

**TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL GRADO ACADÉMICO
DE MASTER EN CIENCIAS EN MANTENIMIENTO Y
REACONDICIONAMIENTO DE MÁQUINAS**

**Título: Influencia del temple por centrifugación sobre
la dureza del acero para herramientas D2.**

Autor: Ing. Gilberto I. Gurri Villafruela

Tutor: Dr. C. P.T Francisco Luis Hernández Árias

Holguín 2014

Dedicatoria

Dedico este trabajo de maestría a todas las personas que hicieron posible su realización, al claustro de profesores, a mi familia y amigos; por su comprensión, esfuerzos y dedicación.

La sabiduría como parte intrínseca del alma, enriquece los más secos parajes y el fruto apacible de toda ciencia honra al maestro con regocijo.

Gracias

Pensamiento

El corazón del entendido adquiere sabiduría;

Y el oído de los sabios busca la ciencia.

Proverbios 18:15

“Si no hubiese estado convencido que detrás de mis experimentos estuvo la mano de Dios, diría que la casualidad, también es parte de su creación”.

Gilberto Gurri Villafruela

9/11/2014

Resumen

Este trabajo se realizó en la Empresa “Héroes del 26 de Julio” de Holguín, dónde existe la necesidad de mejorar las condiciones para el enfriamiento durante el temple de piezas de pequeñas y medianas dimensiones fabricadas de acero para el conformado en frío D2. El objetivo del presente trabajo es el estudio de la influencia del enfriamiento centrifugado sobre la dureza del acero D2 aplicando diferentes regímenes tecnológicos de tratamientos térmicos. Este método de enfriamiento, sin antecedentes en Cuba, pretende sustituir de la práctica industrial los aceites para temple, altamente agresivos a la salud del hombre y contaminantes del medio ambiente. El estudio se realizó de forma experimental, aplicando las técnicas modernas del diseño de experimentos, procesando los datos de las mediciones con la ayuda de un estadígrafo, el cual muestra sus resultados de forma gráfica y tabulada.

Abstract

This work was carried out in the “Héroes del 26 de Julio” of Holguín factory, where exists the necessity to improving the cooling conditions during hardening of the small dimensions parts of cold work tools steel D2. The objective of the work is the study of the influence of the centrifugal cooling on the hardness of D2 steel, applying different technological processes of heat treatments. This cooling method, without antecedents in Cuba, pretend to substitute of the industrial practice the cooling oils for hardening, highly aggressive to the human’s health and pollutants of the environment. The study was carried out in an experimental way, applying the modern techniques of the design of experiments, processing the mensuration’s data with the statistician software, which shows its results in a graphic and tabulation way.

ÍNDICE
Contenidos

Pág.

Introducción	1
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE EL TRATAMIENTO TÉRMICO Y SUS MEDIOS DE ENFRIAMIENTOS EN ACEROS PARA HERRAMIENTAS.	
1.1. Estado del arte.	7
1.2. Fundamentos teóricos.	12
1.2.1. Clasificación de los medios tecnológicos de enfriamiento para temple.	12
1.2.2. Particularidades del enfriamiento en diferentes medios.	16
1.2.3. Factores que determinan la efectividad de los medios de enfriamiento.	19
1.2.4. Métodos específicos de enfriamiento.	19
1.2.5. Formas de enfriamiento de las piezas durante el temple.	20
1.3. Los aceros para herramientas.	23
1.3.1. Clasificación de los aceros para herramientas.	23
1.3.2. Aceros para herramientas de alta templabilidad.	25
1.3.3. Características, propiedades y aplicaciones del acero D2.	27
1.4. Tratamientos térmicos convencionales aplicados al acero D2.	31
1.4.1. Recocido.	36
1.4.2. Temple.	36
1.4.3. Revenido.	39

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL TEMPLE POR CENTRIFUGACIÓN APLICADO AL ACERO D2.	
2.1. Equipamiento y procedimiento utilizado	40
2.2. Diseño del experimento.	41
2.3. Caracterización del proceso de tratamiento térmico aplicado al acero D2.	43
2.4. Determinación de los tiempos tecnológicos de calentamiento.	48
2.5. Medición de la dureza.	59
2.6. Análisis de los resultados.	60
2.6.1. Procesamiento estadístico de los resultados.	60
2.6.2. Operación de temple.	60
2.6.2.1. Análisis de varianza de la dureza.	60
2.6.2.2. Medias por mínimos cuadrados para dureza.	63
2.6.2.3. Verificación del supuesto de homogeneidad de varianzas.	63
2.6.2.4. Verificación de la normalidad de la dureza.	64
2.6.3. Operación de temple y revenido.	65
2.6.3.1. Análisis de varianza de la dureza.	65
2.6.3.2. Medias por mínimos cuadrados para dureza.	68
2.6.3.3. Verificación del supuesto de homogeneidad de varianzas.	69
2.6.3.4. Verificación del supuesto de normalidad.	70
CONCLUSIONES	72
RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

INTRODUCCIÓN

Introducción.

En la aplicación de los tratamientos térmicos de piezas de máquinas y herramientas un papel fundamental lo constituye el proceso de enfriamiento, el cual es quien define en gran medida la calidad, estructura y las propiedades finales de las piezas tratadas y de su correcta aplicación depende la presencia o no de defectos, tales como: grietas, torceduras y deformaciones. Es por eso importante realizar una correcta selección de los medios de enfriamientos y su utilización racional durante el tratamiento térmico de diferentes aceros.

En la mayoría de los casos el temple de los aceros se realiza en agua, aceites, disoluciones acuosas, salinas y alcalinas, baños de metales y sales fundidas, en disoluciones poliméricas y mezclas de aire-agua y gases.

El agua y las disoluciones acuosas se distinguen por poseer una alta capacidad de enfriamiento pero a su vez es característico que el enfriamiento sea demasiado rápido en las superficies de las piezas en las zonas de bajas temperaturas, existiendo así una gran dependencia de la capacidad de enfriamiento de la temperatura, lo que trae como resultado la aparición de grietas en muchos de los casos.

El enfriamiento en aceite por su parte no ofrece estas deficiencias pero posee una baja capacidad de enfriamiento además de ser un agente altamente contaminante por la expulsión hacia la atmósfera de gases y metales pesados tales como: Pb, As, Zn, entre otros.

Los álcalis, las sales y baños de metales fundidos, poseen una capacidad de enfriamiento muy cercana a la del aceite, por otra parte la utilización de disoluciones poliméricas ha permitido obtener velocidades intermedias de enfriamiento entre el agua y el aceite.

Durante el enfriamiento en el proceso de temple, la transferencia de calor, las transformaciones de fases y las interacciones mecánicas ocurren de forma simultánea, donde los campos físicos interactúan recíprocamente entre sí por medio de variables de estado o interacciones conjuntas; siendo la transferencia de calor el único proceso sobre el cual un ingeniero puede influir en muchos de los casos, (Božidar,2010).

La variación de la temperatura en cualquier punto en el objeto a enfriar constituye una tendencia de fuerza mayor para las transformaciones de fase; se ha demostrado que si no se toma en consideración este efecto, entonces se tendrá un efecto colateral muy fuerte debido a la variación de las contracciones térmicas surgidas, las que deberán ser equilibradas por las tensiones internas que además fluctúan continuamente durante el proceso de enfriamiento por la interacción de las tensiones térmicas y de las transformaciones de fase y que producto de ello, en casos extremos, la pieza incluso podría agrietarse. En cualquier punto de la pieza enfriada, la tensión varía con el tiempo, dependiendo así la variación de las propiedades termo-mecánicas de la temperatura y de la velocidad de enfriamiento.

En la actualidad un problema determinante lo constituye la sustitución de los aceites minerales los cuales tradicionalmente han sido utilizados en calidad de medios de enfriamientos para los aceros aleados y para los cuales se necesitan determinadas exigencias técnicas, cuya problemática se encuentra relacionada fundamentalmente con el siempre creciente aumento de los precios de los derivados de los hidrocarburos, además de ser un medio deficitario y que pierde con facilidad sus propiedades de enfriamiento, incompatible con el medio ambiente y por otra parte de fácil contaminación con agua; lo que hace posible sus pérdidas de propiedades como medio de enfriamiento.

Un aspecto esencial y no menos importante dentro de los procesos de enfriamientos lo constituyen las tecnologías utilizadas para la realización de estos; las cuales van desde simples tanques o cubas hasta líneas e instalaciones automatizadas con el fin de elevar la productividad del trabajo y del equipamiento, lograr estabilidad y exactitud en los procesos tecnológicos, así como simplificar la planificación de la producción y el ahorro de recursos energéticos, (Sokolov, 1984).

La empresa de Equipos Agrícolas “Héroes del 26 de julio” cuenta con un taller para la realización de los tratamientos térmicos a materiales ferrosos y no ferrosos, fundamentalmente para el tratamiento a fundiciones de hierro y aceros. El taller se encuentra estructurado por sectores y por nivel de especialización entre los cuales se encuentra el sector para el tratamiento térmico a las herramientas tales como, calibres, machos, punzones, matrices, bloques para el forjado, estampado en frío y en caliente

en una gran variedad de aceros especiales destinados a la fabricación de estas herramientas.

Por sus excelentes propiedades físico-mecánicas, de durabilidad y características mecánicas, alrededor del 70% de las herramientas para el conformado en frío en esta empresa y a nivel mundial se fabrican del acero para herramientas D2, según normas AISI/SAE. Este acero pertenece a los aceros para herramientas de alta templabilidad, de clase ledeburítica, cuya composición química es de alto carbono (1,40-1,60 %) y cromo (11,0-13,0 %) y puede ser aleado con otros elementos como el molibdeno (0,7-1,2 %) y el vanadio (1,10 máximo).

Desde el punto de vista de comercialización, en la actualidad el precio promedio unitario de las herramientas que más comúnmente se utilizan en los procesos de manufactura de metales oscila entre los 80 y 105 euros (Catálogo de precios, 2013) y en ocasiones superior, lo que implica altos costos para enfrentar incluso, pequeños volúmenes productivos, por lo que el desarrollo y la implantación de esta investigación permitirá, en primera instancia reducir los costos propios de los procesos de los tratamientos térmicos, los costos de manufactura en un estimado de 3-5% y reducir las costosas importaciones de estas herramientas, que reportan la erogación de importantes sumas de divisas convertibles a la economía nacional.

En el presente trabajo se muestra el resultado de la investigación realizada a cerca de los niveles de dureza alcanzados en este acero durante el temple por el método de centrifugación, el cual garantiza una calidad similar a las exigidas en las normas internacionales, eliminando el riesgo de contaminación al medio ambiente, así como disminuir los elevados costos de los tratamientos térmicos a las herramientas.

En varias ocasiones en la Empresa de Equipos Agrícolas “Héroes del 26 de Julio” se necesita durante la operación de temple, que piezas de pequeñas y medianas dimensiones de gran responsabilidad adquieran mejores propiedades físico-mecánicas, conociendo que los medios de enfriamientos convencionales no garantizan; lo que ocasiona defectos y bajas propiedades en los aceros herramentales tratados, provocando pérdidas económicas, con un alto efecto contaminante para el medio ambiente y la salud del hombre por estas operaciones; constituyendo esto la **situación problemática** del presente trabajo.

Generando así el siguiente **problema científico**:

Fluctuación del nivel de la dureza obtenida en el acero D2 después de la aplicación del temple por el método convencional.

Objeto de la investigación.

Los métodos de enfriamiento para el temple de los aceros para herramientas.

Campo de la Investigación.

El temple por el método de enfriamiento de centrifugación aplicado al acero para herramientas D2.

Hipótesis.

Si durante el temple del acero para el conformado en frío D2, se aplica una nueva forma de enfriamiento que sustituya los métodos convencionales actuales, entonces se podría influir en la obtención de mejores propiedades de dureza y de durabilidad, incrementando así su vida útil de trabajo.

Objetivos de la Investigación.

Objetivo General.

Determinar la influencia del método de enfriamiento por centrifugación sobre la dureza durante el temple y el revenido del acero para herramientas D2.

Tareas a desarrollar durante la Investigación.

1. Realización de un estudio bibliográfico y establecimiento del estado del arte a cerca de los métodos de enfriamiento y tecnologías utilizadas durante el tratamiento térmico del acero D2.
2. Elaboración del diseño del experimento.
3. Estudio del comportamiento de la influencia del régimen de centrifugación (r.p.m), de la temperatura de austenización y de revenido sobre la dureza del acero D2.

4. Estudio comparativo del comportamiento de la dureza y propiedades físicas del temple por centrifugación con los métodos de enfriamientos convencionales.

Métodos de Investigación.

Los métodos propuestos para desarrollar la investigación son empíricos y teóricos.

1. Métodos empíricos.

- 1.1 **Criterio de expertos:** Se aplica mediante las consultas a especialistas sobre el tema, nos permite realizar un mejor diseño organizacional así como establecer los mejores parámetros tecnológicos de la investigación llevándose a cabo la misma con el mayor rigor científico-técnico, de forma racional y económica.
- 1.2 **Mediciones:** mediante el método de las mediciones técnicas podremos obtener datos reales y precisos sobre la influencia de los medios centrifugados sobre la dureza del acero de alta templabilidad D2.
- 1.3 **Observación:** mediante el método de la observación estudiaremos como influye el comportamiento relacional de las variables (temperatura-régimen de centrifugación) sobre la dureza en diferentes regímenes tecnológicos, así como su comparación con los resultados obtenidos durante el enfriamiento en aceite.
- 1.4 **Experimentación:** mediante la experimentación y con ayuda del diseño experimental de la investigación se determinan los regímenes tecnológicos para los cuales se obtienen los mejores resultados durante la aplicación del enfriamiento por centrifugación, garantizando así los resultados esperados.

2. Métodos teóricos.

- 2.1 **Análisis y síntesis:** Se empleará en la revisión y consulta de la bibliografía especializada sobre el tema, así como en el estudio de la información existente sobre la aplicación de los distintos tipos de enfriamientos convencionales en los tratamientos térmicos y establecer las especificaciones tecnológicas para los enfriamientos centrifugados.
- 2.2 **Histórico-lógico:** Se empleará para el análisis histórico de las concepciones teóricas sobre los medios de enfriamientos, su evolución y concepciones actuales. Para analizar los cambios en la dirección y enfoques de los procesos tecnológicos de los

tratamientos térmicos, enmarcado en los diferentes procedimientos, considerando el desarrollo progresivo de estos y en el análisis integral de los procesos de enfriamientos.

2.3 Inductivo-deductivo: se empleará para el procesamiento, búsqueda y definición de propiedades para la caracterización del objeto y campo de la de investigación, sus relaciones esenciales, así como la elaboración de las conclusiones.

2.4 Hipotético-deductivo: se empleará para elaborar la hipótesis de la investigación y los resultados esperados.

3. Métodos estadísticos.

Estadística descriptiva: Posibilitará el procesamiento de la información obtenida de la observación y medición científica, así como en la construcción de tablas y gráficos.

Novedad: por primera vez en nuestro país se desarrolla e introduce una nueva tecnología y método de enfriamiento para el temple de los aceros para el conformado en frío que permitirá influir en la cinética de las transformaciones de fase y obtener mejoras en las propiedades físico-mecánicas de las piezas tratadas.

Actualidad: la introducción de esta tecnología responde a la aplicación y desarrollo de novedosos procesos tecnológicos, menos agresivos del medio ambiente y menos costosos, con mayores prestaciones, funcionabilidad y adaptabilidad, mejoras en la calidad de los procesos y de los productos terminados, humanizando así el trabajo y preservando la salud del hombre.

CAPÍTULO 1

**ESTADO DEL ARTE. FUNDAMENTOS TEÓRICOS
SOBRE EL TRATAMIENTO TÉRMICO Y SUS MEDIOS
DE ENFRIAMIENTOS EN ACEROS PARA
HERRAMIENTAS**

1.1 Estado del arte.

La estructura y las propiedades de los aceros se determinan por la composición química y por los parámetros de temperatura – tiempo, durante el calentamiento y el enfriamiento. Las interrogantes más estudiadas en la actualidad son las relacionadas con la composición química y la estructura de los aceros (Luty, 1990). El calentamiento y el enfriamiento a pesar de que es de uso constante en la práctica, han sido poco estudiados, como lo ha sido por ejemplo, el papel de los defectos puntuales – vacancias, así como también lo investigado en los últimos años referido al nuevo fenómeno de la aparición de segregaciones inestables por la frontera de los granos. Podemos decir que el lado más débil dentro de la tecnología del tratamiento térmico es el enfriamiento; es ahí precisamente donde aún existen grandes reservas para la obtención y direccionamiento de las microestructuras y propiedades de los metales.

El polaco Waclaw Luty, 1990, ha realizado investigaciones profundas acerca del desarrollo mundial, las perspectivas y aspectos de los problemas relacionados con los medios de enfriamientos e incluyendo también la búsqueda de nuevos medios y tecnologías para este fin.

En dependencia de las condiciones de trabajo de determinadas piezas, se debe obtener o bien una estructura homogénea o por el contrario un gradiente estructural con sus propiedades correspondientes, por ejemplo, para la resistencia a la fatiga un importante valor lo tienen las tensiones superficiales; así como que grandes tensiones volumétricas aumentan la tendencia a la formación de grietas. Estas características en primer término se determinan con la tecnología de enfriamiento.

