

PARÁMETROS TERMODINÁMICOS DEL TEMPLE POR
CENTRIFUGACIÓN DEL ACERO AISI D2 A LA TEMPERATURA DE
AUSTENIZACIÓN DE 1 050 °C

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO

Autor: José Raúl Fajardo Breffe

Tutor: M.Sc. Ing. Gilberto Israel Gurri Villafruela

Holguín, 2022



Resumen

En la presente investigación se realiza el estudio de los parámetros termodinámicos que se desarrollan en la operación de temple por centrifugación durante el proceso de tratamiento térmico del acero para herramientas AISI D2 a la temperatura de austenización de $1\ 050\ ^\circ\text{C}$, atendiendo de forma particular los diferentes parámetros que se desarrollan según las condiciones que surgen en el contorno cerrado de la cámara de enfriamiento cuando se aplican distintos regímenes de frecuencias de rotación. Se muestran los resultados del análisis de determinados parámetros termodinámicos en el sistema de enfriamiento por centrifugación. Para la realización de la investigación se utilizan métodos teóricos; el análisis de los resultados y el cálculo de determinados parámetros termodinámicos, así como el empleo del método de CFD para conocer el comportamiento dinámico del flujo de enfriamiento a través del módulo de Flow Simulation.



Summary

In present it the study of the thermodynamic parameters accomplishes investigation itself that unroll in the operation of character for spin-drying in the course of heat treatment of the steel for tools AISI D2 themselves to the temperature of austenization of 1 050 °C, taking care of the different parameters that develop according to the conditions that happen in the contour closed of the camera of cooling when they are applicable of particular form several regimens of frequencies of rotation. They show the results of the analysis of determined thermodynamic parameters in the cooling system for spin-drying. They utilize theoretic methods for the realization of investigation; The income analysis and the calculation of determined thermodynamic parameters, as well as the job of CFD's method to know the expeditious behavior of the flow of cooling through Flow Simulation's module.



Indice

Introducción	1
CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	6
1.1. Caracterización del acero AISI D2.....	6
1.2. Tratamientos térmicos aplicados al acero AISI D2.....	8
1.2.1 Recocido	8
1.2.2 Temple.	10
1.2.3 Revenido.....	11
1.3 Clasificación de los medios tecnológicos de enfriamiento para temple.....	11
1.3.1. Factores que determinan la efectividad de los medios de enfriamiento.....	14
1.3.2. Métodos específicos de enfriamiento.....	15
1.3.3. Formas de enfriamiento de las piezas durante el temple.	15
1.4 Fundamentos teóricos del enfriamiento por centrifugación.....	17
1.4.1. Mecanismo de transferencia de calor.	18
1.5 Parámetros termodinámicos del sistema de enfriamiento por centrifugación del acero para herramienta AISI D2.	20
1.5.1. Coeficiente de transferencia de calor por convección.....	21
1.5.2. Número de Nusselt.	21
1.5.3. Número de Prandtl	22
1.5.4 Número de Reynolds	22
1.6. Software CAD para la modelación de las variantes de enfriamiento.	23
1.6.1 Módulo de Flow Simulation	23
1.5.2 Módulo de Simulation	24
CAPÍTULO II. PARÁMETROS TERMODINÁMICOS DEL ENFRIAMIENTO POR CENTRIFUGACIÓN.	26
2.1 Estudios del fluido en contorno cerrado de la cámara durante el proceso del enfriamiento por centrifugación por los métodos de CFD y FEM.	26
2.1.1. Resultados del comportamiento del estudio para la determinación de los parámetros termodinámicos.	26
2.1.2. Estudios del fluido para las frecuencias de rotación de 500 r/min, ($8,33 \text{ s}^{-1}$).27	
Estudio 3. Estudio de la velocidad y densidad del fluido.	32
2.2. Determinación de los coeficientes termodinámicos del proceso de enfriamiento por centrifugación.....	34



CONCLUSIONES.....	37
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39



Introducción

En la actualidad el empleo de las tecnologías de tratamientos térmicos constituyen una de las formas más utilizadas para modificar y mejorar las propiedades de los aceros y sus aleaciones, los cuales comprenden un calentamiento a determinadas temperaturas, un tiempo de mantenimiento a esa temperatura, seguido de un enfriamiento a velocidades adecuadas con el fin de obtener las propiedades físicas y mecánicas deseadas, especialmente la dureza, la resistencia y la tenacidad. Las propiedades mecánicas de las piezas tratadas, no solo dependen de su composición química, sino también de la composición estructural que se obtenga en la misma, la que es posible modificar sin alterar su composición. En la actualidad para el enfriamiento de los materiales se emplean distintas formas y métodos, en los que se involucran el uso de instalaciones especializadas y auxiliares para lograr las propiedades deseadas en estas aleaciones. Existen diversos medios de enfriamiento para lograr las características antes mencionadas, entre los que podemos encontrar: el enfriamiento por aire, agua, aceites, disoluciones acuosas salinas y alcalinas, disoluciones poliméricas, baños salinos y metálicos, entre otros. Sobre la efectividad de los medios de enfriamiento influyen diversos factores, los cuales determinan su efecto tecnológico, entre lo que se encuentran: la composición química del medio, las propiedades físicas, la temperatura, la dirección y la velocidad del movimiento y la influencia de las capas o películas estacionarias en los medios de enfriamiento.

En la Universidad de Holguín se han realizado investigaciones relacionadas con los medios de enfriamiento, Gurri Villafruela G.I, (2008), introdujo una nueva tecnología para el enfriamiento en la operación de temple de los aceros para herramientas de alta templabilidad, la cual consiste en aplicar distintos niveles de frecuencias de rotación dentro de una cámara de enfriamiento, la cual se ha denominado «Temple por centrifugación».

El ingeniero (Viada Alaor, 2020) realizó un estudio comparativo entre la nueva tecnología propuesta por (Gurri Villafruela, 2008) y los métodos tradicionales de enfriamiento durante el temple de las herramientas fabricadas de acero AISI D2, o



sea, el enfriamiento en aceite, en aire por convección natural, en aire por convección forzada laminar y con enfriamiento por centrifugación en presencia de un flujo continuo turbulento dentro de la cámara de enfriamiento, donde se demostró que esta nueva tecnología favorece las condiciones necesarias durante el enfriamiento, lo que puede constituir un medio alternativo para la sustitución de los aceites industriales.

El ingeniero (Lobaina Jiménez. E, 2021) investigó la influencia que ejerce el temple por centrifugación sobre las propiedades termodinámicas del medio de enfriamiento durante el temple del acero AISI D2, desde la temperatura de austenización de 1080 °C, empleando tres niveles de frecuencias de rotación, 8,33 s⁻¹, 16,67 s⁻¹ y 25 s⁻¹, en un régimen alternativo de enfriamiento dentro de la cámara de enfriamiento. Este estudio estableció el comportamiento de la temperatura, la presión, velocidad, trayectoria y densidad del fluido dentro de la cámara de enfriamiento, así como los parámetros termodinámicos fundamentales del enfriamiento y demostró que su aplicación favorece en gran medida el proceso de intercambio de calor y por consiguiente una mejor calidad de las propiedades termomecánicas del proceso.

El ingeniero (Sánchez Tauler. E, 2022) investigó la influencia que ejerce el temple por centrifugación sobre las propiedades termodinámicas del medio de enfriamiento durante el contorno cerrado de la cámara desde la temperatura de austenización de 980 °C, empleando tres niveles de frecuencias de rotación, 8,33 s⁻¹, 16,67 s⁻¹ y 25 s⁻¹, en un régimen alternativo de enfriamiento dentro de la cámara de enfriamiento. Este estudio proporcionó datos importantes relacionados con el comportamiento termodinámico del fluido y su influencia sobre el temple del acero estudiado.

Los estudios comparativos realizados al acero investigado durante el temple en diferentes medios, así como, para el temple por centrifugación durante el enfriamiento continuo y en el contorno cerrado de la cámara, han demostrado que el enfriamiento por el método de centrifugación puede constituir una alternativa



para nuestra industria mecánica, pudiendo sustituir aquellos medios tradicionales de enfriamiento tales como, las sales, los aceites y otros. Por los resultados obtenidos durante su aplicación se ha podido demostrar que esta nueva tecnología constituye un método de enfriamiento fiable, ecológico, y menos costoso, lo que lo convierten en un prototipo sugerente para implementar en nuestra industria en años venideros.

El empleo de esta nueva tecnología de enfriamiento para los aceros de alta templabilidad, garantiza la disminución de efectos perjudiciales que aparecen durante la utilización de métodos y medios tradicionales para el temple, lo que la convierte en una tecnología más controlable y al mismo tiempo más ecológica.

En la actualidad no se cuenta con suficiente documentación acerca de este novedoso método, del cual los estudios no abundan, por lo que la presente investigación contribuirá a un mejor control y dominio de los parámetros durante el enfriamiento, lo cual nos propicia una mayor exactitud y manejo de las propiedades mecánicas necesarias de las piezas tratadas.

En el presente trabajo se investiga el comportamiento de los parámetros termodinámicos durante el proceso de temple del acero AISI D2 a la temperatura de austenización de 1 050 °C, por el método de enfriamiento por centrifugación a distintas frecuencias de rotación (bajas, (500 r/min,); medianas, (1000 r/min) y altas (1 500 r/min)), durante el contorno cerrado de la cámara de enfriamiento.

