



**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL CORDOBA
CARRERA DE INGENIERIA METALURGICA**

Tema:

“Predicción de dureza en cilindros de acero tratados térmicamente mediante
análisis computacional”

Tesis previa a la obtención del Título de:

INGENIERO METALURGICO

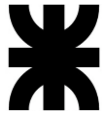
Autores:

Jimenez, Esteban Samuel
Vaccarello, Fernando Ezequiel

Tutor:

Ing. Cantero, Santiago Marcelo

Córdoba, Argentina 2021



Agradecimientos

En nombre de ambos integrantes de este proyecto, queremos agradecer principalmente a nuestras familias, que desde un principio han dado su apoyo a través de todos los años recorridos en nuestra carrera. Constancia, perseverancia, esfuerzo y dedicación son algunos de los valores que nos inculcan a diario, ayudando a que cumplamos nuestros sueños.

A nuestro tutor Ing. Santiago M. Cantero, que siempre ha brindado total predisposición, nos ha guiado y ayudado en las actividades realizadas.

Al Director del Departamento de Ingeniería Metalúrgica, el Ing. Diego H. Suárez, por confiar en nosotros para el desarrollo de este trabajo, que es el lugar donde nace esta propuesta.

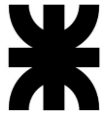
Al departamento de Ing. Metalúrgica de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba y sus docentes por ofrecer gentilmente respuestas a nuestras inquietudes y formarnos como futuros ingenieros.

A la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, que es nuestra segunda casa y a diario brinda la posibilidad de que muchos jóvenes, como nosotros, hagan realidad sus sueños de manera gratuita.

A todos aquellos que nos han apoyado, de una forma u otra para que hoy nos encontremos en la recta final de la carrera. A todos ellos que hicieron posible este sueño, simplemente, ¡Gracias!

Tabla de Contenido

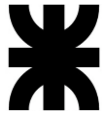
Agradecimientos	1
Tabla de Contenido	2
Resumen.....	7
Alcance de proyecto.....	9
Justificación	10
Objetivos.....	11
1. Introducción	12
2. Marco Teórico.....	12
2.1 Dureza	12
2.1.1 Definición.....	12
2.1.2 Tipos.....	12
2.1.2.1 Ensayo Brinell.....	12
2.1.2.2 Ensayo Vickers.....	13
2.1.2.3 Ensayo Rockwell.....	14
2.2 Tratamientos Térmicos [3].....	16
2.3 Proceso de temple.....	17
2.3.1 Temple directo.....	18



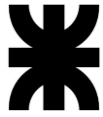
2.3.2	Temple escalonado.....	18
2.3.3	Temple selectivo	18
2.3.4	Temple por spray.....	19
2.3.5	Temple a la niebla	19
2.3.6	Temple interrumpido.....	19
2.4	Otros tipos de tratamientos térmicos son (Figura 5):	19
2.5	Templabilidad.....	23
2.6	Ensayo Jominy	26
2.6.1	Curvas Jominy.....	29
2.6.2	Bandas de templabilidad	30
2.7	Curvas de enfriamiento	31
2.8	Influencia de los diversos factores en el temple de los aceros	35
2.8.1	Influencia en la composición.....	35
2.8.2	Efecto del medio de enfriamiento	36
2.8.3	Influencia del tamaño de grano	38
2.8.4	Influencia del tamaño de las piezas.....	39
2.9	Diagramas TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación) o Curvas de las S.....	40
2.10	Variables de transferencia de calor.....	47



2.10.1	Numero de Biot	47
2.10.2	Número de Fourier	51
2.10.3	Funciones de Bessel	52
3.	Materiales.....	53
3.1	Equipamiento	53
3.2	Software	53
3.2.1	Matlab.....	53
3.2.2	Características Matlab	54
3.2.3	Característica de ventana de comandos.....	57
3.2.4	Principales comandos Matlab.....	57
3.2.5	M-FILES	59
3.2.6	Operaciones con vectores.....	60
3.2.7	Representaciones Gráficas	61
3.2.8	Funciones básica para las gráficas	62
4.	Metodología	66
4.1	Estudio y elección de las ecuaciones de transferencia de calor	68
4.1.1	Conducción transitoria adimensional, solución exacta	71
4.1.2	Soluciones aproximadas, analíticas y graficas [5]	72



