aceite o gas. La carburización al vacío ofrece ventajas de excelente uniformidad y reproducibilidad por su mejorado control de proceso con hornos de vacío, mejoras en las propiedades mecánicas debido a la ausencia de oxidación intergranular y a reducción del tiempo ciclo. Las desventajas con este proceso van directamente relacionadas con el costo de los equipos y el rendimiento (4).

Desafortunadamente los tratamientos térmicos de carburizado causan una distorsión descontrolada y excesiva. La reducción de distorsión ha sido un problema en todos los procesos de tratamientos térmicos, incluyendo el carburizado por muchos años (3). La mayor distorsión aparece durante el cambio de fase volumétrico de austenita a martensita y a los grandes gradientes térmicos en el material, por lo tanto, una fase de calentamiento o enfriamiento no homogénea de un componente durante el tratamiento térmico a menudo conduce a grandes distorsiones. Aproximadamente del 20 al 40% de la distorsión final es causada por los parámetros de tratamiento térmico, como: tipo de horno, posiciones dentro de la cámara, uniformidad de enfriamiento, gases para el carburizado y el medio de enfriamiento. El resto es causado por la composición química del material, estructura y geometría de la pieza (5).

El enfriamiento o temple se refiere al proceso de enfriar partes de acero desde el punto de austenización (entre 815 y 870°C para aceros de grado maquinaria) lo suficientemente rápido para formar martensita y evitar a formación de estructuras más suaves tanto en la superficie como en el núcleo del componente. La función principal del medio de temple es controlar la rapidez con la que se extrae calor de la pieza para controlar sus propiedades mecánicas, como: dureza, resistencia a la tensión y ductilidad, el medio de temple debe, además, minimizar la distorsión generada por los esfuerzos residuales asegurando la uniformidad en toda la pieza (6).

Muchos materiales y soluciones se usan como medios de temple para aceros, las velocidades más rápidas se obtienen usando agua o salmuera (agua con sal). Algunos medios de temple menos drásticos son los polímeros a base de agua, aceites y sales. Velocidades más bajas de enfriamiento se pueden obtener enfriando con aire, gases inertes, o vacío (6).

La transmisión automotriz es un componente del tren motriz y es la responsable de transmitir el par y la velocidad del motor por medio de engranes y flechas hacia la caja diferencial, y este a su vez a las ruedas del vehículo haciéndolo que se mueva acorde a los requerimientos de manejo. La flecha de trasmisión usualmente se refiere a un elemento de máquina rotatorio, el cuál soporta distintos elementos de la transmisión, como engranes, poleas, entre otros (7).

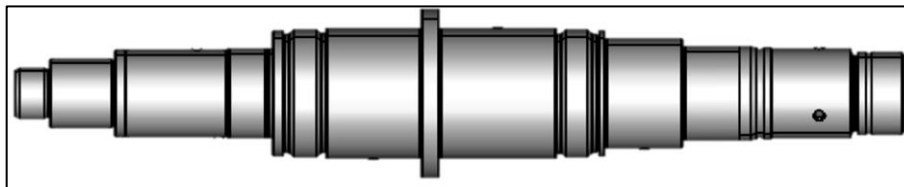


Fig. 1. Flecha principal de transmisión

En los últimos 20 años las simulaciones computacionales han ido tomando aceptación en la industria y la academia, como método para caracterizar las operaciones de procesamiento de los materiales, algunos de los procesos más comunes como, por ejemplo, el vaciado, formado, maquinado, proceso de soldadura y tratamiento térmico se han estudiado con simulaciones por computadora.

La determinación de los coeficientes de transferencia de calor entre la pieza y el medio de temple durante el enfriamiento es un paso sumamente importante para poder establecer una aproximación aceptable del gradiente térmico generado en el componente durante este proceso a través de programas de simulación.

SISAMEX es una empresa mexicana que pertenece al grupo QUIMMCO, y se encarga de manufacturar distintos componentes del tren motriz para vehículos pesados. Además, aplica el tratamiento térmico a varios componentes de acuerdo a los requerimientos especificados. En flechas de transmisión SISAMEX aplica dos rutas de tratamiento térmico de carburizado, el carburizado por lote en hornos tipo caja y el carburizado continuo en hornos de empuje, este tratamiento se aplica a tres diferentes modelos de flechas de transmisión con el objetivo de mejorar la resistencia al desgaste, tenacidad y la resistencia a la fatiga.

Después del tratamiento térmico de carburizado las flechas tienen que pasar a un proceso de enderezado para reducir la distorsión y poder continuar con el proceso de rectificado. En este proceso se obtiene un porcentaje alto de componentes con alta distorsión, la cual muchas veces no es posible reducir en el proceso de enderezado y el material termina por fracturar debido a la cantidad de flexiones recibidas o simplemente no se endereza a valores permisibles y queda por ser material de desperdicio.

En esta investigación se pretende comparar las distintas rutas de carburizado, horno tipo caja, continuo, y vacío con diferentes medios de temple para observar el efecto que tienen en propiedades microestructurales, mecánicas, de esfuerzos residuales y distorsión.

Asimismo, se calcularon los coeficientes de transferencia de calor de las principales zonas de la flecha de transmisión para poder correlacionar esta información con los resultados microestructurales, de esfuerzos residuales y distorsión.

Estos coeficientes de transferencia de calor, serán la base que permitirán desarrollar un modelo de simulación para la predicción de características microestructurales, esfuerzos residuales y distorsión en la flecha principal de transmisión en el siguiente trabajo de investigación.

## 1.1 Objetivos

General:

Determinar el efecto de la ruta de carburizado y temple sobre la distorsión, propiedades microestructurales y esfuerzos residuales en la flecha principal de transmisión.

Específicos:

- Realizar pruebas experimentales aplicando el proceso de carburizado atmosférico y al vacío con aceite y nitrógeno como medios de temple.
- Evaluar cambios dimensionales como longitudes, diámetros y excentricidad de las tres rutas de carburizado
- Evaluar la capa efectiva de carburizado, durezas, porcentaje de austenita retenida en capas endurecidas y microestructura en superficie y núcleo.
- Evaluar los esfuerzos residuales en superficie de diámetro principal las tres rutas de carburizado.
- Determinar coeficientes de convección HTC (*Heat transfer coefficient*) en el carburizado tradicional tipo caja con temple en aceite entre la flecha principal y el medio de temple mediante método inverso.

## 1.2 Hipótesis

El tratamiento térmico de carburizado al vacío mejorara las características metalúrgicas de los componentes evaluados. Los medios de temple gaseosos como el nitrógeno permitirán una reducción de hasta el 50% de distorsión en excentricidad comparado con los tratamientos que utilizan aceite como medio de temple.

El temple con gases generará una disminución de esfuerzos residuales compresivos en la superficie de la flecha, debido a la disminución de la severidad de enfriamiento, comparado con los tratamientos que utilizan temple con aceite.

La determinación de los coeficientes de transferencia de calor que interactúan entre el medio de temple y la flecha principal de transmisión permitirá correlacionar las zonas con mayor distorsión y sustentaran la base para crear un modelo de predicción sobre microestructura, propiedades mecánicas, esfuerzos residuales y distorsión.

## CAPITULO II

### ANTECEDENTES

#### 2.1 Tratamiento térmico de carburizado

El carburizado es la adición de carbono a la superficie de un acero de baja aleación a temperaturas generalmente entre 850 y 950°C, en donde la austenita que tiene la mayor solubilidad de carbono es la estructura cristalina estable en estas condiciones. El endurecimiento se lleva a cabo cuando la superficie rica en carbono es templada para formar martensita, en donde la superficie martensítica con alto contenido de carbono, alta resistencia al desgaste y resistencia a fatiga es superpuesta por un núcleo tenaz bajo en carbono (8).

El espesor de la capa carburizada de un acero está en función del tiempo de carburizado y del carbono disponible (potencial de carbono) en la superficie. Cuando se utilizan tiempos prolongados para capas altas, un potencial elevado produce una superficie con alto contenido de carbono, la cual puede resultar en un exceso de austenita retenida o carburos libres. Estos dos elementos microestructurales tienen efectos adversos sobre la distribución de esfuerzos residuales en la pieza endurecida. Por consiguiente, un potencial de carbono elevado debe aplicarse para ciclos de carburizado cortos. La selección del potencial de carbono depende también de la respuesta al carburizado del acero (8).

#### 2.2 Aceros utilizados para carburizado

Cuando se selecciona un acero para carburizado, es importante considerar distintos factores como mecanizado, resistencia al sobrecalentamiento, susceptibilidad a deformaciones durante el tratamiento térmico, templabilidad y características de diseño, así como resistencia mecánica tanto de la superficie como del núcleo (9).

Generalmente los aceros seleccionados para carburizado contienen menos de 0.25% C en peso. Aceros al carbono pueden ser carburizados, pero la respuesta al carburizado está limitada debido a la falta de los elementos aleantes. Esto se muestra en la Tabla 1, donde una lista de aceros carburizables son presentados (10).

La capa efectiva es generalmente medida de diferentes maneras. Un método es a partir de la capa efectiva en una muestra metalográfica de la pieza determinando la microdureza a lo largo de un perfil de profundidad desde la superficie de la muestra (9).



Tabla 1. Lista de aceros para carburizados más comunes y sus características (10).

Grado de Acero	Características y Beneficios
4620	Bajo costo, acero al Cromo, níquel, molibdeno. Utilizado donde la templabilidad nominal y respuesta de núcleo es requerida.
8620	Acero mayormente especificado para carburizado. Excelente respuesta a carburizado con buena templabilidad para la mayoría de las secciones transversales
4320	Mayor templabilidad para una respuesta mejorada de núcleo en secciones gruesas.
4820	Incremento en el contenido de níquel para mayor tenacidad en el núcleo, respuesta baja en largos tiempos de procesamiento
9310	Máximo contenido de níquel para máxima tenacidad en el núcleo, respuesta baja en largos tiempos de procesamiento

### 2.3 Clasificación de los procesos de carburizado

Los procesos más comunes que se encuentran en la industria son los siguientes:

**Carburizado en paquete.** Proceso que generalmente se desarrolla colocando el acero con carbón y coque. Se añade un activador para el carbón como el borato de bario ( $\text{BaB}_2\text{O}_4$ ) que promueve la liberación de gas  $\text{CO}_2$ , el activador cataliza con el exceso de  $\text{CO}_2$  y forma  $\text{CO}$ , el gas resultante reaccionando con el bajo carbono de la superficie del acero y forma carbono, que difunde dentro del acero. Este tratamiento se realiza entre  $920 - 940^\circ\text{C}$  de 2 a 36 horas (9).

**Carburizado líquido.** - Es realizado en recipientes de sal de cianuro fundida. Los cuales son calentados de forma interna o externa. Existen dos alternativas en este proceso. El primero es a baja temperatura entre  $840 - 900^\circ\text{C}$ , que es realizado cuando se requieren bajas capas de carbono ( $0.076 - 0.76\text{ mm}$ ). El segundo proceso es a alta temperatura de  $900 - 950^\circ\text{C}$  donde mayores capas son alcanzadas ( $0.76 - 3\text{ mm}$ ). El tiempo de proceso es entre 1 y 4 horas para ambos casos.

**Carburizado en gas.** Actualmente el proceso más utilizado en la industria, el cuál puede llevarse a cabo con cualquier gas carbonoso como metano, etano, propano, y gas natural. Los tiempos de carburizado son generalmente de 4 a 10 horas. La temperatura de carburizado es mayor que la temperatura crítica superior ( $>954^\circ\text{C}$ ). Las capas efectivas son por lo general hasta  $1.3\text{ mm}$ .

**Carburizado al vacío.** - Es un proceso limpio usado para introducir carbono en la superficie del acero, además previene la oxidación al límite de grano auténtico. Este proceso es llevado en un horno al vacío con presiones menores a las presiones atmosféricas normales. El principio de carburizado es exactamente igual al del proceso de carburizado de gas, la principal diferencia es el uso de la presión sub-atmosférica.

**Carburizado iónico.** - Este proceso se lleva a cabo usando metano como gas carbonoso a presiones de  $250-400\text{ Torr}$ , donde se producen cantidades significativas de carbono en forma de hollín, sin embargo, estas deficiencias pueden ser superadas usando un proceso iónico. La ionización del metano es producida con un alto voltaje (aprox.  $1000\text{V}$ ) a una presión relativamente baja de  $10\text{ Torr}$ . Entonces se forma una capa de gas reactiva cerca de las piezas a carburizar lo que impide la formación de hollín.

## **2.4 Fuentes de carbono**

Atmósferas carburizantes controladas se producen mezclando un gas portador con un gas enriquecedor (8), el cuál sirve como la fuente del carbono. El gas portador endotérmico, no es simplemente un diluyente, sino que desempeña un papel en la aceleración de la reacción de carburación en la superficie de las piezas. La cantidad de gas de enriquecimiento requerida por el proceso depende principalmente de la demanda de carbono, es decir, la velocidad a la que el carbono es absorbido por la carga de trabajo.

El gas endotérmico es una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y nitrógeno (con cantidades pequeñas de dióxido de carbono, vapor de agua, y metano) que se produce al hacer reaccionar un hidrocarburo como el gas natural (principalmente metano), propano o butano con aire. Este gas se produce en un generador utilizando una relación de alimentación de aire e hidrocarburo, en el caso de aire metano la relación es de 2.5, mientras que para la relación de aire con propano es de 7.5. Estas reacciones cambiarán dependiendo de la composición de la alimentación de gases de hidrocarburo y el contenido de vapor de agua del aire del medio ambiente (8).

## **2.5 Equipos de carburizado**

Los hornos de carburizado varían ampliamente según su construcción, sin embargo, pueden ser divididos en 2 categorías, hornos tipo caja y hornos continuos (11).

### **2.5.1 Hornos tipo caja**

Los hornos de carburizado tipo caja pueden ser: los llamados “de pozo” y los horizontales.

Los hornos horizontales son utilizados para carburizar y templar directamente. Este horno está diseñado para ser descargado en un vestíbulo que cubre el tanque de temple, debido a que la atmósfera del horno también fluye hacia el vestíbulo, las piezas se pueden mantener libres de oxidación después del temple. Estos tipos de hornos pueden ser capaces de procesar diferentes tipos de cargas variando los requerimientos de capa endurecida. La Fig. 2 muestra el esquema de un horno tipo caja (11).

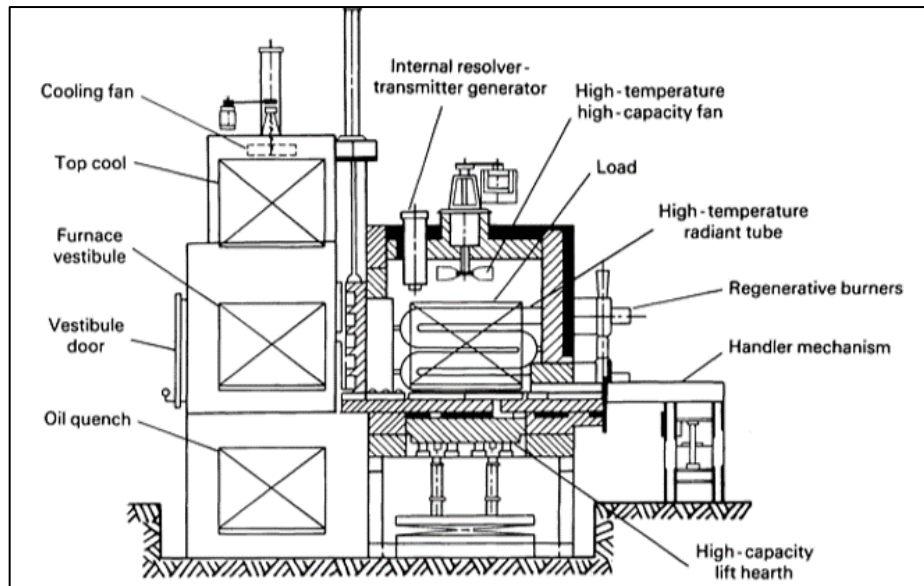


Fig. 2. Esquema de Horno tipo Caja (11)

## 2.5.2 Horno continuo

Hay varios tipos de hornos en esta clasificación, algunos estos son del tipo malla, rotatorios, de rodillos y distintos hornos de empuje. La mayoría de estos pueden ser construidos con el temple completamente sellado, por lo cual las piezas son producidas libre de oxidación.

## 2.6 Variables de proceso

La operación exitosa del proceso de carburizado depende del control de las principales variables, las cuales son: temperatura, tiempo y composición de la atmosfera (12).

### 2.6.1 Temperatura

La máxima velocidad a la cual el carbono puede ser añadido en el acero está limitada por la velocidad de difusión del carbono en la austenita. Esta tasa de difusión incrementa cuando se aumenta la temperatura, por ejemplo, la velocidad de adición del carbono a 925 °C es 40% mayor que a 870 °C. La temperatura comúnmente usada para carburizado es de 925 °C, ya que esta temperatura permite una difusión considerablemente rápida sin tener un alto deterioro de los componentes del horno o herrajes para posicionamiento de las cargas.

### 2.6.2 Tiempo

La Fig.3 muestra el impacto del incremento en la temperatura de carburizado para obtener una capa endurecida de 1.5 mm, se observa entonces que usando una temperatura de 900 °C se necesitan hasta 17 horas para alcanzar la capa de 1.5mm, mientras que incrementando hasta 1035 °C solamente se necesitan 3.6 horas.

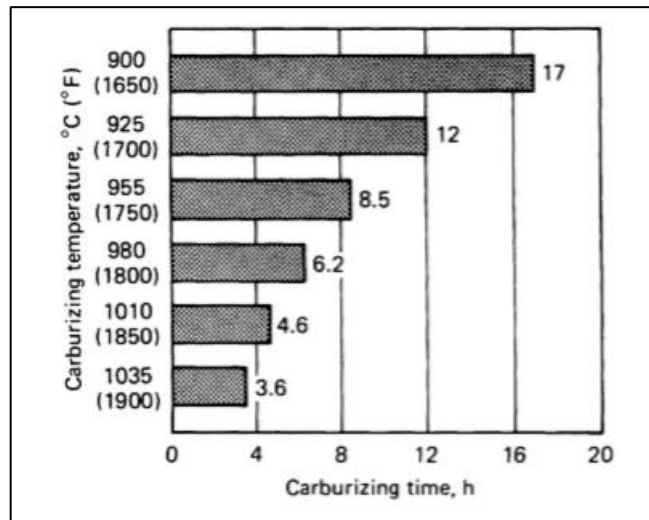


Fig. 3. Efecto de la temperatura en el tiempo de carburizado para obtener una capa de 1.5mm. (11).

### 2.6.3 Potencial de carbono

El potencial de carbono de la atmósfera del horno está definido como el contenido de carbono en hierro puro que está en equilibrio termodinámico con la atmósfera. El potencial de carbono en el horno debe ser mayor que el carbono potencial de la superficie de las piezas con el fin de que la carburización se lleve a cabo. Es esta diferencia en potencial de carbono la fuerza motriz para que el carbono se transfiera a las partes.

### 2.6.4 Difusión de carbono

El efecto combinado de tiempo, temperatura y concentración en la difusión de carbono en austenita puede ser expresada por la ley de difusión de Fick. La primera ley de Fick menciona que el flujo de una sustancia difusiva perpendicular al plano de la unidad de

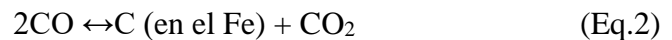
área de la sección transversal es proporcional al gradiente de carbono local perpendicular al plano. La constante de proporcionalidad es el coeficiente de difusión D, el cual tiene como unidades (distancia)<sup>2</sup>/tiempo. La segunda ley de Fick es un balance de materia dentro de un volumen elemental del sistema: el flujo del carbono en un volumen elemental de hierro menos el flujo del carbono fuera del volumen elemental igual a la velocidad de carbono acumulado en el volumen. Combinando estas dos leyes permite obtener una ecuación diferencial parcial que describe el proceso de difusión.

### 2.6.5 Gas para atmósferas de carburizado

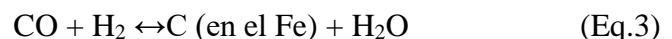
La atmósfera en el proceso de carburizado consiste principalmente de un gas endotérmico portador enriquecido con una adición de metano, el cuál sirve como fuente de transporte del carbono a la superficie de la carga. Los principales constituyentes de la carga son: CO, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, y CH<sub>4</sub>. De estos el N<sub>2</sub> es un gas inerte y actúa solo como diluyente. Las cantidades de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, y H<sub>2</sub>O presentes son muy cercanas las proporciones esperadas en el equilibrio de la reacción reversible:



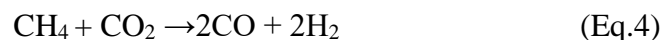
Aunque la secuencia de reacciones involucradas en la carburación no se conoce en detalle, se sabe que el carbono se puede agregar o eliminar rápidamente del acero mediante las reacciones reversibles:



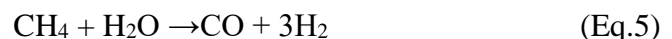
y



El enriquecimiento con metano del gas endotérmico proporciona carbono para el proceso mediante reacciones lentas como:

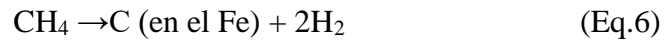


y



Las cuales reducen las concentraciones de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, respectivamente. Estas reacciones regeneran el CO y el H<sub>2</sub>, lo que dirige las reacciones de las ecuaciones 2 y 3 a la derecha. Debido a que el contenido de metano de las atmósferas de carburación suele ser muy

superior al contenido que se espera en el equilibrio, dados los contenidos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O presentes, es evidente que las reacciones en la ecuación 4 y 5 no se acercan al equilibrio. La suma de las reacciones en las ecuaciones 2 y 4 y en las ecuaciones 3 y 5 se reduce a:



Por lo tanto, con un contenido constante de CO<sub>2</sub> y un punto de rocío constante, el cambio en la composición de la atmósfera neta durante la carburación es una reducción en el contenido de metano y un aumento en el contenido de hidrógeno. En la mayoría de las operaciones comerciales, los caudales en la atmósfera son lo suficientemente altos y la tasa de descomposición del metano es lo suficientemente baja para evitar una gran acumulación de hidrógeno durante un ciclo de carburación. Sin embargo, con las cargas de carburación que tienen un área de superficie alta, hay una caída en el contenido de CO del 1 al 3% al comienzo del ciclo cuando la demanda de carbono es mayor. Esto es causado por la dilución de la atmósfera del horno con hidrógeno.

El control del potencial de carbono durante la carburación se logra variando la velocidad de flujo del gas enriquecedor de hidrocarburos, mientras se mantiene un flujo constante de gas portador endotérmico. Como base para regular el flujo de gas de enriquecimiento, se monitoriza la concentración de algunos de los componentes de la atmósfera del horno:

- Contenido de vapor de agua por medición del punto de rocío
- Contenido de dióxido de carbono por análisis de gas infrarrojo
- Potencial de oxígeno usando un sensor de oxígeno de zirconia

Las dos primeras cantidades proporcionan medidas del potencial de carbono según las reacciones de las ecuaciones 2 y 3. El potencial de oxígeno está relacionado con el potencial de carbono por la reacción:



Cuando el contenido de monóxido de carbono de la atmósfera permanece relativamente constante, tanto el dióxido de carbono como el potencial de oxígeno proporcionan el potencial de carbono requerido para que se lleve a cabo el proceso. Para que el punto de rocío sea una medida válida del potencial de carbono, el producto de los contenidos de hidrógeno y monóxido de carbono debe ser estable. Si el contenido de hidrógeno de la atmósfera del horno aumenta, como resultado de la carburación o la formación de hollín, se alterarán las relaciones entre el contenido de CO<sub>2</sub>, el potencial de oxígeno, el punto de rocío y el potencial de carbono. Por esta razón, algunos sistemas de control de procesos incluyen el análisis infrarrojo de CO y la medición del potencial de CO<sub>2</sub> u oxígeno para

que se pueda calcular un verdadero potencial de carbono para todas las condiciones operativas.

## **2.7 Carburizado al vacío**

El proceso de carburizado al vacío es un proceso de saturación y difusión en donde el material a ser procesado es austenizado en una cámara sin presencia de oxígeno, carburizado en una presión parcial de gas de hidrocarburo, difundiendo en vacío y después templado en aceite o gas. Comparado con el proceso de carburizado de atmósfera convencional, este proceso ofrece grandes ventajas como excelente uniformidad y repetibilidad debido al alto grado de control de proceso que ofrecen estos equipos, mejorando las propiedades mecánicas debido a la ausencia de oxidación intergranular, además de permitir utilizar temperaturas mayores de proceso, lo cual permite tener tiempos de ciclo menores (13).

El carburizado al vacío se realiza típicamente en 4 pasos, los cuales se describen a continuación.

### **2.7.1 Calentamiento y homogenización**

Este es el primer paso y es donde el material es sometido a calor para alcanzar la temperatura deseada, generalmente entre 845 y 1040 °C, después es necesario mantener esta temperatura lo suficiente para asegurar que el material se encuentre homogéneamente en la temperatura de trabajo.

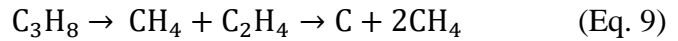
Durante la primera etapa se debe prevenir la oxidación intergranular, es por ello que en este sistema se utiliza presión negativa (vacío) entre los rangos de 13 a 67 Pa (0.1 a 0.5 torr), dependiendo del diseño del sistema.

### **2.7.2 Etapa de saturación**

Esta etapa es donde se lleva a cabo la absorción de carbono en la austenita a la temperatura de trabajo. La etapa de saturación se alcanza llenando la cámara de vacío con presión parcial de gases de hidrocarburo.



Los gases utilizados principalmente son: acetileno ( $C_2H_2$ ), propano ( $C_3H_8$ ) y en menor medida el etileno ( $C_2H_4$ ). El carbono es liberado en la superficie del material a través de reacciones como:



Desarrollos realizados en el pasado han demostrado que el acetileno tiene un desempeño excelente para el carburizado al vacío. Esto es por la química del acetileno ya que a diferencia del propano o etileno la disociación del acetileno libera 2 átomos de carbono a diferencia de 1 átomo liberado en los otros casos, asimismo evita la formación de metano no reactivo.

### **2.7.3 Difusión**

Si el acero a carburizar fuera endurecido con el gradiente de carbono resultante solo de la etapa de saturación, resultaría en una microestructura indeseable junto a la capa carburizada, esta se vería reflejada una interface entre superficie y núcleo extremadamente abrupta. Debido a esto, la etapa de difusión permite que el carbono se conduzca hacia el interior del material desde la superficie de acero, resultando en una superficie con menos contenido de carbono y una gradual interfaz entre la superficie y el núcleo.

### **2.7.4 Enfriamiento**

El cuarto paso del proceso es el de enfriamiento, el cuál puede realizarse en aceite de temple o gas (helio, nitrógeno o argón) de 2 a 20 bares comúnmente. Cuando el carburizado se lleva a cabo a una alta temperatura es común bajar la temperatura antes de templar, tal como se hace en el proceso de atmósfera convencional.

### **2.7.5 Ventajas del tratamiento térmico de carburizado al vacío**

Algunas de las ventajas del proceso de carburizado al vacío son:

- Ausencia de oxidación Intergranular.
- Capacidad de usar temperaturas mayores debido al tipo de equipos y a naturaleza del proceso.
- Produce una capa y perfil de carbono más uniforme.
- Fácil integración a la línea de manufactura. El proceso es limpio, seguro, fácil de operar y fácil de mantener.
- No hay flamas expuestas ni gases de contaminación.
- Capacidad de automatización completa, usando recetas o control de número de parte de los ciclos de tratamientos térmicos
- A través de simulaciones por computadora se alcanzan controles de proceso precisos que permiten ajustes a ciclos establecidos.
- Consumo de energía solo cuando es necesario, esto por la naturaleza de la operación al vacío.
- Normalmente se obtiene menor distorsión en comparación con otros procesos (14).

### **2.8 Tipos de medios de temple**

El requerimiento principal de los distintos medios de temple es la de extraer calor por lo menos de la superficie, de una porción suficiente o incluso de toda la sección transversal del componente a una velocidad no menor a la crítica de enfriamiento. Si esto se cumple, la austenita enfriada no transformará en estructuras perlíticas y, por lo tanto, la microestructura será predominante en martensita o bainita. Los medios de temple modernos, además, deben cumplir otros requerimientos (15) :

- Presentar una cinética de enfriamiento adecuada dentro de todo el rango de temperaturas, particularmente la velocidad de enfriamiento por debajo de la temperatura de inicio de transformación de martensita ( $M_s$ ) debe ser lo suficientemente baja para prevenir deformaciones inaceptables durante el enfriamiento.
- Ser estables durante su vida en servicio, resistentes a la descomposición térmica y oxidación.
- Cumplir los estándares y requerimientos que conciernen a la toxicidad, inflamabilidad y la protección del medio ambiente y entorno laboral.

- Los residuos generados en la superficie deben ser fáciles de remover mediante el uso de lavadoras, evaporadoras, entre otros.
- El costo por unidad de producción debe de ser bajo.

### **2.8.1 Clasificación general y comparación de medios de temple**

La clasificación de los medios de temple puede basarse por su estado de agregación de materia (sólido, líquido o gaseoso), la mayoría de los medios de temple son líquidos. Los medios de temples gaseosos son menos numerosos. De acuerdo con este criterio, los medios fluidos, compuestos de sólidos en polvo fluidificados por una corriente de gases, y los rociadores de agua - aire o de agua nebulizada pueden clasificarse como medios mixtos.

El grupo de medios de temple líquidos es dividido en tres subgrupos: agua, aceite y sales fundidas (15).

### **2.8.2 Aceites minerales**

Este tipo de medio de temple es el más utilizado debido a que provee la combinación óptima de alta dureza con la distorsión mínima. Cuando se compara con otros medios de temple (excepto agua), los aceites son más fáciles de controlar, su rango de aplicación es muy amplio, aunque no se debe ignorar el peligro de incendio al apagar cargas pesadas con relaciones altas de área de superficie a masa. (15).

### **2.8.3 Clasificación y descripción general de aceites de temple**

Usualmente los productores de aceite para medios de temple ofrecen varias opciones, de acuerdo a las temperaturas de operación, todos los aceites comerciales disponibles pueden ser divididos en dos grupos, aceites de baja temperatura (fríos) y aceites de alta temperatura (calientes). También pueden ser divididos por el factor o poder de enfriamiento, el cual tiene 3 grupos; aceites lentos y rápidos de baja temperatura (fríos) y de alta temperatura (calientes). La Tabla 2 enlista los aceites bajo estos criterios. (15).

Tabla 2. Clasificación y Descripción general de los aceites de temple (16)

Clasificación por rango de temperatura	Clasificación según su poder de enfriamiento	Subgrupos de acuerdo a composición química	Viscosidad a 50 °C	Punto ebullición °C	Contenido de ceniza %	Contenido de coque
A aceites de baja temperatura (hasta 90 °C)	1 Aceites convencionales (lentos)	a Aceites Convencionales	6°E/45CsT/	230	0.01	0.05
		b Aceites compuestos de aditivos vegetales o animales				
	2 Aceites rápidos y de alto rendimiento	a Aceites rápidos y de alto rendimiento			0.01	0.010
		b Aceites rápidos y de alto rendimiento con aditivos vegetales o animales				
B Aceites calientes (arriba de 90 °C)	Aceites calientes (para martemplado y austemplado)	a Aceites convencionales	6°E/45CsT/	230	0.01	0.10
		b Aceites de alto desempeño			0.01	

Los aceites convencionales (grupo 1) tienen viscosidades cinemáticas en el rango de 5.5 a 50 mm<sup>2</sup>/s a 50 °C y contiene aditivos que incrementan la resistencia al envejecido. El poder de enfriamiento de este grupo de aceites es determinado por la viscosidad del aceite. Aceites con baja viscosidad enfrían más rápido que aquellos con alta viscosidad.