Para la realización del estudio y con el objetivo de determinar los parámetros termodinámicos del medio de enfriamiento para dicho acero a la temperatura de austenización 1 050 °C, empleamos el software SolidWorks 2016 y el módulo CAD de Flow Simulation, para conocer el comportamiento dinámico del fluido basados en las leyes termodinámicas de:

- Ley de transferencia de calor.
- Ley de enfriamiento de Newton.
- Ley de Stefan Boltzmann.



Basados en los antecedentes existentes y objetivos de nuestra investigación se identifica como **Problema científico de la investigación:** En la actualidad se desconocen los parámetros termodinámicos que se desarrollan durante el enfriamiento por centrifugación del acero para herramientas AISI D2 para la temperatura de austenización de 1 050 °C, en un contorno cerrado de la cámara de enfriamiento.

Objeto de estudio: El temple con enfriamiento por centrifugación desde la temperatura de austenización de 1 050 °C.

Campo de estudio: Parámetros termodinámicos del medio de enfriamiento por centrifugación en el contorno cerrado de la cámara de enfriamiento.

Hipótesis: Si se establecen los parámetros termodinámicos del fluido durante el temple en el contorno cerrado de la cámara de enfriamiento, entonces se podrá conocer el comportamiento del enfriamiento por centrifugación del acero para herramientas AISI D2.

Objetivo general: Determinar los parámetros termodinámicos durante el enfriamiento por centrifugación del acero para herramientas AISI D2 para la temperatura de austenización de 1 050 °C.

Tareas de investigación:

1. Realizar la fundamentación teórica de los sistemas de enfriamientos en los tratamientos térmicos.
2. Determinar los parámetros del sistema de enfriamiento por centrifugación del acero para herramientas AISI D2 para la temperatura de austenización de 1 050 °C por el método CFD y calcular los siguientes indicadores termodinámicos:
 - Número de Reynolds.
 - Número de Nusselt.
 - Número de Prandtl.
 - Coeficiente de transferencia de calor por convección.



3. Describir la influencia de los coeficientes determinados durante el enfriamiento.

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:

Empíricos:

Consultas a expertos: permite que la investigación se sustente, además, en conocimientos de especialistas acerca de la temática de investigación.

Análisis documental: utilizado en la búsqueda de información de estudios relacionados con el tema de la investigación, antecedentes y estado actual.

CFD y MEF: 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 termodinámico del sistema de enfriamiento por centrifugación de las herramientas de troquelado en frío fabricadas de acero AISI D2.



CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

1.1. Caracterización del acero AISI D2.

El acero D2 es un acero de alta templabilidad diseñado para el conformado en frío que contiene en su composición química un alto contenido de carbono y de cromo además es aleado con molibdeno y vanadio y se caracteriza por: (Uddeholm).

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

Las propiedades físicas de este acero en estado templado y a temperaturas ambiente y elevada, se muestran en la tabla 1.1 y 1.2.

Como ya hemos reflejado anteriormente el acero D2 se recomienda para la fabricación de herramientas que requieren una resistencia al desgaste muy alta, combinada con una tenacidad moderada (resistencia al impacto), además este puede suministrarse de varias formas, las que incluyen en forma de laminado en caliente, pre-mecanizados y en forma mecanizada o de acabado. En la tabla 1.3 se muestran las aplicaciones específicas de este acero en dependencia de su rango de dureza, dimensiones y estado de suministro del material.

Como puede observarse, sus múltiples aplicaciones responden a un rango de dureza determinado lo cual va en relación con las microestructuras (naturaleza, tamaño de las partículas y distribución de las fases) derivadas de la aplicación de los diferentes procesos de tratamientos térmicos, quienes de manera conclusiva proporcionan las propiedades a los aceros.



Tabla 1.1. Propiedades físicas del acero D2 templado y revenido con una dureza de 62 HRC, a temperatura ambiente y elevada. (Uddeholm).

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	20,0	21,0	23,0
Módulo de elasticidad			
ksi	30 450	29 000	26 100
Mpa	210 000	200 000	180 000
Calor específico			
Btu/lb°F	0,110	-	-
J/kg °C	460	-	-

Tabla 1.2. Relación de la dureza (HRC) con los valores de resistencia a la compresión del acero D2. (Uddeholm).

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.

Los tratamientos térmicos son el conjunto de operaciones encargadas de brindar y sacar a relucir la mayor cantidad de propiedades físico-mecánicas al material en el cual se le quiera aplicar el tratamiento térmico. En el caso del acero AISI D2 no es la excepción, se le aplica los procesos de Recocido, Temple y Revenido en ese orden. Para llevar a cabo debemos tener en cuenta relación su composición química y el tipo de microestructura obtenida después del tratamiento térmico, que en definitiva define en gran medida el conjunto de propiedades deseadas.

El proceso de calentamiento generalmente se realiza en hornos de cámara, ya sean con atmósferas protegidas o al vacío, para evitar de esta forma la descarburación o su efecto contrario en las piezas tratadas; se aplican también calentamiento en baños salinos; no obstante, en caso contrario debe garantizarse el empaquetamiento o protección de las piezas contra las posibles reacciones de sus superficies a través de la aplicación de envolturas en láminas finas, fundas o bolsas de acero para recocido y temple. Debido a que esta lámina de acero es muy fina, inmediatamente tras su introducción en el medio de calentamiento esta alcanza la temperatura del horno y absorbe el oxígeno encerrado en el envoltorio de la lámina, eliminando de esta forma el oxígeno dispuesto para la oxidación, permaneciendo de esta manera la pieza limpia.

1.2.1 Recocido.

El recocido es la operación de tratamiento térmico que se le aplica a este acero luego de haber sido sometido a un proceso de conformación en caliente (forjado), maquinado y antes del temple y los que pueden ser recocido completo, de alivio de tensiones (revenido alto) e isotérmicos. El recocido completo tiene como finalidad obtener una estructura que permita su maquinabilidad después de realizada la forja y se aplica a temperaturas ligeramente superiores a la temperatura crítica de transformación ($A_{cm} - 855\text{ }^{\circ}\text{C}$) debiendo ser el calentamiento de forma lenta y uniforme seguido de un enfriamiento también lento (en el horno) a razón de $20 - 30\text{ }^{\circ}\text{C/h}$. El recocido de alivio de tensiones se aplica



con el objetivo de eliminar las tensiones internas que se originan durante la operación de maquinado o el conformado, las que de persistir al sumarse a las tensiones térmicas y estructurales que surgen durante el temple provocan la deformación de la piezas.

Tabla 1.3. Aplicaciones del acero D2. (Uddeholm).

Para el corte	Espesor del material	Dureza del material; (HB)	
		< 180 HRC	> 180 HRC
Herramientas para: troquelado, troquelado fino, punzonado, embutido, cizallado, rebabado, recortado	< 1/8" (3 mm)	60-62	58-60
	1/8"-1/4" (3-6 mm)	58-60	54-56
Pequeños cortes en frío. Cuchillas para trituración de plásticos. Cuchillas para granulación			56-60
Cizallado circular			58-60
Herramientas de recortado para la forja	En caliente		58-60
	En frío		56-58
Cuchillas para frezado de madera, escariadores, brochas			58-60
Para el conformado			HRC
Herramientas para:			
Doblado, conformado, embutición profunda, laminación de llantas, embutición y conformado corriente			56-62
Troqueles para el acuñado			56-60
Troquel para extrusión en frío			58-60
Punzonado			56-60
Conformación de perfiles y tubos, por enrollado, enrollado plano			58-62
Troqueles para moldes de:			
Cerámicas, ladrillos, azulejos, ruedas de esmerilado, lozas, plásticos abrasivos			58-62
Rodillos laminadores de rosca			58-62
Herramientas para el conformado en frío			56-60
Martillos trituradores			56-60
Herramientas para el estampado			56-60
Calibres, instrumentos de medición, barras guías, bushes, herramientas para moletear, manguitos, boquillas para proyección de arena			58-62

El recocido isotérmico se aplica con el objetivo de reducir tiempo en esta operación; ya que la temperatura es más fácil de controlar que la velocidad de enfriamiento, el acero se calienta a temperaturas superiores al punto crítico superior y se enfría hasta la temperatura de la transformación perlítica (50 - 100 °C inferior a Ac_1) a cualquier velocidad y luego se mantiene hasta que transcurra la



descomposición completa de la fase austenítica metaestable, obteniéndose de esta forma resultados estructurales más estables.