4.2	Determinación de la ecuación de velocidad de enfriamiento.....	76
4.3	Confección de tabla de Distancia vs CR vs HRC	79
4.4	Determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección (h)	81
4.5	Confección del Flujograma de procesamiento de información.....	84
4.6	Creación de Script en fichero M según Flowsheet 2.....	86
4.7	Creación de interfaz	93
4.8	Cálculo de error o incertidumbre	99
5.	Aplicación del programa de predicción al Acero SAE 1045	103
5.1	Propiedades del Acero SAE 1045	103
5.1.1	Características	103
5.1.2	Maquinabilidad.....	104
5.1.3	Conformabilidad	104
5.1.4	Soldabilidad	104
5.1.5	Aplicaciones.....	105
5.2	Curvas de dureza U para un acero SAE 1045	105
5.3	Resultados de la predicción.....	108
	Comparativo de las curvas U de Grossman vs Sistema predictivo para templado en Agua.....	108



Comparativo de las curvas U de Grossman vs Sistema predictivo para templado en Aceite	113
6. Conclusiones	118
6.1 Conclusión general	118
6.2 Conclusiones específicas	119
6.3 Propuesta de mejora	120
7. Lista de referencia y bibliografía	121



Resumen

Una práctica esencial en la labor de un Ingeniero Metalúrgico es la elección de un material metálico que sea capaz de responder a las sollicitaciones mecánicas a la que va a ser sometido. Para esta elección el metalurgista debe recopilar información de distintos ensayos, obtener curvas teóricas de distintos comportamientos del material y tablas de datos para así conseguir con el menor costo posible, un material con los tratamientos adecuados para las sollicitaciones requeridas.

Con el objetivo de reducir esta tarea de recolección, se propuso obtener una herramienta computacional, sencilla, que proporcione información específica, de forma rápida, en la elección de un material y su correspondiente tratamiento térmico para conseguir en dicho material las durezas necesarias para las sollicitaciones a la que va a ser expuesta.

Por lo tanto, el presente trabajo desarrolla una metodología para la obtención de una herramienta computacional capaz de predecir la dureza de distintos redondos de aceros enfriados en un determinado medio de temple.

El software utilizado para desarrollar dicha herramienta computacional es Matlab, el cual posee un lenguaje de alto nivel, diseñado para facilitar cálculos, visualización y programación en un entorno adecuado para utilizar. Proporciona una forma simple de tratar problemas y resolverlos debido a su notación numérica, que radica en el manejo de matrices eficientes, incluyendo su propio compilador, lo cual permite extender su uso permitiendo al usuario crear sus propios comandos, clases y funciones.



Para evaluar la efectividad de la herramienta se analizan los datos en base al acero SAE 1045, el cual es un acero de aplicación universal que proporciona un nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo con respecto a los aceros de baja aleación.

Para este acero se tuvieron en cuenta distintos diámetros y medios de enfriamiento. Los diámetros elegidos son 1, 2, 3, 4 y 5 pulgadas; y los medios de enfriamientos son, agua y aceite. Estos diámetros y medios de enfriamientos fueron los elegidos debido a que se encontraron curvas con datos empíricos llamadas curvas U de Grossman las cuales fueron las más convenientes para su comparación.

Pudimos apreciar que para un acero SAE 1045 templado en agua a 32 °C agitada a 0,25 m/s y templado en aceite convencional a 43 °C agitado a 0,51 m/s, se obtuvieron resultados dentro de un Cv menor a 25% para diámetros entre 1-3 pulgadas, los cuales son valores aceptables que permiten el uso del software con poco margen de error. Mientras que para mayores diámetros el Cv es mayor a 25% por lo que el sistema no logra dar buenos resultados.



Alcance de proyecto

En el presente trabajo se desarrolla una herramienta computacional capaz de predecir las condiciones de dureza que pueden alcanzar distintos redondos de acero al ser tratados térmicamente mediante el uso del programa “Matlab R2018a”.

Para ello, se aplicaran las ecuaciones teóricas de transferencia de calor, velocidad de enfriamiento y la relación entre dicha velocidad y la dureza obtenida. Además se determinara el coeficiente de transferencias de calor por convección en distintos medios de temple.

Si bien, la herramienta computacional utilizada admite el procesamiento de diversas composiciones de aceros, el trabajo se enfocará en la utilización del acero SAE 1045 en distintos medios de enfriamiento.