Los aceites rápidos (grupo 2) están compuestos por fracciones de destilación de baja viscosidad y contienen aditivos que mejoran la humectación al adherirse a la superficie de la pieza para aumentar el poder de enfriamiento. Las superficies de las piezas templadas en estos aceites usualmente oscurecen durante el enfriamiento. El poder de enfriamiento de los aceites rápidos, especialmente aquellos con bajas viscosidades es tan alto que incluso durante el enfriamiento los aceros al carbono con secciones de hasta 25 mm son

endurecidos completamente. De este grupo de aceites rápidos, los de baja viscosidad son más recomendables para el enfriamiento de piezas de grandes secciones transversales a diferencia de los aceites más densos, ya que el rango de temperatura de ebullición de los aceites anteriores se posiciona más bajo que el de los últimos.

Los aceites de alta temperatura (calientes, grupo 3) alcanzan temperaturas de hasta 200 °C, e incluso 250 °C, sin degradar la vida del aceite. El poder de enfriamiento es mucho mayor que los baños de nitrato y con la adición de emulsionantes apropiados que no alteren el poder de enfriamiento las piezas podrán ser lavadas con agua como los grupos 1 y 2 de aceites. (15).

#### **2.8.4 Temple en gas con alta presión (HPGQ)**

El temple en gas con alta presión o temple “seco” en componentes carburizados usando gases inertes como medio de temple ha ganado popularidad en recientes años debido a que presenta ventajas económicas y ecológicas sobre el temple con aceite o convencional.

Gases de temple como helio y nitrógeno son inertes, no dejan residuos en las piezas ni equipos. Las propiedades como la conductividad térmica, capacidad calorífica y viscosidad determinan la capacidad de temple del gas. El enfriamiento con gas puede incrementar aumentando la velocidad y presión del gas. Presiones de gas de 10 a 40 bar con velocidades de 10 a 20 m/s son utilizados comúnmente para temple.

Al utilizar gas como medio de temple es posible obtener distorsión y deformación al igual que los procesos con medio de temple líquidos, sin embargo, usando gas como medio de temple la transferencia de calor sobre el componente es más homogénea y por lo tanto tiene menos tendencia a sufrir distorsión durante el enfriamiento.

Las aplicaciones comunes incluyen flechas y transmisiones de engranes usados en la industria automotriz, las cuales suelen carburarse al vacío usando una temperatura de 980 °C y temple con helio a 20 bar.

La Fig.4 muestra el coeficiente de transferencia de calor para diferentes medios de temple utilizados en la industria, en ésta se observa que los gases presentan menor coeficiente de transferencia comparado con aceite y agua. Para garantizar una buena efectividad en el temple depende principalmente del coeficiente de transferencia de calor del medio de temple, la templabilidad del acero y la geometría del material.

Coeficientes de transferencia de calor (HTC) altos son preferidos en la mayoría de los casos, sin embargo, aceros con alta templabilidad pueden utilizar medios de temple con

bajo coeficiente de transferencia, como el helio y nitrógeno, los cuales suelen utilizarse para reducir distorsión, esfuerzos y agrietamientos manteniendo la resistencia del acero.

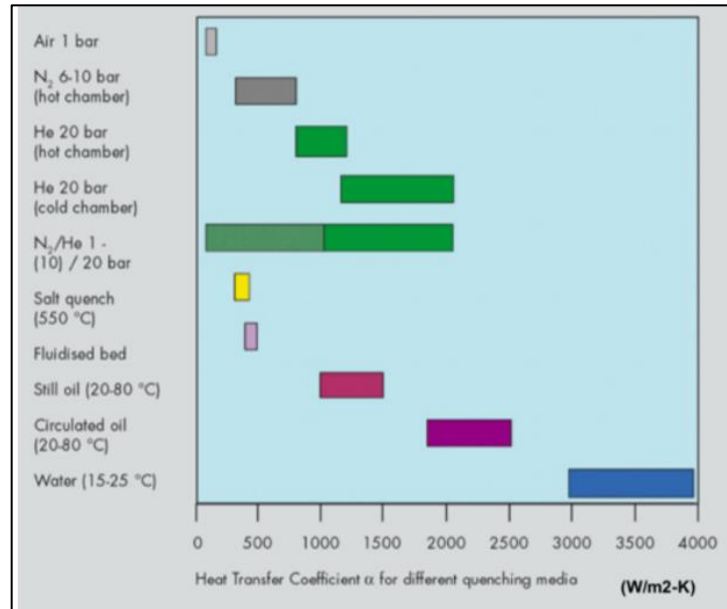


Fig. 4. Coeficientes de transferencia de Calor (HTC) para diferentes medios de temple (17) .

## 2.9 Curvas de enfriamiento

El estudio del comportamiento del temple a través del análisis de las curvas de enfriamiento es cada vez más utilizado y quizás es el método de caracterización del medio de temple que brinda más información. Las curvas de enfriamiento son obtenidas templando una pieza de prueba con uno o más termopares en un medio de temple fluido.

Las piezas de prueba son calentadas a elevada temperatura (por encima de la temperatura crítica  $AC_3$ ) y posteriormente templadas en el medio de temple de interés. Un equipo de adquisición de datos se utiliza para grabar los cambios de temperatura con respecto al tiempo. Las curvas tiempo - temperatura resultantes reflejan las características de remoción de calor del medio de temple, masa y área superficial de la pieza de prueba. Las curvas de enfriamiento obtenidas brindan información sobre la velocidad de enfriamiento alcanzada en la pieza.

Se consideran tres etapas de extracción de calor asociadas con el temple en líquidos, estas se refieren como etapas A, B y C. La Fig.5 muestra una curva tiempo - temperatura

ilustrando las tres etapas mencionadas. La curva de tasa de enfriamiento que es el negativo de  $dT/dt$  también es mostrada (18).

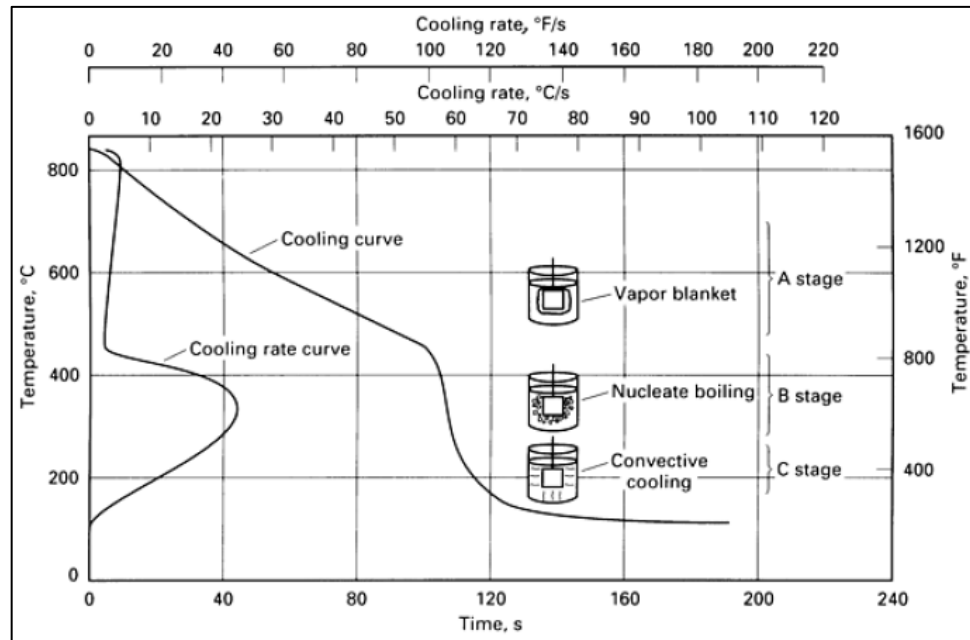


Fig. 5. Curva y velocidad de enfriamiento de una probeta con un termopar localizado al centro de diámetro de 25mm templado con agua a 95 °C corriendo a 15m/min (18).

**Etapa A.** Esta etapa de enfriamiento se caracteriza porque el vapor del medio de temple rodea a la pieza, esta etapa es también conocida como etapa de vapor. La capa de vapor es mantenida mientras el suministro de calor desde el interior de la pieza hacia la superficie excede la cantidad de calor necesaria para evaporar el medio de temple y mantener la fase vapor. El enfriamiento en esta etapa es lento y ocurre principalmente por radiación a través de la capa de vapor.

**Etapa B.** La mayor velocidad de enfriamiento ocurre en esta etapa también conocida como etapa de ebullición. Durante este periodo la capa de vapor se rompe y altas tasas de extracción de calor son alcanzadas. El calor se extrae rápidamente de la superficie a medida que el medio de temple entra en contacto con la superficie del metal y se vaporiza.

**Etapa C.** Esta etapa es llamada también la etapa de enfriamiento convectivo. Esta etapa comienza cuando la temperatura de la superficie de la pieza se reduce por debajo del punto de ebullición del medio de temple, donde la ebullición para y comienza el enfriamiento por conducción y convección en el medio de temple. Esta velocidad es dependiente de la

viscosidad cinemática del líquido de temple, por lo general la velocidad de enfriamiento disminuye con el incremento de esta propiedad.

### **2.9.1 Análisis de las curvas de enfriamiento**

Hoy en día es generalmente reconocido que la curva de velocidad de enfriamiento, la cual se calcula a través de la primera derivada de los datos de tiempo y temperatura, es probablemente más informativa que la curva tiempo y temperatura. Las tasas de enfriamiento pueden calcularse cuando los datos son obtenidos usando equipos de adquisición de datos digitales o computadoras personales equipadas con un convertidor análogo - digital.

La característica del calor extraído por el medio de temple es comúnmente estudiada usando una pieza estándar (probeta). Que puede ser una barra, placa, o esfera. La configuración típica es una barra cilíndrica de longitud mínimo 4 veces mayor al tamaño del diámetro, esto para minimizar efectos laterales de enfriamiento. Un termopar es localizado en el centro de la probeta. Para algunos estudios se complementa la información con un segundo termopar cerca de la superficie de la probeta. Esto permitirá la cuantificación de cambio de temperatura sobre la probeta durante el proceso de temple.



### 2.9.2 Método inverso de conducción de calor

Los problemas inversos de conducción de calor (IHCP por sus siglas en inglés) son utilizados para calcular los coeficientes de transferencia de calor en la superficie de la probeta de estudio. Un problema inverso de conducción de calor significa que alguna de las condiciones fronteras iniciales o propiedades del material no están completamente definidas como se determina a partir de los perfiles de temperatura medidos en algunas ubicaciones específicas (19).

Con el avance en la capacidad de equipos de cómputo, gran variedad de técnicas numéricas y métodos computacionales han sido desarrollados para proporcionar soluciones precisas en problemas inversos de conducción de calor (IHCP). Entre estos métodos de optimización estocástica se han convertido en un medio popular para resolver problemas inversos, debido a su capacidad de encontrar el resultado óptimo global sin calcular el complicado gradiente de la función objetivo.

Los algoritmos genéticos como los aplicados por Verma S. y Kim K.W. (20) (21) se aplican con éxito para resolver muchos tipos de problemas de transferencia de calor inversa. La evaluación cuantitativa de diferentes técnicas de optimización numérica muestra (22) que los métodos estocásticos pueden ofrecer resultados más precisos para IHCP que los enfoques de gradiente en la recuperación de condiciones complejas de frontera térmica.

### 2.9.3 Transferencia de calor durante el temple

La extracción de calor de las piezas durante el proceso de temple puede ser matemáticamente expresado en términos del interfaz efectivo del coeficiente de transferencia de calor. El medio de temple debe entregar un coeficiente de transferencia de calor de interfaz suficientemente alto para producir una velocidad de enfriamiento que minimice la transformación de austenita en ferrita o perlita y produzca la cantidad deseada de bainita y martensita (15).

La interfaz del coeficiente de transferencia de calor se define como:

$$h = \frac{q}{A(T_1 - T_2)} \quad (\text{Eq.11})$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor;  $q$  es el calor que fluye desde la pieza hacia el medio de temple;  $A$  es el área de la pieza;  $T_1$  es la temperatura de la superficie de la pieza; y  $T_2$  es la temperatura del medio de temple.

#### 2.9.4 Cálculo de transferencia de calor

Con el fin de calcular el coeficiente de transferencia de calor de las curvas que se extraen de las localizaciones de la pieza de prueba, normalmente un modelo en dos dimensiones de conducción de calor axisimétrico es considerado para estimar la distribución de temperatura en una pieza cilíndrica (el radio y la longitud de la pieza se denota con las letras  $r$  y  $z$  respectivamente). El cilindro es sometido a coordenadas longitudinales locales y el coeficiente de transferencia de calor HTC ( $z,t$ ) en todas su superficie. La conductividad térmica y calor específico de material varían con la temperatura,  $k(T)$  y  $C_p(T)$ , respectivaente.

La formulación matemática de este problema de conducción de calor no linear se describe en la Ec. 12

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

Con las condiciones frontera iniciales

$$T(r, z, 0) = T_0 \quad (13)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{0 \leq z \leq Z} = \text{HTC}(z,t) [T_q - T(r, z, t)] \quad (14)$$

$$r = R$$

Donde  $r$  y  $z$  son coordenadas locales,  $t$  es el tiempo,  $\rho$  es la densidad,  $T_0$  es la temperatura inicial,  $T_q$  es la temperatura del medio de temple. El método de diferencias finitas explicitas de Schmidt se utiliza para discretizar las ecuaciones (12-14) y resolver el problema (23).

La temperatura a diferentes tiempos está dada por mediciones a  $n$  puntos en la región sólida, localizada en  $r_k$ , ( $k=1 \dots n$ ). Llamando  $T_k^m$  a las temperaturas medidas, y  $T_k^c$ , la temperatura calculada en esos puntos. La solución a este problema se obtiene minimizando la siguiente función Ec. 15:

$$= S(\tau_1, \dots, \tau_m) = \sum_{k=1}^n (T_k^m - T_k^c)^2 = \min \quad (15)$$

Donde  $n$  es el número total de mediciones de temperatura, es decir, el número de puntos multiplica el número de mediciones en cada punto. El problema inverso se reformula como un problema de optimización. Se ha desarrollado una variedad de técnicas numéricas y analíticas para resolver los problemas de optimización (19).

La Fig. 6 muestra el método para el cálculo inverso del coeficiente de transferencia de calor.

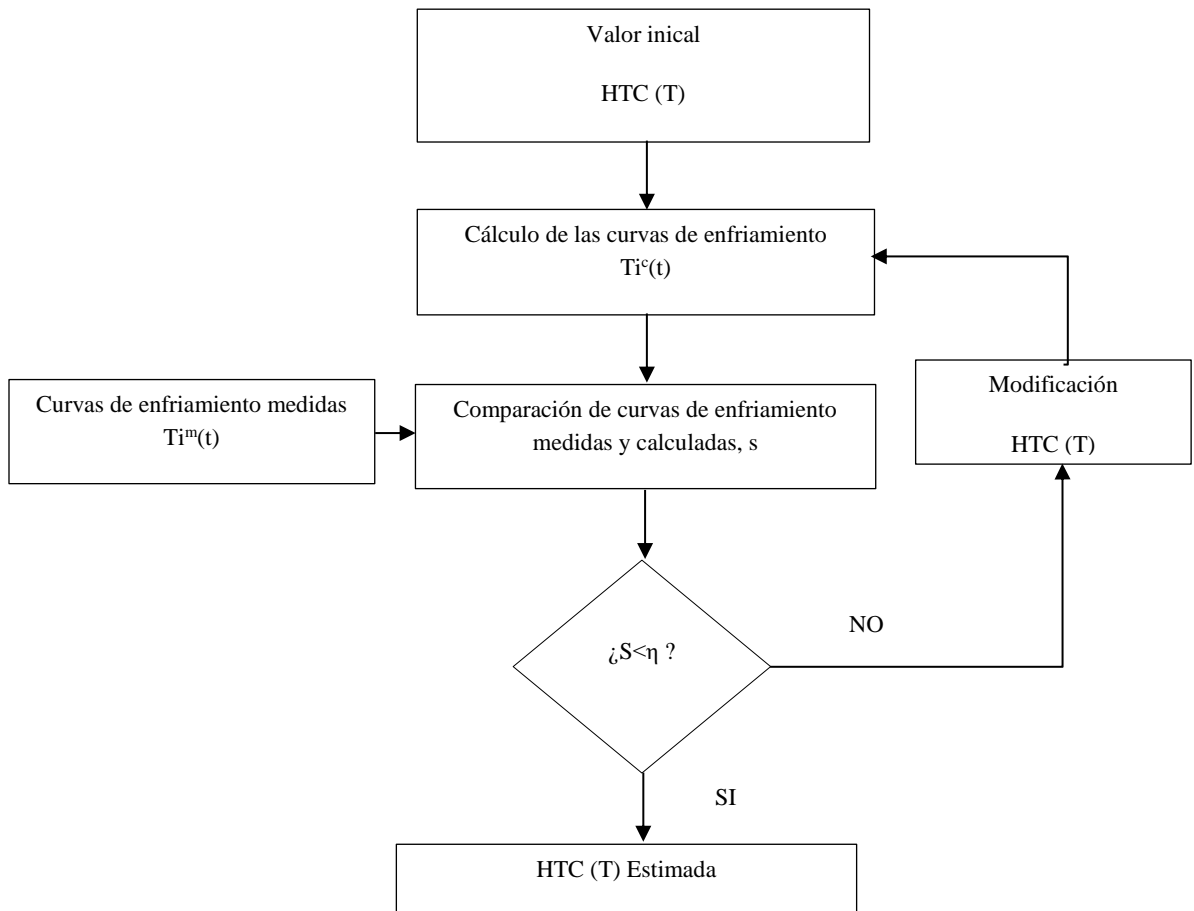


Fig. 6. . Método para cálculo del coeficiente de transferencia de calor

## **2.9 Esfuerzos residuales y distorsión en componentes carburizados**

Los tratamientos térmicos a menudo causan deformaciones y esfuerzos residuales, los cuales son relacionados a problemas como grietas de temple, deformación y distorsión. Los esfuerzos residuales pueden ser definidos como los esfuerzos internos contenidos en un cuerpo sin la interacción de una fuerza externa o gradiente de temperatura.

Los principales efectos de los esfuerzos residuales incluyen cambios dimensionales y resistencia a la propagación de grietas. Los cambios dimensionales ocurren cuando los esfuerzos residuales (o una porción de estos) en un cuerpo son eliminados. En el caso de la propagación de grietas, los esfuerzos residuales pueden ser benéficos o perjudiciales según la dirección de estos que pueden ser compresivos o de tensión.

### **2.10 Esfuerzos residuales compresivos**

Los esfuerzos residuales compresivos en las capas superficiales generalmente son beneficiosos debido a que estos reducen los efectos de los esfuerzos de tensión que pueden producir agrietamiento en el material. Por lo tanto, los esfuerzos residuales compresivos contribuyen al incremento de la resistencia a la fatiga de los componentes.

### **2.13 Esfuerzos residuales a tensión**

Los esfuerzos residuales en la superficie de una pieza son generalmente indeseados debido a que estos incrementan la posibilidad de grietas por temple, marcas en el rectificado a bajos esfuerzos y tendencia a reducir la resistencia mecánica de un componente generando fallas por fatiga.

### **2.14 Generación de esfuerzos residuales en carburizado y temple**

Cuando los aceros de bajo carbono son carburizados y templados, primero el núcleo transforma a alta temperatura (600 a 700 °C) a ferrita y perlita con la consiguiente relajación de las tensiones de transformación. Después la superficie alta en carbono transforma a martensita a baja temperatura (menor a 300 °C), acompañada de una expansión de volumen, dando como resultado la generación de esfuerzos residuales de compresión a lo largo de la capa carburizada.

Las diferencias notorias entre los porcentajes de carbono entre la capa y el núcleo determinan la secuencia de la fase de transformación en el enfriamiento después del carburizado y los esfuerzos residuales compresivos resultantes desarrollados en la capa. Del mismo modo, los esfuerzos compresivos residuales en la capa incrementan a medida que el porcentaje de carbono en el núcleo disminuye. Incrementando la capa de carburizado se reduce la contribución del núcleo con bajo carbón en el desarrollo de esfuerzos compresivos en la capa, de este modo afectan negativamente las propiedades a la fatiga (24).

Los esfuerzos compresivos máximos se desarrollan a una cierta distancia de la superficie. Este efecto ocurre debido a la presencia de austenita retenida, cuyo grado depende de la composición del acero, contenido de carbono en la superficie, temperatura y severidad de temple (25).

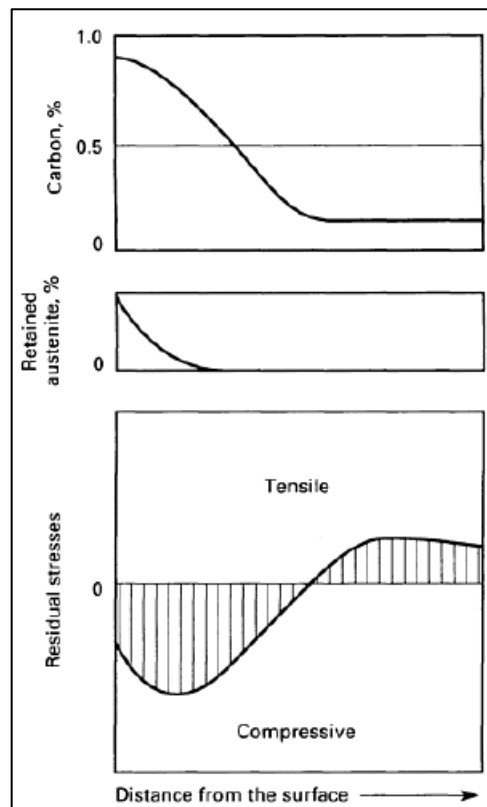


Fig. 7. Relación entre contenido de carbono, austenita retenida y patrón de esfuerzos residuales desde la superficie y hasta el núcleo (25).

Existen dos métodos de medición de esfuerzos residuales: destructivos y no destructivos descritos a continuación.

### **2.14.1 Método Destructivo**

Este método es antiguo, pero razonablemente preciso y puede emplearse en sitios confinados (26), sin embargo, es tedioso, consume mucho tiempo y es caro (27). El método de perforación de agujero es el más utilizado para la medición de esfuerzos residuales. Este método consiste en colocar galgas extensiométricas en la superficie de la muestra para medir las deformaciones. Luego, se utiliza una fresa de guía rígida para perforar un orificio pequeño, recto, circular, perpendicular y de fondo plano que no exceda los 3.2 mm (0.125 pulgadas) en el centro de la roseta y en la superficie del componente que se analiza. La redistribución de la deformación que se produce en la superficie en el área circundante del pozo (resultante del alivio de la tensión residual) se mide luego con las galgas extensiométricas instaladas previamente. La tensión residual se calcula en un gran número de puntos en una superficie a partir de las mediciones de deformación utilizando el método establecido (28) (29).

### **2.14.2 Método no destructivo**

Los métodos no destructivos, como su nombre lo indica son aquellos en los cuales la muestra puede evaluarse sin la necesidad de realizar alguna modificación física al componente, usualmente solo involucra limpieza del área a inspeccionar, uno de los métodos más usados es el método de difracción de rayos-X. La principal dificultad con los métodos no destructivos es que las mediciones de los parámetros de la red cristalográfica, velocidades ultrasónicas, o cambios magnéticos son indirectamente relacionados con el esfuerzo residual (27) (30).

### **2.14.3 Método de difracción de rayos-X**

Esta técnica involucra la medición de esfuerzos residuales a escalas macro y micro. En la mayoría de las ocasiones el método de difracción de rayos-X ha sido utilizado para proveer valores cuantificables de perfiles de esfuerzos residuales de la superficie o de componentes totalmente endurecidos (31). Esta técnica depende de la determinación de las deformaciones y las diferencias de esfuerzos inducidos en los espacios de la red cristalográfica. Las deformaciones macro-residuales son medidas a partir del cambio.

El método de rayos-X más utilizado para determinar los esfuerzos residuales en películas delgadas es el llamado “Método de  $\text{Sen}^2 \psi$ ”, que permite determinar la distribución de la deformación de la red cristalina en una fina capa superficial. La principal ventaja de este método, considerando que requiere de un tiempo adicional para la recolección de datos, es el establecimiento de la linealidad de la distancia interplanar en función de  $\text{Sen}^2 \psi$  (32).

En la Fig. 8 se muestra una película cristalina sometida a esfuerzos de tensión. El espacio entre los planos reticulares que son perpendiculares al plano de la película se incrementa, debido a la tensión, mientras el espaciamiento de los planos paralelos a la película disminuye, debido a la contracción de la relación de Poisson (33).

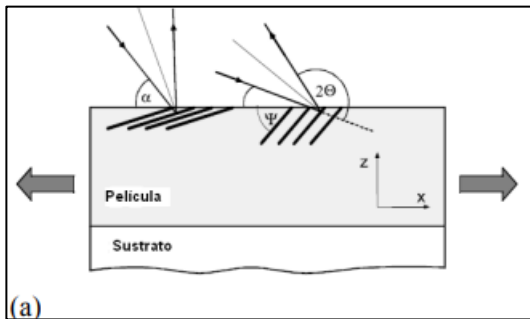
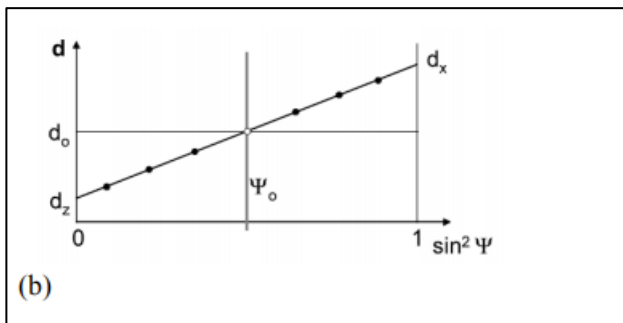


Fig. 8. Representación esquemática del método de  $\text{Sen}^2 \psi$  (33).



En este método se asume un estado biaxial de esfuerzos, el cual requiere que la medición de esfuerzos esté relacionada a los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  (ver Fig. 9) mediante la ecuación 16:

$$E \Phi \Psi = \left[ \frac{1+\nu}{E} (\sigma_1 \cos^2 \Phi + \sigma_2 \sin^2 \Phi) \sin^2 \Psi \right] - \left[ \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (16)$$

Dónde:  $\nu$  es la relación de Poisson y E: es el módulo de Young.

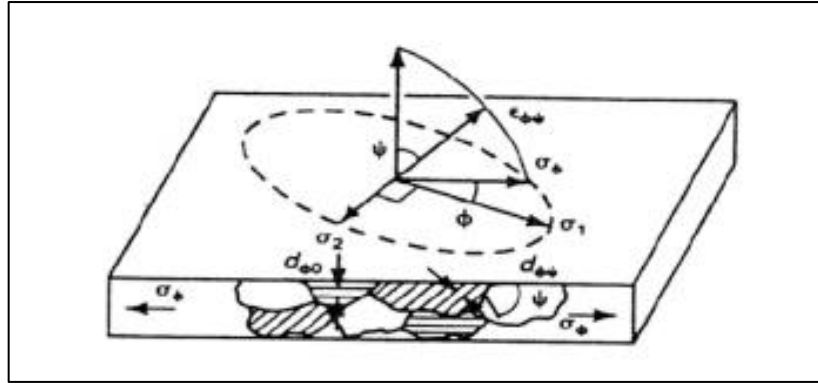


Fig. 9. Orientación de los componentes de la deformación (34).

El esfuerzo se mide a lo largo de cierta dirección (ecuación 17).

$$E\Phi\Psi = \left[ \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_{\Phi\Psi} - d_0}{d_0} \right] \quad (17)$$

Dónde  $d_{\Phi\Psi}$  es el espaciamiento interplanar que existen en los cristales que son perpendiculares a la dirección  $\psi$  en la condición estresada y  $d_0$  el espaciamiento interplanar en la condición libre de esfuerzos (32).

Equipos portátiles de difracción de rayos-X están disponibles comercialmente en varias formas que permiten realizar la medición de la tensión rápidamente (entre 4 y 30 s). Los principales inconvenientes son que no se puede aplicar a materiales no cristalinos como los polímeros, y solo es capaz de medir tensiones residuales de materiales muy cerca de la superficie.

#### 2.14.4 Estado del arte de esfuerzos residuales

En 2010 K. Palaniradja y colaboradores (35), publicaron un estudio en donde sometieron muestras de acero AISI 1040 y AISI 6150 a dos distintos tratamientos de endurecimiento superficial, carburizado e inducción. El resultado indicó que cuanto mayor es la dureza y la capa efectiva endurecida mayor son los esfuerzos residuales generados, los cuales permiten mejorar la resistencia de la fatiga de material. Los análisis de esfuerzos residuales mostraron que el tratamiento térmico por inducción presentó el doble de esfuerzos en comparación del tratamiento de carburizado.



K. Dybowski y colaboradores (36), en el artículo “*The effect of the quenching method on the deformations size of gear wheels after vacuum carburizing*” evaluaron los esfuerzos residuales del acero AISI 9310 después de carburizado al vacío y templear en gas y aceite. Demostrando que, con el temple en aceite, en comparación con el temple en gas se obtienen mayores esfuerzos compresivos resultando en mayor distorsión.

Por otra parte Jacek Sawick y colaboradores presentaron un trabajo llamado “*The influence of grinding conditions on the distribution of residual stress in the Surface layer of 17CrNi6-6 Steel*”, donde evaluaron los perfiles de esfuerzos residuales desde la superficie hasta una profundidad de 0.8mm entre el proceso de carburizado convencional y carburizado al vacío, obteniendo que el carburizado al vacío ofrece un incremento en esfuerzos residuales sobre todo cerca de la superficie del componente. Las muestras analizadas fueron en forma de anillo.

## **2.15 Distorsión**

Los factores que afectan la forma final de los componentes tratados por carburizado son varios. Muchos de estos factores son resultado de cada etapa del proceso de manufactura además del proceso de tratamiento térmico. Los factores y las relaciones entre el tratamiento térmico y la distorsión son resumidos brevemente en la Fig. 10.

La complejidad en la distorsión es suma de múltiples factores y de la relación entre estos. Por ejemplo, con el incremento de elementos aleantes, se presenta una disminución en la conductividad térmica del acero y la diferencia de temperatura incrementa durante los procesos de calentamiento y enfriamiento, dando como resultado una distorsión considerable. Por otro lado, la templabilidad del material se incrementa a medida que incrementan los elementos aleantes.