1.2.2 Temple.

La operación de temple consiste en calentar el acero en el intervalo de temperaturas de austenización seguido de un enfriamiento tal que permita la transformación de la austenita en martensítica más carburos. La dimensión de la pieza a tratar y su composición son factores importantes en la determinación de la temperatura de austenización, el tiempo de permanencia durante el calentamiento y el medio de enfriamiento. Debe tomarse en consideración que la cantidad de carburos disueltos en la austenita es proporcional a la temperatura que se aplique la austenización, de forma tal que si la temperatura de austenización es baja, la cantidad de carburos a disolver en la disolución sólida es poca y se obtienen valores reducidos de dureza, mientras que si la temperatura es elevada, dentro de los límites establecidos, entonces la cantidad de carburos disueltos serán muchos y esto provocará también el crecimiento del grano austenítico disminuyendo de este modo los valores de tenacidad. Por lo que la temperatura de austenización deberá ser bien seleccionada, acorde a las prestaciones de las piezas, su configuración y tipo de aleación ya que de esta dependerá el intervalo crítico en que se disolverán los carburos capaces de darle a la matriz la combinación de elementos de aleación adecuada para elevar la templabilidad y la dureza después del temple. Particular atención se le debe prestar a las piezas de configuración compleja las que durante el temple se le debe aplicar un calentamiento escalonado para evitar así las distorsiones y la aparición de agrietamiento por impacto térmico. Luego del calentamiento de austenización y al aplicar el proceso de enfriamiento se debe tomar en consideración los diagramas Tiempo-Temperatura-Transformación.

El temple es la operación principal dentro del tratamiento térmico cuando se requiere de un mejoramiento de las propiedades mecánicas en los materiales, ya que este proporciona cambios estructurales, físicos y químicos que conllevan a definir el comportamiento de las partes y piezas durante el proceso de explotación.



Resulta entonces importante proporcionar las condiciones tecnológicas adecuadas para favorecer el equilibrio energético necesario para que ocurran las transformaciones de fases y estructurales en busca de una homogeneidad en las propiedades. 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 [1]. El enfriamiento durante el temple puede considerarse como un proceso complejo debido a que ocurren de forma simultánea distintos fenómenos 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 [2].

1.2.3 Revenido.

El revenido es la operación de tratamiento térmico que se aplica inmediatamente después de aplicado el temple, especialmente para los aceros para herramientas, teniendo como objetivo fundamental eliminar las tensiones internas generadas durante la transformación estructural de la austenita en martensita en el temple, así como las tensiones térmicas originada por un enfriamiento desigual del acero. La aplicación del revenido en dependencia de la temperatura aplicada puede generar una disminución en la dureza final del acero, tendiendo a aumentar su tenacidad, así como también puede mostrar el fenómeno de endurecimiento por precipitación o secundario a temperaturas entre los 490 – 560oC mediante la aplicación de regímenes de calentamientos cíclicos repetitivos.

1.3 Clasificación de los medios tecnológicos de enfriamiento para temple.

Los procesos tecnológicos de los tratamientos térmicos tienen como objetivo fundamental la variación microestructural de los materiales mediante la aplicación de aquellos procesos tales como: recocido, temple, revenido, mejoramiento y



tratamientos superficiales, utilizando como vías para el enfriamiento variados medios, que en concordancia con la norma internacional ISO 6743 -14 – para tratamientos térmicos (U) (ISO 6743-14, 1994), pueden ser clasificados en seis grupos de la forma siguiente: H- Indica los tipos de productos de aceites minerales. A- Indica las disoluciones acuosas, tales como el agua o disoluciones poliméricas. S- Indica - Sales fundidas. G- Indica – Gas. F- Indica los productos usados para el endurecimiento en lecho hirviente. K- Indica el resto de los medios de enfriamiento. Estos medios son clasificados según su tendencia al fenómeno de producir la camisa de vapor cuando se realiza la inmersión de una pieza caliente al medio de enfriamiento conocido también como el fenómeno de Leidenfrost. La camisa o película de vapor se forma en los medios de enfriamiento cuyo punto de ebullición se encuentra por debajo de la temperatura de austenización, tales como el agua, aceites, emulsiones y disoluciones acuosas poliméricas. Los medios que no muestran el fenómeno de Leidenfrost son aquellos que su punto de ebullición se encuentra por encima de la temperatura de austenización del acero, tales como las sales y metales fundidos, gases, al vacío, lecho hirviente y los gases técnicos, (Ljiljana, 2009). Durante la inmersión de un espécimen caliente en un medio de enfriamiento surgen tres estadios o fases las cuales tienden a producir una camisa de vapor, ellas son: a) La fase de formación de la camisa de vapor; b) fase de burbujeo; c) fase de convección (Ljiljana, 2009; Mac Kenzie).

Mediante la utilización de diferentes medios, se ha logrado la variación de la velocidad de enfriamiento, los que han evolucionado en la medida en que se desarrolla la ciencia y la técnica, en 1999 Caballero y Figueroa realizaron un estudio donde exponen los medios esenciales de enfriamiento para el temple:

Agua: Debe evitarse que el agua se caliente durante el temple, debido a que puede prolongarse la primera etapa del enfriamiento. El agua enfría muy rápido.



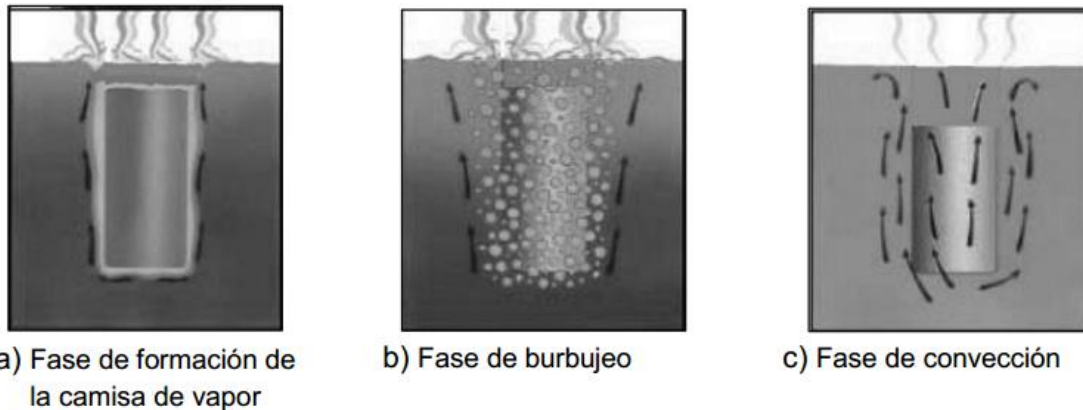


Figura 1. Fases durante el enfriamiento de un espécimen dentro de un medio con formación de la camisa de vapor.

Soluciones salinas: Añadiendo al agua una determinada cantidad de sales de temple, el enfriamiento es más rápido y por lo tanto más energético, debido no solo al mayor calor específico de las soluciones respecto al agua pura, sino también porque debido a la evaporación, las soluciones salinas cristalizan y sus cristales, dada las altas temperaturas estallan rompiendo el velo de vapor que circunda la pieza.

Aceites: Los aceites animales y vegetales con el uso continuo a determinada temperatura se descomponen, espesan y se vuelven gomosos dando temple bastante irregulares. Además, son caros y de olor desagradable. Los mejores aceites para el temple son los minerales obtenidos por destilación fraccionada del petróleo. El aceite caliente tiene más poder refrigerante (30 – 40 °C) que el frío, por ser más fluido. Este tipo de temple produce deformaciones y tensiones internas notablemente inferiores a los del agua y soluciones salinas. Un buen aceite de temple debe poseer las propiedades siguientes:

- Volatilidad no muy elevada.
- Temperatura de inflamación y combustión lo más elevada posible.
- Gran resistencia a la oxidación.

Sales fundidas: Están constituidas por cantidades variables de sodio, potasio, bario, etc., en forma de cianuros y sus componentes. Son utilizados como medios



de enfriamiento y sustituyen con ventaja al aceite y al plomo fundido. Las sales se emplean en un intervalo de temperaturas entre 150 - 600°C. Se utilizan para enfriar la pieza durante el temple y para calentar durante el revenido. También presentan muy alta temperatura de transición. Con respecto a la severidad de temple, se comportan muy semejante al aceite pudiendo considerarse los efectos equivalentes. La agitación aumenta la severidad de temple por la difusión del calor.

Gases: Para muchos aceros basta enfriar al aire tranquilo para que se forme martensita. Aunque este tipo de enfriamiento es el que provoca menos distorsiones, también como contrapartida produce cierta oxidación superficial en lugar de aire pueden usarse gases protectores o inertes.

1.3.1. Factores que determinan la efectividad de los medios de enfriamiento.

El efecto tecnológico de la acción de los medios de enfriamiento se determina por un conjunto de factores, entre los cuales se encuentran: la composición química del medio, las propiedades físicas, la temperatura, la dirección y la velocidad del movimiento. Las características óptimas de muchos medios también se manifiestan en determinados intervalos de temperaturas, el agua, por ejemplo, con un ligero aumento de temperatura su capacidad de temple cambia bruscamente tal que su velocidad de enfriamiento a una temperatura de 18 °C alcanza hasta 200 - 600 K/s y a una temperatura de 75 °C esta es no mayor de 30 K/s, mientras que el aceite mantiene aproximadamente una misma capacidad de temple en un amplio intervalo de temperaturas. El carácter de movimiento del medio de enfriamiento es determinante durante el proceso de enfriamiento, este puede ser laminar o turbulento, en forma de flujo o chorro. Con el aumento de la velocidad de movimiento del medio, aumentan bruscamente los procesos de intercambio de calor, los químicos y otros, por lo que un suministro a alta velocidad de agua fría o aire a través de un rociado puede aumentar en varias decenas de veces la velocidad de enfriamiento y así lograr una transformación martensítica uniforme en la pieza; al suministrar aire a alta velocidad a través de un rociado se puede lograr una capacidad de enfriamiento igual al del aceite, (Solodijin, 1987).