El calentamiento o austenización se realiza en determinadas condiciones pre establecidas que pueden ser estrictamente controladas, mientras que la posibilidad de regular y controlar las condiciones del enfriamiento con el nivel de la técnica moderna, es muy limitado; entre tanto, que un enfriamiento racional o sea, el enfriamiento y la correspondiente cinética de las transformaciones de fase de determinada marca de acero, el área de la sección y otras exigencias, se determinan definitivamente con aquellas características de las piezas templadas como, la dureza superficial y su distribución en su sección, el tipo y grado de las tensiones residuales, las que ejercen gran influencia en las propiedades mecánicas (en específico en la resistencia a la

fatiga), la dimensión de las tensiones de temple, la inclinación a la formación de grietas y al mismo tiempo el costo total del tratamiento, entre otros.

Como consecuencia y en aras de adquirir nuevos conocimientos acerca del tema, en los últimos años muchos investigadores se han inclinado al estudio de la tecnología del enfriamiento (Luty, 1990), dentro de las que se abordan las siguientes temáticas:

- Desarrollo de técnicas de laboratorio para determinar las propiedades termocinéticas y tecnológicas de varios tipos de medios de enfriamientos.
- Métodos para la medición de las velocidades de enfriamientos en las instalaciones industriales, el cálculo de la distribución de la temperatura a través de la sección en las piezas templadas y también el estudio de la correlación ente las condiciones de temple, dureza y distribución de las tensiones.
- Desarrollo de nuevos tipos de medios para temple a base de aceites minerales, disoluciones acuosas poliméricas, medios gaseosos y líquidos y también medios para el temple bainítico.
- Estudio de los fenómenos físico-químicos, que surgen durante el proceso de intercambio de calor en distintos tipos de medios de enfriamientos.
- Trabajos para el desarrollo y construcción de nuevas instalaciones que permitan la regulación de las velocidades de enfriamientos.
- Desarrollo de métodos científicos para la selección de los medios de enfriamientos.

Como puede apreciarse, el ámbito donde se desarrollan las investigaciones denota que aún existen muchos campos investigativos en beneficio del desarrollo de las tecnologías de enfriamientos, constituyendo estas el área de investigación menos estudiada dentro de los procesos tecnológicos de los tratamientos térmicos.

Como quedó aclarado anteriormente, la naturaleza física de las transformaciones, los estados de fases y estructurales finales y por su puesto las propiedades de los aceros, son determinados, entre otras cuestiones, por las características cinéticas del enfriamiento durante el tratamiento térmico. Como es natural, que una valoración de la capacidad de enfriamiento del medio no se puede realizar de forma independiente a las regulaciones de la transformación primaria de la disolución- γ en condiciones de un enfriamiento ininterrumpido, ya que la estabilidad de la austenita subenfriada y las

diferentes posiciones de los intervalos de temperaturas en la transformación martensítica de diferentes marcas de aceros, (Novikov,1986), se encuentra estrechamente relacionado con el cambio de temperaturas. Por eso las primeras valoraciones dadas sobre la capacidad de enfriamiento de un medio por la significación de la velocidad de enfriamiento llevadas a cabo en una temperatura prefijada o en un determinado intervalo de temperaturas, pueden ser consideradas como muy aproximadas.

Es conocido el intento de la utilización del método calorimétrico para el estudio de los medios de enfriamiento, aunque este no ha tenido mucha aceptación debido a las grandes dificultades que se tienen en cuanto a la medición de la velocidad de entrega de calor de la probeta enfriada, (Hernández, 1986).

Se ha establecido además, que la disminución de la velocidad de enfriamiento en el intervalo de temperaturas de la transformación martensítica, proporciona la realización de procesos de relajación, la aparición de transformaciones, propias del revenido, que en su conjunto conllevan a la disminución de las tensiones estructurales y a una baja probabilidad de formación de grietas, (Novikov, 1986), efecto que, por ser positivo, debe ser tomado en consideración en el momento de desarrollar o valorar la capacidad de enfriamiento de nuevos medios de enfriamientos. Esta posición, por su puesto, conllevó a que en los últimos años surgiera en la literatura el término de enfriamiento "Ideal" de temple, el cual se realiza con una velocidad (hipercrítica) de enfriamiento en el intervalo de temperaturas de la transformación perlítica y una baja velocidad en el intervalo martensítico. Es entonces con relación a esto que, la capacidad de enfriamiento de los medios para temple de muchas de las investigaciones realizadas hoy en el mundo se realiza y se valoran por la dependencia de la velocidad de enfriamiento de la temperatura de la pieza a enfriar, (Heins, 1982). Esto hace posible que los medios de enfriamientos estudiados puedan ser comparados con el medio "Ideal" de temple, así como también con el agua y los aceites minerales, lo que es de mucha importancia en la solución de la interrogante acerca de la racionalidad técnica de sustituir el agua y el aceite por medios más efectivos para el enfriamiento.

Al mismo tiempo se han desarrollado varios métodos de laboratorios que para el estudio de la capacidad de enfriamiento, basados en la comparación de las

propiedades termocinéticas de los distintos tipos de medios de enfriamientos, los cuales permiten hacer una valoración de su viabilidad para determinado uso.

Aunque se hayan tenido sustanciales avances en el desarrollo y el conocimiento acerca de los medios de enfriamientos, aún se encuentra limitado y se ha centrado básicamente en el estudio de las tecnologías de los tratamientos térmicos y en el enfriamiento como parte integrante de sus operaciones auxiliares, sin embargo desde una visión hacia el futuro podemos agregar que los objetivos investigativos en esta área de la ciencia de los materiales se encuentra enfocada hacia, la economía energética, economía de los materiales, aumento de la productividad mediante la mecanización y automatización de los procesos, mejoras de las condiciones laborales y por último y no menos importante la conservación del medio ambiente.

Si se tienen en consideración los intentos de pronósticos en el desarrollo de las tecnologías de enfriamientos en las más cercanas e inclusive más lejanas perspectivas, presupone ver una tendencia a la disminución del consumo de los medios de enfriamientos específicamente los deficitarios aceites, de aquí la necesidad de perfeccionar los medios y métodos de enfriamiento. Este objetivo puede ser logrado en la actualidad con la utilización de los aceites de enfriamiento rápido en lugar de los aceites comunes. La utilización de estos aceites, si es que estos se caracterizan por una alta resistencia a la evaporación, pues conllevan a la disminución de los gastos por concepto de pérdidas por extracción o por la propia evaporación. Es en esta dirección donde se dirige el desarrollo de todos los tipos de aceites, o sea mediante la elevación de su resistencia o estabilidad (la resistencia a la oxidación y a su descomposición térmica). Es necesario también señalar que, en la actualidad la estabilidad de los medios de enfriamiento poliméricos se ha visto limitada básicamente a su baja resistencia a la influencia de microorganismos, lo que provoca su pronta descomposición, (Hernández, 1986).

Por otro lado el desarrollo alcanzado en la mecanización y automatización de los procesos tecnológicos en los tratamientos térmicos, requiere de un sustancial desarrollo de las tecnologías de enfriamientos, (Luty, 1990). Es por ello que el progreso en el área del desarrollo de los medios de enfriamientos y utilización de la regulación automatizada de sus capacidades durante la operación del enfriamiento debe

adelantarse al perfeccionamiento de los métodos industriales de medición de estas capacidades en correlación con los resultados alcanzados en la distribución de la dureza en la sección de las piezas tratadas, parámetros de tal regulación, que para los aceites puede ser - el carácter e intensidad de su circulación; para las sales fundidas - la concentración de agua; para los medios de enfriamientos poliméricos - concentración, circulación y temperatura; para los gases - presión y agitación; para los medios en estado de suspensión - intensidad del flujo de gases. Desde el punto de vista de técnicas de protección y del medio ambiente, las mejores perspectivas las poseen las disoluciones poliméricas, aunque, probablemente haciendo varias consideraciones en un futuro previsible, estos no sustituirán a los aceites minerales.

En conclusión aún se tiene mucho campo de investigación en materia de medios y procedimientos de enfriamientos por lo que la presente investigación propone la introducción de un nuevo medio o procedimiento a través de la centrifugación de las piezas austenizadas capaz, si no bien, de dar una total respuesta a las problemáticas planteadas, pues modificar la práctica industrial de la utilización de los aceites minerales mediante la regulación automatizada de la capacidad de enfriamiento del medio propuesto, garantizando y proporcionando un uso racional de los recursos tecnológicos y naturales, así como las características y propiedades de los aceros para herramientas de alta templabilidad, la conservación de la salud del hombre y del medio ambiente.

1.2. Fundamentos Teóricos

1.2.1. 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.

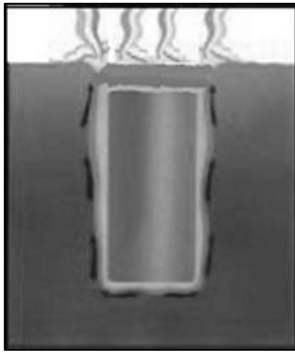
S- Indica - Sales fundidas.

G- Indica – Gas.

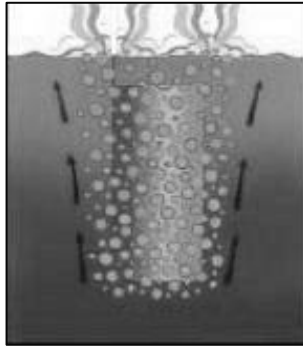
F- Indica los productos usados para el endurecimiento en lecho hirviente.

K- Indica el resto de los medios de enfriamiento.

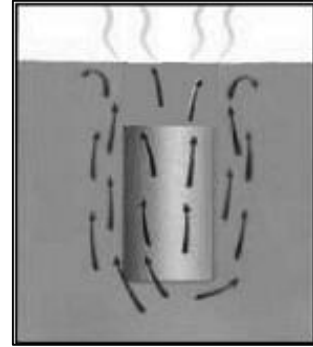
Estos medios son clasificados según su tendencia al fenómeno de producir la camisa de vapor cuando se realiza la inmersión de una pieza caliente al medio de enfriamiento conocido también como el fenómeno de Leidenfrost. La camisa o película de vapor se forma en los medios de enfriamiento cuyo punto de 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; tal y como se muestra en figura 1.1, (Ljiljana, 2009; Mac Kenzie).



a) Fase formación de la camisa de vapor



b) Fase de burbujeo



c) Fase de convección

Figura. 1.1. Fases durante el enfriamiento de un espécimen dentro de un medio con la formación de la camisa de vapor. (Ljiljana, 2009).

Durante los procesos de tratamientos térmicos los medios de enfriamientos deben ser seleccionados según sus características de transferencia de calor, de acuerdo a la calidad del acero a enfriar y también al tipo de tratamiento térmico a utilizar. Básicamente, los aceites para temple son clasificados en tres grupos: aceites con velocidades para enfriamientos rápidos, acelerados y de mediana velocidad – aceites convencionales; y los aceites para altas temperaturas, (Chan, 2001). En la tabla 1.1 se muestra la clasificación de los aceites utilizados para el temple en los tratamientos térmicos en dependencia del procedimiento de enfriamiento.

Tabla 1.1. Clasificación de los aceites para el tratamiento térmico según la Norma ISO 6743 -14, (ISO 6743-14, 1994; Ljiljana, 2009)

Aplicación Específica	Temperatura del aceite en el instante del temple (ϑ) °C	Tipo de producto y/ o requerimientos de rendimiento	Símbolo ISO- L	Observaciones
Temple en frío	$\vartheta \leq 80$	Aceite para temple normal	UHA	*
		Aceite para enfriamiento rápido	UHB	
Temple semi-caliente	$80 < \vartheta \leq 130$	Aceite para temple normal	UHC	
		Aceite para enfriamiento rápido	UHD	
Temple en caliente	$130 < \vartheta \leq 200$	Aceite para temple normal	UHE	
		Aceite para enfriamiento rápido	UHF	
Temple muy caliente	$200 < \vartheta \leq 310$	Aceite para temple normal	UHG	
		Aceite para enfriamiento rápido	UHH	
Temple al vacío			UHV	
Otros casos			UHK	

* Algunos aceites pueden ser recuperados mediante el lavado en agua. Esta característica es producto de la presencia en su concentración de determinados emulsificadores. Estos aceites son conocidos como aceites "lavables".

Al seleccionar el medio de enfriamiento o un semiproducto determinado para la fabricación de determinadas piezas, no sólo se le debe prestar atención a los requisitos técnicos, sino también a los requisitos de protección al hombre y del medio ambiente.

Los aceites para temple incluyen los aceites básicos y los aceites con aditivos, los aceites básicos pueden ser el aceite mineral (provenientes del petróleo), de origen sintético o natural (aceite vegetal, o animal). Las altas exigencias en cuanto al rendimiento de los aceites ha conllevado a un incremento en el uso de los aceites sintéticos como las polialfaolefinas o los ésteres sintéticos. Los aceites de base mineral, los naftalínicos o parafinados, son más utilizados debido a sus ventajas en cuanto a su estabilidad en comparación con los aceites naturales o a que son más baratos, en comparación con los aceites sintéticos. En la tabla 1.2, se muestran los tipos y las propiedades más importantes de los aceites básicos según API (American Petroleum Institute).

Tabla 1.2. Clasificación de los aceites básicos y sus principales propiedades según API (American Petroleum Institute), (Ljiljana, 2009).

Grupo API	Hidrocarburos saturados, %	Azufre, %	Índice de viscosidad
Grupo I, diluido - refinado	Inferior a 90	> 0.03	80 - 120
Grupo II, hidrotratados	> / = 90	< / 0.03	80 - 120
Grupo III, Hidrotratamiento profundo / isomerización con parafina	> / = 90	< / 0.03	120 +
Grupo IV, Polialfaolefinas (PAO) Polimerización, Hidrogenación	Fórmula definida R-CHCH ₃ -/CH ₂ -CHR/ _x -H	-	130 +
Grupo V	Todos los aceites básicos (incluyendo los sintéticos)		

La función de los aditivos en los aceites es la inhibición de la oxidación y la espuma, mejorar la limpieza de las superficies de las piezas a tratar, mejorar la velocidad de enfriamiento, etc. Las propiedades físicas y químicas básicas de los aceites para el temple son: la viscosidad, ebullición, fluidez, punto de inflamación, oxidación y estabilidad térmica, volatilidad y lavabilidad. La viscosidad, como una de las características más importantes de los lubricantes, presenta el criterio de “fricción interna”, cuyo trabajo al oponerse a la posición molecular, cambia en el lubricante bajo la tensión cortante. La viscosidad depende de la temperatura y de la presión. La velocidad de enfriamiento depende de la viscosidad. Los fluidos emulsionados contienen aceite básico y una cantidad mayor de sustancias activas-superficiales para

producir una emulsión estable y una protección a la corrosión. Los agentes sintéticos no contienen aceite pero estos contienen sustancias activas - superficiales, inhibidores de corrosión, sustancias poliméricas altamente moleculares y otras sustancias. Existen numerosas posibilidades de combinación de composiciones, pero desde el punto de vista medioambiental y de los requisitos de seguridad, la selección aditivos tiene una influencia muy fuerte. En este tipo de aceites industriales se ha puesto una restricción importante sobre los aditivos de bario, los que han estado utilizando durante años y ahora estos deben ser reemplazados, (Ljiljana, 2009).

1.2.2. Particularidades del enfriamiento en diferentes medios.

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.

Cuando se realiza un temple para obtener una estructura martensítica, el enfriamiento en los intervalos de menor estabilidad de la austenita (inferior a lo punto A_1), debe de realizarse con velocidades que superen la velocidad crítica de temple (que para los aceros aleados se encuentra en el orden desde de las décimas hasta 100°C/s . y para los aceros al carbono- desde 100 hasta 600°C/s), pero no en todo el intervalo de temperaturas (desde la temperatura de calentamiento hasta el ambiente), sino solo en el intervalo de temperaturas entre $650-400^\circ\text{C}$, siendo muy probable que se transforme en mezcla ferrito-cementítica. Por encima de los 650°C la velocidad de transformación de la austenita es pequeña y por eso el acero que se temple puede enfriarse lentamente en este intervalo de temperaturas, pero no tan despacio que comience la precipitación de la ferrita o la transformación de la austenita perlita. El intervalo entre $650-400^\circ\text{C}$ debe pasarse rápidamente, en los aceros al carbono, por debajo de los 400°C comienza otra vez la zona de estabilidad relativa de la austenita y el enfriamiento puede volver a ser lento (En los aceros aleados a $400-300^\circ\text{C}$, puede volver a empezar la transformación acelerada de la austenita, por esto, es necesario enfriarlos en este intervalo de temperaturas con suficiente rapidez, en algunos casos incluso mayor que a $400-600^\circ\text{C}$). Finalmente, en el intervalo de temperaturas de transformación

martensítica, a partir de los 200-300°C, es muy importante que el enfriamiento sea retardado, para que a las grandes tensiones estructurales no se sumen las tensiones térmicas que aparecen como resultado del enfriamiento rápido, (Guliaev, 1986). Tomando en consideración los aspectos antes descritos, en la figura 1.2 se muestra la curva de enfriamiento ideal para el temple.

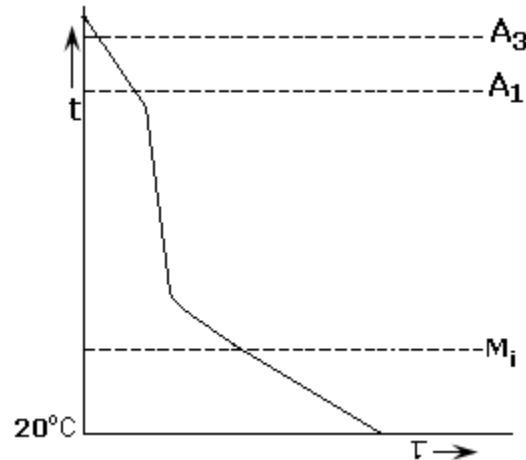


Figura. 1.2 Curva ideal de enfriamiento durante el temple. (Guliaev, 1986).