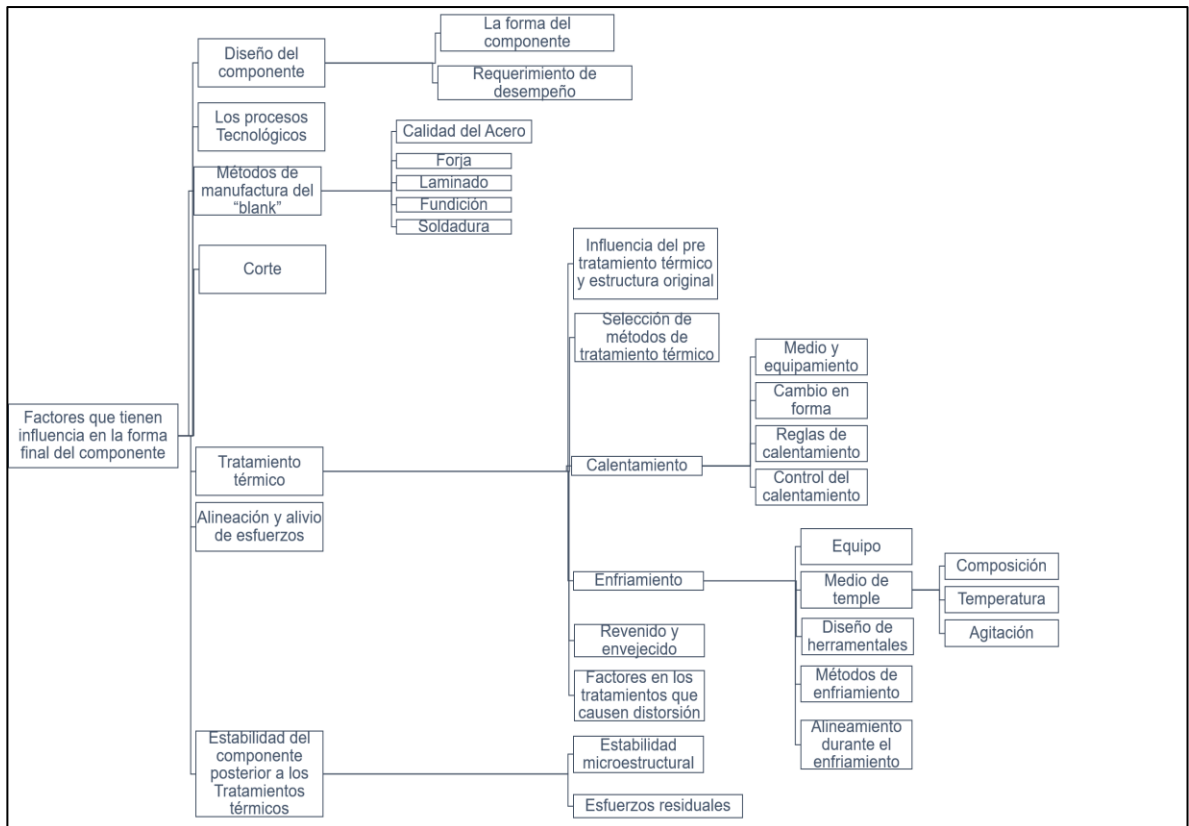


Fig. 10. Factores que afectan la forma final de los componentes (37).

Otro ejemplo es el cilindro excéntrico de la Fig. 11 donde la tendencia en distorsión de este componente es alta debido al espesor de pared delgado y la asimetría del componente (37).

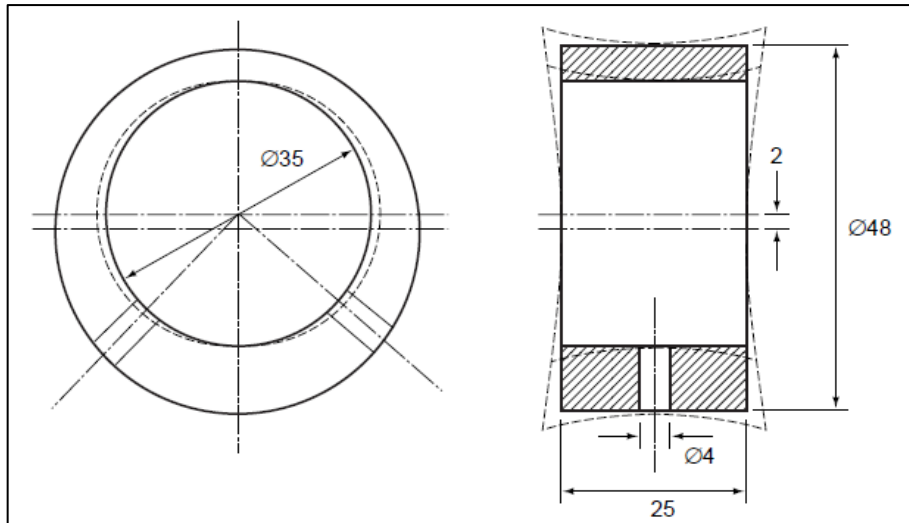


Fig. 11. Distorsión de un cilindro excéntrico (37).

### 2.15.1 Influencia de la forma del componente en la distorsión del tratamiento térmico

Además de los cambios de volumen causados por la transformación de fases durante el tratamiento térmico, la forma del componente cambiará en función de los esfuerzos térmicos y esfuerzos de la estructura. Las distorsiones de componentes simples causados por estos esfuerzos se muestran en la Fig.12. Las funciones de los esfuerzos térmicos y de estructura son contrarios entre sí, y son mostrados en la Tabla 3 (37).

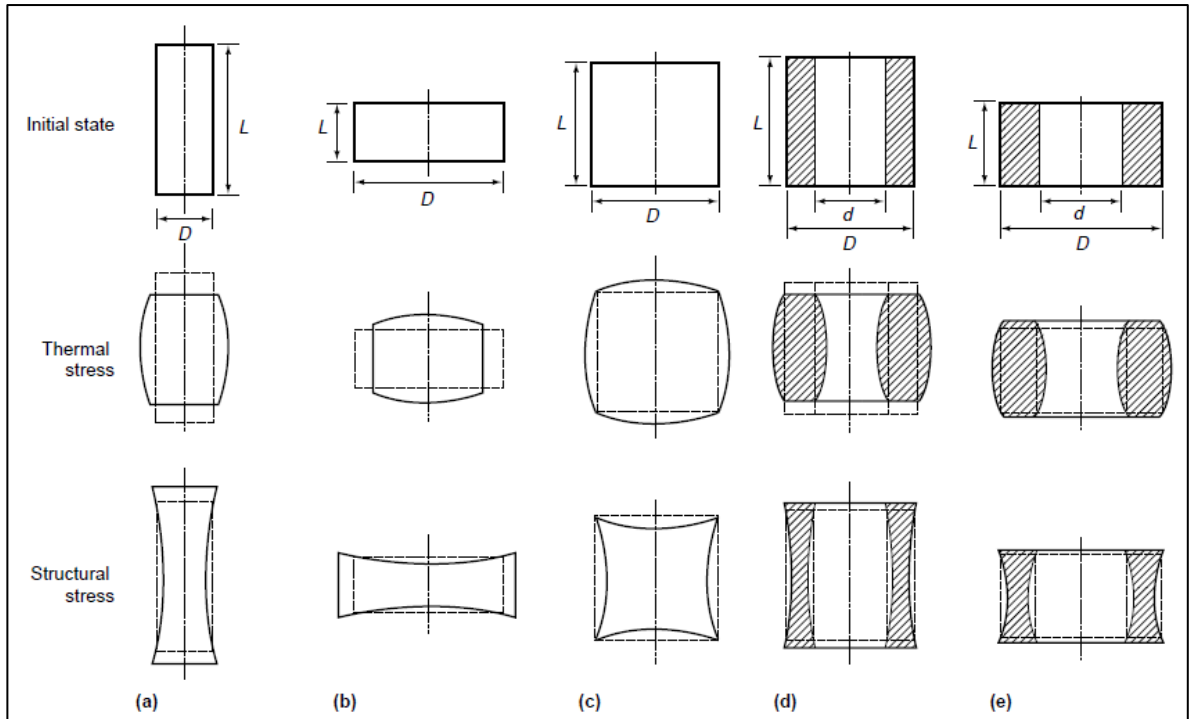


Fig. 12. Distorsión típica de componentes simples.

Tabla 3. Comparación de distorsiones causadas por esfuerzos térmicos y de estructura (38).

Distorsión causada por esfuerzos térmicos	Distorsión causada por esfuerzo estructural
Contratación a lo largo de la dirección de mayor tamaño.	Elongación a lo largo de la dirección de mayor tamaño.
Elongación a lo largo de la dirección de menor tamaño.	Contracción a lo largo de la dirección de menor tamaño.
Superficie que sobresale.	Superficie cóncava.
Suavizado de bordes y esquinas.	Afilado de bordes y esquinas.
Radio exterior expandiéndose y el interior contrayéndose.	Radio exterior contrayéndose y el interior expandiéndose.
El orificio interior del extremo tiende al tipo cuerno.	El orificio interior del extremo tiende al tipo cuerno.

Generalmente la distorsión de un componente con una forma simple, espesor de pared uniforme, y buena simetría es relativamente pequeña y regular. Por otra parte, entre más compleja, peor simetría y mayor diferencia de espesores de pared en el componente, la distorsión del componente puede incrementarse.

### 2.15.2 Componente cilíndrico

La longitud y el diámetro del componente con simetría axial después del temple tendrán un ligero cambio. La distorsión se relaciona a la relación entre la longitud entre el diámetro ( $L/D$ ), el tamaño, condición de temple, temperatura de calentamiento, la composición del acero, entre otros. Para un componente cilíndrico de medio carbono, la longitud tiende a incrementar mientras que el diámetro tiende a disminuir con el aumento de la temperatura de temple, Fig.13 (37).

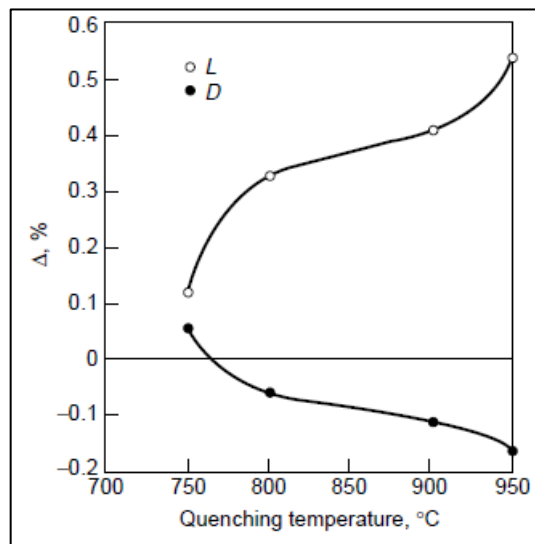


Fig. 13. Efecto de la temperatura de temple sobre la distorsión de un cilindro de medio carbono

La distorsión es también sensible a la relación  $L/D$ , Fig. 14 (37).

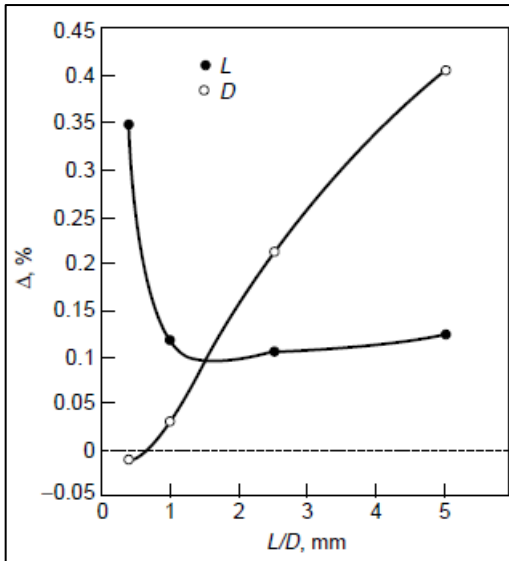


Fig. 14. Efecto de la relación Longitud entre diámetro (L/D) en la distorsión de un cilindro de medio carbono.

Así como la temperatura de temple, la relación longitud / diámetro, se ha encontrado que el contenido de carbono influencia la distorsión de componentes de aceros al carbono cilíndricos. Fig.15.

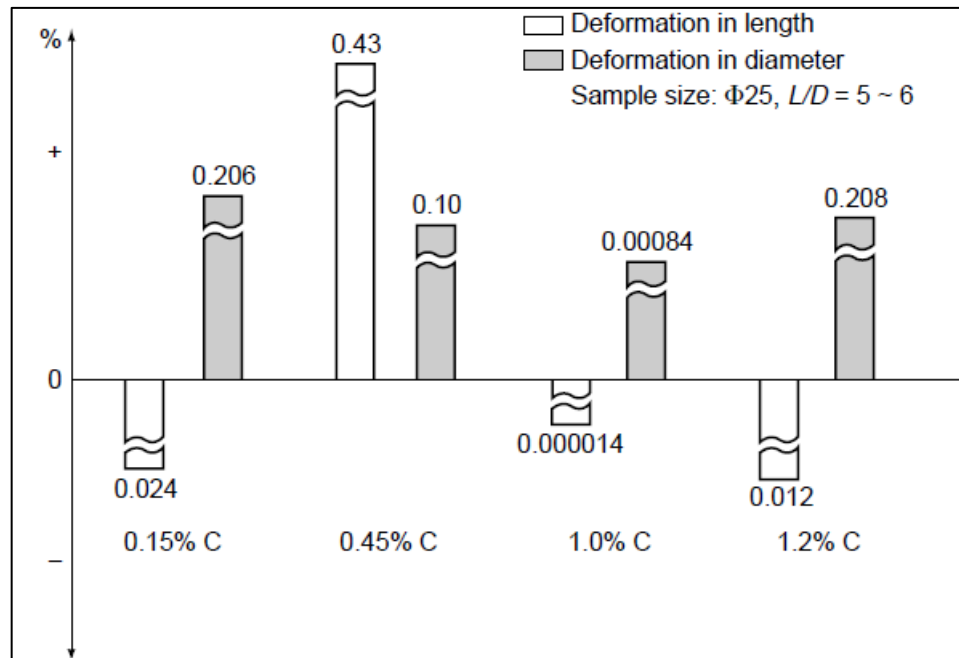


Fig. 15. Efecto del contenido de Carbono en la distorsión de componentes cilíndricos de aceros al carbono. (37).

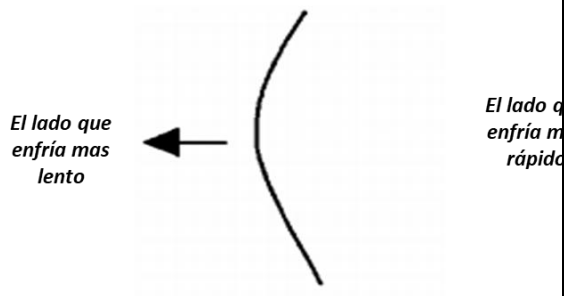
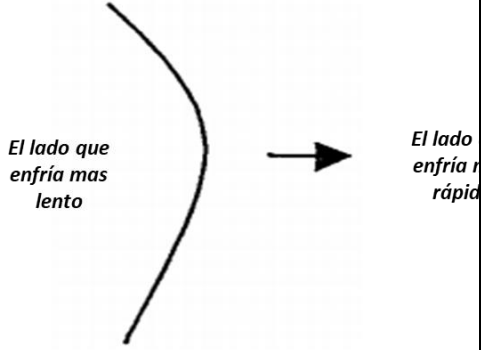
En la Fig.15 se observa que la distorsión de aceros de medio carbono es mayor, mientras que las distorsiones en aleaciones de bajo y alto carbono so relativamente pequeñas (37).

### 2.15.3 Asimetría y pandeamiento

Los ejes asimétricos experimentarán una deflexión cuando el enfriamiento es desigual en los dos lados durante el proceso de temple. Si hubiera solamente esfuerzos térmicos, el componente se pandearía hacia el lado con el mayor enfriamiento, pero por los esfuerzos de transformación, el componente se pandea hacia el lado con el enfriamiento menor. La cantidad de distorsión final depende de la cantidad de estos dos esfuerzos.

El pandeamiento es dependiente del tipo de acero, método de enfriamiento, y tamaño de sección transversal, como lo muestra la Tabla 4. Entre mayor sea el tamaño del componente mayor la tendencia de pandeamiento (37).

Tabla 4. Dirección de pandeamiento causada por asimetría bajo diferentes condiciones. (37)

Condición	Dirección de Pandeamiento
<p>Acero al carbono, templado en agua o salmuera</p> <p>Mala templabilidad del acero o componente con larga área de sección transversal; la capa endurecida es delgada</p> <p>Carburizado de acero de bajo carbón aleado</p>	
<p>Aleaciones de medio carbono aleadas o aleaciones grado herramienta aleado, templado con aceite</p> <p>Buena templabilidad de acero o componente con poca área de sección transversal. Puede ser endurecida completamente usando baja velocidad de enfriamiento</p> <p>Carburizado de aceros bajo carbón (1014, 1020)</p>	

#### 2.15.4 Influencia del enfriamiento en distorsión.

El proceso de enfriamiento tiene el mayor impacto en la distorsión final del componente. Hay diferentes factores que afectan la distorsión, como el tipo y diseño de equipos de enfriamiento, el medio de temple, temperatura, agitación del medio de temple y presión en el proceso de enfriamiento (38).

##### *Tanque de temple por inmersión*

El volumen y tamaño del tanque de temple, el flujo y la agitación del medio de enfriamiento son factores que inciden directamente en la distorsión del componente.



En el proceso de carburizado los tanques de temple con aceite son los más utilizados. El volumen del tanque afecta la disipación del calor, si el tanque es muy pequeño, la temperatura del medio va a variar considerablemente, ocasionando que haya una distribución de temperatura no uniforme durante el proceso, lo que ocasionará distorsión en este proceso.

#### ***Equipo de temple con gas.***

El temple con gas a alta presión ha incrementado su uso debido a la limpieza y mínima distorsión. La tasa de enfriamiento con gas a alta presión es menor que con aceite (38).

La distorsión como resultado del proceso de temple es principalmente debido al gradiente térmico y las transformaciones de fase dentro de componente. Estas pueden ser controladas durante el temple con gas, ajustando la presión de temple, y la velocidad del flujo de las boquillas (39).

#### **2.15.5 Factores que afectan la distorsión de piezas carburizadas.**

Además de la forma, los métodos de temple, selección el medio de temple y templabilidad, otros factores relevantes en el proceso de carburizado pueden además influenciar el tamaño final y la forma de la pieza significativamente (38). los cuales se describen a continuación.

#### ***Contenido de carbono y distribución del carbono en la capa carburizada.***

La capa superficial con alto contenido de carbono tiene un punto menor de transición de martensita, mayor contenido de austenita retenida, y mayor incremento volumétrico durante la transformación martensítica. Los esfuerzos de transformación de las piezas carburizadas varían con el contenido de carbono y la distribución de este en la capa.

### ***Profundidad de capa de carburizado***

Entre más profunda la capa de carburizado, mayor serán los esfuerzos de transformación después del temple, y mayor será la deformación de la pieza.

### ***Tiempo y temperatura de carburizado.***

La deformación causada por plasticidad incrementa conforme se incrementa el tiempo y la temperatura de carburizado, siendo la influencia de la temperatura la que tiene mayor efecto. Por lo tanto, para partes con delgado espesor de pared o piezas con poca profundidad de capa la temperatura de carburizado deberá ser menor.

### ***Dureza en el núcleo de piezas carburizadas***

La dureza en el núcleo es un reflejo del grado de endurecimiento, con el incremento de la dureza en el núcleo, la deformación cambia de ser causada por esfuerzos térmicos a transformacionales.

### ***Capa carburizada heterogénea***

Una capa carburizada heterogénea resultará en una distribución no-asimétrica de los esfuerzos estructurales y, por lo tanto, en distorsión. Estos factores, junto con el tamaño y forma de las piezas, resultan en la distorsión de piezas carburizadas y templadas.

## **2.15.6 Estado del arte de distorsión**

Diversos estudios se han realizado con el fin de comparar la severidad del medio de temple con distorsión y propiedades mecánicas de componentes de transmisión, la revisión bibliográfica realizada se resume a continuación

En un reporte publicado en 2006 por Jurči and Stolař (40), fue investigada la distorsión de engranes y piñones templados en gas y aceite, estos componentes de acero 18CrNiMo7-6, fueron tratados en horno continuo. No se encontraron diferencias en microestructura ni dureza en núcleo usando nitrógeno en lugar de aceite. Como resultado del estudio, se observó menor excentricidad (*run out*) y mejor uniformidad de la distorsión con temple en nitrógeno.

Atraszkiewicz, B. y colaboradores (5), presentaron en 2012 un trabajo en el proceso de engranes en tratamiento térmico al vacío utilizando helio y nitrógeno como medios de temple en un acero 15CrNi6. Se encontró que el helio es una buena alternativa como medio de temple ya que tiene mayor poder de enfriamiento comparado con el nitrógeno,

por otro lado, mejores propiedades mecánicas en el núcleo resultaron en el caso de temple con helio. No se encontraron efectos negativos en la capa endurecida ni mayores niveles de distorsión en el nitrógeno, comparado con el helio como medio de temple.

En 2016 K. Dybowski y colaboradores (36), publicaron un artículo llamado “*The effect of the quenching method on the deformations size of gear wheels after vacuum carburizing*”, en el cuál le objetivo era comparar las deformaciones de un engrane de acero AISI 9310, después de carburizado al vacío utilizando nitrógeno y aceite como medios de temple. Se concluyó en el estudio que con el temple en gas se tenía una deformación más uniforme en el diente del engrane lo cual ayuda a predecir mejor la distorsión.

Robin Frisk en 2016 (41), presentó un trabajo titulado “*Distortion analysis of low pressure carburized components*”, en donde se encontró que en general la distorsión del engrane principal disminuía con el tratamiento térmico al vacío y temple con nitrógeno. En el caso específico de la distorsión de dientes reportó que la distorsión en el ángulo de hélice es menor cuando utiliza temple en gas, mientras que el ángulo de presión en el lado convexo del diente incrementa con el uso del temple en gas.

## CAPITULO III

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Condiciones iniciales

SISAMEX manufactura distintos modelos de flechas de transmisión, estas se someten a un proceso de enderezado después del tratamiento térmico de carburizado, se mide la excentricidad (*run out*) de la pieza sometida al giro y se enderezan los diámetros que sobrepasen las 100 $\mu$ m de excentricidad. Se cuenta con un sensor acústico que detecta la aparición y propagación de grietas durante el proceso de enderezado. Es necesario mantener el valor de excentricidad por debajo de los 100  $\mu$ m en todos los diámetros y no presentar grietas para poder entrar al proceso de rectificado sin causar daños en la herramienta de corte.

A continuación, en la Fig. 16 se presenta el flujo del material después de maquinado y hasta el proceso de enderezado.

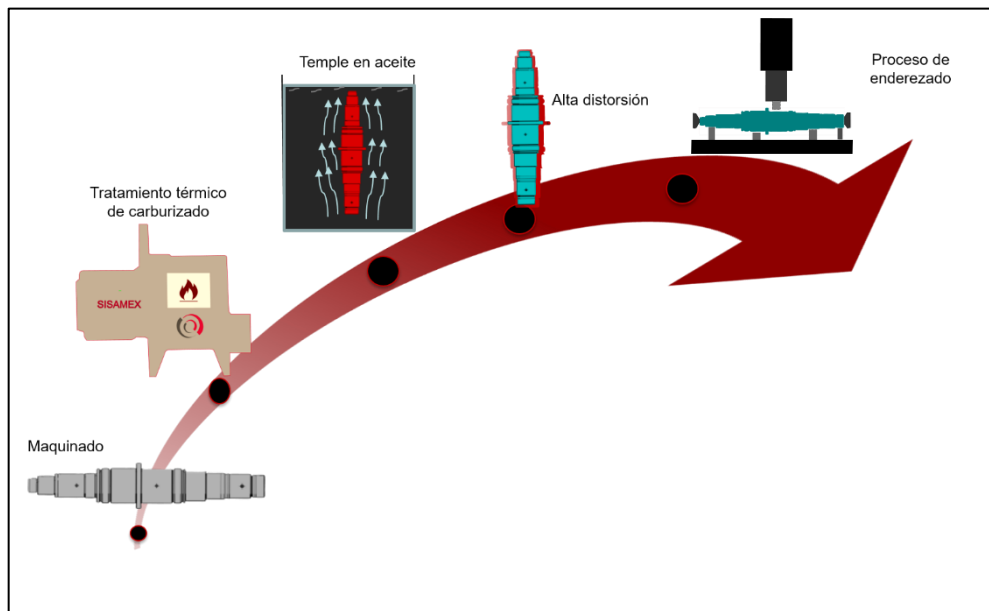


Fig. 16. Flujo material para evaluar distorsión después de tratamiento térmico.

La flecha principal de transmisión es el modelo que presenta mayor índice de rechazo por alta distorsión después del tratamiento térmico, debido a esto y con la finalidad de conocer el efecto de las tres diferentes rutas de carburizado sobre las propiedades metalúrgicas, esfuerzos residuales y distorsión, se tomó este modelo para desarrollar el presente estudio.

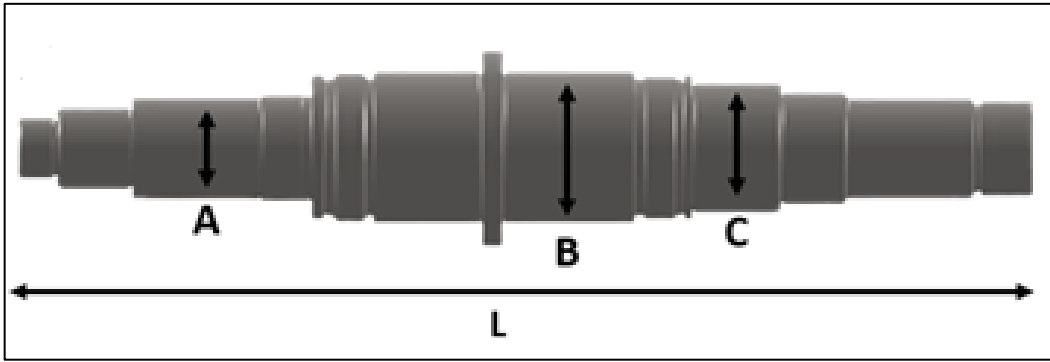


Fig. 17. Flecha Principal de transmisión y diámetros principales.

### 3.2 Diagrama de flujo experimental

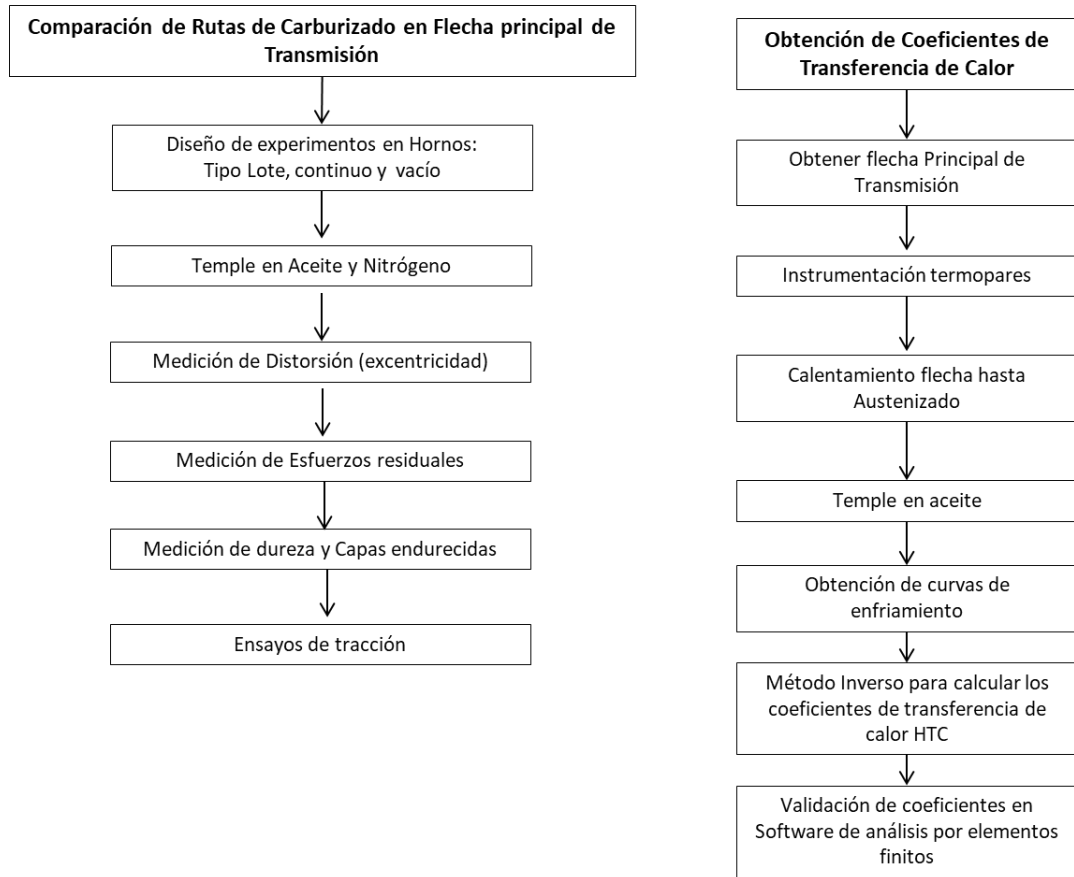


Fig. 18. Diagramas de flujo experimental.

### 3.3 Diseño de experimentos

#### 3.3.1 Diseño de experimentos para rutas de carburizado

Las distintas pruebas de carburizado se realizaron para obtener una capa de carburizado deseada entre 0.8 y 1.4mm. Los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 5 para la flecha principal.

Tabla 5. Parámetros de pruebas de carburizado de la flecha principal.

Proceso	Temperatura de carburizado	Tiempo de carburizado	Temperatura de ecualizado	Medio Enfriamiento
Lote	927 °C	X h	860 °C	Aceite 70 °C
Continuo	927 °C	0.9X h	860 °C	Aceite 60 °C
Vacío	980 °C	0.36X h	900 °C	Nitrógeno
Vacío	980 °C	0.36X h	900 °C	Aceite

A continuación, en la Fig.19 se presentan las rutas de tratamiento térmico utilizadas para los distintos procesos de carburizado.

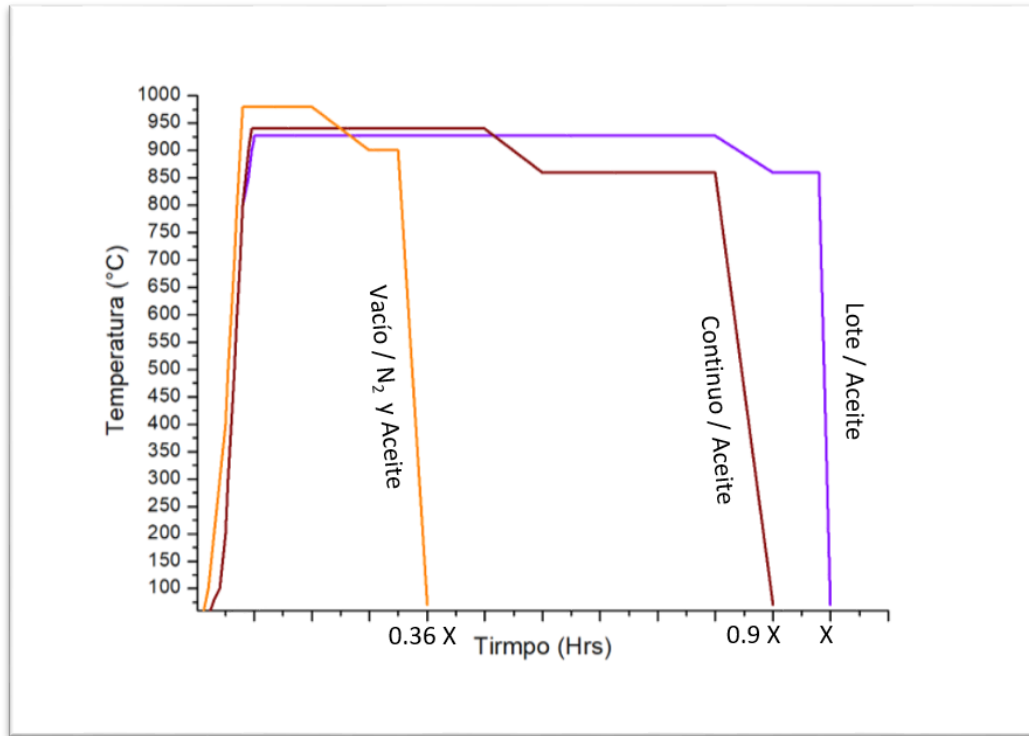


Fig. 19. Ruta de tratamiento térmico utilizadas.