1.3.2. Métodos específicos de enfriamiento.

Frecuentemente el temple de las piezas se realiza de forma continua desde las temperaturas de calentamiento hasta 80 - 20 grados en un solo medio. La terminación del enfriamiento en los medios como en aceite, disoluciones salinas y baños metálicos se realiza sin la utilización de procedimientos específicos, que a veces estos no tienen dificultad alguna en su realización; la pieza luego del calentamiento se introduce en el medio de enfriamiento con o sin agitación y el enfriamiento se realiza hasta la temperatura del medio y luego se extrae al aire. Un enfriamiento de mayor complejidad lo constituye cuando se realiza en medios con alta velocidad de enfriamiento como lo es el agua y sus disoluciones acuosas. En este caso en las piezas de espesores medios y en especial las piezas gruesas aparecen diferencias de temperaturas entre la superficie y el centro, las cuales pueden alcanzar más de 600 °C, las que provocan tensiones considerables, deformaciones y finalmente la formación de grietas. Con el objetivo de disminuir el nivel de tensiones surgidas durante el temple se toman medidas especiales, entre las que se encuentran la limitación del intervalo del enfriamiento rápido y de las propias velocidades de enfriamientos dentro de este intervalo. Dentro de los métodos más efectivo para prevenir la aparición de grietas para piezas con espesores medios y gruesos lo constituye el enfriamiento interrumpido, por inmersión y por aspersion, en algunos casos ambos métodos son utilizados de forma combinada, o sea la pieza se enfría por inmersión en la cuba con el líquido y de forma simultánea algunas secciones de las piezas son enfriadas adicionalmente con un chorro fuerte del propio líquido. Generalmente el enfriamiento por chorro se emplea para el enfriamiento de cavidades internas de las piezas durante el temple localizado, (Nekrasov, 2011).

1.3.3. Formas de enfriamiento de las piezas durante 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 estadíos 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 (estadío) 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 templean 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 (e). En la figura se muestra un ejemplo de inmersión de algunas configuraciones de piezas en el medio de enfriamiento.

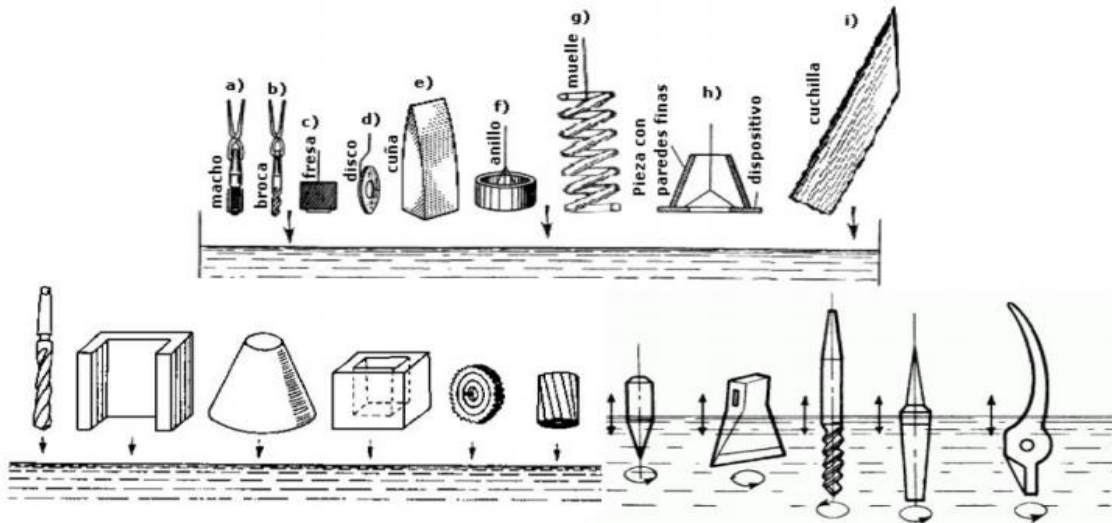


Figura 2: Formas recomendadas para la inmersión de piezas en los baños de enfriamiento (Nekrasov, 2011).

1.4. Fundamentos teóricos del enfriamiento por centrifugación.

El enfriamiento durante el temple de los aceros debe facilitar la obtención de determinadas estructuras en las secciones de las piezas, dado todo esto por su templabilidad y al mismo tiempo no debe provocar defectos de temple tales como: formación de grietas, torceduras, deformaciones y un elevado nivel de tensiones residuales.

Enfriamiento por centrifugación: es el enfriamiento inducido por la aplicación de frecuencias de rotación, bajo el efecto del intercambio de calor por convección en el interior de una cámara.

Efecto Aero-termo-centrifugado: efecto que se produce por un flujo de aire impulsado por la aplicación de frecuencias de rotación a determinada temperatura de austenización.

El proceso de enfriamiento por centrifugación consiste en el efecto areo-termo-centrifugado que se origina dentro de una cámara de enfriamiento, donde una vez las piezas austenizadas a 980 °C, se trasladan hacia el interior de la cámara y se



le aplica el nivel de frecuencias de rotación indicado. Este procedimiento hace que disminuya la severidad del gradiente de temperatura que surge en la superficie de la pieza por impacto térmico directo, lo que facilita una transformación en condiciones energéticas y cinéticas más estables, permite la obtención de una microestructura homogénea, con una distribución adecuada de sus constituyentes estructurales, minimizar o eliminar las distorsiones y las tensiones residuales y alcanzar la dureza deseada en correspondencia a las operaciones aplicadas.

En la presente investigación se emplearán los métodos de estudio por modelación por CFD considerando las siguientes variables de experimentación, según tabla 1.4

Tabla 1.4. Variables de experimentación consideradas en los ensayos por modelación del enfriamiento por centrifugación por CFD

Variable	Parámetro	Unidades	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
TA	Temperatura de austenización	°C	1 050		
VF	Velocidad del flujo	m/s	3		
F _r	Frecuencia de rotación	r/min (s ⁻¹)	500 (8,33)	1 000 (16,67)	1 500 (25)
TF	Temperatura del fluido	°C	27		

1.4.1. Mecanismo de transferencia de calor.

Cuando existe un desnivel de temperaturas en un sistema o cuando dos sistemas a diferentes temperaturas se ponen en contacto se transfiere energía. El proceso mediante el cual tiene lugar este transporte de energía se conoce como transmisión de calor. Lo que transmite calor no puede ser medido ni observable directamente; pero sus efectos, preferentemente variaciones de energía interna, permiten su medida. De acuerdo a los conceptos de la termodinámica, siempre que existe una diferencia de temperatura en el universo, la transferencia de calor se realiza desde los cuerpos de temperatura más elevada a los cuerpos más fríos,



esta energía transmitida se denomina calor. Las leyes de la Termodinámica tratan de la transferencia de energía, pero siempre se refieren a sistemas que están en equilibrio, y solo pueden utilizarse para predecir la cantidad de energía requerida para cambiar un sistema de un estado de equilibrio a otro (Castellanos & Montesino, 2007). Por ello podemos decir que la transferencia de calor se refiere al intercambio de energía entre cuerpos que se encuentran a diferente temperatura en un sistema determinado. A través de la transferencia de calor, se complementan los principios termodinámicos, los mismos proporcionan métodos de análisis que permiten predecir la velocidad de transferencia térmica. Por ello es necesario considerar para realizar un análisis completo de la transferencia de calor tres mecanismos diferentes: **conducción, convección y radiación**. No obstante, es necesario considerar que en la mayoría de los casos el calor se transfiere de forma simultánea en varias de estas formas.

Existen dos tipos de convección:

Convección natural: Ocurre cuando la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que da lugar a fuerzas ascensionales, el fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna fuerza motriz exterior.

Convección forzada: La misma tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido con una velocidad (v), sobre una superficie que se encuentra a una temperatura T_s mayor o menor que la del fluido T_f , como la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural, se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura. Independiente de que la convección sea natural o forzada, la cantidad de calor transmitido Q_c , se puede escribir (Ley de enfriamiento de Newton).

$$Q_c = hA(t_s - t_f)$$

Donde:



h = Coeficiente de transferencia del calor por convección en la interface gas – sólido ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$).

A = Área superficial en contacto con el fluido (m^2).

Radiación: Es la propagación del calor sin la intervención de partículas materiales y debida a la propagación de ondas electromagnéticas, si solo hubiese conducción y convección, un cuerpo colocado en el vacío estaría siempre a la misma temperatura. Todo cuerpo emite hacia el espacio energía en forma de ondas electromagnéticas que supone una pérdida de energía y por consiguiente su temperatura disminuye, los cuerpos que le rodean también emiten radiación y parte de ella la absorbe el cuerpo inicial de modo que se establece un balance de energía entre ellos. Un cuerpo negro es un emisor y absorbedor perfecto de radiación. A una temperatura y longitud de onda específica ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro. Además, absorbe toda la radiación incidente sin importar su longitud de onda ni dirección y es un emisor difuso (Andrade & Masabanda, 2012, p.12). Un cuerpo negro, emitirá energía a una rapidez proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo. Cuando dos cuerpos intercambian calor por radiación, el intercambio de calor neto es entonces proporcional a las diferencias en T^4 .

$$q = \sigma A(t_1^4 - t_2^4)$$

Donde:

σ = es la constante de proporcionalidad y se le llama constante de Stefan-Boltzmann con el valor de $5.669 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}^4$ (Castellanos & Montesino, 2007).

