



**Universidad
de Holguín**

FACULTAD
DE INGENIERÍA
DPTO. INGENIERÍA MECÁNICA

Comportamiento de la velocidad de enfriamiento por el método de centrifugación del acero AISI D2

Elianis Rodríguez Torres

M.Sc. Ing. Gilberto Israel Gurrí Villafruela

Holguín, 2022

Resumen

En la presente investigación se realiza un estudio de los procesos básicos de tratamientos térmicos empleados en el acero AISI D2, atendiendo de forma particular la velocidad de enfriamiento durante temple y la severidad con que este ocurre. Se muestran los resultados del análisis de las curvas de enfriamiento continuo para el proceso de temple en el sistema de enfriamiento por centrifugación del acero para herramienta AISI D2 en la cámara de centrifugación del análisis de estas se obtiene la temperatura de estabilidad térmica para cada proceso en los diferentes regímenes de rotación. Para el desarrollo de la investigación se utilizan métodos teóricos como el análisis-síntesis; histórico-lógico; la inducción-deducción; análisis documental; además se muestra el estudio realizado al proceso de enfriamiento de las herramientas empleando el método de elementos finitos (FEM) a través del software CAD SolidWorks 2016, mediante el cual se predicen los resultados de las posibles temperaturas de estabilidad térmica del proceso de enfriamiento de las herramientas aplicando el análisis de elementos finitos (FEA) y del comportamiento dinámico del flujo de enfriamiento empleando el módulo de Flow Simulation CFD y MEF.

Abstrac

In present it investigation AISI D2 accomplishes a study of the basic processes of heat treatments used in steel himself, taking care of the velocity of cooling during character of particular form and the severity this happens with. The results of the analysis of the curves of continuous cooling for the process of character in the cooling system for spin-drying of the steel for tool give the appearance of being AISI D2 in the camera of spin-drying of the analysis of these you get the temperature from thermic stability for each process in the different regimens of rotation. Syntheses utilize theoretic methods like analysis themselves for the development of investigation; Historic logician; Induction deduction; Documentary analysis; Besides the DAC SolidWorks shows the study accomplished to the process of cooling of the tools using the finite-element method (FEM) through the software itself 2016, the one by means of which the results of the possible temperatures of thermic stability of the process of cooling of the tools applying the analysis of finite elements (UGLY) and of the expeditious behavior of the flow of cooling using Flow Simulation's module CFD are predicted and MEF.

INDICE

Introducción:.....	1
Capítulo I. Fundamentación Teórica	6
1.1 Caracterización del acero AISI D2.....	6
1.2 Tratamientos Térmicos aplicados al acero AISI D2	8
1.2.1 Medios de enfriamiento. Enfriamiento de centrifugación.	8
1.3 Velocidad de enfriamiento. Coeficiente de Grossman.	9
1.4 Mecanismos de transmisión de calor.	14
1.4.1 Transmisión de calor por convección.....	14
1.5 Software CAD para la simulación de las variantes de enfriamiento.	15
1.5.1 Módulo de Flow Simulation.	16
1.5.2 Módulo de simulación.....	17
CAPÍTULO II. VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO POR EL MÉTODO DE CENTRIFUGACIÓN	19
2.1 Estudios del fluido por CFD en contorno cerrado de la cámara durante el proceso del enfriamiento por centrifugación, a altas, medias y bajas temperaturas de austenización.	19
2.1.1 Resultados del comportamiento del estudio para la determinación de la velocidad de enfriamiento.....	19
2.1.2 Estudio 1. Velocidad de enfriamiento para la temperatura de austenización de 980 °C....	19
2.1.3 Estudio 2. Velocidad de enfriamiento para la temperatura de austenización de 1050 °C.	22
2.1.3 Estudio 3. Velocidad de enfriamiento para la temperatura de austenización de 1080 °C..	24
24	
2.2 Velocidad de enfriamiento.....	26
2.3 Coeficiente de Grossman para las diferentes temperaturas de austenización.	27
CONCLUSIONES.....	28
Bibliografía.....	30

Introducción:

En la mayor parte del sector industrial de nuestro país se emplean los procesos de conformar en frío a partir de chapas, tal es el caso de la empresa Mecánica de Holguín Héroes del 26 de Julio, la cual brinda varios servicios de mantenimiento, reparación y fabricación de artículos fundamentalmente destinados para los equipos agrícolas, los cuales poseen un número importante de piezas conformadas. Estas piezas son elaboradas a partir de chapas, barras mediante varios procesos de conformado donde se destacan el corte, doblado, el embutido, roscado, entre otros. El proceso de conformar en frío requiere de un alto grado de precisión y resistencia ya que durante este se desarrollan varios mecanismos destructivos que actúan de forma simultánea, tales como: el desgaste, el micro astillado, el agrietamiento y la fluctuación de las cargas, los cuales pueden provocar las roturas de los punzones y matrices o incluso de otras de las partes, componentes de los troqueles, (Gurri Villafruela G.I & García Domínguez A 2019)

Los aceros más utilizados para la conformar en frío son los aceros de alto contenido de carbono y aleados principalmente al cromo, molibdeno y vanadio, entre los cuales se encuentra el acero de clase ledeburítica AISI D2. Este acero posee una resistencia media a la descarburación, una buena templabilidad, buena estabilidad dimensional y al agrietamiento durante el tratamiento térmico, alcanza altos niveles de dureza y una muy alta resistencia al desgaste, (ASM MetalsHandbook, 1991). Por sus características este acero puede ser utilizado para la fabricación de matrices de corte, perforado y estirado, para la deformación de los materiales por embutición y doblado, herramientas para el estampado, laminación y recortado en frío, punzones, dados y machos de roscar y trefilar, calibres y otros, (Borobeva G.A & Skladnova E.E, 2005).

La gran popularidad de este acero para la fabricación de herramientas está dada por la atractiva combinación de sus propiedades de resistencia y tenacidad, (Salunkhe S. & Fabijanic D., 2015), lo que a su vez está estrechamente relacionado con las tecnologías y procedimientos tecnológicos durante la aplicación del tratamiento térmico.



Para alcanzar el conjunto de propiedades adecuadas de las herramientas es necesario someter estas a un proceso de tratamiento térmico, el cual incluye varias operaciones básicas como el recocido, el temple y el revenido, cuya operación de mayor complejidad lo constituye el temple. La operación de temple de los aceros para herramientas es sumamente compleja y está condicionada a los grados de aleación de los materiales, configuraciones geométricas, condiciones de cargas durante la explotación de las herramientas y a las condiciones tecnológicas existentes. De aquí que se deba diseñar correctamente el proceso de calentamiento y enfriamiento para así garantizar las propiedades deseadas de dureza, resistencia y tenacidad de estos materiales, (Gurri Villafruela G.I & Pérez Rodríguez R., 2019). La operación de temple incluye un calentamiento a altas temperaturas (austenización), para facilitar la transformación hacia la austenita, seguido de un proceso de enfriamiento controlado (temple), para obtener las propiedades y estructuras deseadas. Las microestructuras obtenidas están relacionadas con las velocidades de enfriamiento empleadas, (Surberg Cord Henrik, 2014). El enfriamiento durante la operación de temple es considerado también como un proceso muy complejo debido a que en este ocurren de forma simultánea distintos procesos tales como: la transferencia de calor, las transformaciones de fases y las interacciones mecánicas. Estos constituyen campos físicos que interactúan entre sí o a través de variables de estado, siendo la transferencia de calor el evento físico que conduce a activar los otros procesos y en muchos de los casos es el único proceso donde se puede influir directamente, (BožidarLišcic, 2010). Es durante el enfriamiento donde mayormente se desarrollan los mecanismos de roturas o agrietamientos, los cuales están definidos por los altos estados tensionales causados por las diferencias de temperatura en el volumen de las piezas enfriadas, generalmente cuando el enfriamiento se realiza de forma brusca, lo que está determinado por un conjunto de factores, tales como: la composición química, las propiedades físicas, la temperatura, la dirección y la velocidad del movimiento del medio de enfriamiento, entre otros.

En la Universidad de Holguín se han realizado estudios relacionados con el tema del temple por centrifugación para el acero AISI D2 a bajas, medianas y altas temperaturas de austenización, Gurri Villafruela G.I, P. R. (2014,2019), cuando el



enfriamiento se realiza de forma continua, donde se determinó su influencia sobre la dureza del acero AISI D2. Viada R.(2020). Realiza el análisis de la influencia del enfriamiento en el acero estudiado basado en los métodos CFD y FEM. Los ingenieros mecánicos, Lobaina J, (2021), Sánchez T, (2022) y Fajardo B, (2022), realizaron estudios y determinaron los parámetros termodinámicos que rigen el temple con enfriamiento por centrifugación del acero AISI D2, a las temperaturas de austenización de 980 °C, 1 050 °C y 1 080 °C a regímenes de frecuencia de rotación de 8,33 s⁻¹, 16,67 s⁻¹ y 25 s⁻¹ en contorno cerrado de la cámara de enfriamiento.