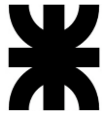


Justificación

En los procesos industriales, es necesaria la utilización de diversas tablas y curvas para la correcta elección de las características de dureza para la elaboración de una pieza. Esto conlleva a grandes pérdidas de tiempo en la búsqueda de dichas características con posibilidad de cometer errores en su selección.

Con ayuda del software Matlab, que es una herramienta computacional adecuada para uso ingenieril, y los conocimientos específicos de transferencia de calor y dureza, se desarrollará una aplicación de uso sencillo para que el ingeniero o usuario correspondiente, pueda predecir el comportamiento de dureza de un redondo de acero. Esto se realizará mediante la carga de ciertos datos característicos del material y el tratamiento térmico a utilizar, arrojando el programa, los valores de curvas de dureza “U” para distintos diámetros.

Con el desarrollo de este sistema de predicción de dureza se buscará poder realizar una consulta rápida para detectar si un acero de una composición química específica, enfriado en un medio determinado; logrará reunir todos los requisitos necesarios luego de ser tratado térmicamente.



Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una herramienta computacional para determinar la dureza de cilindros de aceros de distintas composiciones químicas y diámetros, enfriados en distintos medios de temple a través de la programación computacional.

Objetivos Específicos

- ✓ Generación de un script en el software Matlab R2018a implementando las ecuaciones teóricas de transferencia de calor y velocidad de enfriamiento.
- ✓ Estudio de la relación entre la velocidad de enfriamiento y dureza de un acero.
- ✓ Estudio de las transferencias de calor por convección en distintos medios de temple.
- ✓ Creación de una interfase para la aplicación del script desarrollado.
- ✓ Comprobación de resultados de la programación propuesta en aceros SAE 1045.
- ✓ Cálculo de error o incertidumbre.



1. Introducción

2. Marco Teórico

2.1 Dureza

2.1.1 Definición

Debido a que este trabajo se trata sobre la predicción de dureza, es importante conocer la definición de esta propiedad. La dureza es un ensayo típico que se realiza a los materiales metálicos que consiste en un test simple de carácter poco destructivo.

La mayoría de los ensayos se hacen por penetración. La dureza caracteriza la resistencia a la deformación y los valores obtenidos permiten efectuar algunas clasificaciones. Sin embargo, el proceso operativo debe ser muy preciso para asegurar la reproducibilidad y la confiabilidad de los resultados.

2.1.2 Tipos

2.1.2.1 Ensayo Brinell

Fue el primer ensayo de dureza de penetración ampliamente aceptado y tipificado en 1900 por J. A. Brinell. Este ensayo consiste en comprimir sobre una superficie metálica una bola de acero de 10 mm de diámetro con una carga de 3000 kgf. Según que el material a ensayar sea blando o duro se utiliza una carga de 500 kgf para los primeros y se emplea un penetrador de carburo de tungsteno para los materiales duros. La carga se aplica durante un tiempo normalizado de 15 segundos y después de eliminar la carga se mide el diámetro de la huella con

un microscopio de pocos aumentos. Debe obtenerse una medida de dos diámetros perpendiculares. La dureza Brinell (HB) es el resultado de dividir la carga por la superficie de la huella. Podemos visualizar el proceso en la Figura 1.

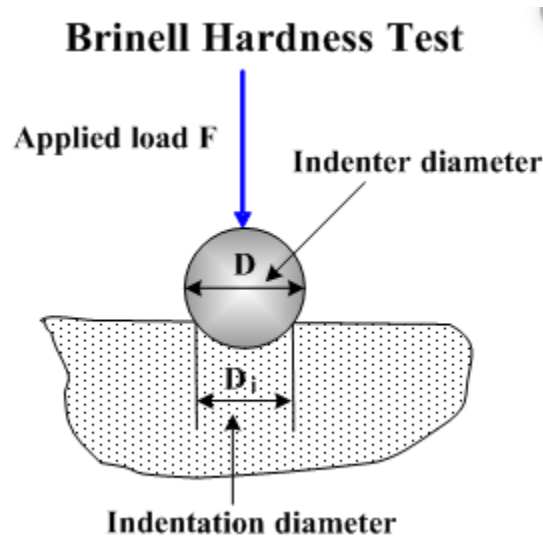


Figura 1. Ilustración dureza Brinell.