### 3.3.2 Diseño de experimentos de simulación por elemento finito

A continuación, en la Tabla 6 muestra los parámetros utilizados para el diseño de experimentos con respecto al tratamiento térmico de carburizado. Asimismo, la Tabla 7 presenta los parámetros para la obtención de las curvas de enfriamiento.

Tabla 6. Parámetros aplicados en las pruebas de carburizado de la flecha principal.

Flecha principal	Temperatura de carburizado	Tiempo de carburizado	Temperatura de ecualizado	Medio de enfriamiento
Lote	927 °C	X h	860 °C	Aceite 70 °C

Tabla 7. Parámetros de austenizado y enfriamiento para obtención de curvas de enfriamiento.

Flecha principal	Temperatura de austenizado	Tiempo de permanencia	Medio de enfriamiento
Lote	860 °C	30 min	Aceite 70 °C

En la Fig. 20 se muestra la ruta del tratamiento térmico de los parámetros utilizados de tiempo y temperatura para el carburizado de la flecha principal, posteriormente el incremento de temperatura y temple para recolectar las curvas de enfriamiento.

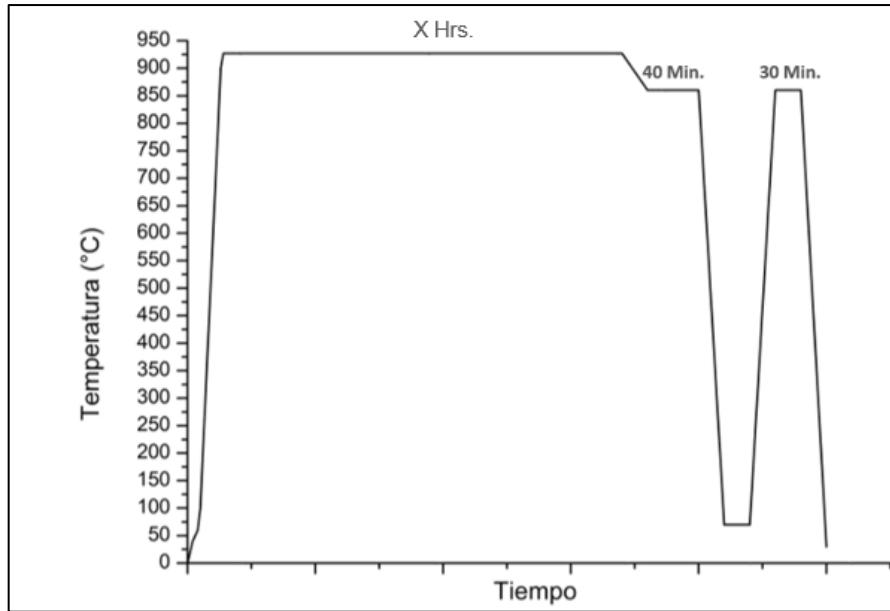


Fig. 20. Gráfica tiempo temperatura para carburizado y obtención de curvas de enfriamiento.

### 3.4 Medición de distorsión

La medición de distorsión se llevó a cabo utilizando una máquina de medición óptica, la cual mide las principales características geométricas de las flechas como longitudes, diámetros y excentricidad en los diámetros principales. La Fig. 21 muestra el equipo utilizado para la medición de distorsión.

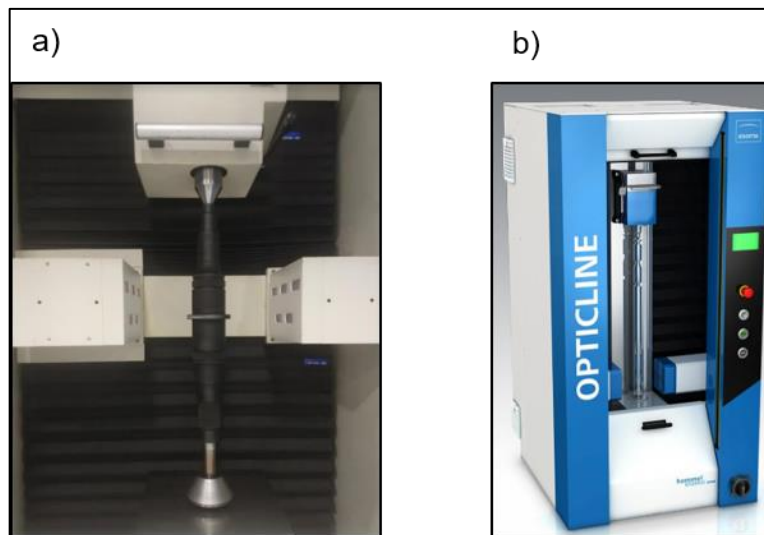


Fig. 21. a) medición de distorsión y b) equipo de medición óptica.

### 3.5 Medición de rayos-X para esfuerzos residuales y austenita retenida

Una vez procesados los componentes se procedió a la evaluación de esfuerzos residuales, utilizando un difractor de rayos-X G2R, bajo la norma DIN EN 15305. (42).

Se evaluaron los esfuerzos residuales superficiales de los 3 principales diámetros A, B y C. Con el mismo método se evaluó el porcentaje de austenita retenida de cada condición solo en el diámetro B, usando la norma ASTM E975-13 (43).

En la Fig. 22 se observa en a) la posición para medición de esfuerzos residuales de diámetro B y en b) se observa el diámetro B ya cortado para evaluación de austenita retenida superficial.

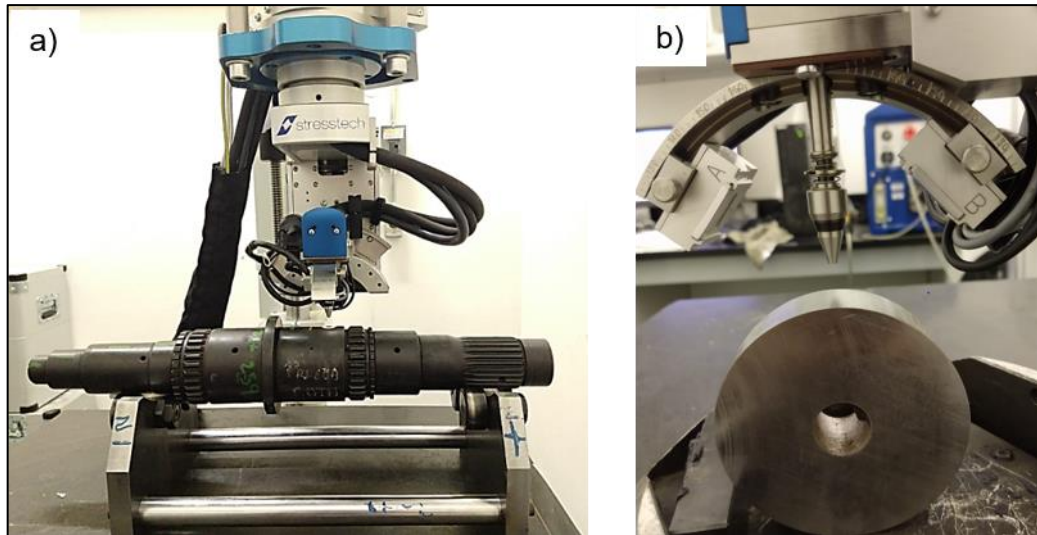


Fig. 22. Medición en diámetro B de a) esfuerzos residuales y b) medición de austenita retenida.

### 3.6 Medición de dureza, capa carburizada, y preparación metalográfica

Para la medición de dureza en núcleo, se preparó el diámetro mediante el corte de la sección transversal y midiendo la dureza a medio radio, utilizando un indentador de 5 mm de bola y una carga de 750 kg en un durómetro Brinell. El método de medición de dureza se realizó bajo la norma ASTM E10-15 (44). En la Fig.23 se observa un esquema marcando la zona para inspección de dureza y la imagen del durómetro.

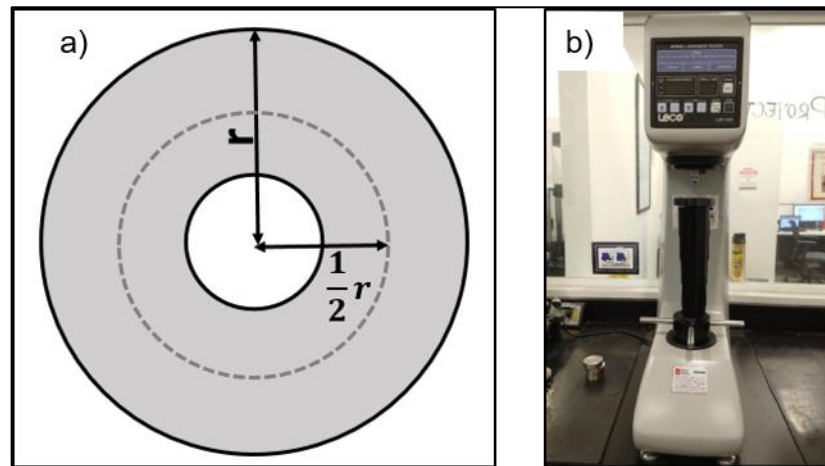


Fig. 23. a) Esquema de la zona para inspección de dureza núcleo y b) equipo de medición de dureza Brinell.

Para la inspección de dureza superficial se utilizó un durómetro Rockwell, con 150 kg, de acuerdo con la norma ASTM E18-15 (45). En la Fig. 24 se observa el esquema con la localización del punto para inspección de dureza y el durómetro Rockwell utilizado.

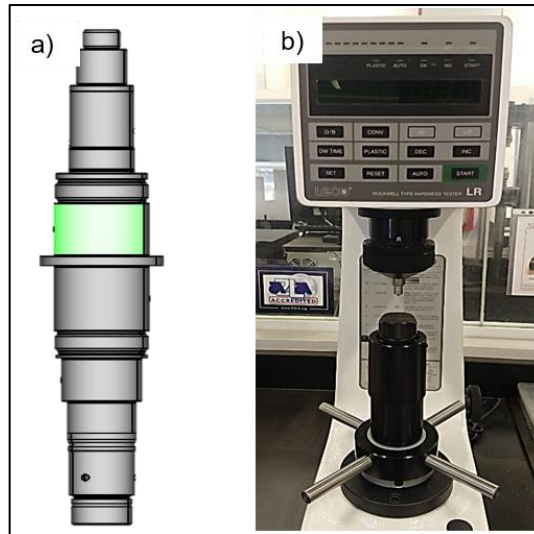


Fig. 24. a) Diámetro de toma de dureza superficial y b) equipo de medición de dureza superficial marca Leco.

La evaluación de la capa carburizada se realizó en el diámetro menor y en el diámetro mayor como se observa en la Fig. 25, con el fin de asegurar que toda la flecha este dentro de los parámetros establecidos, 0.8 a 1.4mm. Esto debido a que es el procedimiento realizado para liberar las piezas en producción. La evaluación de capa efectiva también llamada CHD “*case hardening depth*” se realizó utilizando un durómetro Vickers con una carga de 1 kg, se tomó el valor mínimo de 550 HV para medición de capa efectiva. Esta evaluación se llevó a cabo bajo la norma ASTM B934-15 (46). La Fig. 26 muestra el equipo de microdureza utilizado.

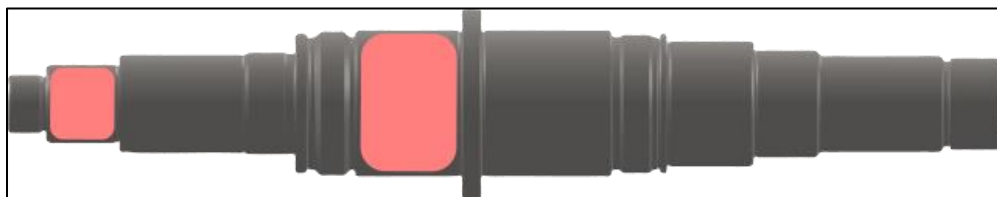


Fig. 25. Zonas para evaluación de capa efectiva.



Fig. 26. Equipo de microdureza EMCO TEST.

La evaluación metalográfica se realizó inspeccionando el diámetro mayor B, las características a evaluar fueron: oxidación intergranular, tamaño de martensita y porcentajes de fase en núcleo de diámetro. Se utilizó un microscopio marca Zeiss, con aumentos desde 50X hasta 500X, el equipo se puede observar en la Fig. 27.



Fig. 27. Microscopio óptico marca Zeiss.

Para la preparación metalográfica se realizaron mediante el procedimiento estándar metalográfico, desbastes con lijas de SiC desde el número 120 hasta 1200, posteriormente se dio un pulido con óxido de alúmina  $Al_2O_3$  en paño suave. El ataque se realizó con nital al 4%.

Para la medición de oxidación intergranular se utilizó el software Axiovisión y se evaluó la pieza sin ataque químico.

### 3.7 Pruebas de tensión

Se maquinaron 3 probetas para pruebas de tensión de cada condición de carburizado. La ubicación de la muestra se tomó del núcleo del componente según la Fig. 28. Las dimensiones de la probeta se tomaron según la norma ASTM E8, y se muestran en la Tabla 8. La Fig. 28 muestra también el plano de la probeta y la probeta de tensión maquinada.

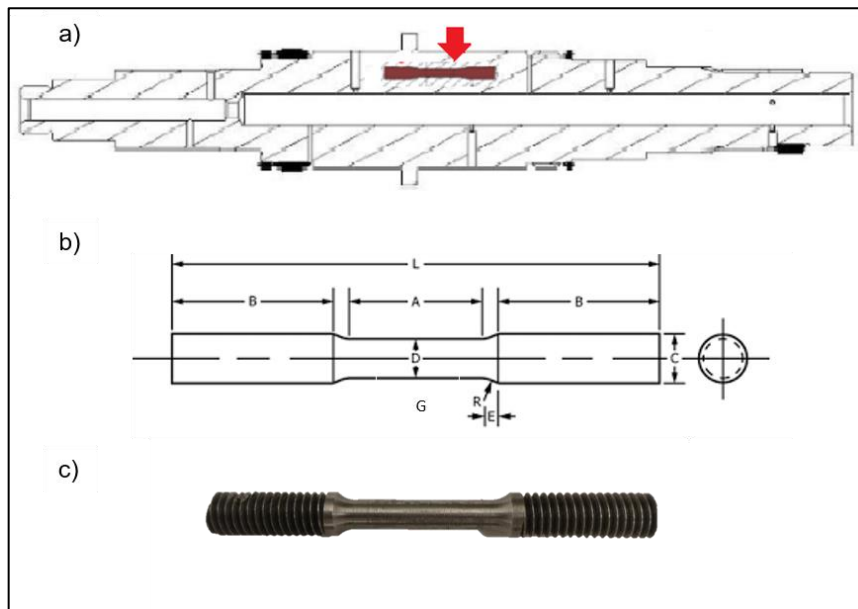


Fig. 28. a) Localización probeta de tensión, b) Plano de probeta de tensión y c) Probeta de tensión maquinada

Tabla 8 Dimensiones de probeta de tensión.

Nomenclatura	Descripción	Dimensiones
G	Longitud Zona Calibrada	25.0 +/- 0.1
D	Ancho	6.0
R	Radio o filete	6.0
L	Longitud total	100
A	Longitud de sección reducida	32
B	Ancho de agarre	30
C	Ancho de sección de agarre	10



### 3.8 Procedimiento experimental para obtener coeficientes de transferencia de calor.

Con el fin de obtener los coeficientes de transferencia de calor por el método de HICP (inverso) entre la superficie del componente y el medio de enfriamiento, fue necesario obtener las curvas de enfriamiento durante el proceso de temple después del proceso de carburizado en horno tipo lote, en diferentes áreas cercanas a la superficie de la flecha de transmisión. Para obtener las curvas de enfriamiento se emplearon 6 termopares localizados a 1 mm de la superficie de diferentes diámetros de la flecha principal de transmisión como se observa en la Fig. 29.

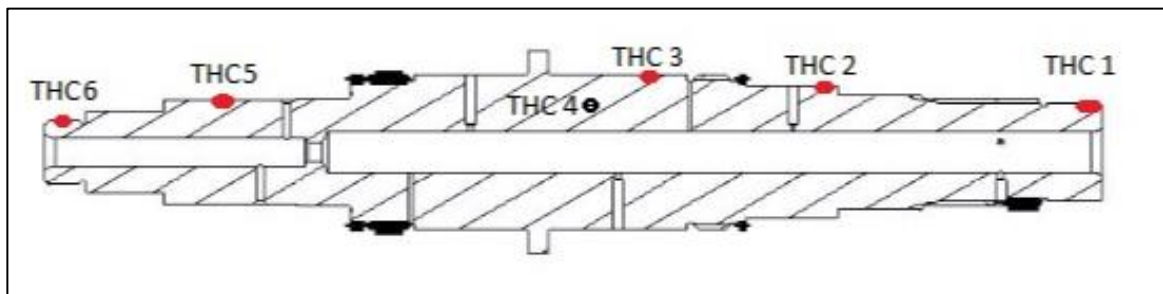


Fig. 29. Localización de termopares.

Un equipo de adquisición de datos Eurotherm fue utilizado para obtener las temperaturas en tiempo real de las 6 zonas seleccionadas, con una velocidad de  $1^{\circ}\text{C/s}$ .

La flecha instrumentada fue calentada por encima de los  $850^{\circ}\text{C}$ , una vez alcanzada la temperatura se enfrió en aceite caliente con el fin de obtener los datos de enfriamiento. A continuación, en la Fig. 30 se presenta el procedimiento experimental para la obtención de las curvas de enfriamiento de la flecha principal.

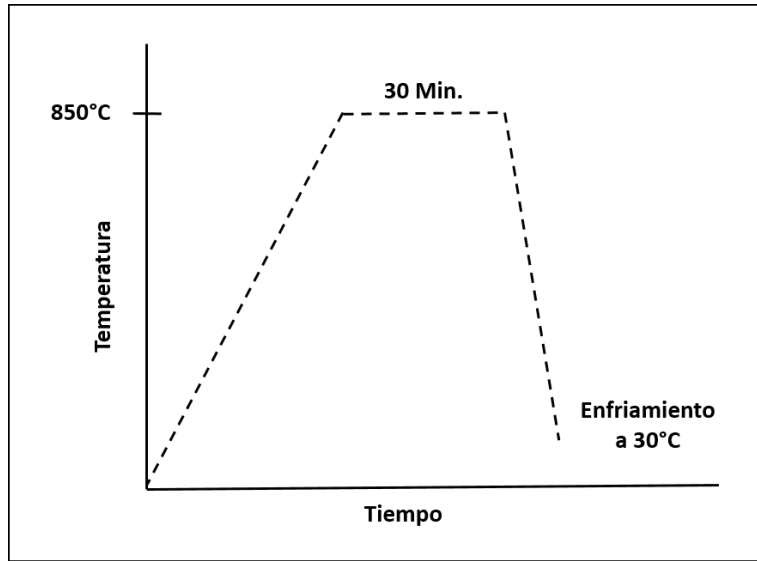


Fig. 30. . Procedimiento experimental para obtención de curvas de enfriamiento.

Se calculó la velocidad de enfriamiento de cada posición con el fin de obtener la velocidad de enfriamiento máxima y mínima alcanzada durante el proceso de temple.

Para obtener los coeficientes de transferencia de calor fue necesario conocer las propiedades físicas más importantes del material, como densidad  $\rho$ , conductividad térmica  $k$  y calor específico  $C$  a diferentes temperaturas. El programa Jmat Pro fue utilizado para calcular dichas propiedades.

Para calcular los coeficientes de transferencia de calor de cada posición a lo largo de la flecha de transmisión, se consideró un modelo de condición de calor 2D simétrico para estimar la distribución de la temperatura en la pieza cilíndrica (el radio y la longitud del cilindro se denotan con las letras  $R$  y  $Z$ ). El cilindro está sujeto a una coordenada local longitudinal y un coeficiente de transferencia de calor que varía en el tiempo  $HTC(z, t)$  en todas sus superficies. Tanto la conductividad térmica como la capacidad de calor varían con la temperatura,  $k(T)$  y  $C_p(T)$ .

El método para el cálculo inverso de los coeficientes de transferencia de calor se muestra en la Fig. 31.

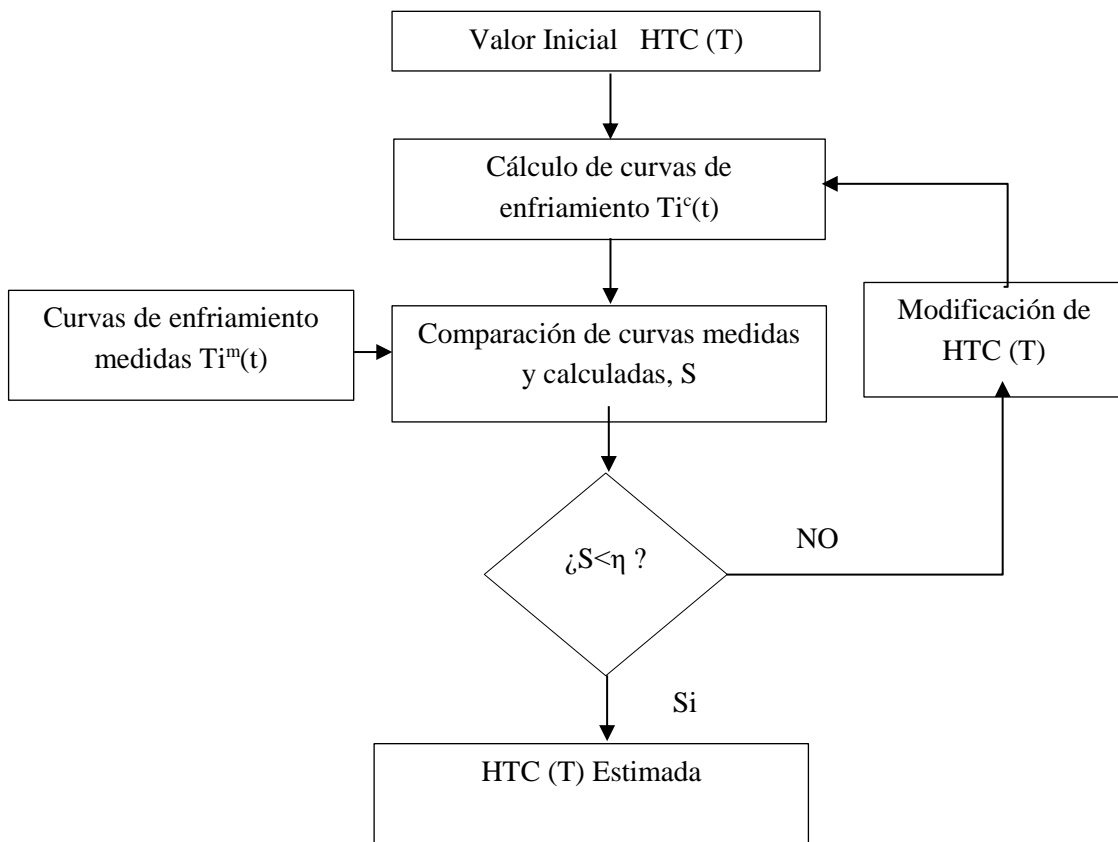


Fig. 31. Método para calcular los coeficientes de transferencia de calor HTC (53).

## CAPITULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1 Perfil de carburizado

A continuación, en la Fig. 32 se presentan los perfiles de carbono de cada uno de los procesos de carburizado realizados.

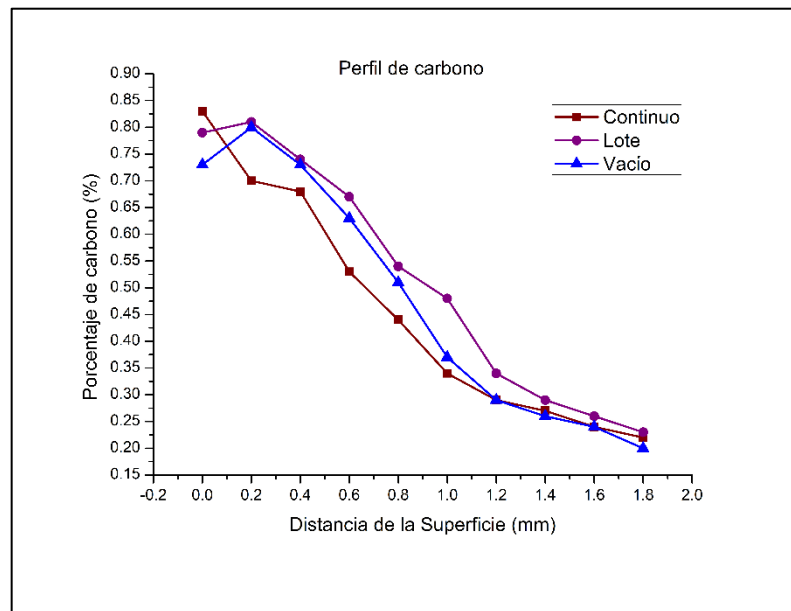


Fig. 32. . Perfiles de carbono en los tres sistemas de carburizado.

## 4.2 Capa de carburizado

En la Fig. 33 se presentan las profundidades obtenidas de las capas en las piezas tratadas en las diferentes rutas de carburizado para Z1 (diámetro menor), Z2 (diámetro mayor) y la relación entre Z1/Z2.

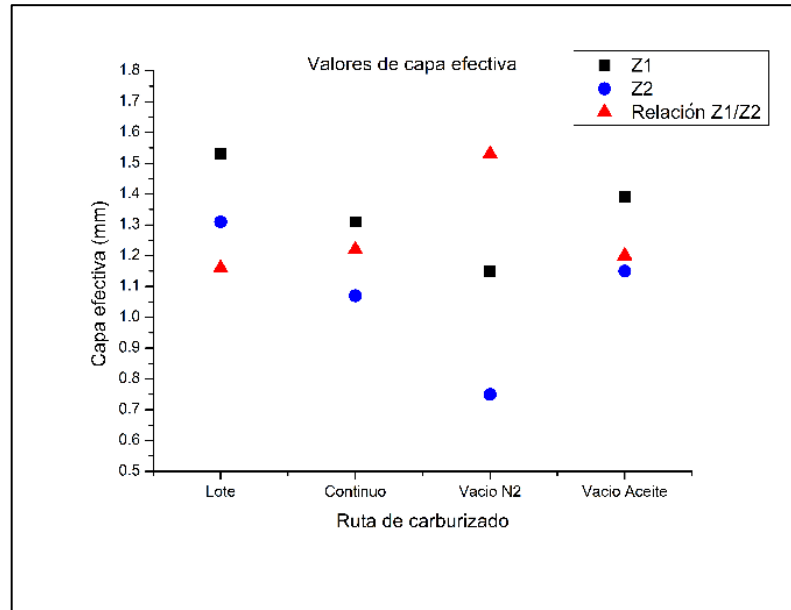


Fig. 33. . Resultados de capa efectiva.

La Tabla 9 resume los valores de capa de la Z1 (diámetro menor) y Z2 (diámetro mayor) y la relación Z1/Z2.

Tabla 9. Resultados de CHD, diámetro A y B y la relación B/A.

Tratamiento	Z1 (mm)	Z2 (mm)	Relación Z1/Z2
Lote	1.53	1.31	1.16
Continuo	1.31	1.07	1.22
Vacío N2	1.15	0.75	1.53
Vacío Aceite	1.39	1.15	1.20

### 4.3 Dureza superficial y núcleo

A continuación, en la Fig. 34 se muestra la gráfica con los resultados de dureza superficial y núcleo promedio de los distintos tratamientos de carburizado realizados.

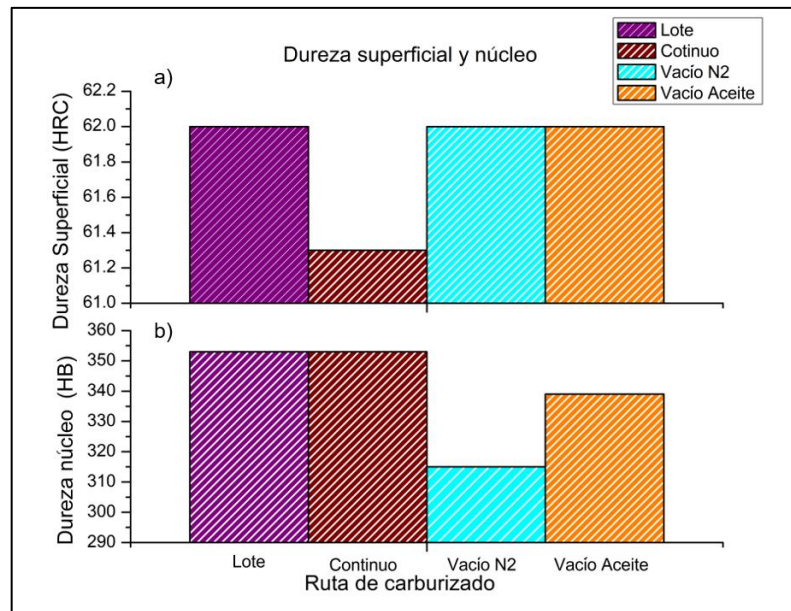


Fig. 34. Resultados de dureza a) superficial y b) núcleo

En la Tabla 10 se muestran los resultados promedio de las durezas tanto superficial como en núcleo de las diferentes rutas de carburizado.

Tabla 10. Resultados de Dureza superficial y núcleo

Ruta De Carburizado	Dureza superficial, HRC (Conversión a HV ISO18265 Low alloy steels)	Dureza de núcleo, HB
Lote	62 (745 HV)	353
Continuo	61.3 (727 HV)	353
Vacío N2	62 (745 HV)	315
Vacío aceite	62 (745 HV)	339

## 4.4 Microestructura

### 4.4.1 Oxidación intergranular

La Fig. 35 presenta las micrografías de la superficie del diámetro B de las distintas rutas de carburizado, las imágenes se encuentran sin ataque químico para la evaluación de la oxidación intergranular.