En la presente investigación, debido a lo costoso y complejo que pudieran resultar los análisis experimentales, se emplean herramientas computacionales con el fin de reducir costos y tiempo obteniendo resultados satisfactorios. La investigación está basada en el empleo de las herramientas CAD del software SolidWorks 2016, por medio del módulo Simulation, basado en el método de elementos finitos (FEM), el cual nos brinda la posibilidad de simular el enfriamiento por centrifugación expuesto por Gurri Villafruela G.I & Pérez Rodríguez R., (2019), para obtener de esta forma las curvas del proceso de enfriamiento, así como, determinar los coeficientes de Grossman intensidad del enfriamiento para dicho proceso.

Las investigaciones realizadas hasta el momento se han basado en la determinación de los parámetros termodinámicos durante el temple con enfriamiento por centrifugación, pero aún se desconoce la velocidad con que se desarrolla este proceso, lo que esta interrogante nos plantea el siguiente **Problema científico de la investigación**: En la actualidad se desconoce el comportamiento de la velocidad de enfriamiento por centrifugación durante el temple de las herramientas de acero para conformar en frío AISI D2.

Objeto de estudio: Determinar la velocidad de enfriamiento por el método de centrifugación y determinar el coeficiente de Grossman para este proceso utilizando los métodos de elementos finitos (FEM).

Campo de estudio: se enmarca en la simulación del proceso de enfriamiento de las herramientas de acero para conformar en frío AISI D2 empleando los métodos FEM.



Objetivo general: Realizar el estudio del comportamiento de la velocidad de enfriamiento por centrifugación mediante FEM y establecer un coeficiente de Grossman para cada régimen estudiado de este proceso.

Hipótesis: si se emplea los métodos de estudio por CFD y FEM, entonces se podrá obtener la curva de la velocidad de enfriamiento y determinar el adecuado coeficiente de Grossman para el proceso de enfriamiento durante el temple por centrifugación del acero AISI D2.

Tareas de Investigación:

1. Realizar una revisión bibliográfica en correspondencia con el tema de investigación.
2. Hacer una descripción de los medios y tipos de enfriamiento aplicados a las herramientas fabricadas del acero AISI D2 para la operación del temple.
3. Determinar mediante CFD y FEM las curvas de enfriamiento en el contorno cerrado de la cámara de enfriamiento para el acero AISI D2.
4. Determinar la velocidad desarrollada durante el temple con enfriamiento por centrifugación del acero AISI y definir el coeficiente de Grossman para este proceso.

Métodos de investigación utilizados

Métodos teóricos:

- *Histórico-lógico:* fue utilizado para distinguir los antecedentes y fundamentos teóricos de la investigación al encontrarse resultados relevantes a nivel nacional e internacional.
- *Análisis- síntesis:* permitió dar cumplimiento a las tareas al seguir la lógica de la investigación.
- *Inducción-deducción:* utilizado en la investigación de otros casos de estudios relacionados con el tema, facilita la identificación de aspectos generales que permiten la formulación del análisis teórico.

Métodos Empíricos



- Consulta a expertos: permite que la investigación se sustente, además en conocimientos de especialistas de la temática de investigación
- Análisis documental: utilizado en la búsqueda de información de estudios relacionados con el tema de la investigación.
- CFD: Para simular el enfriamiento de las herramientas de troquelado en frío fabricadas del acero AISI D2.

Resultados esperados Con la realización de la presente investigación se podrá determinar el comportamiento de la velocidad de enfriamiento por centrifugación de las herramientas de troquelado en frío fabricadas del acero AISI D2.



Capítulo I. Fundamentación Teórica

1.1 Caracterización del acero AISI D2.

El AISI D2 es uno de los aceros trabajados en frío más utilizados, con alto contenido decarbono y de cromo. La disolución de los elementos de aleación y la precipitación de los carburos dan como resultado su alta resistencia mecánica al desgaste y dureza. Las propiedades están determinadas principalmente por los elementos de aleación, el tamaño de grano de austenita, el ancho del listón de martensita, la densidad de dislocaciones y los precipitados. La correlación predominante entre los precipitados y la tenacidad implica su cantidad, tipo, distribución de tamaño, morfología, estabilidad y distribución espacial.

Este acero se caracteriza por poseer:

- Alta resistencia al desgaste
- Alta resistencia a la compresión
- Alta templabilidad
- Alta templabilidad dimensional durante el temple
- Buena estabilidad frente al revenido
- Buena tenacidad
- Buen acabado superficial
- Alto límite de rotura a la flexión

Tabla1. Composición química del acero AISI D2(Key toSteelsDatabase, 2004)

Acero		Composición Química en %								
Marcado	Norma Internacional	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	V	Fe
D2	AISI / SAE									
1.2379	DIN	1,45	0,15	0,15	Hasta	Hasta	11,0	0,4	0.15	~85
X155CrMo12.1	JIS	-	-	-	0,03	0,03	-	-	-	
SKD 11	GOST	1,65	0,35	0,4			12,5	0,6	0.30	
X12M (X12Φ)										
Temperatura de los puntos críticos: $Ac_1 = 830\text{ °C}$, $Ac_3(Ac_m) = 855\text{ °C}$, $Ar_1 = 750\text{ °C}$, $Mi = 230\text{ °C}$										



Las propiedades físicas de este acero en estado templado y a temperaturas ambientes y elevadas se muestran en las tablas 2 y 3

Tabla 2. Propiedades físicas del acero AISI D2 templado y revenido con una dureza de 62 HRC a temperatura ambiente y a elevadas temperaturas (Uddeholm, 2016)

Temperatura	68°F (20°C)	390°F (200°C)	750°F (400°C)
Densidad			
lbs/in ²	0,277	0,276	0,275
kg/m ³	7695	7650	7600
Coefficiente de expansión térmica			
Baja temperatura de revenido			
en °F desde 68°F	-	6,8 x 10 ⁻⁶	-
en °C desde 20°C	-	12,3 x 10 ⁻⁶	-
Alta temperatura de revenido			
en °F desde 68°F	-	6,2 x 10 ⁻⁶	6,7 x 10 ⁻⁶
en °C desde 20°C	-	11,2 x 10 ⁻⁶	12 x 10 ⁻⁶
Conductividad térmica			
Btu in/ft ² h °F	139	146	159
W/m °C	20	21	23
Módulo de elasticidad			
Ksi	30 450	29 000	26 100
Mpa	210 000	200 000	180 000
Calor específico			
Btu/lb°F	0,11	-	-
J/kg °C	460	-	-



Tabla 3.Relacion de la dureza (HRC) con los valores de resistencia a la compresión del acero AISI D2(UddeholmSleipner, Sverker, 2016)

Dureza, HRC	Límite de resistencia a la compresión, Rc 0,2	
	Ksi	MPa
62	319	2200
60	312	2150
55	276	1900
50	239	1650

1.2 Tratamientos Térmicos aplicados al acero AISI D2

El tratamiento térmico del acero D2 consiste en la aplicación de tres operaciones fundamentales: el recocido, el temple y el revenido. El recocido puede ser completo, incompleto (de relajación) e isotérmico. El temple se realiza empleando distintas temperaturas de austenización, o sea, a bajas temperaturas entre (960 - 980) °C, a temperaturas intermedias (1000 - 1050) °C, y a altas temperaturas (1050 - 1100) °C, seguido del revenido a temperaturas desde 200°C hasta 590°C, todo en dependencia del tipo de herramienta, operación tecnológica a realizar y propiedades mecánicas deseadas. Nuestro estudio lo basaremos para la operación de temple según el régimen propuesto por (Gurri Villafruela G.I., 2014), el cual consistió en un calentamiento a temperaturas de austenización de 1080°C, (Gurri Villafruela G.I & García DomínguezA, 2019),seguido de un enfriamiento forzado especializado por centrifugación.

1.2.1Medios de enfriamiento. Enfriamiento de centrifugación.

Para el enfriamiento del acero AISI D2 se han empleado varios tipos y formas de enfriamiento tales como: el aire, chorro de aire/gas (aire caliente), aceites sintéticos, (BožidarLiščic, 2010), (Uddeholm, 2016), (Acero SISA, 2017) baños de metales y sales fundidas, (Gurev A.M &Voroshnyn L.G., 2005); (Brison W.E., 2015); tratamientos criogénicos, (NandakumarPillai, 2017); al vacío, (Wołowiec E., 2012), (Jones W.R,



1996), (TheHerringGroup, Inc., 2018); en campos magnéticos, (Bernshtein, 1987), (Jaramillo R. A.-L., 2004), (A. B. Alifanov, 2012) y eléctricos, (Sibgatulin G.G, 1982); con rayos láser, (B.A. Ahmed, 2012), (Hongtao, 2013), (Jai Hindus.S, 2014); en lecho hirviente y bajo tratamiento Aero termo acústico, (Borobeva G.A &Skladnova E.E, 2005), (ASM, MetalsHandbook, 1991), (Totten GE B. C., 1993); sin embargo, aún persisten deficiencias en cuanto a la uniformidad del enfriamiento lo que constituye una vía para la aparición de defectos como el temple en manchas, macro y micro agrietamientos, imperfecciones geométricas y un aumento sustancial de las tensiones internas, desperfectos que propician una disminución de las propiedades de resistencia, tenacidad y de durabilidad de las piezas tratadas. El grado de agitación del medio (magnitud y turbulencia del flujo en la zona del enfriamiento) juega un papel determinante en lo referente a la severidad (velocidad) del enfriamiento, (Totten GE W. G., 1996), pues este proporciona una mayor uniformidad de la transferencia de calor durante todo el proceso y permite minimizar las imperfecciones físicas y estructurales en el acero, (Canale&Totten, 2005). En el presente trabajo se muestran los estudios realizados mediante la aplicación de las herramientas CAD, a un novedoso método de enfriamiento, (Gurri Villafruela G.I., 2014), al acero AISI D2, el cual consiste en someter el acero austenizado a un enfriamiento forzado utilizando el efecto del intercambio de calor convectivo generado dentro de una cámara de enfriamiento bajo la influencia de la aplicación de frecuencias de rotación.

