

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**T E S I S**

**PREDICCIÓN DE LA DISTORSIÓN EN ANILLOS ROLADOS SIN  
COSTURA DURANTE TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE Y  
REVENIDO USANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA.**

**POR**

**RENE DE JESUS CERDA ROJAS**

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

**NOVIEMBRE 2015**

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



**TESIS**

**PREDICCIÓN DE LA DISTORSIÓN EN ANILLOS ROLADOS SIN  
COSTURA DURANTE TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE Y  
REVENIDO USANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA.**

**POR  
M.C. RENE DE JESUS CERDA ROJAS**

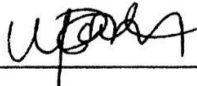
**EN OPCIÓN AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA DE  
MATERIALES**


**NOVIEMBRE DE 2015**


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

Los miembros del comité de la tesis recomendamos que la tesis “Predicción de la distorsión en anillos rolados sin costura durante tratamiento térmico de temple y revenido usando simulación numérica” realizada por el M.C. Rene De Jesus Cerda Rojas sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ingeniería de Materiales.

El Comité de Tesis

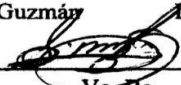
  
\_\_\_\_\_  
Asesor  
Dra. Martha Patricia Guerrero Mata

  
\_\_\_\_\_  
Coasesor  
Dr. Luis Adolfo Leduc Lezama

  
\_\_\_\_\_  
Coasesor  
Dr. Rafael David Mercado Solís

\_\_\_\_\_  
Coasesor  
Dr. Florentino Fernández Guzmán

\_\_\_\_\_  
Coasesor  
Dra. María de Jesús Pérez López

  
\_\_\_\_\_  
Vo. Bo.  
Dr. Simón Martínez Martínez

San Nicolás de los Garza, N. L.,

NOVIEMBRE de 2015

## **Dedicatoria.**

A mis padres Rene Cerda y Aracely Rojas por el apoyo incondicional de siempre, motivándome siempre a lograr mis objetivos y metas, siempre brindándome su cariño y bendiciones para salir adelante.

A mi esposa Lorena Morales y a mi hijo Rene Jerónimo que son mi base motriz del día a día, siempre brindándome su apoyo en mi toma de decisiones y sobre todo para concluir el presente trabajo.

A mis hermanas Brenda Cerda y Elizabeth Cerda, por siempre brindarme consejos muy constructivos y apoyándome para terminar mis estudios.

A mis cuñados Enrique Arroyo y Miguel Patiño, por su apoyo incondicional de siempre.

A la Dra. Martha Guerrero con quien he trabajado desde mis estudios de postgrado.



## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para la realización de este estudio.

A la empresa FRISA FORJADOS por haberme permitido realizar la presente investigación en sus instalaciones.

A la Dra. Martha Guerrero por el apoyo brindado durante mis estudios de postgrado, siempre motivándome a ser mejor, le agradezco su amistad, su conocimiento brindado y la paciencia que ha tenido conmigo.

Al Dr. Florentino Fernández por sus consejos brindados durante mis estudios, y apoyarme siempre dentro de la organización, motivándome día a día a ser mejor persona en lo personal como en lo laboral.

Al Dr. Luis Ieduc por sus consejos brindados, compartir su conocimiento y su apoyo durante la realización de la presente investigación, y ser parte del comité de revisores.

Al Dr. Rafael Mercado por su apoyo brindado durante la realización de la presente investigación, y ser parte del comité de revisores.

Al Dr. Rafael Colas por todo el apoyo brindado, por todos sus consejos durante el proceso de la investigación, y por su gran amistad.

A la Dra. María Pérez por aceptar ser parte del comité de revisores del presente trabajo, sus consejos para para la realización de esta investigación.

A mis compañeros del departamento de metalurgia Edtson Arechar, Saúl Carmona y Raúl Ruiz por el gran apoyo que siempre me demuestran dentro y fuera de la organización.

# Contenido

<b>1.-Introducción .....</b>	<b>11</b>
<b><i>1.1.-Objetivos .....</i></b>	<b><i>13</i></b>
<i>1.1.1-Objetivo general.....</i>	<i>13</i>
<i>1.2.1-Objetivos particulares.....</i>	<i>13</i>
<b><i>1.2.-Hipótesis .....</i></b>	<b><i>13</i></b>
<b><i>1.3.- Alcances.....</i></b>	<b><i>14</i></b>
<b>2.-Desarrollo de componentes utilizados en la industria de generación de energía. ....</b>	<b>15</b>
<b>3.-Tratamientos térmicos .....</b>	<b>16</b>
<b><i>3.1.-Normalizado .....</i></b>	<b><i>17</i></b>
<b><i>3.2.-Temple .....</i></b>	<b><i>19</i></b>
<b><i>3.3.-Revenido .....</i></b>	<b><i>23</i></b>
<b>4.-Transferencia de Calor.....</b>	<b>28</b>
<b><i>4.1.-Fenómenos de Transferencia de Calor por Conducción. ....</i></b>	<b><i>28</i></b>
<b><i>4.2.- Fenómenos de Transferencia de Calor por Convección.....</i></b>	<b><i>29</i></b>
<b><i>4.3.- Fenómenos de Transferencia de Calor por Radiación. ....</i></b>	<b><i>34</i></b>

<i>4.4. Distorsión asociada al tratamiento térmico.....</i>	<i>34</i>
<b>5.-Procedimiento experimental .....</b>	<b>41</b>
<i>5.1.- Etapa I-Calculo de transferencia de calor a partir de curvas experimentales por el método inverso en el proceso de temple. ....</i>	<i>41</i>
<i>5.2.- Etapa II-Predicción y verificación de perfiles de dureza después del proceso de revenido para el acero 42CrMo4. ....</i>	<i>46</i>
<i>5.3- Etapa III-Efecto de los elementos aleantes en el proceso de revenido (perfiles de dureza).....</i>	<i>53</i>
<b>6.-Resultados obtenidos de la parte experimental.....</b>	<b>54</b>
<i>6.1 Etapa I-Calculo de transferencia de calor a partir de curvas experimentales por el método inverso en el proceso de temple.....</i>	<i>54</i>
<i>6.2 Etapa II-Predicción y verificación de perfiles de dureza después del proceso de revenido para el acero 42CrMo4. ....</i>	<i>74</i>
<i>6.3 Etapa III-Efecto de los elementos aleantes en el proceso de revenido (perfiles de dureza). ....</i>	<i>83</i>
<b>7.- Discusión de resultados.....</b>	<b>88</b>
<i>7.1 Etapa I-Calculo de transferencia de calor a partir de curvas experimentales por el método inverso en el proceso de temple.....</i>	<i>88</i>
<i>7.2 Etapa II-Predicción y verificación de perfiles de dureza después del proceso de revenido para el acero 42CrMo4. ....</i>	<i>93</i>

<i>7.3 Etapa III-Efecto de los elementos aleantes en el proceso de revenido (perfiles de dureza).</i> .....	96
<b>8.-Conclusiones</b> .....	98
<b>9.- Contribución Tecnológica y Científica</b> .....	101
<b>10.- Recomendaciones</b> .....	102
<b>11. - Bibliografía</b> .....	103
<b>Apendice</b> .....	110
<b>Lista de Figuras</b> .....	119
<b>Lista de Tablas</b> .....	125

## Resumen

La corrección de una falla por distorsión puede ser compleja ya que involucra efectos microestructurales y esfuerzos residuales que son la causa principal del fenómeno de distorsión. Las fallas por distorsión son serias debido a que pueden conducir a que el producto final no cumpla con los requerimientos dimensionales y no sea aceptado para desarrollar su función.

Hoy en día, la problemática es la distorsión que sufren los componentes cuando se les somete a un tratamiento térmico temple, debido a las transformaciones de fase y esfuerzos residuales que se generan por el enfriamiento rápido, así como del tratamiento térmico de revenido donde el exceso de carbono es liberado de la estructura cristalina de la martensita y/o bainita y genera la deformación en la estructura cristalina, con esta problemática es posible hacer uso del modelo de Tratamiento Térmico que contiene el paquete comercial computacional FORGE HPC 2011<sup>®</sup>, para tratar de reproducir estos fenómenos que se llevan a cabo durante los tratamientos térmicos mencionados, y posteriormente generar información relacionada al tratamiento térmico de revenido, para desarrollar un modelo matemático que sea capaz de predecir las propiedades mecánicas finales.

Este trabajo consistió en 3 etapas, la primer etapa se basó en estudiar detalladamente el grado de acero 42CrMo4 al aplicarle un tratamiento térmico de temple, bajo condiciones industriales con la finalidad de generar mayor conocimiento de los fenómenos de distorsión del acero antes mencionado, los cuales muchos autores atribuyen que este fenómeno se presenta con mayor frecuencia durante el temple, debido a la transformación de fase martensita, fase metaestable más dura en los aceros que tienen la capacidad de generar esta estructura cristalina, el experimento se desarrolló tratando térmicamente 16 anillos con las siguientes dimensiones; diámetro exterior = 2631 mm, pared = 164 mm y altura de 188 mm, instrumentados cada componente con 20 termopares tipo “k” de 3 mm de diámetro, orientados cada 90°, esta metodología se desarrolló con la finalidad de obtener el máximo dato posible

durante temple para posteriormente asociarlo con los coeficientes de transferencia de calor  $h$ , y así modelar la distorsión en las piezas utilizando un paquete comercial computacional, así como las condiciones de enfriamiento de la primer prueba experimental, encontrando errores máximos de 10 % comparando los resultados experimentales con los resultados obtenidos de la simulación.

La segunda parte del proyecto consistió en una matriz de experimentos de tratamientos térmicos de temple y revenido, donde las variables principales fueron la temperatura y el tiempo, aplicadas en 13 probetas con las siguientes dimensiones; 100 mm X 100 mm X 200 mm, para generar conocimiento de la evolución de la dureza así como las propiedades mecánicas del mismo grado de acero, esta parte del experimento tuvo como finalidad el desarrollo y evaluación de un modelo matemático implementado en computadora que gobierne dicho comportamiento, encontrando errores en el rango de 1 hasta 40 %, comparando los resultados experimentales vs los resultados simulados.

La tercera etapa del proyecto consistió en evaluar el grado de acero AISI 8630 y AISI 4340 utilizando el modelo de tratamiento térmico de revenido y datos experimentales de tres tiempos y tres temperaturas para cada uno de los aceros ya mencionados, encontrando que el modelo de tratamiento térmico de revenido no es capaz de reproducir perfiles de dureza en aceros de media y alta aleación como están clasificados los aceros mencionados, ya que los resultados entre la parte experimental y la simulada no coincide con una línea recta para el acero AISI 8630, se encontró un coeficiente de correlación de 0.87 y errores entre 22 y 44 %, y para el acero AISI 4340, se encontró un coeficiente de correlación de 0.53 y errores entre 17 y 33 %

## **1.-Introducción**

Los aceros están clasificados principalmente por su composición química, que usualmente está definida por el contenido de carbón y otros elementos aleantes. Por lo tanto el significado de un acero puede quedar definido como una aleación de hierro mezclada con pequeñas cantidades de carbón y otros elementos, los aceros al carbón son sustentados por el contenido de carbón, desde mínimas cantidades hasta 2% en peso, las aleaciones que contienen carbón por encima del 2% en peso son llamadas hierros (1).

Un sistema para la designación de aceros al carbón y aceros aleados ha sido desarrollado por la American Iron Steel Institute (AISI) y la Society of Automotive Engineers (SAE), aunque la AISI no ha escrito especificaciones, actualmente se usan las desarrolladas por la SAE, dicho sistema AISI/SAE consiste en que los 2 primeros dígitos especifican los elementos principales de la aleación, por ejemplo si no hay suficientes elementos aleantes se designa el número 10 que se considera un acero pleno al carbón, los segundos 2 dígitos nos indican la cantidad de carbón en por cientos (1), por ejemplo para un acero 1040, significa que es un acero no resulfurizado con un máximo de 1.00 por ciento de manganeso y un 0.40 por ciento de carbón, A Continuación la Tabla 1 muestra algunos de los ejemplos mencionados y más utilizados en la industria del acero.

**Tabla 1.- Designaciones y elementos en carbón y aceros aleados por la SAE (1)**

Tipo	Descripción
<i>Aceros al Carbon</i>	
10XX	No resulturizado, 1.00 maximo de manganeso
11XX	Resulturizado
12XX	Resulturizado y refosforados
15XX	No resulturizado, por encima del 1.00 de manganeso
<i>Aceros Aleados</i>	
13XX	1.75 de Manganeso
40XX	Molibdeno entre 0.2 y 0.25 y 0.042 de azufre
41XX	Cromo 0.5, 0.8 o 0.95, y Molibdeno 0.12, 0.20, 0.30
43XX	Niquel 1.83, Cromo 0.5 hasta 0.80, y Molibdeno 0.25
46XX	Niquel 0.85 o 1.83, Molibdeno 0.20 o 0.25
47XX	Niquel 1.05, Cromo 0.45, Molibdeno 0.20 o 0.35
48XX	Niquel 3.5 y Molibdeno 0.25
51XX	Cromo 0.8, 0.88, 0.93, 0.95 o 1.00
51XXX	Cromo 1.03
52XXX	Cromo 1.45
61XX	Cromo 0.60 o 0.95, Minimo de Vanadio 0.13 o 0.15.
86XX	Niquel 0.55, Cromo 0.50 y Molibdeno 0.20
87XX	Niquel 0.55, Cromo 0.50 y Molibdeno 0.25
88XX	Niquel 0.55, Cromo 0.50 y Molibdeno 0.35
92XX	Silice 1.4 o 2.0 y Cromo 0.70
50BXX	Cromo 0.28 o 0.50
51BXX	Cromo 0.80
81BXX	Niquel 0.30, Cromo 0.45 y Molibdeno 0.12
94BXX	Niquel 0.45, Cromo 0.40 y Molibdeno 0.12



## ***1.1.-Objetivos***

### *1.1.1-Objetivo general*

Desarrollar una metodología para predecir el grado de distorsión en anillos utilizados en la industria de rodamientos y engranes debido al tratamiento térmico de temple y revenido con el apoyo de modelos numéricos implementados en el paquete comercial computacional FORGE HPC 2011®

### *1.2.1-Objetivos particulares*

- a) Desarrollar una metodología experimental para la obtención de los coeficientes de transferencia de calor asociados al proceso del tratamiento térmico.
- b) Revisar las variables causantes de la distorsión en la ruta de proceso de tratamiento térmico de temple y revenido de los componentes.
- c) Validar el modelo de tratamiento térmico de temple y revenido con datos tomados en planta.
- d) Optimizar el modelo para evaluar el perfil de durezas al finalizar el proceso de tratamiento térmico de temple y revenido.

## ***1.2.-Hipótesis***

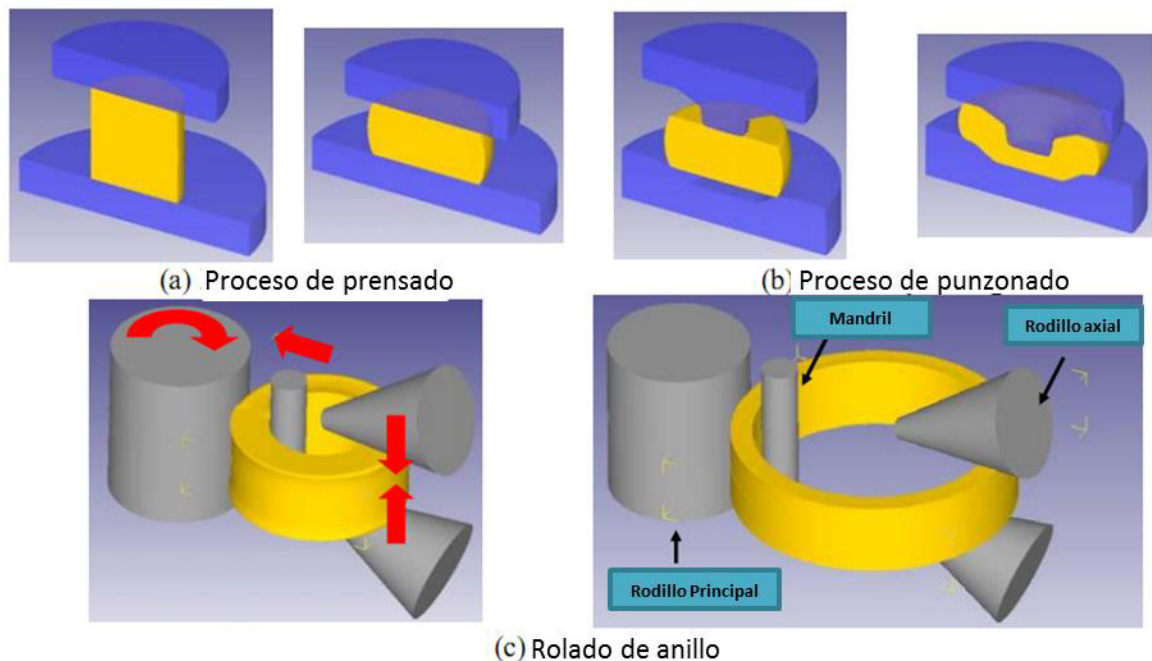
Con la generación de información experimental relacionada con las propiedades mecánicas del acero 42CrMo4 y por medio del uso de técnicas numéricas asistido por paquetes comerciales y el desarrollo de subrutinas avanzadas es posible simular tratamientos térmicos de temple y revenido, para predecir el grado de distorsión y el desarrollo microestructural en porcentajes de fases y perfiles de dureza.

### ***1.3.- Alcances***

Proveer un mejor entendimiento de los fenómenos que se presentan durante el proceso de tratamiento térmico de temple y revenido, así como comprender las causas que generan el problema de la distorsión durante este proceso, debido a los cambios microestructurales y transformaciones de fases que se presentan fuera de equilibrio.

## 2.-Desarrollo de componentes utilizados en la industria de generación de energía.

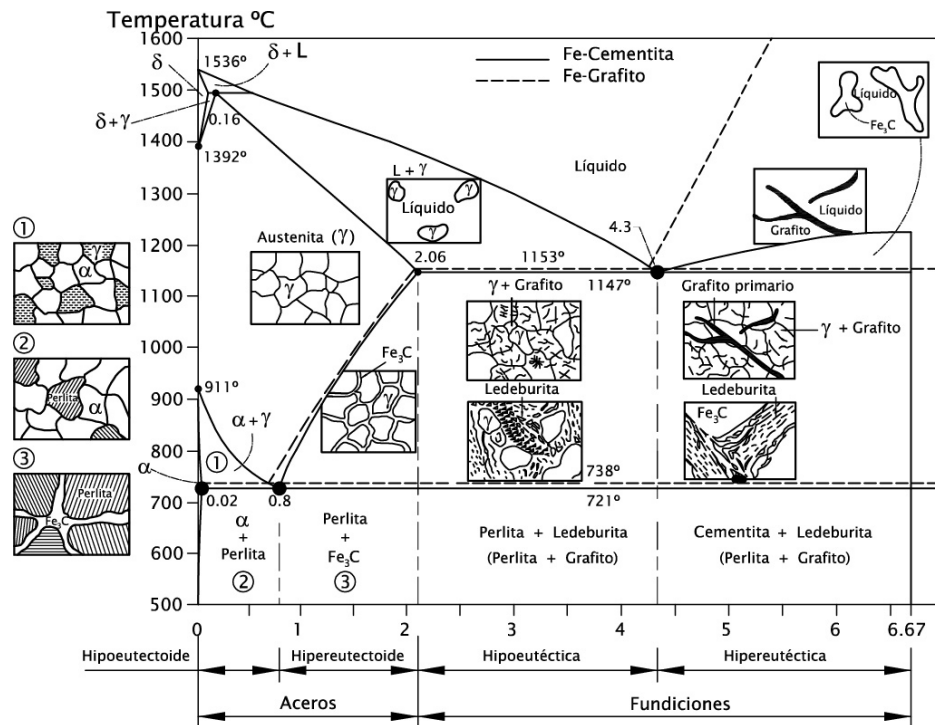
El proceso de manufactura de los anillos comienza con la materia prima adecuada en cuanto a dimensiones y pesos iniciales del requerimiento de cliente, para posteriormente ser calentada a temperaturas por encima de los 1200 °C para después ser llevada al proceso de prensa (Upsetting), posteriormente la preforma se punzona y se corta para abrir el centro del material, para obtener una forma geométrica de “dona”, que el siguiente paso del proceso de manufactura será, llevar dicha preforma al proceso de rolado de anillos donde la preforma se “recalienta” para obtener la temperatura de forja y posteriormente ser rodada para la fabricación del anillo. Este proceso de manufactura se presenta en la Figura1.



**Figura1.-** Proceso de manufactura de la fabricación de anillos sin costura para la generación de energía, a) Proceso de prensado. b) Proceso de punzonado y corte. c) Proceso de rolado de anillo (2).

### 3.-Tratamientos térmicos

La base principal para comprender los tratamientos térmicos es el diagrama de fases Fe-C, en el cual las variables principales son la temperatura y el % de carbón, la Figura2 muestra el diagrama Fe-C, el cual nos sirve para determinar las fases que se desarrollaran cuando el acero es enfriado en el equilibrio térmico (3).



**Figura2.-**Diagrama de equilibrio Fe-C por arriba de 6.67 % en peso de carbón, la línea puntada corresponde al diagrama Fe-grafito (3).

El diagrama Fe-C muestra las temperaturas críticas de temple mejor conocidas como A<sub>1</sub>, A<sub>3</sub>, donde la A<sub>1</sub> nos representa la temperatura eutectoide que es la temperatura mínima para obtener la fase austenita, la A<sub>3</sub> se conoce como la frontera de baja temperatura de la región austenítica para contenidos bajos de carbón.

Algunas de las estructuras en equilibrio de los aceros se enumeran a continuación;

Ferrita (Fe-α); Fase relativamente suave a bajas temperaturas, en equilibrio estable.

Ferrita (Fe- $\delta$ ); Fase isomorfa con Fe- $\alpha$ , fase a alta temperatura, en equilibrio estable.

Austenita (Fe- $\gamma$ ); Fase relativamente suave, en equilibrio estable.

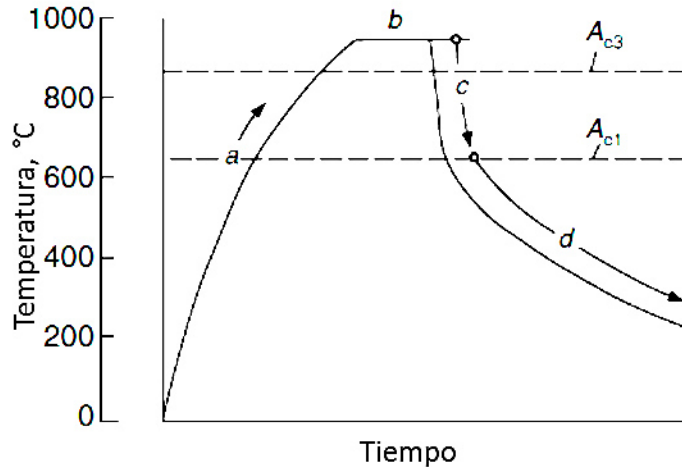
Bainita; microconstituyente metaestable dura, puede formarse a altas temperaturas con una apariencia de pluma, mientras que a bajas temperaturas tiene forma acicular.

Perlita; microconstituyente metaestable, se precipita como una mezcla laminar de ferrita y cementita.

Martensita; Fase Metaestable dura con apariencia de listón cuando C < 0.6 % en peso, apariencia de lámina cuando C > 1.0 (3).

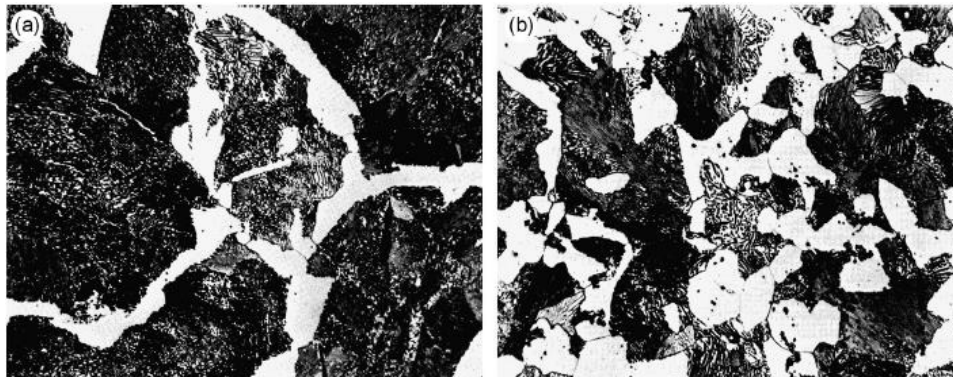
### ***3.1.-Normalizado***

Este es un proceso de tratamiento térmico el cual consiste en austenizar a temperaturas entre 30 y 80°C por encima de la temperatura crítica de transformación  $A_{c3}$ , seguido de un enfriamiento lento (usualmente aire quieto), en la Figura 3 se muestra el ciclo térmico de un tratamiento térmico de normalizado, y la función principal es la de obtener un refinamiento de tamaño de grano, y una estructura uniformemente distribuida de ferrita-perlita (4). Existen diagramas de equilibrio termodinámico en los cuales se establecen bandas de temperaturas para seleccionar el correcto tratamiento térmico de normalizado, estas bandas o zonas dependerán del contenido de carbón que se tenga en la aleación. La secuencia de pasos a seguir durante el normalizado son la velocidad de calentamiento, la temperatura de austenitización, el tiempo que permanece a dicha temperatura, y la velocidad de enfriamiento.



**Figura3.-** Ciclo térmico para un tratamiento térmico de normalizado, *a*, indica el calentamiento, *b*, indica el tiempo de sostenimiento a dicha temperatura, *c*, enfriamiento al aire, *d*, enfriamiento al aire o en horno (4).

El tratamiento térmico de Normalizado refina el tamaño de grano de un acero que tiene un tamaño de grano grande por ejemplo 4 o 5 ASTM como resultado de un calentamiento a alta temperatura se puede llegar a refinar hasta desarrollar un tamaño de grano 7 u 8 ASTM, por ejemplo cuando se va a forjar o se ha soldado el acero, debido a las altas temperaturas a las que es sometido el acero, en la Figura4 se muestra un ejemplo del refinamiento de tamaño de grano como resultado del tratamiento térmico de normalizado.



**Figura4.-** Efecto del refinamiento de tamaño de grano, *a*, tamaño de grano después del proceso de forja o laminado (ASTM 3), *b*, tamaño de grano después del proceso de normalizado (ASTM 6) (4).

### ***3.2.-Temple***

El tratamiento térmico de temple es uno de los procesos con menor entendimiento de la tecnología en tratamientos térmicos, el cual consiste en calentar el material unos 50 °C arriba de la temperatura crítica de temple  $A_{c3}$  y posteriormente enfriarlo súbitamente para lograr desarrollar la fase metaestable mejor conocida como martensita, una fase muy dura donde el carbón está presente en solución sólida en la fase austenítica. Comparada con la fase ferrita y perlita, la martensita se forma mediante una deformación en la estructura cristalina de la austenita sin ningún proceso de difusión de átomos (5).

La reacción martenisítica en el acero es usualmente llevada a cabo atórmicamente, la fracción transformada dependerá del enfriamiento por debajo de la temperatura de inicio de la transformación martensita ( $M_s$ ). La transformación de fase aparentemente no depende directamente del tiempo como lo proponen en su Ecuación 1 Koistinen y Marburger (5), la cual describe el progreso de la transformación por debajo de  $M_s$ ;

$$1 - V_{\alpha'} = \exp\{\beta(M_s - T_q)\}; \text{ donde } \beta \cong -0.011 \quad \text{Ec. 1.}$$

Una definición de “Templar” el acero está definida como “enfriar las piezas de acero a una velocidad más rápida que el aire (6), aunque parece fácil dicho proceso, el temple es físicamente el proceso más complejo del ramo ingenieril y muy difícil de entender, en ocasiones el proceso de temple es llamado el hoyo negro de los tratamientos térmicos.

Uno de los puntos más importantes durante el tratamiento térmico de temple es el proceso de enfriamiento desde la temperatura de solución que es alrededor de 845-880°C, dependiendo de los elementos aleantes que contenga el acero, existen mecanismos durante el proceso de temple que son indispensables entenderlos debido

a que estos tienen una influencia significativa en la selección del medio de enfriamiento y el desempeño deseado después del proceso de enfriamiento.

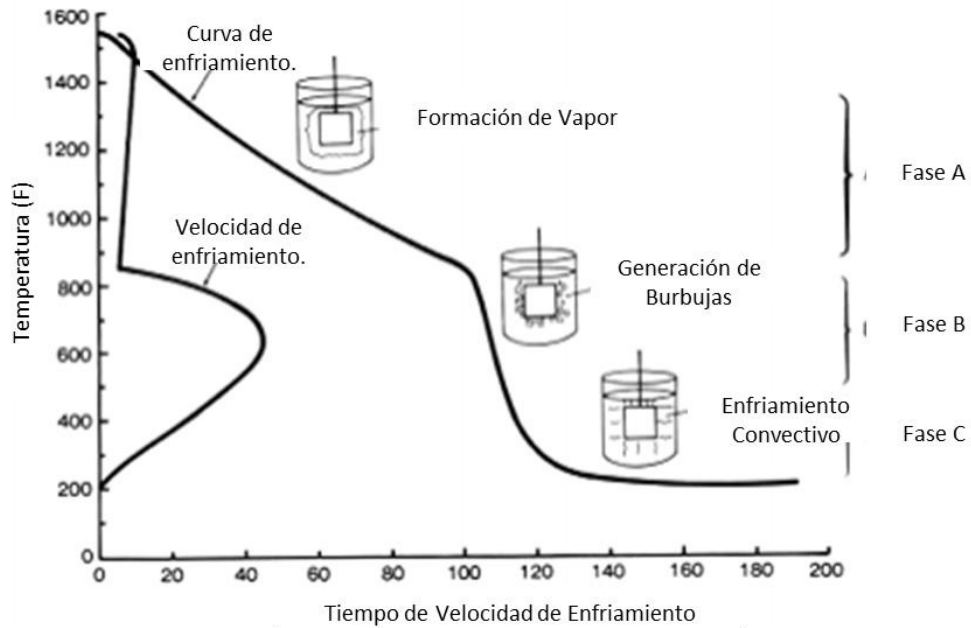
La trayectoria que se forma en la curva de enfriamiento es un indicador de los mecanismos que ocurren durante el proceso de temple, independientemente si se utiliza agua, aceite o polímero se presentarían las tres diferentes etapas conocidas como capa de vapor, proceso de ebullición y finalmente convección natural.

En la etapa de formación de la **capa de vapor**, la transferencia de calor es la etapa de extracción de calor más lenta debido a que la pieza se enfría mediante el proceso de radiación y conducción a través de la capa de vapor, debido a que el medio de enfriamiento no toca la superficie que está comenzando a enfriarse (7).

Una vez que la capa de vapor se colapsa se presenta el mecanismo de **ebullición** y la transferencia de calor da lugar a la convección entre el medio de enfriamiento y la superficie expuesta, es decir el enfriamiento comienza a ser más rápido y en esta etapa es donde se puede evaluar el coeficiente de transferencia de calor.

La última etapa es la de enfriamiento convectivo, el cual comienza una vez que la superficie está apenas por debajo de la temperatura de ebullición del medio de enfriamiento, en esta etapa la velocidad de enfriamiento es baja y determinada por la viscosidad del fluido, estas etapas del proceso de temple se observan en la Figura 5.





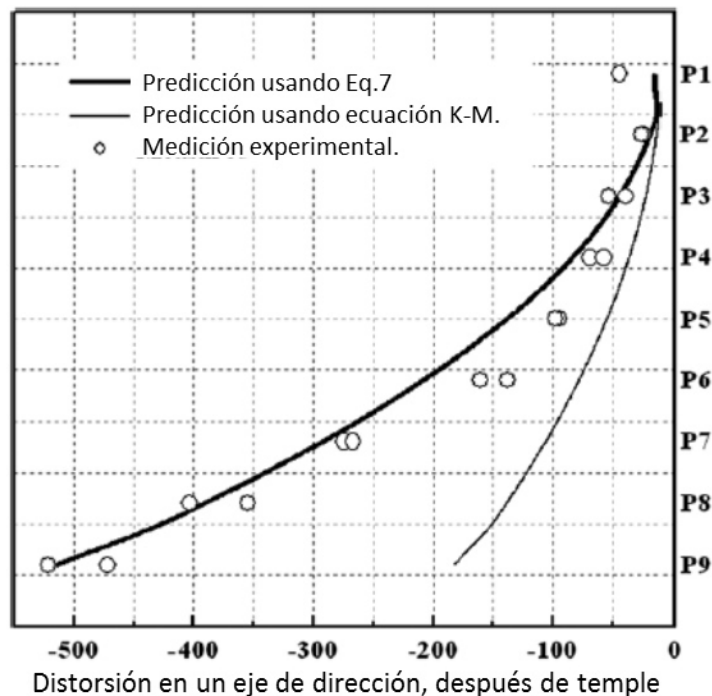
**Figura5.-** Curva de enfriamiento y velocidad de enfriamiento del centro geométrico de una probeta de 1" templada en un medio de agua a 95°C agitada a una velocidad de 15m/min (6).

Hoy en día existen una variedad de modelos experimentales capaces de predecir las distribuciones de temperaturas a través del espesor de ciertos especímenes o piezas, así como considerar las propiedades del material que está siendo analizado para predecir la formación de las fases del acero así como las propiedades mecánicas. Generalmente cuando se desarrolla una simulación de procesos existen 2 tópicos que deben ser resueltos, el primero consiste en desarrollar un modelo matemático para calcular el enfriamiento y las propiedades mecánicas, el segundo problema es generar información experimental para realizar la validación de los resultados simulados (8).

D. Ju (9), modeló a través de simulación y experimentos el comportamiento plástico de la transformación martensítica en un acero al carbón (SCr420) durante el proceso de tratamiento térmico de temple, reproduciendo el calentamiento de una estricción de la probeta y posteriormente templando la zona con argón a 30 °C, encontrando

resultados muy parecidos al comparar el nivel de distorsión de lo experimental versus lo simulado, así como predecir el porcentaje de la fase martensítica.

Seok-Jae Lee (10), simuló la distorsión durante el proceso de temple en un acero de bajo carbono (0.21% en peso), incorporando un modelo de cinética de transformación para predecir vía simulación los cambios volumétricos, partiendo de las ecuaciones de Zener y Hillert para la predicción del cambio volumétrico de las fases en equilibrio desarrolladas durante el enfriamiento, encontrando que la transformación de fase, así como la contracción térmica son los causante de altos valores de esfuerzos, las aproximaciones se muestran en la Figura6.



**Figura6.-** Efecto de la cinética de transformación martensítica en la distorsión final después de temple en aceite (10).

Zichao Li et al (11), Analizó los fenómenos de distorsión durante el proceso de temple utilizando un gas como medio de enfriamiento así como un paquete comercial computacional de elemento finito (DEFORM-HT) para evaluar las condiciones de enfriamiento, a través de los coeficientes de transferencia de calor,

transformaciones de fase y deformaciones debido a las diferencias de temperaturas y los cambios en fase, simuló dicho proceso en un material AISI 4140 obteniendo resultados satisfactorios.

S. Claudinon et al (12), midió in situ la distorsión con una cámara CCD con una exactitud de 0.01mm, de unos especímenes de 40mm de diámetro por 80 mm de largo, utilizando un horno de atmósfera controlada y enfriando con gas, hizo una comparación de los resultados experimentales utilizando la técnica de elementos finitos para validarlos, encontrando una buena correlación entre los resultados teóricos y experimentales, encontrando que para los aceros que no son capaces de desarrollar la transformación martensítica pueden llegar a distorsionarse solo si el gradiente térmico es muy grande, mientras que para los aceros que desarrollan la fase martensítica llegan a modificar su geometría debido al fenómeno de transformación inducida por plasticidad.

### ***3.3.-Revenido***

El tratamiento térmico del acero es un proceso en el que un acero previamente templado o normalizado es calentado a una temperatura por debajo de la temperatura crítica de transformación  $A_{c1}$  y después es enfriada a una velocidad considerada, principalmente para incrementar la ductilidad y tenacidad del acero y a su vez incrementar el tamaño de grano de la matriz, así como decrecer la dureza de la condición de temple, este tratamiento térmico también es utilizado para disminuir el esfuerzo residual que queda como remanente en el acero después de templearlo (2).

Las variables principales asociadas a este proceso de difusión son:

- 1) la temperatura a la cual se llevara a cabo el proceso de tratamiento térmico.
- 2) El tiempo que durara el proceso.
- 3) La velocidad de enfriamiento después del proceso.