Independientemente y en correspondencia con los datos termocinéticos y de las curvas “C”, el enfriamiento acelerado es necesario solo en un estrecho intervalo de temperaturas, correspondientes a la transformación perlítica y bainítica; prácticamente en virtud de la significación del volumen y la inercia térmica de las piezas a templar su velocidad de enfriamiento normalmente se difunde a una región con un campo más amplio de intervalo de temperaturas. Cuando se realiza un temple para obtener de una estructura martensítica se utiliza un enfriamiento forzado de las superficies de las piezas, cuya velocidad de disminución de la temperatura por lo general supera la velocidad crítica de temple de los aceros.

Desde el punto de vista de la formación de defectos durante el temple, la velocidad de enfriamiento por encima de la transformación martensítica M_i juega un papel diferente. Si se aumenta la velocidad de enfriamiento, aumentan las torceduras y aumenta el nivel de las tensiones térmicas. Sin embargo las tensiones térmicas obtenidas en este caso frecuentemente conllevan a la disminución de la sumatoria de las tensiones de temple, lo que disminuye la formación de las grietas de temple.

Un enfriamiento acelerado en el intervalo de la transformación martensítica es no deseado, ya que facilita el aumento acelerado de las tensiones. Especialmente peligrosas son las tensiones de alargamiento, las cuales en condiciones de la disminución de la resistencia relativa de los aceros y la acción físico-química no deseada del agua recalentada pueden provocar la aparición de las grietas de temple.

De esta manera, las exigencias al régimen de enfriamiento desde el punto de vista de la obtención de las estructuras deseadas durante el temple y la prevención de los defectos, habitualmente se contraponen y estas deben ser estudiadas.

En la mayoría de los casos lo más regularmente aceptado es un enfriamiento moderado a elevadas temperaturas, acelerado entre los puntos críticos A_1 y M_i y lentamente en el intervalo de la transformación martensítica. Las diferentes formas y dimensiones de las piezas y también la gran diferencia en las velocidades críticas de temple de los aceros nos muestran la necesidad de desarrollar medios de enfriamientos con capacidades de enfriamiento que soporten de forma menos violenta los cambios bruscos en amplios rangos.

En dependencia de las características de los aceros, el carácter de sus estructuras y también la forma y dimensiones de las piezas, para su enfriamiento durante el temple se emplean medios que se diferencian en gran medida por sus propiedades físico-químicas: el aire, plataformas metálicas, metales fundidos, sales y álcalis, agua, disoluciones acuosas de diferentes compuestos, aceites, polímeros, mezclas de agua-aire, entre otros, (Solodijin, 1987).

Las diferencias entre los medios antes mencionados no solo se limitan a que estos enfrían más rápidos o más lentamente. Una característica fundamental lo constituye la rapidez con que algunos absorben el calor en el mismo comienzo, otros a mediados y otros al final del enfriamiento. Pero una mayor influencia sobre el carácter del enfriamiento ejerce el cambio de estado de agregación de los medios en el período de enfriamiento.

Los metales y sales fundidas utilizados para la realización del temple regularmente poseen su temperatura de ebullición que supera en gran medida la temperatura de enfriamiento de las piezas. Estos medios durante el proceso de enfriamiento no ebullen, no cambian su estado de agregación y es por ello que sus curvas de enfriamiento no

poseen cambios bruscos que muestren cambios de velocidades durante el proceso de enfriamiento. Aquellos medios tales como el agua, disoluciones acuosas de diferentes compuestos, aceites y otros ebulen a temperaturas más bajas que las temperaturas de las piezas que en ellos se enfrían, lo que trae como resultado que estos medios hiervan cambiando su estado de agregación.

1.2.3. 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).

1.2.4. 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).

1.2.5. 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 1.3 (e). En la figura 1.3 se muestra un ejemplo de inmersión de algunas configuraciones de piezas en el medio de enfriamiento.

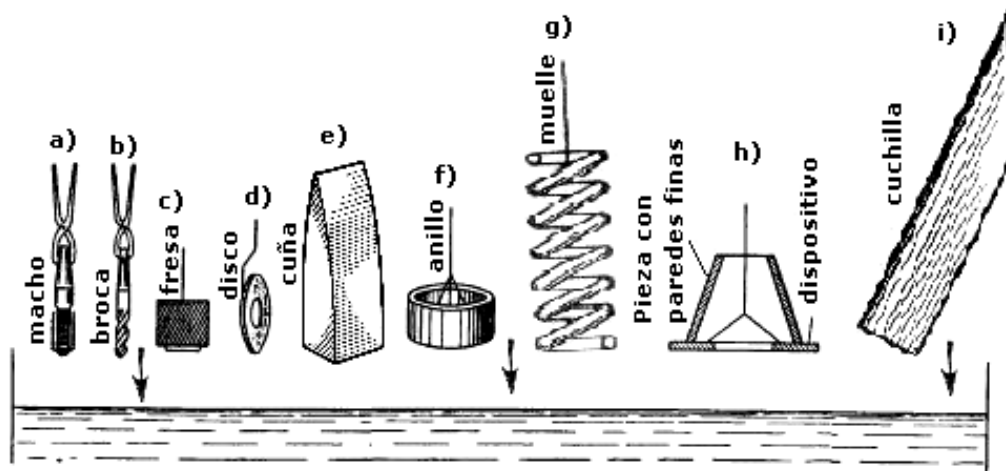


Figura.1.3 Formas recomendadas para la inmersión de piezas en baños de enfriamiento, (Nekrasov, 2011).

Para evitar las deformaciones las piezas de longitud, por ejemplo tornillos, brocas, barras, ejes, se introducen en el medio de enfriamiento de forma vertical. Las piezas finas y planas (discos, planchas, otros) se introducen de canto o borde; los anillos, muelles cilíndricos, cilindros con paredes finas se introducen de forma vertical, con el eje perpendicular al espejo del medio figura 1.3 (f, g, h). Las piezas largas con una forma asimétrica de su sección transversal se introducen con un ángulo, rotándola y por la parte más gruesa de la sección para abajo figura 1.3 (i).

Para que el aire introducido por las piezas y también los vapores y gases que se originan como resultado de la ebullición no se aglomeren en los huecos y orificios ciegos y de forma libre salgan a la superficie, las piezas se sumergen con estos hacia arriba o su enfriamiento se realiza con ayuda de dispositivos duchas, potente flujo el cual extraiga de los huecos u orificios el aire, los vapores y los gases. Las piezas de configuración compleja las orientan de tal forma que los gases y vapores surgidos no se detengan en las cercanías de la superficie y de forma libre se dirijan hacia arriba.

1.3. Los aceros para herramientas.

Los aceros para herramientas constituyen un grupo de aceros especiales que, debido a la amplia gama de propiedades que estos pueden desarrollar son destinados a la fabricación de herramientas utilizadas a la elaboración de materiales mediante la conformación, extrusión, embutición en frío o en caliente o mediante operaciones de maquinado.

Dada la naturaleza y tipo de operación a realizar se selecciona el tipo de acero que posea las mejores características y propiedades más apropiadas, que van desde una alta dureza, tenacidad, resistencia al desgaste, hasta una alta resistencia a altas temperaturas, entre otras. Como ha sido probado en numerosas investigaciones, no todos los aceros agrupan todas las propiedades en su conjunto, por lo que es de vital importancia realizar una correcta selección o inclusive diseñar la aleación que desarrolle la combinación de propiedades óptimas para una determinada aplicación. A continuación brindaremos una brevemente explicación de la clasificación, propiedades, aplicaciones y tratamientos en general para este grupo de aceros, así como para los aceros de alto cromo destinados a la conformación en frío, en específico el acero D2.

1.3.1. Clasificación de los aceros para herramientas.

Existe un gran número de aceros que se utilizan para la fabricación de herramientas, los que poseen una gran variedad en composiciones químicas y propiedades. Existen además varias normas que los clasifica según su uso, propiedades mecánicas o composiciones químicas, sin embargo comparando las normas de aceros existentes a nivel mundial podemos decir que no hay una correspondencia exacta en su clasificación, incluso existen aceros que no son comparables entre sí o únicos en su denominación.

Por lo antes expuesto y con fines en este trabajo de utilizar una clasificación de las más aceptadas a nivel internacional adoptaremos la clasificación que realiza el Instituto Americano del Hierro y Acero (American Iron and Steel Institute, AISI) o la SAE (Society of Automotive Engineers) que han clasificado estos aceros agrupándolos de acuerdo a sus aplicaciones, a sus propiedades o a su medio de temple, lo que ha dado origen a

siete grupos principales, los cuales se pueden dividir en subgrupos y a los que se les ha asignado una letra para su identificación, como se muestra en la tabla 1.3.

Tabla 1.3. Clasificación de los aceros para herramientas según American AISI - Iron and Steel Institute. (Roberts, 1980).

Grupo de aceros	Descripción	Símbolo
Templables en agua		
Para temple en agua	No contienen elementos aleantes y son de alto % de carbono (0,75 a 1.00%). En general tienen limitación en cuanto al diámetro, debido a su especificación de templabilidad.	W
Para trabajos en frío		
Templables en aceite	Sólo son aptos para trabajo en frío pues al aumentar la temperatura disminuye la dureza.	O
Templables al aire. Mediana aleación	No soportan temple en aceite pues se deforman; se usan para piezas de formas complejas (matrices) pues el alto contenido de cromo otorga temple homogéneo.	A
Alta aleación	Contienen alto % de carbono y cromo, para formar carburos de Cr (1,10-1,80 %C). Gran resistencia al desgaste.	D
Para trabajos en caliente		
Mantienen su dureza al rojo (importante en cuchillas); tienen carburos estables a alta temperatura; el Cr aumenta la templabilidad ya que se encuentra disuelto; el tungsteno y el molibdeno son los formadores de carburos		
H1-H19	Tipo base cromo	H
H20-H39	Tipo base tungsteno	
H40-H59	Tipo base molibdeno	
Aceros rápidos		
Aceros de alta velocidad	Tipo base tungsteno.	T
	Tipo base molibdeno	M

Continuación tabla 1.3

Grupo de aceros	Descripción	Símbolo
Para propósitos específicos		
Para propósitos específicos	Tipo baja aleación	L
	Tipo carbono- tungsteno	F
Para moldes		
P1-P6	Tipo bajo carbono	P
P20-P21	Otros tipos	
Resistentes al impacto		
Resistentes al choque	Aceros para herramientas que trabajan al choque. Fácilmente templables en aceite. No se pueden usar en piezas de grandes secciones o formas complejas.	S

1.3.2. Aceros para herramientas de alta templabilidad.

Estos aceros fueron desarrollados originalmente para sustituir a las herramientas fabricadas de aceros rápidos, quedando como un obstáculo para su utilización su relativa baja resistencia al rojo lo que limitaba a este tipo de acero para esas prestaciones, no obstante encontraron un amplio espectro de utilización entre los que podemos mencionar la fabricación de dados de trefilar y de estampado profundo, extrusión en frío y además para la fabricación de punzones, matrices, mandriles, rodillos laminadores y de conformar, para estirado y doblado, para hojas de corte, cuchillas, entre otros usos.

Los aceros de alta templabilidad se encuentran agrupados dentro del grupo de aceros para trabajo en frío, junto a los subgrupos A y O y se caracterizan por poseer una alta concentración de carbono y cromo, que al igual que otros aceros para herramientas presentan una marcada segregación de carburos durante su cristalización, formando así las llamadas redes de carburos. Estos aceros al ser sometidos al proceso de forjado o laminación romperán estas redes de carburos, los cuales serán realineados en

dirección de la deformación, quedando de esta manera una microestructura formada por una matriz aleada con un alto contenido de carburos complejos que le brindan a este material una alta resistencia al desgaste, al impacto y una alta estabilidad dimensional.

En la tabla 1.4, (ASM Handbook, 1993), se muestra la composición química de este grupo de aceros, donde el principal elemento de aleación es el cromo seguido de adiciones de molibdeno y vanadio. El principal objetivo de la combinación de estas aleaciones consiste en brindarle al acero mejores propiedades de dureza a elevadas temperaturas, resistencia mecánica, tenacidad y resistencia al desgaste. Lo cual se logra a través de la aplicación de diferentes regímenes de tratamientos térmicos lo que permite modificar la naturaleza y la cantidad de carburos presentes.

Los tipos de carburos que se presentan en los aceros de alto carbono y alto cromo son el M_7C_3 y el $M_{23}C_6$. El M_7C_3 es un carburo rico en cromo con una estructura hexagonal, y además característico de este tipo de aceros. Se disuelve sólo parcialmente durante el calentamiento de austenización, lo cual provoca que después del temple estos carburos proporcionen una alta resistencia al desgaste. Este carburo disuelve grandes cantidades de hierro, pero no así de otros elementos, (Guliaev, 1986).

**Tabla 1.4. Composición química de los aceros de alto cromo y carbono
(ASM Handbook, 1993)**

AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	W	Mo	Co
D2	1,40-1,60	0,60*	0,60*	11,0-13,0	0,30*	1,10*	-	0,7-1,2	-
D3	2,0-2,35	0,60*	0,60*	11,0-13,5	0,30*	1,0*	1,0*	-	-
D4	2,05-2,4	0,60*	0,60*	11,0-13,0	0,30*	1,0*	-	0,7-1,2	-
D5	1,40-1,60	0,60*	0,60*	11,0-13,0	0,30*	1,0*	-	0,7-1,2	2,5-3,5
D7	2,15-2,50	0,60*	0,60*	11,5-13,5	0,30*	3,8-4,4	-	0,7-1,2	-

* Contenido máximo.

El carburo tipo $M_{23}C_6$ es también un carburo rico en cromo con estructura cúbica centrada en las caras, capaz de disolver gran cantidad de hierro, pero poco tungsteno y molibdeno. Cuando estos últimos dos elementos están presentes en cantidades suficientes, el cromo puede ser reemplazado por hierro y forman así los carburos de

tipo $\text{Fe}_{21}\text{W}_2\text{C}_6$ o $\text{Fe}_{21}\text{Mo}_2\text{C}_6$. Este carburo por lo general se encuentra en los aceros rápidos, pero hay estudios, (Sato, 1956; Guliaev, 1986), que demuestran que conforme se eleva la concentración de molibdeno en un acero alto carbono alto cromo (1.41 %C, 13.13 %Cr), disminuye la cantidad del carburo M_7C_3 y ya a concentraciones de 1.2% de Mo, el único carburo presente es el M_{23}C_6 .

Un acero el cual ha tenido una gran aceptación dentro de este grupo (anexos, tabla A-IV) por sus buenas combinaciones de propiedades y de explotación ha sido el acero D2 que debido a sus excelentes propiedades de resistencia al desgaste, al impacto, alta dureza, relativa tenacidad, resistencia a la deformación plástica y estabilidad dimensional, es muy utilizado en la manufactura industrial alcanzando un papel preponderante dentro de los aceros para la conformación en frío.

1.3.3. Características, propiedades y aplicaciones del acero 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
- Resistencia a la compresión
- Alta templabilidad- propiedades de dureza a corazón
- Alta estabilidad durante el temple
- Buena estabilidad durante el revenido

Las propiedades físicas de este acero en estado templado y a temperaturas ambiente y elevada, se muestran en la tabla 1.5 y 1.6.

Tabla 1.5. 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
Coeficiente 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 1.6. 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

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 1.7 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 1.7. 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

1.4. Tratamientos térmicos convencionales aplicados al acero D2

Los procesos de tratamientos térmicos son de mucha importancia, no solo para este acero, sino para todo tipo de acero que necesite elevar u obtener un umbral de propiedades físico-mecánicas que alarguen su vida útil; teniendo especial relación su composición química (limpieza metalúrgica) 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 tratamiento térmico del acero D2 consta generalmente de tres operaciones básicas entre las que se encuentran el recocido, el temple y el revenido. Estas operaciones pueden ser realizadas de diferentes formas aplicando disímiles procedimientos y medios los que plantearemos más adelante, (ver tabla 1.8).

El proceso de calentamiento generalmente se realiza en hornos de cámara, ya sean con atmósferas protegidas (gases protectores o inertes) 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.

Otro método de protección es la introducción de las piezas a tratar en carbón incandescente neutro, el cual es muy utilizado para proteger los aceros para herramientas contra la oxidación y descarburación el cual absorbe el oxígeno en todas las temperaturas del proceso.

Los medios de temple más utilizados en los procesos de enfriamiento para este acero son el aire y el aceite y también se utilizan otros medios tales como las disoluciones acuosas salinas, alcalinas y poliméricas, baños de metales y sales fundidas, mezclas de aire-agua y gases, siendo los dos primeros los más utilizados para este acero.

Tabla 1.8. Procesos tecnológicos convencionales de tratamientos térmicos aplicados al acero D2.