1.3 Velocidad de enfriamiento. Coeficiente de Grossman.

La mayoría de los tratamientos de térmicos se realiza con enfriamiento continuo, y por consiguiente, normalmente se encuentran los diagramas de CCT en la práctica comercial. Pocos procesos del tratamiento térmico involucran el enfriamiento paso a paso. Si las velocidades de enfriamiento son lentas, las estructuras corresponden más estrechamente con las regiones superiores del diagrama IT. Si las velocidades de enfriamiento son más rápidas tendrán un efecto considerable en la temperatura inicial y progreso de la transformación. De ello se deduce que se necesita algún tipo de curva de enfriamiento continuo. Además, el diagrama de CCT puede ser una herramienta



para evaluar la templabilidad si se conoce la velocidad de enfriamiento requerida a la profundidad mínima (o un diámetro de barra equivalente) para el temple.

La velocidad de enfriamiento durante el temple se controla, seleccionando una concentración adecuada del medio de enfriamiento; logrando una velocidad y dirección del movimiento adecuadas y por medio de la agitación (mediante rotación o balanceo) de las propias piezas. A través de la aplicación del conjunto de estas formas anteriormente mencionadas podemos garantizar:

1. El rompimiento de la camisa de vapor de la superficie de la pieza la cual entorpece la evacuación del calor.
2. Una velocidad de enfriamiento desigual en distintos estadios del temple, rápido – en el comienzo; lento – en el final.
3. Una regulación exacta, en amplio rango, de la velocidad y uniformidad del enfriamiento durante el temple (de tal forma que, si el movimiento del medio de enfriamiento durante el temple y de las propias piezas es de forma divergente conlleva al aumento de la velocidad de enfriamiento, por el contrario cuando convergen esta disminuye.)
4. Una máxima reducción del período (estadio) de ebullición de la camisa de vapor del medio de temple y del enfriamiento reglamentado, con la obtención de relativamente pequeñas diferencias de temperatura en la sección de la pieza, lo que permite disminuir su deformación.

Una de las formas de mejorar las condiciones del enfriamiento de una amplia gama de piezas durante la aplicación del tratamiento térmico, consiste precisamente en la preparación de estas para el temple. Las partes finas, peligrosas con relación a la formación de grietas como resultado de un enfriamiento muy rápido se protegen con dispositivos de compensación o se cubren con asbesto. Durante el temple continuo, las piezas se colocan en dispositivos (bandejas, cestas, perchas, mayas y otros) o en el transportador del horno con una densidad de carga, tal que se garantice un enfriamiento uniforme (individual) de cada una de las piezas. Las piezas de



configuración compleja y con paredes finas, las que poseen en estado de calentamiento una pequeña resistencia, se templen en máquinas de temple, prensas, entre discos comprimidos y otros dispositivos. La uniformidad del enfriamiento depende también de la forma de entrada de las piezas al medio de enfriamiento. Para obtener un enfriamiento uniforme de las partes gruesas de las piezas, estas se introducen primero para que se enfríen con mayor rapidez y permanezcan por un espacio mayor de tiempo que las partes finas figura 1 (e). En la figura 1 se muestra un ejemplo de inmersión de algunas configuraciones de piezas en el medio de enfriamiento. (Gurri G.I, P.R ,2019)

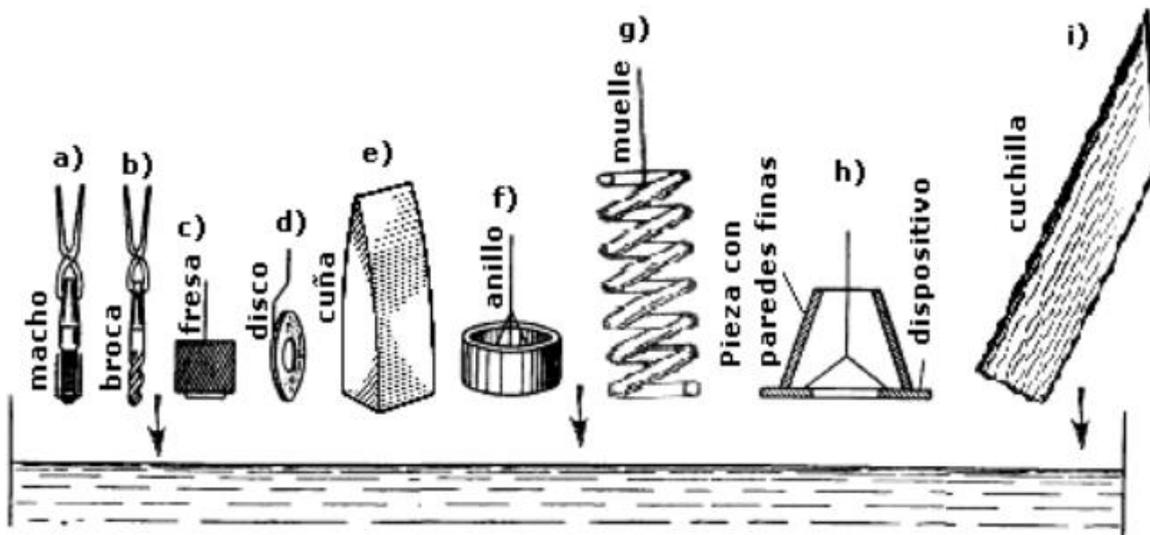


Fig1. Formas recomendadas para la inmersión de piezas en baños de enfriamiento (Gurri G.I, P.R ,2019)

Coeficiente de Grossman

El coeficiente de Grossman caracteriza la severidad del enfriamiento, el cual expresa la capacidad del medio de enfriamiento para extraer el calor desde un cuerpo caliente, lo cual puede ser expresado en términos de los valores de "H". El factor de severidad del enfriamiento de Grossman "H" está basado en la Ley del enfriamiento de Newton (Bozidar Liscic, et al. 2010):



Coeficiente de Grossman se determina por la siguiente expresión:

$$H = \frac{h}{2\lambda}$$

Coeficiente de transmisión de calor:

$$dQ = \alpha \times A(T_s - T_\infty) \times dt$$

Para un cilindro:

$$dQ = \frac{\lambda}{r} \times A(T_c - T_s) \times dt$$

Dónde:

Q – es el calor transferido desde la superficie del cuerpo hacia el ambiente (J).

h - es el coeficiente de transferencia de calor; (W/m²·K).

A - es el área superficial; (m²).

T_s – es la temperatura superficial del cuerpo; (K).

T_∞ - es la temperatura ambiente; (K).

T_c - es la temperatura en el centro del cilindro; (K).

r – es el radio del cilindro; (m).

d - es el diámetro del cilindro; (m).

λ – es la conductividad térmica; (W/m·K).

t – es el tiempo; (s).

Si consideramos el valor de constante (no dependiente de la temperatura y de las posibles transformaciones estructurales), entonces es posible por medio del uso del valor de “h” definir (como primera aproximación) la capacidad del medio de enfriamiento, siempre que el cuerpo este axialmente simétrico. Hasta el momento se han determinado algunos valores de “H” para determinados medios de enfriamiento y grados de agitación, tales como para el agua, el aceite y algunas sales, lo cual ha servido para demostrar que los grados de agitación no son uniformes y no están



definido de formas precisas e incluso para grados comparables de agitación existen diferencias sustanciales entre los valores correspondientes de “H”. Existen además diferentes métodos de cómo evaluar los valores de “H” de un determinado medio de enfriamiento. Uno de los más simples es utilizando las tablas de valores recomendados, donde como ya se mencionó los grados de agitación no están definidos de forma muy precisa y por medio del uso de los diagramas de Lamont, Figura 2, el cual es válido para el centro de una barra cilíndrica de forma tal que $r/R=0$, donde r – es el radio de la parte no templada de la sección transversal de la barra y R – es el radio de la barra.