4) La composición del acero incluyendo el contenido de carbón, elementos aleantes y residuales.

De acuerdo con Minsu Jung (13), el proceso de revenido a relativamente bajas temperaturas se lleva a cabo de la siguiente manera;

Etapa 1.- Entre temperaturas de 0°C y 80°C se lleva a cabo el proceso de redistribución de átomos de carbono a través del proceso de segregación a los sitios intersticiales formando grupos de átomos de carbón, por ejemplo en una martensita delgada los átomos de carbón segregan a las dislocaciones, mientras que una martensita gruesa, los átomos de carbón forman grupos y una estructura modulada en las interfaces de las maclas, esto tiene como efecto una ligera pérdida de volumen (-0.15 pct)

Etapa 2.- Entre temperaturas de 80°C y 180°C se lleva a cabo el proceso de la precipitación de carburos en especial el carburo  $\epsilon$ , el cual precipita en martensita con arriba de 0.20 de carbón, debido a que el proceso de segregación no se da con porcentajes menores a 0.20 de carbón, este proceso tiene un efecto de pérdida de volumen (-0.54 pct) debido a que el carburo  $\eta$  o  $\epsilon$  sustituye los grupos formados entre 0°C y 80°C de la etapa 1.

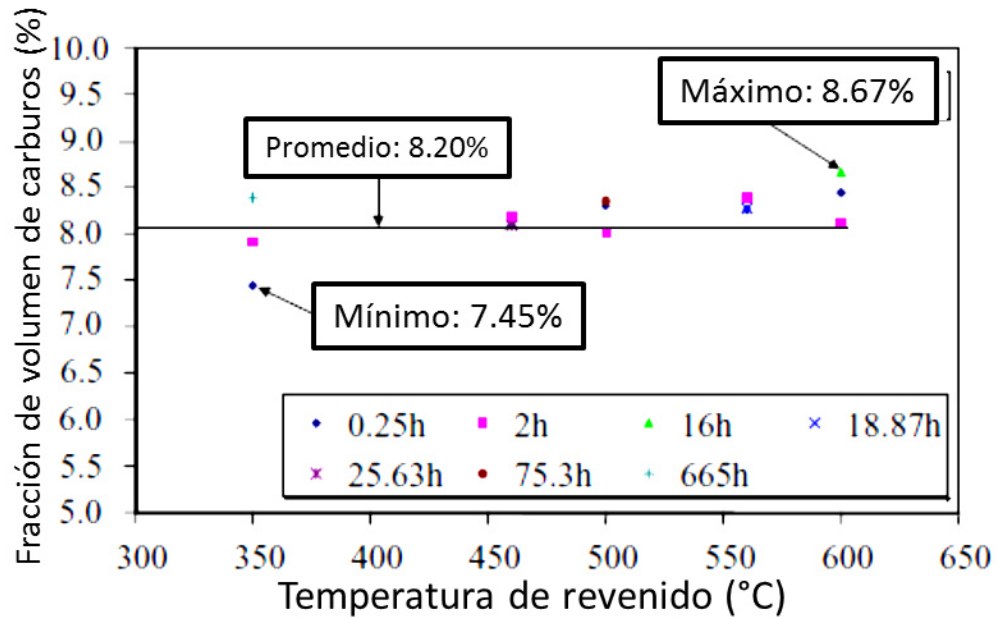
Etapa 3.- Entre temperaturas de 200°C y 300°C en este proceso la austenita retenida que no haya transformado durante el proceso de temple se descompone en ferrita y cementita (usualmente llamada perlita) y este proceso tiene un efecto de incremento de volumen (+ 0.33 pct) cuando la concentración de carbón en la austenita es pequeño.

Etapa 4.- Entre temperaturas de 250°C y 350°C el carbón segregado y los carburos transforman en cementita, este proceso tiene un efecto de un decremento de volumen (-0.66 pct)

En 1945 se desarrolló el famoso trabajo de Hollomon y Jaffe (14), llamado “Time-Temperature Relations in Tempering Steel” el cual hasta la fecha es la base de las aproximaciones que hasta hoy en día se tienen en la predicción de distribución de durezas utilizando modelos matemáticos, ellos desarrollaron una ecuación que predice la dureza en condición de revenido tomando en cuenta las variables principales mencionadas en (3) a partir de una serie de experimentos con 6 especímenes con diferentes porcentajes de carbón que van desde 0.31 hasta 1.15, y sometiéndolos a temperaturas desde 100°C hasta 700°C, con tiempos desde 10 segundos hasta 24 horas, obteniendo los perfiles de dureza de todas las condiciones para obtener la Ecuación 2 donde T es la temperatura, C es una constante relacionada con la composición química, y t es el tiempo.

$$H = f [T(c + \log t)] \quad \text{Ec. 2.}$$

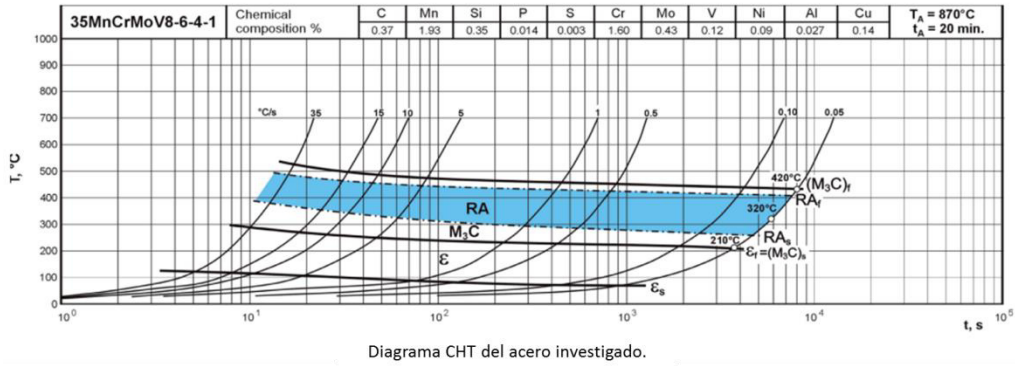
Z. Zhang et al. (15), Investigaron la evolución microestructural de un acero herramienta durante el proceso de tratamiento térmico de revenido, utilizando técnicas como TEM, SEM y rayos X con la finalidad de evaluar el mecanismo principal del “ablandamiento” del acero 55NiCrMoV7, encontrando que el fenómeno de ablandamiento del acero está fuertemente asociado con la evolución de los obstáculos hacia el movimiento de la dislocaciones, por ejemplo los carburos secundarios, así como una fuerte correlación entre la distribución de dureza medida en condición de revenido y el tamaño promedio de los carburos, ellos muestran una Figura7 donde se observa que la fracción de volumen de los carburos vs temperatura de revenido se desarrolla linealmente.



**Figura7.-** Evolución de la fracción de volumen de los carburos respecto a la temperatura de revenido (15).

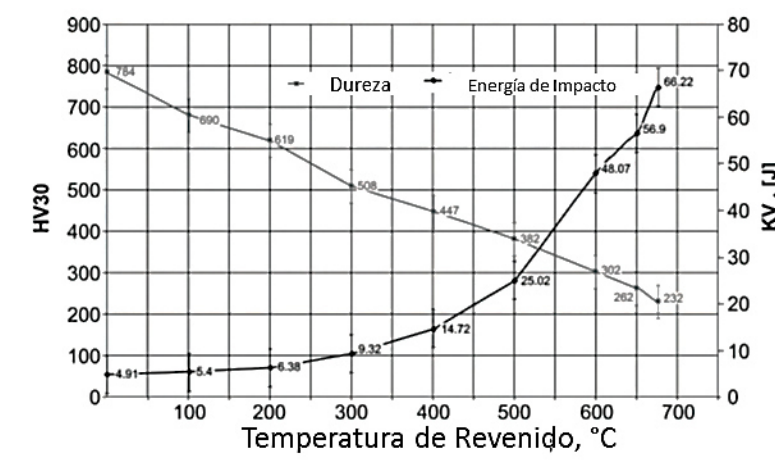
P. Bala et al. (16), Estudiaron la cinética de transformación de un acero al Cr-Mo-V con alto carbón, sometiendo las probetas a un tratamiento térmico de temple y posteriormente calentándolas a diferentes velocidades de calentamiento y con pruebas de dilatometría, observo los cambios microestructurales debido a la precipitación de la fase  $\epsilon$ , carburos  $M_3C$  y la transformación de la austenita retenida, desarrollando un diagrama de transformación continua durante el calentamiento del proceso de revenido (CHT) por sus siglas en inglés, para esta aleación desarrollando las bandas de temperaturas a las cuales se lleva a cabo el proceso de transformación de la austenita retenida en función de la velocidad de calentamiento, dicho diagrama se muestra en la

**Figura8.**



**Figura8.-** Diagrama de transformación durante el proceso de revenido del acero al Cr-Mo-V (16).

Dabrowski y R Dziurkar (17), validaron el efecto de la temperatura de revenido en la distribución de dureza así como la energía de impacto en un 56NiCrMo7, clasificado como un acero herramienta para trabajado en caliente, ellos encontraron que este grado de acero se suaviza muy lentamente después del tratamiento térmico de revenido en los rangos entre 100 y 675°C, confirmándolo no solo en la distribución de dureza sino también en la microestructura bajo las diferentes condiciones a las que fue sometido el acero, obteniendo valores arriba de 66J después de revenir a 675°C, además lo demostraron con fractografías de los especímenes en cuestión, en la Figura9 se muestran los resultados que obtuvieron en propiedades mecánicas.



**Figura9.-** Se muestra la influencia de la temperatura de revenido en la energía de impacto y dureza del 56NiCrMo7 después de ser templadas en aceite a 800°C (17).

## 4.-Transferencia de Calor

El fenómeno de transferencia de calor es la ciencia que trata de predecir el intercambio energético que puede tener lugar entre materiales como resultado de la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos dada una diferencia de temperatura. Esta ciencia pretende no solo explicar cómo la energía térmica puede ser transferida, si no también predecir la rapidez con la que bajo ciertas condiciones específicas tendrá lugar esa transferencia. Los principales mecanismos de transferencia de calor son;

### *4.1.-Fenómenos de Transferencia de Calor por Conducción.*

La transferencia de calor por conducción se presenta cuando existe una diferencia de temperaturas, la experiencia nos dice que hay transferencia de energía desde la región de más temperatura hacia la región de menos temperatura, cuando se presenta este fenómeno, se dice que la energía se ha transferido por conducción y que el flujo de calor por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura, esto se puede observar en la Ecuación 3, la cual representa el fenómeno de transferencia de calor por conducción :

$$\frac{q}{A} = \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ec. 3.}$$

Cuando se introduce la constante de proporcionalidad K;

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ec. 4.}$$

Donde q es el flujo de calor y  $\partial T/\partial x$  es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor, la constante positiva k es la conductividad térmica del material, y se ha puesto el signo menos para satisfacer la segunda ley de la termodinámica, esto es que el calor debe fluir hacia las temperaturas decrecientes.



En la Figura10 se muestra la transferencia de calor a través de un material fijo como una pared estacionaria.

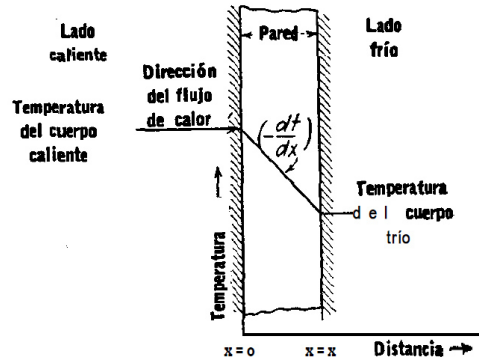


Figura10.- Representación del flujo de calor a través de una pared.

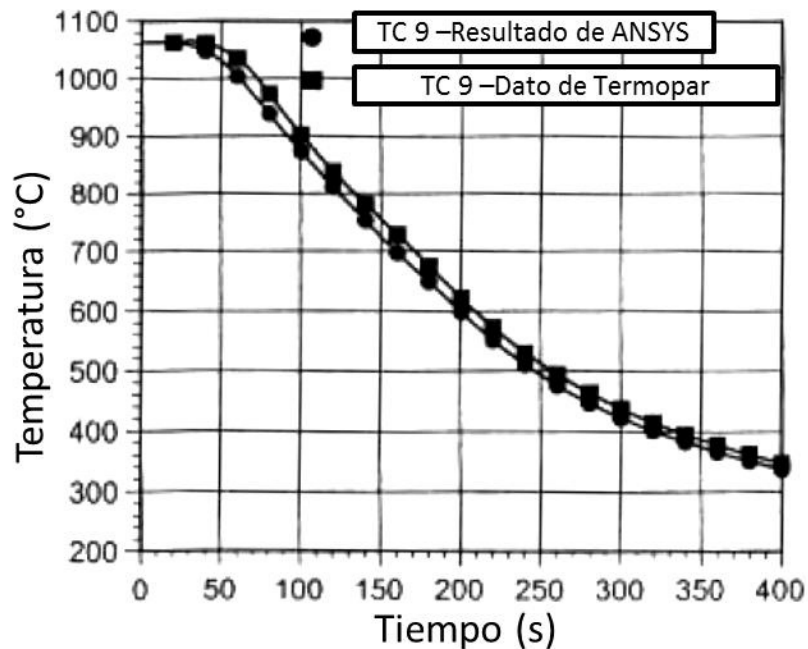
#### 4.2.- Fenómenos de Transferencia de Calor por Convección.

La transferencia de calor por convección es la transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido por medio de mezclas, por ejemplo es bien conocido que si se coloca una placa de metal caliente delante de un ventilador se enfriara más rápido que si se pone al aire quieto, se dice que el calor ha cedido hacia afuera de la placa y a este fenómeno se le conoce como transferencia de calor por convección, para expresar el efecto global de la convección, se utiliza la ley de enfriamiento de Newton, la cual se ilustra en la Ecuación 5.

$$q = hA(T_p - T_\infty) \quad \text{Ec. 5.}$$

La variable  $h$  es el termino sobre el cual tiene influencia la naturaleza del fluido y la manera en que es agitado, para determinar si el fenómeno de convección es natural o es forzada y debe de ser evaluado experimentalmente, es mejor conocido como el coeficiente de transferencia de calor.

Cross et al. (18), de la universidad de Connecticut, desarrollaron ecuaciones empíricas para calcular la variable  $h$ , utilizando el paquete comercial computacional ANSYS, ellos instrumentaron un disco base níquel de 8" X 2.5", colocándole 14 termopares en diferentes localizaciones para obtener datos experimentales de Temperatura en función del tiempo, para posteriormente obtener la variable  $h$  en función de la temperatura y evaluar las curvas de enfriamiento simuladas, obteniendo errores de temperatura de hasta 80°C durante los primeros 80 segundos del proceso de simulación, la comparación del termopar número 9 se observa en la Figura11.



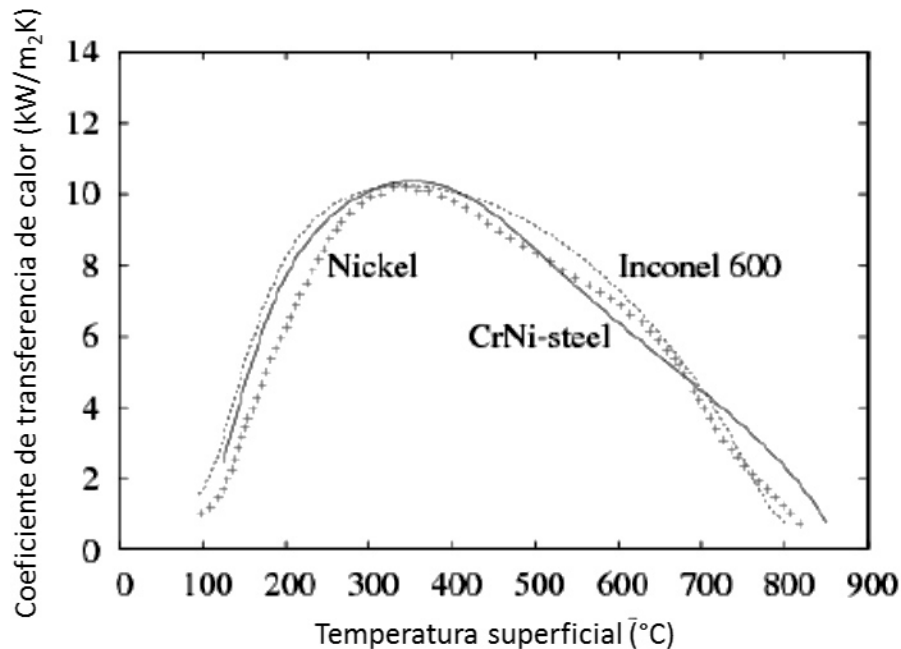
**Figura11.-** Comparación de la temperatura calculada por ANSYS con la temperatura medida experimentalmente (18).

B. Liscic and T. Filetin (19), utilizaron probetas estandarizadas para medir velocidades de enfriamiento en diferentes medios de enfriamiento con diferentes temperaturas, por ejemplo polímero al 10% y a una temperatura de 30°C, sales fundidas a 230°C, aceite a 80°C y 120°C, agua a 30°C y salmuera a 30°C, ellos utilizaron un método de extracción de calor para calcular el coeficiente de transferencia de calor  $h$ , donde prácticamente se relaciona que la pérdida de energía

extraída del espécimen es proporcional al decremento en energía de convección de la superficie, esta metodología aplica para paredes de temperaturas constantes y se muestra en la Ecuación 6

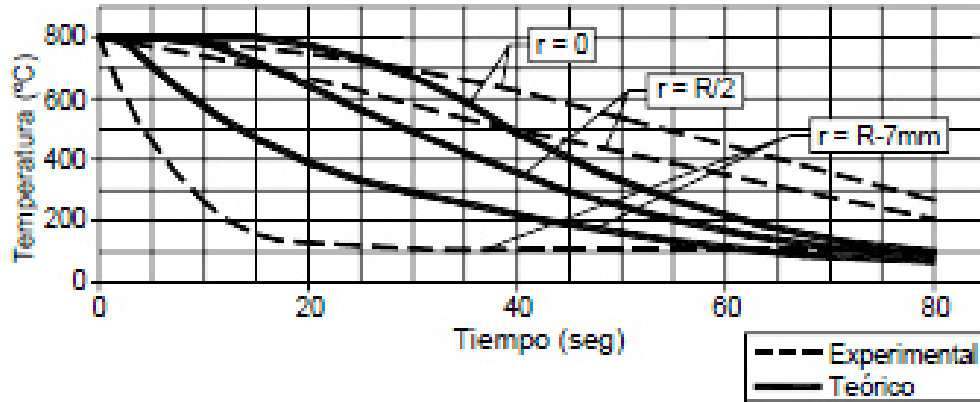
$$Q = hA(T_p - T_1) = c\rho V \frac{dT_p}{dt} \quad \text{Ec. 6.}$$

Hala Salman (20), evaluó diferentes condiciones térmicas de especímenes sometidos a diferentes condiciones de tratamiento térmico controlado, evaluando experimentalmente y utilizando la técnica de volúmenes de control, para predecir los perfiles de temperatura-tiempo, dependiendo los medios de enfriamiento y su nivel de agitación, el factor de templabilidad y la dureza en condición de temple, la cual es una de las variables más importantes para el desarrollo de las propiedades mecánicas de los aceros, para lograr obtener resultados con buena correlación experimental es necesario determinar las condiciones iniciales óptimas y el coeficiente de transferencia de calor  $h$ , que es la base hoy en día de las simulaciones de tratamiento térmico de temple, demostró además la importancia del medio de enfriamiento que es afectado debido a la solución que se utiliza para templar piezas y también como se ve afectada la conductividad térmica dependiendo del grado de acero, como se muestra en la Figura12

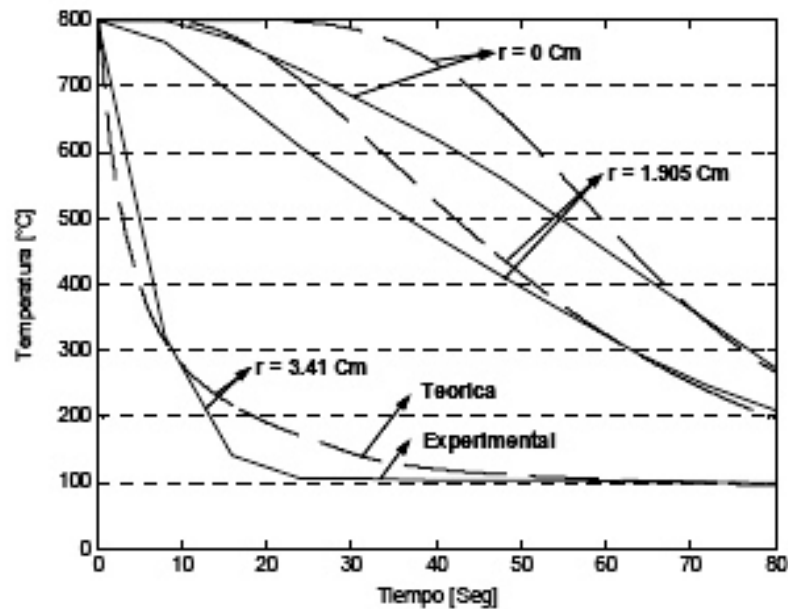


**Figura12.-** Coeficiente de transferencia de calor en función de la temperatura de diferentes materiales (20).

Carlos Camurri y Diego Rdz. (21), desarrollaron un modelo matemático a partir de validaciones experimentales de la transferencia de calor durante las etapas de tratamiento térmico a las que son sometidas las bolas para molienda de 3” y 5” de diámetro, utilizaron la metodología de las diferencias finitas por el medio explícito considerando la temperatura inicial de 50°C, considerando además despreciable la capa de vapor de la primer etapa de temple, obteniendo resultados muy dispersos al compararlos con los experimentales por lo que decidieron contemplar el efecto del aumento de la temperatura del medio durante el temple, así como la transferencia de calor por radiación y conducción de la capa de vapor, obteniendo resultados que no sobrepasaron el 3 % de error. Los resultados de la primera aproximación se muestran en la Figura13, y los resultados corregidos cambiando las condiciones de frontera iniciales se muestran en la Figura14.



**Figura13.-** Distribución de temperaturas teóricas y experimentales durante el tratamiento térmico de temple de bolas de 3" diámetro (21).



**Figura14.-** Distribución de temperaturas teóricas corregidas y experimentales durante el tratamiento térmico de temple de bolas de 3" diámetro (21).

En este experimento se puede apreciar la importancia de la selección de las variables más importantes de los modelos matemáticos para la simulación de enfriamientos de los diferentes materiales, como son la temperatura del medio de enfriamiento y el coeficiente de transferencia de calor en función de la temperatura.

### ***4.3.- Fenómenos de Transferencia de Calor por Radiación.***

Otro mecanismo de transferencia de calor es por radiación el cual se presenta a altas temperaturas y a diferencia de la transferencia de calor por conducción y convección, este mecanismo no necesita ni ningún medio de intervención para ser activado, este mecanismo de transferencia de energía se presenta por los cambios de configuración electrónica de los átomos, este tipo de energía es rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre ninguna atenuación en vacío, este es el mecanismo por el cual la energía del sol es transferida a la tierra.

Este fenómeno es conocido también como un fenómeno volumétrico y todos los cuerpos sólidos, líquidos y gases, absorben, emiten o transmiten radiación. Este proceso se le conoce como fenómeno de superficie para sólidos que son opacados por la radiación térmica por ejemplo las rocas y la materia

### ***4.4. Distorsión asociada al tratamiento térmico.***

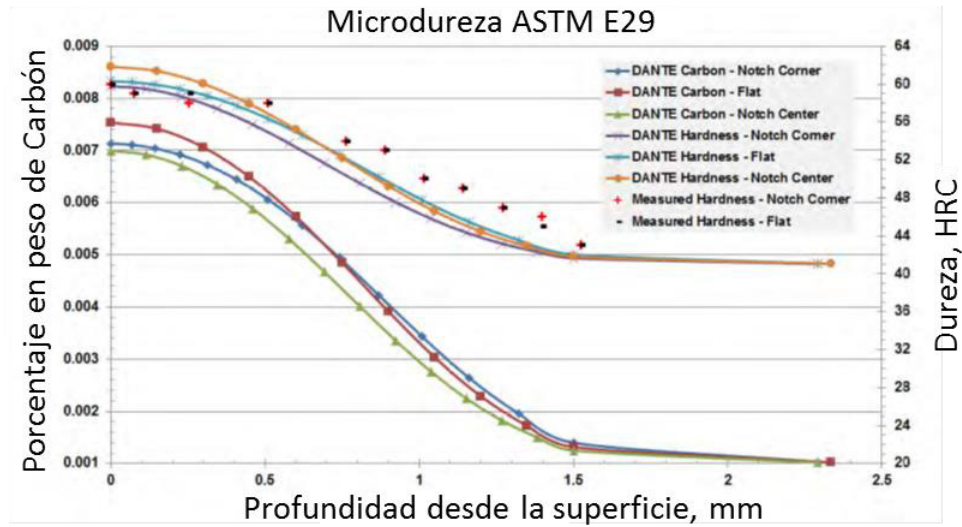
El fenómeno de distorsión ha sido uno de los principales temas a tratar a nivel industrial, debido a que en los últimos años se ha vuelto un problema muy recurrente ocasionando mala estabilidad dimensional así como esfuerzos residuales generados debido a la diferencia de temperaturas y a los cambios microestructurales. Una encuesta entre muchos de los miembros de la “German Research Association of Drive Engineering” estimó en el año 1995 una cantidad aproximadamente de 850 millones de euros para la eliminación de la distorsión en componentes como engranes y rodamientos (22). Otro punto importante es que algunos componentes no se pueden tratar térmicamente utilizando un medio de enfriamiento muy agresivo para lograr una buena penetración de temple, así como mejorar considerablemente las propiedades mecánicas, debido a que si el grado de acero es de buena templeabilidad esto conlleva a una distorsión más prolongada, incluso puede llegar a agrietarse el componente cuando se está templando (23).

De acuerdo con H.W. Zoch y Th. Luebben (24), para la predicción del fenómeno de distorsión se deben de considerar algunas características importantes que deben ser analizadas con cautela, las cuales se describen a continuación:

- (1) Geometría de la parte.
- (2) Composición química/grado de segregación.
- (3) Microestructura/tamaño de grano.
- (4) Esfuerzos (que actúen al momento del temple o esfuerzos residuales)
- (5) Temperatura
- (6) Historial mecánico.

Hoy en día, Existen una gran variedad de modelos matemáticos computacionales (25) que relacionan las transformaciones alotrópicas de los aceros tratando de simular los efectos de las transformaciones de fase asociadas al fenómeno de distorsión (23) Smoljan (26) utilizo la ley de Fourier para modelar la conducción de calor, así como la metodología de MDF (Método de Diferencias Finitas) para calcular las distribuciones de temperatura, en geometrías complejas como cilindros, conos, esferas, etc. Así como asociar la distorsión desarrollada durante el proceso de temple.

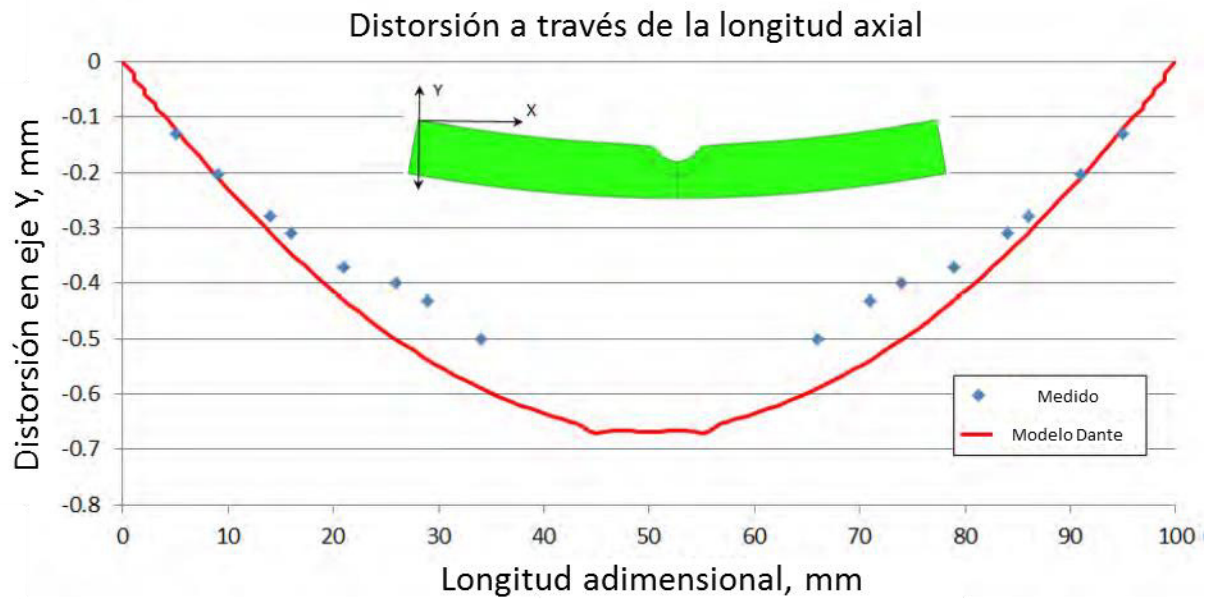
A. Freborg y B. Ferguson de la Deformation Control Technology, en Cleveland, Ohio USA, (27) evaluaron la capa decarburizada, deformación y esfuerzos residuales a especímenes de un acero AMS 6308 (pyrowear<sup>®</sup>53) utilizado como componente de una transmisión aeroespacial, utilizaron el paquete comercial computacional DANTE para simular el tratamiento térmico del proceso de carburización al vacío/Recocido subcritico/Austenizado/Temple con Nitrógeno. Ellos realizaron ciclos experimentales para desarrollar 1mm de capa carburizada y así utilizar y validar a través de la simulación del proceso los resultados experimentales, los cuales muestran buena correlación entre lo experimental y lo simulado, dichos resultados se muestran en la Figura15



**Figura15.-** Comparación entre los resultados experimentales vs simulación de la microdureza en especímenes de AMS 6308 (pyrowear<sup>®</sup>53) (27).

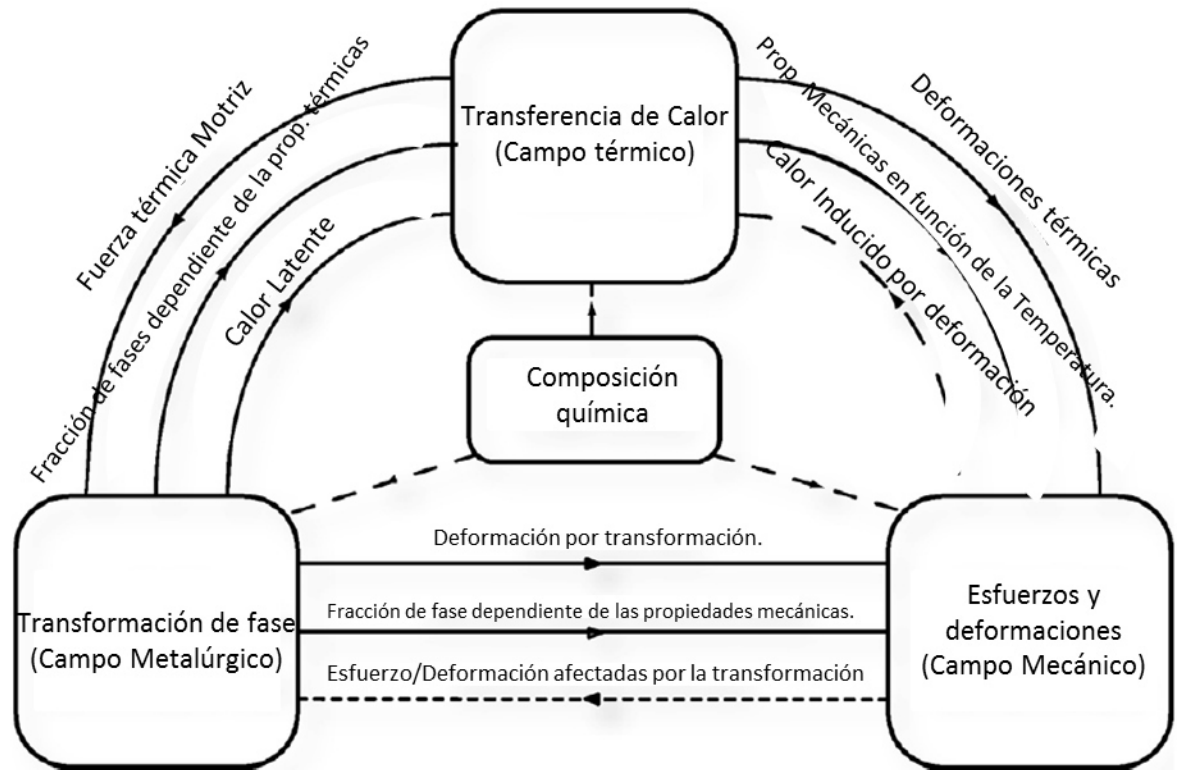
Los resultados de distorsión en los especímenes muestran buena correlación, condiciones iniciales de frontera como desplazamientos en función de la estructura, así como coeficiente de transferencia de calor y temperaturas fueron utilizados para el desarrollo de la simulación de distorsión, las mediciones del espécimen fueron a través del eje “Y” y experimentalmente así fueron medidas, los resultados se muestran en la Figura16





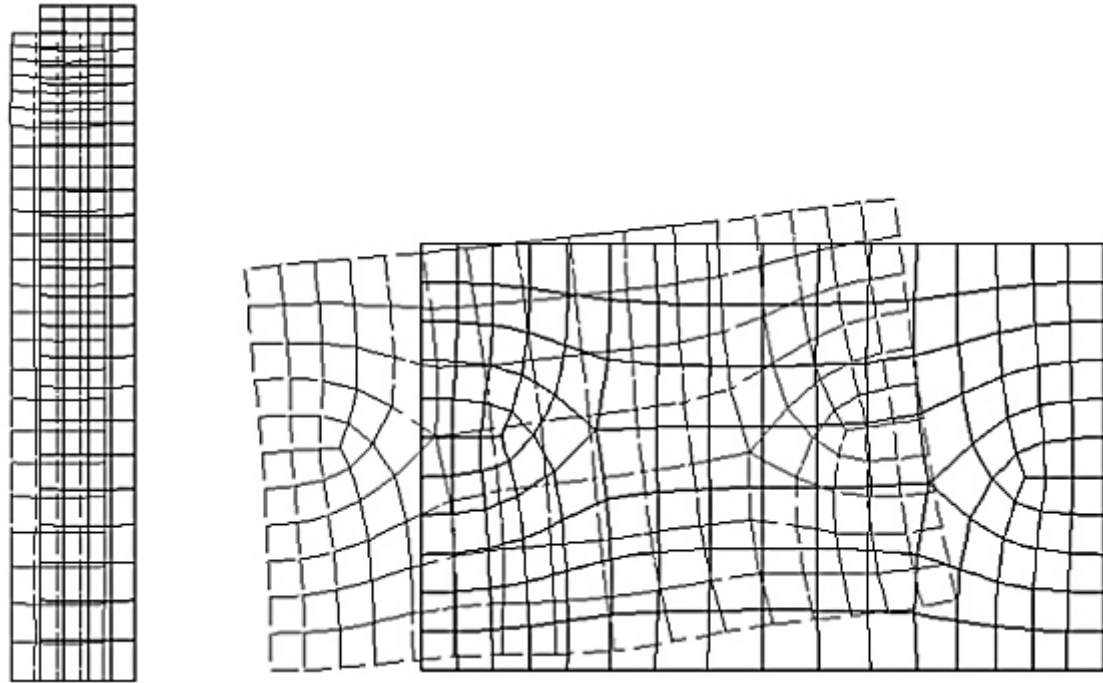
**Figura16.-** Comparación de las mediciones experimentales vs resultados del software DANTE (27).

Caner Simsir y Cemil Hankan (28), desarrollaron un modelo basado en elemento finito para simular tratamientos térmicos, enfocando el estudio hacia la parte del temple, ellos utilizaron probetas cilíndricas estandarizadas con un orificio excéntrico para obtener diferentes escenarios de enfriamiento y validar los resultados a través de la simulación del proceso, evaluando principalmente los esfuerzos residuales y las microestructuras desarrolladas experimentalmente, encontrando buenas correlaciones entre los resultados experimentales y simulados, en la Figura17 se muestran los fenómenos físicos que se presentan durante la simulación un tratamiento térmico.