2.1.2.2 Ensayo Vickers

En el ensayo Vickers (HV) se emplea como penetrador una pirámide de diamante de base cuadrada. Las caras opuestas de la pirámide forman un ángulo de 136° , que fue elegido porque se corresponde aproximadamente con la relación óptima de diámetro de huella a diámetro de bola en el ensayo Brinell. La dureza Vickers al igual que la Brinell se define como la relación entre la carga aplicada dividida la superficie de la huella, donde dicha área se obtiene de la longitud de las diagonales de la impronta.

La característica sobresaliente de este tipo de ensayo es que con una misma carga y penetrador, se pueden comparar desde los metales más blandos 5 HV, hasta los más duros 1500

HV. En otros ensayos de dureza hay que cambiar en cierto intervalo de dureza o la carga o el penetrador.

La desventaja de este ensayo es que requiere preparaciones exigente de la superficie para que sea reproducible y es fácil cometer un error personal al medir las diagonales, lo que lo hace un ensayo poco útil. Se esquematiza en la Figura 2.

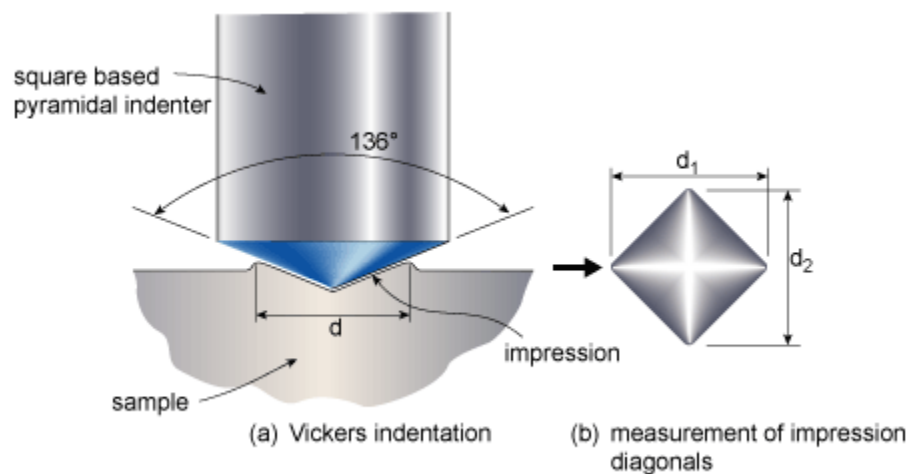


Figura 2. Ilustración ensayo Vickers.

2.1.2.3 Ensayo Rockwell

El ensayo por excelencia y el más aceptable en la actualidad como dureza es el Rockwell. Este permite obtener resultados más rápidos, sin errores humanos y con huellas casi imperceptibles que hacen que las piezas se puedan utilizar en servicio. Por este motivo es que la escala adoptada en el sistema de predicción de este trabajo se ha optado por esta dureza.

El ensayo consiste de aplicar una precarga inicial de 10 kgf que impide la recuperación elástica del material. Luego se le aplica una segunda carga de 150 kgf manteniendo la precarga y después se elimina esta carga y se mide la profundidad de la huella automáticamente mediante la

máquina que demuestra la dureza en el display. La escala tiene 100 divisiones y cada división corresponde a una profundidad de penetración de 0,002 mm. Cuando menor sea la profundidad mayor será la dureza del material a ensayar.

Este tipo de ensayo tiene diferentes combinaciones de carga y penetrador según sea el material a medir. Siempre que se utilice esta unidad de medida se tiene que aclarar el tipo de penetrador y carga utilizada, sin estos datos el ensayo carece de significado.

Las escalas son:

HRA: Se utiliza un penetrador de diamante y una carga máxima de 60 kgf. Se emplea la mayor carga de durezas desde el latón recocido hasta los carburos cementados.

HRB: este utiliza un penetrador tipo Brale de 1/16 de pulgada y carga máxima de 100 kgf. Se emplea para materiales más blandos.

HRC: en este tipo de escala se ensayan los aceros templados. Este utiliza el penetrador de diamante y la carga máxima de 150 kgf. La escala va de 20 a 70 HRC. (Escala utilizada en este proyecto). El proceso se ilustra en la siguiente Figura 3.