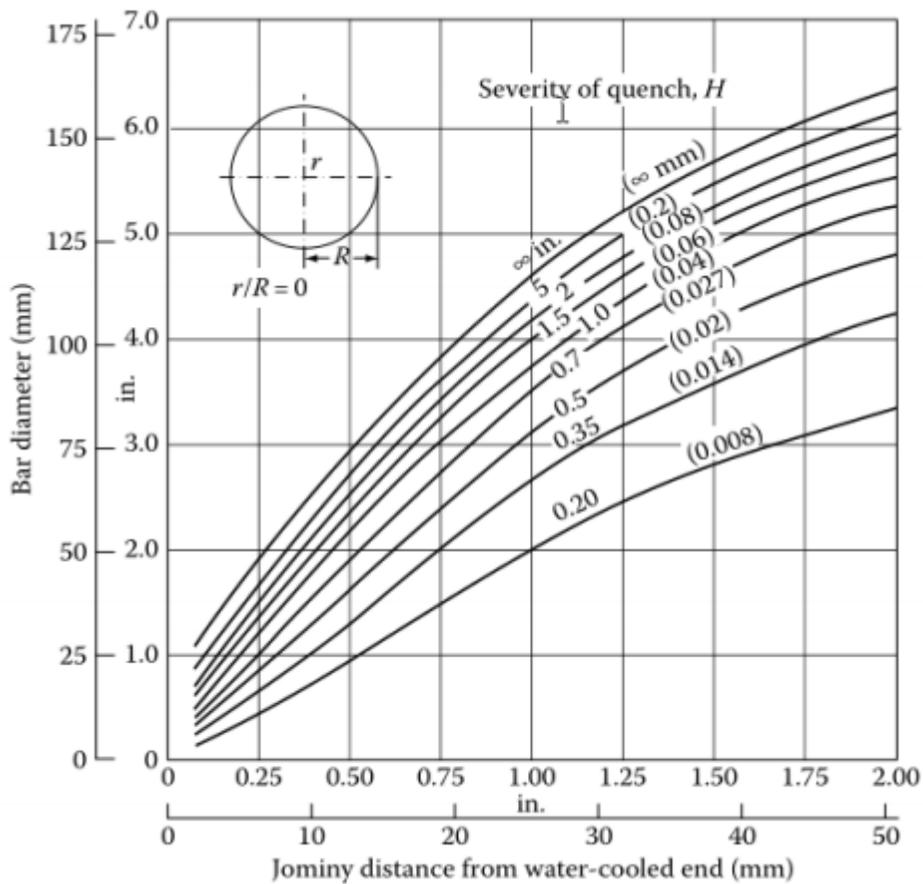


Figura 2. Diagrama de Lamont para el centro de una barra redonda ($r/R=0$)



1.4 Mecanismos de transmisión de calor.

Las leyes de transmisión de calor tienen primordial importancia en el diseño y funcionamiento de múltiples equipos como generadores de vapor, hornos, pre calentadores, intercambiadores, refrigeradores, evaporadores, condensadores, en innumerables aplicaciones industriales, (Domingo, 2011). En muchos casos el objetivo principal es obtener las máximas velocidades de transmisión de calor por unidad de superficie, compatibles con los factores económicos. En otros casos, como en los cambiadores, recuperadores y regeneradores, el objetivo es el aprovechamiento y recuperación del calor. Finalmente, otras veces interesa hacer mínimas las pérdidas de calor mediante aislamientos. Los mecanismos básicos de transmisión del calor son **conducción, convección y radiación**. Sin embargo, en la mayoría de los casos el calor se transfiere simultáneamente en varias de estas formas, (Cengel, 2007).

1.4.1 Transmisión de calor por convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural producida solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, por ejemplo, el aire con un ventilador o el agua con una bomba. Sólo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio. En la naturaleza, la mayor parte del calor ganado por la atmósfera por conducción y radiación cerca de la superficie, es transportado a otras capas o niveles de la atmósfera por convección, (Domingo, 2011).

Un modelo de transferencia de calor H por convección, llamado ley de enfriamiento de Newton, es el siguiente: (Cengel, 2007)

$$H = h A (T_A - T)$$

Donde:

h - se llama coeficiente de convección, en $W / (m^2 \cdot K)$,

A - es la superficie que entrega calor con una temperatura



T_A - el fluido adyacente, que se encuentra a una temperatura T , como se muestra en el esquema de la figura 2.

La tabla 4 lista algunos valores aproximados del coeficiente de convección h .

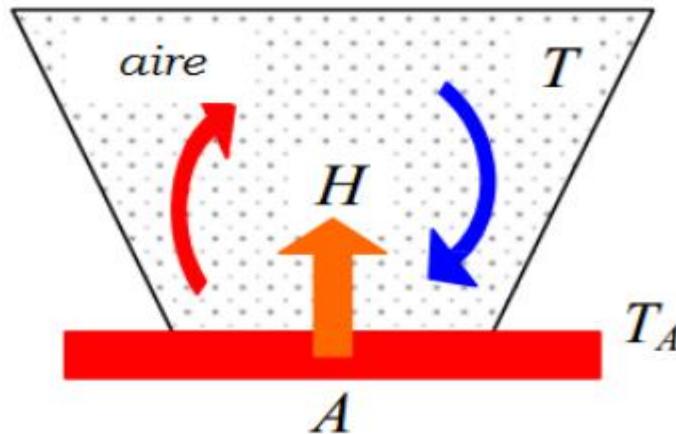


Figura 2. Proceso de convección.

El flujo de calor por convección es positivo ($H > 0$) si el calor se transfiere desde la superficie de área A al fluido ($T_A > T$) y negativo si el calor se transfiere desde el fluido hacia la superficie ($T_A < T$).

Tabla 4. Valores típicos de los procesos de convección (Cengel 2007)

Proceso	h (W/m K)	Proceso	h (W/m K)
Convección libre		Convección forzada	
Gases	2 – 25	Gases	25 – 250
Líquidos	50 - 1000	Líquidos	50 - 20000

1.5 Software CAD para la simulación de las variantes de enfriamiento.

En el mercado laboral competitivo de hoy en día, los profesionales de tecnología CAD no solo realizan diseños (elaboran simulaciones, innovaciones, visualizaciones y además se comunican) para impulsar nuevas ideas y sus carreras. SOLIDWORKS



proporciona un software potente, atractivo y práctico para entender y desarrollar diseños para el mundo real. El software 3D integrado, el plan de estudio y las lecciones facilitan el aprendizaje y la enseñanza del desarrollo de los diseños, y hacen que sea emocionante utilizarlo, (SolidWorksCorporationDassaultSystèmes, 2016). SOLIDWORKS ofrece un amplio conjunto de herramientas probadas (diseño de ingeniería, simulación mecánica y de flujo, diseño sustentable, documentación eléctrica y visualización) en un paquete de software integrado y fácil de comprender, (SolidWorksCorporationDassaultSystèmes, 2016).

1.5.1 Módulo de Flow Simulation.

La dinámica de fluidos de ingeniería (IFD) es una nueva variedad de software de dinámica de fluido computacional (CFD) que permite a los ingenieros mecánicos simular el funcionamiento de aplicaciones de transferencia de calor y flujo de fluidos con potentes herramientas en 3D intuitiva y fácil de utilizar. La IFD se rige por criterios y objetivos de ingeniería que proporcionan a los ingenieros de producto la percepción técnica necesaria para responder a las cuestiones que surgen en el proceso de desarrollo del producto, (SolidWorksCorporationDassaultSystèmes, 2018). SolidWorks® Flow Simulation está basado en los mismos criterios matemáticos que el software de dinámica de fluido computacional (CFD) tradicional, aunque son las ventajas que agilizan y facilitan su uso y que no implican renunciar a una solución sólida y extraordinariamente precisa las que lo diferencian del resto. Diseñado para abordar los retos de ingeniería de CFD, SOLIDWORKS Flow Simulation permite a los ingenieros aprovechar la integración con CAD, las funciones de mallado geométrico avanzado, la convergencia de soluciones y la determinación automática de regímenes de flujo, sin renunciar a la facilidad de uso ni a la precisión. El software SOLIDWORKS Flow Simulation elimina la complejidad del análisis de fluidos y permite a los ingenieros simular fácilmente el flujo de fluidos, la transferencia de calor y las fuerzas de fluidos para poder investigar el impacto que tendrá el flujo de líquido o gas en el rendimiento del producto, (SolidWorksCorporationDassaultSystèmes, 2018).