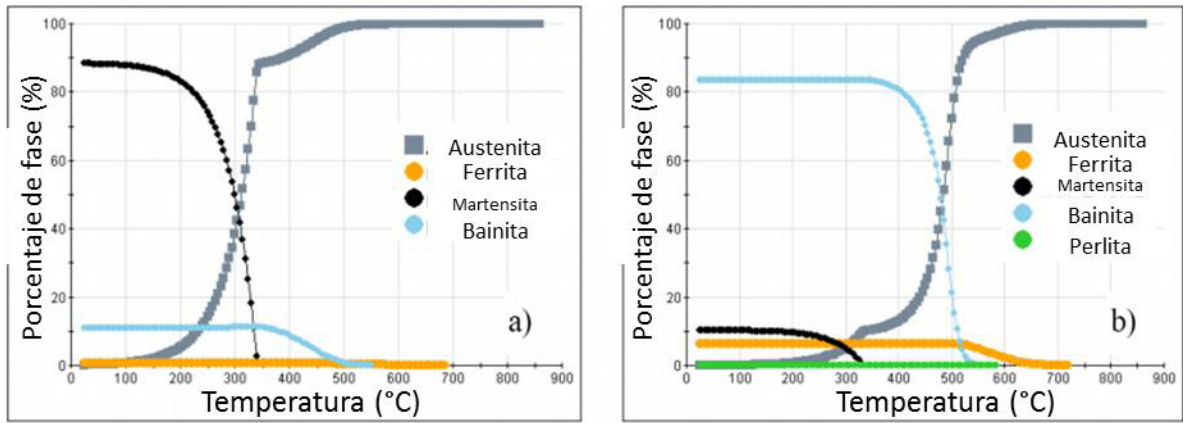
**Figura17.-** Fenómenos físicos considerados por Caner y Cemil para el desarrollo de la simulación de tratamiento térmico de temple (28).

Frédéric Pascon (29), y sus colegas de la Universidad de Liège en Bélgica, desarrollaron un modelo numérico e implementado en el código de elemento finito llamado LAGAMINE, para predecir los cambios en la sección transversal de anillos de material 42CrMo4 con diferentes espesores, modelaron la distorsión que se presentaba en las piezas después de ser rodadas mecánicamente y posterior a ello utilizaban enfriamiento en aire, de tal manera que el enfriamiento fue incluido en el modelo de simulación, encontrando que después de rodado la sección transversal de paredes gruesas exhiben una rotación de material considerable (Figura18) y dicha rotación está fuertemente ligada a la velocidad de enfriamiento.



**Figura18.-** Resultados de la simulación de distorsión de las 2 paredes estudiadas, los resultados fueron multiplicados por 10 para poder apreciar el movimiento (29).

Zhanli Guo y Nigel Saunders (30), modelaron la transformación y predicción de fase desarrolladas durante el tratamiento térmico de los aceros utilizando la base de datos muy conocida llamada JMatPro<sup>®</sup>, donde obtuvieron datos de propiedades de las fases que se desarrollan durante el enfriamiento del acero, tomando como datos de entrada la cinética de transformación de fase como son los diagramas conocidos como TTT y CCT, la variación de la temperatura en función de la densidad del material, módulo de Young, el coeficiente de expansión térmica y la conductividad térmica, otras variables importantes son el esfuerzo de cedencia, el esfuerzo ultimo así como el perfil de dureza en función de la temperatura, todas estas variables fueron tomadas en cuenta para tratar de predecir en lo posible la distorsión que sufren los acero al ser sometidos a enfriamientos súbitos desde la temperatura crítica de transformación, así como el efecto de la velocidad de enfriamiento el cual podemos apreciar en la Figura19.

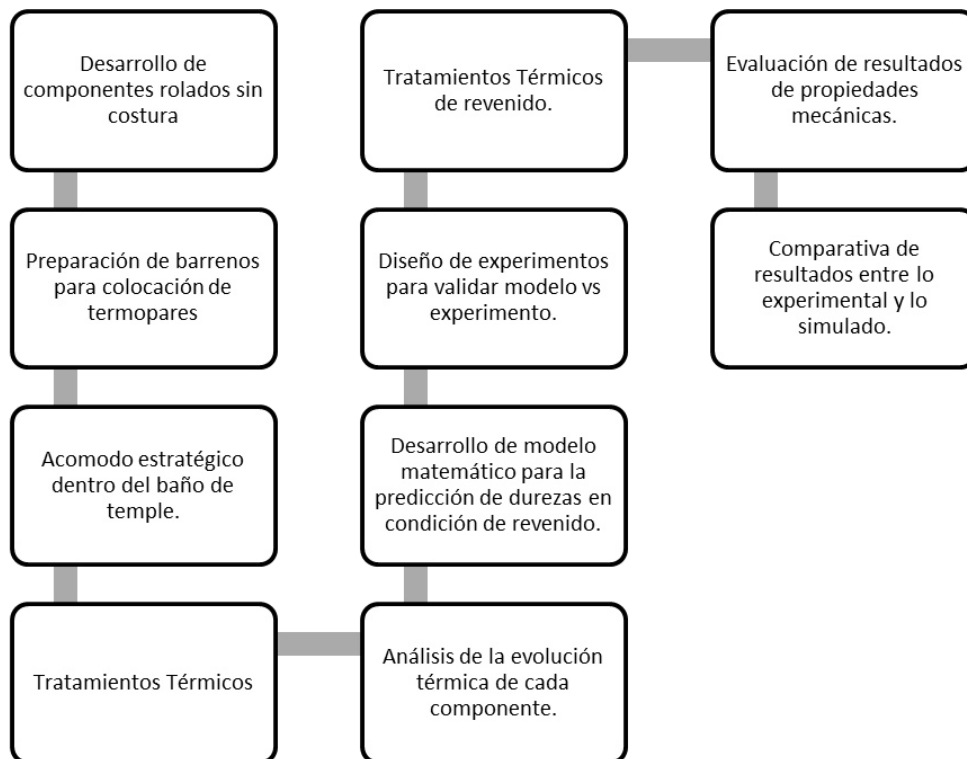


**Figura19.-** Efecto de la velocidad de enfriamiento en la predicción microestructural del acero 4140 (30).

## 5.-Procedimiento experimental

### 5.1.- Etapa I-*Calculo de transferencia de calor a partir de curvas experimentales por el método inverso en el proceso de temple.*

En la Figura20 se muestra como se desarrolló la parte experimental de las validaciones, realizadas para comparar resultados simulados vs resultados experimentales.

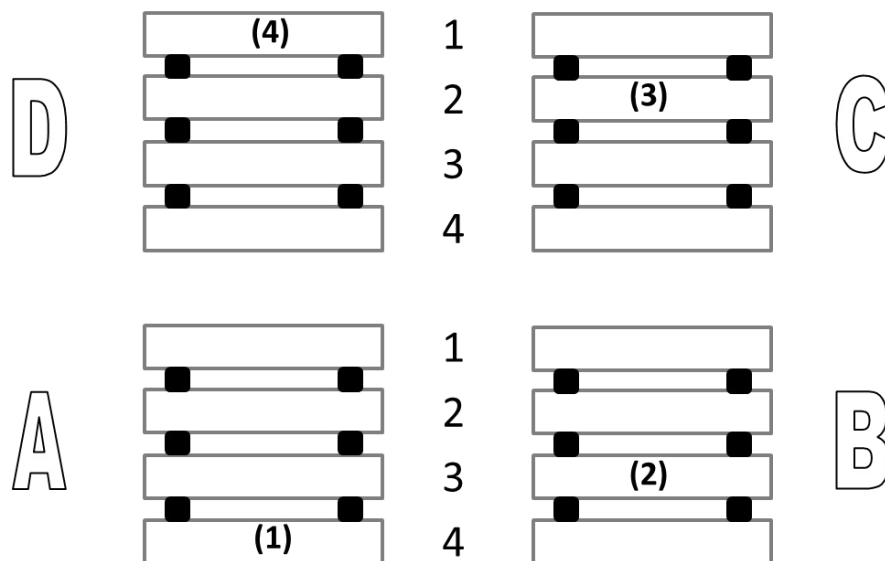


**Figura20.-** Diagrama que muestra el desarrollo del proceso referente a la parte experimental y simulación del proceso.

Se procedió a desarrollar un diseño de experimentos a nivel industrial utilizando una carga de 16 anillos previamente trabajados termomecánicamente (como se mostró en

la Figura1, esquema de proceso de forja) de material 42CrMo4, 4 de los 16 anillos fueron instrumentados con 20 termopares cada uno, localizados a diferentes alturas y girados a 45° para obtener el “comportamiento” del baño de temple referente a las curvas de temperatura vs tiempo, y posteriormente obtener las velocidades de temple y compararlas con un diagrama de transformación CCT para evaluar las posibles microestructuras y durezas de tratamiento térmico de temple, así como el promedio de la distorsión, debido a los cambios microestructurales durante el tratamiento térmico de temple, la solución acuosa que fue utilizada como medio de temple fue una solución de agua + polímero al 8 % a temperatura ambiente con condiciones de agitación que habitualmente se utilizan para templar las diferentes cargas en planta. Las dimensiones de los anillos son de D.E.=2631mm, pared = 164 mm, altura de 188 mm, y el arreglo de la carga se muestra en la

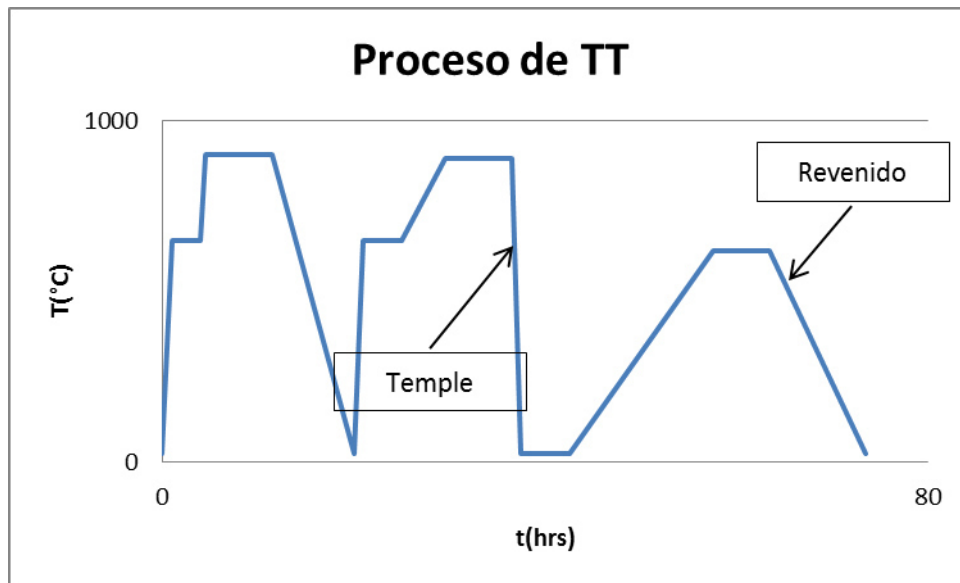
**Figura21.**



**Figura21.-** Arreglo de acomodo de anillos de prueba en condición de temple, el anillo A1, B2, C3 y D4 se instrumentaron con 20 termopares.

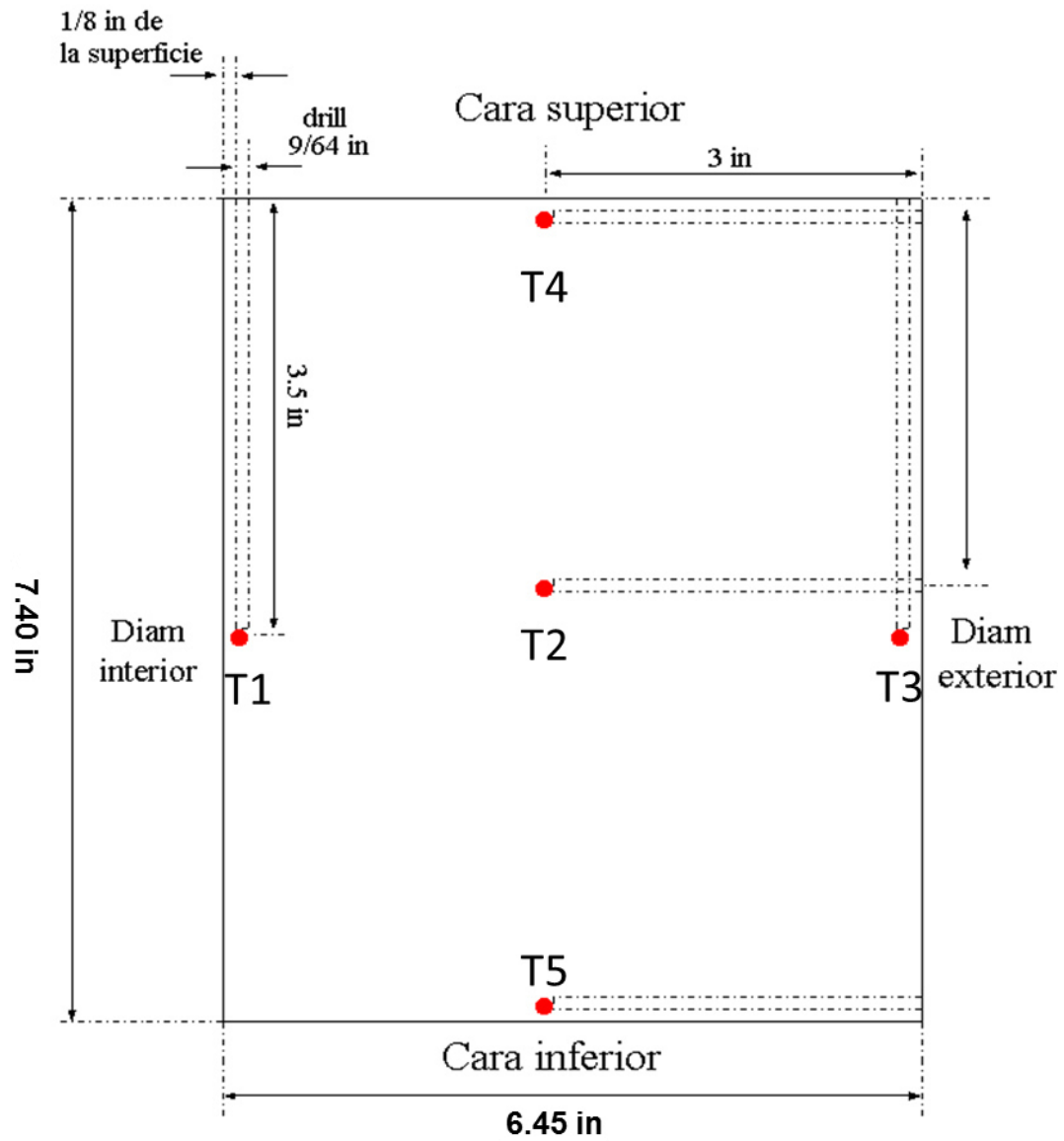
Los anillos de prueba fueron normalizados después del proceso de forja a una temperatura superior a la Ac3 con la finalidad de asegurar una microestructura

homogénea antes de ser tratadas térmicamente en temple y lograr cumplir con las propiedades mecánicas después del proceso de revenido. En la Figura22 se muestra la configuración del proceso de tratamiento térmico que incluyó Normalizado, Temple y Revenido.



**Figura22.-** Se muestra la configuración a la que fueron sometidas las piezas de prueba aplicando un tratamiento térmico de normalizado, temple y revenido.

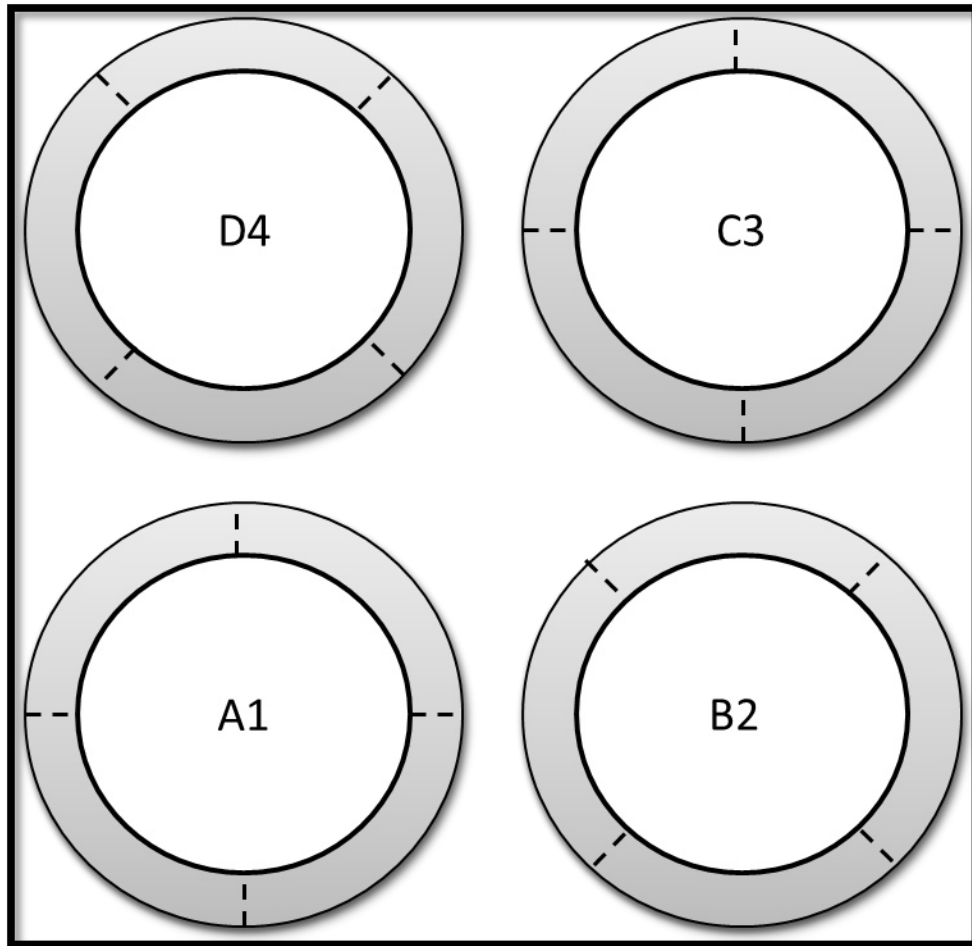
El objetivo principal de esta experimentación, fue obtener la mayor cantidad de información posible, con la finalidad de conocer la evolución térmica de las diferentes zonas del baño de temple, mediante curvas de enfriamiento ( $T$  vs  $t$ ) para posteriormente ser utilizados para realizar la metodología de análisis inverso dentro de FORGE<sup>®</sup>, y obtener las aproximaciones de transferencia de calor por convección  $h$  y utilizar estos valores como condición de frontera dentro de FORGE<sup>®</sup>, para realizar un análisis de tratamiento térmico de temple, y estimar el grado de distorsión en las piezas de prueba, en la Figura23, se muestra el arreglo de la localización de los termopares en la sección transversal de los 4 anillos con su determinada identificación.



**Figura23.-** Ubicación de los termopares en la sección transversal del anillo para obtener curvas de Temperatura vs tiempo en cada una de las posiciones ilustradas.



En la Figura24 Se muestra la vista superior del arreglo geométrico de la carga, mostrando la con líneas punteadas la localización de los termopares.



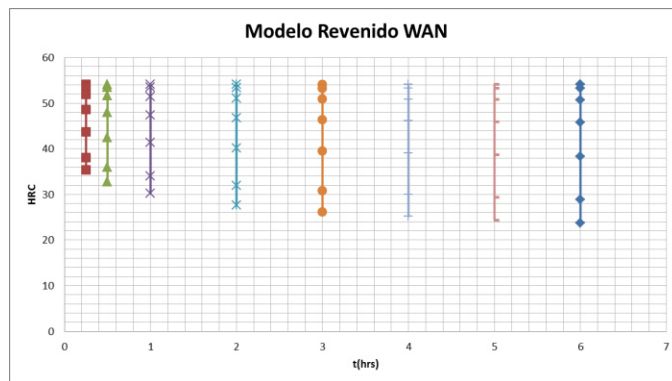
**Figura24.-** Las líneas punteadas muestran la localización de los termopares, así como la estrategia del arreglo para obtener la mayor cantidad de datos posibles.

Al finalizar el proceso de tratar térmicamente los anillos de prueba se obtuvo la mayor parte de los datos de temperatura vs tiempo, sin embargo en las piezas C3 y D4 se encontraron errores al momento de realizar el análisis de datos de la prueba por lo que algunas curvas no fueron obtenidas.

## 5.2.- Etapa II-Predicción y verificación de perfiles de dureza después del proceso de revenido para el acero 42CrMo4.

La segunda parte de la experimentación se basó en el desarrollo e implementación de un modelo matemático encontrado en la literatura desarrollado por WAN (41), en Marzo de 2015 en la universidad politécnica de Wuhan en China, donde a través de la ecuación original de Hollomon y Jaffe, WAN desarrollo una ecuación 3 para predecir la evolución de la dureza en función del tiempo y temperatura, el cual valido con probetas experimentales de laboratorio de un acero T8Mn y 42CrMo4, el objetivo de esta parte de la tesis fue introducir el modelo matemático dentro de FORGE® para posteriormente predecir perfiles de dureza en piezas complejas con forma y relacionar los resultados con las propiedades mecánicas finales, La ecuación 7 fue evaluada utilizando el programa Excel para validar dicho modelo, en la Figura25 se muestran los resultados. A partir de los resultados se modificó el modelo para hacerlo codificable y leído por el programa de elemento finito.

$$H = H_1 + T \left( \frac{dH_1}{dT} \right) \ln \left( 1 + \frac{lg\tau}{c} \right) \text{ Ec. 7.}$$



**Figura25.-** Resultados del modelo matemático de WAN, dureza en función del tiempo (41).

A partir de los resultados del modelo en Excel, personal de TRANSVALOR® nos apoyó con el desarrollo de la ecuación tomando en consideración la metodología del tiempo ficticio (42) el cual considera el cálculo isotérmico de temperatura y tiempo de dentro del modelo matemático para la predicción de la dureza, el modelo se muestra en la Ecuación 8 donde A, B,  $\alpha$ ,  $\beta$  son constantes del material, t es tiempo en segundos y T es temperatura en °C.

$$H = A + B(1 - \alpha\beta T(T - 273)^{(\alpha-1)}) \text{Ln}\left(1 + \frac{\text{Ln}\left(\frac{t}{3600}\right)}{\text{Ln}(10)C}\right) \exp\{-\beta(T - 273)^\alpha\} \quad \text{Ec. 8.}$$

Aplicando el criterio del tiempo ficticio dentro del modelo matemático en la ecuación 8 descrita arriba queda de la siguiente manera, el modelo se observa en la Ecuación 9, El termino H (t, T) corresponde a la dureza al comienzo del incremento, y  $t_{fict}$  es el tiempo correspondiente a la dureza a una temperatura dada T.

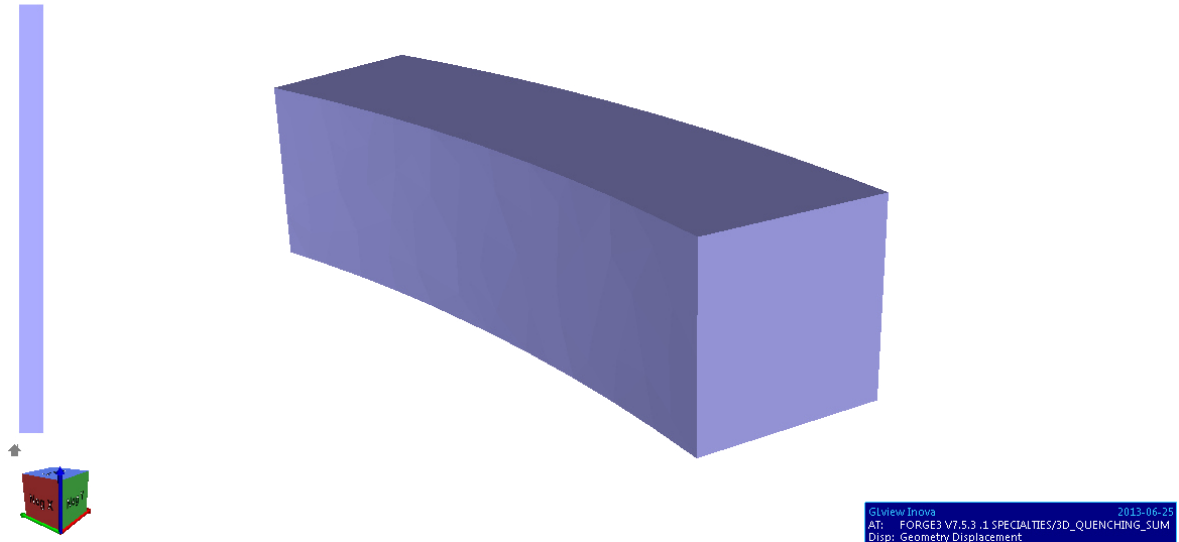
$$t_{fict} = 3600 \exp\left(\text{Ln}(10)C \left[ \exp\left(\frac{1 - \left(\frac{H(t,T)-A}{\beta}\right) \exp\{\beta(T-273)^\alpha\}}{\alpha\beta T(T-273)^{(\alpha-1)}}\right) - 1\right]\right) \quad \text{Ec. 9.}$$

De tal manera que sustituyendo el tiempo ficticio en la ecuación 9, el modelo matemático en condición de revenido se muestra en la Ecuación 10, Modelo matemático utilizado para la predicción de durezas en condición de revenido.

$$H(t + \Delta t, T) = A + B(1 - \alpha\beta T(T - 273)^{(\alpha-1)}) \text{Ln}\left(1 + \frac{\text{Ln}\left(\frac{t_{fict} + \Delta t}{3600}\right)}{\text{Ln}(10)C}\right) \exp\{-\beta(T - 273)^\alpha\} \quad \text{Ec. 10.}$$

El diseño de experimento para validar el modelo fue desarrollado en piezas de dimensiones similares a la de los anillos utilizados en la primera parte acerca de distorsión, para tratar de realizar la validación de una manera más representativa de la evaluación de las propiedades mecánicas

Las dimensiones de las probetas son de 4”X4”X12”, y se muestran en la Figura26



**Figura26.-** Geometría de las probetas de material 42CrMo4 que se utilizaron para el experimento y obtención de relaciones entre las propiedades mecánicas (i.e. Esfuerzo de cedencia, Esfuerzo último, dureza.)

Debido a que se propuso encontrar una correlación entre propiedades mecánicas (43) y dureza (44), se procedió a desarrollar el Diseño de experimentos, en esta etapa se optó por utilizar la metodología de superficies de respuesta, dicho algoritmo se encuentra dentro del paquete comercial computacional MINITAB 14®, el cual consistió en utilizar parámetros similares a los de la industria, se seleccionó el rango óptimo de temperaturas más utilizadas y tiempos, para desarrollar el set de pruebas a validar.

**En la**

Tabla 2 se muestran los tratamientos térmicos a desarrollar, como resultado del diseño de experimentos, obtenidos al variar tiempos y temperaturas de proceso.

**Tabla 2.-** Diseño de experimento para validar las propiedades mecánicas del grado de acero 42CrMo4, los últimos 5 experimentos se realizaron para evaluar la fiabilidad del experimento.

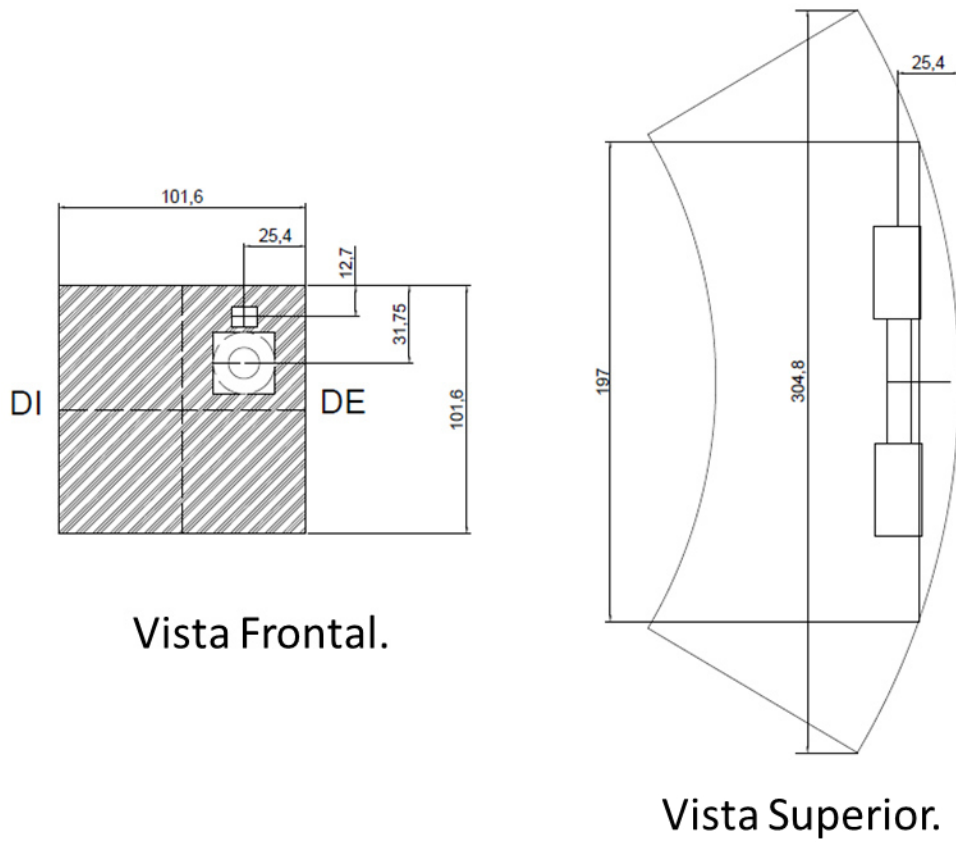
Tiempo (horas)	Temperatura (°C)
2	550
2	650
10	550
10	650
6	529.3
6	670.7
0.3	600
11.7	600
6	600
6	600
6	600
6	600
6	600
6	600

Antes de someter las probetas a este diseño de experimento, las probetas fueron normalizadas a 900°C por 4 horas, posteriormente fueron templadas a 875°C y finalmente se utilizaron las diferentes condiciones mostradas en la

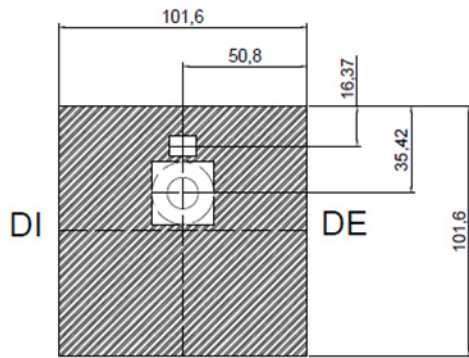
Tabla 2. Las propiedades mecánicas se obtuvieron de acuerdo a la Norma E8 de la AISI la cual nos indica las posiciones y tipo de probetas para el ensayo de tensión, impactos.

En la Figura27 e Figura28 se describe el proceso de obtención de piezas para probetas, de acuerdo a las especificaciones de FRISA FORJADOS SA DE CV, las

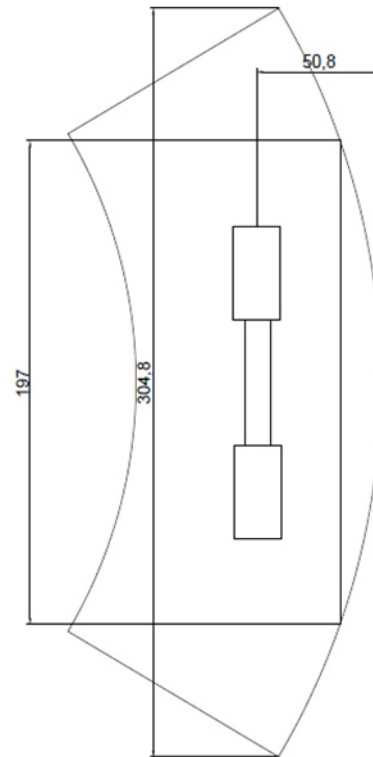
cuales determinan la orientación de la probeta, así como la localización de la misma, a partir del espesor del espécimen utilizado para la validación de dichas propiedades.



**Figura27.-** localización de la probeta para tensión, utilizada para evaluar las propiedades mecánicas a una distancia de  $T/4$ , donde T es el espesor.



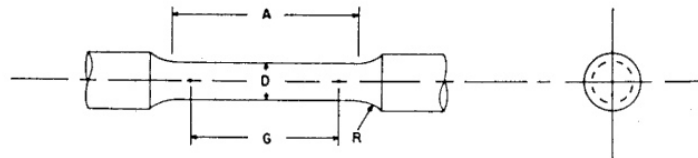
Vista Frontal.



Vista Superior.

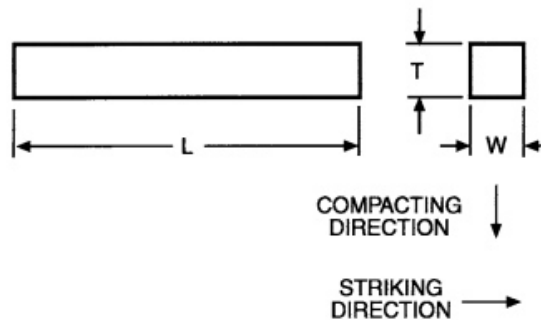
**Figura28.-** localización de la probeta para tensión, utilizada para evaluar las propiedades mecánicas a una distancia de  $T/2$ , donde T es el espesor.

A continuación se muestran en las Figura29 e Figura30, las probetas utilizadas en los ensayos de tensión para determinar las propiedades mecánicas de Esfuerzo de cedencia, Esfuerzo último, así como la probeta del ensayo de impacto, para determinar la energía de los especímenes, dependiendo de las condiciones de tratamiento térmico a las que fueron sometidas.



Dimensions, mm [in.] For Test Specimens with Gage Length Four times the Diameter [E 8]					
	Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional to Standard			
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gage length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]	11.0 ± 0.1 [0.450 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A—Length of reduced section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]	16 [0.625]

**Figura29.-** Dimensiones de la probeta de tensión para evaluación de las propiedades mecánicas (45).



	Dimensions	
	mm	in.
L- Overall Length	75.0 ± 1.5†	2.95 ± 0.06
W-Width	10.00 ± 0.13	0.394 ± 0.005
T-Thickness	10.00 ± 0.13	0.394 ± 0.005

Note 1—Adjacent sides shall be 90° ± 10 min.  
† Editorially corrected in August 2007.

**FIG. 5 Izod (Cantilever-Beam) Impact Test Specimen for P/M Structural Materials**

**Figura30.-** Dimensiones de la probeta de Impacto para evaluación de las propiedades mecánicas (46).



### **5.3- Etapa III-Efecto de los elementos aleantes en el proceso de revenido (perfiles de dureza).**

Se desarrollaron 6 simulaciones variando la composición química y utilizando el modelo de tratamiento térmico de revenido para evaluar las mediciones de dureza de la simulación, para estos casos se utilizaron las composiciones químicas de un acero de alta y media aleación como es el acero AISI 4340 y AISI 8630, en la Tabla 3, se muestran las composiciones químicas en porcentaje en peso.

**Tabla 3.-** Composición química de los aceros utilizados para la simulación del proceso.

	C	Cr	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	V	ASTM
AISI 4340	0.43	0.8	0.7	0.25	1.82	0.02	0.02	0.22	0.05	4
AISI 8630	0.32	0.92	0.85	0.4	0.83	0.01	0.003	0.25	0.02	4

La geometría utilizada para los tratamientos térmicos virtuales fue la misma que se utilizó para modelar el material 42CrMo4 que se muestra en la Figura26.

Los parámetros de temperatura, tiempo y resultado de dureza utilizados para la validación experimental se muestran en la Tabla 4.