1.5 Parámetros termodinámicos del sistema de enfriamiento por centrifugación del acero para herramienta AISI D2.

El AISI D2 es uno de los aceros trabajados en frío más utilizados, con alto contenido de carbono 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, la dispersión de la



martensita, la densidad de dislocaciones y las segregaciones. La correlación predominante entre las segregaciones y la tenacidad implica su cantidad, tipo, tamaño, morfología, estabilidad y distribución espacial. El acero puede tener diferentes performances en servicio según el tamaño, la morfología y la distribución de los carburos eutécticos, que dependen en gran medida de las condiciones de trabajo en caliente, la temperatura del medio, y el tiempo entre cada ciclo de forja C.A. & McQueen (como se citó en Becerra & Morales, 2019). El acero para herramientas AISI D2, muestra una ultra alta resistencia y excelente resistencia al desgaste; sin embargo, experimenta una disminución de su tenacidad en el servicio, la descomposición de la austenita retenida en ferrita (500°C) está relacionado $\approx 773 \text{ K}$ (\approx y cementita durante el proceso de revenido con la pérdida de tenacidad de esta aleación Nanesa & Jahazi (como se citó en Becerra & Morales, 2019).

1.5.1. Coeficiente de transferencia de calor por convección.

El coeficiente de transferencia de calor depende del tipo de flujo de las propiedades termofísicas del fluido y de la geometría del sistema. Su valor no es constante debido a que las condiciones del flujo varían de punto en punto sobre la superficie, pero en los cálculos de aplicación de ingeniería se usa el valor del coeficiente de convección promedio. El análisis matemático de la convección es complejo en la mayoría de problemas de interés práctico se los estudia experimentalmente, obteniéndose resultados a través de ecuaciones empíricas en función de números adimensionales (Andrade & Masabanda, 2012, p.6).

1.5.2. Número de Nusselt.

El número de Nusselt es un número adimensional que se usa para describir la relación de la energía térmica que se convence al fluido con respecto a la energía térmica conducida dentro del fluido. El número de Nusselt es igual al gradiente de temperatura adimensional en la superficie y proporciona una medida de la transferencia de calor por convección que ocurre en la superficie.



$$N_u = \frac{hD}{k}$$

Donde:

k - es la conductividad térmica del fluido.

D - es la distancia característica.

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

1.5.3. Número de Prandtl

Se define como la relación de difusividad impulso a la difusividad térmica. La difusividad del momento o como se le llama normalmente viscosidad cinemática, nos dice la resistencia del material a los flujos de corte (diferentes capas de flujo viajan con diferentes velocidades debido, por ejemplo, a diferentes velocidades de paredes adyacentes) en relación con la densidad.

$$P_r = \frac{v}{a} = \frac{C_p \cdot \mu}{k_f}$$

Donde:

V - es la difusividad del momento (viscosidad cinemática); (m²/s).

a - es la difusividad térmica; (m²/s).

Cp - es el calor específico; (J/kg·K).

μ - es la viscosidad dinámica; (N·s/m²).

k - es la conductividad térmica; (W/m·K).

1.5.4 Número de Reynolds

Para convección forzada en un flujo interno el número de Reynolds se define en función del diámetro del tubo y de la velocidad media del fluido sobre la sección transversal del tubo.

$$R_{eD} = \frac{\rho \mu_m D}{\mu} = \frac{4m}{\pi D \mu}; m = \rho \mu_m A_c$$



Donde:

ρ – Densidad del fluido; kg/m³

μ_m – Velocidad media del fluido; m/s

D – Dimensión característica (diámetro de la centrífuga), m

μ – Viscosidad dinámica del fluido; Pa·s

1.6. Software CAD para la modelación 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 (SolidWorksCorporationDassaultSystemes, 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, (SolidWorksCorporationDassaultSystemes, 2016).

1.6.1 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, (SolidWorksCorporationDassaultSystemes, 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 tendría el flujo de líquido o gas en el rendimiento del producto, (SolidWorksCorporationDassaultSystemes, 2018).

1.5.2 Módulo de Simulation

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 fórmula 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.



CAPÍTULO II. PARÁMETROS TERMODINÁMICOS DEL ENFRIAMIENTO POR CENTRIFUGACIÓN.

2.1 Estudios del fluido en contorno cerrado de la cámara durante el proceso del enfriamiento por centrifugación por los métodos de CFD.

Para la determinación de los parámetros termodinámicos del fluido en un contorno cerrado de la cámara durante el enfriamiento por centrifugación se empleará las herramientas CAD del software de diseño SolidWorks 2016. Para estos estudios se seleccionará la tecnología de tratamiento térmico empleada durante el proceso de enfriamiento por centrifugación al acero para herramientas AISI D2, tomando como base para este estudio la temperatura intermedia de austenización (1 050 °C), así como, 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 1 500 r/min (25 s^{-1})).

El estudio se realizó por medio de la modelación del proceso de enfriamiento, empleando para ello el módulo de “Flow Simulation” donde se establecieron los siguientes parámetros de entrada:

Temperatura del fluido: 27 °C

Presión atmosférica estática: 101 321,32 Pa

Temperatura de las piezas: 1 050 °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 los parámetros termodinámicos.

Los estudios se realizaron con el objetivo de determinar el comportamiento de la temperatura del fluido dentro de la cámara de enfriamiento, su trayectoria, velocidad, presión durante el proceso de enfriamiento y la densidad del fluido.



2.1.2. Estudios del fluido para las frecuencias de rotación de 500 r/min, ($8,33 \text{ s}^{-1}$).

Estudio 1. Estudio de presión del fluido.

En la figura 2.1 se muestra el comportamiento de la presión del fluido en el contorno cerrado de la cámara de enfriamiento donde se puede apreciar que la zona de mayor presión ($101\,325,90 \text{ Pa}$) predomina en una zona muy pequeña en los extremos de la parte superior de la misma y alrededor de las piezas enfriadas se observa un descenso de la misma e igual a $101\,322,32 \text{ Pa}$.

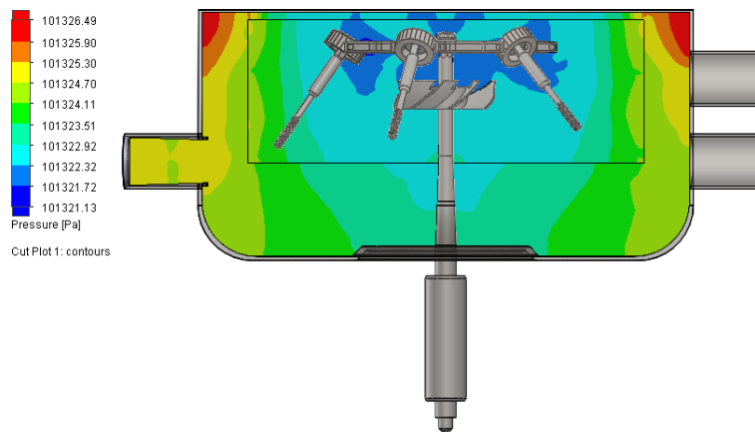


Figura 2.1. Modelo de comportamiento de la presión a $1\,050 \text{ }^\circ\text{C}$ y 500 r/min , ($8,33 \text{ s}^{-1}$).

Estudio 2. Estudio de temperatura del fluido.

En la figura 2.2 se puede apreciar que, en el contorno cerrado de la cámara de enfriamiento, cuando no existe entrada de aire forzado y una vez que ocurre el proceso de intercambio de calor entre las superficies de las piezas y el fluido, la temperatura dentro de la cámara alcanza un valor medio igual a $808,17 \text{ K}$ ($535,02^\circ\text{C}$), mientras que alrededor de las piezas se observa una temperatura inferior a la de austenización e igual a $922,6 \text{ K}$ ($649,46 \text{ }^\circ\text{C}$), lo que nos muestra que la temperatura en la cámara se encuentra por debajo de la temperatura de la menor estabilidad de la austenita subenfriada para esta aleación. El flujo de calor superficial de las piezas hacia el medio de enfriamiento (fluido de aire en movimiento) es de $57\,222,25 \text{ W/m}^2$ y el coeficiente de transferencia de calor medio es igual $28,82 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, lo que desarrolla un flujo de calor superficial por



convección promedio de $30\,547,84\text{ W/m}^2$ y por conducción promedio de $707\,434,40\text{ W/m}^2$.