1.5.2 Módulo de simulación.

SOLIDWORKS Simulation es un sistema de análisis de diseño que está completamente integrado con SOLIDWORKS, SOLIDWORKS Simulation ofrece soluciones de simulación para análisis estáticos lineales y no lineales, de frecuencia, de pandeo, térmicos, de fatiga, de recipiente a presión, de caída, dinámicos lineales y no lineales, y de optimización, (SolidWorksCorporation, 2016). Alimentado por programas de resolución de problemas rápidos y precisos (solvers), SOLIDWORKS Simulation le permite resolver grandes problemas de forma intuitiva mientras diseña. SOLIDWORKS Simulation viene en dos paquetes: SOLIDWORKS Simulation Professional y SOLIDWORKS Simulation Premium para satisfacer sus necesidades de análisis, (SolidWorksCorporation, 2016). SOLIDWORKS Simulation reduce el tiempo de salida al mercado ahorrando tiempo y esfuerzo en la búsqueda de resultados de diseño óptimos. El software utiliza el Método de elementos finitos (FEM). El FEM es una técnica numérica para analizar diseños de ingeniería. El FEM está aceptado como el método de análisis estándar debido a su generalidad y compatibilidad para ser implementado en computadoras. El FEM divide el modelo en numerosas piezas pequeñas de formas simples llamadas "elementos", que reemplazan eficazmente un problema complejo por muchos problemas simples que deben ser resueltos de manera simultánea, (SolidWorksCorporation, 2016). Los elementos comparten puntos comunes denominados "nodos". El proceso de división del modelo en pequeñas piezas se denomina mallado. El comportamiento de cada elemento es bien conocido bajo todas las situaciones de soporte y carga posibles. El método de elemento finito utiliza elementos con formas diferentes. La respuesta en un elemento, en cualquier momento, se interpola desde la respuesta en los nodos del elemento. Cada nodo está descrito en detalle por un cierto número de parámetros, según el tipo de análisis o del elemento utilizado. Por ejemplo, la temperatura de un nodo describe por completo su respuesta en el análisis térmico. Para el análisis estructural, la respuesta de un nodo está descrita, por lo general, por tres traslaciones y tres rotaciones. Se denominan grados de libertad (GDL). El análisis que utiliza FEM se denomina Análisis de elementos finitos (FEA), (SolidWorksCorporation, 2016).



El software formula las ecuaciones que rigen el comportamiento de cada elemento teniendo en cuenta su conectividad con los demás elementos. Estas ecuaciones hacen referencia a la respuesta de cargas, restricciones y propiedades del material conocidas. A continuación, el programa organiza las ecuaciones en un conjunto mayor de ecuaciones algebraicas simultáneas y resuelve las desconocidas. Por ejemplo, en el análisis tensional, el solver encuentra los desplazamientos en cada nodo y, posteriormente, el programa calcula las deformaciones unitarias y finalmente las tensiones.



CAPÍTULO II. VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO POR EL MÉTODO DE CENTRIFUGACIÓN

2.1 Estudios del fluido por CFD en contorno cerrado de la cámara durante el proceso del enfriamiento por centrifugación, a altas, medias y bajas temperaturas de austenización.

La determinación de la velocidad del enfriamiento por centrifugación se realizará mediante el empleo de las herramientas CAD y FEM del software de diseño SolidWorks 2016. Para estos estudios se tomarán los regímenes de tratamientos térmicos empleados durante el proceso de enfriamiento por centrifugación al acero para herramientas AISI D2, tomando como base para este estudio las temperaturas de austenización bajas, medias y altas; y las diferentes frecuencias de rotación empleadas durante el proceso de experimentación (500 r/min ($8,33 \text{ s}^{-1}$); 1 000 r/min ($16,67 \text{ s}^{-1}$) y 1500 r/min (25 s^{-1})). El módulo de “Flow Simulation” se empleó para determinar los parámetros termodinámicos del enfriamiento, que luego serán introducidos en el módulo “Simulation” para determinar la velocidad del enfriamiento para cada régimen estudiado, para ello se introdujeron los siguientes parámetros de entrada:

Temperatura del fluido: 27 °C

Presión atmosférica estática: 101 321,32 Pa

Temperatura de las piezas: 980 °C ,1050°C, 1 080 °C

Frecuencia de rotación: $8,33 \text{ s}^{-1}$; $16,67 \text{ s}^{-1}$; 25 s^{-1}

2.1.1 Resultados del comportamiento del estudio para la determinación de la velocidad de enfriamiento.

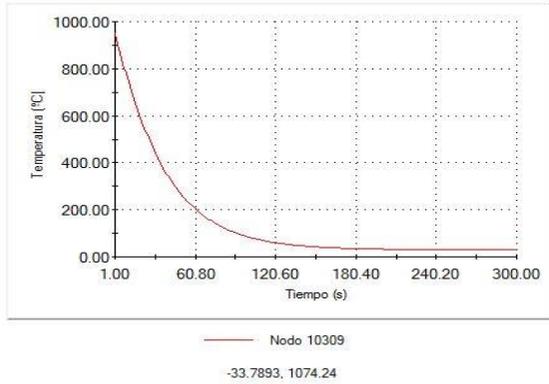
Los estudios se realizaron con el objetivo de determinar el comportamiento de la velocidad de enfriamiento dentro de la cámara, para la obtención de los datos para el cálculo del coeficiente de Grossman para el acero AISI D2a diferentes temperaturas de austenización.

2.1.2 Estudio 1. Velocidad de enfriamiento para la temperatura de austenización de 980 °C.

a)

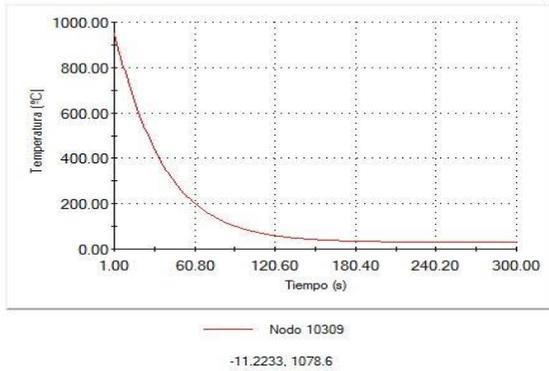


Nombre de estudio: Térmico 15-(Predeterminado)
Tipo de resultado: Térmico Térmico1



b)

Nombre de estudio: Térmico 12-(Predeterminado)
Tipo de resultado: Térmico Térmico1



c)

Nombre de estudio: Térmico 18-(Predeterminado)
Tipo de resultado: Térmico Térmico1

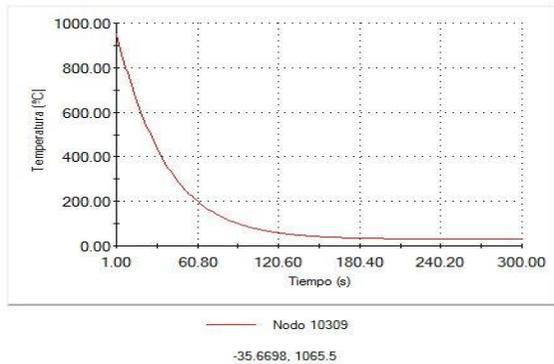


Figura 2.1. Curvas de enfriamiento obtenidas por FEM a) 500 r/min ($8,33 \text{ s}^{-1}$); b) 1000 r/min ($16,67 \text{ s}^{-1}$); c) 1500 r/min (25 s^{-1}).



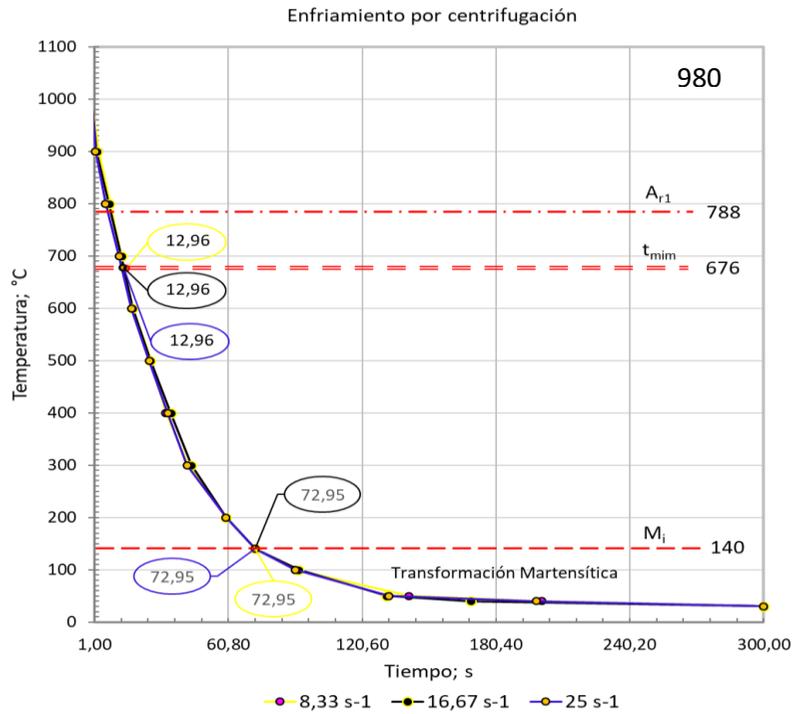


Figura 2.2. Comportamiento de la velocidad de enfriamiento durante el enfriamiento continuo dentro de la cámara a la temperatura de austenización de 980 °C.