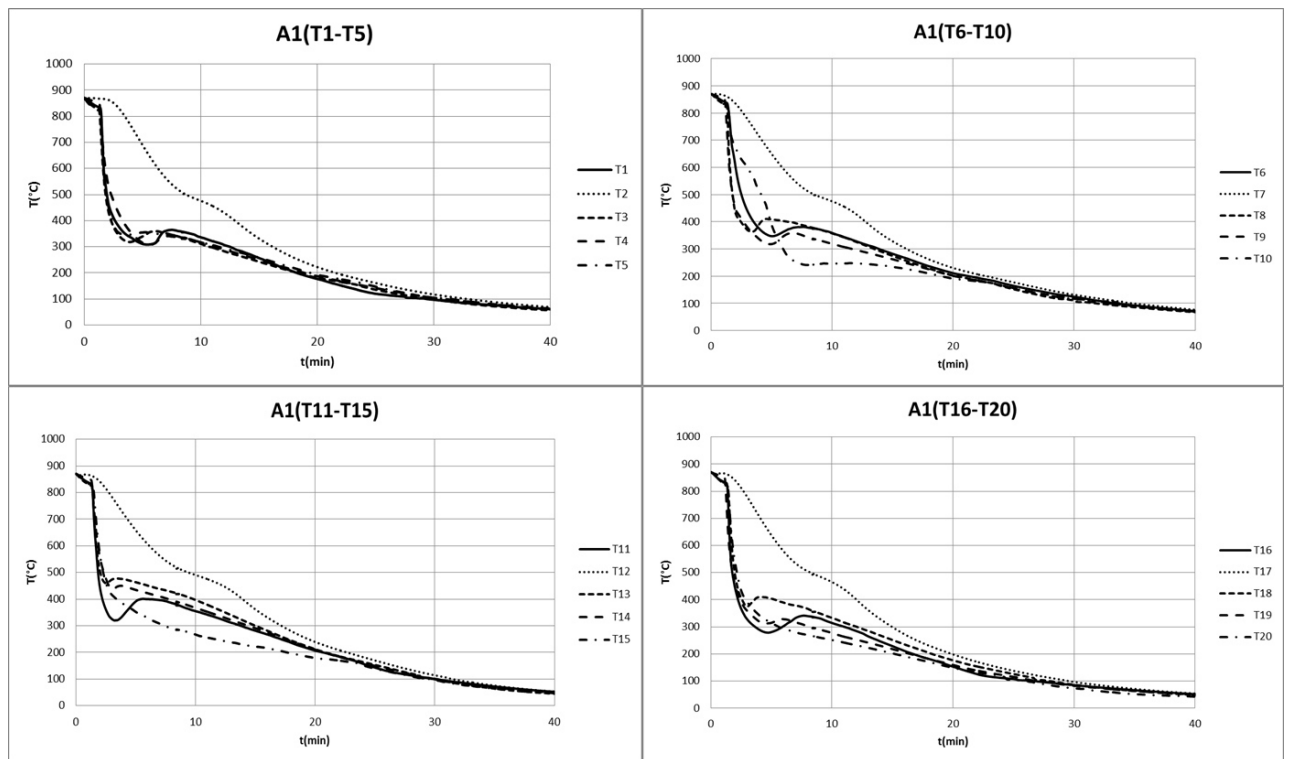
**Tabla 4.-** Parámetros experimentales para la validación virtual de los aceros de alta y media aleación.

AISI 4340			AISI 8630		
Temperatura (°C)	tiempo (hrs)	Dureza (HBN)	Temperatura (°C)	tiempo (hrs)	Dureza (HBN)
545	4	368/367	607	6	321/321
590	8	329/330	640	5	301/296
620	5	289/287	700	5	235/235

## 6.-Resultados obtenidos de la parte experimental.

### 6.1 Etapa I-Calculo de transferencia de calor a partir de curvas experimentales por el método inverso en el proceso de temple.

En la Figura31 se muestran los resultados de la evolución térmica de la probeta nombrada A1, se utilizó un graficador de Eurotherm® con 30 canales disponibles para la obtención de datos, la variable de obtención de datos fue de 8 datos por segundo para cada termopar tipo “k”, en la Figura32 se muestra una imagen física del anillo probeta utilizado para la obtención de datos.

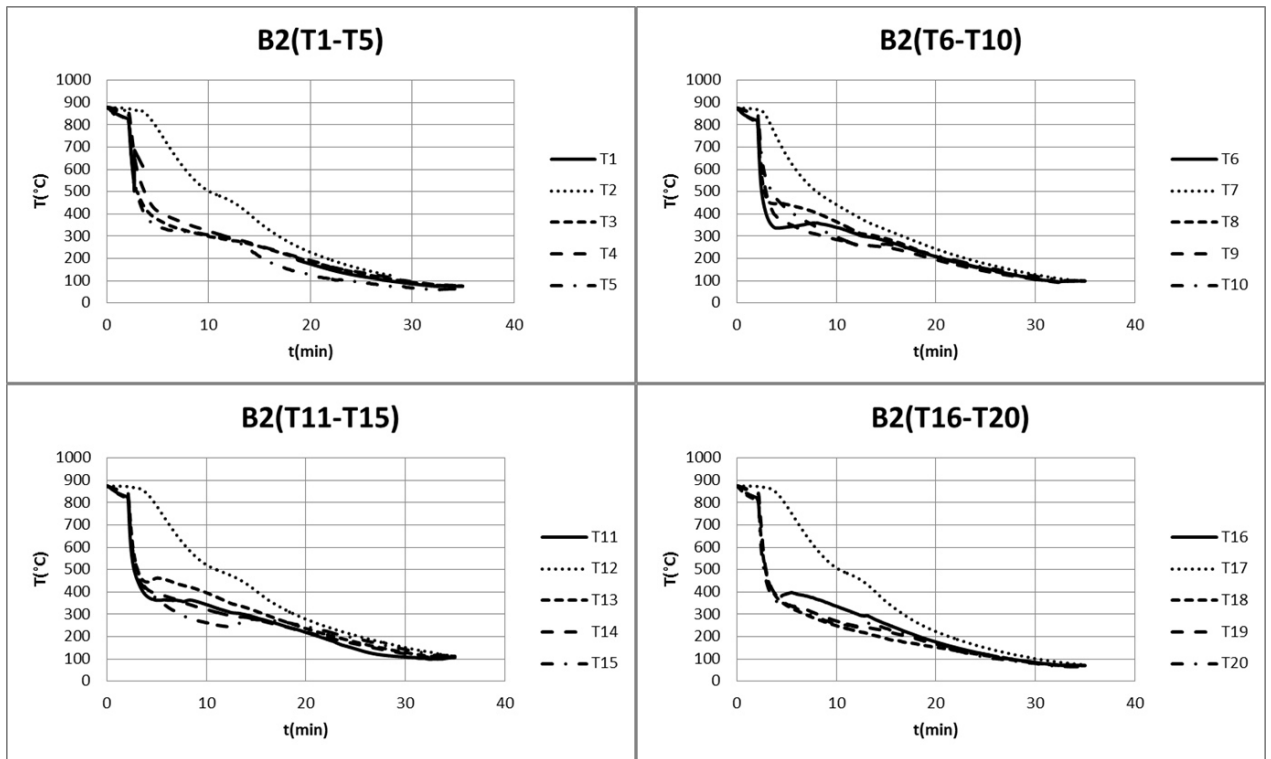


**Figura31.-** Se muestran las curvas de enfriamiento de la prueba nombrada A1, cada grupo de 5 curvas representa un lado del anillo que se muestra en la Figura32.



**Figura32.-** Dimensiones reales de la pieza denominada A1.

En la Figura33 se muestran los resultados de la evolución térmica de la prueba llamada B2, en la Figura34 se muestra una imagen física del anillo utilizado para la prueba denominada B2

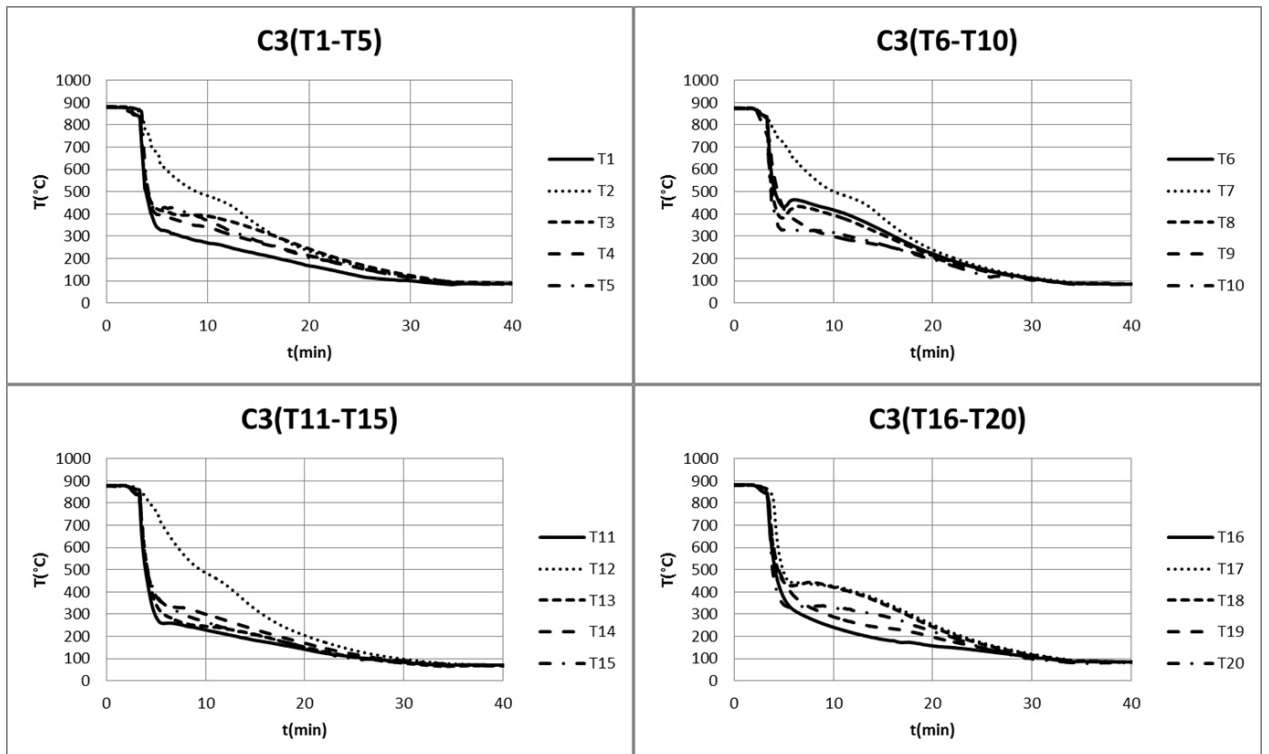


**Figura33.-** Se muestran las curvas de enfriamiento de la prueba nombrada B2, cada grupo de 5 curvas representa un lado del anillo, que se muestra en la Figura34.



**Figura34.-** Dimensiones reales de la pieza denominada B2.

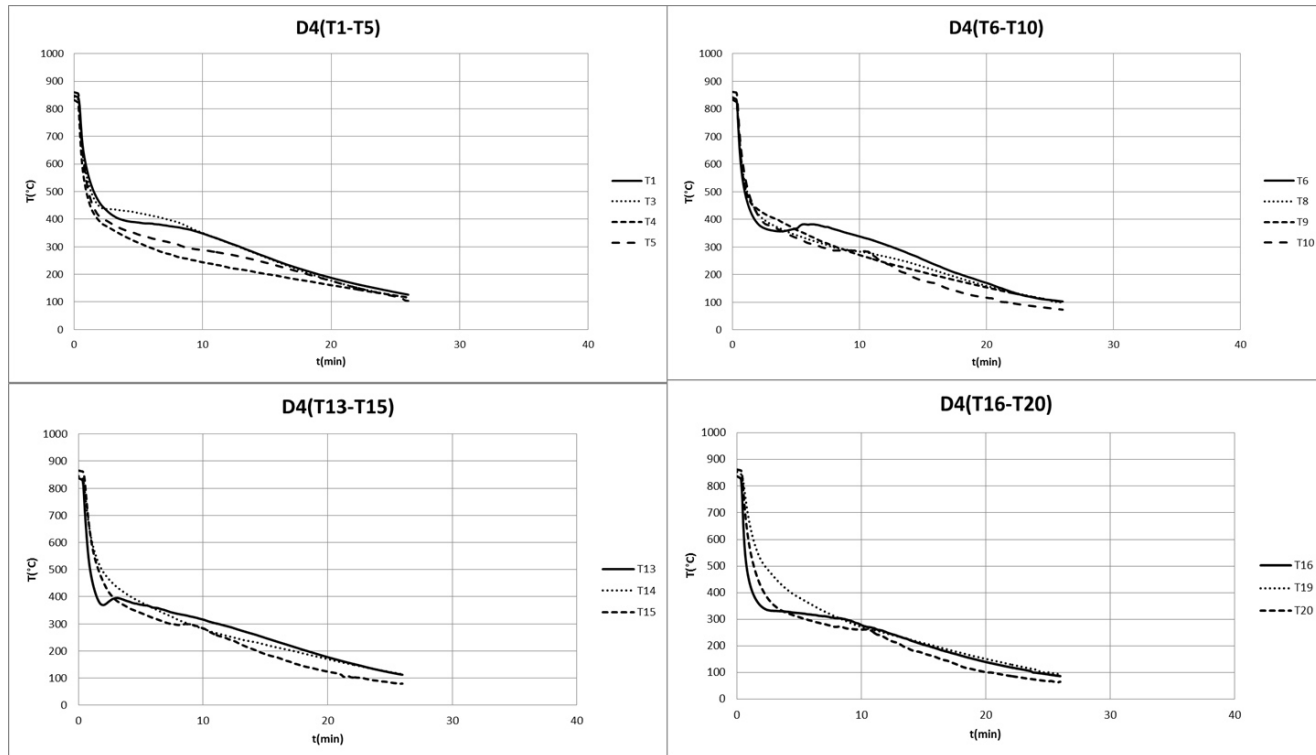
En la Figura35 se muestran los resultados de la prueba denominada C3.



**Figura35.-** Curvas de enfriamiento obtenidas de la prueba nombrada C3.

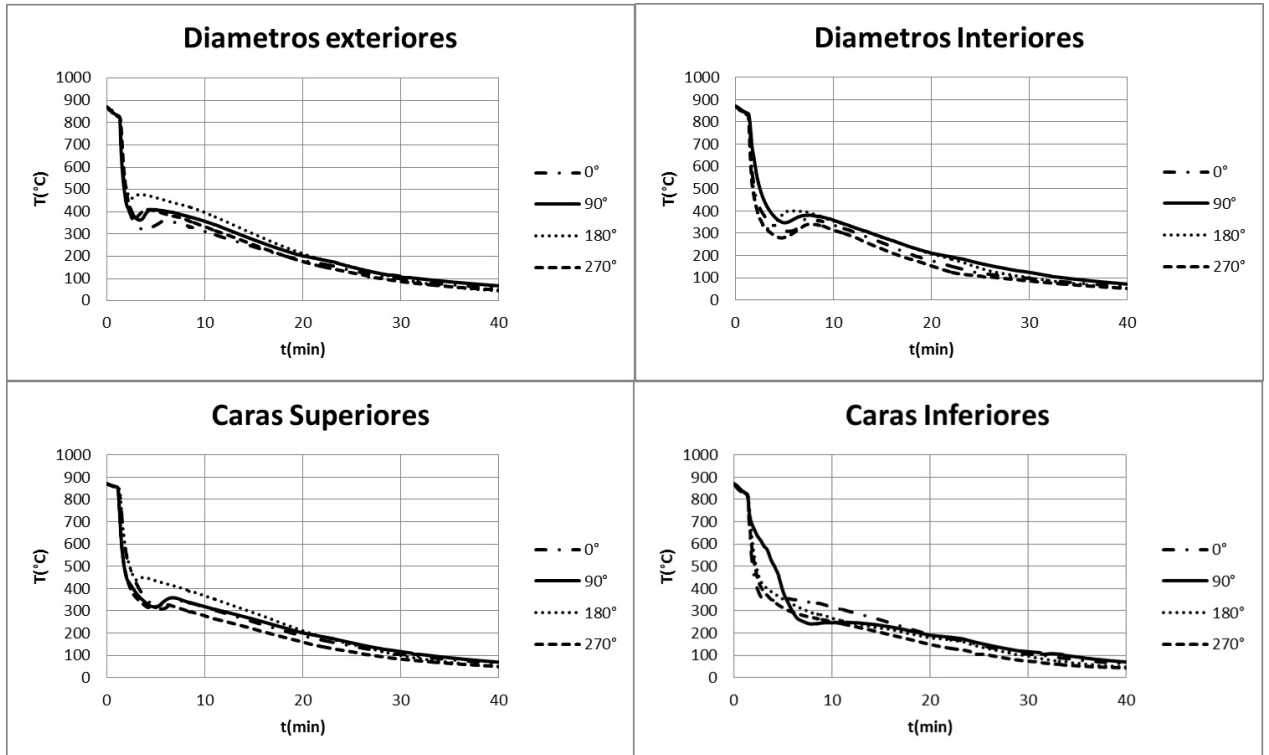
En la gráfica nombrada C3 (T16-T20) de la Figura35 aparentemente fallo el termopar que estuvo localizado en el centro de la pieza, esto debido al resultado anómalo de la curva de enfriamiento.

En la Figura36 se muestran los resultados de la evolución térmica de la prueba nombrada D4.



**Figura36.-** Curvas de enfriamiento de la prueba denominada D4 en las diferentes localizaciones en toda la pieza.

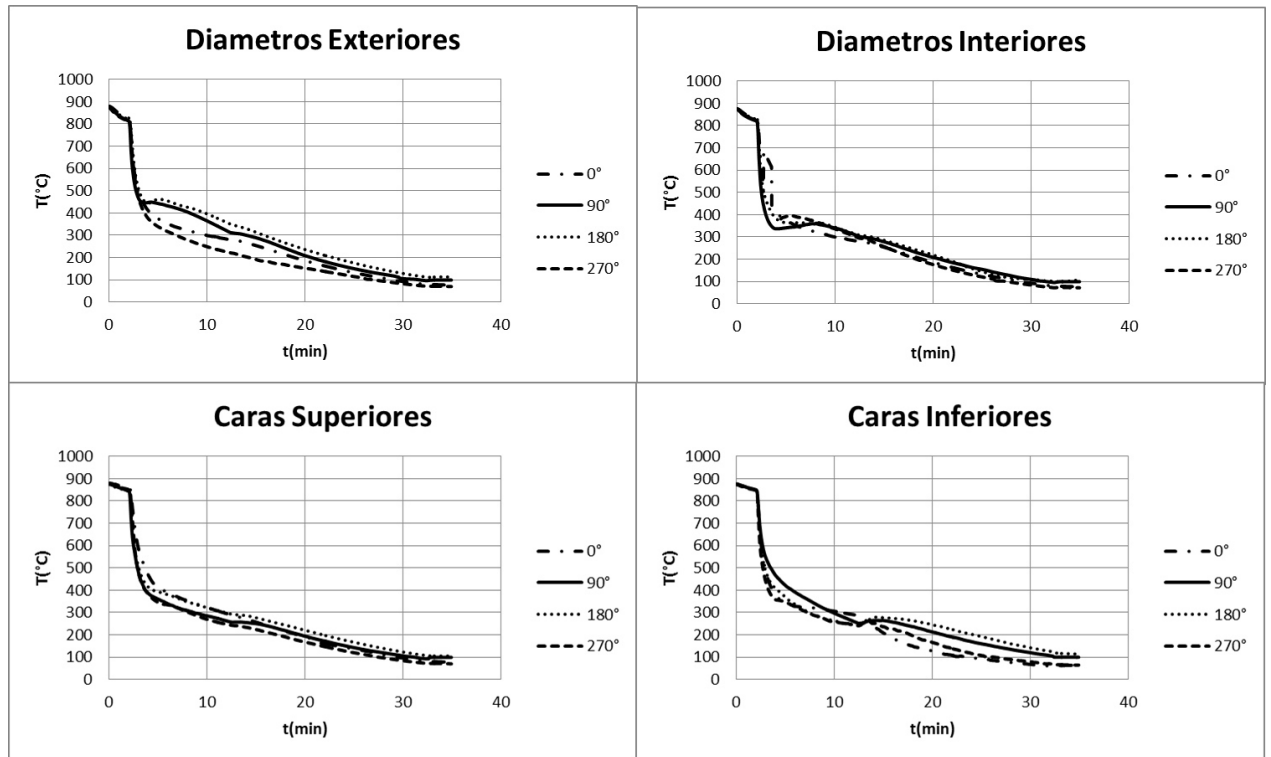
Posteriormente se analizaron los resultados individuales de los anillos para evaluar los diámetros exteriores, interiores, caras superior e inferior, para observar las diferencias que se encontraron en cada uno de los anillos. En las siguientes ilustraciones se presentan los resultados de las pruebas A1, B2, C3, y D4.



**Figura37.-** Curvas de enfriamiento referentes a las diferentes localizaciones de los termopares en la prueba A1, se muestran los comportamientos en diámetro exterior e interior y caras superior e inferior.

El análisis de las curvas obtenidas se realizó para obtener un mejor entendimiento de cómo se enfrió cada una de las piezas, mostrando diferencias en sus velocidades, e incluso errores de medición en la curva de 90° en cara inferior, lo cual es una característica del fenómeno de distorsión.

En la Figura38 se muestran los resultados de la prueba B2, los cuales fueron utilizados para obtener las estimaciones del coeficiente de transferencia de calor  $h$ , para utilizarlos como una de las condiciones de frontera en el paquete comercial computacional FORGE®, y posteriormente modelar el fenómeno de distorsión.

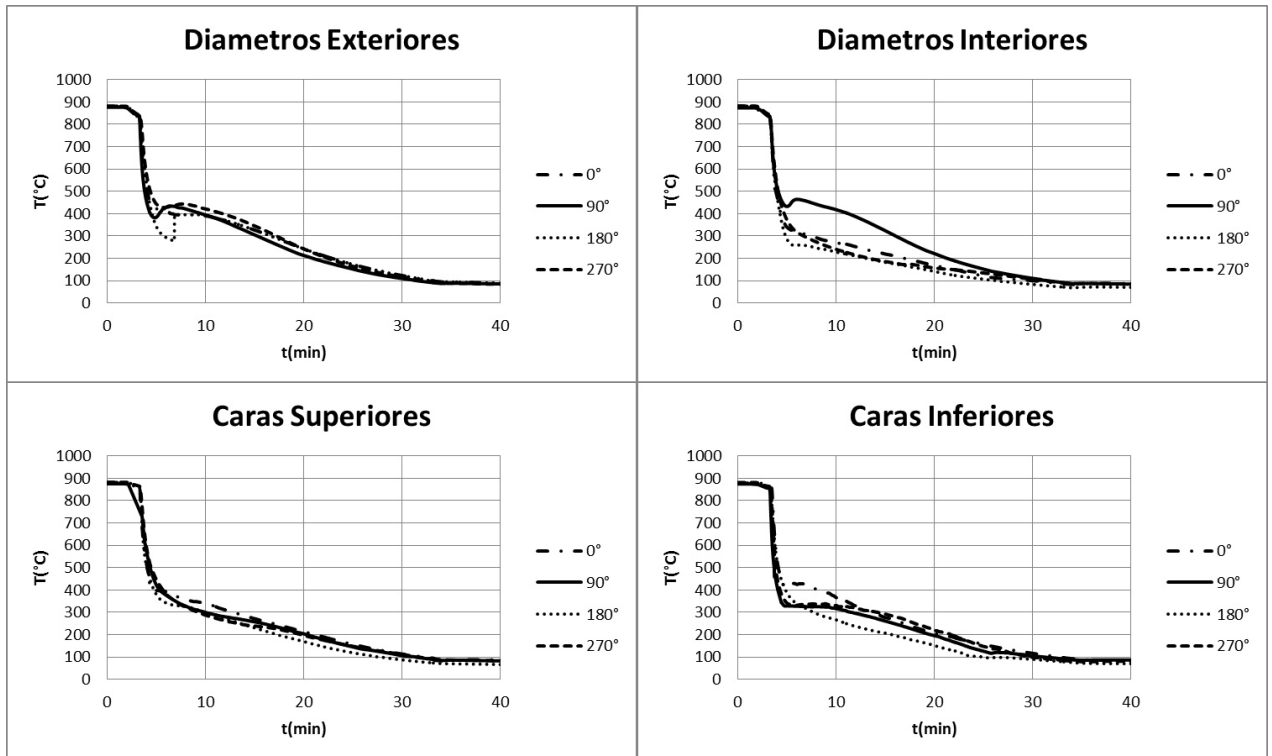


**Figura38.-** se muestran los resultados referentes a la prueba B2, comportamientos en diámetro exterior e interior y caras superior e inferior.

En los resultados referentes a la prueba B2, podemos observar que el enfriamiento en la cara superior y diámetro interior se comportaron un poco más homogéneos comparado con el diámetro exterior y caras inferiores, lo cual es un indicador importante de la heterogeneidad con la que se templó este anillo.



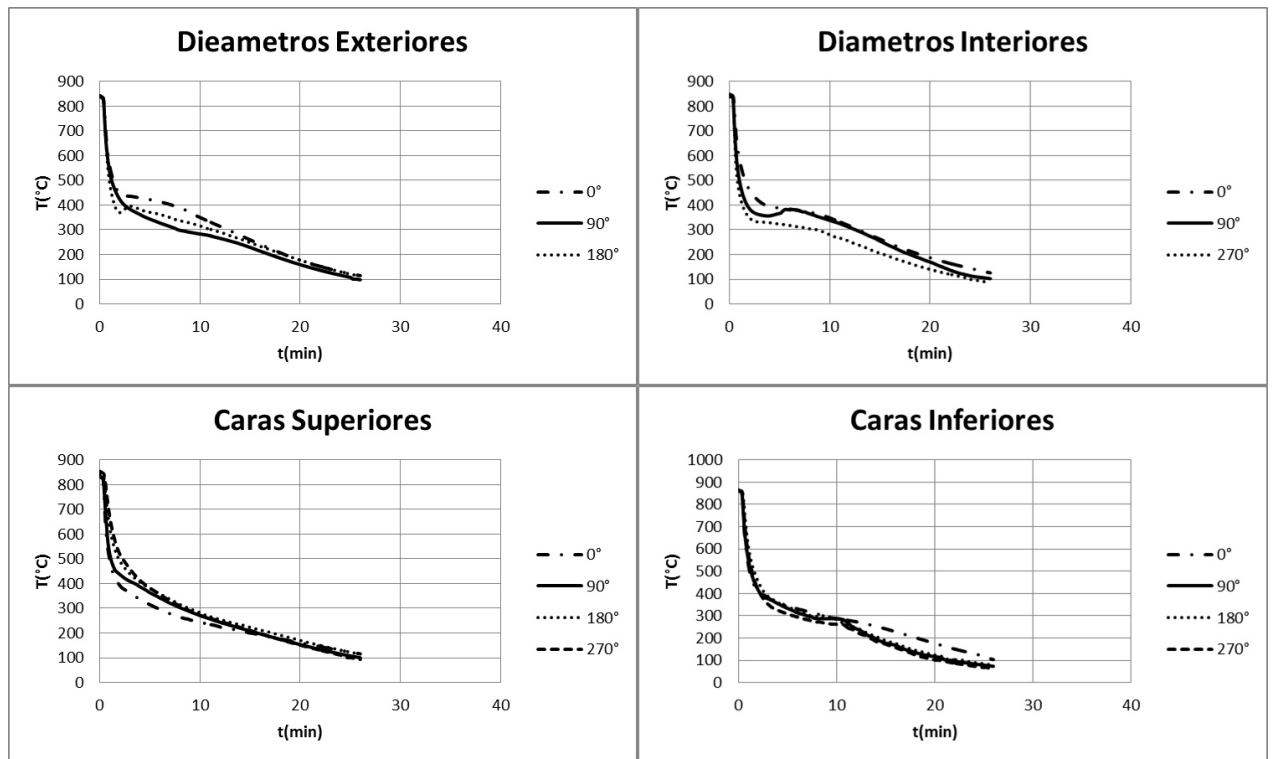
En la Figura39 se muestran los resultados de la prueba C3, analizando los enfriamientos en diámetros interior y exterior, así como en caras superior e inferior.



**Figura39.-** Se muestran los resultados referentes a la prueba C3, comportamientos en diámetro exterior e interior y caras superior e inferior.

En esta prueba se puede observar que el comportamiento en la cara superior es más homogéneo comparado con la cara inferior, diámetro exterior e interior. En los comportamientos de los diámetros exterior e interior podemos observar cambios de pendiente muy pronunciados en 90° y 180° para exterior, y 90° para interior.

En la Figura40 se muestran los resultados de la prueba D4, en esta prueba se presentaron una serie de problemas al momento de realizar la prueba por lo que no se pudieron registrar los comportamientos de algunos termopares.

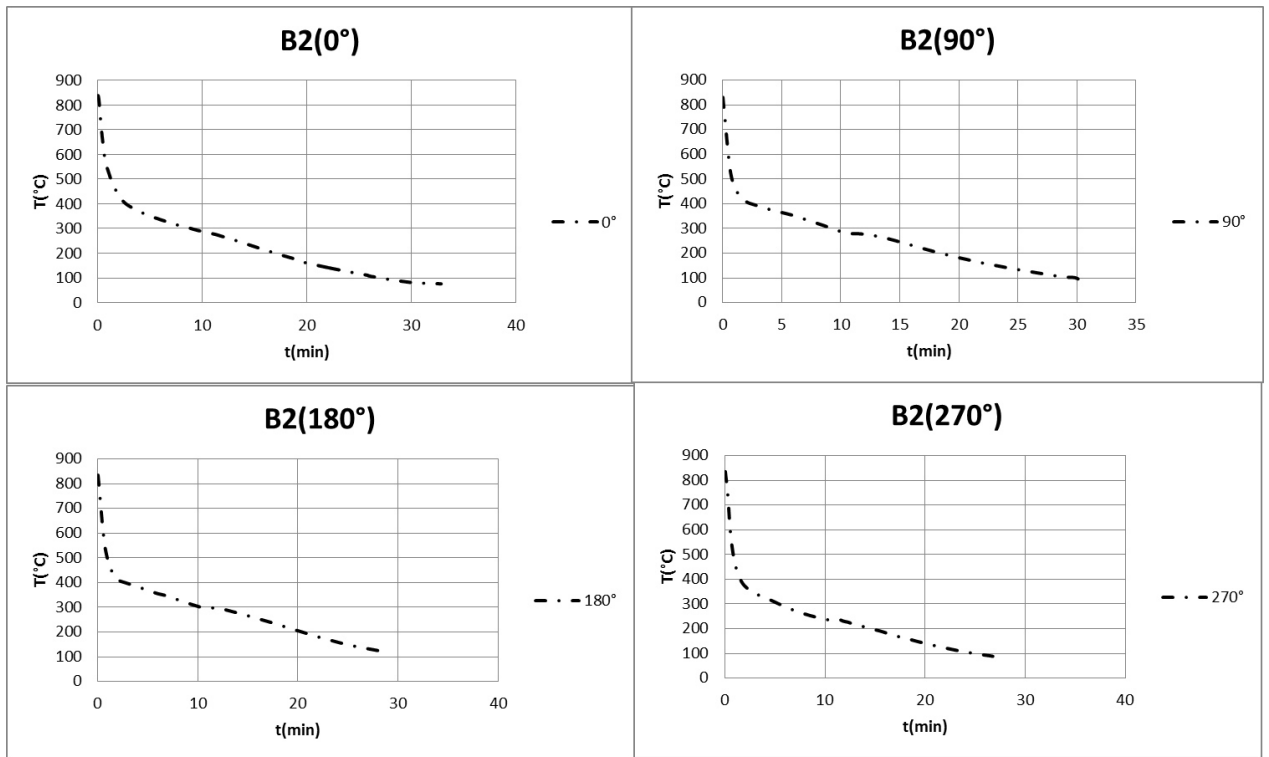


**Figura40.-** Se muestran los resultados referentes a la prueba D4, comportamientos en diámetro exterior e interior y caras superior e inferior.

En esta prueba a pesar de que no se registró la mayoría de los datos de todos los termopares, en los resultados podemos observar que lo enfriamientos en caras son muy similares, comparados con los diámetros.

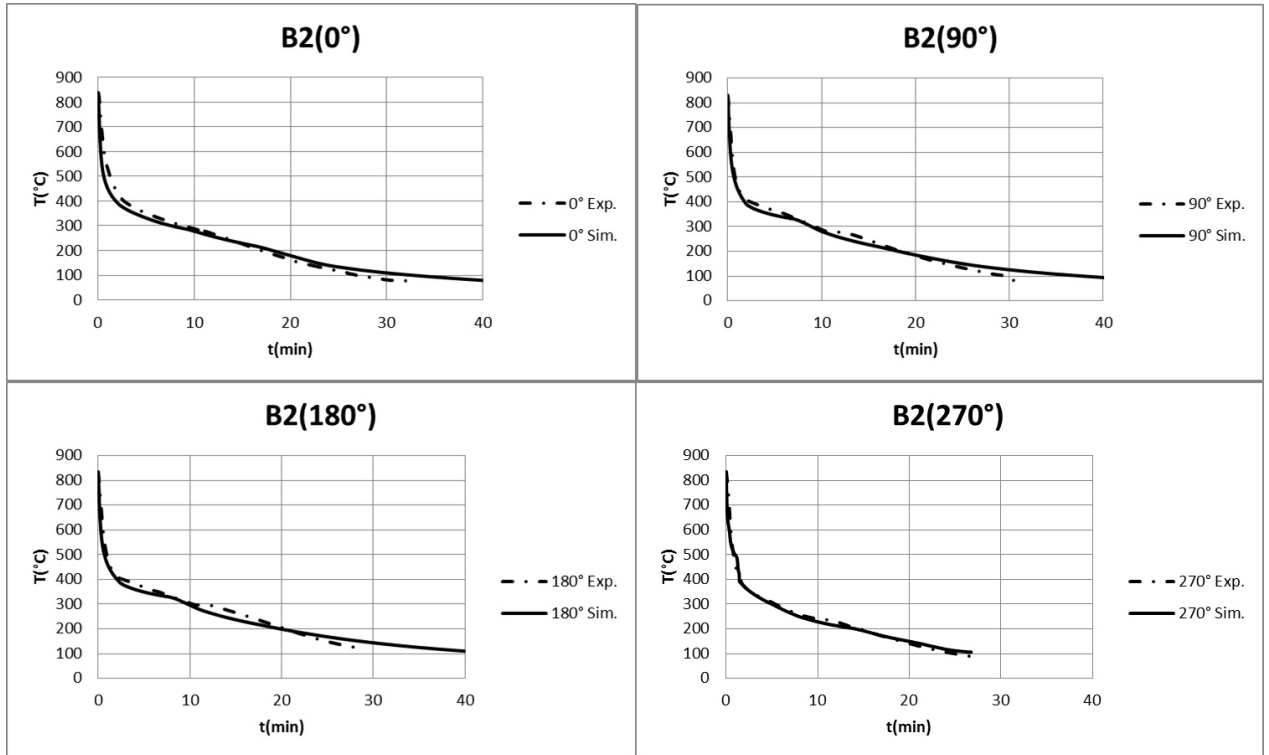
El siguiente paso fue utilizar los datos experimentales de la prueba B2 y realizar análisis inverso (47) para la estimación de los coeficientes de transferencia de calor  $h$ , para posteriormente utilizarlos como condición de frontera dentro del paquete comercial computacional y así modelar la distorsión de los anillos, así como validar los resultados de  $h$  con los perfiles de dureza obtenidos de la parte experimental vs simulación en condición de temple.

Para realizar el análisis de distorsión solo se tomaron los resultados de las curvas cercanas a las superficies del anillo para evaluar un promedio de la transferencia de calor, las cuales fueron utilizadas para el análisis inverso dentro del paquete comercial computacional, en la Figura41 se muestran los promedios de las curvas en sus respectivas localizaciones 0, 90, 180 y 270°.



**Figura41.-** Se muestran los promedios de las curvas obtenidas experimentalmente por zonas del anillo B2, tomando en consideración solo los datos de los termopares cercanos a la superficie.