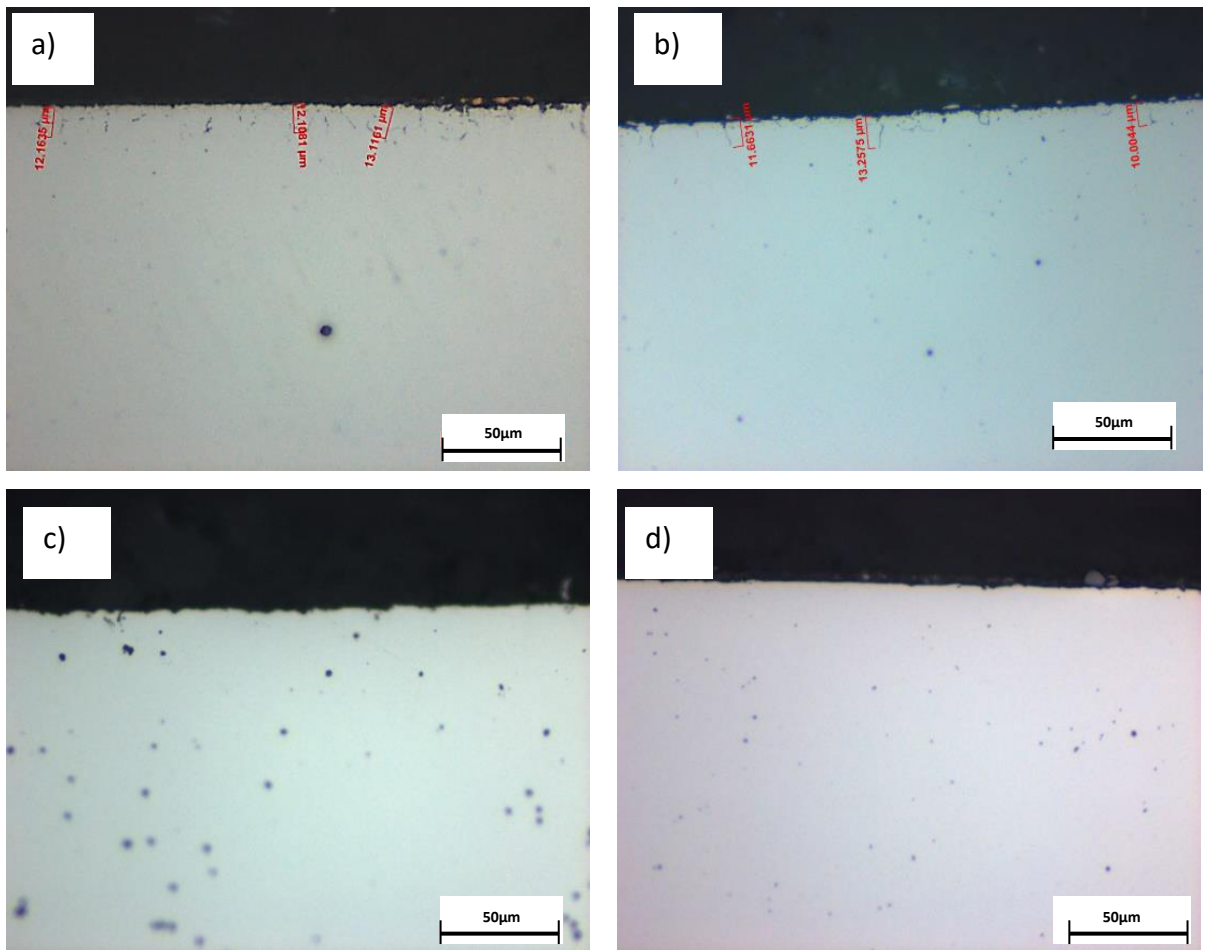


Fig. 35. Micrografías para evaluación de oxidación intergranular, a) lote, b) continuo, c) vacío en N<sub>2</sub> y d) vacío en aceite

En la Fig. 36 se muestran los histogramas con los resultados de oxidación intergranular.

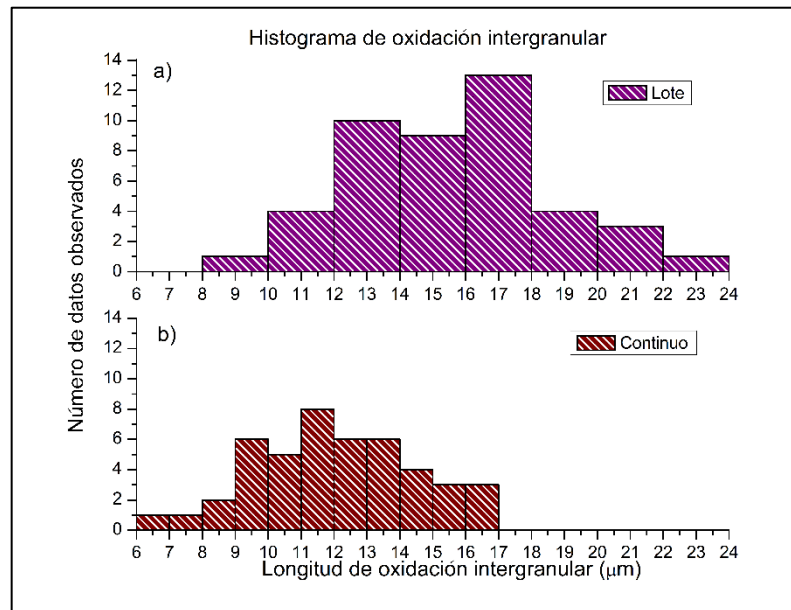


Fig. 36. Histogramas con resultados de medición de oxidación intergranular en a) lote y b) continuo

La Tabla 11 presenta el resumen de los resultados de oxidación intergranular.

Tabla 11. Resultados de oxidación intergranular.

Ruta de Carburizado	Oxidación Intergranular (µm)				
	Lote	Continuo	Vacío He	Vacío N2	Vacío Aceite
Promedio	15.51	12.06	NO	NO	NO
Desviación Estándar	2.95	2.47	NA	NA	NA



#### 4.4.2 Microestructura en superficie , tamaño de martensita y austenita retenida

La Fig. 37 muestra imágenes de la microestructura a 500X de la superficie de diámetro B, además, estas imágenes son utilizadas para la medición de tamaño de martensita, la cual se mide tomando la longitud de la aguja promedio encontrada en la superficie de la muestra.

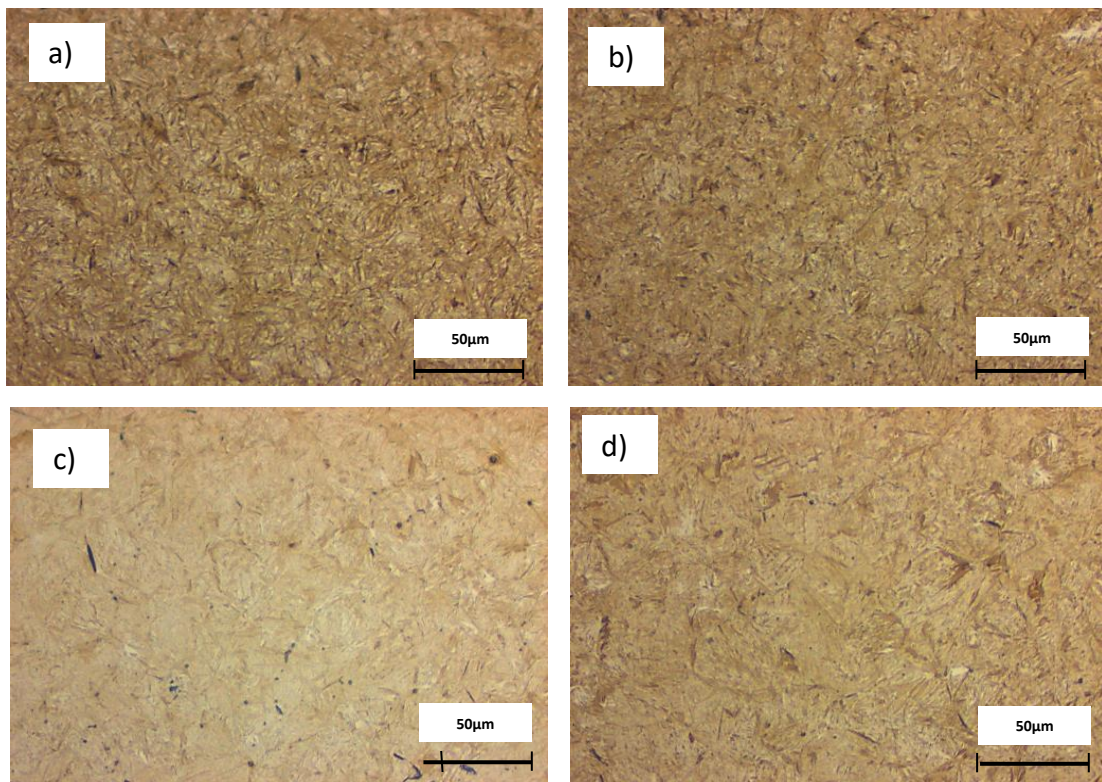


Fig. 37. Micrografías 500x superficial para evaluación de tamaño de martensita en a) lote, b) continuo, c) vacío en N2 y d) vacío en aceite

En la Fig. 38 se muestran los histogramas de las mediciones de tamaño de martensita en las diferentes condiciones.

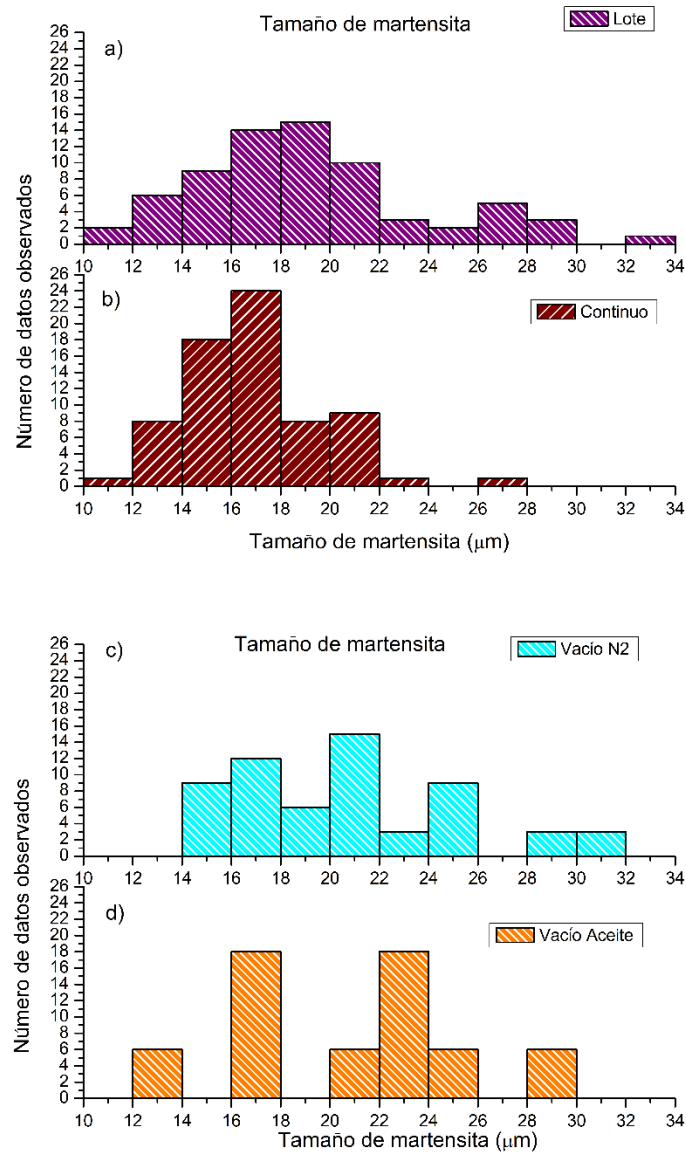


Fig. 38. Histogramas con resultados de medición de tamaño de martensita en a) lote, b) continuo, c) vacío en N2 y d) vacío en aceite.

La Tabla 12 presenta el resumen de los resultados de tamaño de martensita.

Tabla 12. Resultados de tamaño de martensita

Ruta de Carburizado	Tamaño de Martensita ( $\mu\text{m}$ )			
	Lote	Continuo	Vacío N2	Vacío Aceite
Promedio	18.68	16.36	20.51	20.40
Desviación Estándar	4.65	2.74	4.67	4.72

En lo que respecta a los resultados de austenita retenida, estos son mostrados en la Fig. 39, asimismo, el resumen se presenta en la tabla 13.

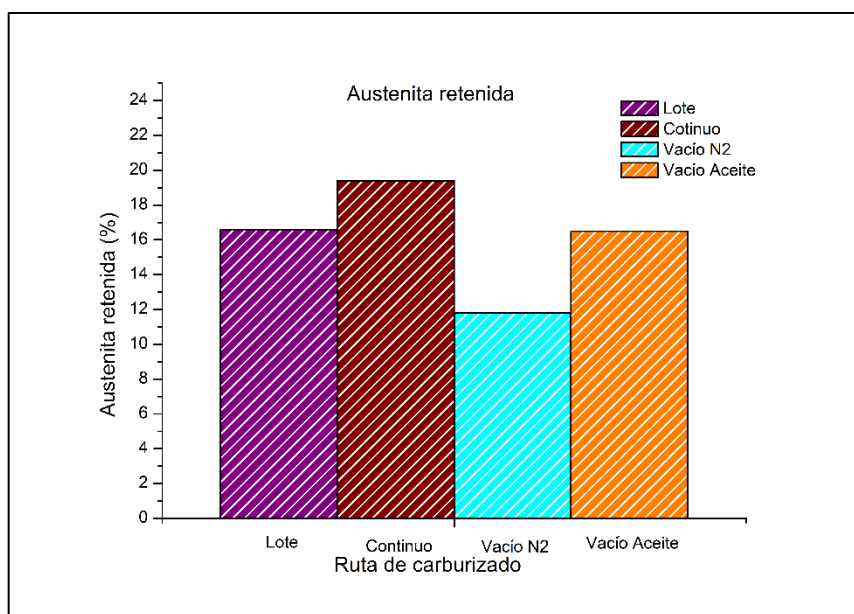


Fig. 39. Resultados de medición de austenita retenida para a) lote, b) continuo, c) vacío en N2 y d) vacío en aceite.

Tabla 13. Resultados de austenita retenida.

Ruta de Carburizado	Austenita Retenida (%)			
	Lote	Continuo	Vacío N2	Vacío Aceite
Promedio	16.6	19.4	11.8	16.5
Desviación Estándar	3.9	2.6	2.0	2.7

#### 4.4.3 Microestructura de Capa, Transición y Núcleo

Las Fig. 40 y 41 muestran imágenes de la capa carburizada, zona de transición y núcleo de las distintas condiciones realizadas, micrografías obtenidas a 100X, respectivamente.

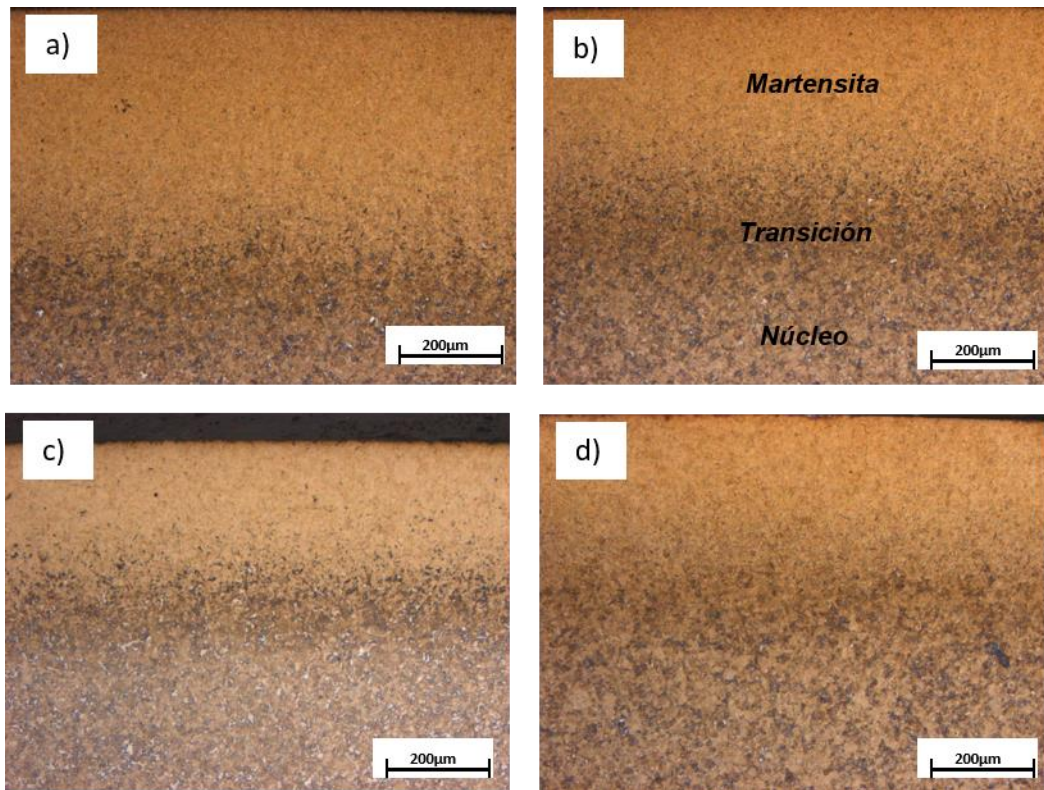


Fig. 40. Micrografías a 100X capa carburizada a) lote, b) continuo, c) vacío en N2 y  
d) vacío en aceite



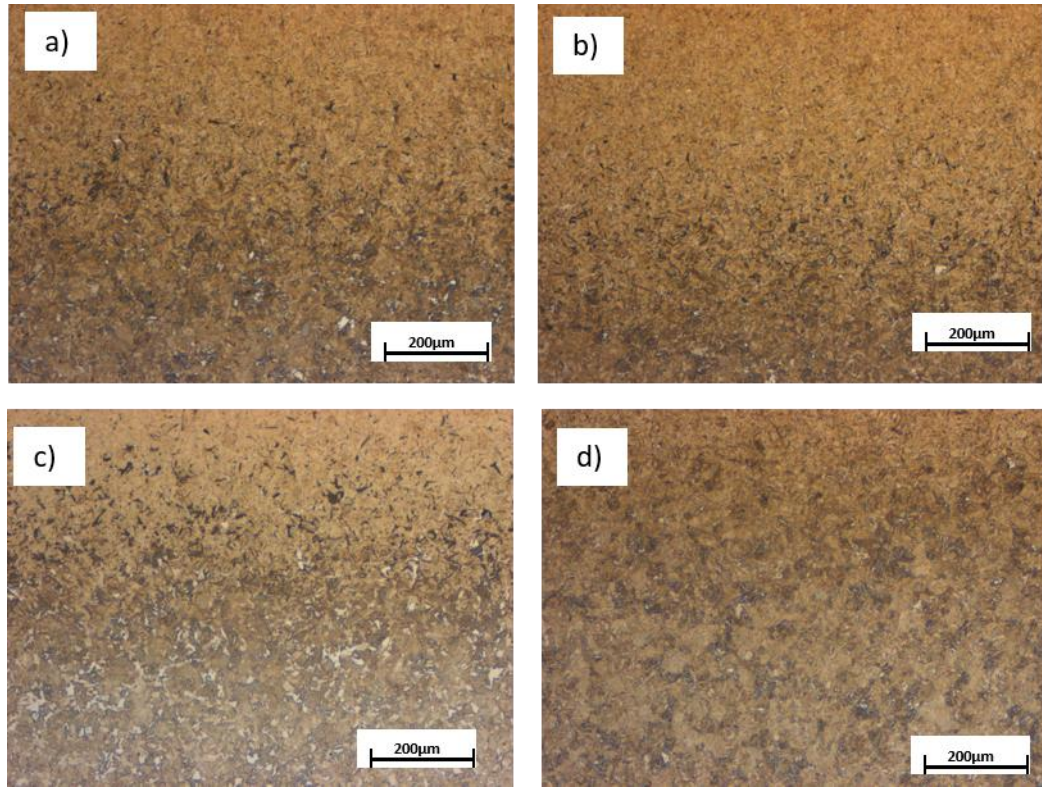


Fig. 41. Micrografías a 100X de la zona de transición, a) lote, b) continuo, c) vacío N2 y  
d) vacío aceite.

Las figuras 42 y 43 muestran la microestructura del núcleo del diámetro B a 200X y a 500X, respectivamente para las rutas de carburizado establecidas.

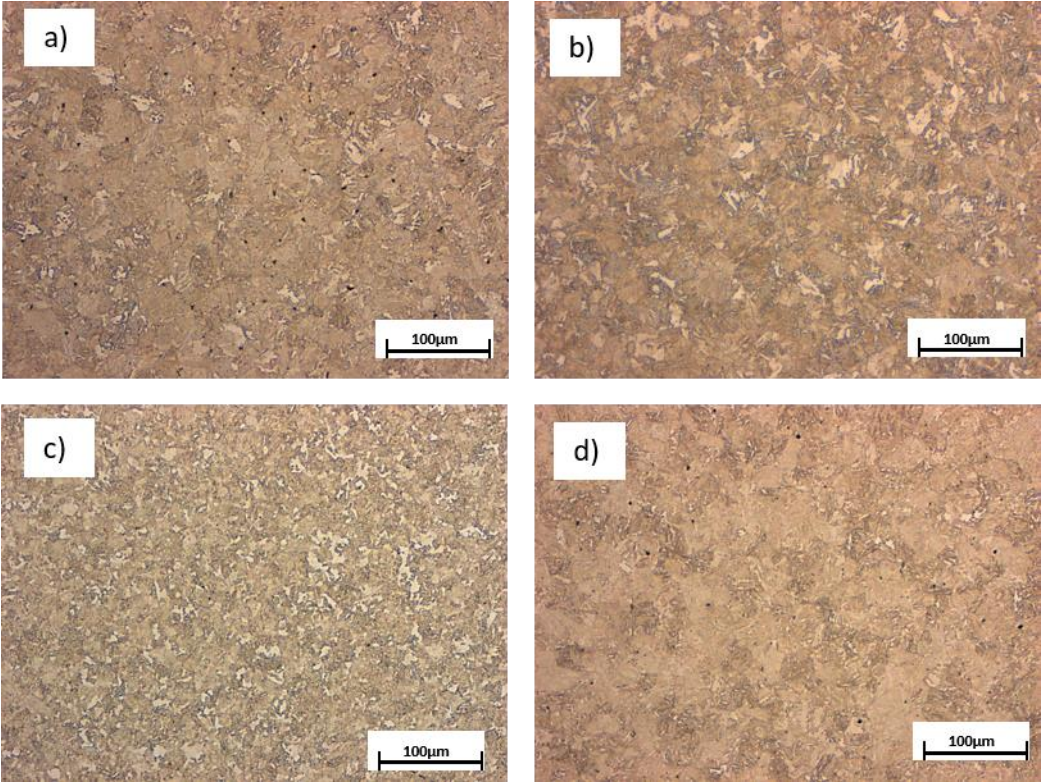


Fig. 42. Micrografías del núcleo a 200X , a) lote, b) continuo, c) vacío en N2 y  
d) vacío en aceite.



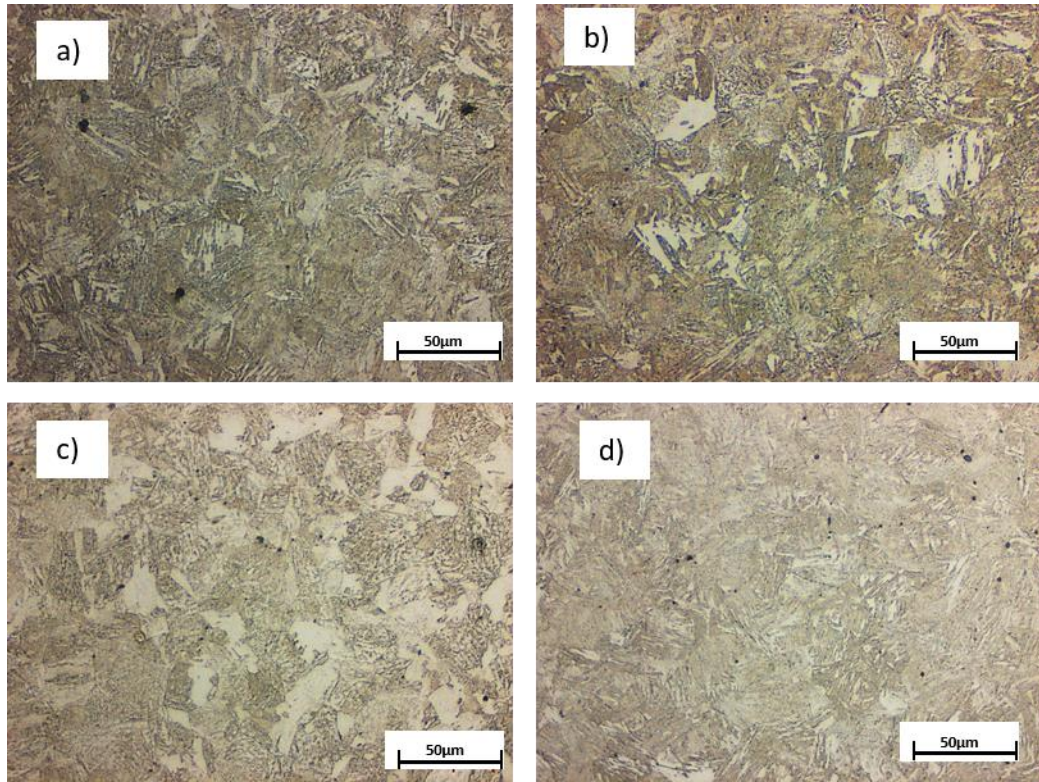


Fig. 43. Micrografías del núcleo a 500X, a) lote, b) continuo, c) vacío en N<sub>2</sub> y  
d) vacío en aceite.



#### 4.4.4 Análisis microestructural

Para el análisis de microestructuras del núcleo de la muestra se presenta la Fig. 44 con los resultados del analizador de imágenes Axio visión LE64 donde se observa en rojo la fase bainita y en verde ferrita correspondiente al núcleo de las distintas rutas de carburizado, se considera el 100% de la imagen, siendo la martensita la que no se evalúa en la imagen.

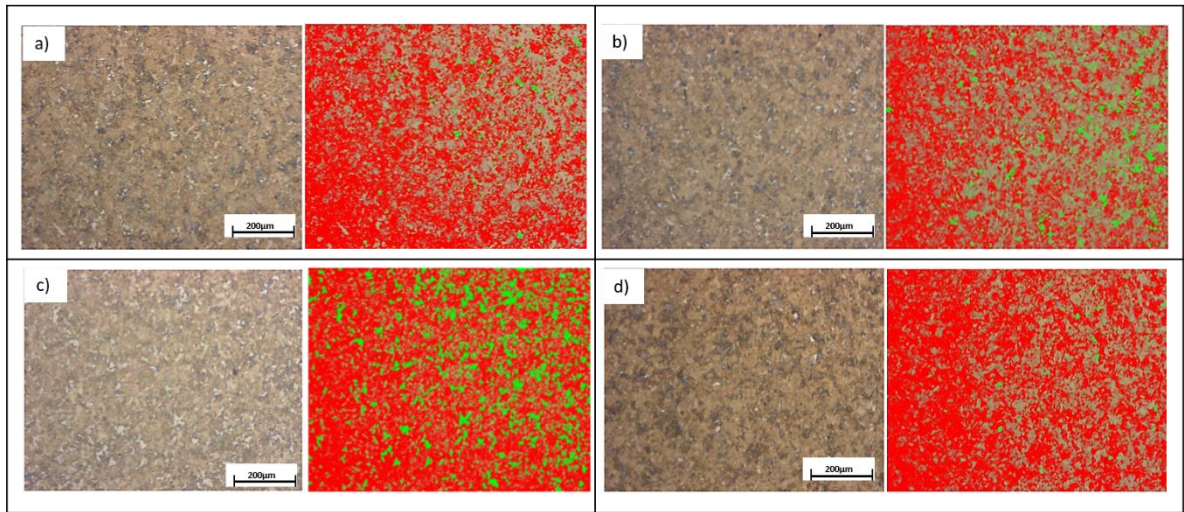


Fig. 44. Resultados de analizador de imágenes a 100X en el núcleo, a) lote, b) continuo, c) vacío en N2 y  
d) vacío en aceite.

La Fig. 45 muestra la gráfica con los resultados de los porcentajes de microestructuras de las distintas rutas de carburizado.

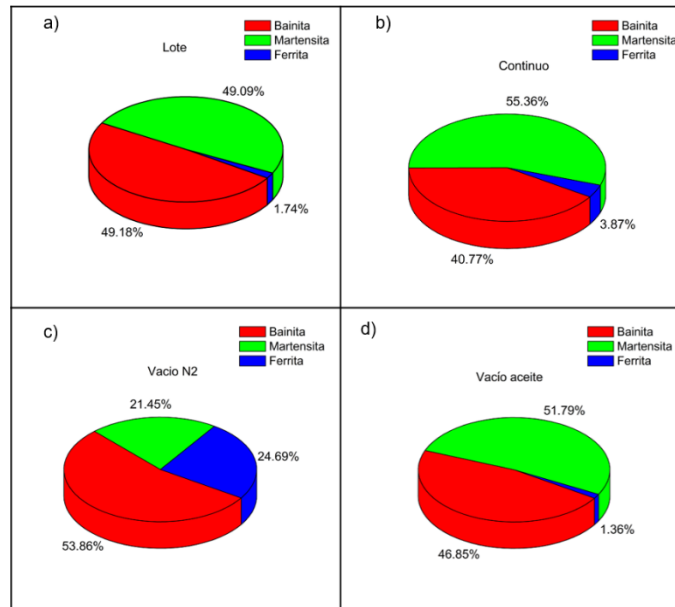


Fig. 45. . Resultados de los porcentajes de microestructuras en el núcleo de las distintas rutas de carburizado: a) lote, b) continuo, c) vacío en N2 y d) vacío en aceite.

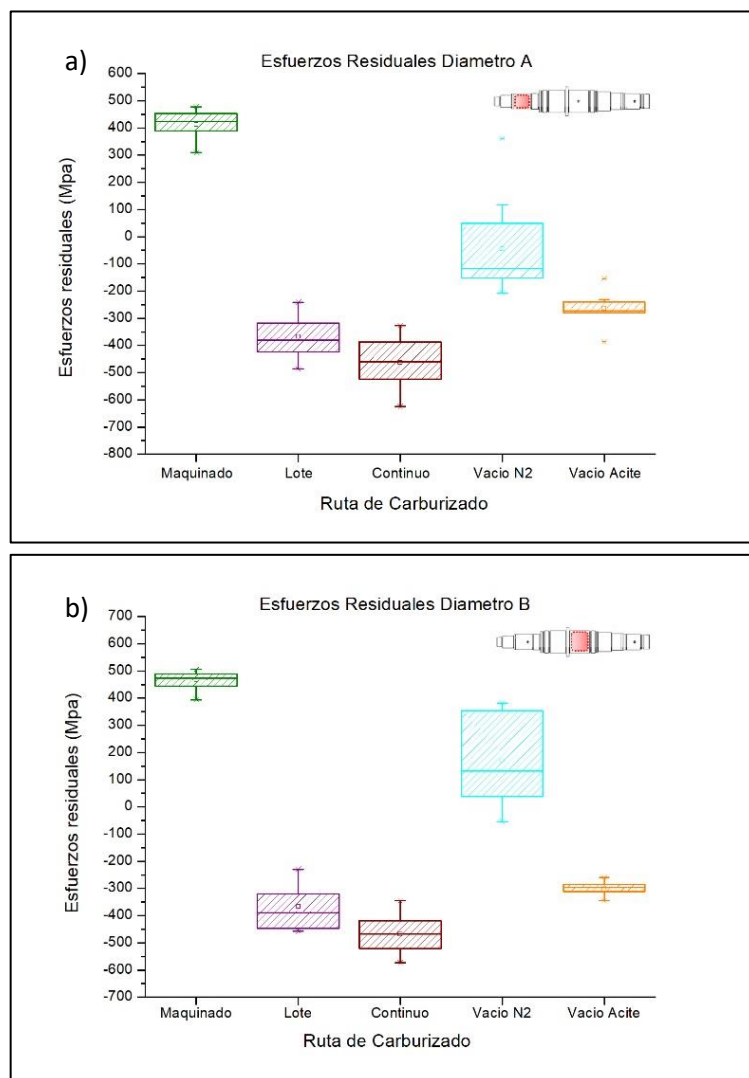
La Tabla 14 presenta el resumen de los resultados de los porcentajes de microestructuras en núcleo de las distintas rutas de carburizado.