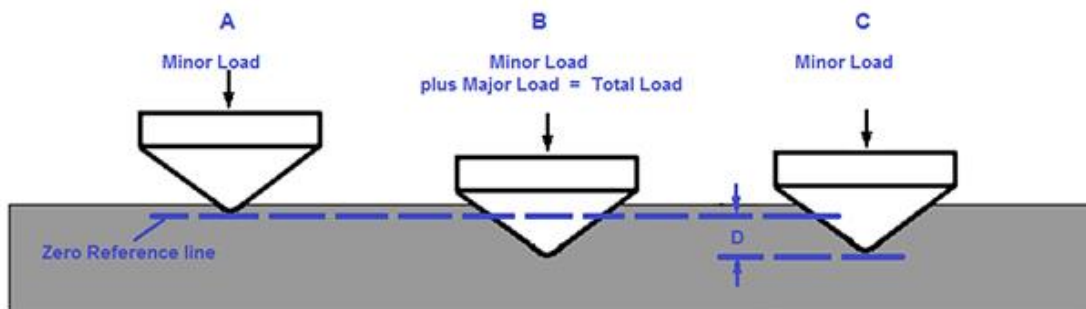


Figura 3. Ilustración ensayo Rockwell.



2.2 Tratamientos Térmicos [3]

Los tratamientos térmicos son muy importantes en este proyecto debido a que en las aleaciones de acero según el tratamiento utilizado será la dureza final de dicha pieza.

Los tratamientos térmicos tienen por objeto mejorar las propiedades y características de los aceros, y consisten en calentar y mantener las piezas de acero a temperaturas adecuadas, durante un cierto tiempo y enfriarlas luego en condiciones convenientes.

De esta forma, se modifica la estructura microscópica de los aceros, se verifican transformaciones físicas y a veces hay también cambios en la composición del metal.

Siempre debemos tener en cuenta dos de los factores más importantes que son el tiempo y la temperatura, los cuales debemos fijarlos de antemano, de acuerdo con la composición del acero, la forma y el tamaño de las piezas y las características que se desean obtener.

El tratamiento más importante a detallar para este trabajo práctico es el temple y se describe a continuación.

Temple: refiere a un proceso de piezas metálicas enfriadas rápidamente desde una temperatura de austenización. Este tratamiento tiene por objetivo endurecer y aumentar la resistencia del acero. Por lo que se debe calentar el metal a una temperatura superior a la crítica para lograr la austenización del mismo y luego enfriar rápidamente, dicha temperatura está dentro de un rango de 815 a 870 °C para el acero. Figura 4. Este tratamiento se utiliza para producir cantidades controladas de martensita en la microestructura. El éxito del endurecimiento significa lograr la microestructura requerida, dureza, resistencia o tenacidad mientras se minimiza el estrés residual, distorsión y la posibilidad de fisuramiento.

Para este tratamiento la selección del medio de enfriamiento depende de la templabilidad de la aleación en particular, el espesor y la forma involucrada, la velocidad de enfriamiento necesaria para lograr la microestructura deseada. Los medios de enfriamiento más comunes son líquidos o gases:

- Aceites que pueden contener variedades de aditivos
- Agua
- Soluciones de polímeros acuosos
- Agua que puede contener sal u otros aditivos

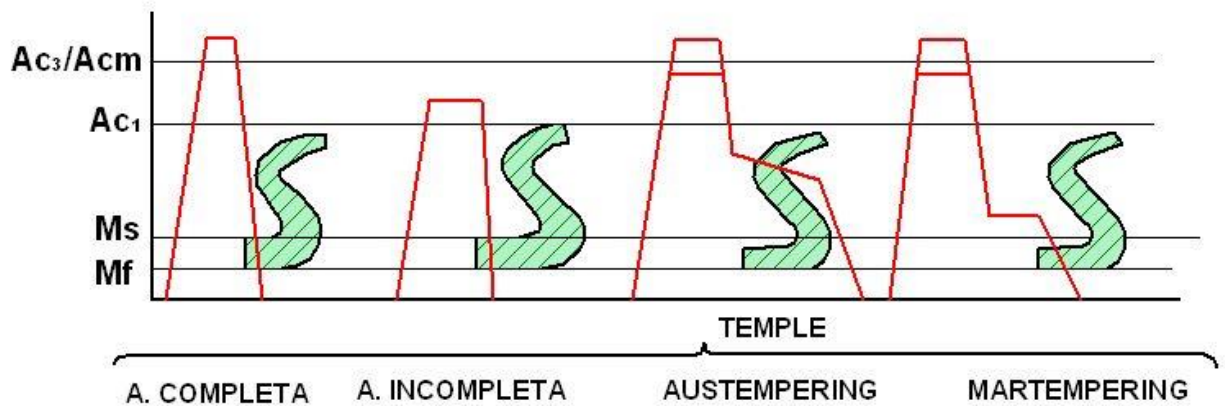


Figura 4. Distintos tipos de temple.