No	Fuente-Autor	Tipos de tratamientos térmicos					
		Recocido, °C		Temple, °C		Revenido °C	
		Temperatura	Medio Enf.	Calentamiento austenización	Medio de enfriamiento	Cant.	Enf.
1.	Ficha Acero SISA.	870 °C enfriamiento horno hasta 540°C	Aire	Precalentamiento 1 ^{er} Escalón 595-650°C	1. Aire 2. Aceite 3. Presión positiva (2 bar mínimo) 4. Baños Salinos	Doble entre 205-540°C	Aire entre revenidos
		870 °C enfriamiento horno hasta 775°C	Aire				
		Alivio de Tensiones					
		Material recocido 650-675°C	Lento horno o Aire	2 ^{do} Escalón 760-790°C			
		Material Templado 15-30°C por debajo de la temperatura de revenido	Lento horno o Aire	Austenización 995-1025°C			
2.	Ficha UNS T30402 SUMITEC AISI D2.	Alivio de tensiones 675°C	Lento horno	Precalentamiento 600-700°C Austenización 980-1065°C	Aire	Según dureza necesaria	
3.	Ficha UDDEHOLM TOOL STEELS.	De ablandamiento 850°C	Lento horno hasta 650°C, luego Aire	Precalentamiento 650-750°C Austenización 1 990-1050°C	1. Aceite- piezas simples 2. Vacío (Gas a alta velocidad) 3. Aire/gas forzado	1. Doble con enfriamiento intermedio al aire en dependencia de la dureza a alcanzar, la mínima temperatura es 180°C y la máx. 510°C. Para máx. estabilidad dimensional.	

Continuación tabla 1.8. Procesos tecnológicos convencionales de tratamientos térmicos aplicados al acero D2.

3.	Ficha UDDEHOLM TOOL STEELS.	Alivio de tensiones 650°C	Lento horno hasta 500°C, luego Aire	Austenización 2 1000-1040°C	4. Baño Martempering o lecho hirviente (180-500°C) luego al aire	2. Tratamiento Subcero inmediatamente después del temple a temp. de -70°C y -80°C seguido de un revenido
4.	Ficha Hitachi Metals, YSS Tools Steels.	Alivio de tensiones 650-700°C	Lento horno	Precalentamiento 1 ^{er} Escalón 500-550°C 2 ^{do} Escalón 750-800°C	Baños salinos u Horno Eléctrico 1050°C	150 – 200°C
		Alivio de tensiones 650-700°C		Austenización 1000-1050°C	Aire Aceite	150 – 200°C
		830-880°C		Austenización 980-1030°C	Enfriamiento aire	
5.	GOST 5950-2000.	840-860°C	Lento horno	Austenización 1. 960-980°C 2. 950-1000°C 3. 1050-1100°C	Aceite	180°C 480-500°C 480-500°C
6.	Okolovich G.A., Evtushenko A.T. Pat.2192485 (2002).	Recocido convencional o según el objetivo final	Lento horno	Precalentamiento en sales de cloruro a 840-860°C, luego se traslada a otro baño a 1080-1100°C y luego se enfrían cíclico en sales fundidas hasta 680-750°C, se repite los dos últimos ciclos 3-4 veces	En aceite después realizado el último ciclo de enfriamiento	Revenido para dureza secundaria a 520-540°C, 3 veces por espacio de una hora

Continuación tabla 1.8. Procesos tecnológicos convencionales de tratamientos térmicos aplicados al acero D2.

7.	Okolovich G.A., Evtushenko A.T, otros Pat. 2200201 (2003)	830-880°C o Isotérmico	Lento horno	Austenización 1070-1080°C	Aceite	400-420 °C-1 hora 520-540°C- 3 veces Último revenido conjuntamente con Carbonitruración o Nitruración
8.	Lazutkina N.A, Shirokov U.L (2002).	830-880°C	Lento horno	Austenización 1000-1030°C	Aire	150-170°C
9.	Pozniak I.A, Skrinchenko U.M (1980)	830-880°C	Lento horno	Pre calentamiento 850°C Austenización 1100-1140°C	Horno Calentamiento en disoluciones salinas Enfriamiento - Aceite	490-530°C (520°C) Múltiple (4-5)
10.	Patente PΦ 2131469, МПК 6 C 21 D 9/22, 1/78	Recocido convencional o según el objetivo final	Lento horno Baños salinos	Calentamiento repetido en 130-170°C por encima de A _{c1} seguido de un enfriamiento cíclico en sales fundidas hasta 680-750°C	En aceite después realizado el último ciclo	200-400°C
11.	Bashnin U.A, Uschakov B.K y otros (1986).	Recocido Isotérmico Temperatura de calentamiento 850-870°C Permanencia Isotérmica 700-720°C	Horno Baños salinos	Pre calentamiento 650-700°C Austenización 1000-1030°C	Aceite Salitre	190-210°C 320-350°C

Continuación tabla 1.8. Procesos tecnológicos convencionales de tratamientos térmicos aplicados al acero D2.

11.	Bashnin U.A, Uschakov B.K y otros. (1986).	Recocido con enfriamiento ininterrumpido 850-870°C	Horno	Precalentamiento 650-700°C Austenización 1000-1030°C	Aceite Salitre	190-210°C 320-350°C
		Revenido alto 750-780°C	Aire			
12.	Sokolov K.N, Korotich I.K (1988).	Recocido convencional o según el objetivo final	Lento horno Baños salinos	Austenización 1000-1050°C	Aceite	220-250°C
13.	ASM Hand Book. (1993)	870-900°C	Lento horno velocidad 22°C/h	Precalentamiento 815°C Austenización 980-1025	Aire	205-540°C
14.	(Thyssen Krupp Materials, 2013)	Recocido globular 830-860°C	Lento horno	Austenización 1000-1050°C	Aire, Aceite 80°C	100 - 600°C
				Austenización 1050-1080°C	Baño caliente a 500-550°C	100 - 600°C Tres veces

El proceso de tratamiento térmico que generalmente les son aplicados al acero D2 son el recocido, temple y revenido, los cuales trataremos a continuación.

1.4.1. 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 ($A_{cm} - 855^{\circ}\text{C}$) debiendo ser el calentamiento de forma lenta y uniforme seguido de un enfriamiento también lento (en el horno) a razón de $20-30^{\circ}\text{C/h}$.

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.

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 ($50-100^{\circ}\text{C}$ inferior a A_{c1}) 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, (ver tabla 1.8).

1.4.2. 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 (ver tabla 1.8) 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, según se muestra en los anexos figura 1.4, (ASM International- Crucible Steel Co., 1991) y figura 1.5, (Thyssen Krupp Materials, 2013) para seleccionar la velocidad enfriamiento que proporcione la estructura más adecuada.

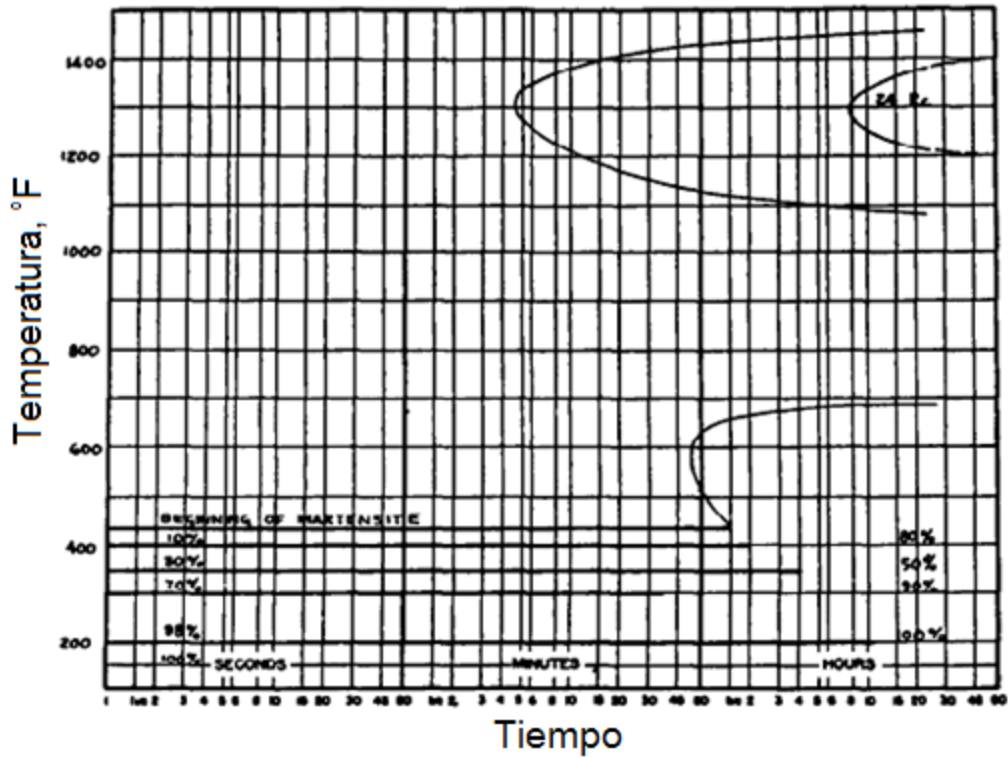


Figura 1.4. Diagrama Tiempo-Temperatura-Transformación del acero TKM 2379 (AISI/SAE D2) austenizado a 980°C, (ASM International- Crucible Steel Co., 1991).

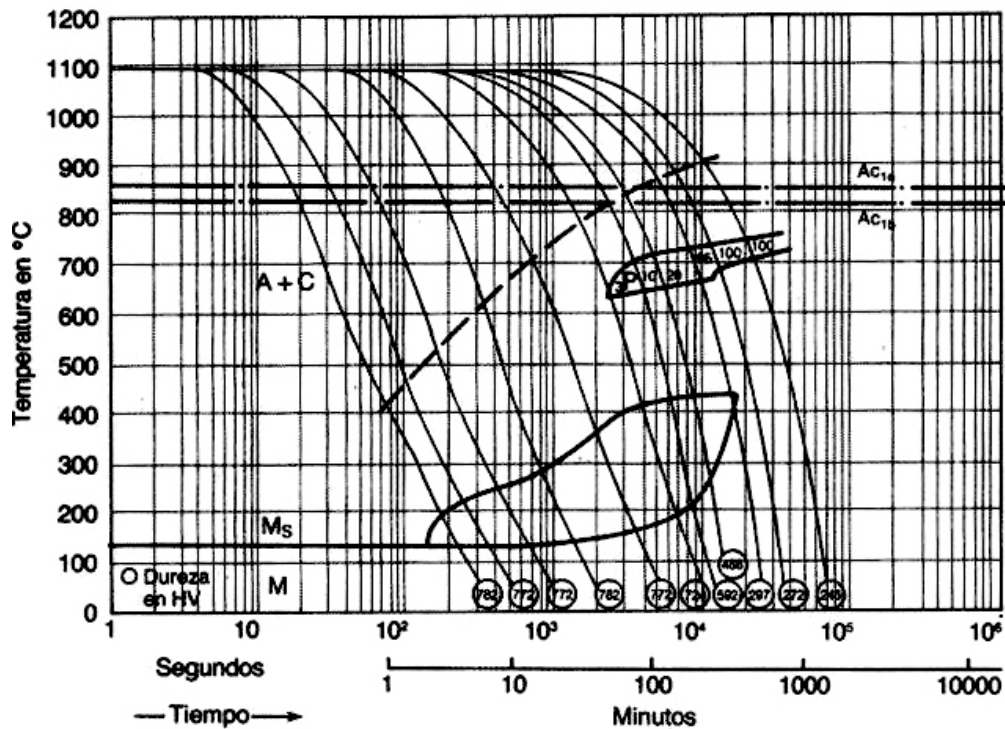


Figura 1.5. Diagrama Tiempo-Temperatura-Transformación del acero TKM 2379 (AISI/SAE D2) austenizado a 1080°C, (Thyssen Krupp Materials, 2013).

1.4.3. 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 – 560°C mediante la aplicación de regímenes de calentamientos cíclicos repetitivos, como se muestra en la figura 1.6.

En la tabla 1.8 se muestran los distintos tipos de procesos tecnológicos de tratamientos térmicos a que se ha sometido el acero D2, dónde cada uno responde a un determinado complejo de propiedades mecánicas y muy ligadas al uso en particular de las herramientas.

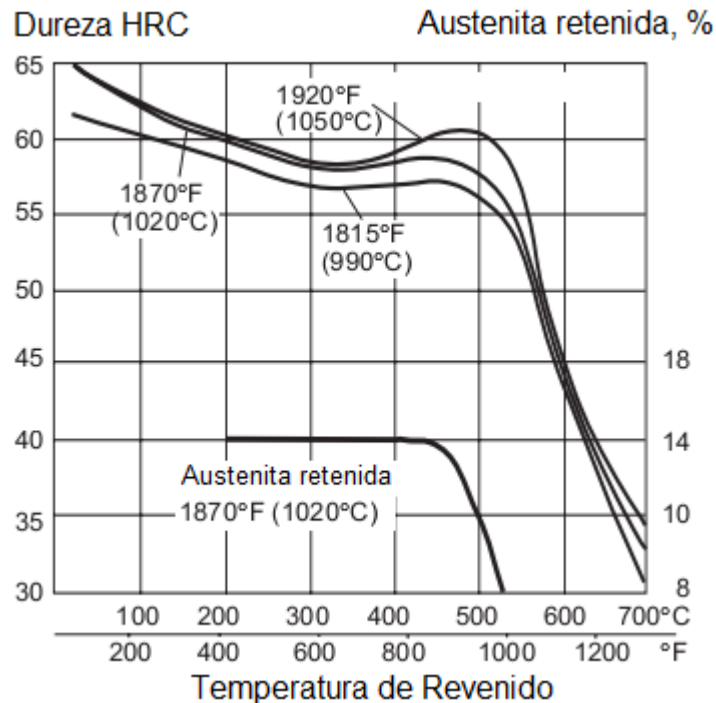


Figura 1.6. Gráfica de revenido con relación a la dureza y la cantidad de austenita retenida en al acero AISI D2. (Uddeholm.)

CAPÍTULO 2

**ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL TRATAMIENTO
TÉRMICO POR CENTRIFUGACIÓN APLICADO AL
ACERO D2**

2.1. Equipamiento y procedimiento utilizado.

Se utiliza un equipo diseñado y construido por el autor donde se realizan las pruebas experimentales, una vista del mismo se muestra en la figura 2.1.

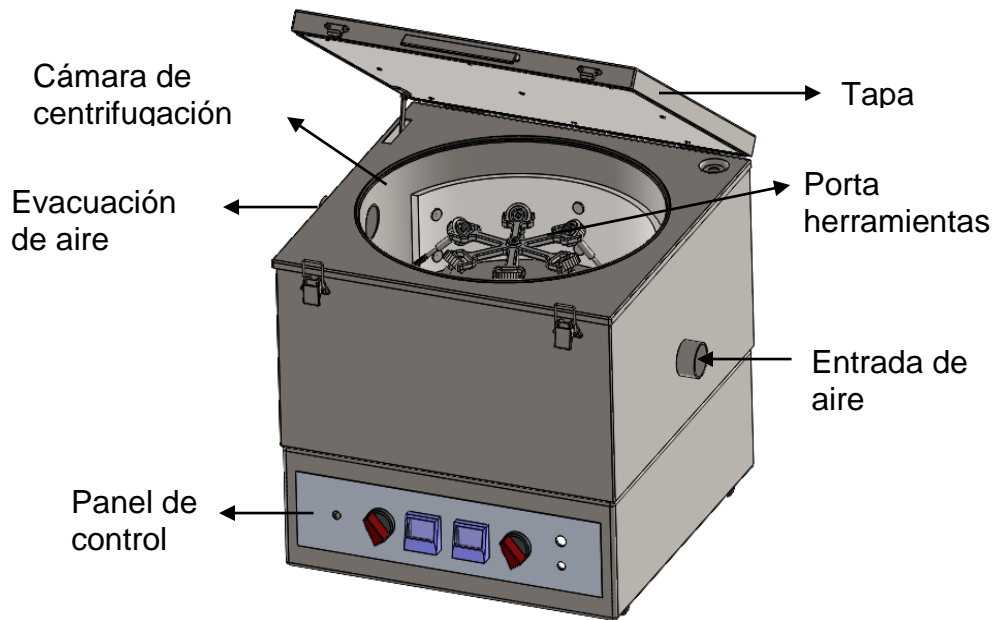


Figura 2.1. Instalación para el enfriamiento centrífugo (Gurri, 2014).

El funcionamiento es el siguiente: las piezas austenizadas se trasladan hacia la cámara de centrifugación donde una vez colocadas en el portaherramientas se le aplica el régimen de enfriamiento el cual es monitoreado por sensores. Después de concluido el tiempo de centrifugación se retiran las mismas.

2.2. Diseño del experimento

Para la realización del estudio de la influencia sobre la dureza del enfriamiento por centrifugación durante el temple y el revenido del acero D2 se utilizó una instalación especializada para lograr tal efecto, (ver anexos figura 3), de manera tal que se monitoreó la temperatura, el tiempo y la velocidad del enfriamiento (r.p.m).

Para el diseño del experimento se tomaron en consideración los siguientes factores:

- Las variables independientes del experimento fueron las siguientes:

Temperatura de austenización: $T_1=980^{\circ}\text{C}$; $T_2=1050^{\circ}\text{C}$; $T_3=1080^{\circ}\text{C}$

Revoluciones por minutos : $r.p.m_1 = 1000$; $r.p.m_2 = 1500$

Temperatura de revenido: $T_1= 180^{\circ}\text{C}$; $T_2= 400^{\circ}\text{C}$; $T_3= 560^{\circ}\text{C}$

El tiempo de enfriamiento durante el temple permanecerá constante para todas las variantes de experimentación y se establecerá en $t= 5$ min

- La variable dependiente: dureza (HRC)
- Unidad experimental: probetas $15 \times 15 \times 55$ mm

Para la conducción del experimento, las unidades experimentales, se distribuirán en bloques aleatorios se llevarán a cabo 2 pruebas para cada combinación, referidas a la temperatura de austenización, r.p.m, tiempo de enfriamiento y temperatura de revenido, obteniéndose así un diseño multifactorial:

1. Factor temperatura

Temperatura de austenización- tres niveles

Temperatura de revenido- tres niveles

2. Factor r.p.m- dos niveles

Diseño multifactorial: $3 \times 2 \times 3$ (3 factores)

Entonces se obtendrán 18 tratamientos o condiciones para una misma temperatura de austenización, revenido y r.p.m, que aplicado a dos probetas por proceso de experimentación se obtendrán un total de 36 probetas, (ver tabla 2.1), que para nuestro caso serán 18 corridas ya que el proceso de enfriamiento en la centrifuga se realizará en pares, quedando entonces una planeación aleatoria expresada de la siguiente forma, ejemplo:

En el bloque 1 para el temple desde una temperatura de austenización de 980°C a una velocidad de enfriamiento de 1000 r.p.m y un revenido a 180°C, se tomarán las probetas 1 y 4, mientras que si el revenido se realiza a 560°C entonces se ensayarán las probetas 13 y 16.