Tabla 14. Resultados de porcentajes de microestructuras en Núcleo

Ruta de Carburizado	% Bainita	% Martensita	% Ferrita
Lote	49.18	49.09	1.74
Continuo	40.77	55.36	3.87
Vacío N2	53.86	21.45	24.69
Vacío aceite	46.85	51.80	1.36

#### 4.5 Medición de rayos-X para esfuerzos residuales

La Fig. 46 muestra los resultados de esfuerzos residuales superficiales medidos en la flecha principal de transmisión mediante difracción de rayos-X para las distintas rutas de carburizado en sus tres principales diámetros. Asimismo, la Tabla 15 presenta los resultados de esfuerzos residuales promedio y la desviación estándar de las tres distintas rutas de carburizado. Por otra parte, la Fig. 47 muestra la gráfica de incremento de esfuerzos residuales en magnitud.



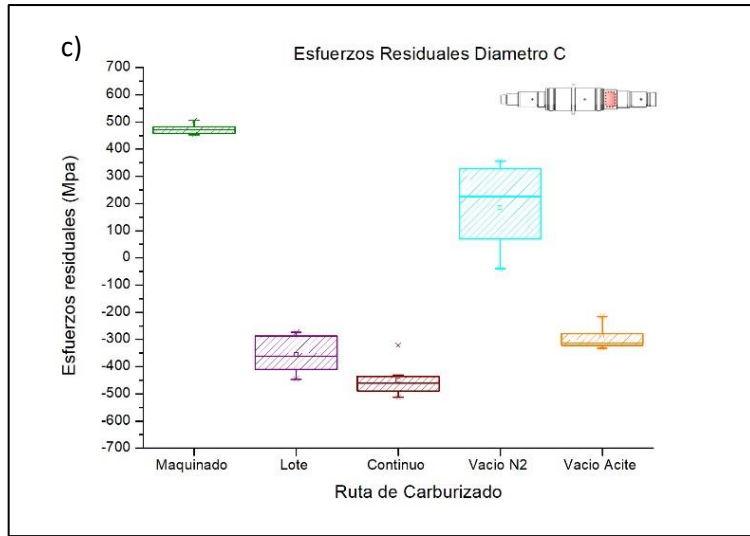


Fig. 46. Resultados de esfuerzos residuales superficiales para las distintas rutas de carburizado en a) diámetro A, b) diámetro B y c) diámetro C,

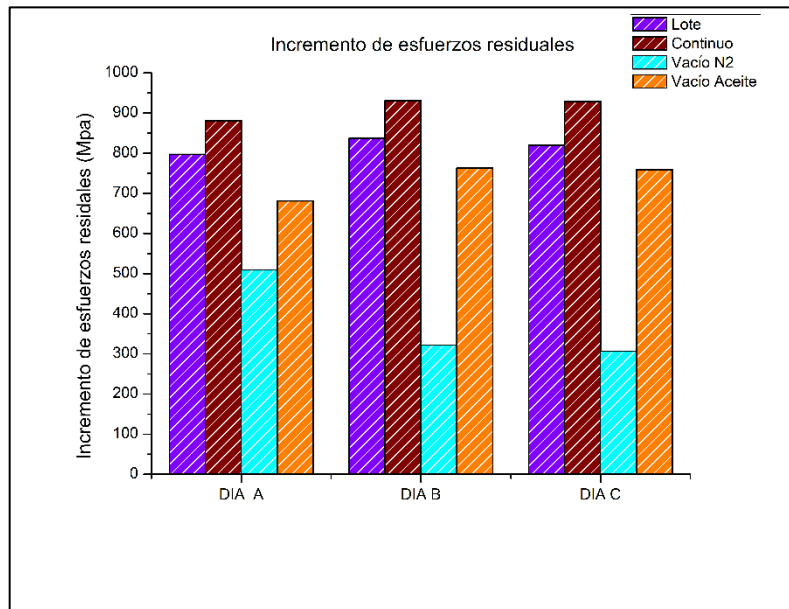


Fig. 47. Incremento en magnitud de esfuerzos residuales superficiales para las distintas rutas de carburizado en los tres principales diámetros analizados.

Tabla 15. Resultados de esfuerzos residuales superficiales.

Diámetro A					
Ruta de carburizado	Maquinado	Lote	Continuo	Vacío N2	Vacío aceite
Promedio (MPa)	414.69	- 383.04	-466.33	-96.03	-266.41
Desviación estándar	47.16	80.72	92.47	117.35	68.93
Incremento (MPa)	NA	797.72	881.01	510.71	681.1
Diámetro B					
Ruta de carburizado	Maquinado	Lote	Continuo	Vacío N2	Vacío Aceite
Promedio (MPa)	465.42	- 371.95	-466.44	142.73	-297.86
Desviación estándar	29.49	91.18	65.22	153.38	25.29
Incremento (MPa)	NA	837.37	931.86	322.7	763.28
Diámetro C					
Ruta de carburizado	Maquinado	Lote	Continuo	Vacío N2	Vacío Aceite
Promedio (MPa)	471.27	-349	-458.22	164.36	-288.01
Desviación estándar	16.48	68.28	50.73	141.91	45.17
Incremento (MPa)	NA	820.27	929.49	306.91	759.29

La Fig. 48 muestra la relación entre el porcentaje de ferrita obtenido en la caracterización de materiales y la media de esfuerzos residuales superficiales obtenidos para el diámetro B.

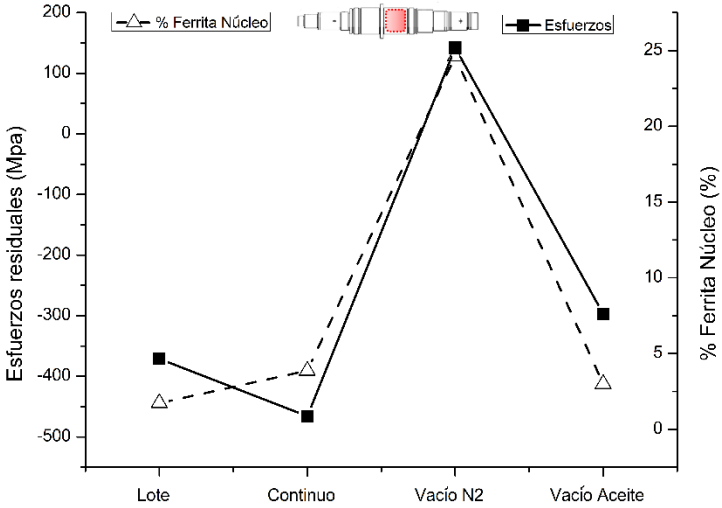


Fig. 48. Relación entre porcentaje de ferrita en núcleo y esfuerzos residuales superficiales.

## 4.6 Ensayos de tensión

La Fig. 49 muestra los resultados de las curvas esfuerzo deformación de las distintas rutas de carburizado en probetas obtenidas del núcleo de las flechas de transmisión. Mientras que la Fig. 50 muestra los resultados del esfuerzo máximo y del esfuerzo de cedencia promedio obtenido de los ensayos de tensión realizados.

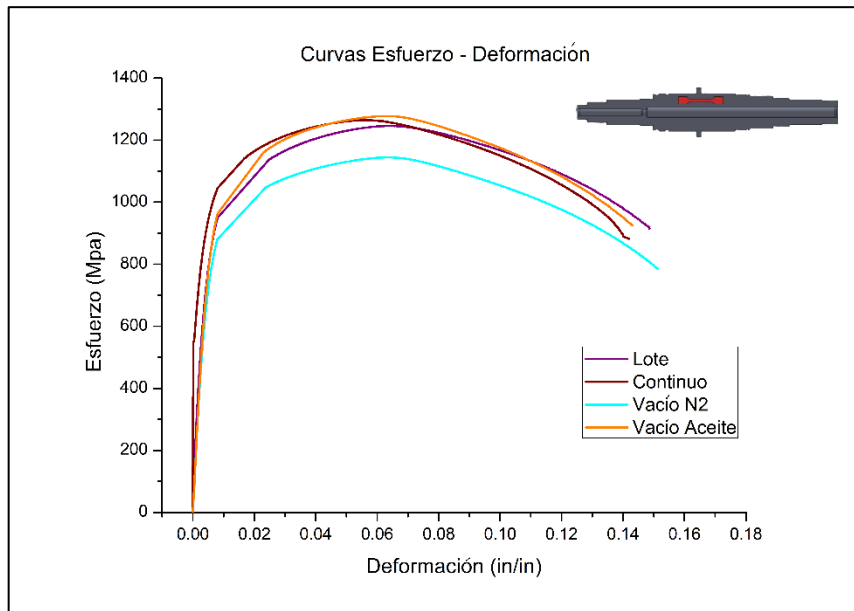


Fig. 49. Curvas esfuerzo – deformación para las distintas rutas de carburizado.

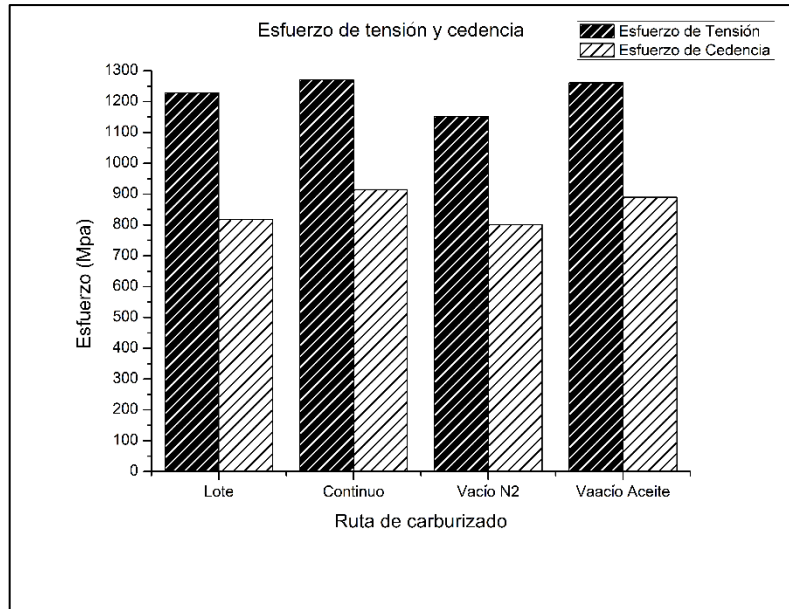


Fig. 50. Resultados de esfuerzo máximo y cedencia de las distintas rutas de carburizado.

La Tabla 16 muestra los resultados de esfuerzo al a tensión y cedencia de las distintas rutas de carburizado.

Tabla 16. Resultados de Esfuerzo a la tensión y cedencia.

Ruta de Carburizado	Lote	Continuo	Vacío N2	Vacío Aceite
Esfuerzo Tensión (MPa)	1229	1270	1151	1261
Esfuerzo Cedencia (MPa)	817	915	801	890



## 4.7 Distorsión

### 4.7.1 Excentricidad

A continuación, la Fig. 51 muestra las gráficas con los resultados de excentricidad de los tres diámetros inspeccionados de las flechas de transmisión.

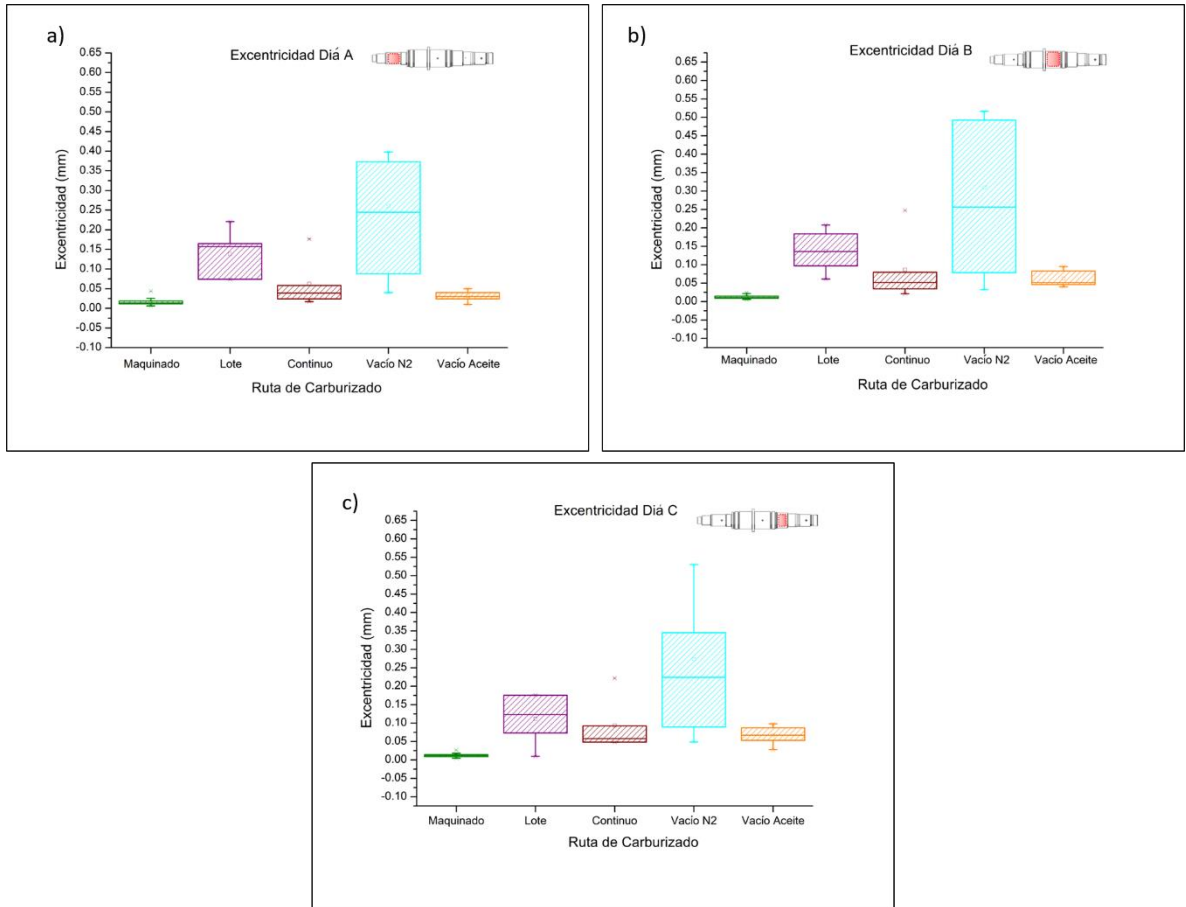


Fig. 51. Resultados de esfuerzo de excentricidad para los tres principales diámetros de las distintas rutas de carburizado, a) diámetro A, b) diámetro B y c) diámetro C.

A continuación, la Fig. 52 muestra los resultados de excentricidad de todos los diámetros de la flecha principal de transmisión, para las distintas rutas de carburizado empleadas. Asimismo, la Tabla 17 presenta los promedios de excentricidad obtenidos de las distintas rutas de carburizado.

Tabla 17. Resultados de excentricidad de los principales diámetros de la flecha principal de transmisión  
A, B y C.

Ruta de carburizado	Excentricidad en diámetro A (mm)	Excentricidad en diámetro B (mm)	Excentricidad en diámetro C (mm)
Lote	0.138	0.137	0.111
Continuo	0.062	0.086	0.093
Vacío N2	0.260	0.309	0.273
Vacío Aceite	0.030	0.063	0.066

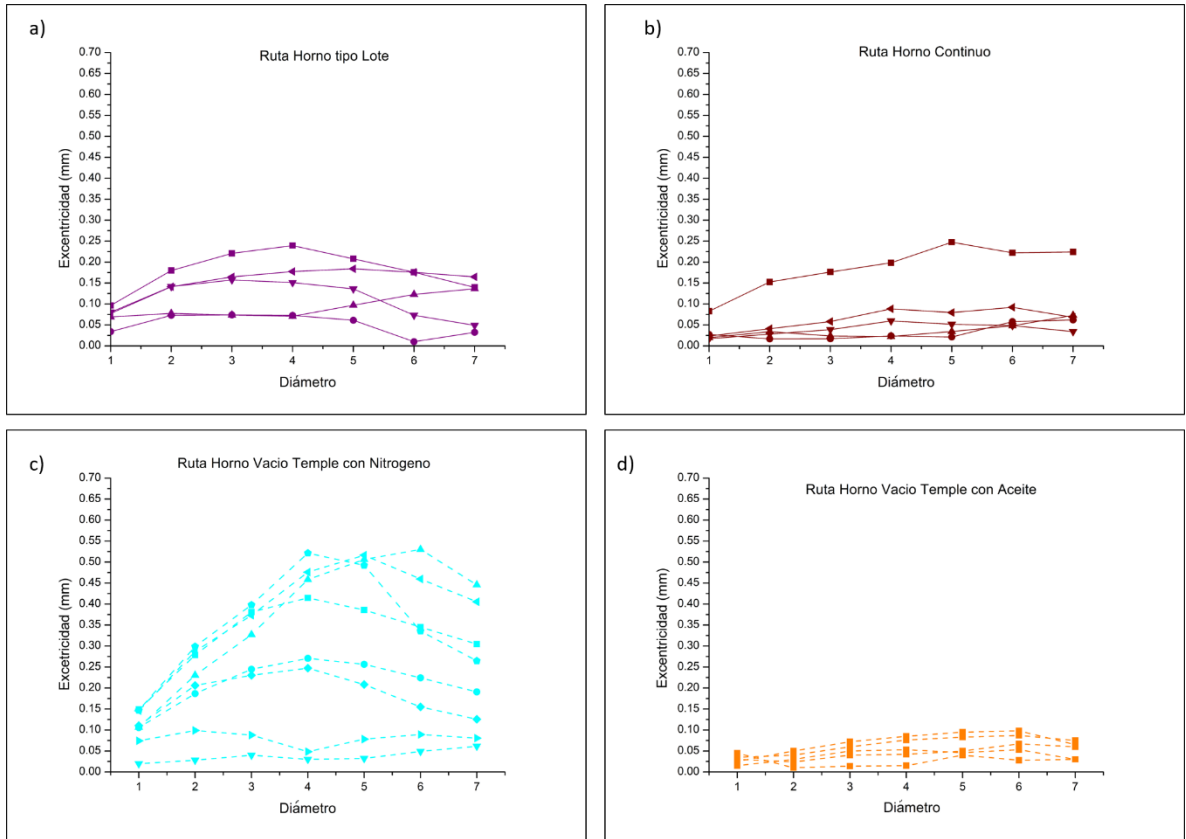


Fig. 52. Resultados de excentricidad en diferentes diámetros de las distintas rutas de carburizado, a) lote, b) continuo, c) vacío en N2 y d) vacío en Aceite

## 4.7.2 Cambio en diámetros

La Fig. 53 muestra el incremento en micrómetros de los tres diferentes diámetros evaluados correspondientes a las distintas rutas de carburizado. Por otra parte, en la Tabla 18 se observan los promedios de incremento en micrómetros de los principales diámetros de las distintas rutas de carburizado.

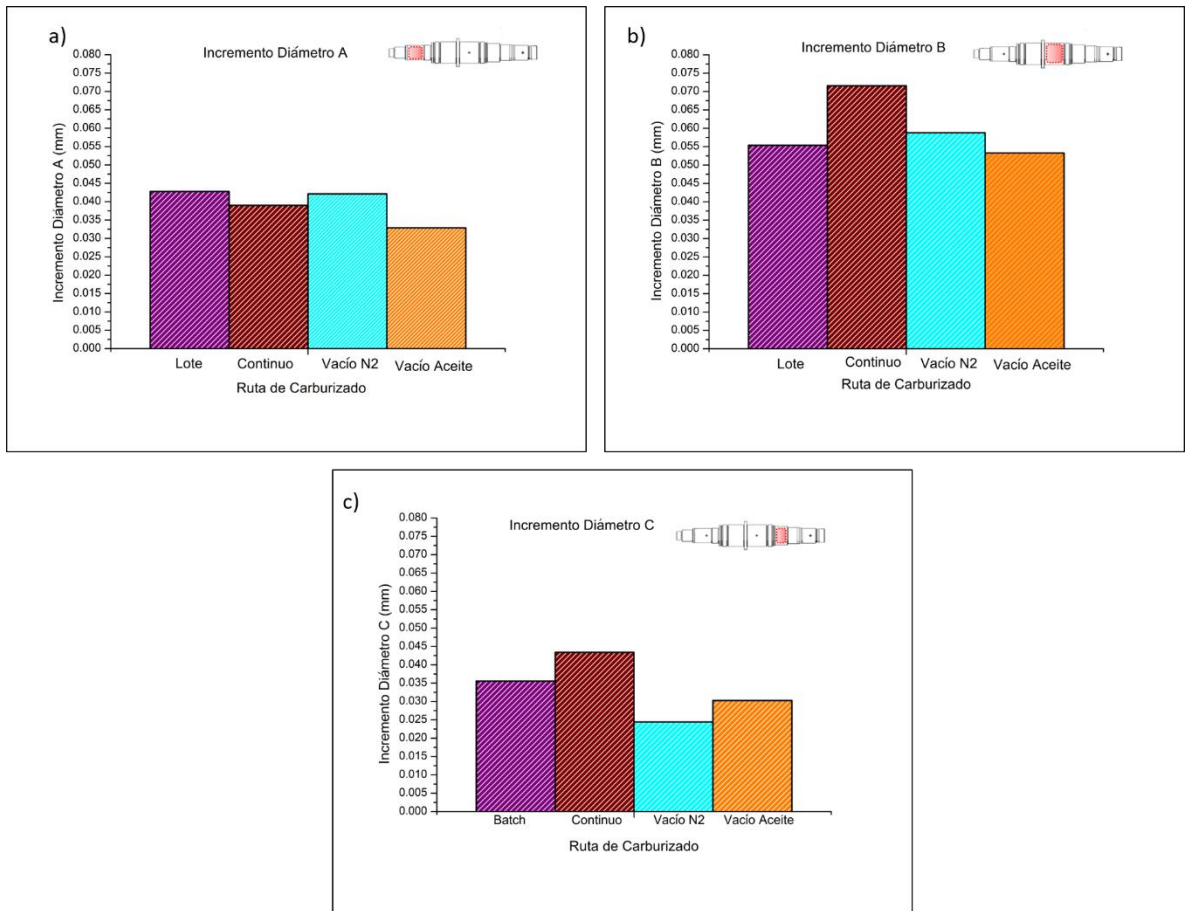


Fig. 53. Incremento en milímetros de los 3 principales diámetros de las distintas rutas de carburizado, a) diámetro A, b) diámetro B y c) diámetro C.

Tabla 18. Resultados de Incremento de Diámetro de los principales diámetros de la flecha principal de transmisión A, B y C.

Ruta de carburizado	Incremento diámetro A (mm)	Incremento diámetro B (mm)	Incremento diámetro C (mm)
Lote	0.042	0.049	0.035
Continuo	0.039	0.054	0.043
Vacío N2	0.042	0.057	0.024
Vacío Aceite	0.032	0.066	0.030

### 4.7.3 Cambio en Longitud

La Fig. 54 muestra el cambio de longitud de la flecha principal de transmisión en micrómetros de las distintas rutas de carburizado empleadas y la Tabla 19 la reducción en micrómetros de la longitud total de la flecha principal de transmisión para las distintas rutas de carburizado.

Tabla 19. Resultados de la reducción de longitud total de la flecha principal de transmisión para las distintas rutas de carburizado.

Ruta de carburizado	Reducción de longitud (mm)
Lote	-0.066
Continuo	-0.0005
Vacío N2	-0.286
Vacío Aceite	-0.139

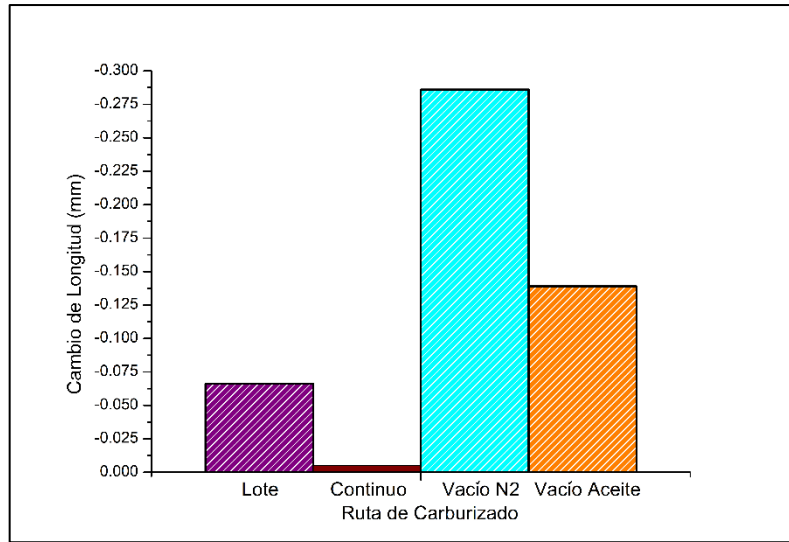


Fig. 54. Reducción en milímetros de la longitud total de la flecha principal de transmisión de las distintas rutas de carburizado.

#### 4.8 Relación entre excentricidad, cambio de longitud, esfuerzos residuales y microestructura

La Fig. 55 muestra la relación entre la excentricidad promedio del diámetro B (que presenta mayor valor) y el cambio de longitud que presentó cada ruta de carburizado.

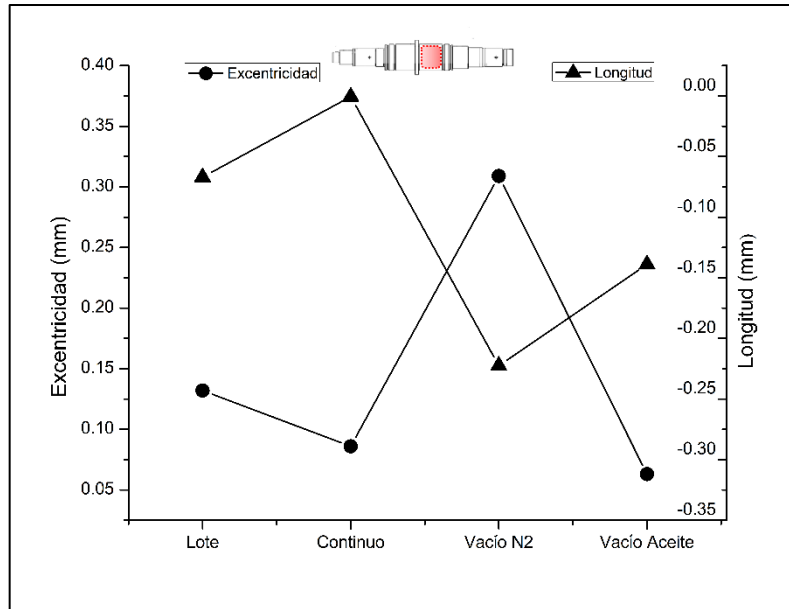


Fig. 55. Relación entre excentricidad y cambio de longitud para cada ruta de carburizado

La Fig. 56 muestra la relación entre la excentricidad (*run out*) promedio de los diámetros A, B y C y los esfuerzos residuales generados en la superficie de cada ruta de carburizado.

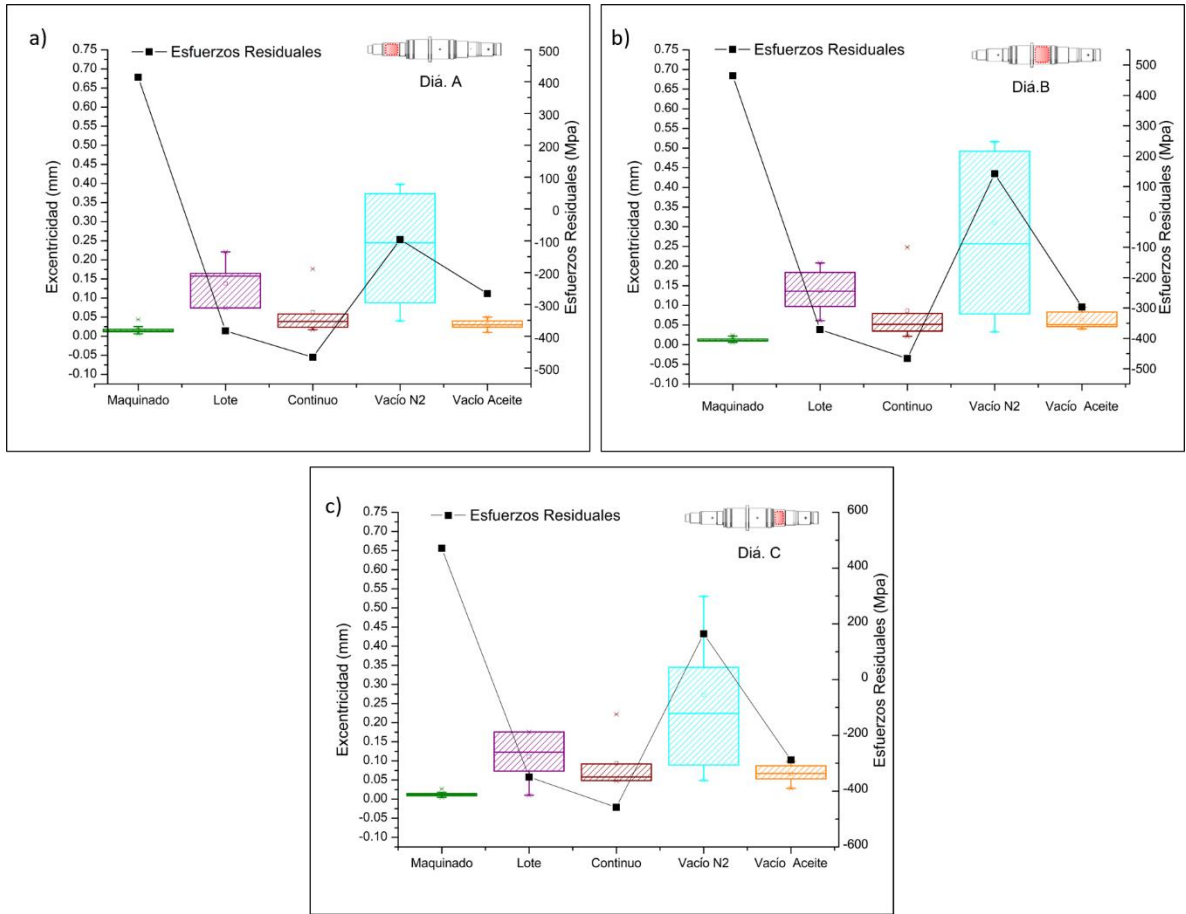


Fig. 56. Relación entre excentricidad (*run out*) y esfuerzos residuales para cada ruta de Carburizado.