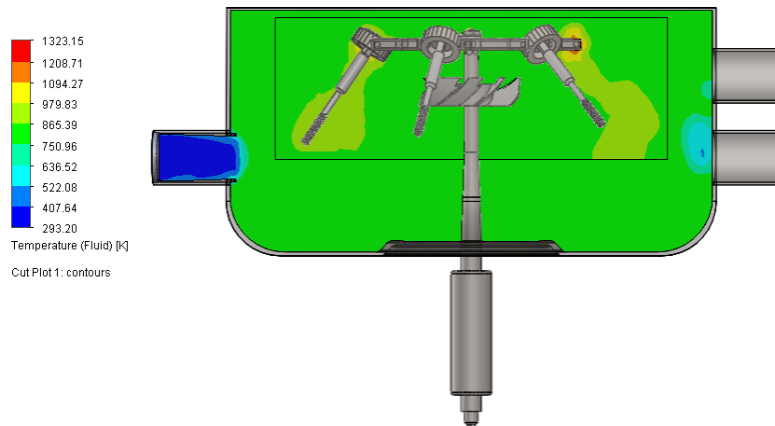


Figura 2.2. Modelo de comportamiento de la temperatura a $1\,050\text{ }^\circ\text{C}$ y 500 r/min ($8,33\text{ s}^{-1}$).

Estudio 3. Estudio de la velocidad y densidad del fluido.

En la figura 2.3 se muestra el estudio del comportamiento de la velocidad del fluido dentro de la cámara de enfriamiento tomando en consideración la presión desarrollada y la temperatura alcanzada dentro de la misma, donde se pudo determinar que la velocidad media del movimiento del fluido fue de $5,26\text{ m/s}$ y desarrolla una densidad igual a $0,32\text{ kg/m}^3$.

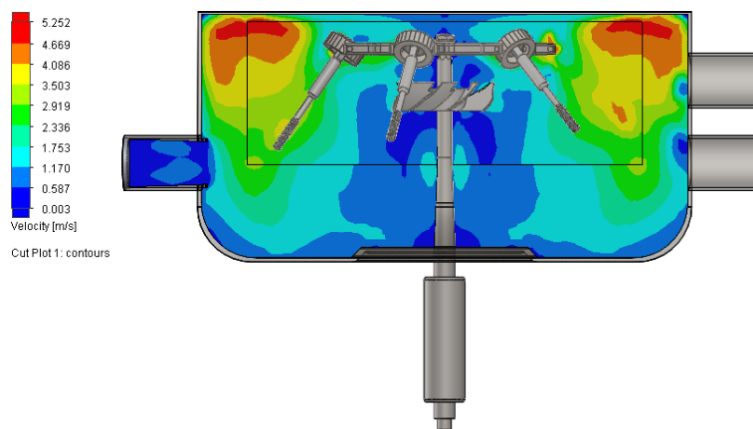


Figura 2.3. Modelo del comportamiento de la velocidad del fluido a $1\,050\text{ }^\circ\text{C}$ y 500 r/min ($8,33\text{ s}^{-1}$).

2.1.3. Estudios del fluido para las frecuencias de rotación de $1\,000\text{ r/min}$ ($16,67\text{ s}^{-1}$).



El comportamiento de los parámetros de presión, temperatura, velocidad y densidad del fluido para los niveles de frecuencias de rotación de $16,67 \text{ s}^{-1}$ se muestran a continuación.

Estudio 1. Estudio de presión del fluido

En la figura 2.4 se muestra el comportamiento de la presión del fluido dentro de la cámara de enfriamiento donde se puede apreciar que existe, en general, un aumento de la presión en el sistema con respecto a la presión obtenida durante la aplicación de las frecuencias de rotación de $8,33 \text{ s}^{-1}$, donde se observan también varias zonas, cada una de las cuales muestra una mayor presión en la medida que disminuye el flujo de calor hacia el medio, siendo la zona de mayor presión igual a (101 385,20 Pa), la cual predomina en una zona bien delimitada en los extremos de la parte superior de la cámara y alrededor de las piezas enfriadas se observa una disminución de la misma igual a 101 310,77 Pa.

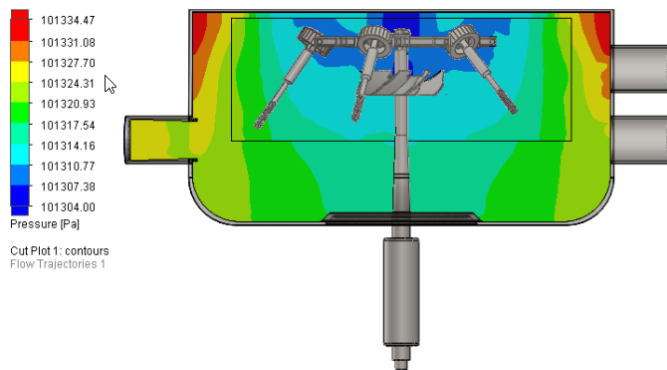


Figura 2.4. Modelo de comportamiento de la presión a $1\ 050 \text{ }^\circ\text{C}$ y $1\ 000 \text{ r/min}$ ($16,67 \text{ s}^{-1}$).

Estudio 2. Estudio de temperatura del fluido

En la figura 2.5 se observa que el comportamiento de la temperatura del fluido en la cámara se comporta de manera muy estable, con un valor promedio igual a 677 K ($403,95 \text{ }^\circ\text{C}$), lo que nos demuestra que existe una mejor condición termodinámica para el desarrollo del enfriamiento. El flujo de calor superficial de las piezas hacia el medio de enfriamiento (fluido de aire en movimiento) es de $102\ 835,91 \text{ W/m}^2$ y el coeficiente de transferencia de calor medio es igual $56,09$



$W/m^2 \cdot K$, lo que desarrolla un flujo de calor superficial por convección promedio de $57\,773,59\ W/m^2$ y por conducción promedio de $1\,201\,269,67\ W/m^2$.

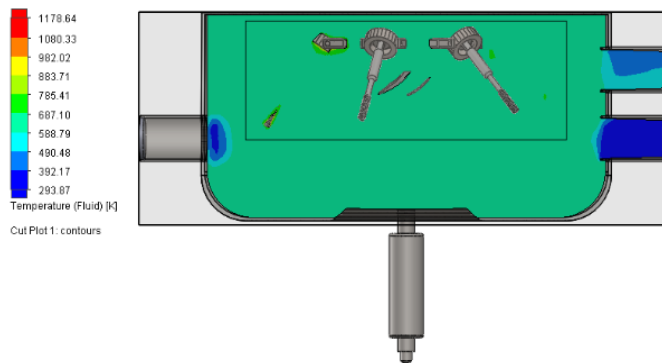


Figura 2.5. Modelo de comportamiento de la temperatura a $1\,050\ ^\circ C$ y $1\,000\ r/min$ ($16,67\ s^{-1}$).

Estudio 3. Estudio de la velocidad y densidad del fluido

En la figura 2.6 se muestra el estudio del comportamiento de la velocidad del fluido dentro de la cámara de enfriamiento tomando en consideración la presión desarrollada y la temperatura alcanzada dentro de la misma, donde se determinó que la velocidad media del movimiento del fluido fue de $10,52\ m/s$ con una densidad del fluido igual a $0,378\ kg/m^3$. Es necesario destacar que a estos niveles de frecuencias de rotación se obtiene una mayor velocidad de movimiento del fluido dentro de la cámara, con respecto al alcanzado con $500\ r/min$ ($8,33\ s^{-1}$), lo que mejora el proceso de enfriamiento.

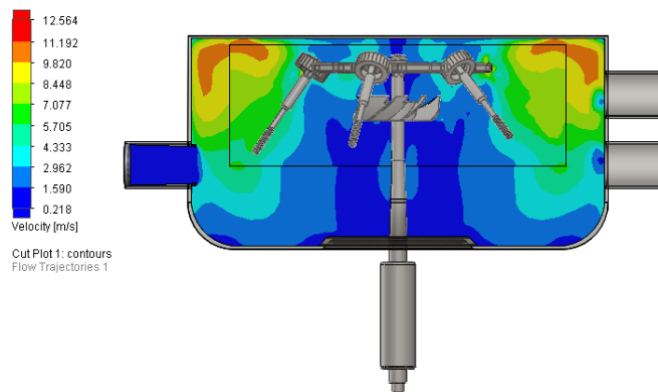


Figura 2.6. Modelo de comportamiento de la velocidad y densidad del fluido a $1\,050\ ^\circ C$ y $1\,000\ r/min$ ($16,67\ s^{-1}$).



2.1.4. Estudios del fluido para las frecuencias de rotación de 1 500 r/min (25 s⁻¹).

El comportamiento de los parámetros de presión, temperatura, velocidad y densidad del fluido para los niveles de frecuencias de rotación de 25 s⁻¹ se muestran a continuación.

Estudio 1. Estudio de presión del fluido.