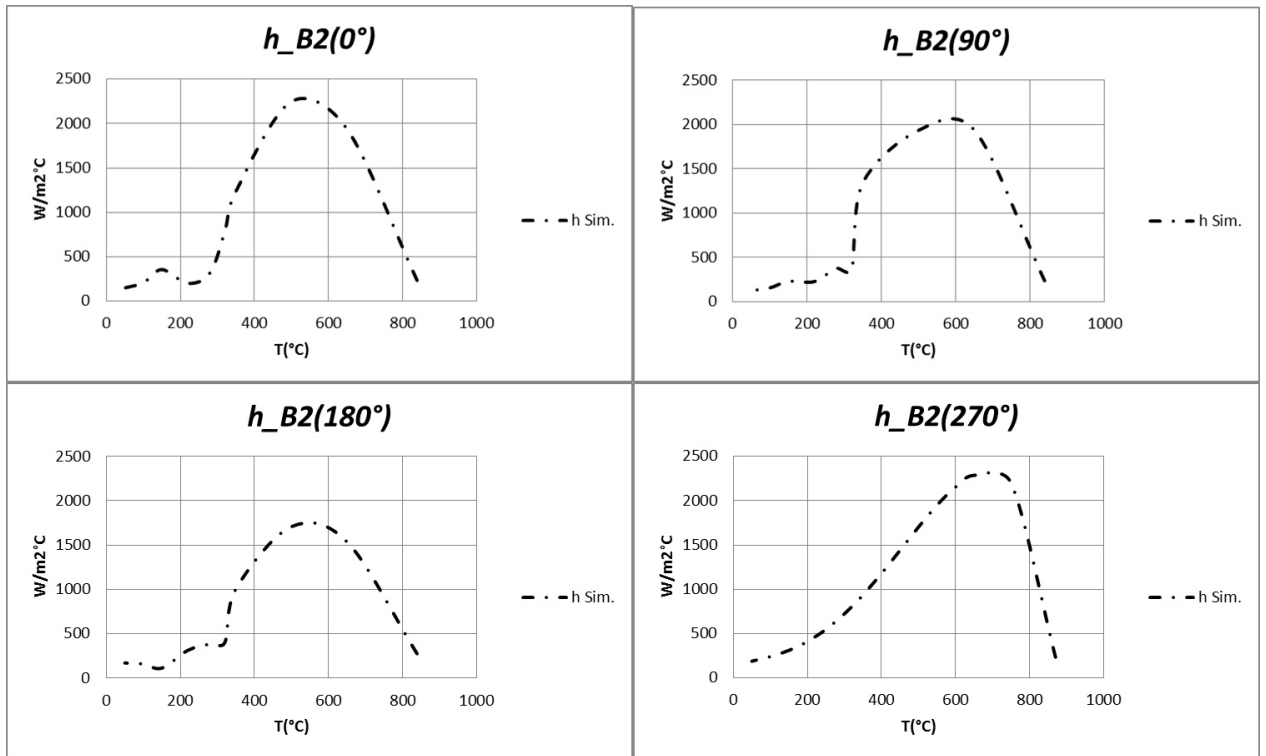
En la Figura42 se muestra los resultados del análisis inverso, el cual consiste en alimentar la curva de enfriamiento y “suponer” valores de coeficiente de transferencia de calor  $h$ , el sistema comienza la iteración y minimiza el error entre la medición experimental y simulación, dando como resultado valores de  $h$ . (31)



**Figura42.-** Se muestran los resultados obtenidos de la simulación de procesos comparados con los resultados obtenidos del experimento para cada promedio de las diferentes zonas donde fue instrumentado este anillo, *línea sólida (simulación), línea semi-sólida (experimental)*, los resultados muestran buena correlación. (32)

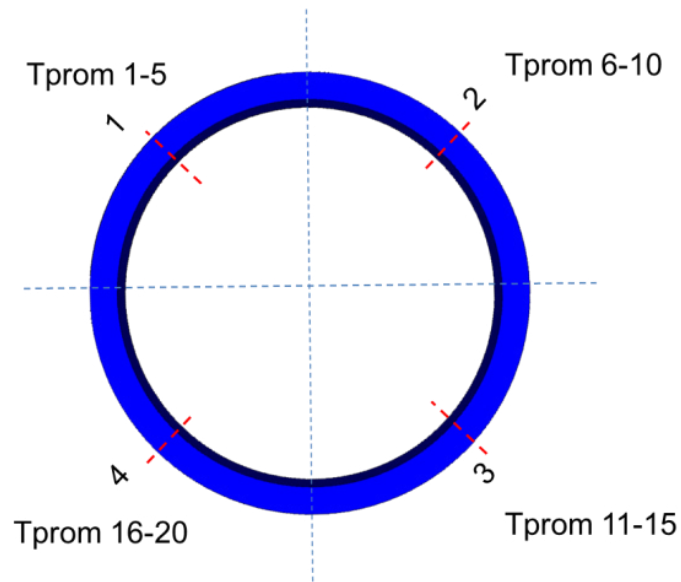
Posteriormente de la prueba experimental, se realizaron indentaciones en la superficie para determinar los perfiles de dureza localizados a 0, 90, 180 y 270 °C., así como la obtención de un corte en la sección transversal en condición de temple para determinar la distribución de durezas, para validarlas con los perfiles de dureza obtenidos de la simulación de procesos.

En la Figura43 se muestran los resultados obtenidos de  $h$  en las aproximaciones, utilizando los promedios de las curvas de la prueba B2.



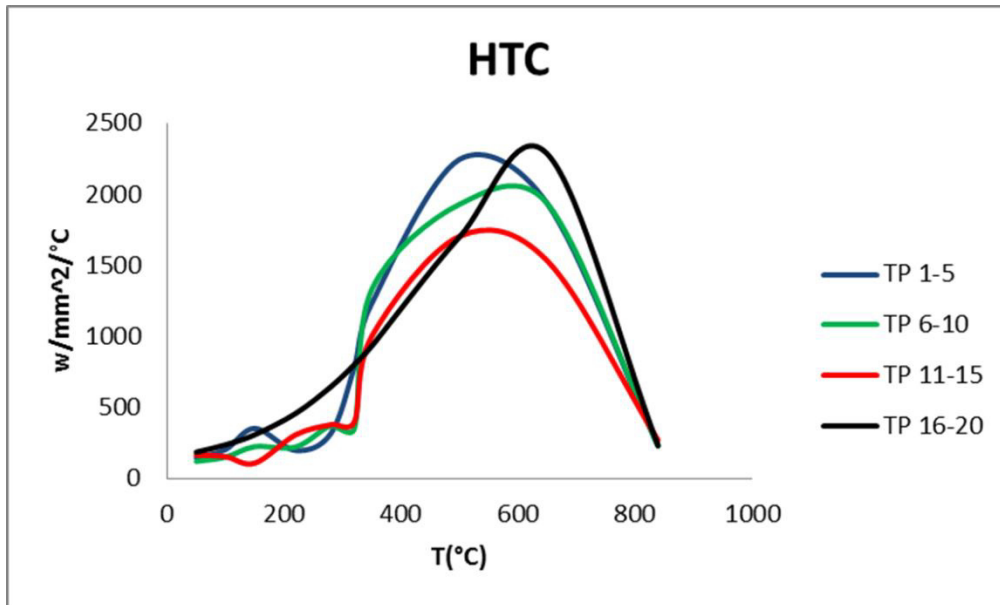
**Figura43.-** Obtención de los coeficientes de transferencia de calor ( $h$ ) en función de la temperatura, estos resultados se utilizaron como condición frontera para la predicción de la distorsión en el anillo, así como para la obtención de las durezas en condición de temple (34).

En la Figura44 se detalla cómo fueron utilizados los resultados de  $h$  obtenidos de la simulación del proceso, esto con la finalidad de someter nuestra pieza virtual a diferentes condiciones de enfriamiento para lograr reproducir el fenómeno de distorsión.



**Figura44.-** Se muestra como fueron utilizados los coeficientes  $h's$  en la pieza, Tprom 1-5 hace referencia a la curva que está ubicada a  $0^\circ$ , Tprom 6-10 hace referencia a la curva que está ubicada a  $90^\circ$ , Tprom 11-15 hace referencia a la curva que está ubicada a  $180^\circ$ , Tprom 16-20 hace referencia a la curva que está ubicada a  $270^\circ$ .

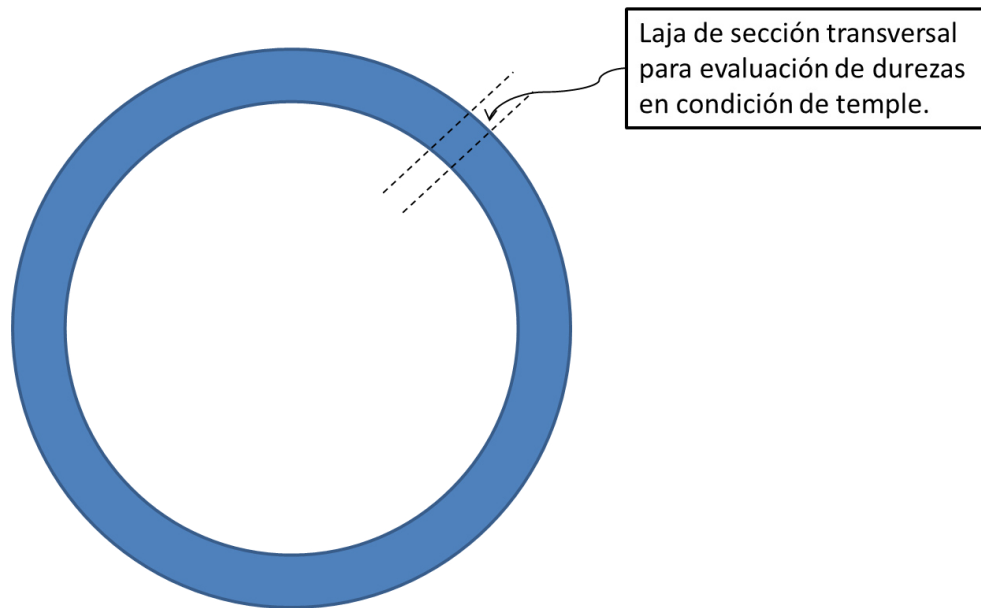
En la Figura45 se observa que la extracción de calor es muy similar en tres zonas, sobresaliendo las sección 4 con un resultado de  $h=2257W/m^2k$  a los  $685^{\circ}C$ , mayor comparado con el resto de las secciones analizadas, con  $h$ 's de 1600, 1950 y 2000  $W/m^2k$  y temperaturas de 575, 605 y 505  $^{\circ}C$  se atribuye que debido a este fenómeno se presenta la distorsión de la pieza (33), ya que la transformación de fase es más rápida en la zona 4, comparada con la zona 1,2 y 3 (35).



**Figura45.-** Superposición de las curvas de HTC obtenidas como resultado del análisis inverso.

El anillo rolado utilizado para la validación experimental y simulación fue cortado en condición de temple para evaluar las durezas en esta condición, debido a esto se procedió a realizar el mapeo de durezas en una de las secciones transversales para validar los resultados de la simulación.

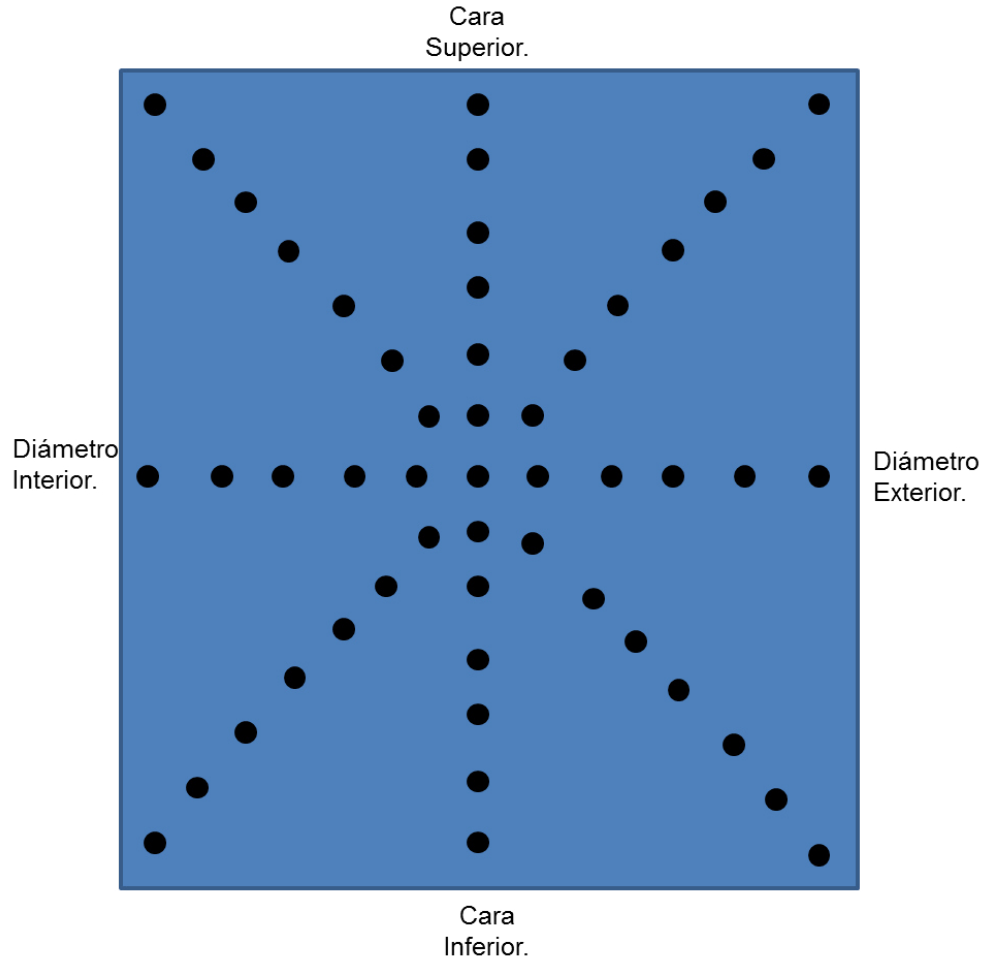
En la Figura46 se muestra de donde se extrajo la laja para realizar el mapeo de durezas.



**Figura46.-** Esquema de la localización donde se extrajo la laja después de aplicar el tratamiento térmico de temple, para su evaluación de dureza.

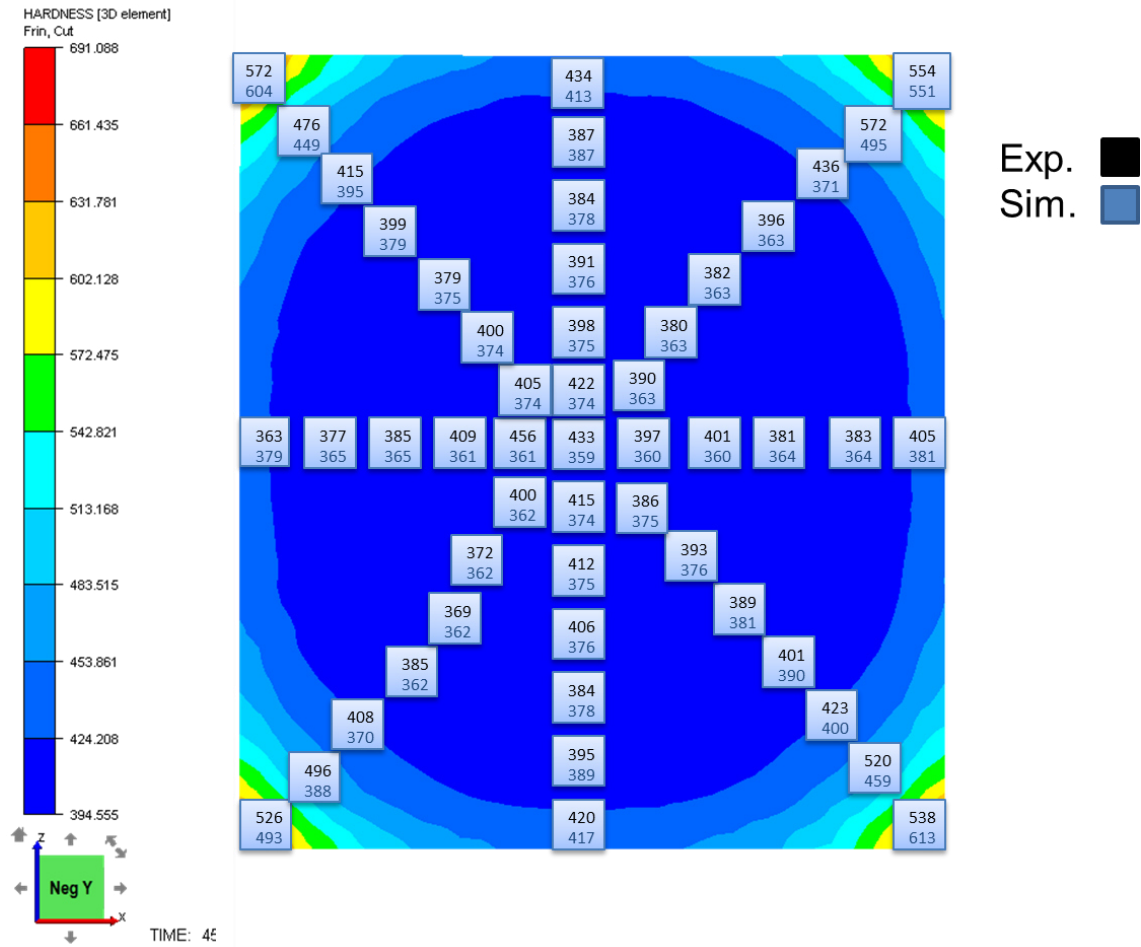
El proceso de análisis de dureza Brinell en la sección transversal del anillo rolado se llevó a cabo en un durómetro de banco con 3000 Kg, se evaluaron perfiles de dureza desde el diámetro interior hacía en diámetro exterior, y de la cara superior hacia la cara inferior, estos valores obtenidos experimentalmente se compararon con los datos obtenidos de los resultados de la simulación del proceso de tratamiento térmico de temple. La metodología para la evaluación del perfil de durezas en sección transversal se muestra en la Figura47, donde el objetivo particular de este procedimiento fue tratar de evaluar toda la sección transversal, las distancias de las indentaciones fueron de 1" aproximadamente.





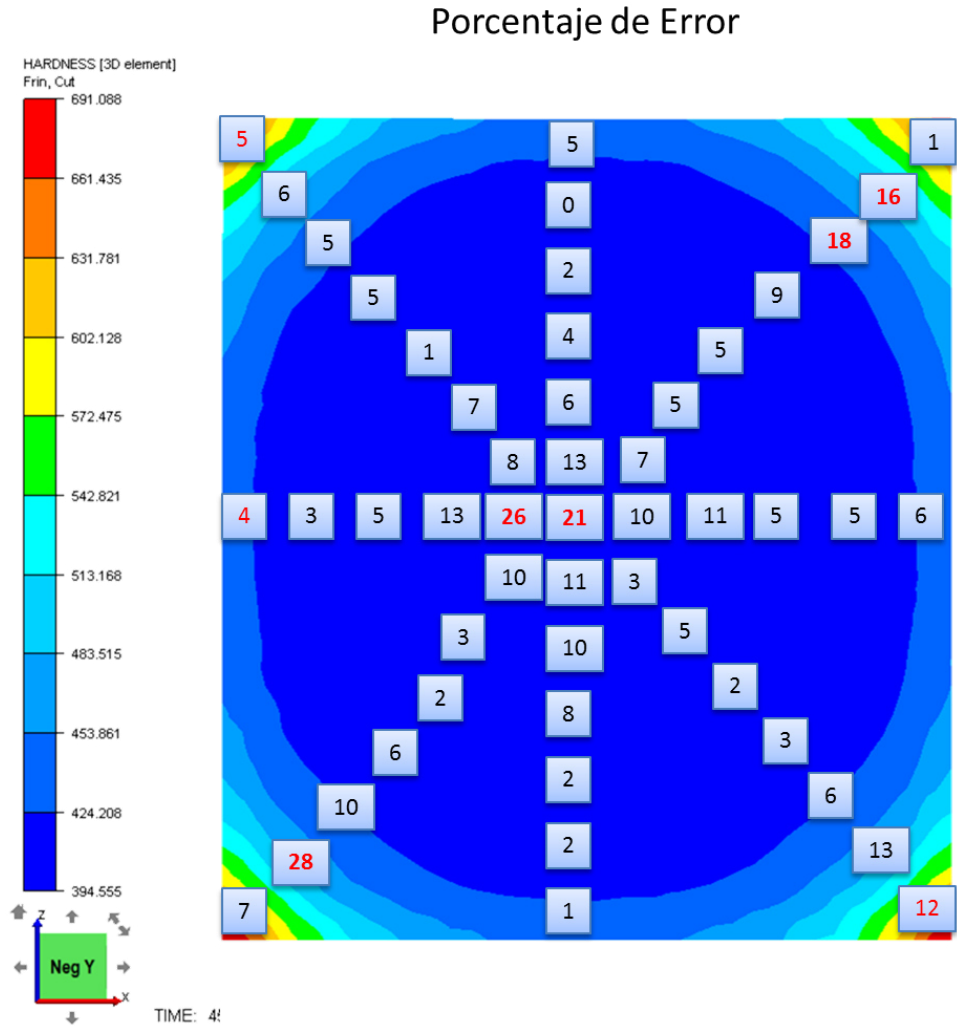
**Figura47.-** Metodología empleada para realizar las indentaciones de dureza en sección transversal de anillo, posteriormente estos datos se compararon con los obtenidos de la simulación de procesos.

A continuación se muestran los resultados de la comparación entre los resultados experimentales vs resultados de la simulación en sección transversal en la Figura48, los valores con color negro corresponden a los resultados experimentales, mientras que los resultados de la simulación corresponden a los valores con color azul (36).los resultados muestran buena correlación al comparar la parte experimental con la parte virtual, esto resalta la buena predicción que se tiene al utilizar diagramas de transformación TTT (37).



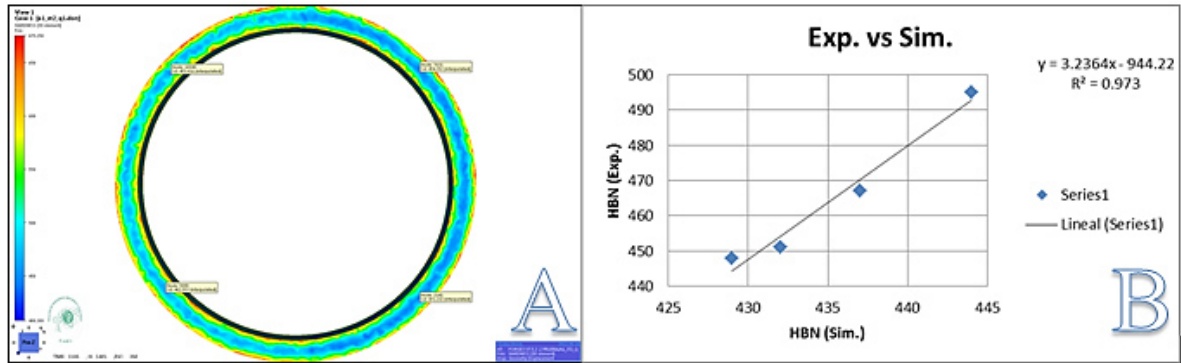
**Figura48.-** Resultados de la comparación entre valores experimentales vs valores de la simulación del proceso, los datos en color negro corresponden a los datos experimentales, los datos con color azul corresponden a los valores de la simulación del proceso.

En la Figura49 se muestran los resultados calculados en porcentaje de error para verificar la aproximación de la modelación de tratamientos térmicos vs simulación matemática, los datos en color rojo son resultados que no son válidos para la comparación debido a que exceden el 15%.



**Figura49.-** Resultados en porcentaje de error, los datos en rojo representan valores muy por encima entre lo experimental vs simulación, y estos exceden el 15% de error tolerable.

En la Figura50 se muestran los resultados obtenidos de la simulación de procesos (Figura50A), validando la dureza superficial experimental y simulación (Figura50B), así como el porcentaje del coeficiente de correlación (0.973), el cual es un resultado confiable similar al que obtuvo Samad Taghizadeh (38) en su experimento de predicción de dureza utilizando redes neuronales artificiales en un acero 1045 templado en agua.



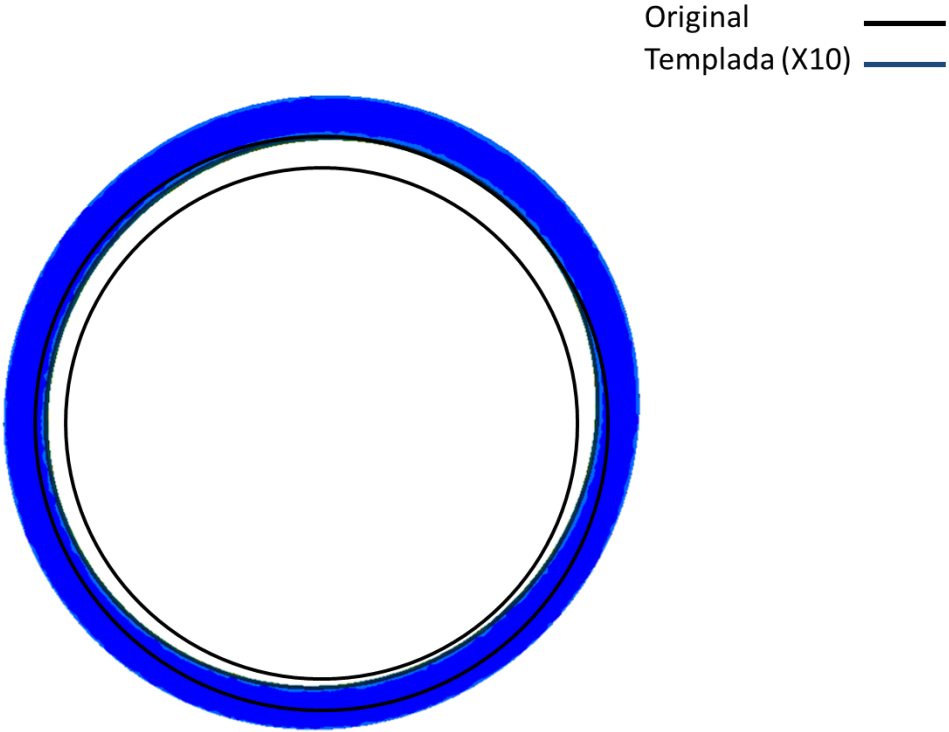
**Figura50.-** Resultados obtenidos de la simulación de procesos utilizando los coeficientes  $h$  dentro de FORGE®, y aproximación de la validación de los resultados experimentales vs simulación aproximándose a la linealidad, con una  $R^2 = 0.97$ .

En la Tabla 5 se muestran el porcentaje de error calculado a partir de los resultados obtenidos en mediciones experimentales y los resultados de la simulación, obteniendo un porcentaje mínimo de 4.2, y un porcentaje máximo de 10.3, lo cual clasifica estos resultados como confiables.

Tabla 5.- Resultados de dureza superficial de la prueba B2, la escala utilizada es Brinell.

Exp.	495	467	448	451
Sim.	444	437	429	432
% Error	10.3	6.4	4.2	4.2

De acuerdo con los resultados obtenidos se observa que la distorsión en el diámetro exterior a  $90^\circ$ , es más pronunciada comparada con el resto de la geometría virtual, debido a que en esta zona se registró la velocidad de enfriamiento más rápida, conllevando a la generación de esfuerzos residuales y una deformación plástica más severa. En cambio la distorsión (39) en el diámetro interior es muy similar, con estos resultados se puede aproximar bien la distorsión (40). Debido a que la distorsión virtual que se presenta como resultado es pequeña comparada con las dimensiones geométricas de la pieza, se amplificó la imagen para poder visualizar el ovalamiento de la pieza, el cual se observa en la Figura51.



**Figura51.-** Comparación entre la geometría original a temperatura ambiente y la geometría después de templarla(X10.)

## 6.2 Etapa II-Predicción y verificación de perfiles de dureza después del proceso de revenido para el acero 42CrMo4.

En la Tabla 6 se muestran los resultados de propiedades mecánicas obtenidos del diseño de experimentos, en las direcciones longitudinal y transversal en la distancia de T/4.

**Tabla 6.-** Resultados obtenidos de propiedades mecánicas en la localización de T/4 en todas las direcciones longitudinal y transversal de las probetas.

Tiempo (Hrs)	Temperatura (°C)	Cedencia L (Psi)	Cedencia T (Psi)	Tension L (Psi)	Tension T (Psi)
2	550	180203	180946	199607	197642
10	550	175937	157800	189877	170200
2	650	137478	139606	153081	158084
10	650	119623	159100	133297	171500
0.3431	600	205893	217191	219234	235051
11.6569	600	134311	143000	147268	157200
6	529	180404	184110	193480	196541
6	670	108900	108000	124900	126800
6	600	158899	155400	172362	168900
6	600	154875	152100	170823	167200
6	600	158772	152000	171694	165700
6	600	150719	154000	166401	166500
6	600	162640	158100	173920	171800
Dureza L (HB)	Dureza T (HB)	Impactos T (-29°C_ Lb/Ft)	Impactos L (-29°C_ Lb/Ft)		
355	370	11	15		
358	334	9	15		
302	298	20	37		
317	281	43	49		
293	399	6	13		
259	233	21	37		
362	355	8	15		
271	221	33	63		
331	336	15	26		
310	336	11	16		
319	327	17	23		
327	336	17	34		
336	341	15	23		

Los resultados de la tabla 6 se validaron con los valores de dureza obtenidos de la simulación, los cuales se muestran las siguientes Figuras:

Figura52, Figura53, Figura54, Figura55, Figura56, Figura57, Figura58, Figura59, Figura60.

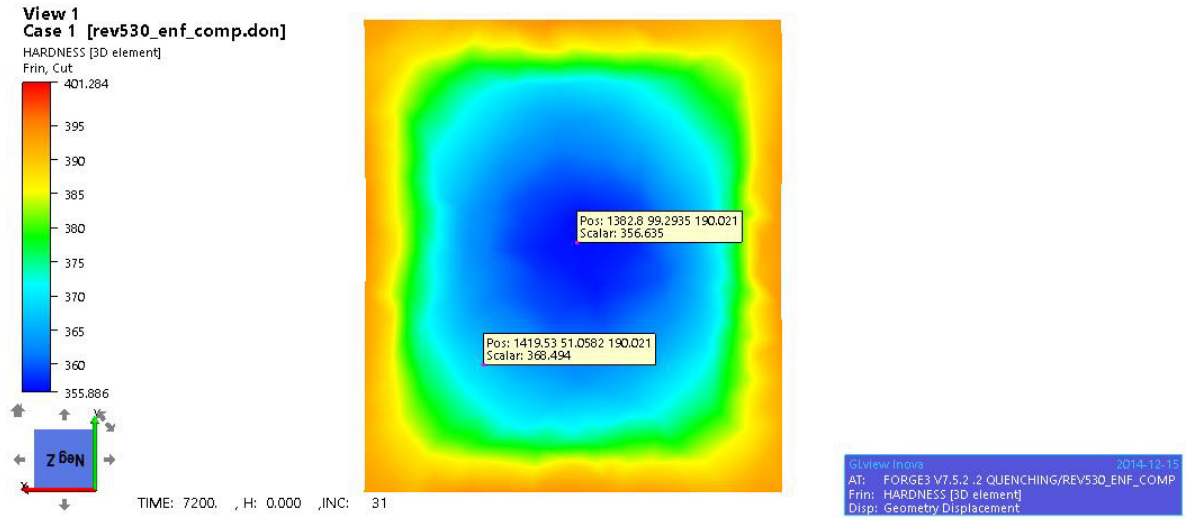


Figura52.- Resultados de dureza a una  $T = 530^{\circ}\text{C}/6$  horas.

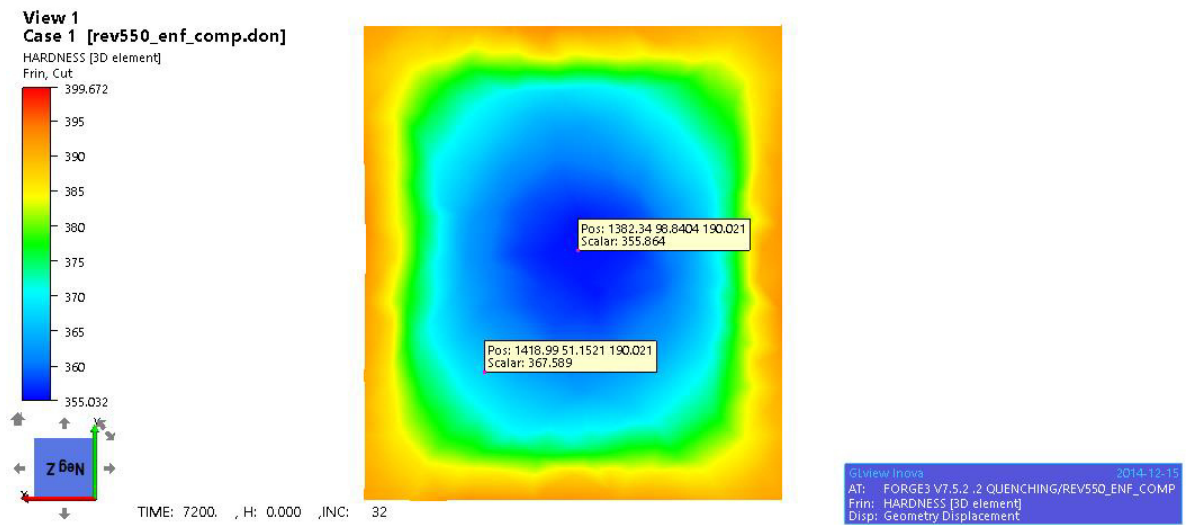


Figura53.- Resultados de dureza a una  $T = 550^{\circ}\text{C}/2$  horas.

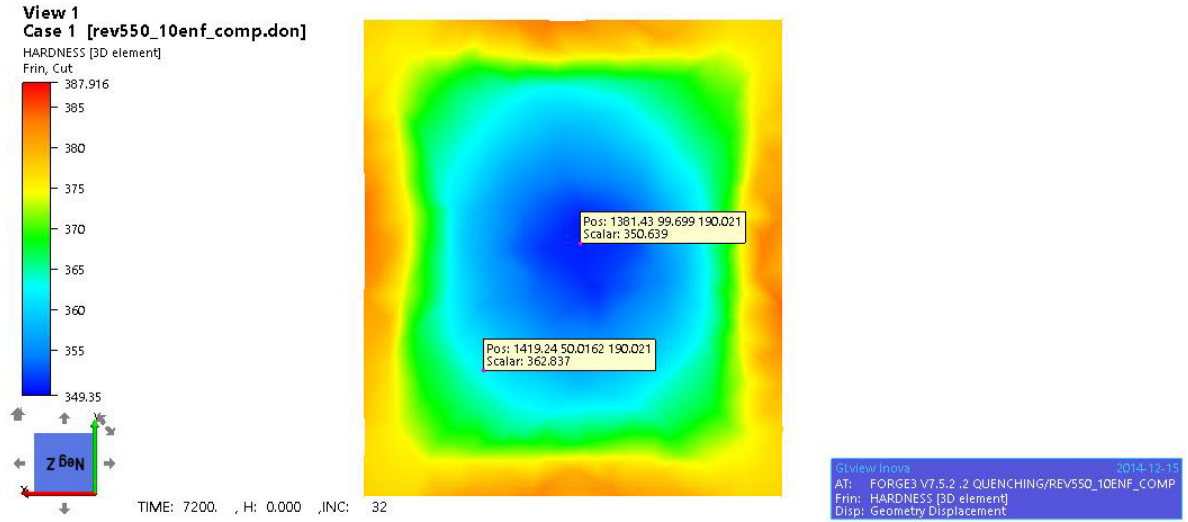


Figura54.- Resultados de dureza a una  $T = 550^{\circ}\text{C}/10$  horas.

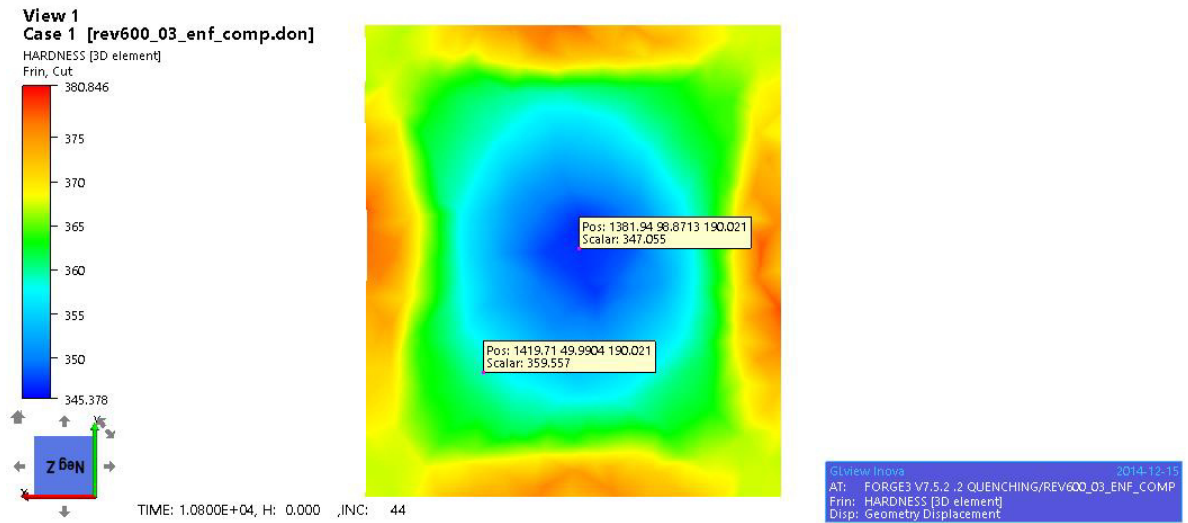


Figura55.- Resultados de dureza a una  $T = 600^{\circ}\text{C}/0.03$  horas.