La Fig. 57 muestra la relación entre la excentricidad promedio del diámetro B (que presenta mayor excentricidad) y el porcentaje de microestructuras obtenido en el núcleo de este mismo diámetro



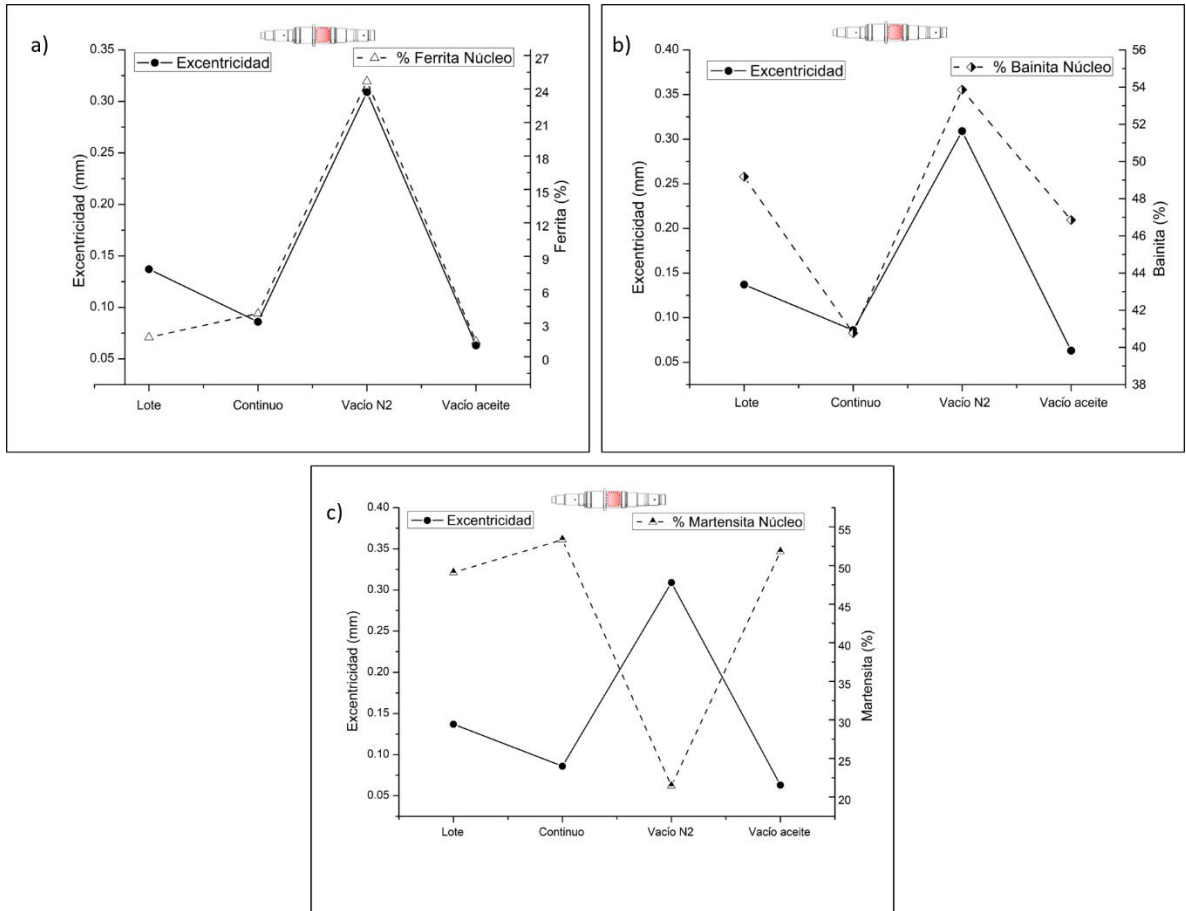


Fig. 57. Relación entre excentricidad y porcentaje de microestructuras para cada ruta de carburizado.

#### 4.9 Curvas de enfriamiento y coeficientes de transferencia de calor.

A continuación, en la Fig. 58 se observan las posiciones de los 6 termopares localizados a lo largo de la flecha principal de transmisión, en donde el termopar número 4 se posicionó en el núcleo de la pieza.

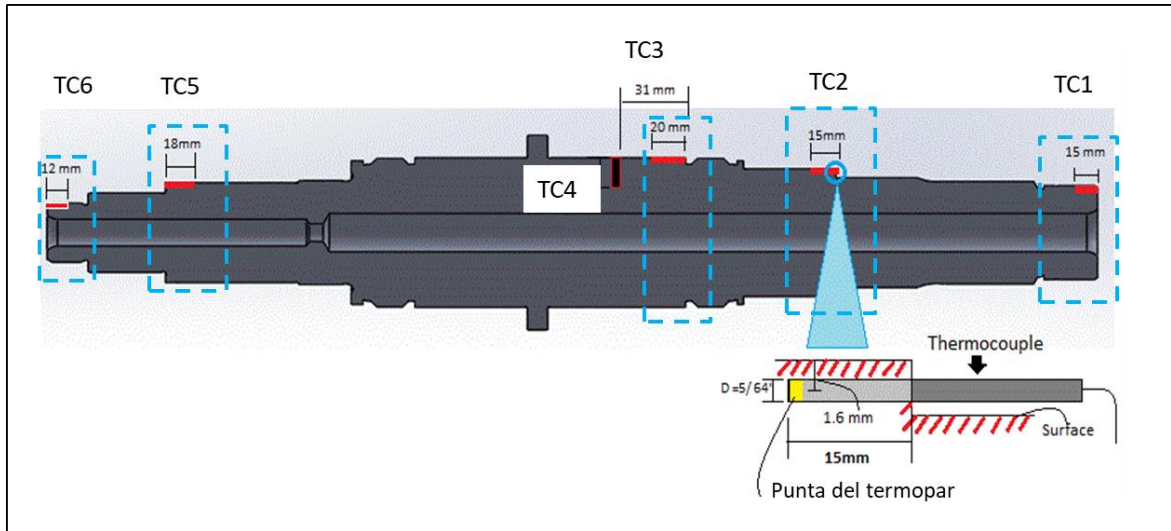


Fig. 58. Posiciones de los termopares en la flecha principal de transmisión

En la Fig. 59 se observan las curvas de calentamiento y enfriamiento correspondientes a los 6 termopares localizados a lo largo de la flecha.

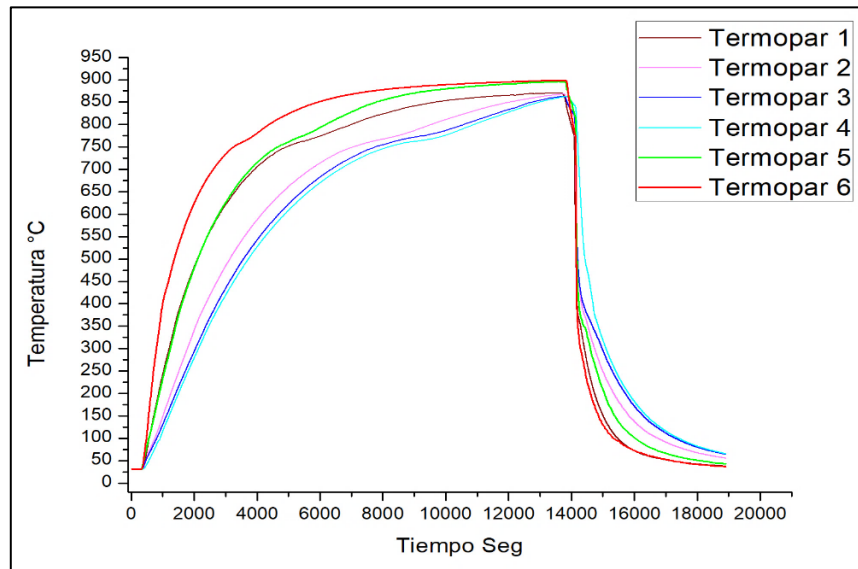


Fig. 59. Curvas de calentamiento y enfriamiento obtenidas de los 6 termopares.

#### 4.10 Velocidad de enfriamiento y coeficientes de transferencia de calor

Para cada una de las curvas de enfriamiento se calculó la derivada con respecto al tiempo ( $dT/dt$ ) para obtener la gráfica de velocidad de enfriamiento de cada termopar. Esto se puede observar en la Fig. 60.

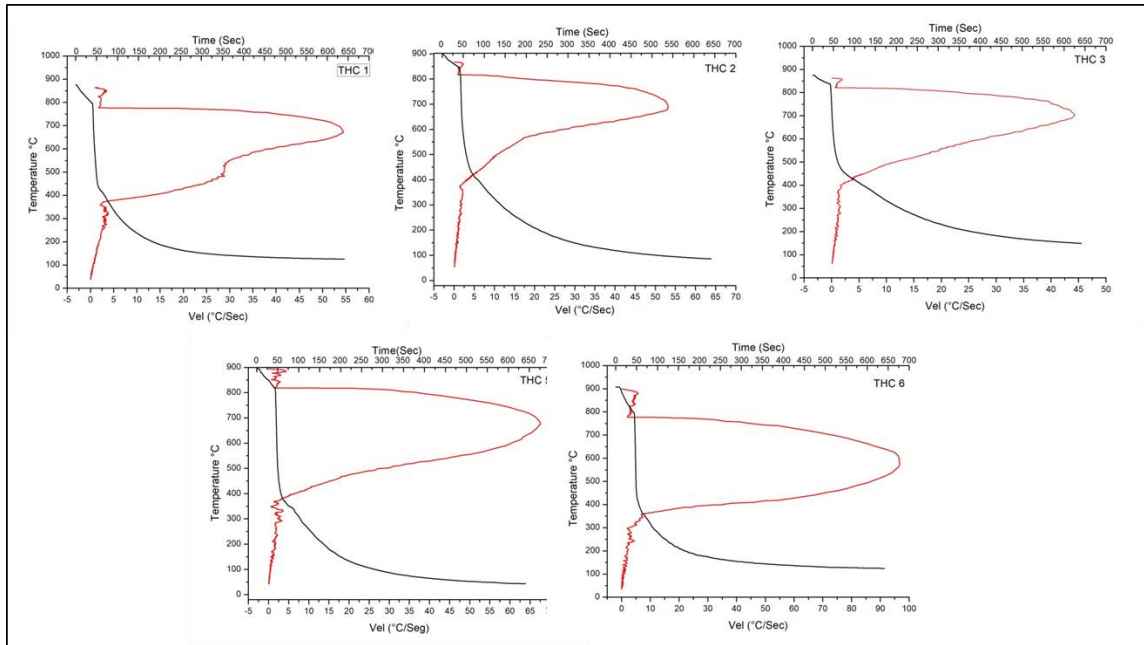


Fig. 60. Curva de enfriamiento y velocidad máxima obtenida por termopar.

En la Fig. 61 se muestran los resultados de los coeficientes de calor HTC calculados para los 5 termopares localizados en la superficie de la flecha.

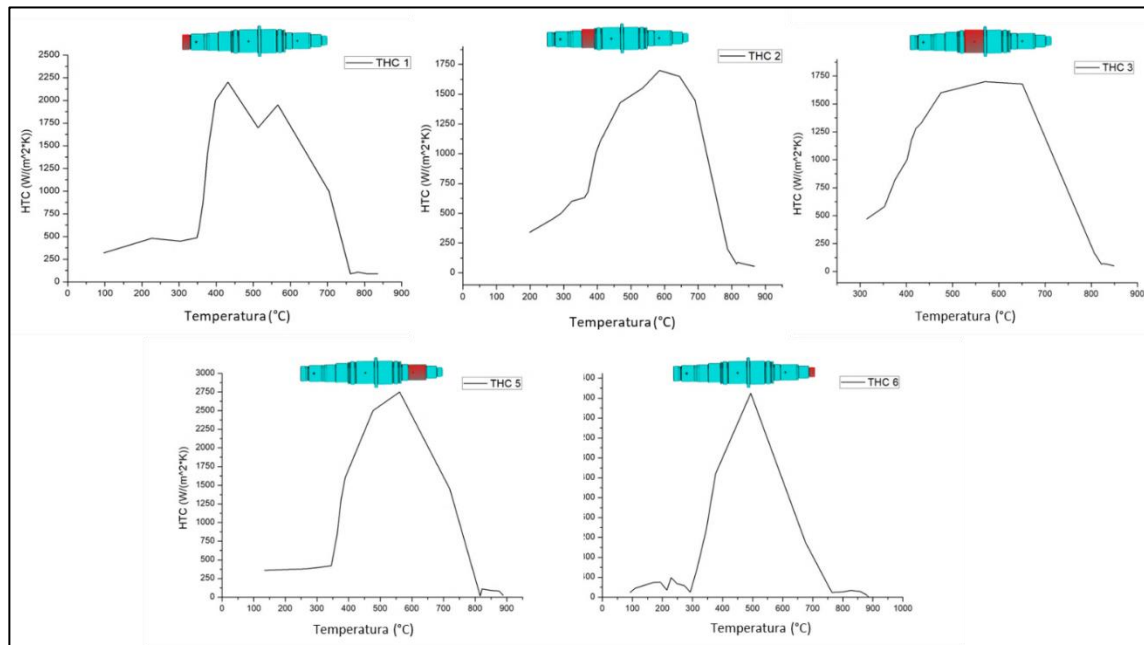


Fig. 61. Curvas de Coeficientes de transferencia de calor (HTC) en función de la temperatura.

La Tabla 20 muestra los valores de velocidad máxima, coeficientes de transferencia de calor y el error máximo encontrado entre la curva de enfriamiento experimental y la calculada en software de simulación multifísica.

Tabla 20. Velocidad máxima por posición de termopares

Termopar	Velocidad Máxima °C/ Seg	Máximo Coeficiente de transferencia de calor HTC W/m <sup>2</sup> K	Máximo error en °C de curva experimental vs curva calculada en software de metafísica.
TC1	54.43	2200	10.63
TC2	53.18	1700	7.85
TC3	44.28	1700	15.12
TC5	67.56	2500	6.73
TC6	96.66	4100	39

La Fig. 62 muestra la relación entre la excentricidad de las piezas enfriadas con aceite y la velocidad de enfriamiento máxima obtenida por diámetro en a) y en b) el coeficiente de transferencia de calor obtenido.

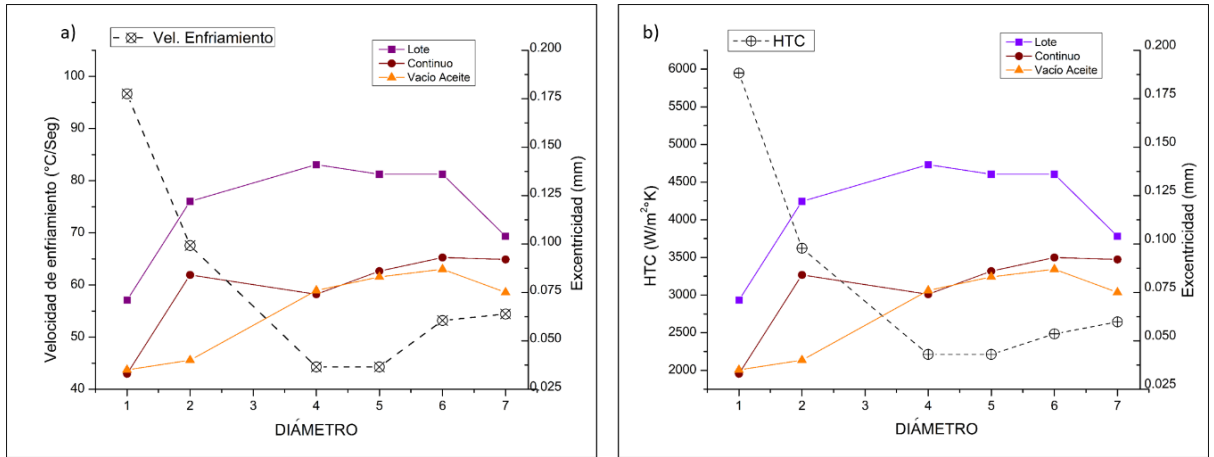


Fig. 62. Muestra para las piezas sometidas a enfriamiento con aceite en, a) Relación entre la excentricidad y velocidad de enfriamiento, b) Relación entre excentricidad y coeficiente de transferencia de calor

## CAPITULO V

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 5.1. Análisis de perfil de carburizado

En la Fig. 32 se observan 3 curvas mostrando el porcentaje de carbono de 1 muestra representativa procesada en las diferentes rutas de carburizado. Se observan algunas diferencias de porcentaje de carbono entre los procesos de carburizado, siendo el proceso de carburizado continuo el que presenta menor porcentaje de carbono hasta 1 mm de distancia desde la superficie, mientras que el proceso tipo lote es el que presenta mayor porcentaje de carbono, con más de 0.1 por ciento por encima del continuo a la distancia mencionada.

Por otra parte, se observa que el porcentaje de carbono en la superficie ronda desde 0.72% hasta 0.85%, siendo el proceso de carburizado al vacío el que presentó menor porcentaje de carbono en la superficie, esto debido a los ajustes iniciales del programa de carburizado, sin embargo, la especificación para estos componentes ronda desde 0.7 y hasta 0.85 % de carbono por lo que los tres procesos cumplen satisfactoriamente este requerimiento.

#### 5.2. Análisis de capa de carburizado

Para la evaluación de capas efectivas de carburizado se eligieron 2 diámetros de la flecha de transmisión, como se observa en la Fig. 25, siendo estos diámetros los de menor y mayor diámetro.

Los resultados de la Fig. 33 muestran que el proceso de carburizado tipo lote es el que presentó mayor capa de carburizado, con 1.53 mm en la zona 1 y 1.31 mm en la zona 2, mientras que el proceso que presentó menor capa carburizada fue el proceso de carburizado al vacío con nitrógeno como medio de temple ( $N_2$ ) con 1.07 mm en la zona 1 y 0.75 mm en la zona 2. Este comportamiento se atribuye de igual manera al ajuste inicial de tiempo del programa de carburizado, en donde un aumento de éste parámetro hubiera permitido mayor difusión de carbono y por consecuencia el crecimiento de la capa efectiva.

Otro dato importante es la relación entre la Zona 1 y zona 2, ya que según (14) Daniel H. Herring el proceso al vacío proporciona una capa más uniforme de carburizado en los componentes, sin embargo, esta ventaja no se ve reflejada en la flecha de transmisión comparando la zona 1 contra la zona 2, ya que la diferencia se mantiene prácticamente igual en todos los procesos de carburizado. La Tabla 9 muestra una relación entre capas muy similar en todos los componentes, siendo el proceso de carburizado al vacío con nitrógeno como temple la que tiene una relación de hasta 1.53 mm entre la zona 1 y la zona 2, mientras el proceso en lote tuvo una relación de 1.16 mm.

La diferencia mayor entre capas carburizadas en los componentes tratados al vacío y templados con nitrógeno no es la esperada debido a que una de las principales ventajas que se mencionan al usar la tecnología de vacío es la de obtener capas carburizadas más homogéneas entre diferentes zonas, ej: flanco de diente y raíz de diente, diámetros, entre otros. En este caso se asocia esta diferencia de capas carburizadas al enfriamiento con nitrógeno al que estuvieron sometidos los componentes, ya que, al no tener gran capacidad de enfriamiento, los diámetros mayores tardan más en enfriar y por consecuencia limita el endurecimiento de la capa. Posiblemente ajustes en velocidad de flujo del nitrógeno, aumento de presión, y ajustes en direccionamiento de flujo ayuden a homogenizar el enfriamiento y reduzcan esta diferencia presentada.

### **5.3. Análisis de dureza superficial y núcleo**

La Fig. 34 a) muestra los resultados de dureza superficial de las distintas rutas de carburizado, en donde se observa que la mayoría de los procesos presentó valores de 62 HRC en la superficie, mientras que el proceso de carburizado en horno continuo es el proceso que presentó menor dureza superficial, con valor promedio de 61.3 HRC, sin embargo, estos resultados corresponden a valores característicos de dureza superficial en componentes carburizados con porcentajes de carbono superficial de 0.72 y 0.85%, según L. Zhang y Y.M. Rong, R. Purushothaman (47).

Asimismo, la Fig. 34 b) muestra los resultados de dureza en núcleo de las rutas de carburizado, destacando los procesos por lote y continuo mostrando valores de 353 HB, mientras que los procesos al vacío presentan una menor dureza de hasta 315 HB en el proceso de vacío con temple en nitrógeno.

Los resultados obtenidos son esperados ya que los procesos por lote y continuo templan con aceite y altas agitaciones para la extracción de calor durante este proceso, mientras que el al vacío utiliza nitrógeno, lo cual reduce drásticamente la tasa de transferencia de



calor entre el medio de temple y las piezas, como lo menciona Weimin Gao, Lingxue Kong, and Peter Hodgson en el artículo “*Fluidized-Bed Quenching*” en la tabla de medios de temple y coeficiente de transferencia de calor (48) ocasionando una menor dureza de núcleo.

El proceso de carburizado al vacío con temple en aceite mostró un incremento en los valores de dureza con 339 HB, sin embargo, no alcanzó los valores de los procesos en lote y continuo, esto debido a diferencias en la velocidad de aceite de temple usado en cada caso y a velocidades de flujo que dependen del diseño del tanque de temple.

La Tabla 10 muestra el resumen de los valores de dureza superficial y de núcleo de cada ruta de carburizado.

## **5.4. Análisis y discusión de resultados microestructurales**

### **5.4.1 Análisis de oxidación intergranular**

La Fig. 35 muestra imágenes tomadas sin ataque con el microscopio óptico a 500X para revelar la oxidación intergranular de las muestras, causada por las altas temperaturas usadas para lograr la difusión de carbono en el proceso de carburizado. Generalmente esta característica es un defecto que afecta negativamente la fatiga del componente en servicio (49). En la figura se observa que solamente los procesos por lote y continuo presentan esta condición, mientras que los procesos al vacío no lo presentan, esto debido a que en los procesos de carburizado al vacío, se elimina la presencia de oxígeno y por consecuencia no se genera este fenómeno de oxidación.

La Fig. 36 presentan los histogramas de oxidación intergranular obtenidos en los procesos por lote y continuo, donde se observa que la mayoría de los datos ronda en 15  $\mu\text{m}$  en el proceso por lote y 12  $\mu\text{m}$  en el proceso continuo. En general para este tipo de procesos se espera que la oxidación intergranular esté por debajo de las 20  $\mu\text{m}$ .

En la Tabla 11 se puede observar el valor promedio de la oxidación intergranular, para los procesos por lote y continuo con 15.51  $\mu\text{m}$  y 12.06  $\mu\text{m}$  respectivamente. Los procesos al vacío no presentan esta condición tal cual las describe en las ventajas de este proceso Herring, Daniel H. en su estudio “*Selecting the Best Carburizing Method for Heat treatment of Gears*” (14)

#### **5.4.2 Análisis de microestructura en superficie, tamaño de martensita y austenita retenida.**

Las micrografías de la Fig. 37 tomadas a 500X sobre la superficie carburizada del diámetro B de las flechas de transmisión presentan a la microestructura martensita como la predominante es la martensita, junto con un porcentaje relativamente bajo de austenita retenida (blanco). Sin embargo, algunas diferencias se pueden observar en la morfología de la martensita entre los distintos procesos de carburizado, ya que los procesos de carburizado al vacío con temple con nitrógeno y aceite muestran una martensita más gruesa comparada con los otros procesos.

En la Fig. 38 los histogramas presentan los resultados de tamaño de martensita encontrados en los distintos procesos de carburizado y se observa que efectivamente los procesos de carburizado por lote y continuo que utilizan aceite como medio de temple presentaron una martensita de tamaño menor con valores de  $16\mu\text{m}$  a  $18\mu\text{m}$ , mientras que los procesos al vacío con nitrógeno y aceite como medios de temple mostraron valores con hasta  $30\mu\text{m}$ . Esta diferencia entre martensita está relacionada al tamaño de grano austenítico previo al temple, el cuál puede variar según la temperatura de procesamiento, aumentando de tamaño de grano austenítico conforme se aumenta la temperatura de procesamiento, tal y como ocurrió en los procesos de tratamiento térmico al vacío y como se explica en el artículo de Carola Celada-Casero (50) . Asimismo, la Tabla 12 muestra los resultados promedio de los valores de tamaño de martensita para las distintas rutas de carburizado.

En lo que respecta a los resultados de austenita retenida, estos se pueden observar en la Fig. 39, donde el proceso de carburizado en horno continuo presenta los valores de austenita retenida mayores con hasta un 19.4%, mientras que el proceso al vacío con nitrógeno como medio de temple fue el proceso que mostró menor cantidad de austenita retenida con un promedio de 11.8 % según la Tabla 13.

En general es deseable obtener valores entre 20% y 25% de austenita retenida, según George F. Vander Voort (51), ya que como esta fase es inestable, tiende a transformarse a martensita o bainita en un bajo porcentaje por las condiciones de esfuerzos a las que esté sometida la pieza, pudiendo ocasionar grietas durante la transformación por los esfuerzos de expansión creados.

La Tabla 13 muestra el valor promedio de los valores obtenidos de austenita retenida para las distintas rutas de carburizado.

### 5.4.3 Análisis microestructural de capa, transición y núcleo

La Fig. 40 presenta imágenes de la capa carburizada tomada a 100X, de las distintas rutas de carburizado. En la Fig. 40 b) de la muestra de carburizado en horno continuo con temple en aceite se puede identificar perfectamente las diferentes zonas de microestructura que se forman en un componente carburizado; capa carburizada con microestructura de martensita, zona de transición con microestructura de martensita y bainita y microestructura de núcleo con microestructura bainita y ferrita libre.

La Fig. 41 presenta imágenes de la microestructura de la zona de transición entre la zona carburizada y el núcleo de la pieza. Se espera principalmente que esta zona refleje un cambio gradual entre la microestructura de la superficie y la de núcleo, con el fin de que las propiedades mecánicas cambien de este mismo modo y no se vea una afectación en el material por los esfuerzos a los que vaya a ser sometido el componente.

En general se observa una transición similar en todos los procesos de carburizado, a excepción del proceso al vacío que uso aceite como medio de temple; Fig. 41 d), el cual no refleja una zona tan visible de transición, esto debido a la microestructura presente en la superficie. Además, presenta un tamaño de martensita mayor lo que ocasiona que se asemeje a una microestructura muy similar a la de transición.

Las siguientes figuras 42 y 43 muestran la microestructura del núcleo del diámetro B a 200X y a 500 X respectivamente para las rutas de carburizado establecidas.

En estas se observa que la microestructura consta principalmente de 3 fases; bainita (café oscuro), martensita (café claro) Y ferrita (blanco).

### 5.4.4 Análisis microestructural

La Fig. 44 muestra los resultados del analizador de imágenes donde se presenta en rojo la fase de bainita y en verde la fase ferrita en el núcleo de las distintas rutas de carburizado.

Se observa que el proceso de carburizado al vacío con temple en aceite Fig. 44d) mostró menores zonas de ferrita (zonas verdes), seguido por el proceso de carburizado por lote Fig. 44a) y continuo Fig. 44b), mientras que el proceso al vacío con temple en nitrógeno mostró la mayor cantidad de ferrita.

La Fig. 45 presenta los resultados de los porcentajes de microestructuras de las distintas rutas de carburizado y la Tabla 14 muestra el resumen de estos resultados, destacando que el proceso que obtuvo menor porcentaje de ferrita en núcleo fue la Fig. 45d) de vacío con

temple con aceite con 1.36 de ferrita, un 46% de bainita y un 51.8% de martensita, mientras que en la Fig. 45c) proceso al vacío usando temple con nitrógeno se obtuvo hasta 24% de ferrita en núcleo y solo un 21% de martensita en núcleo, esto es indicador de una baja transferencia de calor durante el enfriamiento en el proceso de temple debido al uso de gases en lugar de aceites, generando una pobre transformación de bainita y/o martensita en el núcleo de estos componentes.

## 5.5 Análisis de medición de rayos-X para esfuerzos residuales

La Fig. 46 muestra los resultados de esfuerzos residuales superficiales medidos en la flecha principal de transmisión con difracción de rayos-X para las distintas rutas de carburizado en sus tres principales diámetros. Se observa que las piezas medidas en condición de maquinado previo al tratamiento térmico de carburizado tienen esfuerzos de tensión en la superficie con una media de 465 Mpa.

Posterior al tratamiento térmico con las distintas rutas de carburizado se encontró que los procesos de carburizado por lote y continuo con temple en aceite son los que obtienen una generación de esfuerzos compresivos mayores para los 3 diámetros medidos, siendo el proceso de horno continuo el que genera mayor impacto alcanzando una media de -466 Mpa.

Por otra parte, el proceso de carburizado al vacío y temple con nitrógeno es el que generó menor cantidad de esfuerzos compresivos en el núcleo, con una media de 142 Mpa positivos, lo cual representa una desventaja significativa para la vida a fatiga del componente.

La Fig. 47 presenta la gráfica de incremento de esfuerzos residuales en magnitud, donde se observa que los procesos que utilizan aceite para temprar tienen un incremento mayor en comparación con el proceso que utiliza nitrógeno.

Los resultados presentados de esfuerzos residuales son consistentes con lo que menciona K. Dybowski, J. Sawicki, P. kul, B. Januszewicz , R. Atraszkiewicz y S. Lipa (36), en el artículo “The effect of the quenching method on the deformations size of gear wheels after vacuum carburizing, donde demostraron que con temple en aceite se obtienen mayores esfuerzos compresivos resultando en mayor distorsión.

En la Fig. 48 la relación que existe para el diámetro B entre el porcentaje de ferrita en núcleo y los esfuerzos residuales compresivos superficiales de cada ruta de carburizado es expuesta, en esta se observa que los esfuerzos superficiales son dependientes directamente del porcentaje de ferrita en núcleo, es decir, entre menor porcentaje de ferrita mayores esfuerzos a compresión (negativos) mostrados en la superficie y viceversa. Esto se puede asociar con la tasa de enfriamiento alcanzada en las distintas rutas de carburizado, donde el temple con aceite favorece la generación de microestructuras tipo bainita y martensita, mientras que el temple con nitrógeno el cual presenta el menor coeficiente de transferencia de calor propicia una formación menor de estas fases y una mayor de ferrita en núcleo.

## 5.6 Análisis de resistencia mecánica

En la Fig. 49 se presentan los resultados de las curvas esfuerzo deformación de las distintas rutas de carburizado, de las probetas obtenidas del núcleo de las flechas de transmisión.

En esto, se observa que los tratamientos térmicos templados con aceite presentan un valor mayor de esfuerzo a la tensión de material, siendo los procesos de carburizado continuo y vacío con temple en aceite los que presentaron un valor más alto con 1270 y 1260 MPa, respectivamente, mientras que los procesos con temple en gas presentan valores más bajos con 1150 MPa.

La Tabla 16 presenta los valores promedio obtenidos tanto de esfuerzo a tensión como de cedencia de las distintas rutas de carburizado, mientras que la Fig. 50 lo hace de forma gráfica con estos resultados.

## 5.7 Distorsión

### 5.7.1 Análisis de excentricidad

La Fig. 51 muestra los resultados obtenidos de excentricidad (*run out*) medidos en 3 diámetros principales después de los distintos tratamientos térmicos de carburizado. Se puede observar en a) los resultados correspondientes al diámetro A, en b) al diámetro B, y en c) al diámetro C, donde claramente se observa que los procesos que presentaron una menor excentricidad (*run out*) fueron el continuo y de vacío con temple en aceite y a su vez también estos fueron lo que menor variación de resultados mostraron.