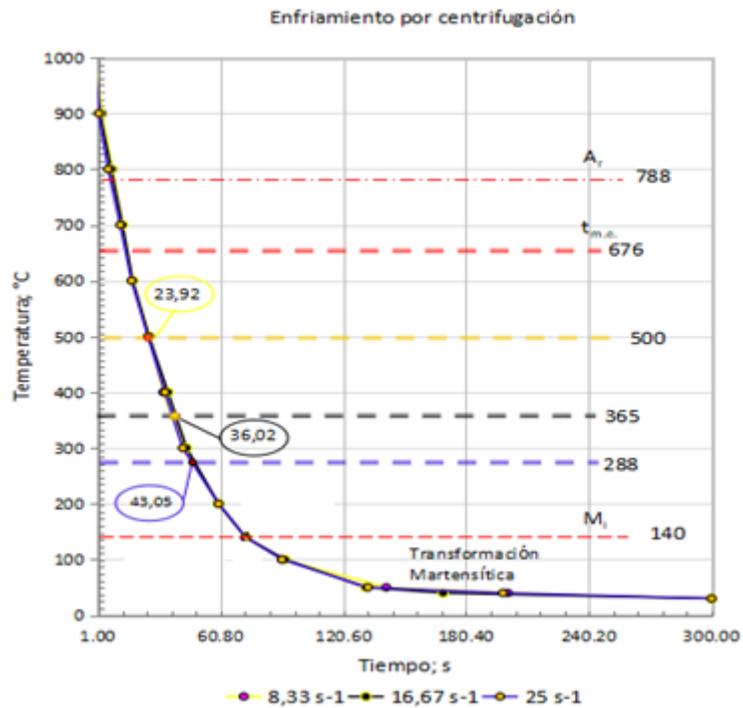


Figura 2.3. Comportamiento de la velocidad de enfriamiento en el contorno cerrado de la cámara a la temperatura de austenización de 980 °C



2.1.3 Estudio 2. Velocidad de enfriamiento para la temperatura de austenización de 1050 °C.

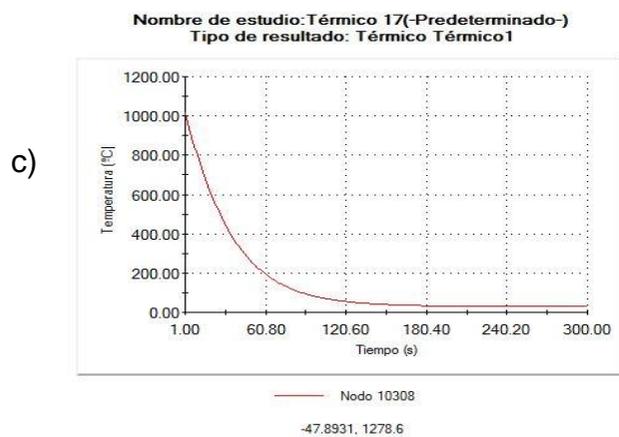
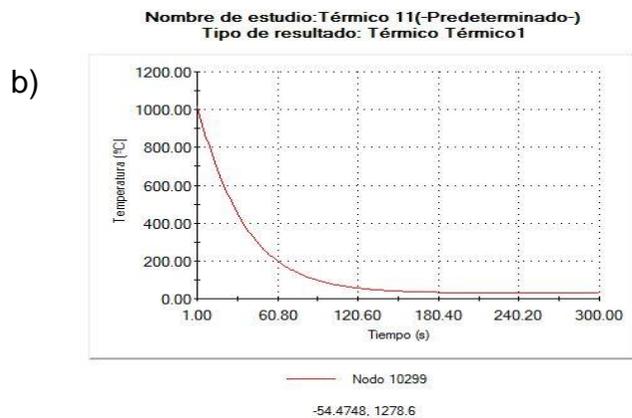
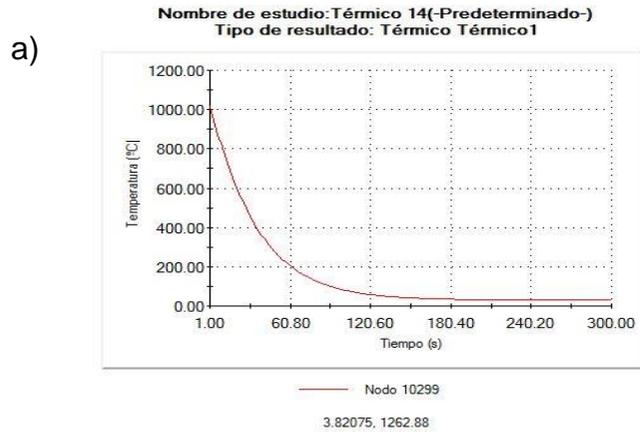


Figura 2.4. Curvas de enfriamiento obtenidas por FEM a) 500 r/min ($8,33 \text{ s}^{-1}$); b) 1000 r/min ($16,67 \text{ s}^{-1}$); c) 1500 r/min (25 s^{-1}).



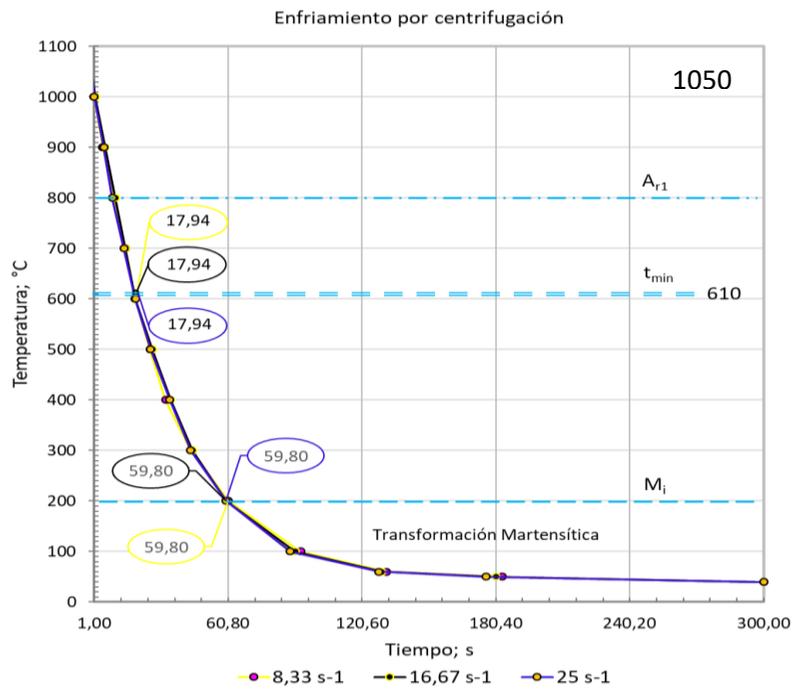


Figura 2.5. Comportamiento de la velocidad de enfriamiento durante el enfriamiento continuo dentro de la cámara a la temperatura de austenización de 1 050 °C.

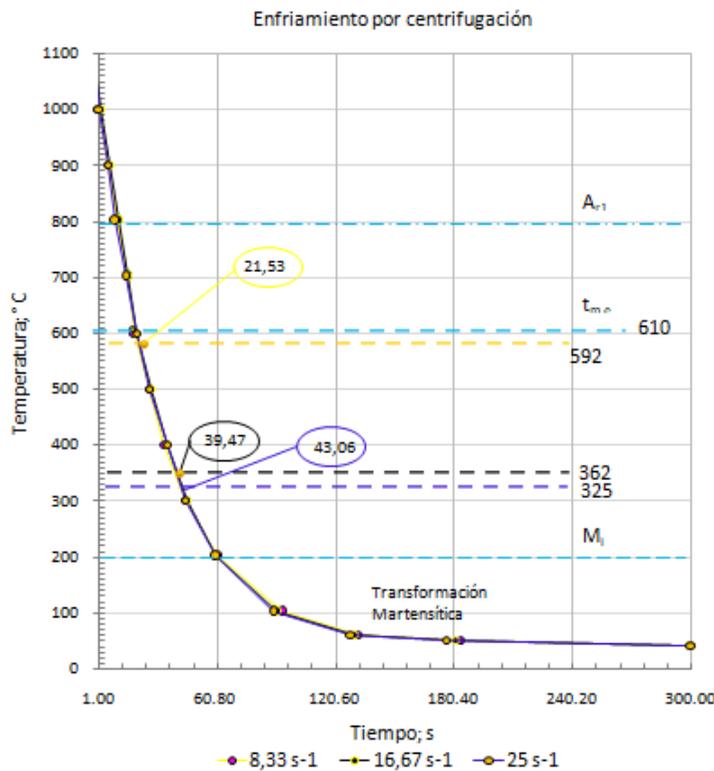
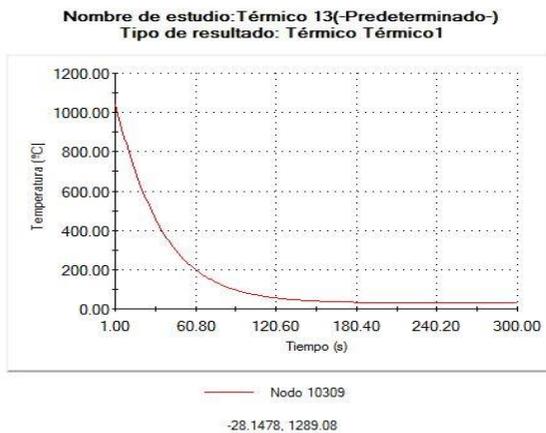