Tabla 2.1. Planeación de las unidades experimentales para la realización de los procesos tecnológicos con enfriamiento por centrifugación.

Bloque	r.p.m	Temperatura de austenización para el temple, °C			Revenido, °C
		980	1050	1080	
1	1000	1	2	3	180
		4	5	6	
		7	8	9	400
		10	11	12	
		13	14	15	560
		16	17	18	
2	1500	19	20	21	180
		22	23	24	
		25	26	27	400
		28	29	30	
		31	32	33	560
		34	35	36	

2.3. Caracterización del proceso de tratamiento térmico aplicado al acero D2

El acero D2, puede ser sometido a diferentes tipos de tratamientos térmicos convencionales, que según los fabricantes (Uddeholm; Acero SISA; SUMITEC AISI D2; Hitachi Metals) y la bibliografía de aceros para herramientas (Bashnin, 1986; Pozniak, 1980; Okolovich, 2002; Okolovich, 2003; Sokolov, 1988; ASM Hand Book, 1991), tal y como se muestra en la tabla VIII, ha estado basado en desarrollar una combinación determinada de resistencia al desgaste, resistencia a la rotura y dureza, o sea obtener una relación óptima entre resistencia y tenacidad. Muchas investigaciones se han realizado (Božidar, 2010; Luty, 1990; Hernández, 1986; Heins, 1982; Ljiljana, 2009), variando diferentes parámetros tecnológicos entre los que se encuentran la temperatura de austenización, velocidades de enfriamientos y medios de temple, sin embargo cada vez se hace más necesario la introducción de nuevas formas y métodos de enfriamientos y ampliar así el espectro investigativo. Con este objetivo en la presente investigación se propone introducir una nueva forma de enfriamiento basada en la aplicación de un proceso de centrifugación durante el temple de probetas de pequeñas dimensiones, mediante el cual se pretende evaluar su influencia sobre la dureza de temple y su comportamiento después de la aplicación del revenido.

Dada la necesidad de estudio de esta forma de enfriamiento se procedió a acondicionar el equipamiento necesario acorde a las exigencias planteadas y así poder determinar qué parámetros tecnológicos facilitan la obtención de los mejores valores de dureza, principalmente relacionados con diferentes regímenes de centrifugación, temperaturas de austenización y de revenido. Dejamos por establecido que no tendría significado alguno realizar experimentos que se encuentren fuera o alejados de los rangos de temperatura de austenización que proporcionan los mayores valores de dureza y de esta forma compararlo con los valores que se obtienen según los regímenes de tratamientos convencionales, con enfriamiento en aceite o aire.

Para la elección de las temperaturas de austenización se tomaron como base aspectos teóricos ya conocidos, que a altas temperaturas de austenización existirá una mayor disolución de los carburos, lo que provocará una disminución de estos en la matriz después de la operación de temple afectando en cierta medida la resistencia al desgaste, por otro lado también es conocido que el endurecimiento secundario se

encuentra relacionado con la temperatura de austenización como se puede apreciar en la figura 1.6.

Por todo lo antes expuesto, para nuestro proceso de experimentación se seleccionan las temperaturas de austenización en un rango entre 980°C y 1080°C, debido a que rangos de temperaturas menores no desarrollan altos valores de dureza en este tipo de acero y temperaturas mayores además de no desarrollar altos valores de dureza pueden provocar una retención, en un por ciento elevado, de austenita en su matriz microestructural.

Entonces los regímenes de tratamientos térmicos que serán empleados para el proceso de experimentación serán los siguientes:

a) Recocido.

Con el objetivo de homogeneizar su condición microestructural, todas las unidades experimentales (probetas) fueron sometidas primeramente a un recocido isotérmico, consistente en (ver figura 2.2) un calentamiento a 850-870°C, con una permanencia isotérmica a 700-720°C, seguido de un enfriamiento en el horno hasta una temperatura de 550°C y luego al aire, alcanzando una dureza de 255 HB.

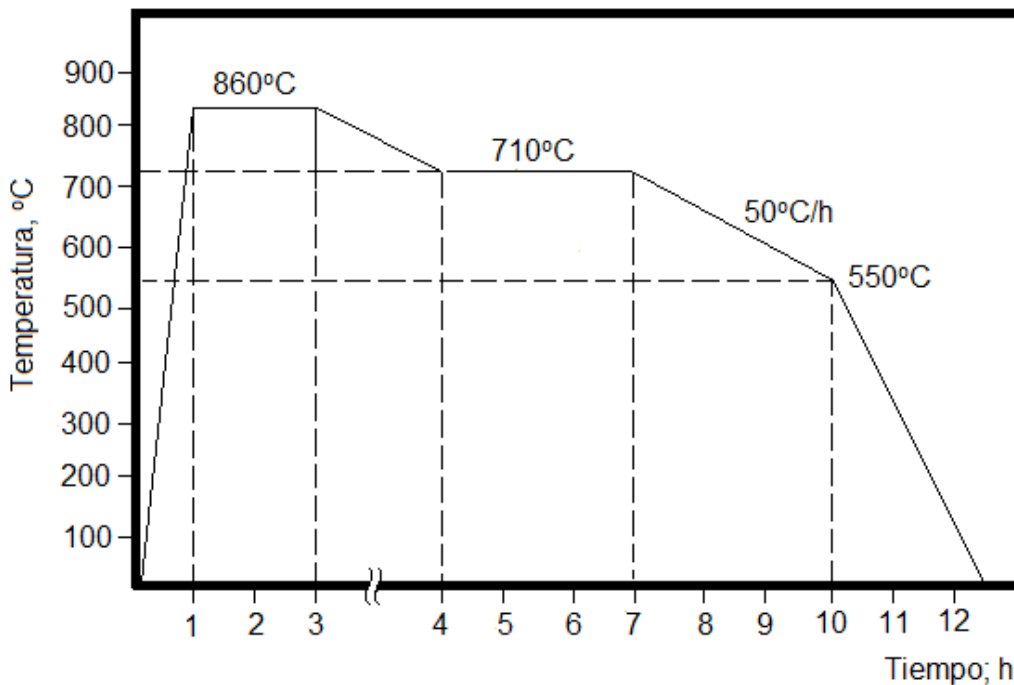


Figura 2.2. Régimen tecnológico de recocido aplicado a las unidades experimentales, (Gurri, 2014).

El calentamiento se realiza en hornos de cámara, para lo cual las probetas se colocan en una caja metálica con carbón vegetal, para evitar descarburación u oxidación de la superficie y se introducen en el horno a una temperatura de 860°C, por espacio de dos horas y luego se traslada hacia otro horno con una temperatura de 710°C manteniéndola por espacio de tres horas y dejándolas enfriar en el horno hasta alcanzar los 550°C a una velocidad de 40-50°C/h y luego se extrae la caja para su enfriamiento final al aire hasta la temperatura ambiente.

b) Temple.

Para la realización del calentamiento de austenización para el temple las probetas se colocan de forma espaciada, según ($S > a$, ver figura 2.3) en una caja metálica con carbón vegetal y se seleccionaron tres temperaturas, 980°C, 1050°C y 1080°C, las cuales fueron previamente precalentadas a 815°C, luego las probetas se trasladan hacia la centrífuga y se le aplica el régimen de centrifugación prefijado en el diseño del experimento, figura 2.4.

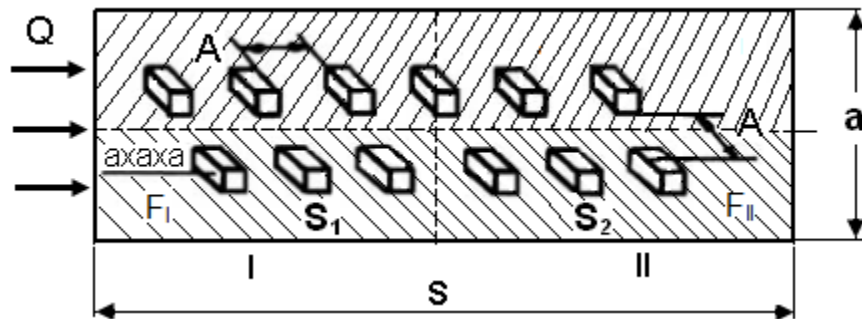


Figura 2.3. Disposición de las probetas en la caja contenedora con carbón vegetal.

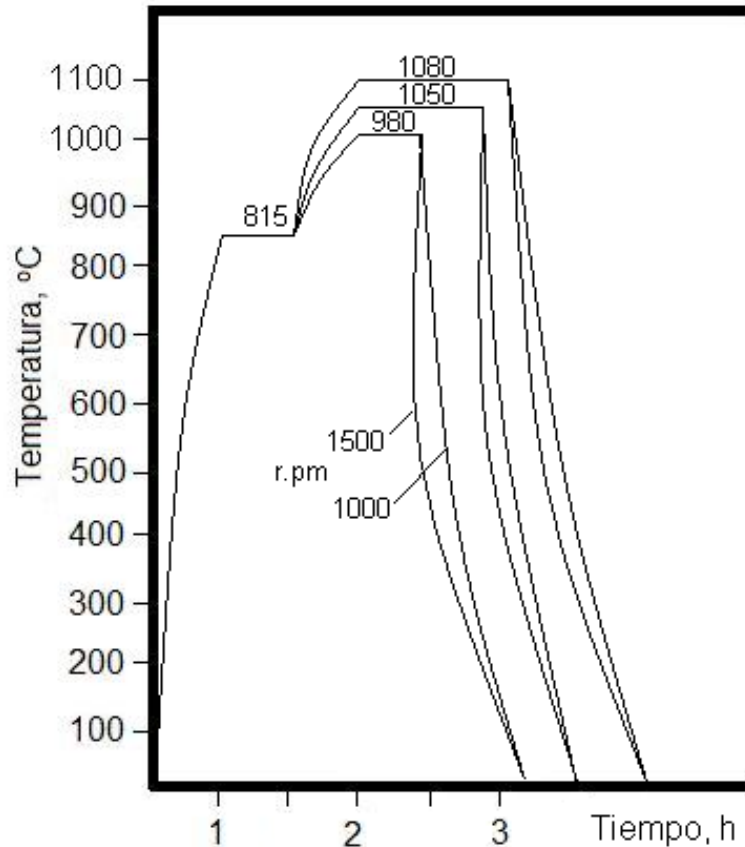


Figura 2.4. Régimen tecnológico de temple aplicado a las unidades experimentales, con enfriamiento centrífugo a 1000 y 1500 r.p.m, (Gurri, 2014).

c) Revenido.

La selección de las temperaturas de revenido se realiza atendiendo a las temperaturas de austenización o sea considerando el efecto de endurecimiento por dispersión secundaria en este acero, para observar de este modo su comportamiento después del enfriamiento centrífugo. Las temperaturas de revenido seleccionadas fueron 180°C, 400°C y 560°C, como se muestra en la figura 2.5

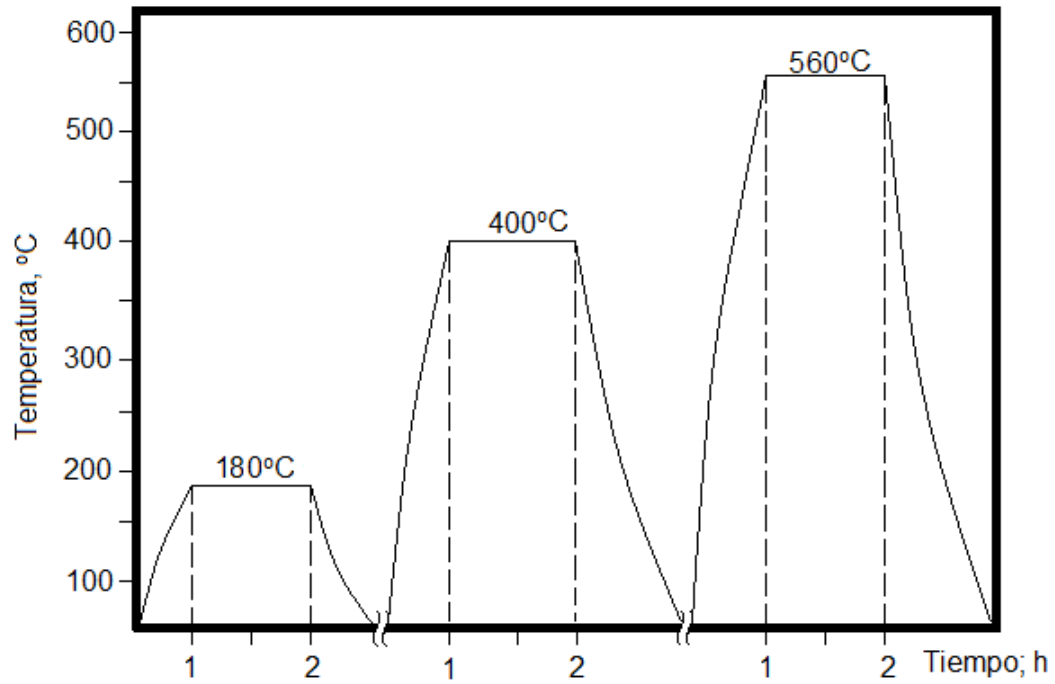


Figura 2.5. Régimen tecnológico de revenido aplicado a las unidades experimentales, con enfriamiento centrifugado a 1000 y 1500 r.p.m, (Gurri, 2014).

2.4. Determinación de los tiempos tecnológicos de calentamiento.

El régimen de calentamiento del metal en el horno se caracteriza por los siguientes parámetros: (Nekrasov, 2011).

- Temperatura del horno, t_h ;
- Temperatura del metal de la carga, t_{mc} ;
- Temperatura final de calentamiento, t_{fc} (en los cálculos se contempla como la temperatura de la superficie- t_s y en el centro de la pieza- t_c);
- Velocidad de calentamiento; V_c
- Tiempo de permanencia a determinada temperatura, $t_{tecn.}$ - tiempo tecnológico;
- Tiempo total de permanencia de las piezas en el horno- t_{total} .

Para establecer el régimen de calentamiento, o sea, los tiempos de calentamiento y de mantenimiento a determinada temperatura de un metal es necesario primeramente determinar el estado termotécnico del cuerpo a calentar; conocer si este clasifica dentro de los cuerpos denominados técnicamente finos o gruesos y tener en cuenta las denominadas resistencias al calentamiento, ya sean internas o externas, que se caracterizan por el criterio de Bio (Bi), mediante la relación entre la resistencia al calor interna x / λ con la externa $1 / \alpha$, según la siguiente expresión:

$$Bi = \frac{S \lambda}{1 \alpha} = \frac{\alpha S}{\lambda} \quad [1]$$

Dónde: α – Coeficiente de transferencia de calor; $W/(m^2 / K)$

λ – Coeficiente de conductividad térmica; $W/(m / K)$

S – Dimensión característica (espesor del cuerpo), m

Este criterio se toma como base en la mayoría de los cálculos y se considera que un cuerpo es denominado fino cuando el criterio de $Bi < 0,25$ y grueso cuando $Bi \geq 0,25$.

El coeficiente de transferencia de calor por conductividad térmica (λ) se toma por el valor promedio en el intervalo de temperatura $t_{i,m}$ - temperatura inicial del metal y $t_{f,m}$ - temperatura final del metal, por datos bibliográficos (Sokolov, 1984, 1988).

El coeficiente de transferencia de calor (α_{total}), se toma como el promedio de la suma del coeficiente de transferencia de calor por irradiación (α_i), y el coeficiente de transferencia de calor por convección, (α_{conv}).

$$\alpha_{total} = \alpha_I + \alpha_{conv} = \alpha_{inicial} + \alpha_{final} + \alpha_{conv.1} + \alpha_{conv.2} \cdot 0,5; W/m^2K \quad [2]$$

Según la Ley de irradiación de Stefan – Bolstman.

$$\alpha_I = C \frac{\frac{T_{med}^4}{100} - \frac{T_{met}^4}{100}}{T_{med} - T_{met}}; W/m^2K \quad [3]$$

Dónde: C = ϵC_o – Coeficiente de irradiación, W/(m² / K⁴)

$C_o = 3,5 W/(m^2 / K^4)$ - Coeficiente de irradiación del cuerpo negro absoluto.

ϵ –Grado de emisividad del cuerpo, para los aceros y el hierro es igual a 0.8

$$C = 3,5 \times 0.8 = 2,8; W/(m^2 / K^4)$$

T_{med} - Temperatura del medio de calentamiento, °C

T_{met} - Temperatura del metal, °C

α_{total} depende de la velocidad de movimiento de los gases y de la irregularidad de la superficie del metal, cuando existe un movimiento forzado de los gases a lo largo de una superficie laminada irregular o una superficie pulida, (t=20°C, p=0.1Mpa), el coeficiente de transferencia de calor por convección, (α_{conv}), en los hornos de tratamiento térmico tiene un valor determinado en dependencia de las diferentes velocidades de movimiento de los gases en el horno. Estos datos se muestran en la tabla 2.2

Tabla 2.2. Coeficiente de transferencia de calor por convección, (α_{conv}).