En la figura 2.7 se muestra el comportamiento de la presión del fluido en el contorno cerrado de la cámara de enfriamiento donde se puede apreciar que existe una disminución de la presión en el sistema con respecto a las frecuencias de rotación de 8,33 s⁻¹ y 16,67 s⁻¹ a una misma temperatura, con una presión media del sistema igual a (101293,88 Pa); la zona de mayor presión (101473,79 Pa) predomina en los extremos de la parte superior de la cámara y alrededor de las piezas enfriadas se aprecia una diferencia de presión de limitando distintas zonas dentro de la cámara, en las cercanías de las piezas se observa una presión media igual a 101 293,94 Pa,

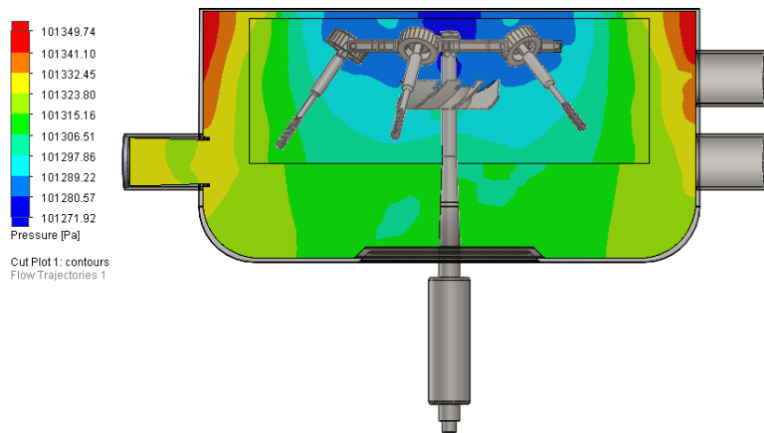


Figura 2.7. Modelo de comportamiento de la presión a 1 050 °C y 1 500 r/min (25s⁻¹).

Estudio 2. Estudio de temperatura del fluido.

En la figura 2.8 se muestra el comportamiento de la temperatura del fluido al nivel estudiado de frecuencias de rotación, donde se aprecia que la misma varía y se establece en dos zonas bien delimitadas, la mayor temperatura se observa en las



cercanías de las piezas debido al proceso de radiación con un valor promedio igual a 635 K (362 °C), y en los extremos de la cámara una temperatura igual a 524,35 K (251,2 °C). El flujo de calor superficial de las piezas hacia el medio de enfriamiento es de 135 699,96 W/m² y el coeficiente de transferencia de calor promedio igual a 75,98 W/m²·K, lo que desarrolla un flujo de calor superficial por convección promedio de 78 265,39 W/m² y por conducción promedio de 15 35718,15 W/m².

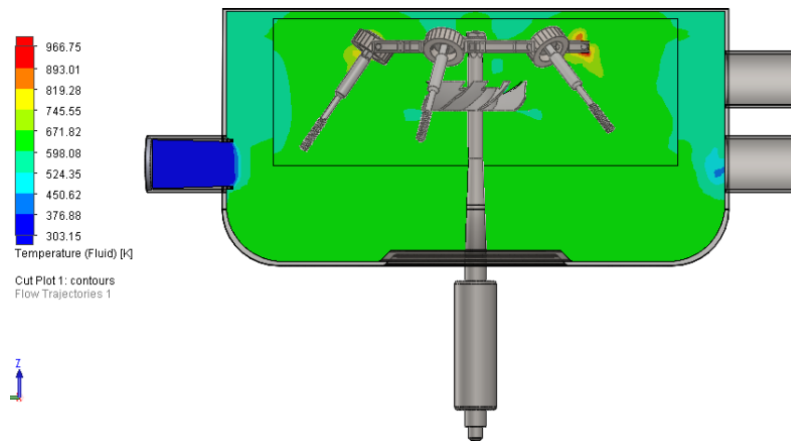


Figura 2.8. Modelo de comportamiento de la temperatura a 1 050 °C y 1 500 r/min (25 s⁻¹).

Estudio 3. Estudio de la velocidad y densidad del fluido.

En la figura 2.9 se muestra el estudio del comportamiento de la velocidad del fluido dentro de la cámara de enfriamiento tomando en consideración la presión desarrollada y la temperatura alcanzada dentro de la misma, donde se determinó que la velocidad media del movimiento del fluido fue de 15,78 m/s con una densidad del fluido igual a 0,42 kg/m³. Es necesario destacar que a estos niveles de frecuencias de rotación se obtiene una mayor velocidad de movimiento del fluido dentro de la cámara, con respecto al alcanzado con 500 r/min (8,33 s⁻¹) y 1 000 r/min (16,67 s⁻¹).



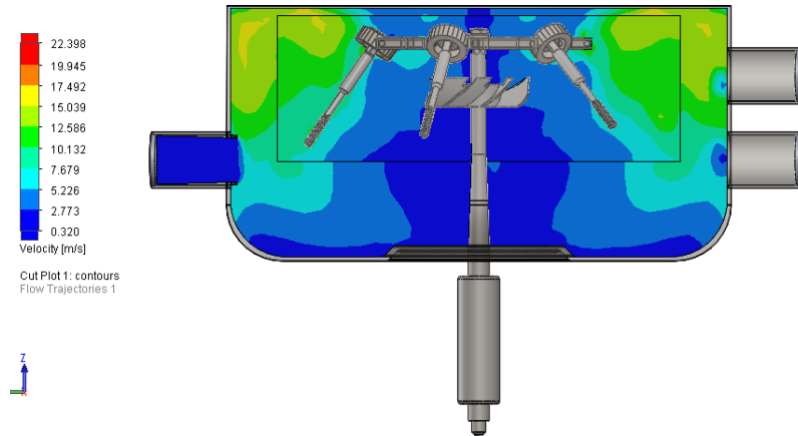


Figura 2.9. Modelo de comportamiento de la velocidad y densidad del fluido a 1 050°C y 1500 r/min ($25s^{-1}$).

En la siguiente tabla, tabla 2.1, se muestra el resumen de los valores y el comportamiento de los parámetros del enfriamiento estudiados por el método de CFD.

Tabla 2.1. Comportamiento de los valores obtenidos del estudio de la presión, temperatura, velocidad y densidad del fluido durante el temple por el método de centrifugación para la temperatura de austenización de 1 050 °C a (500; 1 000; 1 500) r/min.

Parámetros de estudio	Valores obtenidos por CFD		
Frecuencia de rotación; s^{-1}	8,33	16,67	25
Densidad desarrollada por el fluido; kg/m^3	0,32	0,378	0,42
Temperatura media dentro de la cámara; °C	535,02	403,95	362
Presión; Pa	101322,32	101 310,77	101 293,88
Velocidad media del fluido; m/s	5,26	10,52	15,78
Coefficiente de transferencia de calor; $W/m^2 \cdot K$	28,82	56,09	75,98
Flujo de calor superficial de las piezas; W/m^2	57 222,25	102 835,91	135 699,96
Flujo de calor superficial por convección; W/m^2	30 547,84	57773,59	78 265,39
Flujo de calor superficial por conducción; W/m^2	707 434,40	120 1269,67	15 35718,15



2.2. Determinación de los coeficientes termodinámicos del proceso de enfriamiento por centrifugación.

- Número de Reynolds

Para una frecuencia de rotación de 500 r/min ($8,33 \text{ s}^{-1}$)

Para una frecuencia de rotación de 500 r/min ($8,33 \text{ s}^{-1}$) y una temperatura media del fluido igual a $535,02 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\rho = 0,32 \text{ kg/m}^3 \quad D = 0,274 \text{ m}$$

$$u_m = 5,26 \text{ m/s} \quad \mu = 36,95 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s} = \text{kg/m} \cdot \text{s}$$

$$R_{eD} = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{4m}{\pi D \mu}; \quad m = \rho u_m A_c \quad R_{eD} = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{m}}{\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}}$$

$$R_{eD} = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{0,32 \cdot 5,26 \cdot 0,274}{36,95 \cdot 10^{-6}} = 12\,481,64 > 4000 \quad \text{Lo que demuestra que}$$

existe un flujo turbulento.

Para una frecuencia de rotación de 1000 r/min ($16,67 \text{ s}^{-1}$) y una temperatura media del fluido igual a $403,95 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\rho = 0,378 \text{ kg/m}^3$$

$$u_m = 10,52 \text{ m/s}$$

$$\mu = 33,75 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s} = \text{kg/m} \cdot \text{s}$$

$$R_{eD} = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{0,378 \cdot 10,52 \cdot 0,274}{33,75 \cdot 10^{-6}} = 32\,283,776 > 4000 \quad \text{flujo turbulento}$$

Para una frecuencia de rotación de 1500 r/min (25 s^{-1}) y una temperatura media del fluido igual a $362 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\rho = 0,42 \text{ kg/m}^3$$

$$u_m = 15,78 \text{ m/s}$$

$$\mu = 32,2 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s} = \text{kg/m} \cdot \text{s}$$

$$R_{eD} = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{0,42 \cdot 15,78 \cdot 0,274}{32,2 \cdot 10^{-6}} = 56\,748,82 > 4000 \quad \text{flujo turbulento}$$



Número de Prandtl

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k_f} = \frac{v}{a}$$

Para la temperatura de austenización de 1 050 °C

A 1500 r/min el fluido alcanza una temperatura media dentro de la cámara igual a 362 °C

$$Pr = 0,677$$

A 1000 r/min la temperatura del fluido dentro de la cámara alcanza 403,95 °C

$$Pr = 0,685$$

A 500 r/min la temperatura del fluido dentro de la cámara alcanza 535,02 °C

$$Pr = 0,687$$

Número de Nusselt

Tal y como para las frecuencias de rotación aplicadas internamente en la cámara se desarrolla un flujo turbulento y existe un calentamiento del fluido, se cumple que:

$0,5 \leq Pr \leq 2\,000$ y $3\,000 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6$ para determinar el número de Nusselt se aplica Gnielinski (1976)