Para el diámetro A el proceso de carburizado al vacío con temple en aceite presentó el resultado con menor distorsión promedio con 0.03 mm y una desviación estándar de 0.016 mm, seguido por el continuo con 0.062 mm y desviación estándar de 0.018 mm, mientras que el proceso que presentó mayor excentricidad promedio fue el de vacío con temple nitrógeno, con excentricidad promedio de 0.270mm. con desviación estándar de hasta 0.141mm.

El diámetro B es el que en todos los procesos presentó mayor incremento de excentricidad, siendo el carburizado al vacío con temple en aceite el que obtuvo el menor resultado en distorsión promedio con 0.063 mm, seguido por el continuo con 0.086 mm y una variación estándar igual de 0.025 mm. El proceso que mostró mayor incremento de excentricidad

fue el de vacío con temple en nitrógeno con una distorsión promedio de 0.309 mm y desviación estándar de 0.194 mm.

Para el diámetro C el carburizado al vacío con temple en aceite fue el que presentó el resultado con menor distorsión promedio con 0.066 mm, seguido por el continuo con 0.093 mm y una variación estándar promedio de los dos procesos de 0.024, mientras que el proceso que obtuvo mayor excentricidad promedio fue el de vacío con temple en nitrógeno con valores promedio de 0.273 mm además de una mayor desviación estándar con 0.192 mm.

La Fig. 52 muestra de forma gráfica el valor de excentricidad alcanzado de distintas flechas que se sometieron a las distintas rutas de carburizado, en conjunto con el valor de excentricidad alcanzado de los principales diámetros de la flecha principal de transmisión. De igual forma se observa el rango de dispersión de resultados de cada proceso, siendo los procesos con temple en aceite los que mejores resultados muestran, específicamente el proceso de carburizado al vacío con temple en aceite y el proceso de carburizado continuo.

La Tabla 17 muestra los promedios de excentricidad obtenidos de las distintas rutas de carburizado.

### **5.7.2 Análisis dimensional de diámetros**

La Fig. 53 muestra el incremento en milímetros de los tres diferentes diámetros evaluados por las distintas rutas de carburizado.

En la Fig. 53 a) se observa el incremento en milímetros de diámetro A después del carburizado, en general las 5 rutas de carburizado tienen valores similares de distorsión. Siendo el proceso por lote y el vacío con temple en nitrógeno los que presentan mayor aumento en este diámetro con 0.042 mm.

Por otro lado, el diámetro B muestra el mayor incremento, siendo el proceso de carburizado continuo el de mayor impacto con hasta 0.071 mm, mientras que el proceso de vacío con temple aceite es el que tienen menor incremento con 0.053 mm.

Mientras que para el diámetro C, el proceso continuo mostró el mayor incremento con 0.043 mm comparado con el proceso de vacío con temple en nitrógeno que presentó un incremento de 0.024 mm

La Tabla 18 muestra los promedios de incremento en milímetros de los principales diámetros de las distintas rutas de carburizado.

### **5.7.3 Análisis del cambio en longitud**

La Fig. 54 muestra el cambio de longitud de la flecha principal de transmisión en milímetros de las distintas rutas de carburizado empleadas, en esta gráfica se observa que la longitud de la flecha se acorta en diferente proporción según la ruta de carburizado, siendo la ruta de vacío con temple en nitrógeno la que representa una mayor reducción de longitud con 0.286 mm, mientras que la que menos variación de longitud tuvo fue el carburizado con temple en aceite por lote y continuo con solo 0.005 y 0.066 mm respectivamente.

Para los casos con mayor contracción en longitud, se relaciona directamente el nivel de excentricidad presentado, siendo el temple nitrógeno el que más excentricidad promedio presentó.

La Tabla 19 muestra el incremento en milímetros de la longitud total de la flecha principal de transmisión para las distintas rutas de carburizado.

### **5.8 Análisis de la relación entre excentricidad, cambio de longitud, esfuerzos residuales y microestructura.**

La Fig. 55 muestra la relación inversamente proporcional entre la excentricidad promedio del diámetro B (que presenta mayor excentricidad) y el cambio de longitud que presentó cada ruta de carburizado. En esta se observa que la relación es directamente proporcional, ya que a menor excentricidad promedio obtenido menor contracción en la longitud se presenta, este efecto se acentúa sobre todo en los procesos enfriados con aceite en hornos convencionales tipo lote y continuo mostrando el menor excentricidad promedio y el menor cambio en longitud, mientras que en la ruta de carburizado al vacío y temple con nitrógeno se presentó mayor excentricidad promedio y fue justamente la que mostró una contracción mayor en longitud total.

La Fig. 56 muestra la relación entre la excentricidad promedio de los diámetros A, B y C, así como los esfuerzos residuales generados en la superficie en estos mismos diámetros.



En la Fig. 56 a) se observa la relación en el diámetro A, en b) la del diámetro B y en c) la del diámetro C, en las tres gráficas el comportamiento es similar y se observa que hay una fuerte relación inversamente proporcional entre la excentricidad que se genera en cada ruta de carburizado y la media de esfuerzos residuales obtenida, donde se aprecia que los procesos que utilizaron temple con aceite y que presentaron menor excentricidad promedio también son los que generan mayores esfuerzos residuales, mientras que el proceso al vacío con temple con nitrógeno es el que presentó en promedio los menores esfuerzos.

Asimismo, la Fig. 57a) muestra la relación entre la excentricidad promedio del diámetro B (que presenta mayor excentricidad) y el porcentaje de fases obtenido en el núcleo de este mismo diámetro. En la Fig. 57a) se observa la relación con la ferrita, en la Fig. 57b) con la bainita y en la Fig. 57c) con la martensita.

En estas imágenes observamos que la excentricidad es fuertemente influenciado por las fases generadas durante el proceso de enfriamiento o temple de las piezas, específicamente con la bainita, ya que a menores porcentajes de bainita en núcleo menor resultado de excentricidad y viceversa, sin embargo, en la Fig. 57c) observamos que la excentricidad también es inversamente proporcional a la cantidad de martensita en núcleo encontrada, es decir, a mayor cantidad de martensita en núcleo, menor excentricidad presentada y viceversa. Estos resultados se asocian y hacen sentido de acuerdo a la tasa de enfriamiento que genera cada medio de temple durante el enfriamiento, siendo los temples con aceite los que presentan una mayor tasa de enfriamiento y por consecuencia microestructuras con mayor porcentaje de martensita, mientras que la ruta con temple en nitrógeno presentó microestructuras con mayor cantidad de ferrita y bainita en núcleo asociado por el bajo coeficiente de transferencia de calor, esto de acuerdo a la imagen de coeficientes de transferencia de calor para diferentes medios de temple publicada por Y Lu, Y Rong y RD Sisson (17).

## **5.9 Obtención de curvas de enfriamiento y coeficientes de transferencia de calor.**

En la Fig. 58 se observan las posiciones de los 6 termopares localizados a lo largo de la flecha principal de transmisión, en donde el termopar número 4 se posicionó en el núcleo de la pieza. Esta pieza fue procesada en horno tipo lote y templada con aceite.

En la Fig. 59 se presentan las curvas de calentamiento y enfriamiento correspondientes a los 6 termopares localizados a lo largo de la flecha, en estas se observa que la zona 6 es la que alcanza la temperatura de austenización (900 °C) primero al ser el diámetro con menor sección transversal, mientras que el termopar 4 (en el núcleo) solo alcanzó 850°C en 3.8 horas de calentamiento.

Por otro lado, ya al ser templada la pieza se observa la curva de enfriamiento en donde de igual manera el termopar 6 es el primero que llega a temperatura del aceite de temple de 30 °C.

## **5.10 Velocidad de enfriamiento y coeficientes de transferencia de calor HTC**

La Fig. 60 muestra las curvas de enfriamiento y velocidad máxima obtenidas para cada termopar localizado en la flecha principal de transmisión.

En estas se observa que el termopar de la zona 6 es el que alcanza mayor velocidad de enfriamiento máximo de hasta 96.6 °C/s, mientras que el termopar 3, posicionado en el diámetro mayor de la flecha es el que alcanza menor velocidad de enfriamiento con apenas 44.28 °C/s, esto sin contar el termopar del núcleo.

La Fig. 61 muestra los resultados de los coeficientes de calor HTC calculados para los 5 termopares localizados en la superficie de la flecha, donde se obtuvo de igual modo que la zona 6 es la que alcanza un coeficiente de transferencia de calor mayor con 4100 W/m<sup>2</sup>·K, mientras que el termopar 3 situado en el diámetro mayor alcanza únicamente 1700 W/m<sup>2</sup>·K.

La Tabla 20 presenta los valores de velocidad máxima, coeficientes de transferencia de calor y el error máximo encontrado entre la curva de enfriamiento experimental y la calculada en software de simulación multifísica.

La Fig. 62 muestra la relación entre el valor de excentricidad de las piezas enfriadas con aceite y la velocidad de enfriamiento obtenida por diámetro en a) y en b) el coeficiente de transferencia de calor obtenido.

En ambas gráficas se puede observar que el diámetro 1 y 2, representado con el termopar 6 y 5 respectivamente, presentan menor excentricidad y son los que alcanzan un coeficiente de transferencia de calor más alto equivalente a una mayor velocidad de enfriamiento, mientras que los diámetros mayores ( diámetro 4, 5 y 6) representados por los termopares 3 y 2 son los que alcanzan menor coeficiente de transferencia de calor, menor velocidad de enfriamiento y mayor excentricidad alcanzado en las tres rutas de carburizado, por lote, continuo y vacío.

Estas diferencias encontradas durante el enfriamiento del componente propician que se generen gradientes térmicos de diferente magnitud en cada zona y por lo tanto problemas de distorsión durante el enfriamiento. Tal como lo comenta Arthur C. Reardon (52) en su artículo “*Press Quenching and Effects of Prior Thermal History on Distortion during Heat Treatment*”, donde comenta que idealmente la temperatura de transformación debe de ser la misma a lo largo de la sección transversal durante el temple para que el componente sea capaz de transformar uniformemente, sin embargo, en partes carburizadas, la transformación de martensita ( $M_s$ ) no es uniforme en la sección transversal del componente ya que durante la carburización se forma un gradiente de carbón en la superficie del mismo, lo que ocasiona un gradiente en la temperatura de transformación cerca de la superficie que promueve y agrava los problemas de distorsión durante el temple.

Asimismo, menciona que el calor debe ser extraído del componente de la manera más uniformemente posible y que en piezas que son diseñadas con cambios drásticos de geometría con secciones delgadas y gruesas localizadas una junto a la otra esto es difícil de lograr. (52)

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la presente investigación son válidos única y exclusivamente bajo las condiciones establecidas en el diagrama experimental mostrado.

Se evaluaron 4 diferentes rutas de carburizado para la flecha principal de transmisión; carburizado convencional tipo lote y continuo con temple en aceite, carburizado al vacío con nitrógeno como medio de temple, y carburizado al vacío con temple en aceite para ver su efecto en distorsión, propiedades metalúrgicas y esfuerzos residuales.

En general, las 4 rutas de carburizado cumplen con las propiedades mecánicas y de microestructura, siendo las rutas de carburizado convencional con temple en aceite las que presentan más altas propiedades mecánicas y de dureza en núcleo, mientras que la ruta de carburizado al vacío con temple en nitrógeno presentó resultados menores, con un 11% menos de dureza en núcleo y 10% menos de resistencia a la tracción.

La microestructura resultante para la superficie de la flecha principal de transmisión fue de martensita fina a fina-media, ideal para este tipo de aplicaciones, mientras que las microestructuras en el núcleo presentaron mezcla de martensita, bainita y ferrita en diferentes proporciones, siendo la ruta de carburizado con nitrógeno como medio de temple la que presentó una mayor proporción en el porcentaje de ferrita lo que ocasiona la disminución de dureza.

Para el caso de distorsión, se observó que las rutas de carburizado con temple en aceite son las que presentaron menores resultados de excentricidad (*run out*), menor variación en diámetros y menor variación en longitud final, siendo la ruta de carburizado convencional continuo con temple en aceite y al vacío con temple en aceite las rutas con menores variaciones geométricas, mientras que la ruta al vacío con temple en nitrógeno es la que presentó en promedio mayor excentricidad (*run out*), con un incremento de 4.5 veces más que las rutas de carburizado con temple y mayor cambio en longitud final aumentando hasta 4.3 veces esta condición.

Los esfuerzos residuales presentados muestran que las rutas de carburizado con temple en aceite son las que presentan valores compresivos más altos que propiciarán un aumento de la vida a fatiga del componente, mientras que el proceso con temple con nitrógeno es el que presentó esfuerzos residuales compresivos más bajos, lo que por el contrario reduciría la vida a fatiga del componente.

Se determinaron los coeficientes de transferencia de calor (CHD) para diferentes diámetros de la flecha principal de transmisión durante el enfriamiento en aceite, lo que permitió entender que las diferencias entre las diferentes zonas estudiadas durante esta etapa de extracción de calor es lo que ocasiona principalmente la distorsión en los componentes, y estas diferencias están sujetas a varios factores como; geometría de la pieza (cambios drásticos en la sección transversal), homogeneidad de medio de temple, tipo de medio de temple, entre otros.

## RECOMENDACIONES

De acuerdo al conjunto de resultados obtenidos de propiedades mecánicas y metalúrgicas, distorsión y de esfuerzos residuales en la presente investigación se recomienda aplicar las rutas de carburizado con temple en aceite: tipo lote, continuo, y vacío para procesar componentes robustos como la flecha principal de transmisión.

El temple con nitrógeno que posee un coeficiente de transferencia de calor menor puede ser opción para componentes de menor tamaño y sección transversal pequeña, esto en combinación con una fuente de acero de alta templabilidad para garantizar la transformación requerida en el núcleo de la pieza y las propiedades mecánicas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **ASM, INTERNATIONAL.** ASM HANDBOOK VOLUME I, Properties and selection Iron, steels and high performance LLOYDS. s.l. : ASM INTERNATIONAL, 1993.
2. **Jon L. Dossett, Howard E. Boyer.** *Practical Heat Treating SECOND EDITION.* Ohio : ASM INTERNATIONAL, 2006. 0-87170-829-9.
3. **Dong-Wan Kim, Hoon-Hwe Cho, Won-Beom Lee, Kyun Taek Cho, Yi-Gil Cho, Se-Jong Kim, Heung Nam Han.** *A finite element simulation for carburizing heat treatment of automotive gear ring incorporating transformation plasticity.* s.l. : ELSEVIER, 2016. Vol. 99.
4. **Davis, Joseph R.** *Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics.* s.l. : ASM INTERNATIONAL, 2002. 0-87170-764-0.
5. **R. Atraszkiewicz, B. Januszewicz, Ł. Kaczmarek, W. Stachurski, K. Dybowski, A. Rzepkowski.** *High pressure gas quenching: Distortion analysis in gears after.* s.l. : ELSEVIER, 2012.
6. **Tamura., M. Tagaya and I.** *Studies on the quenching media: theoretical study.* s.l. : of Jim, 1996.
7. **Bhandari, V. B.** *Design Of Machine Elements.* New Delhi : Tata McGraw-Hill, 2010. 978-0-07-068179-8.
8. **Jeremy St. Pierre, C.I. Hayes, Inc.** Vacuum carburizing of steels. [book auth.] ASM INTERNATIONAL. *HEAT TREATING VOLUME 4.* s.l. : ASM, 1991.
9. **Malgorzata Przylecka and Wojciech Gestwa, Kiyoshi Funatani, George E.Totten, David Pye.** *Design of Carburizing and Carbonitriding Processes.* s.l. : Marcel Dekker, Inc, 2004.
10. **Geller, A.L. and Lozhushnik, L.G.** *Contact Fatigue Limit of Carburised 25Kh2GNTA Steel.* s.l. : Met. Sci. Heat Treat., 1968. (USSR), No. 6, .
11. **C.A. Stickels, C.M. Mack, and J.A. Pieprzak.** Metall. Trans. B. [book auth.] ASM INTERNATIONAL. *ASM HANDBOOK VOLUME 4 HEAT TREATING.* s.l. : ASM INTERNATIONAL, 1991.

12. **Y. Shimosato.** Heat Treatment and Surface Engineering: New Technology and Practical Applications,. [book auth.] ASM INTERNATIONAL. *ASM HANDBOOK VOLUME 4 HEAT TREATING*. s.l. : ASM INTERNATIONAL, 1991.
13. **Jeremy St. Pierre, C.I. Hayes, Inc.** Vacuum Carburizing of Steels. [book auth.] ASM INTERNATIONAL. *ASM HANDBOOK VOLUME 4 HEAT TREATING*. s.l. : ASM INTERNATIONAL, 1991.
14. **Herring, Daniel H.** *Selecting the Best Carburizing Method for Heat treatment of Gears*. 2002.
15. **Bozidar Liscić, Hans M. Tensi, Lauralice C. F. Canale, George E. Totten.** *Quenching Theory and Technology*. Boca Raton, FL : CRC Press, 2010. Second Edition.
16. **Les Anwendung von Ölen für die Wärmebehandlung von Stahl, Mineralöltechnik.** *After Mansion*. 1978.
17. **Y Lu, Y Rong, RD Sisson.** *Equivalency Comparison of Heat Transfer Coefficient in Liquid and Gas Quenches*. 2015. Vol. In EPD Congress.
18. **Engineers, Society of Manufacturing.** Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Vol 3, 4th ed. [book auth.] E.F. Houghton & Co. *Originally in Practical Metallurgy for Engineers, 5th ed*. 1952.
19. **Imre Felde, Sándor Szénási, Attila Kenéz, Shi Wei, Rafael Colas.** *Determination of complex thermal boundary conditions using a Particle Swarm Optimization method*. BREMEN, GERMANY : IDE, 2015.
20. **Verma, S. and Balaji, C.** *Multi-parameter estimation in combined conduction radiation from a plane parallel participating medium using genetic algorithms*. s.l. : International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007. Vol. 50.
21. **Kim, K.W. and Baek, S.W.** *Inverse surface radiation analysis in an axisymmetric cylindrical enclosure using a hybrid genetic algorithm*. s.l. : Numerical Heat Transfer Part A e Applications, 2004. 46 (4) 367-381.
22. **Felde, I.** Estimation of Thermal Boundary Conditions by Gradient Based and Genetic Algorithms. [book auth.] MATERIALS SCIENCE FORUM 729. 2012.
23. **Tyn Myint-U, Lokenath Debnath.** *Linear Partial Differential Equations for Scientists and Engineers*. Boston : Birkhäuser, 2007. Fourth Edition.
24. **D.E. Diesburg, C. Kim, and W. Fairhurst.** *Proceedings of Heat Treatment '81*. s.l. : Metals Society, 1983.



25. **T. Yamaguchi, Z.G. Wang, and T. Inoue.** *Proceedings of the 27th Japan Congress on Materials.* s.l. : Mater. Sci. Technol, 1985. Vol. 1.
26. **Bathgate, R.G.** *Met. Forum.* 1983. Vol. 6.
27. **L. Mordfin.** *Proceedings of Residual Stress for Designers and Metallurgists, L.J. Vande Walle.* s.l. : American Society for Metals, 1981.
28. **Evans, E.B.** *Encyclopedia of Materials Science and Engineering.* s.l. : Pergamon Press, 1986.
29. **Lement, B.S.** *Distortion in Tool Steel.* s.l. : American Society for Metals, 1959.
30. **Mordfin, L.** *Encyclopaedia of Materials Science and Engineering.* s.l. : Pergamon Press,, 1986.
31. **Mittemeijer, E.J.** *Heat Treat.* 1983. Vol. 3.
32. **Aguirre, A. Juy.** “*Influencia de las tensiones residuales de mecanizado en las propiedades mecánicas de Y-TZP*”. s.l. : Universidad Politecnica de Cataluña, 2004.
33. **Kraft, O. and Gao, Huajian.** *Diffusion processes in advanced technological Materials.* s.l. : Willian Andrew, 2005.
34. **Research, Paul Prevey and Lambda.** *X ray diffraction residual stress techniques.* Metals Park, OH : American Society for metals. Vol. 10. Metals Handbook.
35. **K. Palaniradja, N. Alagumurthi and V. Soundararajan.** *Residual Stresses in Case Hardened Materials.* s.l. : The Open Materials Science Journal, 2010.
36. **K. DYBOWSKI\*, J. SAWICKI\*#, P. KULA\*, B. JANUSZEWICZ \*, R. ATRASZKIEWICZ\*, S. LIPA\*.** THE EFFECT OF THE QUENCHING METHOD ON THE DEFORMATIONS SIZE OF GEAR WHEELS. LODZ, POLAND : ResearchGate, 2016, Vol. 61.
37. **G. Totten, M. Howes, T. Inoue,.** *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel.* s.l. : ASM Internacional, 2002.
38. **J. Pan, Shanghai Jiao Tong University, P.R. China.** Factors Affecting Final Part Shaping. [book auth.] M. Howes, T. Inoue G. Totten. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel.* s.l. : ASM International, 2002.
39. **Herring, Danoel H.** *Vacuum Heat Treatment.* s.l. : BNP media, 2012.

40. **Stolař, P. Jurči and P.** "Distortion behaviour of gear parts due to carburizing and quenching with different quenching media". s.l. : BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 2006.
41. **FRISK, ROBIN.** Distortion Analysis of Low Pressure carburized components. STOCKHOLM, SWEDEN : KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2016.
42. **15305, DIN EN.** Test method for residual stress analysis by X-ray diffraction. 2008.
43. **E975-13, ASTM INTERNATIONAL.** Standard practice for X-ray determination of retained austenite in steel with near randomcrystallographic orientation.
44. **E10-15, ASTM INTERNATIONAL.** Standard test method for Brinell hardness of metallic materials.
45. **E18-15, ASTM INTERNATIONAL.** Standard test methods for Rockwell hardness of metallic materials.
46. **B934-15, ASTM INTERNATIONAL.** Standard Test Method for effective case depth of ferrous powder metallurgy (PM) parts using microindentation hardness measurements.
47. **L. Zhang, Y.M. Rong, R. Purushothaman.** *Microstructure and Property Predictions by Using a Heat-Treatment Planning.* Detroit, Michigan, USA : ASM Heat Treating Society Conference, 2007.
48. **Weimin Gao, Lingxue Kong, and Peter Hodgson.** *Fluidized-Bed Quenching.* Ohio, : ASM International 4A Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, 2013.
49. **HANDBOOK, ASM.** *Heat Treating.* s.l. : ASM INTERNATIONAL, 1991. VOLUME 4.
50. **Santofimia, Carola Celada-CaseroJilt SietsmaMaria Jesus.** *The role of the austenite grain size in the martensitic transformation in low carbon steels.* s.l. : Materials and Design ELSEVIER, 2019.
51. **George F. Vander Voort, Buehler Ltd., Lake Bluff, Ill.** *Martensite and Retained Austenite.* s.l. : Industrial Heating The international Journal of thermal technology, 2009.
52. **Reardon, Arthur C.** *Press Quenching and Effects.* s.l. : Gear Technology, 2014.
53. **Imre Felde, Tamás Réti.** *Evaluation Of Hardening Performance of Cooling Media by Using Inverse Heat Conduction Methods and Property Prediction.* Budapest, Hungary : s.n.

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Flecha principal de transmisión .....	12
Fig. 2. Esquema de Horno tipo Caja (11).....	20
Fig. 3. Efecto de la temperatura en el tiempo de carburizado para obtener una capa de 1.5mm. (11).....	21
Fig. 4. Coeficientes de transferencia de Calor (HTC) para diferentes medios de temple (17) .....	30
Fig. 5. Curva y velocidad de enfriamiento de una probeta con un termopar localizado al centro de diámetro de 25mm templado con agua a 95 °C corriendo a 15m/min (18). ....	31
Fig. 6. . Método para cálculo del coeficiente de transferencia de calor .....	35
Fig. 7. Relación entre contenido de carbono, austenita retenida y patrón de esfuerzos residuales desde la superficie y hasta el núcleo (25).....	37
Fig. 8. Representación esquemática del método de $\text{Sen}^2 \psi$ (33).....	39
Fig. 9. Orientación de los componentes de la deformación (34). ....	40
Fig. 10. Factores que afectan la forma final de los componentes (37).....	42
Fig. 11. Distorsión de un cilindro excéntrico (37). ....	43
Fig. 12. Distorsión típica de componentes simples.....	44
Fig. 13. Efecto de la temperatura de temple sobre la distorsión de un cilindro de medio carbono.....	45
Fig. 14. Efecto de la relación Longitud entre diámetro (L/D) en la distorsión de un cilindro de medio carbono. ....	46
Fig. 15. Efecto del contenido de Carbono en la distorsión de componentes cilíndricos de aceros al carbono. (37). ....	47
Fig. 16. Flujo material para evaluar distorsión después de tratamiento térmico.....	52
Fig. 17. Flecha Principal de transmisión y diámetros principales. ....	53
Fig. 18. Diagramas de flujo experimental.....	54
Fig. 19. Ruta de tratamiento térmico utilizadas. ....	56
Fig. 20. Gráfica tiempo temperatura para carburizado y obtención de curvas de enfriamiento. ....	58
Fig. 21. a) medición de distorsión y b) equipo de medición óptica. ....	58
Fig. 22. Medición en diámetro B de a) esfuerzos residuales y b) medición de austenita retenida.....	59
Fig. 23. a) Esquema de la zona para inspección de dureza núcleo y b) equipo de medición de dureza Brinell. ....	60

Fig. 24. a) Diámetro de toma de dureza superficial y b) equipo de medición de dureza superficial marca Leco. ....	61
Fig. 25. Zonas para evaluación de capa efectiva.....	61
Fig. 26. Equipo de microdureza EMCO TEST.....	62
Fig. 27. Microscopio óptico marca Zeiss.....	62
Fig. 28. a) Localización probeta de tensión, b) Plano de probeta de tensión y c) Probeta de tensión maquinada.....	63
Fig. 29. Localización de termopares. ....	65
Fig. 30. . Procedimiento experimental para obtención de curvas de enfriamiento. ....	66
Fig. 31. Método para calcular los coeficientes de transferencia de calor HTC (42).....	67
Fig. 32. . Perfiles de carbono en los tres sistemas de carburizado. ....	68
Fig. 33. . Resultados de capa efectiva. ....	69
Fig. 34. Resultados de dureza a) superficial y b) núcleo .....	70
Fig. 35. Micrografías para evaluación de oxidación intergranular, a) lote, b) continuo, c) vacío en N2 y d) vacío en aceite .....	71
Fig. 36. Histogramas con resultados de medición de oxidación intergranular en a) lote y.....	72
Fig. 37. Micrografías 500x superficial para evaluación de tamaño de martensita en a) lote, .....	73
Fig. 38. Histogramas con resultados de medición de tamaño de martensita en a) lote,..	74
Fig. 39. Resultados de medición de austenita retenida para a) lote, .....	75
Fig. 40. Micrografías a 100X capa carburizada a) lote, b) continuo, c) vacío en N2 y ..	77
Fig. 41. Micrografías a 100X de la zona de transición, a) lote, b) continuo, c) vacío N2 y.....	78
Fig. 42. Micrografías del núcleo a 200X , a) lote, b) continuo, c) vacío en N2 y.....	79
Fig. 43. Micrografías del núcleo a 500X, a) lote, b) continuo, c) vacío en N2 y.....	80
Fig. 44. Resultados de analizador de imágenes a 100X en el núcleo, a) lote, b) continuo, c) vacío en N2 y d) vacío en aceite. ....	81
Fig. 45. . Resultados de los porcentajes de microestructuras en el núcleo de las distintas rutas de carburizado: a) lote, b) continuo, c) vacío en N2 y d) vacío en aceite. ....	82
Fig. 46. Resultados de esfuerzos residuales superficiales para las distintas rutas de carburizado en a) diámetro A, b) diámetro B y c) diámetro C,.....	84
Fig. 47. Incremento en magnitud de esfuerzos residuales superficiales para las distintas rutas de carburizado en los tres principales diámetros analizados.....	84
Fig. 48. Relación entre porcentaje de ferrita en núcleo y esfuerzos residuales superficiales. ....	86
Fig. 49. Curvas esfuerzo – deformación para las distintas rutas de carburizado. ....	87
Fig. 50. Resultados de esfuerzo máximo y cedencia de las distintas rutas de carburizado.....	88

Fig. 51. Resultados de esfuerzo de excentricidad para los tres principales diámetros de las distintas rutas de carburizado, a) diámetro A, b) diámetro B y c) diámetro C.....	89
Fig. 52. Resultados de excentricidad en diferentes diámetros de las distintas rutas de carburizado, a) lote, b) continuo, c) vacío en N2 y d) vacío en Aceite.....	91
Fig. 53. Incremento en milímetros de los 3 principales diámetros de las distintas rutas de carburizado, a) diámetro A, b) diámetro B y c) diámetro C. ....	92
Fig. 54. Reducción en milímetros de la longitud total de la flecha principal de transmisión de las distintas rutas de carburizado.....	94
Fig. 55. Relación entre excentricidad y cambio de longitud para cada ruta de carburizado .....	95
Fig. 56. Relación entre excentricidad ( <i>run out</i> ) y esfuerzos residuales para cada ruta de Carburizado. ....	96
Fig. 57. Relación entre excentricidad y porcentaje de microestructuras para cada ruta de carburizado.....	97
Fig. 58. Posiciones de los termopares en la flecha principal de transmisión .....	98
Fig. 59. Curvas de calentamiento y enfriamiento obtenidas de los 6 termopares.....	99
Fig. 60. Curva de enfriamiento y velocidad máxima obtenida por termopar. ....	100
Fig. 61. Curvas de Coeficientes de transferencia de calor (HTC) en función de la temperatura.....	100
Fig. 62. Muestra para las piezas sometidas a enfriamiento con aceite en, a) Relación entre la excentricidad y velocidad de enfriamiento, b) Relación entre excentricidad y coeficiente de transferencia de calor.....	102

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Lista de aceros para carburizados más comunes y sus características (10). ....	17
Tabla 2. Clasificación y Descripción general de los aceites de temple (16).....	28
Tabla 3. Comparación de distorsiones causadas por esfuerzos térmicos y de estructura (38). ....	44
Tabla 4. Dirección de pandeamiento causada por asimetría bajo diferentes condiciones. (37).....	48
Tabla 5. Parámetros de pruebas de carburizado de la flecha principal. ....	55
Tabla 6. Parámetros aplicados en las pruebas de carburizado de la flecha principal.....	57
Tabla 7. Parámetros de austenizado y enfriamiento para obtención de curvas de enfriamiento. ....	57
Tabla 8 Dimensiones de probeta de tensión.....	64
Tabla 9. Resultados de CHD, diámetro A y B y la relación B/A.....	69
Tabla 10. Resultados de Dureza superficial y núcleo .....	70
Tabla 11. Resultados de oxidación intergranular.....	72
Tabla 12. Resultados de tamaño de martensita .....	75
Tabla 13. Resultados de austenita retenida. ....	76
Tabla 14. Resultados de porcentajes de microestructuras en Núcleo .....	82
Tabla 15. Resultados de esfuerzos residuales superficiales.....	85
Tabla 16. Resultados de Esfuerzo a la tensión y cedencia.....	88
Tabla 17. Resultados de excentricidad de los principales diámetros de la flecha principal de transmisión A, B y C. ....	90
Tabla 18. Resultados de Incremento de Diámetro de los principales diámetros de la flecha principal de transmisión A, B y C.....	93
Tabla 19. Resultados de la reducción de longitud total de la flecha principal de transmisión para las distintas rutas de carburizado.....	93
Tabla 20. Velocidad máxima por posición de termopares.....	101