Estado de la Superficie	Velocidad de movimiento de los gases de combustión, m/s	
	≤ 5	≥ 5
Laminada	5.0 + 3.4 v	6.14 v ^{0.78}
Irregular o rugosa	5.3 + 3.6 v	6.47 v ^{0.78}
Pulida	4.8 + 3.4 v	6.12 v ^{0.78}

Para la velocidad de movimiento de los gases de combustión ≤ 5 m/s; v se toma entre 2÷3 m/s y para ≥ 5 m/s; entre 2÷6 m/s

Durante el proceso de calentamiento el coeficiente de transferencia de calor (α) y las constantes físicas del metal calentado (λ , c, α), cambian, por ello sus valores deben ser

tomados en el intervalo de temperatura determinado. Los valores aproximados para (λ y c) se toman de las tablas, (Nekrasov, 2011; Sokolov, 1988; Lajtin, 1980).

Tal como el proceso de calentamiento se realiza en una caja metálica en presencia de carbón vegetal y se aplica a un acero de alta aleación, el que exige unas determinadas condiciones de calentamiento; por lo general se aplica un régimen de calentamiento combinado, el cual incluye dentro del cálculo del tiempo de calentamiento diferentes metodologías, partiendo de que nuestras condiciones de calentamiento se asemejan al calentamiento de cuerpos heterogéneos.

Para el cálculo del tiempo de calentamiento (enfriamiento) de cuerpos heterogéneos previamente se determinan los coeficientes equivalentes de termoconductividad (λ_{eq}), termodifusibilidad (α_{eq}) y el peso volumétrico equivalente (γ_{eq}) y luego se prosigue según la metodología de cálculo para los cuerpos homogéneos.

Para nuestro caso se considera la carga como un cuerpo macizo heterogéneo sin capas de aire intercalada, o sea que las probetas se colocaron en dos hileras (ver figura 2.1) de 6 probetas espaciadas entre ellas a una distancia de 15 mm, siendo las dimensiones de la caja de 180 x 100 x 165 mm y el flujo calorífico (Q) se proyecta sobre la caja de forma paralela a las capas dispuestas.

Entonces la determinación de los coeficientes se realiza por las siguientes ecuaciones:

Coeficiente de termoconductividad equivalente (λ_{eq}),

$$\lambda_{eq} = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_n}{\frac{F_1 + F_2 + \dots + F_n}{\frac{F_1 \lambda_1}{S_1} + \frac{F_2 \lambda_2}{S_2} + \dots + \frac{F_n \lambda_n}{S_n}}}; \quad [4]$$

Dónde: F_1, F_2 - Área de la sección transversal de las distintas capas a través de las cuales se encuentra dirigido el flujo de calor. (perpendicular al flujo calorífico)

$S_1; S_2; \lambda_1; \lambda_2$ - Espesor (m) y termoconductividad de las capas correspondientes

Peso específico volumétrico equivalente (γ_{eq})

$$\gamma_{eq} = \gamma_1 \frac{S_1}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} + \gamma_2 \frac{S_2}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} + \gamma_n \frac{S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad [5]$$

Coeficiente de termodifusibilidad (α_{eq})

$$\alpha_{eq} = \frac{\lambda_{met}}{C_{eq}\gamma_{met}} \quad [6]$$

Dónde: λ_{met} - Coeficiente de conductividad térmica, (se toma para el intervalo de temperatura de $t_{inic.met.}$ – temperatura inicial del metal; $t_{f.met.}$ - temperatura final del metal); $W/(m \cdot K)$

C_{eq} - Capacidad calórica equivalente, se determina de forma análoga que γ_{eq} ;
 $J/(kg.K)$

Sustituyendo obtenemos:

Datos de entrada

Dimensión de las probetas: $S=15 \times 15$ mm $L=55$ mm

Acero: D2

Separación entre las probetas: 10 mm

Temperatura de calentamiento: 830°C

Temperatura inicial del metal: 27°C

Temperatura final del metal: 815°C

Densidad: 7695 kg/m³

Tal como el flujo de calor se encuentra dirigido de forma paralela a la caja y al eje de las probetas entonces

$$\lambda_{eq} = \frac{S_1 + S_2}{\frac{F_1 + F_2}{\frac{F_1 \lambda_1}{S_1} + \frac{F_2 \lambda_2}{S_2}}} \quad [7]$$

1. Espesor de las capas

$S=0.021$ m, la capa de carbón vegetal 0.035 m, por lo tanto el espesor de las capas será: $S = S_{real} \times K_d = 0,015 \cdot 1,4 = 0.021$; K_d - Coeficiente de distribución de las piezas en la caja, (tabla 3.4; libro Nekrasov, 2011).

$S_1 = 0.098$ m y $S_2 = 0.098$ m

2. Determinación del área de la sección transversal de las capas

El área de la sección transversal de las dos áreas coinciden y se determinan de la siguiente forma:

$$F_1; F_2 = 0,1 \times 0,098 = 0,0098 \text{ m}^2$$

3. Termoconductividad de la primera capa

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_{27} + \lambda_{830}}{2} = \frac{13 + 22}{2} = 17,5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

4. Termoconductividad de la segunda capa se selecciona de la siguiente forma:

Los datos termofísicos aproximados para el carbón vegetal son los siguientes: (Libro Nekrasov, 2011).

$$\gamma_{med} = 150 \text{ kg}/\text{m}^3; \lambda_{med} = 0,072 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}); C_{med} = 0,84 \text{ KJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

5. Determinación del coeficiente de termoconductividad equivalente

$$\lambda_{eq} = \frac{0,098 + 0,098}{0,0098 + 0,0098} = 17,82 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$
$$\frac{0,0098 \cdot 17,5}{0,098} + \frac{0,0098 \cdot 0,072}{0,098}$$

6. Determinación del peso específico equivalente.

$$\gamma_{eq} = 7695 \frac{0,098}{0,196} + 150 \frac{0,098}{0,196} = 3922,5 \text{ kg}/\text{m}^3$$

7. Determinación del coeficiente de termodifusibilidad

$$\alpha_{eq} = \frac{\lambda_{met}}{C_{eq} \gamma_{met}} \quad [8]$$

$$\alpha_{eq} = \frac{18}{699 \cdot 3922,5} = 3,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 0,012 \text{ m}^2/\text{h}$$

La capacidad calórica media del metal y del carbón vegetal es igual a

$$C_m = \frac{C_{27^\circ\text{C}} + C_{830^\circ\text{C}}}{2} = \frac{0,495 + 0,620}{2} = 0,5575 \text{ KJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$C_{med} = 0,84 \text{ KJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$C_{med} = 0,5575 \frac{0,09}{0,18} + 0,84 \frac{0,09}{0,18} = 0,69875 KJ/(kg \cdot K) = 699 J/(kg \cdot K)$$

8. Determinación del criterio de Bi

$$B_i = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda} \quad [9]$$

$$\alpha_{total} = \alpha_I + \alpha_{conv} = \alpha_{inicial} + \alpha_{final} + \alpha_{conv.1} + \alpha_{conv.2} \quad 0,5$$

$$\alpha_I = C \frac{\frac{T_{med}^4}{100} - \frac{T_{met}^4}{100}}{T_{med} - T_{met}}; W/m^2K$$

$$\alpha_{Iinicial} = 2,8 \frac{\frac{830^4}{100} - \frac{27^4}{100}}{830 - 27} = 16,54 W/m^2K$$

$$\alpha_{Ifinal} = 2,8 \frac{\frac{830^4}{100} - \frac{815^4}{100}}{830 - 815} = 62,31 W/m^2K$$

$$\alpha_{conv.1} = 4,8 + 3,4 v = 4,8 + 3,4 \cdot 3 = 15 W/(m^2 / K)$$

$$\alpha_{conv.2} = 4,8 + 3,4 v = 4,8 + 3,4 \cdot 2 = 12 W/(m^2 / K)$$

$$\alpha_{total} = \alpha_I + \alpha_{conv} \cdot 0,5 = 52,93 W/(m^2 / K)$$

$$B_i = \frac{52,93 \cdot 0,098}{18} = 0,29 > 0,25$$

Una vez conocido el criterio de Bi, para la determinación del tiempo de calentamiento (expresados en horas) y nuestras condiciones de experimentación, seleccionaremos el algoritmo de cálculo para piezas denominadas gruesas en condiciones de (t= const) del medio de calentamiento, por el siguiente algoritmo de cálculo: (Nekrasov, 2011)

1. Determinación de la función (de exceso relativo de temperatura) de la superficie:

$$\theta_{sup} = \frac{t_h - t_{f.met}}{t_h - t_{inic.met}} \quad [10]$$

$$\theta_{sup} = \frac{830 - 815}{830 - 27} = 0,018$$

2. Determinación gráfica del criterio de F_0 (Fourier) para la superficie de una lámina según los valores calculados de Bi y θ según diagrama 3.6 Pág.100, (Nekrasov, 2011) – Obteniéndose un valor de $F_0 = 15$
3. Cálculo del tiempo de calentamiento de la superficie $t_{cal.sup.}$.

$$t_{cal.sup.} = \frac{F_0 \cdot S^2}{\alpha} \quad [11]$$

$$t_{cal.sup.} = \frac{15 \cdot 0,021^2}{0,012} = 0,55 \text{ h} = 33 \text{ min}$$

4. Según los criterios de F_0 y Bi determinar la función θ para el centro de la sección de las piezas. Según gráfica 3.8, (Nekrasov, 2011), obteniéndose:

$$\theta_{cent} = 0,02$$

5. Determinación de la temperatura del centro de las piezas al finalizar el período de calentamiento de la superficie.

$$t_{cent} = t_h - (t_h - t_{inic.met}) \cdot \theta_{cent} \quad [12]$$

$$t_{cent} = 830 - (830 - 27) \cdot 0,02 = 814^\circ C$$

6. Determinación de la diferencia entre la temperatura de la superficie y el centro de las piezas al finalizar el período de calentamiento de la superficie (comienzo del periodo de calentamiento)

$$\Delta t_{inic} = t_{inic.sup} - t_{cent} \quad [13]$$

$$\Delta t_{inic} = 830 - 814 = 16^{\circ}C$$

7. Determinación del tiempo de calentamiento a corazón de las piezas aplicando el algoritmo de cálculo en condiciones de temperatura ($t=const$) constante de la superficie de las piezas.

Partimos de la determinación de la función para el centro de las piezas θ_{cent} , la cual numéricamente es igual al grado de estabilización de la temperatura, aplicando la siguiente ecuación:

$$\theta_{cent} = \frac{t_{final\ pieza} - t_{cal.\ final.\ cent.}}{t_{final\ pieza} - t_{cal.\ inic.\ cent.}} = \frac{\Delta t_{final}}{\Delta t_{inic.}} \quad [14]$$

$$\theta_{cent} = \frac{830 - 815}{830 - 16} = 0,018$$

8. Determinar el criterio de (Fo) en función de θ_{cent} , según gráfico 3.15, (Nekrasov, 2011) – Obteniéndose Fo=0.8
9. Determinación del tiempo de calentamiento de las piezas

$$t_{cal.} = \frac{F_0 \cdot S^2}{\alpha} \quad [15]$$

$$t_{cal.} = \frac{0,8 \cdot (0,021)^2}{0,012} = 0,03 \text{ h} = 1,8 \text{ min}$$

10. Determinar el tiempo de calentamiento de las piezas en el horno en el primer escalón de calentamiento

$$t_{total\ cal.} = t_{cal.\ sup.} + t_{cal.} \quad [16]$$

$$t_{total\ cal.} = 33 + 1,8 = 35 \text{ min}$$

11. Determinación del tiempo de calentamiento durante la austenización.

Se procede de la misma forma que para el cálculo anterior variando solo los coeficientes y datos específicos para este intervalo de temperatura.

Como datos iniciales tomamos:

Temperatura del horno: 1000°C

Temperatura inicial de las piezas: 815°C

Temperatura final de las piezas: 980°C

12. Termoconductividad de la primera capa

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_{815} + \lambda_{1000}}{2} = \frac{22 + 23}{2} = 22,5 \text{ W}/(m \cdot K)$$

13. Determinación del coeficiente de termodifusibilidad

$$\alpha_{eq} = \frac{\lambda_{met}}{C_{eq}\gamma_{met}} \quad [17]$$

$$\alpha_{eq} = \frac{22,5}{730 \cdot 3922,5} = 7,86 \cdot 10^{-6} m^2/s = 0,03 m^2/h$$

La capacidad calórica media del metal y del carbón vegetal es igual a:

$$C_m = \frac{C_{815^\circ C} + C_{1000^\circ C}}{2} = \frac{0.607 + 0.620}{2} = 0.6135 \text{ KJ}/(kg \cdot K)$$

$$C_{med} = 0,84 \text{ KJ}/(kg \cdot K)$$

$$C_{med} = 0,6135 \frac{0,09}{0,18} + 0,84 \frac{0,09}{0,18} = 0,73 \text{ KJ}/(kg \cdot K) = 730 \text{ J}/(kg \cdot K)$$

14. Determinación del criterio de Bi

$$Bi = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda} \quad [18]$$

$$\alpha_{inic} = 2,8 \frac{\frac{1000^4}{100} - \frac{815^4}{100}}{1000 - 815} = 30,21 \text{ W}/m^2 K$$

$$\alpha_{I\text{final}} = 2,8 \frac{\frac{1000^4}{100} - \frac{980^4}{100}}{1000 - 980} = 38,81 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_{conv.1} = 4.8 + 3.4 v = 4.8 + 3.4 \cdot 3 = 15 \text{ W/(m}^2\text{/K)}$$

$$\alpha_{conv.2} = 4.8 + 3.4 v = 4.8 + 3.4 \cdot 2 = 12 \text{ W/(m}^2\text{/K)}$$

$$\alpha_{total} = \alpha_I + \alpha_{conv} \cdot 0,5 = 48,01 \text{ W/(m}^2\text{/K)}$$

$$Bi = \frac{48,01 \cdot 0,098}{22,5} = 0.21 < 0.25$$

Una vez conocido el criterio de Bi, para la determinación del tiempo de calentamiento (expresados en horas) y nuestras condiciones de experimentación, seleccionaremos el algoritmo de cálculo para piezas denominadas finas en condiciones de (t= const) del medio de calentamiento, por el siguiente algoritmo de cálculo: (Nekrasov, 2011)

$$\tau_{cal} = \frac{S \cdot \rho \cdot C_m}{3,6 \cdot K_f \cdot C'_{R,I}} \zeta^t_{final} \cdot \zeta^t_{inic} \quad [19]$$

Dónde: $C'_{R,I}$ - Coeficiente de emisividad (irradiación) reducida, tomando en consideración la transferencia de calor por convección, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ y se determina por la fórmula:

$$C'_{R,I} = C_{R,I} + C_{I,C} \quad [20]$$

Dónde: $C_{I,C}$ - Coeficiente de irradiación de calor convencional y se determina por la siguiente expresión:

$$C_{I,C} = \alpha_{conv} \frac{\frac{t_h - t_{met}}{100}^4 - \frac{t_{met} - 273}{100}^4}{\frac{t_h + 273}{100}^4 - \frac{t_{met} + 273}{100}^4} \quad [21]$$

$C_{R,I}$ - Coeficiente de irradiación reducido que para los hornos eléctricos a temperaturas menores a 1000°C es igual a 2,9 W/(m².K⁴) y para mayores de 1000°C es igual a 3,5 W/(m².K⁴). Tomado del libro, (Nekrasov, 2011).

ξ_{final}^t y ξ_{inic}^t - Factor térmico final e inicial, K⁻³

El valor de los factores de temperatura se determina en dependencia de la temperatura del medio y la temperatura del metal según las gráficas 3.2 y 3.3, (Nekrasov, 2011).

$$C_{I,C} = 13,5 \frac{1000 - 815}{\frac{1000 + 273}{100}^4 - \frac{815 + 273}{100}^4} = 0.20 \text{ W/ m}^2 \cdot \text{K}^4$$

$$C'_{R,I} = 3,5 + 0.20 = 3,7 \text{ W/ m}^2 \cdot \text{K}^4$$

$$\tau_{cal} = \frac{S \cdot \rho \cdot C_m}{3,6 \cdot K_f \cdot C'_{R,I}} \xi_{final}^{980} \cdot \xi_{inic}^{815} \quad [22]$$

$$\tau_{cal} = \frac{0,098 \cdot 3922,5 \cdot 0,73}{3,6 \cdot 1,70 \cdot 3,7} \cdot 0,058 \cdot 0,046 = 0.032 \text{ h}$$

15. Determinación del tiempo total de permanencia de las piezas en el horno tomando en consideración el tiempo tecnológico de mantención para la homogeneización y las transformaciones de fase

$$t_{total \text{ cal.}} = t_{cal.} + t_{tecn.} \quad [23]$$

El cálculo del tiempo tecnológico de mantención de las piezas a la temperatura de austenización se determina tomando en consideración la termoconductividad de este material la cual es muy baja en comparación con los aceros al carbono y de baja aleación.