2.3 Proceso de temple

La velocidad de extracción de calor por un medio de enfriamiento y la manera que este es usado afecta sustancialmente al rendimiento del templante. Las variaciones en las prácticas de enfriamiento han sido designadas con nombres específicos según la técnica de temple empleada:

- Temple directo
- Temple escalonada



- Temple selectivo
- Temple al spray
- Temple a la niebla
- Temple interrumpido

2.3.1 Temple directo

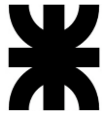
Refiere al temple enfriado directamente desde la temperatura de austenización y es por lejos la práctica más ampliamente utilizada.

2.3.2 Temple escalonado

Es usado cuando la velocidad de enfriamiento de la parte que está siendo templada necesita cambiar abruptamente durante el ciclo de enfriamiento. Dicho cambio puede consistir en aumentar o disminuir la velocidad de enfriamiento para lograr los resultados deseados. La práctica más usual es disminuir la temperatura de la pieza utilizando un medio con buenas características de remoción térmica y luego transferir las partes a un segundo medio para enfriarlo más lentamente a través del rango de transformación martensítica.

2.3.3 Temple selectivo

Este tratamiento es utilizado cuando ciertas áreas de la pieza no deben ser afectadas relativamente por el medio de enfriamiento. Esto puede ser logrado por el aislamiento del área a ser más lentamente enfriada, de modo que el templante entre en contacto solo con aquellas áreas que se necesitan enfriar rápidamente.



2.3.4 Temple por spray

Implica dirigir corrientes del líquido de enfriamiento a alta presión sobre el área de la pieza de trabajo cuando se desean velocidades de enfriamiento más altas. La velocidad de enfriamiento es más rápida porque las gotas del templante formado con alta intensidad de spray impactan sobre la superficie de la pieza removiendo el calor con mayor efectividad.

2.3.5 Temple a la niebla

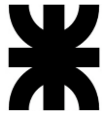
Utiliza una fina niebla o neblina de gotas de líquido en un gas portador como agente refrigerante. Aunque similar al enfriamiento por spray, el enfriamiento por niebla produce velocidades de enfriamiento más bajas debido al contenido de líquido relativamente bajo.

2.3.6 Temple interrumpido

Refiere al rápido enfriamiento del metal desde la temperatura de austenización aun punto sobre la Ms (comienzo de la estructura martensítica) donde éste es mantenido por un específico periodo de tiempo seguido por un enfriamiento en aire. Ejemplo de este tratamiento son: austempering, martempering y temple isotérmico.

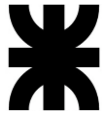
2.4 Otros tipos de tratamientos térmicos son (Figura 5):

- **Recocido:** cuyo objetivo principal es ablandar el acero, regenerar su estructura y también eliminar tensiones internas. Se realiza calentando el metal a temperaturas adecuada según norma y enfriamientos lentos.
- **Normalizado:** consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente superior a la crítica, seguido de un enfriamiento generalmente en aire, de esta



forma se consigue un acero con una estructura y propiedades que se consideran como normales, se suele utilizar para piezas que han sufrido trabajos en caliente, deformaciones en frío, como también para destruir los efectos de un tratamiento térmico defectuoso.

- **Revenido:** es un tratamiento que se les da a las piezas de acero que han sido previamente templadas. Se calienta el acero a una temperatura inferior a la crítica A_{c1} , con el cual se logra reducir las tensiones generadas en el temple y además se disminuye la dureza y resistencia del acero templado con lo cual se mejora la tenacidad de este quedando el acero con la dureza o resistencia deseada.
- **Tratamientos Isotérmicos de los aceros:** son tratamientos en el cual el enfriamiento no se hace de una forma regular y progresiva, sino que se modifica o interrumpe a diversas temperaturas, en los que permanece el material a temperatura constante durante un cierto tiempo, que depende de la composición del acero, de la masa de la pieza y de los resultados que se quieren obtener. Podemos nombrar:
- **Austempering:** o transformación de la austenita en la zona de 250° a 600° , este tratamiento consiste en calentar el acero a una temperatura superior a la crítica y luego enfriarlo rápidamente en plomo o baño de sales (más utilizado), a temperaturas comprendidas entre 250° y 600° , permaneciendo el acero en el baño a esa temperatura durante el tiempo suficiente para que se verifique la

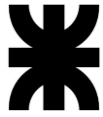


transformación completa de la austenita en otros constituyentes a temperatura constante.