Figura 2.6. Comportamiento de la velocidad de enfriamiento en el contorno cerrado de la cámara a la temperatura de austenización de 1 050°C

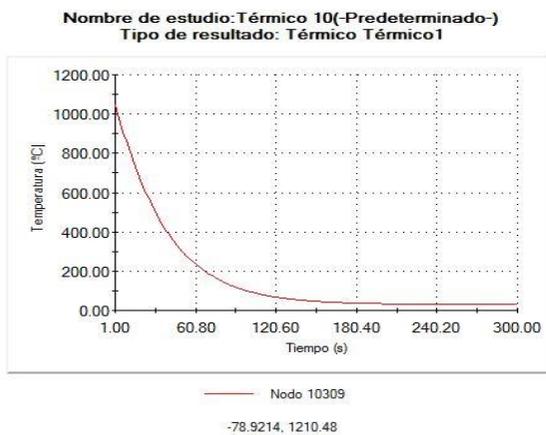


2.1.4 Estudio 3. Velocidad de enfriamiento para la temperatura de austenización de 1080 °C.

a)



b)



c)

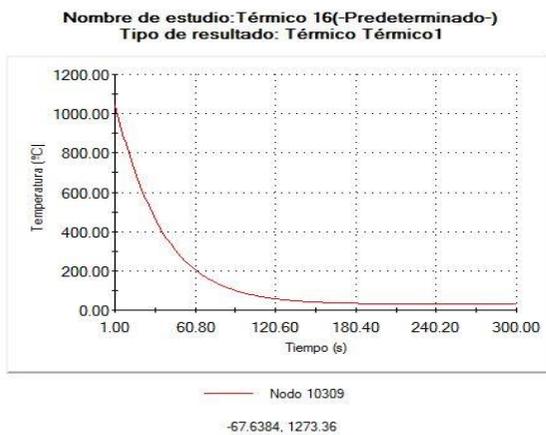


Figura 2.7. Curvas de enfriamiento obtenidas por FEM a) 500 r/min ($8,33 \text{ s}^{-1}$); b) 1000 r/min ($16,67 \text{ s}^{-1}$); c) 1500 r/min (25 s^{-1}).



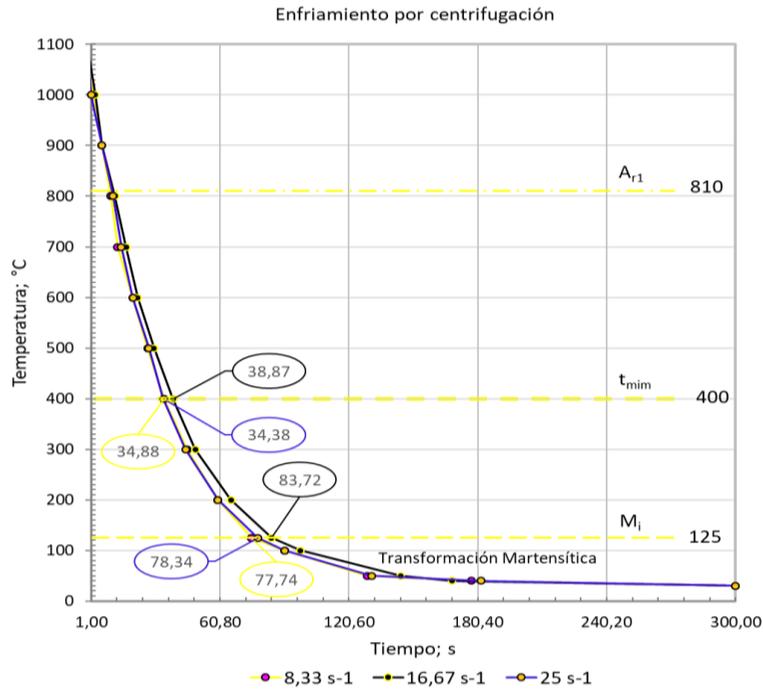


Figura 2.5. Comportamiento de la velocidad de enfriamiento durante el enfriamiento continuo dentro de la cámara a la temperatura de austenización de 1 080 °C.

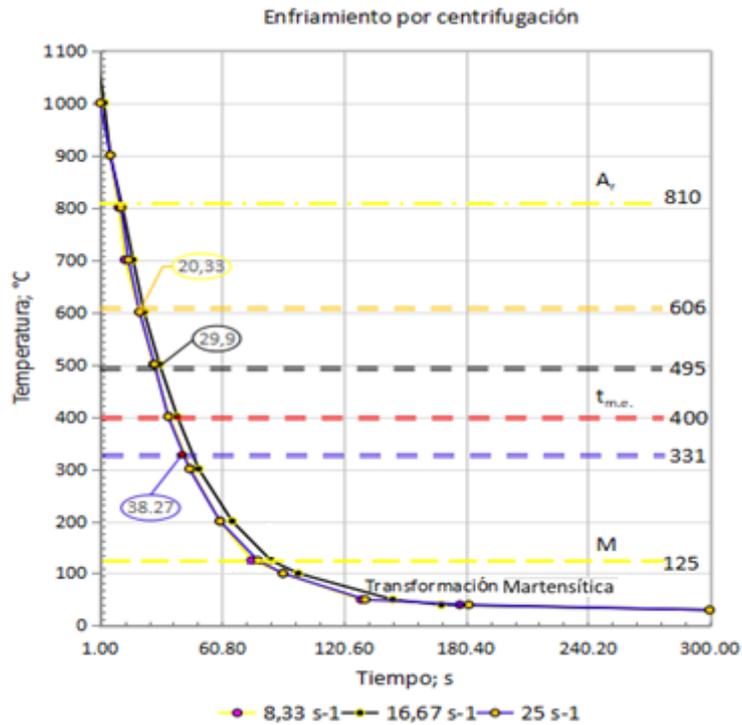


Figura 2.6. Comportamiento de la velocidad de enfriamiento en el contorno cerrado de la cámara a la temperatura de austenización de 1 080 °C.



2.2 Velocidad de enfriamiento

En los procesos tecnológicos de tratamientos térmicos, generalmente se determina la velocidad media de enfriamiento, por la siguiente fórmula:

$$V_{enf.medio} = \frac{T_{max} - T_{est}}{\tau_{max}}$$

(2)

Donde: T_{max} – Temperatura de austenización, °C.

T_{est} – Temperatura de estabilidad térmica;

τ_{max} – Tiempo máximo para alcanzar la estabilidad térmica, s.

Tabla 2.1. Valores de la velocidad de enfriamiento para los casos de estudio.

Temperatura inicial (°C)	Temperatura de estabilidad térmica (°C)	Tiempo s	Frecuencia de rotación s ⁻¹ , (r/min)	Velocidad de enfriamiento (°C /s)
980	288	45,45	25 (1 500)	15,22
1050	325	43,03		16,84
1080	331	38,27		19,57
980	365	36,02	16,67 (1 000)	17,07
1050	362	39,47		17,43
1080	495	29,90		19,56
980	500	23,92	8,33 (500)	20,06
1050	592	21,53		21,27
1080	606	20,33		23,31

Del análisis de los datos obtenidos de los estudios realizados se puede concluir, que mientras mayor sea la temperatura de estabilidad térmica obtenida en el proceso de enfriamiento cuando se establece el régimen de contorno cerrado de la cámara, menor



es el tiempo necesario para lograr la estabilidad termodinámica de la temperatura y mayor será la velocidad del enfriamiento obtenida en el proceso.

2.3 Coeficiente de Grossman para las diferentes temperaturas de austenización.

En la tabla 2.2 se muestran los resultados de los cálculos realizados para determinar el coeficiente de Grossman para todos los casos de estudio.

Tabla 2.2. Coeficiente de Grossman para los casos de estudio.

Temperatura inicial (°C)	Temperatura de estabilidad térmica (°C)	Frecuencia de rotación s^{-1} , (r/min)	Coeficiente de transferencia de calor $h(W/m^2 \cdot K)$	Conductividad térmica λ (W/m·K)	Coeficiente de Grossman H
980	288	25 (1 500)	76,95	27,85	1,38
1050	325		76,41	27,85	1,37
1080	331		76,41	27,85	1,37
980	365	16,67 (1 000)	56,09	27,85	1,00
1050	362		56,09	27,85	1,00
1080	495		56,34	27,95	1,00
980	500	8,33 (500)	29,77	28,20	0,52
1050	592		29,29	27,60	0,53
1080	606		28,82	27,00	0,53

Del análisis realizado de los resultados presentados en la tabla anterior se concluye que, la intensidad del enfriamiento en el régimen establecido en el contorno cerrado de la cámara de enfriamiento, aumenta mientras mayor es el nivel de frecuencia de rotación aplicado para una misma temperatura de austenización y mientras menor sea la temperatura de estabilidad térmica dentro de la cámara.



CONCLUSIONES.