Basados en datos empíricos, (Lajtin, 1980), se han desarrollado fórmulas para determinar el tiempo de mantención de las piezas en dependencia de la presencia de la cantidad total de elementos que son fuertes formadores de carburos que para los aceros herramentales de alto contenido de cromo de clase ledeburítica como lo es el acero D2, se establece que el tiempo tecnológico de permanencia es igual a:

$$t_{perm.} = 0,2Cr + 0,5W + V + Mo \text{ [24]}$$

Dónde: Cr, W, V, Mo- Significa la concentración de estos elementos en por ciento

$$t_{perm.} = 0,2 \cdot 12,53 + 0,22 \cdot V + 0,45 \cdot Mo = 3,18 \text{ min/mm}$$

Entonces como el calentamiento es bilateral, para el cálculo consideramos la mitad del espesor de las piezas o sea $S = 7,5 \text{ mm}$

$$t_{tecn.} = 3,18 \cdot 7,5 = 23,85 = 0,39 \text{ h}$$

Y el tiempo total de calentamiento es igual a:

$$t_{total \text{ cal.}980} = 0,58 + 0,032 + 0,39 = 1,002 \text{ h} = 60,12 \text{ min}$$

De esta misma forma se procedió para el cálculo del tiempo de calentamiento para los distintos regímenes de calentamiento para el temple o sea para 1030°C y 1080°C , obteniéndose los siguientes resultados:

$$t_{total \text{ cal.}1030^{\circ}\text{C}} = 0,58 + 0,39 + 0,397 = 1,37 \text{ h} = 82,02 \text{ min}$$

$$t_{total \text{ cal.}1080^{\circ}\text{C}} = 0,58 + 0,39 + 0,683 = 1,65 \text{ h} = 99,18 \text{ min}$$

El tiempo de permanencia de las probetas durante el recocido se tomó de 2 horas para la temperatura de 860°C y de 3 horas para la permanencia isotérmica a 710°C y para el revenido se tomó una permanencia de 1 hora para cada temperatura.

2.5. Medición de la dureza

La medición de la dureza se realiza según la norma ISO 6508:1999, después de realizadas las operaciones de temple y de revenido para cada uno de los procesos planeados, midiéndose en las caras longitudinales de cada una de las probetas y para ello se utilizó el durómetro Digital Rockwell Hardness Tester HRS-150.

En cada proceso se tomaron 3 lecturas de las mediciones para establecer su valor promedio. En la tabla 2.3, se muestran los registros de los valores de dureza promedios alcanzados después de cada proceso de experimentación.

Tabla 2.3. Dureza promedio obtenida durante las 36 corridas experimentales con variación de las r.p.m temperatura de austenización y de revenido.

Temperatura austenización °C	r.p.m	Dureza, HRC			
		Temple por centrifugación	Revenido, °C		
			180	400	560
980	1000	60	60	58	62
	1500	61	61	59	63
1050	1000	62	62	59	64
	1500	62	62	58	65
1080	1000	62	63	58	64
	1500	63	63	59	65

2.6. Análisis de los resultados

2.6.1. Procesamiento estadístico de los resultados.

Para el procesamiento de los resultados se aplicaron métodos estadísticos avanzados mediante la aplicación del software Statgraphics 5.1, donde se procesaron los resultados obtenidos en los dos procesos observados, o sea para los resultados de dureza obtenidos en el temple y para el temple y revenido a 1000 y 1500 r.p.m, respectivamente, cuyos resultados se muestran a continuación.

Este procedimiento nos permite realizar un análisis multifactorial de la varianza de la dureza, o sea nos permite determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo en esta, así como las interacciones significativas entre los factores que intervienen.

2.6.2. Operación de temple

2.6.2.1. Análisis de varianza de la dureza.

Para la realización del análisis de varianza de la dureza se tomaron los resultados de las mediciones después de realizado el temple y se procesaron obteniéndose los resultados que se reflejan en la tabla 2.4

Tabla 2.4. Análisis de varianza de la dureza durante el temple.

Análisis de la Varianza para Dureza - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:RPM	11,0848	1	11,0848	54,85	0,0000
B:Temple	78,6539	2	39,3269	194,60	0,0000
INTERACCIONES					
AB	2,38463	2	1,19231	5,90	0,0038
RESIDUOS	20,6133	102	0,202092		
TOTAL (CORREGIDO)					
	112,737	107			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

En la tabla podemos ver la descomposición de la variabilidad de la dureza en sus contribuciones debidas a los factores temple (temperatura de austenización) y r.p.m y nos informa acerca de la importancia estadística de estos factores.

Si partimos de las hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_j$$

H_1 : Algún μ_j difiere

De los resultados de este test podemos concluir que dado que el p-valor es inferior a 5% y 1% tanto para los factores principales como para la interacción, entonces podemos señalar que existen diferencias significativas en la dureza por los mismos, pero como la interacción es altamente significativa (99% de confianza), los factores principales (temperatura de austenización-temple y r.p.m), son dependientes, por lo que significa que la respuesta (dureza) varía en dependencia a como se combinan los niveles de estos factores principales, y el estudio se centra en el mismo, como se muestra en la gráfica 2.6.

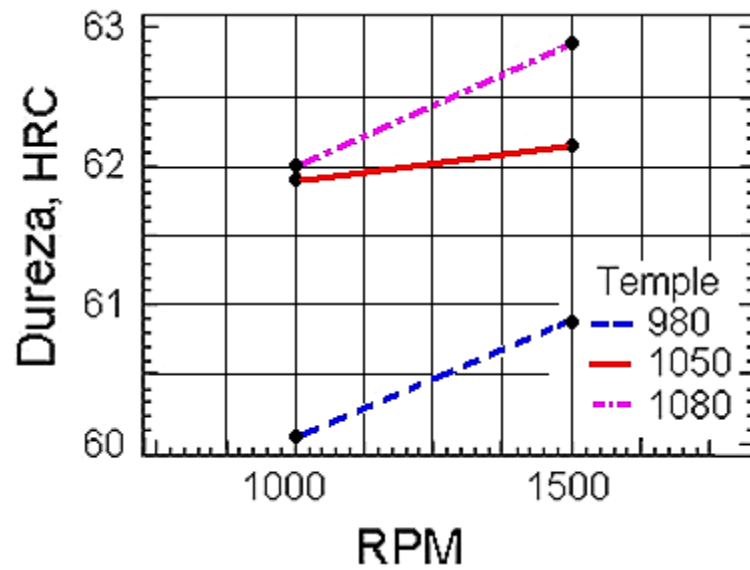
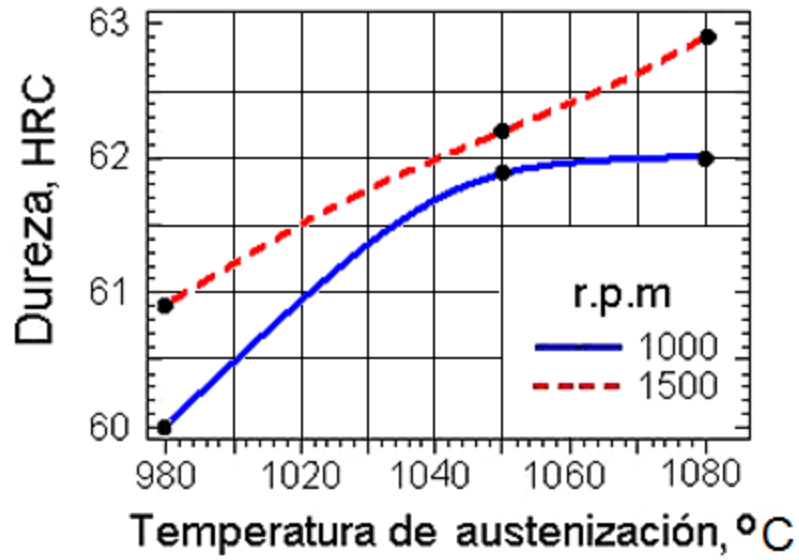


Figura 2.6. Gráficas de interacción de la dureza en función de la temperatura de austenización y las r.p.m. en la operación de temple, (Gurri, 2014).

2.6.2.2. Medias por mínimos cuadrados para dureza.

Se procesaron las mediciones de dureza para determinar los valores medios por mínimos cuadrados obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 2.5

Tabla 2.5 Valores medios de dureza por mínimos cuadrados para la operación de temple

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para Dureza con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	108	61,6389			
RPM					
1000	54	61,3185	0,0611754	61,1972	61,4399
1500	54	61,9593	0,0611754	61,8379	62,0806
Temple					
980	36	60,4528	0,0749243	60,3042	60,6014
1050	36	62,0389	0,0749243	61,8903	62,1875
1080	36	62,425	0,0749243	62,2764	62,5736
RPM según Temple					
1000 980	18	60,0444	0,105959	59,8343	60,2546
1000 1050	18	61,9278	0,105959	61,7176	62,1379
1000 1080	18	61,9833	0,105959	61,7732	62,1935
1500 980	18	60,8611	0,105959	60,6509	61,0713
1500 1050	18	62,15	0,105959	61,9398	62,3602
1500 1080	18	62,8667	0,105959	62,6565	63,0768

Esta tabla nos muestra la dureza media para cada nivel de factores y también nos presenta el error estándar de cada media, la cual es una medida de su variabilidad en la muestra. Las dos columnas de la derecha muestran un 95,0% intervalos de confianza para cada una de las medias.

De los gráficos de interacción presentados en la figura 2.6, se obtiene que la dureza mayor es cuando se combina la temperatura de austenización a 1080°C con 1500 rpm, obteniéndose el mayor valor de dureza promedio de 62,87 HRC.

2.6.2.3. Verificación del supuesto de homogeneidad de varianzas.

La verificación del supuesto de la homogeneidad de la varianza de la dureza se realiza en cuanto a los factores de r.p.m y temperatura de austenización y apoyándonos en las hipótesis siguientes se obtiene:

a) Para dureza de acuerdo a las r.p.m

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

H_1 : Algún σ^2 difiere

Contraste C de Cochran: 0,532814 P-valor = 0,634047

Contraste de Bartlett: 1,00216 P-valor = 0,63404

Con ambas pruebas se puede aceptar la hipótesis de homogeneidad de varianzas (ambos p-valor son superior a 5%)

b) Para dureza de acuerdo a temple

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2$$

H_1 : Algún σ^2 difiere

Contraste C de Cochran: 0,455647 P-valor = 0,101808

Contraste de Bartlett: 1,07041 P-valor = 0,0293767

Mediante el p-valor mostrado en la prueba de Cochran se comprueba la hipótesis nula de que la varianza de dureza dentro de cada uno de los tres niveles de temple, es la misma.

2.6.2.4. Verificación de la normalidad de la dureza.

Para la verificación de la normalidad de la dureza se realizaron varias pruebas estadísticas, arrojando el siguiente resultado.

Tests de Bondad de Ajuste para Dureza

Estadístico DMAS de Kolmogorov = 0,0708907

Estadístico DMENOS de Kolmogorov = 0,131366

Estadístico DN global de Kolmogorov = 0,131366

P-Valor aproximado = 0,0481041

Considerando que el p-valor de la prueba de Kolmogorov-Smirnov está bastante próximo al 5%, se va asumir que existe normalidad

2.6.3. Operación de temple y revenido.

2.6.3.1. Análisis de varianza de la dureza.

Para la realización del análisis de varianza de la dureza se tomaron los resultados de las mediciones después de realizado el temple y el revenido y se procesaron obteniéndose los resultados que se reflejan en la tabla 2.6

Tabla 2.6. Análisis de varianza de la dureza durante el temple y revenido.

Análisis de la Varianza para Dureza - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Revenido	451,98	2	225,99	1026,97	0,0000
B:RPM	9,30454	1	9,30454	42,28	0,0000
C:Temple	34,8156	2	17,4078	79,11	0,0000
INTERACCIONES					
AB	2,01185	2	1,00593	4,57	0,0129
AC	19,3494	4	4,83736	21,98	0,0000
BC	5,3163	2	2,65815	12,08	0,0000
ABC	5,24648	4	1,31162	5,96	0,0003
RESIDUOS	19,805	90	0,220056		

TOTAL (CORREGIDO)	547,829	107			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Partiendo de las hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_j$$

H₁: Algún μ_j difiere

De los resultados de la prueba realizada de varianza de la dureza, finalizada la operación de revenido, podemos concluir que dado que el p-valor es inferior a 5% y 1% tanto para los factores principales como para la interacción, entonces se puede señalar que existen diferencias significativas en la dureza por los mismos, pero como la interacción es altamente significativa (99% de confianza), los factores principales (temperatura de austenización-temple, r.p.m y revenido), son dependientes, por lo que significa que la respuesta (dureza) varía en dependencia a como se combinan los niveles de estos factores principales, centrándose el análisis en el mismo, ver gráficas de las figuras 2.7 y 2.8.

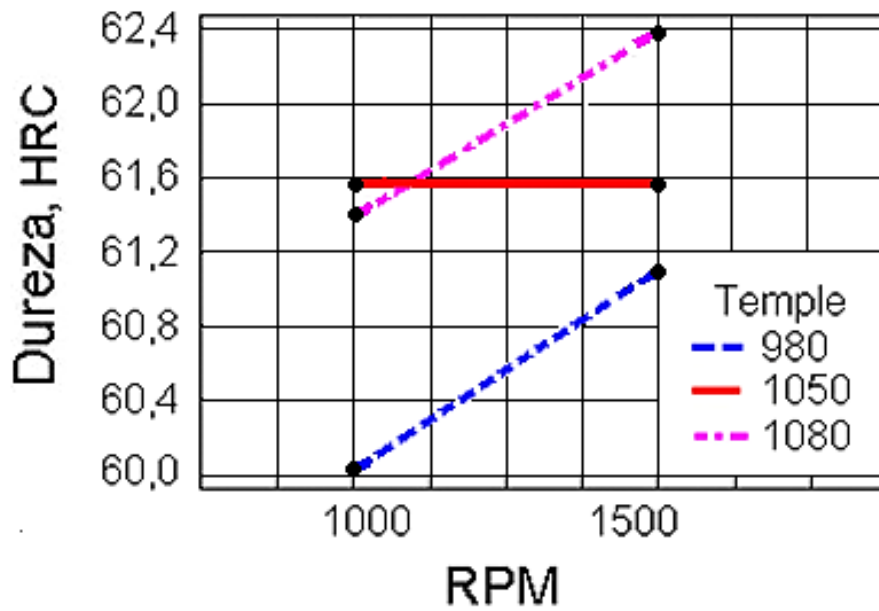
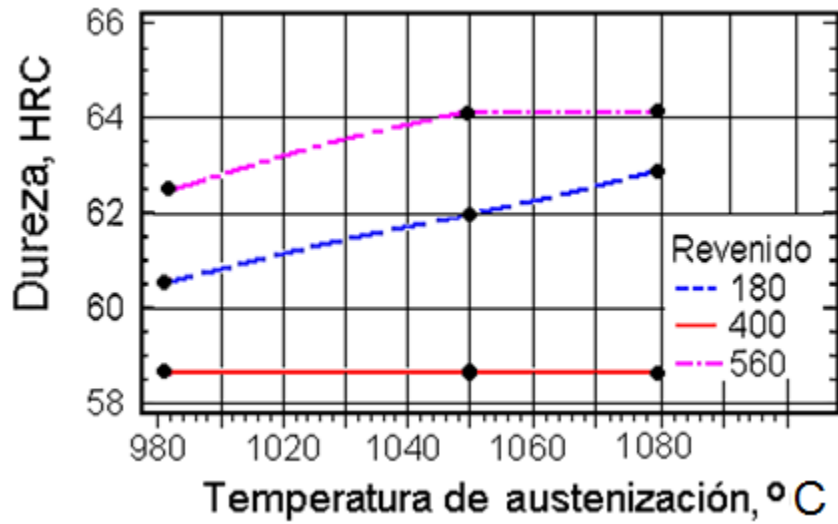


Figura 2.7. Gráficas de interacción de la dureza en función de la temperatura de austenización, r.p.m y de revenido en las operaciones de temple y revenido, (Gurri, 2014).