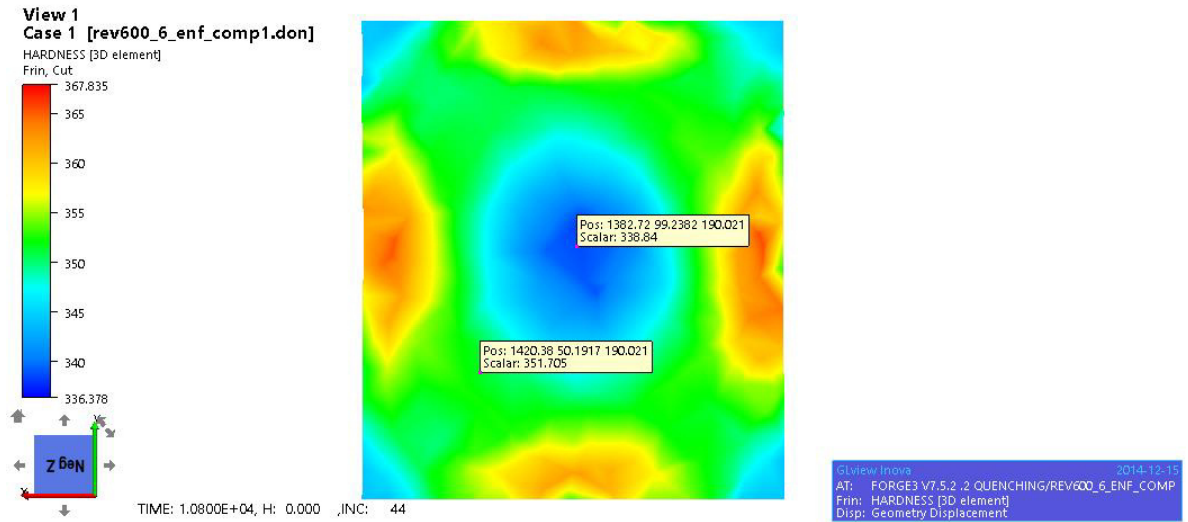


Figura56.- Resultados de dureza a una  $T = 600^{\circ}\text{C}/6$  horas.

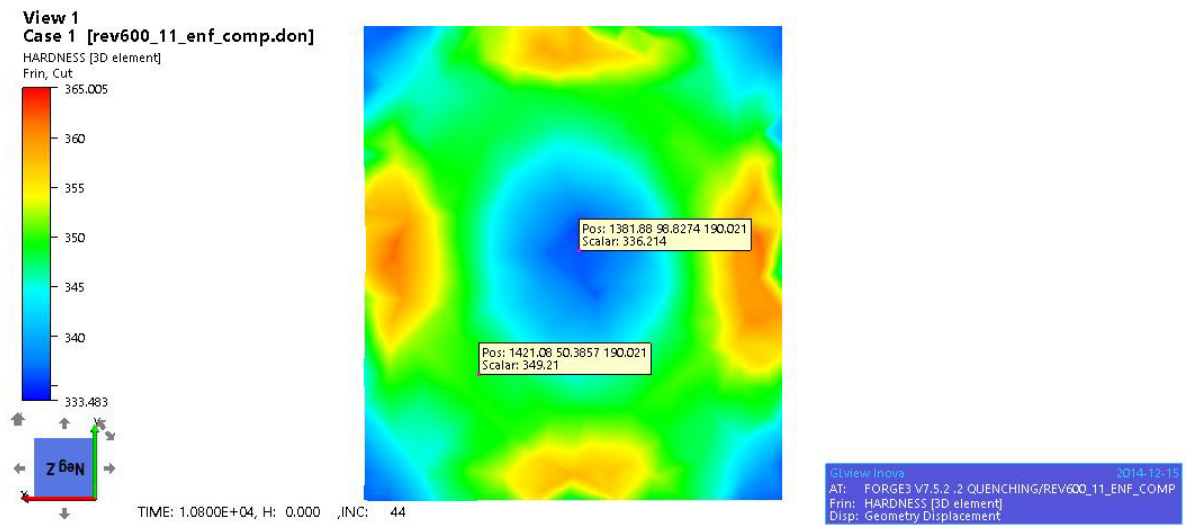


Figura57.- Resultados de dureza a una  $T = 600^{\circ}\text{C}/11$  horas.

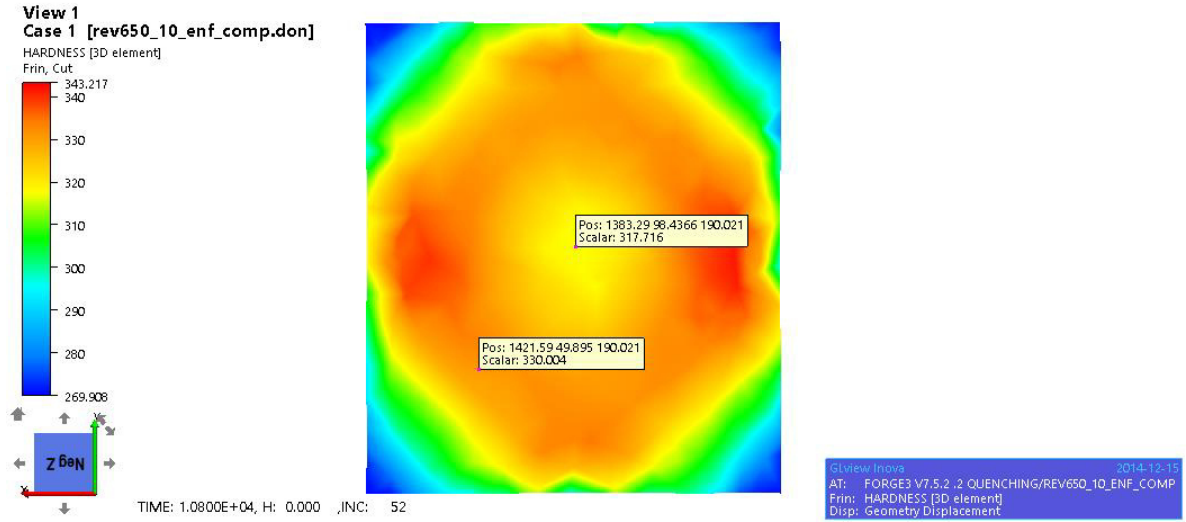


Figura58.- Resultados de dureza a una  $T = 650^{\circ}\text{C}/10$  hrs.

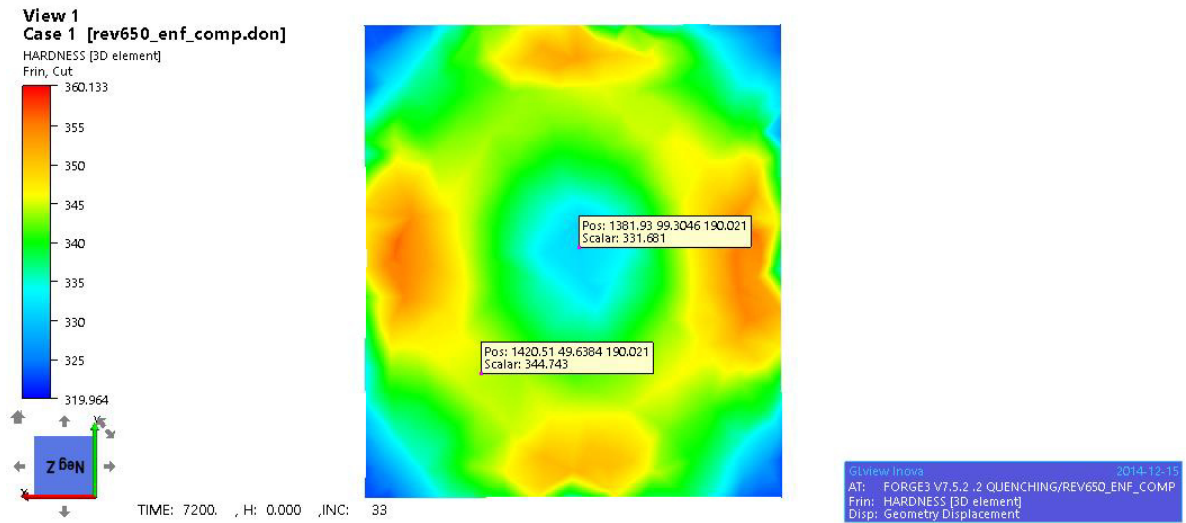
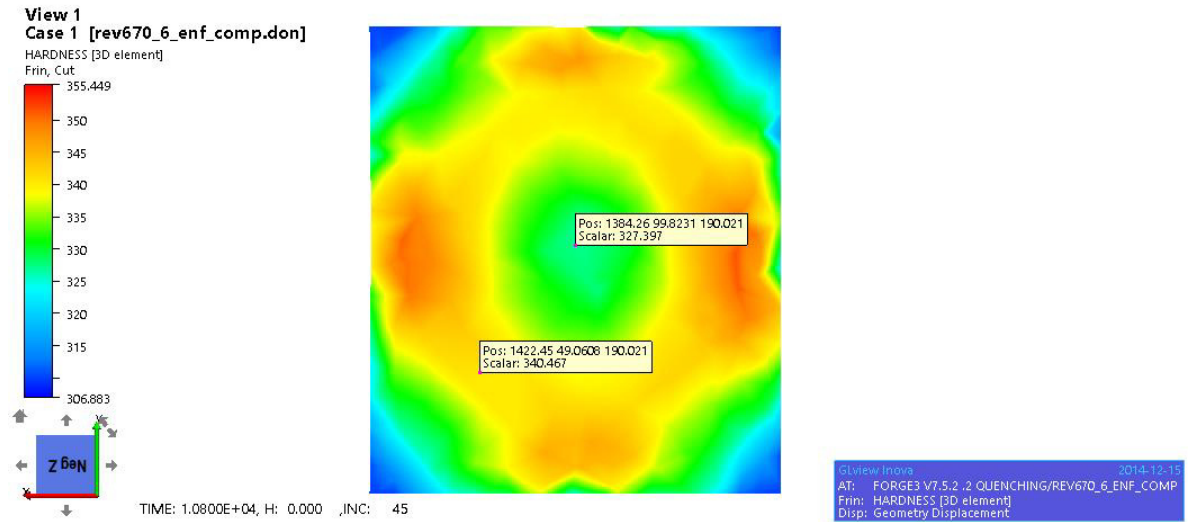


Figura59.- Resultados de dureza a una  $T = 650^{\circ}\text{C}/2$  horas.



**Figura60.-** Resultados de dureza a una  $T = 670^{\circ}\text{C}/6$  horas.

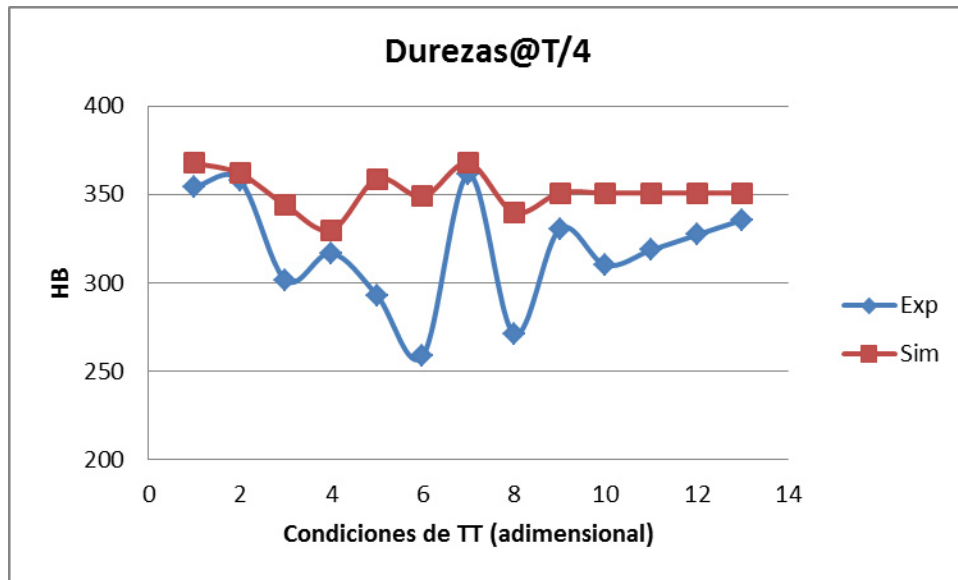
En la Tabla 7 se muestran los resultados de propiedades mecánicas obtenidos del diseño de experimentos, en las direcciones longitudinal y transversal en la distancia de  $T/2$ , estos resultados fueron utilizados para llevar a cabo la validación de los resultados virtuales del modelo de revenido para el material 42CrMo4, los resultados se muestran en la Figura61 y Figura62.

**Tabla 7.-** Resultados obtenidos de propiedades mecánicas en la localización de T/2 en todas las direcciones longitudinal y transversal de las probetas.

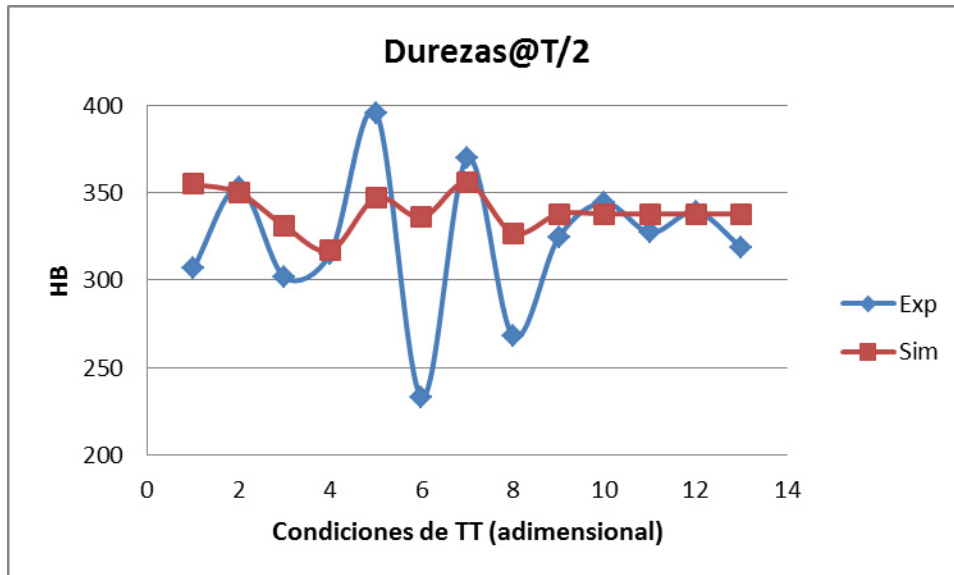
<i>Tiempo (Hrs)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Cedencia L (Psi)</i>	<i>Cedencia T (Psi)</i>	<i>Tension L (Psi)</i>	<i>Tension T (Psi)</i>
2	550	201055	186408	219391	198712
10	550	172598	156800	187157	169500
2	650	138832	138805	154845	153935
10	650	121127	160000	135008	172100
0.3431	600	209654	205822	222423	207399
11.6569	600	126176	144800	143270	159400
6	529	171027	172394	193151	190419
6	670	108400	105200	125300	12900
6	600	153296	155400	172743	169200
6	600	153413	159600	173055	174200
6	600	151707	153900	169411	167300
6	600	157056	155200	169866	167900
6	600	152405	158300	172661	172400

<i>Dureza L (HB)</i>	<i>Dureza T (HB)</i>	<i>Impactos T (-29°C_ Lb/Ft)</i>	<i>Impactos L (-29°C_ Lb/Ft)</i>
307	379	11	14
353	358	10	14
302	293	24	39
315	290	38	58
396	391	9	11
233	242	26	41
370	387	10	13
268	252	30	65
325	344	15	23
344	344	11	15
327	332	13	22
339	336	18	26
319	327	13	23

En la Figura61 y Figura62 se muestra la comparación entre la parte experimental vs simulación, los resultados muestran buena correlación, a excepción de los resultados utilizando tiempos muy prolongados (47).



**Figura61.-** Comparación entre resultados experimentales vs simulación y % de Error en una localización de T/4 entre las mediciones, en el eje de las horizontal cada número representa una condición de temperatura y tiempo.

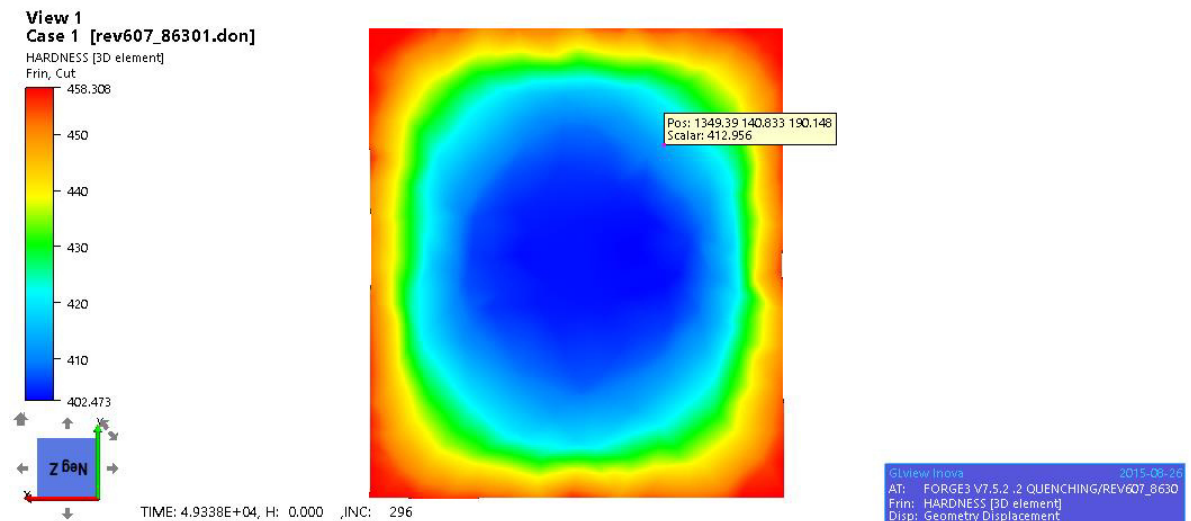


**Figura62.-** Comparación entre resultados experimentales vs simulación y % de Error en una localización de T/2 entre las mediciones, en el eje de las horizontal cada número representa una condición de temperatura y tiempo.

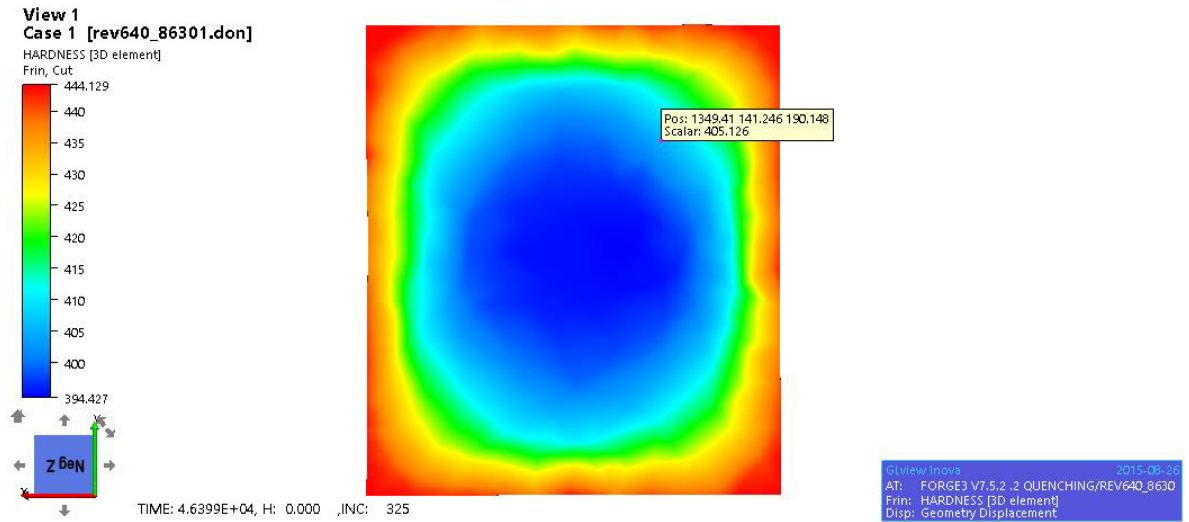
### 6.3 Etapa III-Efecto de los elementos aleantes en el proceso de revenido (perfiles de dureza).

A continuación se muestran los resultados de las 6 simulaciones variando la composición química y utilizando el modelo de tratamiento térmico de revenido para evaluar los resultados de dureza de la simulación, para estos casos se utilizaron resultados de tratamientos térmicos de temple, utilizando las composiciones químicas de un acero de alta aleación y media aleación como es el acero AISI 4340 y AISI 8630, en condición de temple.

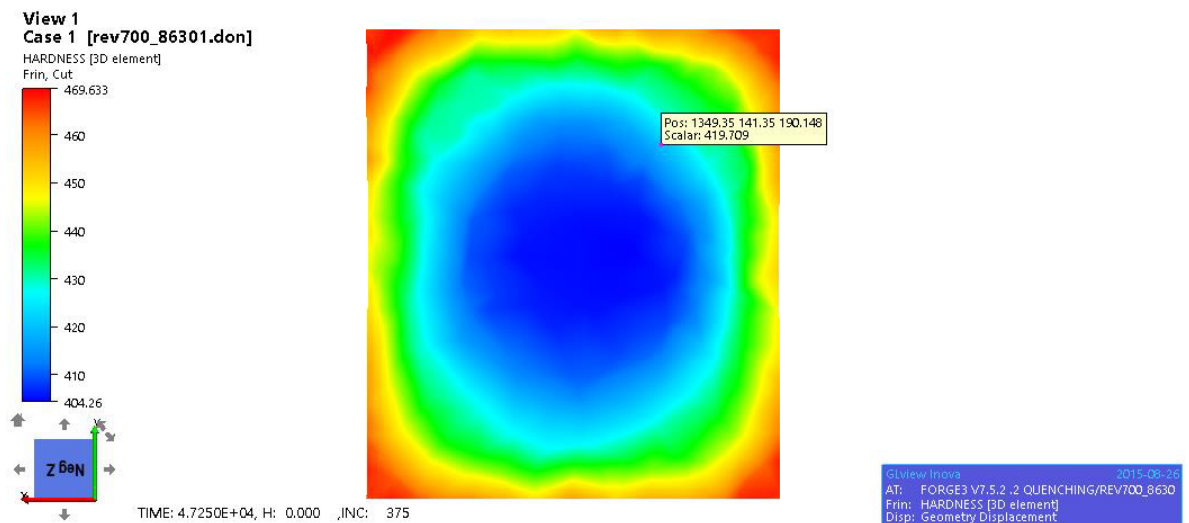
En la Figura 63, Figura 64, e Figura 65 se muestran los resultados de las diferentes condiciones a las que fueron sometidas las probetas virtuales del acero AISI 8630.



**Figura 63.-** Resultados de dureza a una temperatura de 607°C/6 horas para un acero AISI 8630.



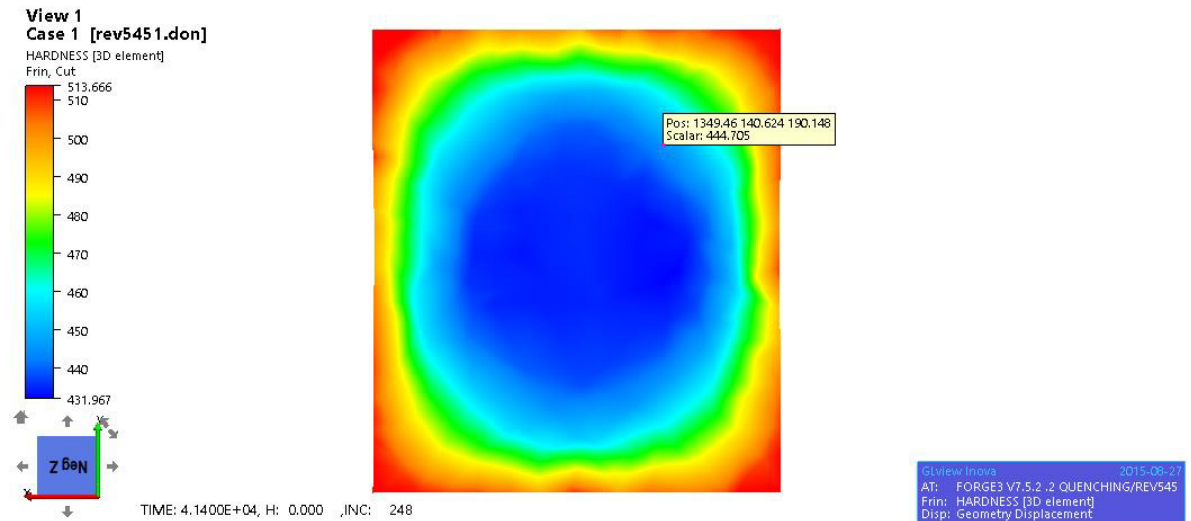
**Figura 64.-** Resultados de dureza a una temperatura de 640°C/5 horas para un acero AISI 8630.



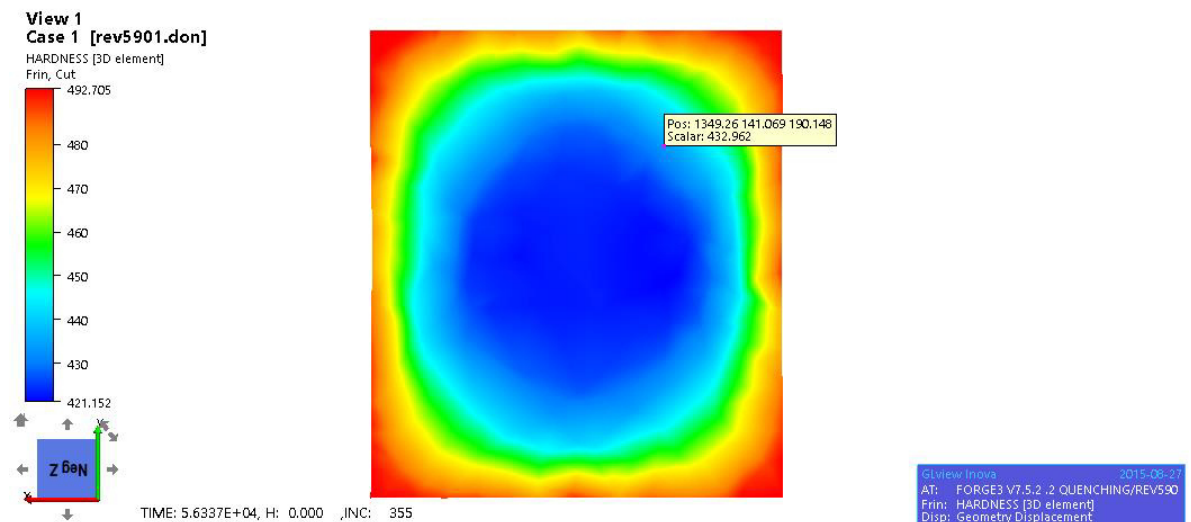
**Figura 65.-** Resultados de dureza a una temperatura de 700°C/5 horas para un acero AISI 8630.



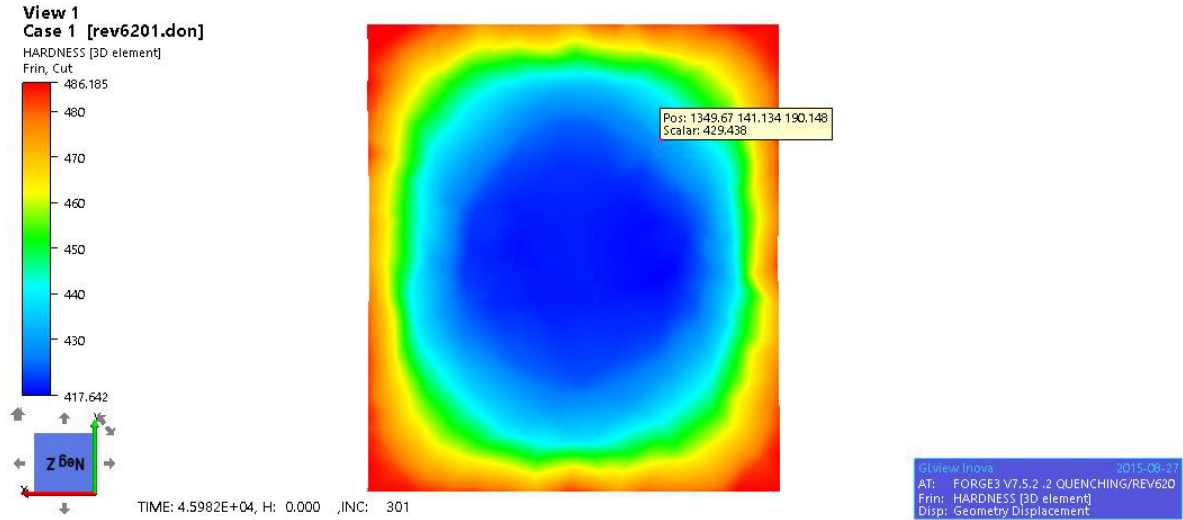
En la Figura 66, Figura 67, e Figura 68 se muestran los resultados de las diferentes condiciones a las que fueron sometidas las probetas virtuales del acero AISI 4340.



**Figura 66.-** Resultados de dureza a una temperatura de 545°C/4 horas para un acero AISI 4340.

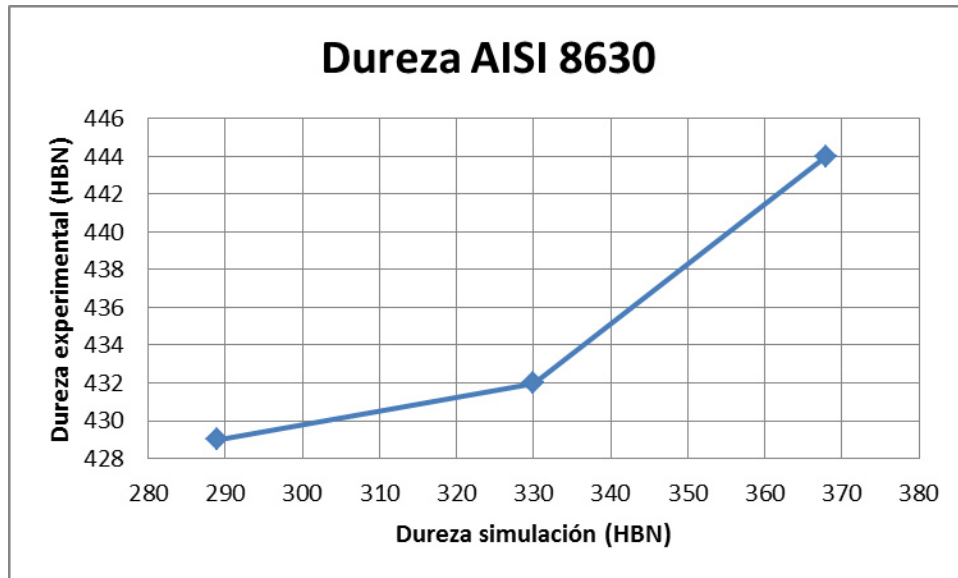


**Figura 67.-** Resultados de dureza a una temperatura de 590°C/8 horas para un acero AISI 4340.

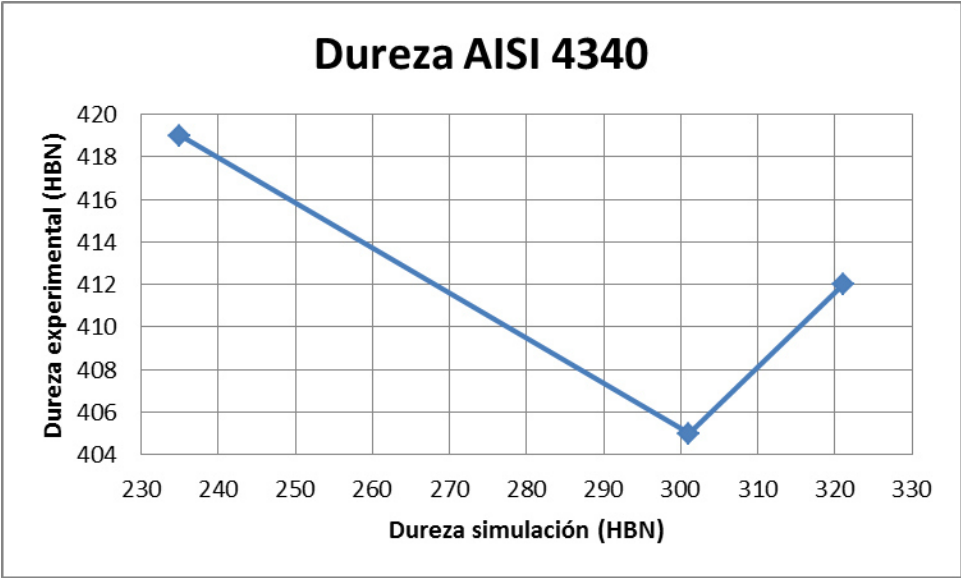


**Figura 68.-** Resultados de dureza a una temperatura de 620°C/5 horas para un acero AISI 4340.

En la Figura 69 se muestran los resultados comparativos de dureza entre simulación y experimental del acero AISI 8630.



**Figura 69.-** Comparación de resultados de dureza entre simulación y experimental para un acero AISI 8630.



**Figura 70.-** Comparación de resultados de dureza entre simulación y experimental para un acero AISI 8630.

## **7.- Discusión de resultados.**

### ***7.1 Etapa I-Calculo de transferencia de calor a partir de curvas experimentales por el método inverso en el proceso de temple.***

Los resultados de la Figura31 muestran las velocidades de enfriamiento del anillo denominado prueba A1, en la cual podemos observar que en solo una de las caras el enfriamiento (A1(T1-T5)) es considerado “uniforme” debido a que presentan similitud las curvas obtenidas de las superficies del anillo y en donde se presenta el fenómeno de recalcancia o calor latente de transformación (49) debido a la transformación martensítica del grado de acero en cuestión, así como también podemos observar los comportamientos de los termopares que fueron colocados en los centros de las secciones transversales del anillo, donde se presenta con claridad la transformación bainítica aproximadamente a los 10 minutos y 500°C de haber iniciado el enfriamiento (50), en los resultados de esta prueba podemos apreciar que los cambios de pendiente de los termopares insertados en las superficies presentan mayor inflexión que el resto de las pruebas, esto es debido a que la prueba A1, la pieza de prueba presento solo una cara en contacto con otras piezas debido al acomodo de la carga al momento de realizar las pruebas en línea.

Los resultados de la Figura33 se muestran los resultados de enfriamientos durante el tratamiento térmico de temple, en los que podemos observar mejores resultados en la cara B2(T1-T5), debido a su similitud en morfologías de las curvas obtenidas, sin embargo en el resto de los resultados se presentan diferencias entre las curvas obtenidas, debido a que esta prueba se realizó con un anillo colocado debajo del anillo de prueba y otro anillo encima del anillo de prueba, esto afecta la extracción de calor en las zonas donde fueron insertados los termopares, referente a los resultados obtenidos de los centros del anillo de prueba B, se puede observar que la cara B2(T6-T10) no presenta cambio de pendiente a los 500°C, tal como lo presentan en resto de las curvas obtenidas experimentalmente, aparentemente la transformación bainítica para esta condición no fue desarrollada debido a que específicamente esta sección

presento una velocidad de enfriamiento en el centro más rápida que el resto de las secciones y pudo no haber tocado la nariz de enfriamiento del diagrama de transformación TTT para el acero 42CrMo4.

Los resultados de la Figura35 se muestran los resultados de enfriamientos durante el tratamiento térmico de temple, para esta prueba se tuvieron una serie de problemas al momento de llevar a cabo la prueba, este problema se puede visualizar en los resultados de las curvas de enfriamientos, por ejemplo la gráfica C3(T16-T20), en los que podemos observar el comportamiento anómalo de la temperatura registrada en el centro de la pieza comparado con el resto de los resultados de termopares colocados en el centro, esta pieza presento un anillo debajo de ella y otro anillo encima de ella por lo que la diferencias de temperaturas pudo haber sido debido al arreglo geométrico de la carga durante la prueba de tratamiento térmico.

En los resultados del prueba D (Figura36), se instrumentó el anillo que prácticamente estuvo tocando la superficie del material de apoyo, así como también el anillo que se colocó encima de esta pieza, debido a esto no se pudo registrar toda la información de las curvas experimentales y los resultados no muestran una correlación directa.

En los resultados referentes a la Figura37 se pueden apreciar diferencias en las curvas de enfriamiento separadas por Diámetros exterior e interior y caras superior e inferior del anillo "A", para la condición del DE se aprecia que los termopares encontrados a  $90^\circ$  y  $270^\circ$  (uno en frente del otro) presentan un enfriamiento muy similar, mientras que para los termopares localizados a  $0^\circ$  y  $180^\circ$  presentan mucha discrepancia en sus enfriamientos, lo cual conlleva a tener un enfriamiento muy heterogéneo y esta es una de las principales causas de la distorsión (51).