- **Martempering:** enfriamiento interrumpido a partir de la temperatura de austenización de ciertos aceros. El objetivo es retrasar el enfriamiento justo por encima de la transformación martensítica por un período de tiempo para igualar la temperatura en toda la pieza. Esto minimizará la distorsión, el agrietamiento y la tensión residual.

Generándose luego del tratamiento una estructura martensítica.

- **Recocido isotérmico:** es un tratamiento de ablandamiento que consiste en calentar el acero a una temperatura por encima de la zona crítica aproximadamente entre 740° a 820° , y luego se baja a una temperatura de 600° a 700° , que se mantiene constante durante algunas horas para conseguir la completa transformación isotérmica de la austenita y finalmente se enfría al aire.
- **Temple superficial:** donde se endurece únicamente la capa superficial de las piezas. El calentamiento se puede llevar a cabo ya sea por llama directa o corrientes inducidas de alta frecuencia, por lo que se puede regular la penetración de la dureza.
- **Tratamientos en los que hay cambio de composición:** en esta clase de tratamientos además de considerar al tiempo y la temperatura como puntos fundamentales también debemos tener en cuenta la atmosfera que envuelve el metal durante el calentamiento y enfriamiento. Este tipo de tratamiento se



suele realizar para piezas que necesitan una gran dureza superficial además de gran resistencia al desgaste y buena tenacidad en el núcleo. Por lo que podemos nombrar a:

- **Cementación:** se modifica la composición de las piezas, aumentando el contenido de carbono en la zona periférica, y luego se debe realizar un temple y revenido para obtener la dureza final.
- **Cianuración:** es un tratamiento parecido a la cementación donde el acero absorbe carbono y nitrógeno en la zona superficial, quedando luego esa zona periférica muy dura después del temple final.
- **Nitruración:** se realiza a baja temperatura aproximadamente 500 °C, donde el acero en contacto con una corriente de amoníaco absorbe nitrógeno, formándose en la capa periférica nitruros de gran dureza, quedando las piezas muy duras sin necesidad de ningún otro tratamiento posterior.