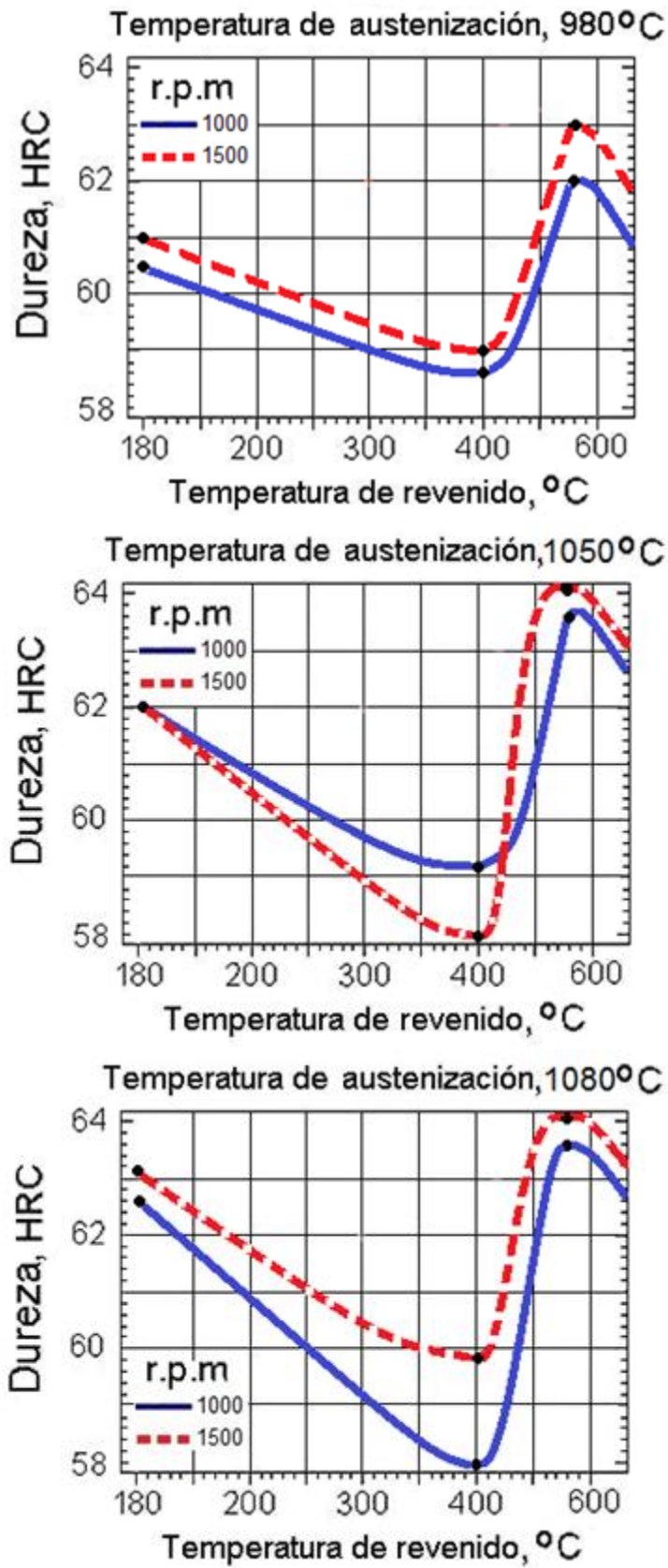


Figura 2.8. Gráficas de interacción de las r.p.m, temperatura de austenización y de revenido sobre el endurecimiento secundario, (Gurri, 2014).

2.6.3.2. Medias por mínimos cuadrados para dureza.

Tabla 2.7 Valores medios de dureza por mínimos cuadrados para la operación de temple y revenido.

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para Dureza con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior	
Media Total	108	61,3306				
Revenido						
180	36	61,7806	0,0781835	61,6252	61,9359	
400	36	58,6306	0,0781835	58,4752	58,7859	
560	36	63,5806	0,0781835	63,4252	63,7359	
RPM						
1000	54	61,037	0,0638365	60,9102	61,1639	
1500	54	61,6241	0,0638365	61,4973	61,7509	
Temple						
980	36	60,5472	0,0781835	60,3919	60,7025	
1050	36	61,5694	0,0781835	61,4141	61,7248	
1080	36	61,875	0,0781835	61,7197	62,0303	
Revenido según RPM						
180	1000	18	61,5722	0,110568	61,3526	61,7919
180	1500	18	61,9889	0,110568	61,7692	62,2086
400	1000	18	58,4444	0,110568	58,2248	58,6641
400	1500	18	58,8167	0,110568	58,597	59,0363
560	1000	18	63,0944	0,110568	62,8748	63,3141
560	1500	18	64,0667	0,110568	63,847	64,2863
Revenido según Temple						
180	980	12	60,5417	0,135418	60,2726	60,8107
180	1050	12	61,95	0,135418	61,681	62,219
180	1080	12	62,85	0,135418	62,581	63,119
400	980	12	58,6167	0,135418	58,3476	58,8857
400	1050	12	58,6417	0,135418	58,3726	58,9107
400	1080	12	58,6333	0,135418	58,3643	58,9024
560	980	12	62,4833	0,135418	62,2143	62,7524
560	1050	12	64,1167	0,135418	63,8476	64,3857
560	1080	12	64,1417	0,135418	63,8726	64,4107
RPM según Temple						
1000	980	18	60,0778	0,110568	59,8581	60,2974
1000	1050	18	61,5889	0,110568	61,3692	61,8086
1000	1080	18	61,4444	0,110568	61,2248	61,6641
1500	980	18	61,0167	0,110568	60,797	61,2363
1500	1050	18	61,55	0,110568	61,3303	61,7697
1500	1080	18	62,3056	0,110568	62,0859	62,5252

Esta tabla nos muestra la dureza media para cada nivel de factores y también nos presenta el error estándar de cada media, la cual es una medida de su variabilidad en la muestra. Las dos columnas de la derecha muestran un 95,0% intervalos de confianza para cada una de las medias.

De los gráficos de interacción presentados en la figura 2.7 se obtiene que la dureza mayor es cuando se combina la temperatura de austenización a 1080°C con 1500 rpm y un revenido a 560°C, obteniéndose el mayor valor de dureza promedio de 64,14 HRC.

2.6.3.3. Verificación del supuesto de homogeneidad de varianzas.

La verificación del supuesto de la homogeneidad de la varianza de la dureza se realiza en cuanto a los factores de r.p.m y temperatura de austenización y de revenido y apoyándonos en las siguientes hipótesis se obtienen:

a) Para dureza de acuerdo a revenido

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2$$

$$H_1: \text{Algún } \sigma^2 \text{ difiere}$$

Contraste de Varianza

Contraste C de Cochran: 0,442533 P-valor = 0,15207

Contraste de Bartlett: 1,04783 P-valor = 0,0887372

Con ambas pruebas se puede aceptar la hipótesis de homogeneidad de varianza ya que ambos p-valor son superiores al 5%.

b) Para dureza de acuerdo a r.p.m

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \text{Algún } \sigma^2 \text{ difiere}$$

Contraste C de Cochran: 0,537875 P-valor = 0,582554

Contraste de Bartlett: 1,00288 P-valor = 0,582546

Mediante el p-valor mostrado en ambas pruebas se comprueba la hipótesis nula de que la varianza de dureza dentro de cada uno de los dos niveles de r.p.m, es la misma.

c) Para dureza de acuerdo a temple

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2$$

$$H_1: \text{Algún } \sigma^2 \text{ difiere}$$

Contraste C de Cochran: 0,412245 P-valor = 0,343877
Contraste de Bartlett: 1,04738 P-valor = 0,090729

En los tres factores se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas comprobándose las hipótesis nulas de que la varianza de dureza dentro de cada uno de los tres niveles es la misma.

2.6.3.4. Verificación del supuesto de normalidad

Al igual que para la operación de temple para la verificación de la normalidad de la dureza se realizaron varios test estadísticos, arrojando así el siguiente resultado.

Tests de Bondad de Ajuste para Dureza

Estadístico DMAS de Kolmogorov = 0,102284
Estadístico DMENOS de Kolmogorov = 0,119218
Estadístico DN global de Kolmogorov = 0,119218
P-Valor aproximado = 0,0928497

Según los valores del p-valor se cumple el supuesto de normalidad ya que este es superior al 5%

Del procesamiento y análisis de los resultados se pudo comprobar que existe una dependencia directa de la dureza con relación a la temperatura de austenización, r.p.m (temple con enfriamiento por centrifugación) y temperatura de revenido y que de acuerdo a las solicitudes técnicas y de explotación de las herramientas a fabricar de acero D2 pueden ser aplicados los regímenes tecnológicos de tratamiento térmico como se muestran en la tabla 2.8.

Los resultados obtenidos en la aplicación del enfriamiento por centrifugación durante el temple del acero D2 son similares a los obtenidos por los métodos convencionales de enfriamiento, o sea, en aceite o aire-aire comprimido, proporcionando niveles de dureza aceptables, dando muestra de que este método facilita la ocurrencia de las transformaciones de fase, limitando los indeseables defectos que aparecen por la acción de violentos cambios estructurales y tensionales durante el enfriamiento en aceite y ser menos agresivo al medio ambiente y a la salud del hombre.

Tabla 2.8 Regímenes tecnológicos para la aplicación del temple por centrifugación al acero D2.

Herramientas para:	Rango de dureza (HRC)	Temperatura de austenización; °C	Régimen de enfriamiento r.p.m	Temperatura de revenido; °C
troquelado, punzonado cizallado, embutido, rebabado, recortado	54-56	980	1000	450
	58-60	980	1500	180
recortado para la forja en caliente	58-60	1050	1000	400
doblado, embutición profunda, laminación de llantas	56-62	980	1500	250
		1050	1500	180 ÷ 350
		1080	1000	200 ÷ 420
martillos, otras prestaciones	62-64	1080	1500	560

Conclusiones:

1. Los resultados obtenidos de la investigación realizada confirman que el enfriamiento centrifugado puede constituir una nueva forma de enfriamiento para las herramientas de pequeñas y medianas dimensiones fabricadas de acero D2, ya que los niveles de dureza promedios alcanzados después del temple oscilan entre 58 y 62.87 HRC en dependencia de la temperatura de austenización y después del revenido de 64,14 HRC, por el mecanismo de endurecimiento por segregación secundaria.
2. Los valores de dureza obtenidos en el temple con enfriamiento por centrifugación se comportan de manera similar a los obtenidos durante el temple en aceite y aire para el acero D2.
3. Los análisis y procesamiento de los resultados demuestran que existe una dependencia directa de la dureza con relación a la temperatura de austenización, r.p.m (temple con enfriamiento por centrifugación) y la temperatura de revenido y que en dependencia de las solicitaciones técnicas y de explotación de las herramientas fabricadas de acero D2 estas pueden ser sometidas a distintos regímenes tecnológicos de tratamiento térmico.

Recomendaciones:

1. Aplicar esta nueva tecnología de enfriamiento durante la operación de temple para las herramientas fabricadas de aceros de alta templabilidad, la cual mejora la termocinética de las transformaciones de fase e incide favorablemente sobre los parámetros medio ambientales en la explotación de la maquinaria.
2. Extender la investigación del enfriamiento centrifugado a otras marcas y grupos de aceros, así como realizar un estudio metalográfico y de propiedades mecánicas para determinar el comportamiento estructural de estos aceros.
3. Utilizar la instalación aplicando otros medios para el enfriamiento tales como: rociado de agua por aspersión, gas carbónico, mezcla agua-aire, así como la aplicación de campos magnéticos permanentes y variables y sus combinaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **A.P, Guliaev.** Ciencia de los Materiales. 6ta. Moscú : Metalurgia, 1986.
2. **Acero SISA.** Acero SISA D2. [En línea] www.sisa1.com.mx: isamty@sisa1.com.mx.
3. **ASM Hand Book.** Heat treating. 1991. Vol. 4.
4. **ASM International- Crucible Steel Co.** Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams,. 1991. pág. 507.
5. **Bashnin U.A, Ushakov B.K, Cekeii A.G.** Tecnologías de tratamiento térmico de los aceros. s.l. : M.:Металлургия, 1986. págs. 364-372.[trad.]. **Башнин Ю.А., Ушаков Б.К., Секей А.Г.** Технология термической обработки стали.
6. **Božidar Liščic ...,** [et al.]. --p.cm. Quenching theory and technology. [trad.] Tecnologías y Teoría del Enfriamiento. 2nd ed. s.l. : Taylor and Francis Group, LLC, 2010. ISBN 978-0-8493-9279-5.
7. **Catálogo de precios.** Catálogo de precios para herramientas, 2013
8. **Chan Ka Man C.** Heat Treatment of Mould. [rpdrc.ic.polyu.edu.hk /content/hot_metal_process/heat_treatment1.htm](http://rpdrc.ic.polyu.edu.hk/content/hot_metal_process/heat_treatment1.htm). [En línea] Febrero de 2001.
9. **GOST 5950-2000.** Planchas, Barras.y Bobinas de Aceros Aleados para Herramientas. [Norma]. [trad.] 22 de Junio de 2000. **ГОСТ 5950-2000.** Прутки, Полосы и Мотки из Инструментальной Легированной Стали.
10. **Handbook., ASM.** Wrought Tool Steels. 10th. s.l. : ASM International Materials Park Ohio, 1993. págs. 758, 773. Vol. 1.
11. **Heins R.W., Myeller E.R.** Characterisation of polymer quenchants by cooling querves. [trad.] Caracterización del enfriamiento en polímeros según las curvas de enfriamiento. s.l. : Metall Progress, 1982. págs. 33-39. Vol. 122 No.4.
12. **Hernández Árias.F.L.** Propiedades y estructura de los aceros de construcción de maquinaria después del temple en disoluciones acuosas de monosulfito. Instituto Agrario de Construcción de Maquinaria. Rostov del Don : s.n., 1986. pág. 185.
13. **Hitachi Metals.** YSS Tools Steels. [En línea] <http://www.hitachi-metals.co.jp>.
14. **ISO 6743-14.** Lubricants, industrial oils and related products (class L) – Classification- 1994.

15. **Lajtin U.M.** Tratamiento Térmico en la Construcción de Maquinaria. Manual. s.l. : Машиностроение, 1980. pág. 783 [trad.]. **Лажтин Ю.М.** Термическая обработка в машиностроении. Справочник.
16. **Lazutkin N.A, Shirokov U.L, Bezrukov U.L, - Лазуткина Н.А., Широков Ю.Л., Безруков Д.В.** The influence of modes of heat-treatment on physical and mechanical properties of steel X12M is investigated. The optimum modes of hardening and tempering ensuring the best physical and mechanical properties of steel of the given mark are chosen. s.l. : МИ ВлГУ, г. Муром, РФ.
17. **Ljiljana Pedišić, Božidar Matijević, Jasminka Munić.** THE INFLUENCE OF QUENCHANTS COMPOSITION ON THE COOLING RATE. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. Ivana : s.n., 2009. Artículo.
18. **Luty, Wacław.** chłodziwa hartownicze. [ed.] Maslencov S.B. [trad.] Medios para Temple. s.l. : Metalurgia, 1990. pág. 195. ISBN 5-229-00526-2.
19. **Mac Kenzie D.S.** Selection of Quench Oils, Houghton International, Valley Forge PA. s.l. : Selección de los aceites para temple.
20. **Nekrasov V.N, Simonov T.V.** Tecnologías para las producciones Térmicas. Procedimientos para la Nanoestructuración de los materiales. s.l.: Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. pág. 248. ISBN 978-5-398-00564-6.[trad.]. **В.Н.Некрасова, М.Ю. Симонов,Т.В.** Технология термического производства. Способы наноструктурирования материалов.
21. **Novikov I.I** Teoría del Tratamiento Térmico de los Metales. 4. s.l. : M, 1986. pág. 479. [trad.]. **И.И, Новиков.** Теория термической обработки металлов.
22. **Okolovich G.A., Evtushenko A.T, Guriev A.M., Klimov D.A, Ojrimenko S.A., Shilova B.M.** Método de tratamiento termocíclico de los aceros para herramientas para dureza secundaria.Pat. 2192485.Federación Rusa, 10 de Nov. de 2002. МПК7 C21D9/22. [trad.]. **Околович Г.А., Евтушенко А.Т., Гурьев А.М., Климов Д.А., Охрименко С.А., Шилова В.М.** Способ термоциклической обработки инструментальной стали на вторичную твердость.Пат. 2192485.Российская Федерация, 10 de Nov. de 2002. МПК7 C21Д9/22.
23. **Okolovich G.A., Evtushenko A.T, Guriev A.M., Ojrimenko S.A., Semenchina A.S.** Método de tratamiento térmico para los aceros de alto cromo para dureza secundaria.

- Pat. 2200201.Federación Rusa, 10 de Marzo. de 2003. MPK7 C21D9/22, C23C8/24. [trad.]. **Околович Г.А., Евтушенко А.Т., Охрименко С.А., Семенчина А.С.** Способ термической обработки высокохромистой инструментальной стали на вторичную твердость. Пат. 2200201.Российская Федерация, 10 de Marzo de 2003. МПК7 C21D9/22, C23C8/24.
24. **Pozniak L.A., Skrinchenko U.M., Tishaev S.I.** Aceros para conformar. s.l. : M.: Metalurgia, 1980. pág. 169. [trad.]. **Позняк Л.А., Скрынченко Ю.М., Тишаев С.И.** Штамповые стали.
25. **Roberts, G.A. and Cary, R.A.** Tool Steels. American Society for Metals. 4th. s.l. : Metals Park Ohio, 1980. págs. 21, 24, 36, 42, 141, 185, 195, 228, 249, 529, 530, 535, 539.
26. **Sokolov K.N** Equipamiento para los Talleres de Tratamientos Térmicos.Kiev-Donetsk. —328 págs. [trad.]. 2-е изд. Киев; Донецк : Вшца школа, 1984. pág. 328. перераб. и доп. **Соколов К.Н.** Оборудование термических цехов.— 2-е изд., перераб. и доп. — Головное изд-во, —328 с.
27. **Sokolov K.N, Korotich I.K.** Tecnología del tratamiento térmico de los metales y Proyección de los Talleres de Tratamientos Térmicos. s.l. : M.: Metalúrgia, 1988. pág. 286.[trad.].**Соколов К.Н, Коротич И.К.** Технология термической обработки металлов и проектирование термических цехов.M.: Metalurgia, 1988.
28. **Solodijin A.G;** Organización y Proyección de los Talleres de Tratamientos térmicos Tecnología.1987.pág.97.Vol.1.[trad.]. Москва: Высшая Школа, **А.Г., Солодихин.** Технология, Организация и Проектирование Термических Цехов.
29. Study on Carbides in Commercial Special Steels by Electrolytic Isolation (V)- On Carbides in Several Cold Working Die Steels. **Sato, T.,Nishzawa,T.andMurai,K.** 1956, Tetsu-to-Hagane, Vol. 42, pág. 565.
30. **SUMITEC AISI D2.** UNS T30402. [En línea] www.sumiteccr.com.
31. **Thyssen Krupp Materials.** Manual de Aceros Especiales. 2013. pág. 11 y 35.
32. **Uddeholm.** Aplicaciones de acero para Herramientas.