En los resultados referentes a la Figura38 se pueden apreciar diferencias en las curvas de enfriamiento separadas por Diámetros exterior e interior y caras superior e inferior del anillo "B", para la condición del DE se aprecia que los termopares encontrados a  $90^\circ$  y  $180^\circ$  presentan un enfriamiento muy anormal pero similar, mientras que para los termopares localizados a  $0^\circ$  y  $270^\circ$  presentan un enfriamiento sin cambio de

pendiente o transformación martensítica, esta prueba se realizó con carga arriba del anillo y debajo del anillo, lo cual pudo haber afectado durante el enfriamiento en su extracción de calor.

En los resultados referentes a la Figura39, se puede apreciar en las curvas de enfriamiento un comportamiento muy similar para los termopares localizados en las caras superiores del anillo “C”, lo cual indica que para esa posición y localización específica el medio de temple que se utilizó presenta buenas condiciones de agitación, mientras que para el resto de los termopares no se presenta un resultado concreto, debido al comportamiento anómalo de las curvas de enfriamiento.

En los resultados referentes a la Figura40 se puede apreciar en las curvas de enfriamiento un comportamiento muy similar para los termopares localizados en las caras inferiores y superiores del anillo “D”, lo cual indica que para esa posición y localización específica el medio de temple que se utilizó presenta buenas condiciones de agitación, mientras que para el resto de los termopares no se presenta un resultado concreto, debido al comportamiento anómalo de las curvas de enfriamiento.

En los resultados referentes a la Figura41 se puede apreciar las curvas promedio de cada zona instrumentada con termopares, esta técnica se utilizó para optimizar tiempos de cálculo para la condición del anillo “B”

En los resultados referentes a la Figura42 se puede apreciar la buena correlación entre los resultados experimentales y los resultados de la simulación del proceso de temple, obteniendo mediante la técnica de análisis inverso (52) los coeficientes de transferencia de calor  $h$  para las diferentes condiciones de enfriamiento.

En la Figura43 se muestran los resultados obtenidos del coeficiente de transferencia de calor en función de la temperatura experimental promedio de cada zona del anillo “B”, estos resultados fueron utilizados posteriormente como condición térmica inicial para modelar el fenómeno de distorsión en la condición del anillo “B”. Se aprecia cierta similitud en los resultados a  $90^\circ$  y  $180^\circ$  donde la máxima extracción de calor

ocurre aproximadamente a los 560°C/600°C, caso contrario para la condición de 270°C, donde la máxima temperatura a la cual ocurre la máxima extracción de calor es aproximadamente a los 700°C.

En la Figura44 se muestra como fue seccionado el anillo virtual tridimensional para establecer su condición de frontera térmica inicial, utilizando los coeficientes de transferencia de calor en función de la temperatura en cada una de las secciones mostradas. La Figura45 muestra la superposición de los coeficientes de transferencia de calor obtenidos del análisis inverso realizado para el promedio de las curvas experimentales del anillo denominado “B”, se aprecia la diferencia de comportamientos por zonas, lo cual es un fuerte indicador del enfriamiento heterogéneo durante el proceso de tratamiento térmico, las zonas con termopares del 1 al 15 presentan mucha similitud comparado con el promedio de los termopares del 16 al 20, este comportamiento se puede atribuir principalmente a que la zona de enfriamiento de los termopares 16 al 20 presenta una mayor velocidad de agitación, debido a que presenta un comportamiento casi lineal al inicio del enfriamiento este fenómeno se le atribuye al buen rompimiento de la capa de vapor (53).

Ya que se tuvieron los resultados de la simulación térmica utilizando los coeficientes de transferencia de calor mostrados en la Figura45, se procedió a cortar una laja de la sección transversal que se muestra en la Figura46 y que está relacionada con la zona donde se colocaron los termopares B2 (90°), para validar los resultados experimentales vs los resultados de la simulación.

En la Figura47 se muestra la metodología empleada para la medición de dureza, una vez desarrollado el perfil de dureza se procedió a realizar de manera comparativa los resultados de la simulación vs los resultados obtenidos en condición de temple de la laja correspondiente a la sección B2 (90°), los resultados comparativos se muestran en la Figura48, donde se aprecia una buena correlación entre los resultados experimentales y simulados, para entender mejor los resultados se calculó el porcentaje de error, el cual se muestra en la Figura49 a, encontrando valores desde 0%, hasta 28% en el centro de la pieza, este incremento de la dureza en el centro de la

sección transversal no es muy común en los aceros templados mediante transformación de fase, debido a que el perfil de dureza se espera que sea mayor en la superficie y conforme se avanza hacia el centro se espera que baje la dureza, Liscic y totten estudiaron este fenómeno mejor conocido como “endurecimiento inverso”, el cual está principalmente atribuido a un retardo en la transformación de fase durante el tratamiento térmico de temple, es decir que una vez que se colapsa la capa de vapor en la superficie del anillo, la temperatura en el centro de la pieza está por encima de la temperatura crítica A1, teniendo velocidades de enfriamiento rápidas en el centro de la pieza y esto conlleva a el desarrollo de una fase martensítica en el centro de la sección transversal (54).

En los resultados de la Figura50, se muestran los resultados medidos en la superficie del anillo en condición de temple comparados con los resultados de la simulación, los cuales muestran un coeficiente de correlación de 0.97 %, con porcentajes de error desde 4.2-10.3% de error en la 4 mediciones que se realizaron, lo cual es considerado un resultado aceptable, debido a que no excede el 15% de error.

En la Figura51, se muestran los resultados de la simulación amplificados 10 veces debido a que por las dimensiones del anillo virtual, fue muy difícil apreciar el ovalamiento predicho por simulación, con este resultado podemos predecir el ovalamiento y/o distorsión en componentes bajo condiciones muy específicas de velocidad de agitación y concentración de polímero.



## ***7.2 Etapa II-Predicción y verificación de perfiles de dureza después del proceso de revenido para el acero 42CrMo4.***

Para llevar a cabo las simulaciones de tratamiento térmico de revenido fue necesario correr una simulación de tratamiento térmico de temple para comenzar con una condición de frontera partiendo de una combinación de estructura martensítica y bainítica, esta condición fue utilizada para el resto de la simulaciones de revenido mostradas en las siguientes ilustraciones, En la Figura52 se muestran los resultados de dureza para la condición de revenido a 530°C por 6 horas en la posición de  $\frac{1}{2}$  T y  $\frac{1}{4}$  T, obteniendo escalares de dureza de 356 HB y 368 HB, y porcentajes de error de 4% y 2%, para esta condición el modelo de revenido predice las condiciones con muy buena exactitud.

En la Figura53 se muestran los resultados de dureza para la condición de revenido a 550°C por 2 horas en la posición de  $\frac{1}{2}$  T y  $\frac{1}{4}$  T, obteniendo escalares de dureza de 355 HB y 367 HB, y porcentajes de error de 14% y 4%, para esta condición de revenido predice bien las durezas, quizás sea cuestión de modificar la variable de transferencia de calor, para obtener un resultado con menor porcentaje de error.

En la Figura54 se muestran los resultados de dureza para la condición de revenido a 550°C por 10 horas en la posición de  $\frac{1}{2}$  T y  $\frac{1}{4}$  T, obteniendo escalares de dureza de 350 HB y 362 HB, y porcentajes de error de 1% y 1%, para esta condición el modelo de revenido predice las condiciones con muy buena exactitud.

En la Figura55 se muestran los resultados de dureza para la condición de revenido a 600°C por 0.3 horas en la posición de  $\frac{1}{2}$  T y  $\frac{1}{4}$  T, obteniendo escalares de dureza de 347 HB y 359 HB, y porcentajes de error de 17% y 23%, para esta condición el modelo de revenido no predice las condiciones con muy buena exactitud, debido a que el tiempo de permanencia a esta temperatura es muy corto.

En la Figura56 se muestran los resultados de dureza para la condición de revenido a 600°C por 6 horas en la posición de  $\frac{1}{2}$  T y  $\frac{1}{4}$  T, obteniendo escalares de dureza de

338 HB y 351 HB, y porcentajes de error de 3% y 8%, para esta condición el modelo de revenido predice las condiciones con muy buena exactitud.

En la Figura57 se muestran los resultados de dureza para la condición de revenido a 600°C por 11 horas en la posición de  $\frac{1}{2}$  T y  $\frac{1}{4}$  T, obteniendo escalares de dureza de 336 HB y 349 HB, y porcentajes de error de 40% y 35%, para esta condición el modelo de revenido no predice las condiciones con muy buena exactitud, debido a que el tiempo de permanencia a esta temperatura es muy prolongado, aparentemente una de las restricciones del modelo es hasta 10 horas.

En la Figura58 se muestran los resultados de dureza para la condición de revenido a 650°C por 10 horas en la posición de  $\frac{1}{2}$  T y  $\frac{1}{4}$  T, obteniendo escalares de dureza de 317 HB y 330 HB, y porcentajes de error de 1% y 4%, para esta condición el modelo de revenido predice las condiciones con muy buena exactitud.

En la Figura59 se muestran los resultados de dureza para la condición de revenido a 650°C por 2 horas en la posición de  $\frac{1}{2}$  T y  $\frac{1}{4}$  T, obteniendo escalares de dureza de 331 HB y 344 HB, y porcentajes de error de 10% y 14%, para esta condición de revenido predice bien las durezas, quizás sea cuestión de modificar la variable de transferencia de calor, para obtener un resultado con menor porcentaje de error.

En la Figura60 se muestran los resultados de dureza para la condición de revenido a 670°C por 6 horas en la posición de  $\frac{1}{2}$  T y  $\frac{1}{4}$  T, obteniendo escalares de dureza de 327 HB y 340 HB, y porcentajes de error de 22% y 25%, para esta condición el modelo de revenido no predice las condiciones con muy buena exactitud, aparentemente una de las restricciones del modelo es hasta 650°C.

En la Figura61 se muestran los resultados de dureza para la posición de  $\frac{1}{4}$  T, se muestran los resultados experimentales vs simulados, se puede apreciar que para la condición de 600°C por 0.3 (punto 5) y 11 (punto 6) horas los errores obtenidos son del 23 y 35 % por lo que a tiempos muy cortos y tiempos muy prolongados el modelo no es funcional debido a que sobrepasan el 15 % de error aceptable para desarrollar

resultados confiables, así como la condición de 670°C por 6 (punto8) horas donde el porcentaje de error es del 25 %.

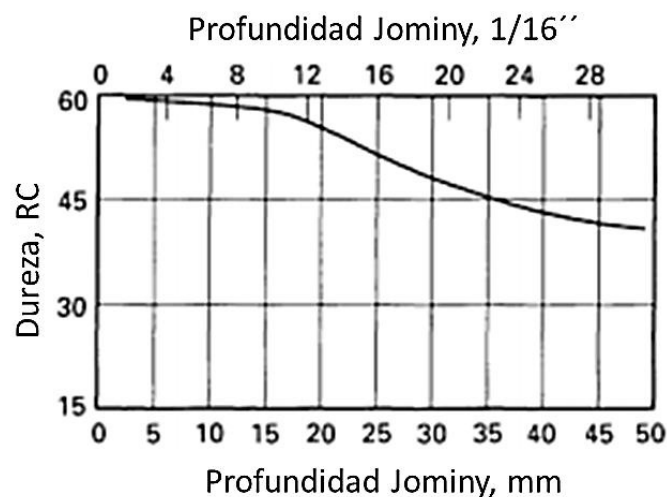
En los resultados de la Figura62 se muestran los resultados de dureza para la posición de  $\frac{1}{2}$  T, se muestran los resultados experimentales vs simulados, se puede apreciar que para la condición de 600°C por 11 (punto 6) horas el error obtenido es del 40 %, y para la condición de 670°C por 6 (punto 8) horas el error obtenido es del 22 %, por lo que a tiempos muy prolongados el modelo no es funcional debido a que sobrepasan el 15 % de error aceptable para desarrollar resultados confiables.

### **7.3 Etapa III-Efecto de los elementos aleantes en el proceso de revenido (perfiles de dureza).**

De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 69 para un acero AISI 8630, el modelo de revenido no es capaz de predecir con buena exactitud los perfiles de dureza de la pieza analizada, debido a que se obtuvieron porcentajes de error entre 17 y 33 % en la comparación de los resultados experimentales y simulados, los cuales no son confiables.

De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 70 para un acero AISI 4340, el modelo de revenido no es capaz de predecir con buena exactitud los perfiles de dureza de la pieza analizada, debido a que se obtuvieron porcentajes de error entre 22 y 44 % en la comparación de los resultados experimentales y simulados, los cuales no son confiables.

Los resultados desarrollados en la comparación entre los resultados experimentales y simulados pueden atribuirse a que los grados de acero AISI 8630 y AISI 4340 presentan mejores propiedades mecánicas (mayor dureza de temple) debido a sus elementos aleantes, esto lo podemos observar en la Figura 71.



**Figura 71.-** Resultados de Prueba Jominy en AISI 8630,(55)

En la Figura 72.- se utilizó el programa de Caterpillar® para predecir las durezas en condición de temple, calculando los valores para la prueba Jominy entre el acero AISI 8630 y AISI 4340, mostrando mejor templabilidad el acero AISI4340.

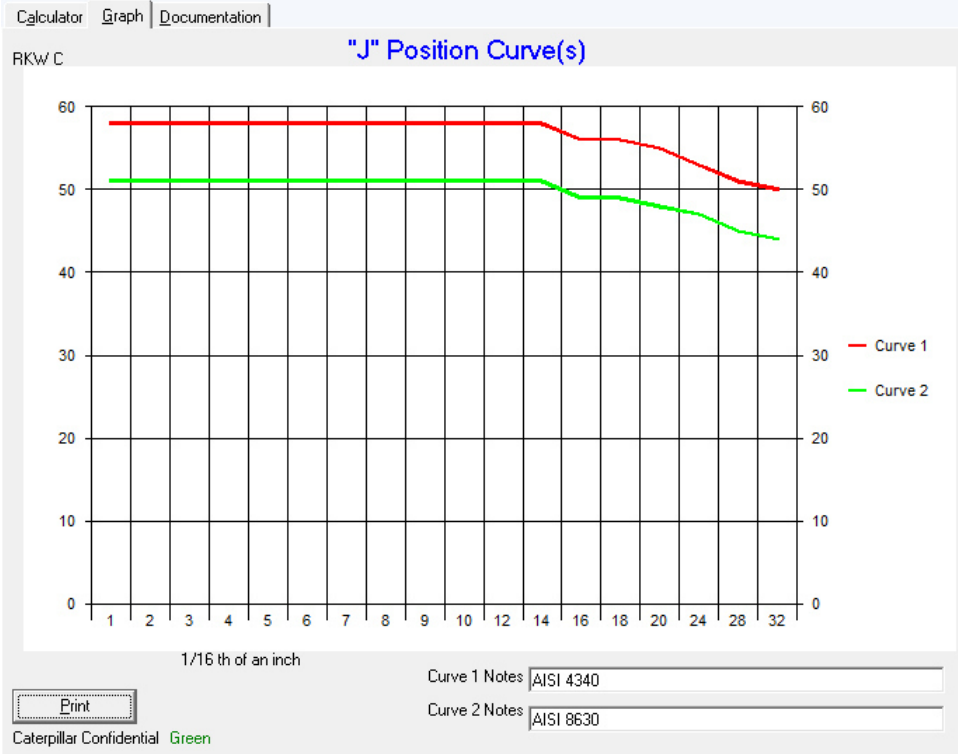


Figura 72.- Resultados de Prueba Jominy en AISI 8630 y AISI 4340 (56)

## 8.-Conclusiones.

- ✓ Se desarrolló una metodología para calcular el coeficiente de transferencia de calor  $h$  mediante la técnica de análisis inverso, el cual supone valores de  $h$ , y compara con las temperaturas experimentales, hasta minimizar el error y obtener la temperatura similar a la temperatura experimental, obteniendo con este resultado la reproducibilidad de los perfiles de temperatura de la sección transversal de los productos estudiados.
- ✓ Se obtuvo una buena correlación entre los resultados experimentales comparados con los resultados de la simulación, dando como resultado porcentajes de error menores a 10%, los cuales se consideran como aceptables, esto nos indica que las propiedades mecánicas, físicas, térmicas así como la información referente a los diagramas de transformación TTT y CCT de la base de datos del paquete comercial computacional es confiable.
- ✓ Con la información disponible de la reología de materiales del paquete comercial computacional es suficiente para reproducir el problema de distorsión bajo las condiciones térmicas experimentales para el grado de acero estudiado.
- ✓ Con los resultados mostrados en la parte I, es posible contrarrestar la problemática del fenómeno de distorsión, analizando las condiciones del baño de temple (por ejemplo, velocidades de agitación, concentración de polímero, acomodo y buen funcionamiento de propelas y/o boquillas, temperaturas del baño, etc.).

- ✓ Con esta metodología es posible predecir perfiles de temperatura en una amplia gama de productos, reduciendo así el riesgo de que el componente quede dimensionalmente fuera de tolerancias y sea considerado como producto no aceptable.
- ✓ Se implementó un modelo matemático en conjunto con TRANSVALOR FORGE para la predicción de dureza en condición de revenido, basado en la ecuación de Hollomon, obteniendo resultados satisfactorios para el grado de acero 42CrMo4.
- ✓ Los porcentajes de error encontrados como resultado de la comparación entre los resultados experimentales y simulados para predicción de distorsión fueron hasta 10.3 %, y para predicción de dureza en condición de revenido fueron hasta 40%.
- ✓ De acuerdo a los resultados de la parte II, el modelo de tratamiento térmico de revenido es funcional para la predicción de dureza en la condición de tratamiento térmico antes mencionada, pero está restringido a los rangos de temperaturas entre 500 y 650 °C, y tiempos entre 1 y 10 horas, esto se atribuye a los porcentajes de error encontrados.
- ✓ Con la predicción de dureza en condición de revenido, es posible estimar las propiedades mecánicas del material que este siendo analizado, integrando constantes del material.
- ✓ El modelo de revenido no es capaz de reproducir perfiles de dureza con buena exactitud de grados de acero que presentan el fenómeno de “endurecimiento secundario”, debido a que este comportamiento no se encuentra implícito en la ecuación.

- ✓ Para la predicción de temple y revenido es importante contar con información experimental (curvas de enfriamiento, Tamaño de grano, aproximación de fases presentes, etc) para desarrollar resultados mayormente aproximados a la realidad y poder predecir propiedades mecánicas consistentes.



## **9.- Contribución Tecnológica y Científica.**

La contribución científica de este trabajo encuentra su justificación en el interés teórico del tema propuesto y sobre todo en la utilidad práctica que se deriva del mismo, a su vez hace énfasis en el desarrollo e implementación del modelo matemático para predicción de durezas en condición de tratamiento térmico de revenido del acero 42CrMo4, debido a que difícilmente se encuentran modelos de predicción con una exactitud de resultados confiables como el descrito en este trabajo, con este modelo de predicción de dureza es posible estimar otras propiedades mecánicas (tales como esfuerzo de tensión último) a partir de los resultados virtuales sin la necesidad de realizar una serie de experimentos prolongados, y así desarrollar tratamientos térmicos más robustos y confiables.

La contribución tecnológica de este proyecto resalta en la implementación del modelo matemático para predicción de dureza y que hoy en día se encuentra disponible en la versión actualizada en el paquete comercial computacional FORGE<sup>®</sup>, debido a la excelente relación que existe entre universidad y Transvalor, de esta manera se logra una mayor y mejor difusión tecnológica a través del paquete comercial computacional, dando paso a que la industria actual pueda tener acceso a esta tecnología.

## **10.- Recomendaciones.**

- I. Implementar y validar un diseño de experimentos para aceros de baja aleación, variando el tamaño de grano inicial, y utilizando condiciones de velocidades de calentamiento experimentales, para evaluar el modelo para predicción de durezas en condición de revenido.
  
- II. Evaluar otros grados de acero con aleaciones de mayor contenido de elementos aleantes, por ejemplo un F22, el cual se ha encontrado que presenta el fenómeno de endurecimiento secundario, debido a que el modelo trabajado en esta tesis no predice dicho fenómeno, y validar los resultados encontrados.
  
- III. Realizar más experimentos en condición de tratamiento térmico de revenido con las variables físicas en completo control, analizar los resultados encontrados y validar si es posible la implementación de variables en la ecuación para desarrollar un modelo más robusto para la predicción de perfiles de dureza en el acero.

## 11. - Bibliografía.

- (1) George Krauss, Libro “Steels; processing, structure, and performance”, ASM international<sup>®</sup> 2005, No. 05140G.
- (2) E. Ceretti et al, “3d Simulation of a Hot Ring Rolling Industrial Process”, International Journal of Materials Forming, volumen 10, paginas 323-326, 2010.
- (3) Handbook “Heat treating”, ASM International, Volumen 4, paginas 14-17.
- (4) George Totten, “Steel Heat Treatment Handbook, second edition” pagina 347, 2006.
- (5) H.K.D.H. Bhadeshia “Steels; Micorstructure and properties, third edition”, pagina 108, 2006.
- (6) Shuhui Ma, “Characterization of the performance of mineral oil based quenchants using CHTE quench Probe System”, Tesis como opción a título de Master en Ciencia e Ingeniería de materiales, Worcester Polytechnic Institute, Junio 27 de 2002.
- (7) M. Maniruzzaman et al, “Effect of quench strat temperature on surface heat transfer coefficients”, Center of heat treatment excellence, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, USA, Quenching Control and Distortion, Septiembre 9-13, Chigago, Illinois, EUA 2012.
- (8) Smoljan, “Numerical Simulation of Steel Quenching” ASM international , JMEPEG Volumen 11, paginas 75-79, 2001.
- (9) D.Y. Ju et al, “Modeling and experimental verification of martensitic transformation plastic behavior in carbon steel for quenching process” Materials science and engineering Volumen A, paginas 438-440,2006.

- (10) Seok\_Jae Lee et al, "Finite element simulation of quench distortion in a low alloy Steel incorporating transformation kinetic" Acta Materialia Volumen 56, paginas 1482-1490, 2008.
- (11) Zhchao Li et al, "Distortion minimization during gas quenching process", journal of materials processing Technology Volumen 172, paginas 249-257, 2006.
- (12) S. Claudinon et al, "Continuous in situ measurement of quenching distortions using computer vision" journal of materials processing Technology Volumen 122, paginas 69-81, 2001.
- (13) Minsu jung et al, "Microstructural and Dilatational Changes during tempering and tempering Kinetics in Martensitic Medium-Carbon Steel" The Minerals, Metals and Materials Society and ASM International, paginas 551-559, 2009.
- (14) Hollomon and Jaffe "Time-Temperature Relations in Tempering Steel" American of mining and metallurgical engineers, Techical Publication No. 1831, New York 1945.
- (15) Z. Zhang "Microstructure evolution of hot-work tool steels during tempering and definition of a kinetic law based on hardness measurement", Materials Science and Engineering A 380, paginas 222-230, 2004.
- (16) P. Bala et al. "The Kinetics of phase transformations during tempering of low alloy medium carbon steel" Archives of Materials Science and Engineering, Volume 28, Paginas 98-104, 2007.
- (17) R. Dabrowski and R. Dziurka, "Tempering Temperature Effects on Toughness of 56NiCrMo7 Steel", Archives of Metallurgy and Materials Volume 56, 2011.

- (18) M.F. Cross et. al, "Developing Empirical Equations for Heat Transfer Coefficients on Matallic Disks", 19<sup>th</sup> ASM Heat Treating Society Conference Proceedings Includng Heat Treating in the New Millennium, paginas 335-342, 1999.
- (19) B. Liscic and T. Filetin, "Global Database of Cooling Intensities of Liquid Quenchants, Proceedings of the European Conference on Heat Treatment 2011 "Qualityin Heat Treatment" Wels, Austria, paginas 40-49, 2011.
- (20) Hala Salaman, "Evaluation of Heat Transfer Coefficient during Quenching of Steels", Tesis como opción a título de doctor en Ingeniería Mecánica, Septiembre de 2009.
- (21) Camurri y Rdz., "Modelo matemático y validación experimental de la transferencia de calor durante las diferentes etapas del tratamiento térmico de bolas para molienda", Congreso Conamet/Sam, 2004.
- (22) W. Zoch, Th. Luebben, "Distortion engineering-a New Concept to Control distortion Problems" Quenching Control and Distortion, Septiembre 9–13, Chicago, Illinois, EUA, 2012.
- (23) Pascon Frédéric et al., "Prediction of distortion during cooling of Steel rolled rings using thermal-mechanical-metallurgical finite element method", Porperties of materials, Metal Forming, Paginas 1-7, 2004.
- (24) H.W. Zoch and Th. Luebben, "Distortion Engineering – a new concept to control distortion problems", Quenching control and distortion, Septiembre 9-13, Chicago Illinois, EUA, 2012.
- (25) B.L. Ferguson et al, "Modeling heat treatment of steel parts", Computational Meaterial science 34, paginas 274-281, 2005.

- (26) Somljan S., "Numerical Simulation of Steel Quenching" ASM international, paginas 75-79, 2002.
- (27) A. Freborg y B. Ferguson "Predicting Distortion and Residual Stress in a Vacuum Carburized and Gas Quenched Steel Coupon", Quenching Control and Distortion, Septiembre 9-13, Chicago Illinois, EUA, 2012.
- (28) C. Simsir y C. Hakan, "A FEM based framework for simulation of thermal treatments: Applications to steel quenching", computational materials science 44, paginas 588-600, 2008.
- (29) F. Pascon et. Al, "Prediction of distortion during cooling of steel rolled rings using thermal-mechanical-metallurgical finite element method" properties of Materials, Metal Forming, paginas 1-7, 2004.
- (30) Zhanli Guo et al. "Modelling phase transformations and material properties critical to the prediction of distortion during the heat treatment of steels" International Journal of Microstructure and Materials Properties, Volumen 4 No. 2, 2009.
- (31) Li Huiping et al, "High-speed data acquisition of the cooling curves and evaluation of heat transfer coefficient in quenching process", measurement 41, paginas 676-686, 2008.
- (32) A.S.A. Elmaryami et al, "Development of a numerical model of quenching of steel bars for determining cooling curves", Metal science and heat treatment, Volumen 55, paginas 48-51, 2013.
- (33) T.S. Prasanna Kumar et al., "Determination of heat transfer coefficient during quenching of an alloy steel by In-situ plant testing", Quenching Control and Distortion, Septiembre 9-13, Chicago, Illinois, EUA, 2012.

- (34) V. Lacarac et al, "Evaluation of non-uniform cooling effects for air-cooled forgings", *Journal of Materials Processing Technology* 152, paginas 370-383, 2004.
- (35) J.H. Kang et al "Characterization of cooling heat transfer various coolant conditions in warm forging process" *Journal of Materials Processing Technology* 184, paginas 338-344, 2007.
- (36) F.M.B. Fernandez et al "Mathematical model coupling phase transformation and temperature evolution during quenching of steels", *Material Science technology*, Volumen 1, 1985.
- (37) Victor Li et al, "A computational model for the prediction of steel hardenability", *metallurgical and materials transactions B*, Volumen 29B, paginas 661-672, junio 1998
- (38) Samad Taghizadeh et al., "Developing a model for hardness prediction in water-quenched and tempered AISI 1045 steel through an artificial neural network", *Journal of materials and design*, Volumen 51, paginas 530-535, 2013.
- (39) Dean Deng, "FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects", *Journal of materials and design*, Volumen 30, paginas 359-366, 2009.
- (40) Hai-liang Yu et al "Distortion behavior of a heavy hydro turbine blade casting during forced air cooling in normalizing treatment process", *Journal of Materials Engineering and Performance*, paginas 55-61, 2012.
- (41) Nong Wan et al, "Mathematical Model for Tempering Time Effect on Quenched Steel Based on Hollomon Parameter", *journal of Materials Science and Technology*, Volumen 21, No. 6, 2005

- (42) Part 8 Metallurgy, Transvalor®, 17 North State Street Suite 1700 Chicago, IL 60602 EUA 2014.
- (43) Lixin Li et al., “Inverse analysis of the stress–strain curve to determine the materials models of work hardening and dynamic recovery”, journal of Materials Science and Engineering A, Volumen 636, paginas 243-428, 2015.
- (44) M.D. Tylor et al.,” Correlations between nanoindentation hardness and macroscopic mechanical properties in DP980 steels”, Journal of materials science and engineering A, volumen 597, paginas 431-439, 2014.
- (45) Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, E 8/E 8 M-08, American Association State.
- (46) Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, E 23-07a, American Association State.
- (47) Miao Cui et al.,” A new inverse analysis method based on a relaxation factor optimization technique for solving transient nonlinear inverse heat conduction problems”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volumen 90, paginas 491–498, 2015.
- (48) Xiaohu Deng and Dongying Ju, “Modeling and Simulation of quenching and tempering process in steels”, Physics procedia 50, paginas 368-374, 2013.
- (49) Seok-Jae and Young-Kook Lee, “Latent heat of martensitic transformation in a medium-carbon low-alloy steel”,Scripta Materialia 60 paginas 1016-1019, 2009.
- (50) Metallurgy, Transvalor Solution, Reference Documentation 2011, 17 North State Street Suite 1700 Chicago, IL 60602 EUA 2014.



(51) Robert Pietzsch et al, "Minimizing the Distortion of Steel Profiles by Controlled Cooling", Materials technology-Carbon Steels, steel research international 76, 2005.

(52) Li huiping et al,"Inverse heat conduction analysis of quenching process using finite-element and optimization method", Finite Element in Analysis and Designs 42, paginas 1087-1096, 2006.

(53) Th. Lubben, F. Frerichs, "Quenching of bearing races-Influence of rewetting behavior on distortion", Quenching control and distortion, Septiembre 9-13, 2012, Chicago Illinois, USA.

(54) B. Liscic and G. Totten, "Inverse Hardness Distribution and its Influence on mechanical properties", Proceedings of the Second International conference on Quenching and the Control of Distortion, paginas 4-7 Noviembre, Cleveland, Ohio, 1996.

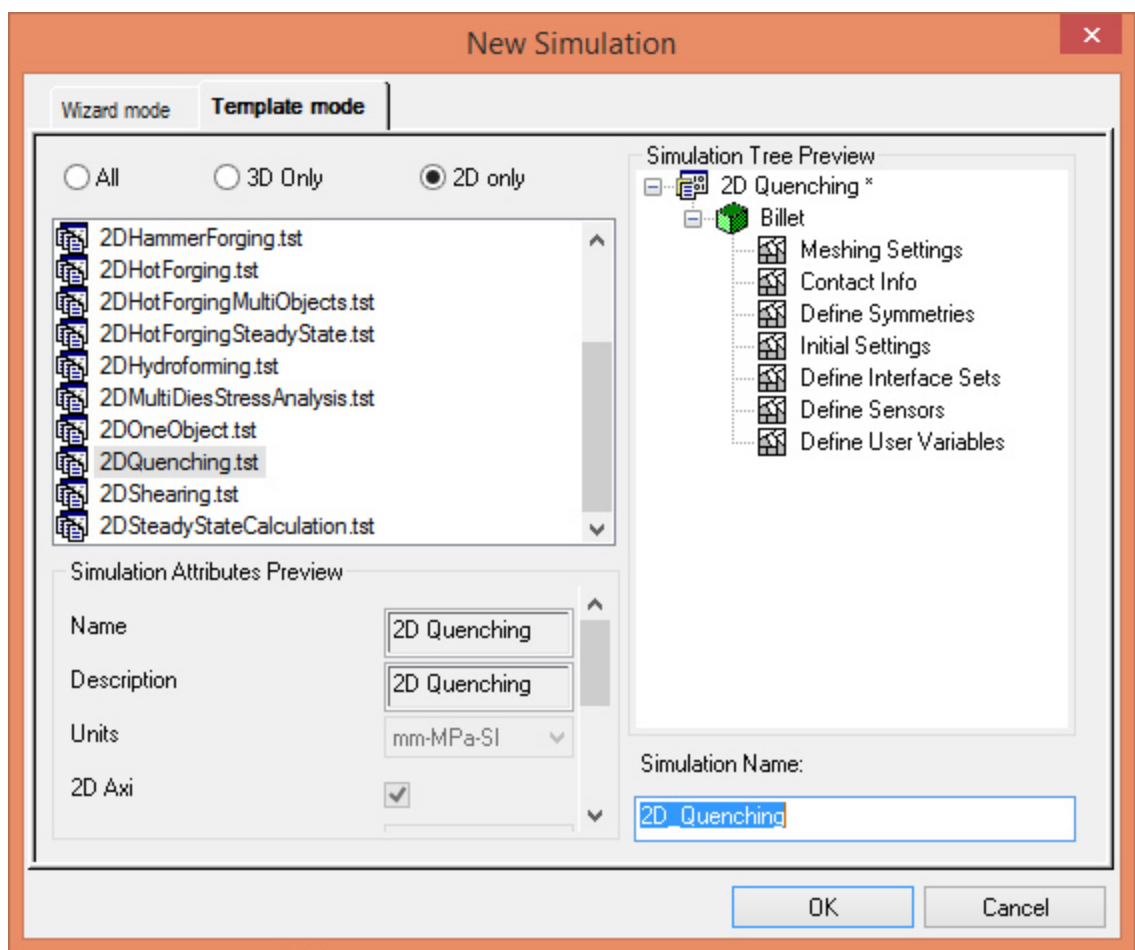
(55) Handbook of Heat Treatment, Volume 4, ASM International the materials information company, 2009.

(56) Caterpillar, 1E0038 Hardenability Calculator Verion 1.1, Copyright 2000, 2001, All Rights Reserved.

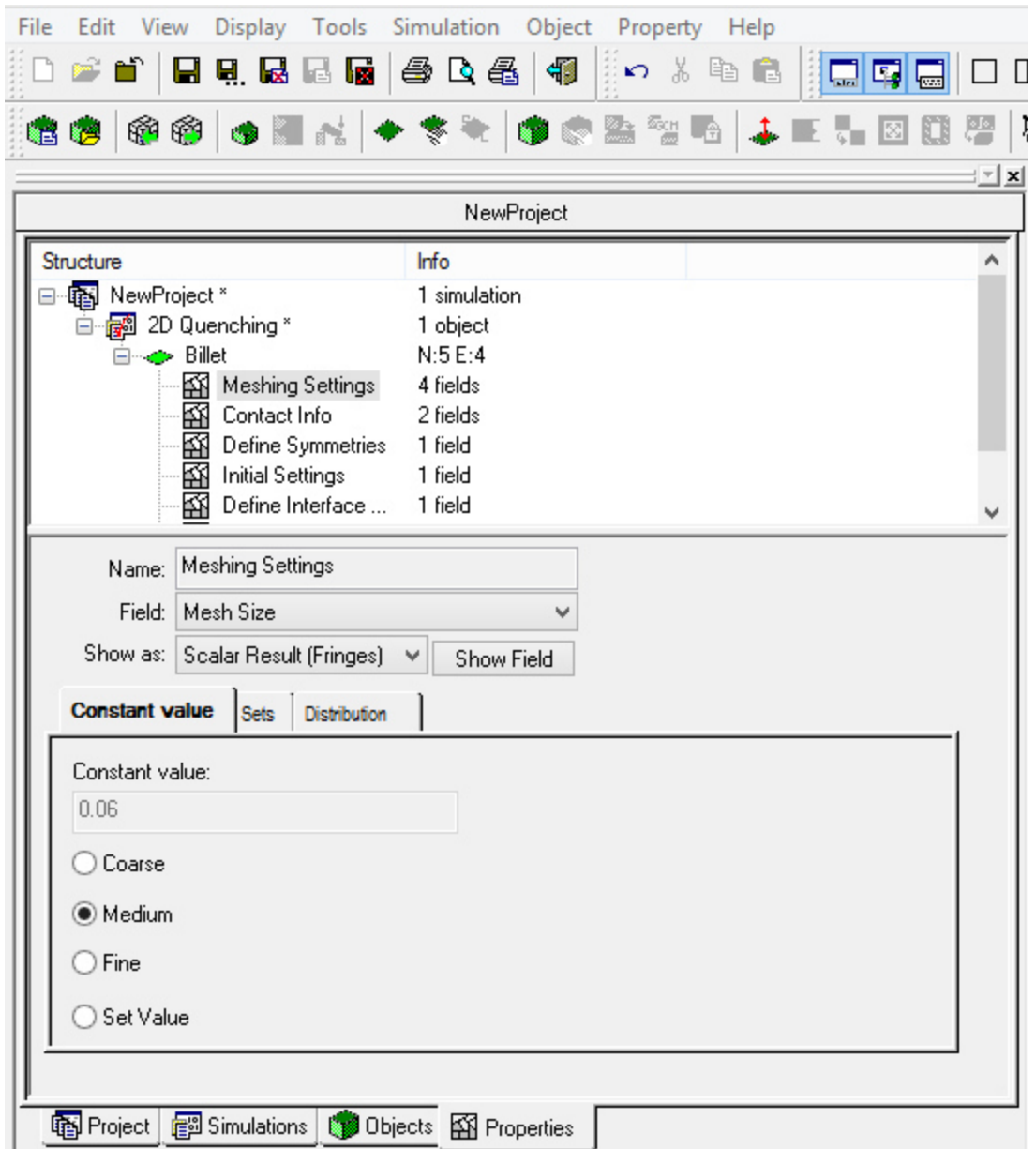
## Apéndice.