Para la frecuencia de rotación de 500 r/min ($8,33 \text{ s}^{-1}$)

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12,7 \cdot (f/8)^{0,5} \cdot (Pr^{2/3}-1)} ; \text{ donde: } f = (0,79 \ln Re - 1,64)^{-2} \text{ (Petukhov 1970)}$$

$$f = (0,79 \ln 12\,481,64 - 1,64)^{-2} = (0,79 \cdot 9,43 - 1,64)^{-2} = (5,8112)^{-2} = 0,029$$

$$Nu_D = \frac{(0,004)(12\,481,64 - 1\,000) \cdot 0,687}{1 + 12,7 \cdot (0,004)^{0,5} (0,687^{2/3} - 1)} = \frac{31,55}{1 + 12,7(0,063) \cdot (-0,21)} = \frac{31,55}{0,83} = 38,01$$

Para las frecuencias de rotación de 1 000 r/min ($16,67 \text{ s}^{-1}$)

$$f = (0,79 \ln 32\,283,78 - 1,64)^{-2} = (0,79 \cdot 10,38 - 1,64)^{-2} = 0,023$$

$$Nu_D = \frac{(0,0029)(32\,283,78 - 1\,000) \cdot 0,685}{1 + 12,7 \cdot (0,0029)^{0,5} (0,685^{2/3} - 1)} = \frac{62,14}{1 + 12,7(0,053) \cdot (-0,22)} = \frac{62,14}{0,84} = 73,97$$

Para las frecuencias de rotación de 1500 r/min (25 s^{-1})



$$f = (0,79 \ln 56\,748,82 - 1,64)^{-2} = (0,79 \cdot 10,94 - 1,64)^{-2} = 0,020$$

$$N_{uD} = \frac{(0,0025)(56\,748,82 - 1\,000) \cdot 0,677}{1 + 12,7 \cdot (0,0025)^{0,5} (0,677^{2/3} - 1)} = \frac{94,35}{1 + 12,7(0,05) \cdot (-0,22)} = \frac{94,35}{0,86} = 109,70$$

Los resultados de los estudios realizados se muestran a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 2.2. Tabla resumen del resultado del cálculo de los parámetros termodinámicos en el contorno cerrado de la cámara de enfriamiento.

Parámetros	Valores obtenidos mediante el cálculo		
Frecuencias de rotación, s ⁻¹	8,33	16,67	25
Número de Reynolds (Re)	12 481,64	32 283,776	56 748,82
Número de Prandalt (Pr)	0,687	0,685	0,677
Número de Nusselt (Nu)	38,01	73,97	109,70

Según los resultados obtenidos de los estudios realizados podemos concluir que, el proceso de enfriamiento en el contorno cerrado de la cámara se produce por medio del movimiento turbulento del fluido, como lo indica el valor del número de Reynolds para cada nivel de frecuencia de rotación estudiado; en la medida que aumentan las frecuencias de rotación del proceso, el movimiento del fluido se intensifica, lo que conlleva a un notable aumento del flujo de calor y del proceso de transferencia de calor por convección hasta alcanzar un valor máximo de 78 265,39 W/m² a 25 s⁻¹, así como lo indica el comportamiento de la velocidad del fluido y de la temperatura durante el proceso, observándose un ligero descenso de la presión, lo que favorece el intercambio de calor.



CONCLUSIONES.

1. Se determinaron los parámetros termodinámicos que se desarrollan durante el proceso de temple con enfriamiento por centrifugación a la temperatura de austenización de 1 050 °C en el contorno cerrado de la cámara de enfriamiento.
2. Se demostró que el enfriamiento en los niveles de frecuencias de rotación estudiados ocurre mediante el proceso de transferencia de calor por convección por medio del movimiento turbulento del fluido dentro de la cámara.
3. Se comprobó que la estabilidad termodinámica dentro de la cámara se logra por debajo de la temperatura de la menor estabilidad de la austenita subenfriada.
4. Se demostró que al aumentar los niveles de frecuencias de rotación, se intensifica el proceso de enfriamiento, observándose los resultados más apropiados a $16,67 \text{ s}^{-1}$, dadas la distribución más uniforme de la temperatura durante el proceso de enfriamiento y un comportamiento más estable del proceso de transferencia de calor.



RECOMENDACIONES.

1. Se recomienda determinar los parámetros termodinámicos para la temperatura de austenización de 1 050 °C a las frecuencias experimentales de rotación de 8,33 s⁻¹, 16,67 s⁻¹ y 25 s⁻¹ en un régimen transitorio.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta, A. y Narváez, M. (2012). Diseño y Contrucción de un Equipo para el Análisis de Transferencia de Calor por Radiación y Convección Combinadas para el Laboratorio de Transferencia de Calor.(Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Mecánico).Quito, Ecuador. Recuperado de <https://1library.co/document/yd75pmlly-construccionanalisis-transferenciaradiacion-conveccion-combinadas-laboratoriotransferencia.html>.
2. Ávila, J. y Ruiz, J.(2019). Efecto de la temperatura en austenización simple y doble del tratamiento térmico convencional del acero para herramientas AISI D2 sobre la microestructura, dureza y tenacidad.(Tesis en Opción al Título de Ingeniero de Materiales).Trujillo, Perú. Recuperado de <http://www.dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/15351/Becerra%20Avila%2c%20Jorge%20Gerardo%3b%20Morales%20Ruiz%2c%20Jefferson.pdf?sequence=1&isAllowed=y> .
3. Becerra, M. at et.al.(2021).Tratamientos Térmicos.TEPEXI,8(15).41 -44. Recuperado de: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/tepexi/issue/archive>.
4. Bozidar Lisci'c, Hans M. Tensi at et.al. (2010). Quenching Theory and Technology, 2da. Edition, by Taylor and Francis Group, LLC. ISBN 978-0- 8493-9279-5. Pag.328.
5. Castellanos, J., Montesino, M. (2007). Métodos Fundamentales de Análisis de los Procesos de Transmisión de Calor. Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente. Cienfuegos. Cuba: Editorial de Universidad de Cienfuegos.
6. Corace, J. (2009). Unidad V: Mecanismos de Transferencia de Calor. Física II. Recuperado de <http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica2/U05.pdf>.
7. C.WEGST, M.WEGST. Key to Steels Database. s.l. : Verlag Stahleisen mbH, Dusseldorf, 2004. ISBN 3-922599-20-6. Llave de los aceros.



8. Escuela Colombiana de Ingeniería. (2008). Tratamientos Térmicos. Recuperado de <https://docplayer.es/39777234-Tratamientos-termicosprotocolo-curso-de-materiales.html> .
9. Jorge, M. (2016). Diseño y Construcción de una Máquina de Ensayo Jominy de Templabilidad para la Carrera de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte. (Trabajo de Grado Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en Mecatrónica). Ibarra, Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/5359>.
10. Martín, A. (2011). Apuntes de Transmisión de Calor. Departamento de Física e Instalaciones. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de <http://oa.upm.es/6935/1/amd-apuntes-transmision-calor.pdf>.
11. Patiño, H; Rosero, B. (2016). Tratamiento térmico de temple, influencia del medio de enfriamiento. Ciencia e Ingeniería, 8(1). 52-58. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Hernan-Patino-Duque/publication/320295979_Tratamiento_termico_de_temple_influencia_del_medio_de_enfriamiento/links/59dc2421aca2728e20183ccf/Tratamiento-termico-de-temple-influencia-del-medio-de-enfriamiento.pdf?origin=publication_detail.
12. Ruperto, J. y Sebastián, B. (2014). Diseño y Construcción de un Equipo Didáctico de Convección Forzada con Sistema de Control Centralizado para el Laboratorio de Transferencia de Calor. Quito, Ecuador. (Tesis en Opción al Título de Ingeniero Mecánico). Recuperado de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7489/1/CD-5607.pdf>.
13. SolidWorks Corporation. (2016). Introduction to Simulation.
14. Solidworks Corporation. (2016). Solidworks Simulation Professional. (D. Systemes, Ed.) USA.
15. SolidWorks Corporation Dassault Systèmes. (2016). Diseño Innovador para el Diseño y Desarrollo de Productos.



16. SolidWorks Corporation Dassault Systèmes. (2018). Por qué Solidworks Flow Simulation es la Opción Perfecta para los Ingenieros de Product.
17. Villafruela,G. (2014). Influencia del temple por centrifugación sobre la dureza del acero para herramientas D2.(Tesis de Maestría).Universidad de Holguín, Holguín.
18. Villafruela ,G. (2019). Temple por centrifugación para el acero AISI D2 a bajas temperaturas de austenización.Universidad de Holguín, Holguín.
19. 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 al título de ingeniero mecánico). Universidad de Holguín, Holguín.
20. The effect of some heat treatment parameters on the properties of AISI D2. SURBERG CORD HENRIK, PAUL STRATTON, KLAUS LINGENHÖLE. 3, s.l. : ETHAN, 2014, Int. J. Mech. Eng. Autom., Vol. 1, págs. 119-128.
21. BOŽIDAR LIŠCIC, TENSI H.M, W LUTY. Quenching Theory and Technology. Second. s.l. : Taylor and Francis Group, LLC, 2010. pág. 685.