1. Mediante el empleo de los módulos Flow Simulation y Simulation se obtuvieron las curvas que describen el enfriamiento en el contorno cerrado de la cámara y el tiempo para alcanzar los parámetros de estabilidad térmica del proceso de enfriamiento a distintos regímenes de frecuencias de rotación.
2. Se determinó en los distintos niveles de frecuencias de rotación estudiados la velocidad de enfriamiento a la cual se alcanza la estabilidad térmica en el proceso de enfriamiento durante el temple en el contorno cerrado de la cámara.
3. Se determinó el coeficiente de Grossman para cada régimen de enfriamiento estudiado el cual nos muestra la severidad con que ocurre este proceso hasta el primer escalón de estabilidad termodinámica.
4. Se concluyó que, mientras mayor es la temperatura de estabilidad térmica del enfriamiento durante el temple en el contorno cerrado de la cámara, menor es el tiempo necesario para lograr la estabilidad termodinámica del proceso y mayor es la velocidad del enfriamiento obtenida en el temple del acero AISI D2.
5. Se concluye que la severidad del enfriamiento en el contorno cerrado de la cámara durante el temple aumenta, mientras mayor es, el nivel de frecuencia de rotación aplicado para una misma temperatura de austenización y mientras menor sea la temperatura de estabilidad térmica dentro de la cámara.



RECOMENDACIONES.

1. Se recomienda realizar los estudios en los módulos de Flow Simulation y Simulation en un régimen transitorio.
2. Elaborar un nomograma para el proceso de enfriamiento por centrifugación para el acero para el conformado en frío AISI D2.



Bibliografía

Gurri Villafruela G.I, & García Domínguez A, P. R. (2019). LA CENTRIFUGACIÓN. UN NUEVO MÉTODO DE ENFRIAMIENTO PARA LOS ACEROS DE ALTA TEMPLABILIDAD. *X Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica. COMEC 2019. V Simposio de Materiales. Universidad de Villa Clara. Cuba*

ASM Metals Handbook. (1991). *Heat Treating* (Vol. 4). ASM International.

ASM, Metals Handbook. (1991). *Volume 4: Heat Treating*. ASM International.

ASM International Materials. (1993). *ASM Handbook. Wrought Tool Steels* (Vol. 1). Park Ohio: 10th.

Borobeva G.A, & Skladnova E.E, L. A. (2005). *Инструментальные материалы. Aceros para Herramientas*. Политехника

Salunkhe S ., & Fabijanac D., N. J. (2015). Effect of Single and Double Austenitization treatments on the Microstructure and Hardness of AISI D2 Tool Steel. *Elsevier. Materials Today: Proceedings 2*, 1901 – 1906

Gurri Villafruela G.I, G. D., & Pérez Rodríguez R., Q. E. (2019). Temple por centrifugación desde temperaturas intermedias de austenización en el acero AISI D2. *I Convención Científica y Tecnológica Internacional. Universidad de Camagüey. Cayo Santa María*

Surberg Cord Henrik, P. S. (2014). The effect of some heat treatment parameters on the properties of AISI D2. *Int. J. Mech. Eng. Autom.*, 1(3), 119-128.

Božidar Liščic, T. H. (2010). *Quenching Theory and Technology* (Second ed.). United States of America: Taylor and Francis Group, LLC

Gurri Villafruela G.I, P. R. (2019). Temple por centrifugación para el acero AISI D2 a bajas temperaturas de austenización. *9na Conferencia Internacional Universidad de Holguín*. Holguín



Gurri Villafruela G.I. (2014). *Influencia del temple por centrifugación sobre la dureza del acero para herramientas D2*. Tesis de Maestría, Universidad de Holguín, Ingeniería Mecánica

Viada R. (2020). *Análisis de la influencia del enfriamiento en las herramientas para conformar en frío basado en CFD y FEM*. Tesis presentada en opción a ingeniero, Universidad de Holguín

Lobaina J, (2021). *Parámetros termodinámicos del enfriamiento por centrifugación del acero AISI D2*. Tesis presentada en opción a ingeniero, Universidad de Holguín

Sánchez T, (2022). *Parámetros termodinámicos del enfriamiento por centrifugación a la temperatura de austenización de 980°C del acero AISI D2*. Tesis presentada en opción a ingeniero, Universidad de Holguín

Fajardo B, (2022). *Parámetros termodinámicos del enfriamiento por centrifugación a la temperatura de austenización de 980°C del acero AISI D2*. Tesis presentada en opción a ingeniero, Universidad de Holguín

B.A. Ahmed, K. R.-u.-H. (2012). *Synthesis of Laser Beam Rapidly Solidified Novel Surfaces on D2 Tool Steel*. *Key Engineering Materials*, 510-511 , 493- 499.

Uddeholm. (2016). *AISI D2 Cold Work tool steel. Datos de aceros para Herramientas*. Obtenido de Uddeholm: <https://www.uddeholm.com/iberica/es>

Uddeholm Sleipner, Sverker. (Septiembre de 2016). 11. Recuperado el 13 de Enero de 2017, de www.uddeholm.com

Acero SISA. (2017). *Acero SISA D2*. Obtenido de www.sisa1.com.mx: isamty@sisa1.com.mx



Gurev A.M, & Voroshnyn L.G., J. Y. (2005). Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей. Endurecimiento termocíclico y químicotermocíclico de los aceros. *Ползуновский вестник №2 (ч. 2)*

Brison W.E. (2015). *Heat Treatment. Master Control Manual*. Munich: Hanser Publications, Cincinnati.

Nandakumar Pillai, R. K. (2017). A review on effects of cryogenic treatment of AISI 'D' series cold working tool steels. *Rev.Adv.Mater.Sci* , 51, 149 - 159.

Wołowiec E., K. P. (2012). Heat treatment of tool steels in vacuum furnaces with gas quench. Review of industrial applications, Part 1,2. Heat Treatment Equipment. SECO/WARWICK Corp.

Jones W.R. (1996). Vacuum Heat treating for M2 High Speed and D2 tool steels. *Proceeding of the 16th ASM Heat Treatin Society Conference & Exposition*, (págs. 19 - 21). Ohio. Cincinnati.

The Herring Group, Inc. (2018). *"The Heat Treat Doctor"*. Obtenido de Vacuum Heat Treating of Tool Steels: dherring@heat-treat-doctor.com

Jai Hindus.S, H. K. (2014). Experimental investigation on laser assisted surface tempering of AISI D2 tool Steel. *12th GLOBAL CONGRESS ON MANUFACTURING AND MANAGEMENT, GCMM 2014* (págs. 1489 - 1495). Procedia Engineering 97

Bernshtein, M. L. (1987). *Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. Tratamiento Térmico de piezas de acero en campos magnéticos*. Машиностроение.

Jaramillo, R. A.-L. (2004). Effect of 30 Tesla Magnetic Field on Transformations in a Novel Bainitic Steel²². Investigation of austenite decompositions in high-carbonstrength Fe-C-Si-Mn steel under 30-Tesla magnetic field. *Scripta Materialia*(52), págs. 461 -466.

A. B. Alifanov, Ж. А. (2012). Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле. Mecanismo de fortalecimiento de los aceros en campos magnéticos. *Литье и металлургия*, 4(68), 151 -155.



Sibgatulin G.G, T. P. (1982). Endurecimiento de la herramienta de corte por la acción de impulsos de corriente”; (suplemento a la revista “Industria de la Aviación”, , pág.31. (3).

B.A. Ahmed, K. R.-u.-H. (2012). Synthesis of Laser Beam Rapidly Solidified Novel Surfaces on D2 Tool Steel. *Key Engineering Materials*, 510-511 , 493- 499.

Hongtao, D. a. (2013). Improving machinability of high chromium wear-resistant materials via laser–assisted machining. (17), 246–269.

Borobeva G.A, & Skladnova E.E, L. A. (2005). *Инструментальные материалы. Aceros para Herramientas*. Политехника.

Totten GE, W. G. (1996). Quenching fundamentals: effect of agitation. *Adv.Mat.& Proc*, 149(2), 73-76.

Canale, F. L., & Totten, G. E. (2005). *Quenching Technology: A Selected Overview of the Current State-of-the-art*. (Vol. 8). Materials Research

Domingo, A. M. (2011). *Apuntes de Transmisión del Calor*. Madrid: E.T.S Arquitectura de Madrid.

Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico Tercera Edición*. México: McGraw Hill Interamericana.

SolidWorks Corporation. (2016). *Introduction to Simulation*.

Solidworks Corporation. (2016). SolidWorks Simulation Professional. (D. Systemes, Ed.) USA.

Villafruela,G. (2019). Temple por centrifugación para el acero AISI D2 a bajas temperaturas de austenización.Universidad de Holguín, Holguín.

SolidWorks Corporation Dassault Systèmes. (2016). *DISEÑO INNOVADOR PARA EL DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS*



SolidWorks Corporation Dassault Systèmes. (2018). *POR QUÉ SOLIDWORKS FLOW SIMULATION ES LA OPCIÓN PERFECTA PARA LOS INGENIEROS DE PRODUCTO.*

Gurri Villafrela, G.I, (2021), Compendio de fórmulas, tablas y figuras. Metalografía y Tratamientos Térmicos, Departamento de Ingeniería mecánica de la Universidad de Holguín.