A continuación se describen los pasos para ejecutar el proceso de optimización utilizando Forge HPC 2011.

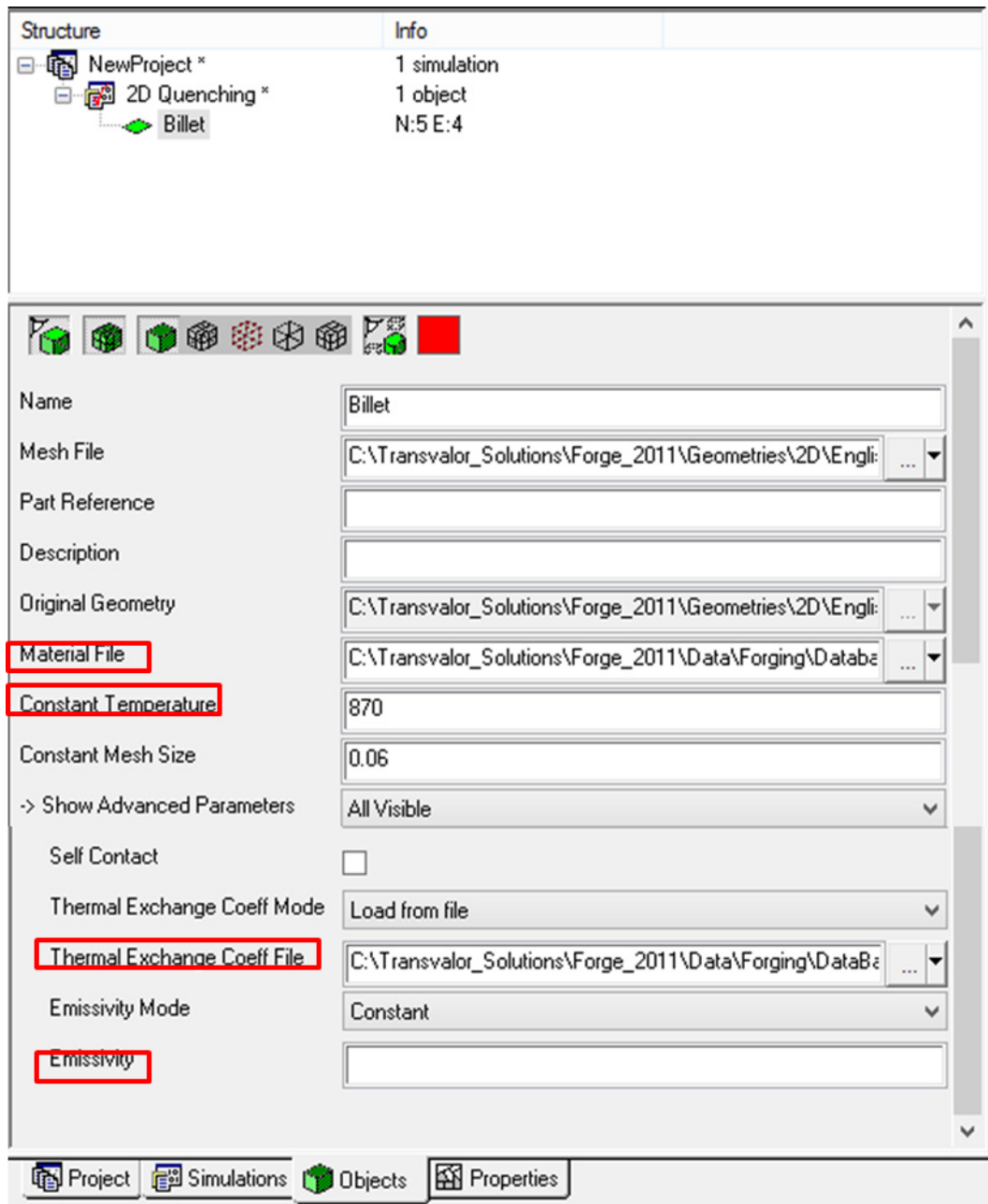
- 1) Seleccionar el tipo de análisis que se requiere realizar, en este caso se selecciona “2D Quenching” o “3D Quenching”, según sea el caso.



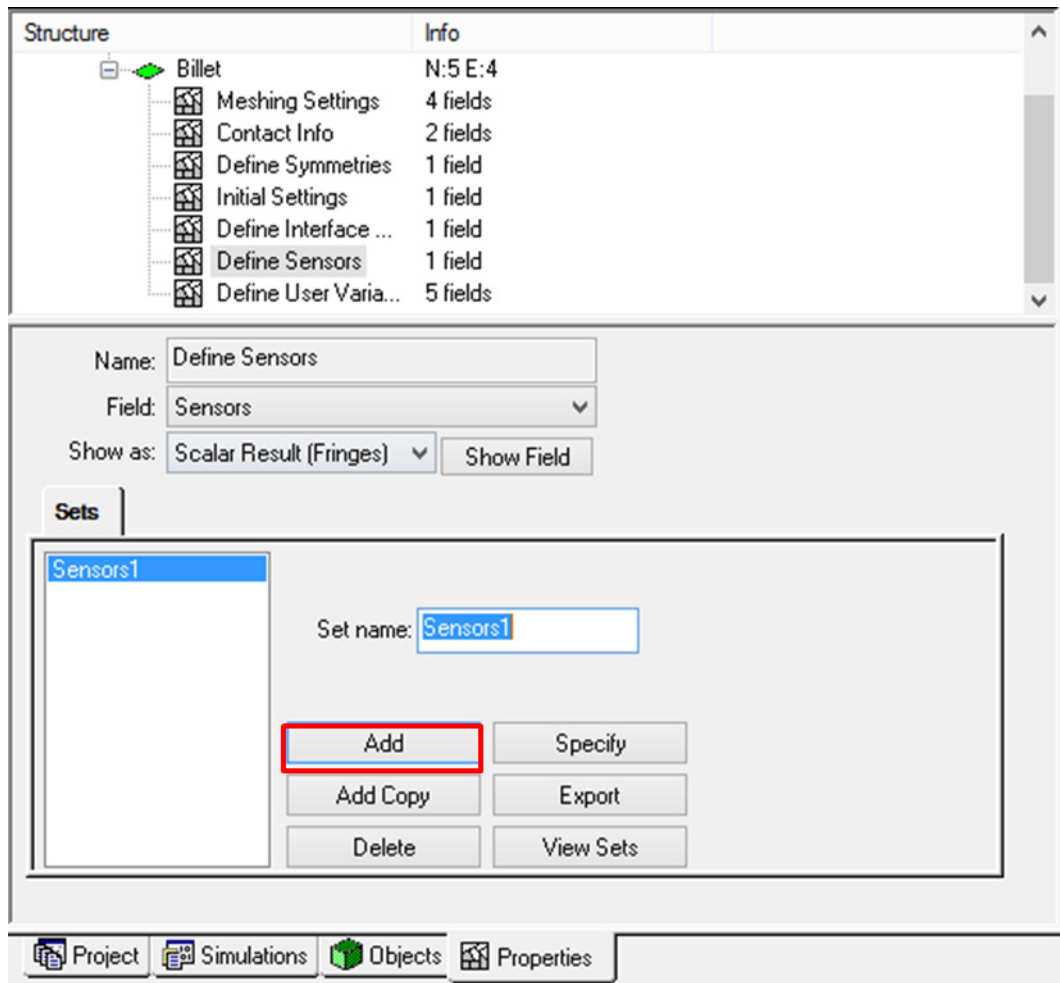
- 2) Importar Geometría a analizar, en los siguientes formatos;  
.may;.fg2;.dxf;.otl;.cont;.con;.up;.low;.sup;.inf;.iges;.igs;.dou;.st;.tit
- 3) Discretizar el continuo (definición de malla), puede ser malla burda, media o fina, como se muestra en la siguiente figura:



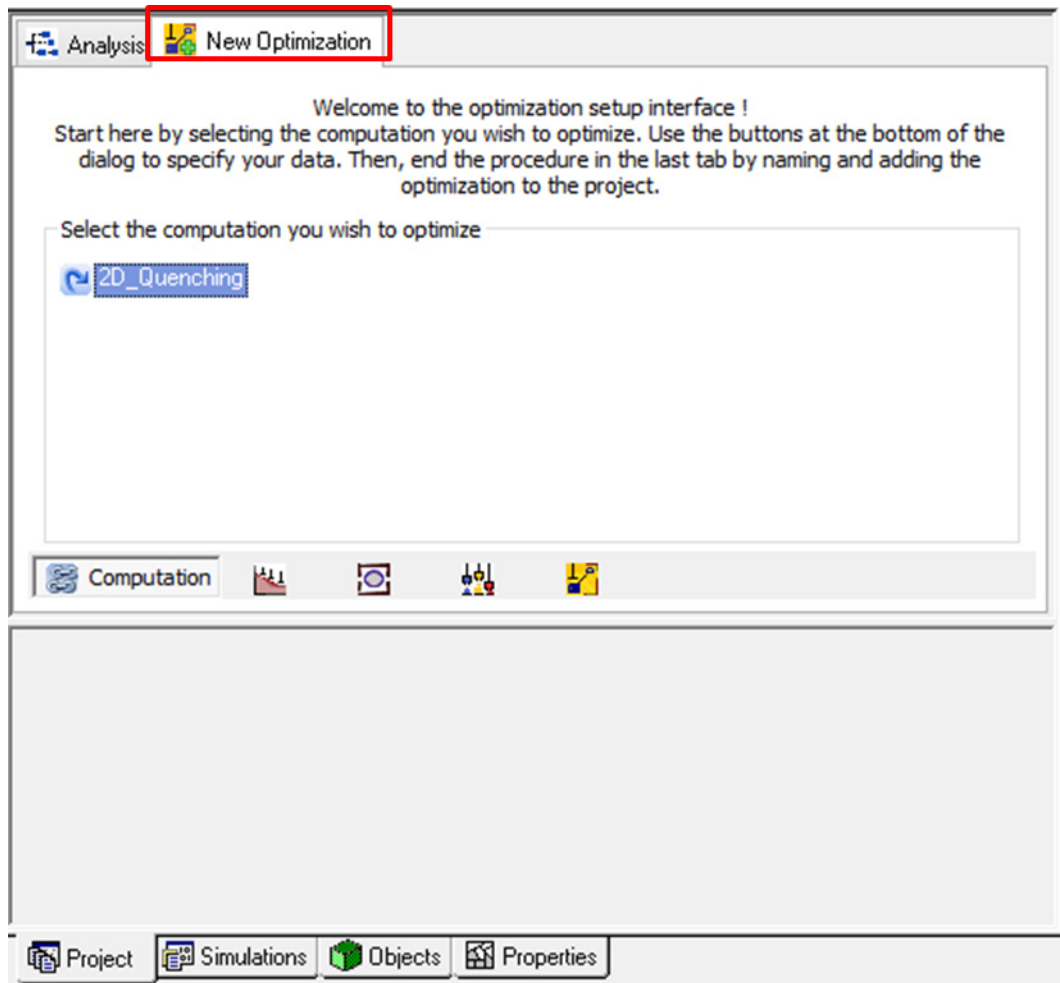
4) Definición de las condiciones iniciales por ejemplo propiedades térmicas, mecánicas, físicas (temperatura inicial, austenización, definición del calor específico a presión constante, definición de la conductividad térmica, material)



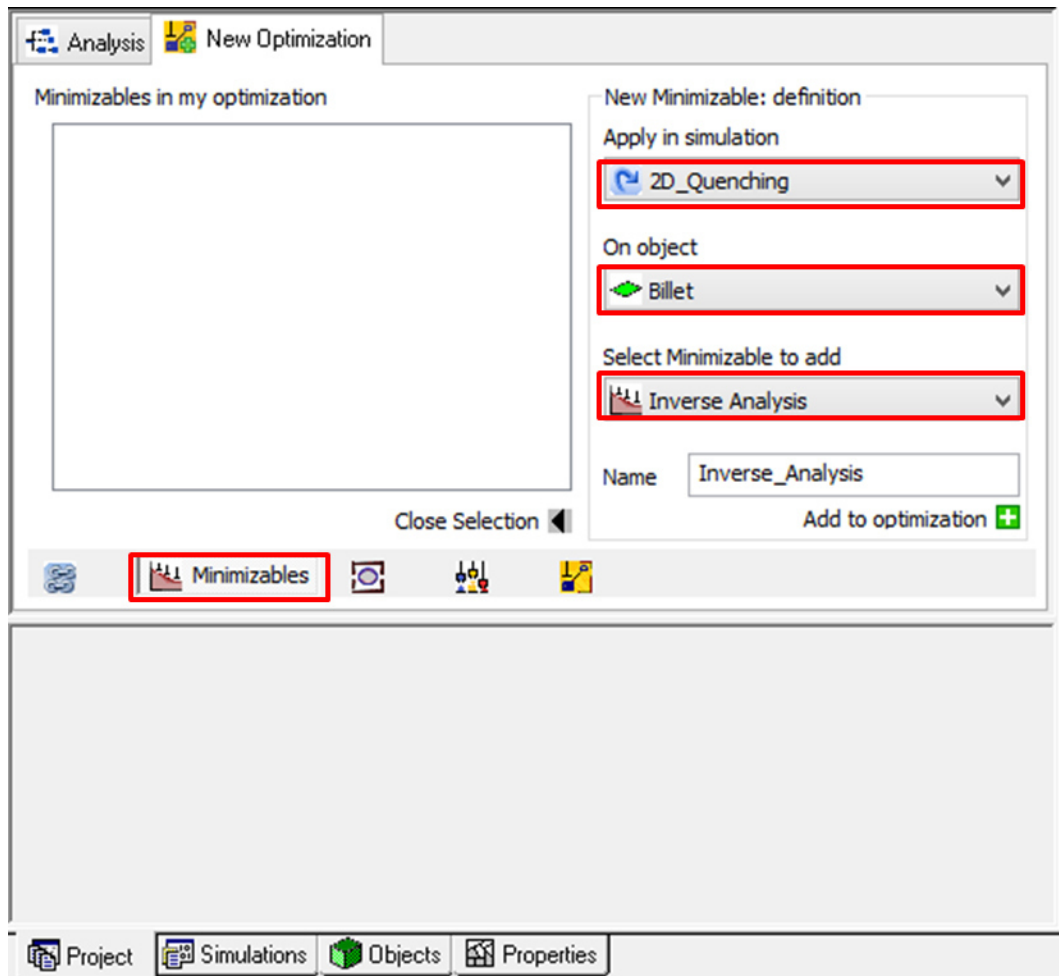
5) Definición de la coordenada (sensor virtual) donde se localiza físicamente el termopar para la adquisición de datos experimentales.



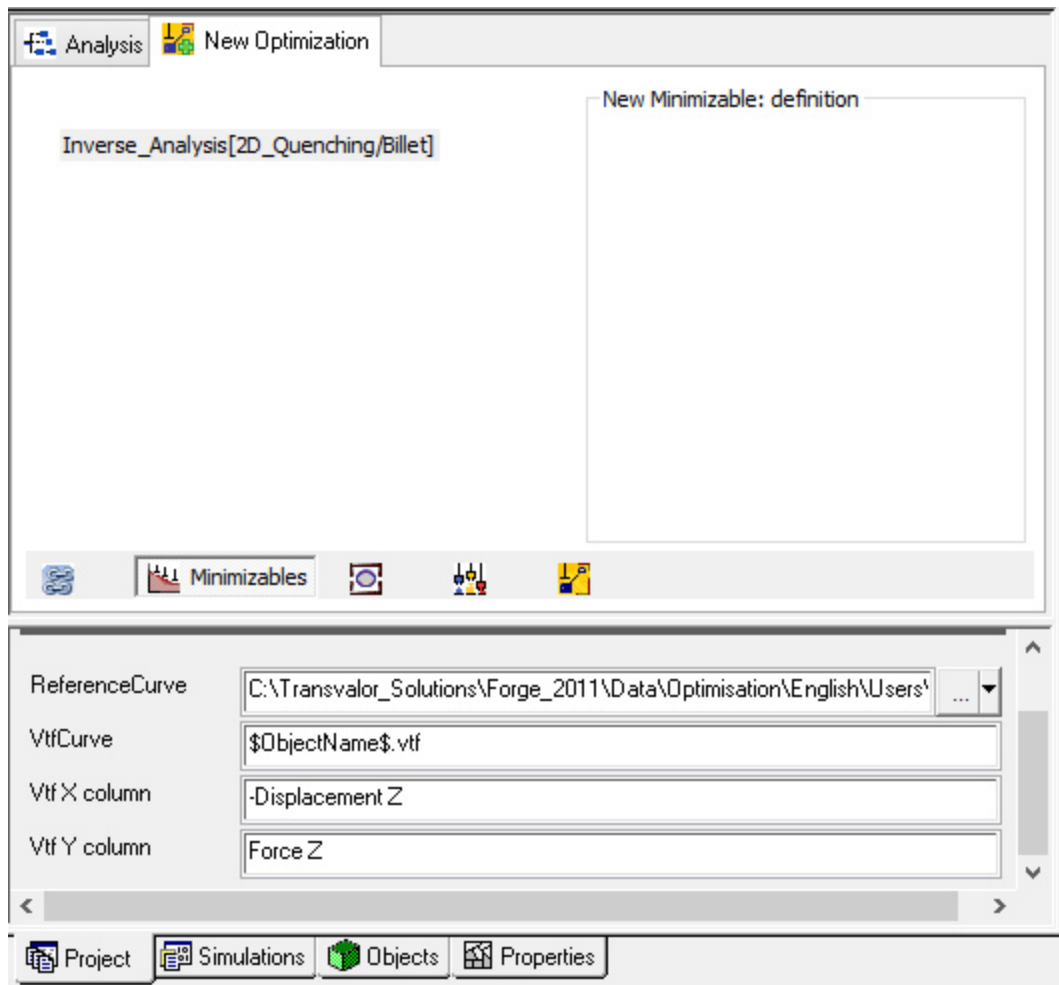
6) Una vez finalizado nos vamos a la parte de “New Optimization”, en la pestaña de Project, y seleccionamos el nombre de la simulación.



7) En la parte de “minimizables”, tenemos que definir el nombre de la simulación donde se aplicara el proceso de optimización, el nombre del objeto que será analizado y comparado, y seleccionar “Inverse Analysis” y añadir.

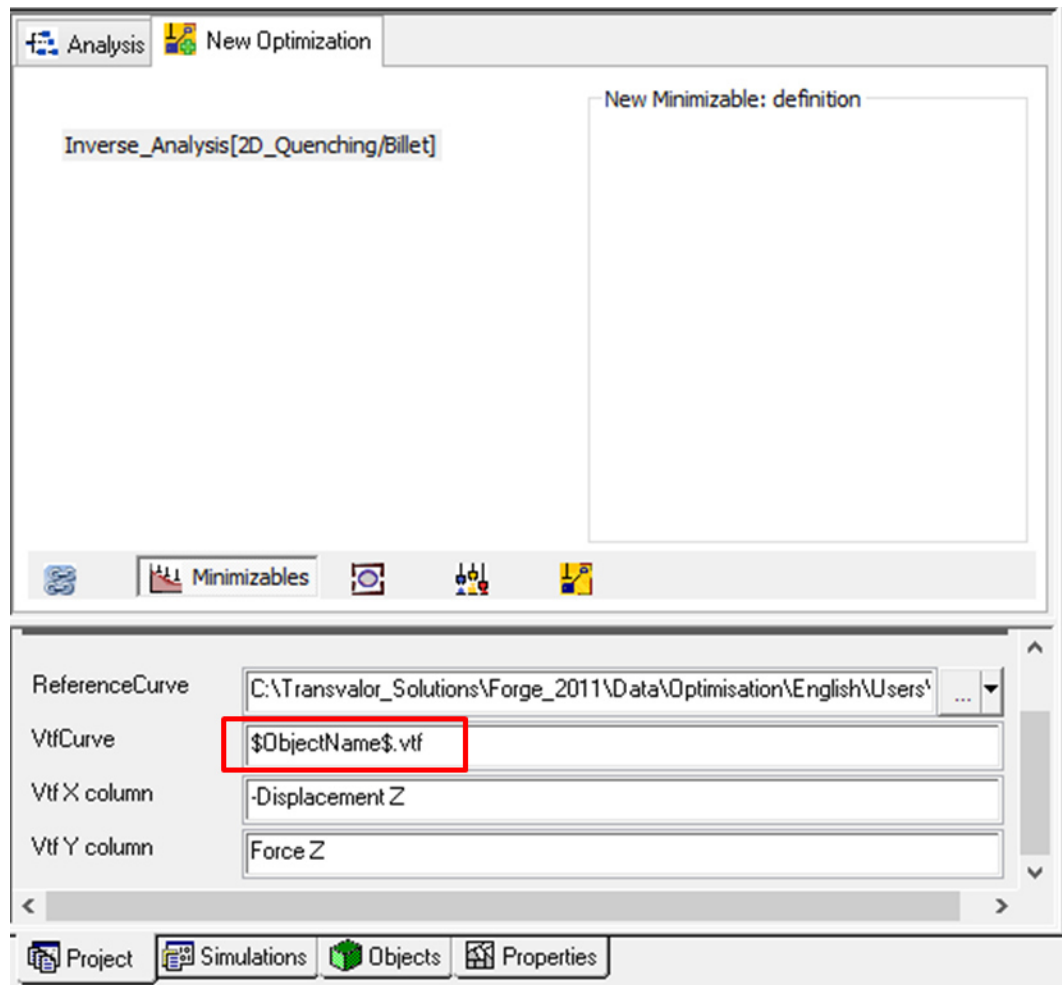


8) En la parte de “Reference Curve” debemos de seleccionar el archivo .txt que contenga los datos experimentales de la curva que se requiere analizar para encontrar el coeficiente de transferencia de calor.

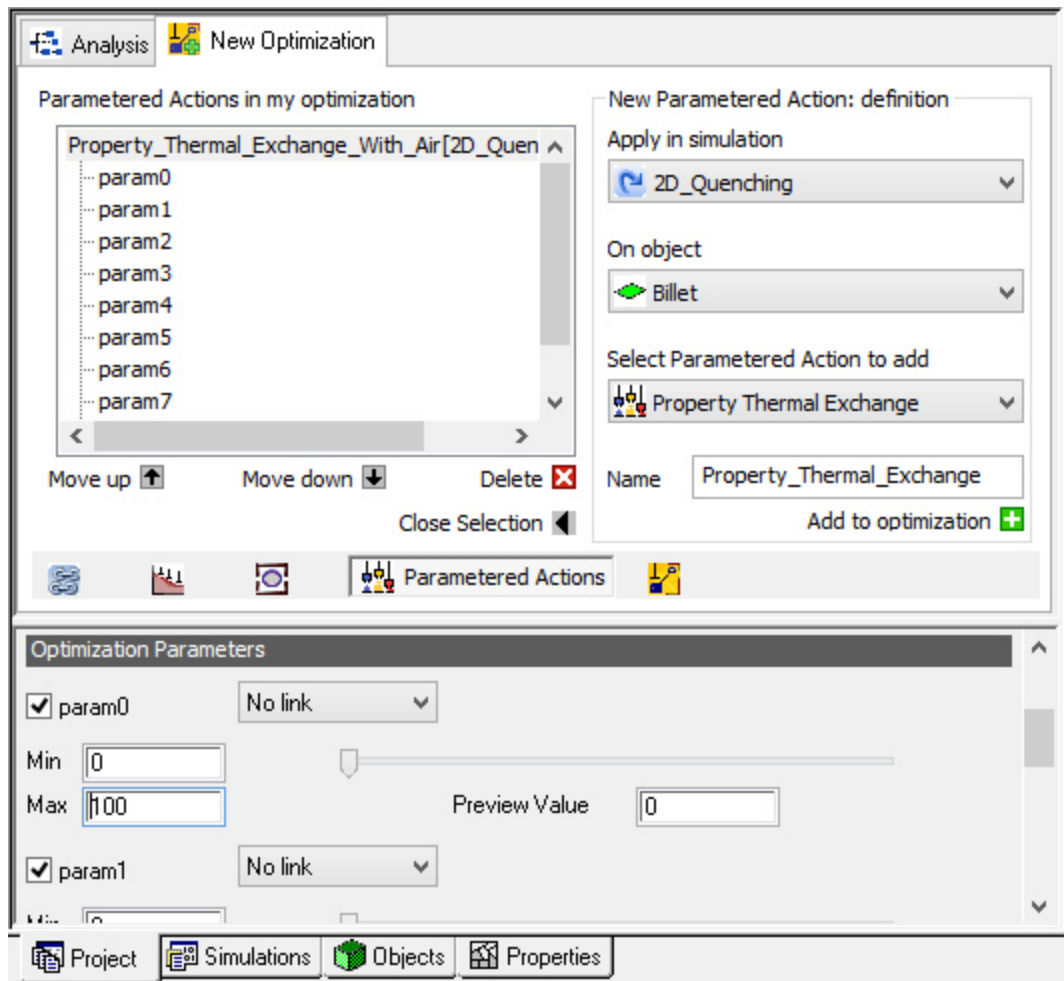


9) En la sección de VtfCurve, en "ObjectName", se define el nombre de la pieza a analizar tal y como se definió en la simulación del proceso, usualmente se nombra como "Billet", en la sección de VtfX column, usualmente se define la variable de tiempo en segundos, y en la parte de Vtf Y column se define la variable de temperatura.





10) Posteriormente en la parte de “Parametered Actions”, se selecciona `property_Thermal_Exchange`, y se comienzan a llenar las variables de temperatura con posibles datos de coeficiente de transferencia de calor, en la parte de `Param0` hasta `Param9`, definiendo valores mínimos y máximos, y este es el rango que se toma en consideración para comenzar con el cálculo de ajuste de temperaturas y aproximaciones de  $h$ .



11) Una vez terminada la definición de coeficientes de transferencia de calor, se procede a finalizar el preprocesamiento, en la parte de “Finalize Setup”, añadiendo el nombre de la optimización.

12) Se le da click derecho en el nombre de la nueva optimización, y se define el número de simulación que se desean resolver para tener mejores aproximaciones.

13) Una vez que se terminan de resolver las simulaciones, Forge enumera numéricamente en orden ascendente la mejor opción hasta la no tan mejor opción, y es posible obtener el coeficiente de transferencia de calor en función de la temperatura.

## Lista de Figuras.

Figura1.- Proceso de manufactura de la fabricación de anillos sin costura para la generación de energía, a) Proceso de prensado. b) Proceso de punzonado y corte. c) Proceso de rolado de anillo. ....	15
Figura2.-Diagrama de equilibrio Fe-C por arriba de 6.67 % en peso de carbón, la línea puntada corresponde al diagrama Fe-grafito (2).....	16
Figura3.- Ciclo térmico para un tratamiento térmico de normalizado, <i>a</i> , indica el calentamiento, <i>b</i> , indica el tiempo de sostenimiento a dicha temperatura, <i>c</i> , enfriamiento al aire, <i>d</i> , enfriamiento al aire o en horno (3). ....	18
Figura4.- efecto del refinamiento de tamaño de grano, a, tamaño de grano después del proceso de forja o laminado (ASTM 3), b, tamaño de grano después del proceso de normalizado (ASTM 6) (3). ....	18
Figura5.- Curva de enfriamiento y velocidad de enfriamiento del centro geométrico de una probeta de 1” templada en un medio de agua a 95°C agitada a una velocidad de 15m/min (5).....	21
Figura6.- Efecto de la cinética de transformación martensítica en la distorsión final después de templar en aceite (9).....	22
Figura7.- Evolución de la fracción de volumen de los carburos respecto a la temperatura de revenido (14).....	26
Figura8.- Diagrama de transformación durante el proceso de revenido del acero al Cr-Mo-V (15).....	27
Figura9.- Se muestra la influencia de la temperatura de revenido en la energía de impacto y dureza del 56NiCrNo7 después de ser templadas en aceite a 800°C (16). ....	27

Figura10.- Representación del flujo de calor a través de una pared. ....	29
Figura11.- Comparación de la temperatura calculada por ANSYS con la temperatura medida experimentalmente (17). ....	30
Figura12.- Coeficiente de transferencia de calor en función de la temperatura de diferentes materiales (19). ....	32
Figura13.- Distribución de temperaturas teóricas y experimentales durante el tratamiento térmico de temple de bolas de 3” diámetro (20). ....	33
Figura14.- Distribución de temperaturas teóricas corregidas y experimentales durante el tratamiento térmico de temple de bolas de 3” diámetro (20). ....	33
Figura15.- Comparación entre los resultados experimentales vs simulación de la microdureza en especímenes de AMS 6308 (pyrowear®53) (25). ....	36
Figura16.- Comparación de las mediciones experimentales vs resultados del software DANTE (25). ....	37
Figura17.- Fenómenos físicos considerados por Caner y Cemil para el desarrollo de la simulación de tratamiento térmico de temple (26). ....	38
Figura18.- Resultados de la simulación de distorsión de las 2 paredes estudiadas, los resultados fueron multiplicados por 10 para poder apreciar el movimiento (27). ....	39
Figura19.- Efecto de la velocidad de enfriamiento en la predicción microestructural del acero 4140 (28). ....	40
Figura20.- Diagrama que muestra el desarrollo del proceso referente a la parte experimental y simulación del proceso. ....	41

Figura21.- Arreglo de acomodo de anillos de prueba en condición de temple, el anillo A1, B2, C3 y D4 se instrumentaron con 20 termopares. ....	42
Figura22.- Se muestra la configuración a la que fueron sometidas las piezas de prueba aplicando un tratamiento térmico de normalizado, temple y revenido. ....	43
Figura23.- Ubicación de los termopares en la sección transversal del anillo para obtener curvas de Temperatura vs tiempo en cada una de las posiciones ilustradas. ....	44
Figura24.- Las líneas punteadas muestran la localización de los termopares, así como la estrategia del arreglo para obtener la mayor cantidad de datos posibles. ....	45
Figura25.- Resultados del modelo de WAN, dureza en función del tiempo. ....	46
Figura26.- Geometría de las probetas de material 42CrMo4 que se utilizaron para el experimento y obtención de relaciones entre las propiedades mecánicas (i.e. Esfuerzo de cedencia, Esfuerzo último, dureza.).....	48
Figura27.- localización de la probeta para tensión, utilizada para evaluar las propiedades mecánicas a una distancia de $T/4$ , donde T es el espesor. ....	50
Figura28.- localización de la probeta para tensión, utilizada para evaluar las propiedades mecánicas a una distancia de $T/2$ , donde T es el espesor. ....	51
Figura29.- Dimensiones de la probeta de tensión para evaluación de las propiedades mecánicas (37). ....	52
Figura30.- Dimensiones de la probeta de Impacto para evaluación de las propiedades mecánicas (38). ....	52
Figura31.- Se muestran los resultados de la prueba nombrada A1, cada grupo de 5 curvas representa un lado del anillo que se muestra en la Figura32. ....	54

Figura32.- Imagen de la pieza denominada A1. ....	55
Figura33.- muestra los resultados de la prueba denominada B2. ....	56
Figura34.- Imagen de la pieza denominada B2. ....	57
Figura35.- Curvas obtenidas de la prueba nombrada C3.....	57
Figura36.- muestra los resultados de la prueba denominada D4 en las diferentes localizaciones en toda la pieza.....	58
Figura37.- Se muestran los resultados referentes a las diferentes localizaciones de los termopares en la prueba A1, se muestran los comportamientos en diámetro exterior e interior y caras superior e inferior. ....	59
Figura38.- se muestran los resultados referentes a la prueba B2, comportamientos en diámetro exterior e interior y caras superior e inferior. ....	60
Figura39.- Se muestran los resultados referentes a la prueba C3, comportamientos en diámetro exterior e interior y caras superior e inferior. ....	61
Figura40.- Se muestran los resultados referentes a la prueba D4, comportamientos en diámetro exterior e interior y caras superior e inferior. ....	62
Figura41.- Se muestran los promedios de las curvas obtenidas experimentalmente por zonas del anillo B2, tomando en consideración solo los datos de los termopares cercanos a la superficie.....	63
Figura42.- Se muestran los resultados obtenidos de la simulación de procesos comparados con los resultados obtenidos del experimento para cada promedio de las diferentes zonas donde fue instrumentado este anillo, <i>línea solida (simulación)</i> , <i>línea semi-solida (experimenta)</i> , los resultados muestran buena correlación. (30) .....	64

Figura43.- Obtención de los coeficientes de transferencia de calor ( $h$ ) en función de la temperatura, estos resultados se utilizaron como condición frontera para la predicción de la distorsión en el anillo, así como para la obtención de las durezas en condición de temple (31).....	65
Figura44.- Se muestra como fueron utilizados los coeficientes $h$ 's en la pieza, Tprom 1-5 hace referencia a la curva que está ubicada a $0^\circ$ , Tprom 6-10 hace referencia a la curva que está ubicada a $90^\circ$ , Tprom 11-15 hace referencia a la curva que está ubicada a $180^\circ$ , Tprom 16-20 hace referencia a la curva que está ubicada a $270^\circ$ . ....	66
Figura45.- Superposición de las curvas de HTC obtenidas como resultado del análisis inverso.....	67
Figura46.- Esquema de la localización donde se extrajo la laja después de aplicar el tratamiento térmico de temple, para su evaluación de dureza. ....	68
Figura47.- Metodología empleada para realizar las indentaciones de dureza en sección transversal de anillo, posteriormente estos datos se compararon con los obtenidos de la simulación de procesos. ....	69
Figura48.- Resultados de la comparación entre valores experimentales vs valores de la simulación del proceso, los datos en color negro corresponden a los datos experimentales, los datos con color azul corresponden a los valores de la simulación del proceso. ....	70
Figura49.- Resultados en porcentaje de error, los datos en rojo representan valores muy por encima entre lo experimental vs simulación, y estos exceden el 15% de error tolerable. ....	71
Figura50.- Resultados obtenidos de la simulación de procesos utilizando los coeficientes $h$ dentro de FORGE®, y aproximación de la validación de los resultados experimentales vs simulación aproximándose a la linealidad, con una $R^2 = 0.97$ . ....	72

Figura51.- Comparación entre la geometría original a temperatura ambiente y la geometría después de templarla(X10.) .....	73
Figura52.- Resultados de dureza a una T = 530°C/6 horas. ....	75
Figura53.- Resultados de dureza a una T = 550°C/2 horas. ....	75
Figura54.- Resultados de dureza a una T = 550°C/10 horas. ....	76
Figura55.- Resultados de dureza a una T = 600°C/0.03 horas. ....	76
Figura56.- Resultados de dureza a una T = 600°C/6 horas. ....	77
Figura57.- Resultados de dureza a una T = 600°C/11 horas. ....	77
Figura58.- Resultados de dureza a una T = 650°C/10 hrs. ....	78
Figura59.- Resultados de dureza a una T = 650°C/2 horas. ....	78
Figura60.- Resultados de dureza a una T = 670°C/6 horas. ....	79
Figura61.- Comparación entre resultados experimentales vs simulación y % de Error en una localización de T/4 entre las mediciones, en el eje de las horizontal cada número representa una condición de temperatura y tiempo. ....	81
Figura62.- Comparación entre resultados experimentales vs simulación y % de Error en una localización de T/2 entre las mediciones, en el eje de las horizontal cada número representa una condición de temperatura y tiempo. ....	82



## Lista de Tablas

Tabla 1.- Designaciones y elementos en carbón y aceros aleados por la SAE (1). ....	11
Tabla 2.- Diseño de experimento para validar las propiedades mecánicas del grado de acero 42CrMo4, los últimos 5 experimentos se realizaron para evaluar la fiabilidad del experimento. ....	49
Tabla 3.- Resultados de dureza superficial de la prueba B2, la escala utilizada es Brinell. ....	72
Tabla 4.- Resultados obtenidos de propiedades mecánicas en la localización de T/4 en todas las direcciones longitudinal y transversal de las probetas. ....	74
Tabla 5.- Resultados obtenidos de propiedades mecánicas en la localización de T/2 en todas las direcciones longitudinal y transversal de las probetas. ....	80