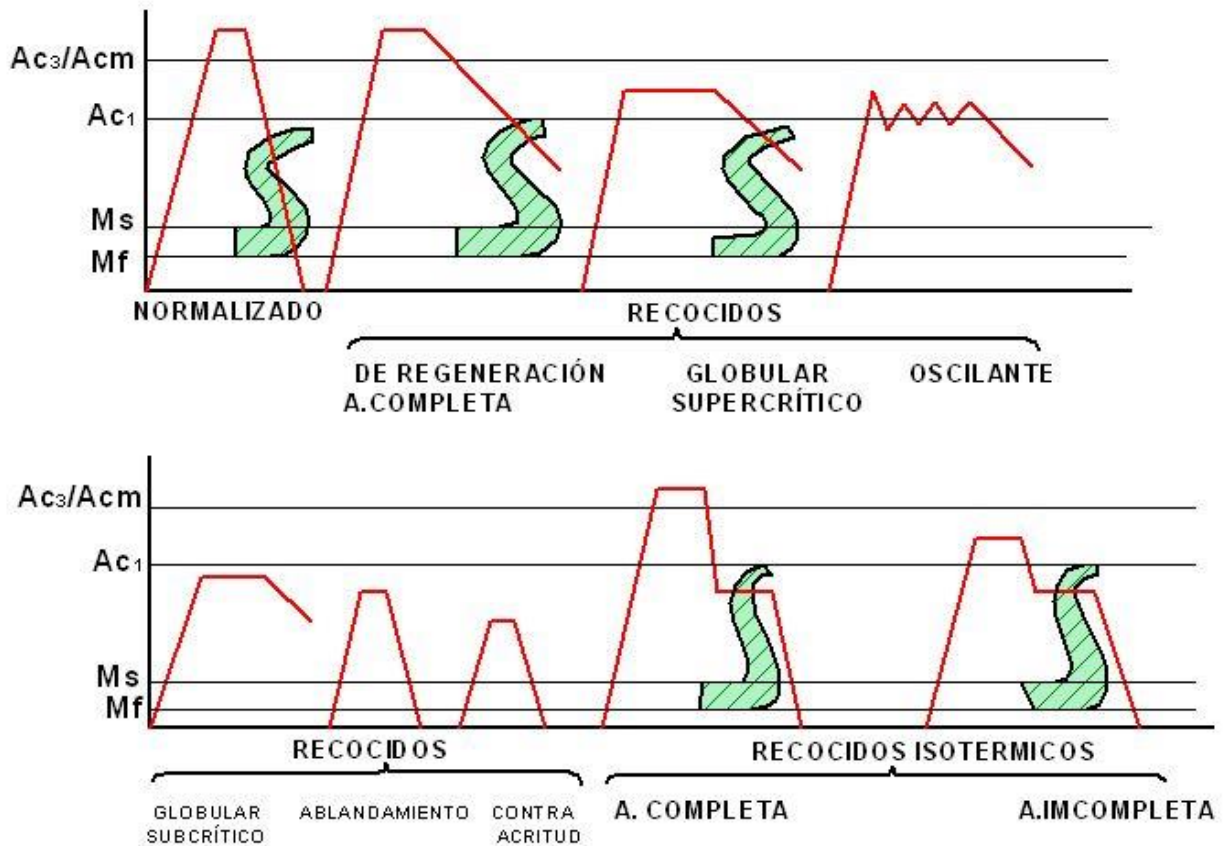


Figura 5. Distintos tipos de tratamientos térmicos.

2.5 Templabilidad

Podemos definir como templabilidad a la profundidad y distribución de la dureza en el interior de las piezas. Y hay que diferenciarlo del término dureza que es la resistencia que opone un material a la penetración.

Para aclarar estos conceptos podemos nombrar algunos ejemplos: si ensayamos dos aceros, uno ordinario 0.45 % de carbono y otro aleado con cromo-vanadio de 0,40 % de C, 1 % de Cr, y 0,18 % de V y templamos en agua una varilla de 10 mm de diámetro de ambos aceros obtendremos en una sección transversal del exterior al interior las siguientes durezas: acero al

carbono: 57-57-56 y 55 Rockwell C; acero cromo-vanadio 52-52-52 y 52 Rockwell C como se demuestra en la Figura 6.

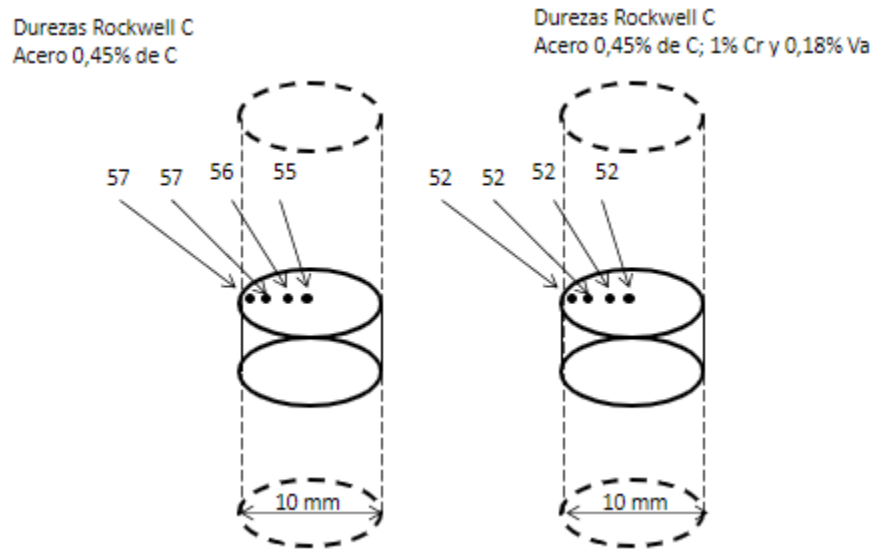


Figura 6. Durezas que se obtienen en el interior de redondos de acero al carbono y acero cromo-vanadio de 10 mm de diámetro templados en agua.

Si templamos redondos de 100 mm de diámetro de los mismos aceros, obtenemos resultados muy diferentes; donde la dureza disminuye muy rápidamente del exterior al interior en el acero al carbono, y en cambio, se conserva más uniforme en el acero cromo-vanadio. Acero al carbono, 48-26-20 y 15 Rockwell C, acero cromo-vanadio, 50-44-33 y 36 Rockwell C. Como se puede ver en la Figura 7.

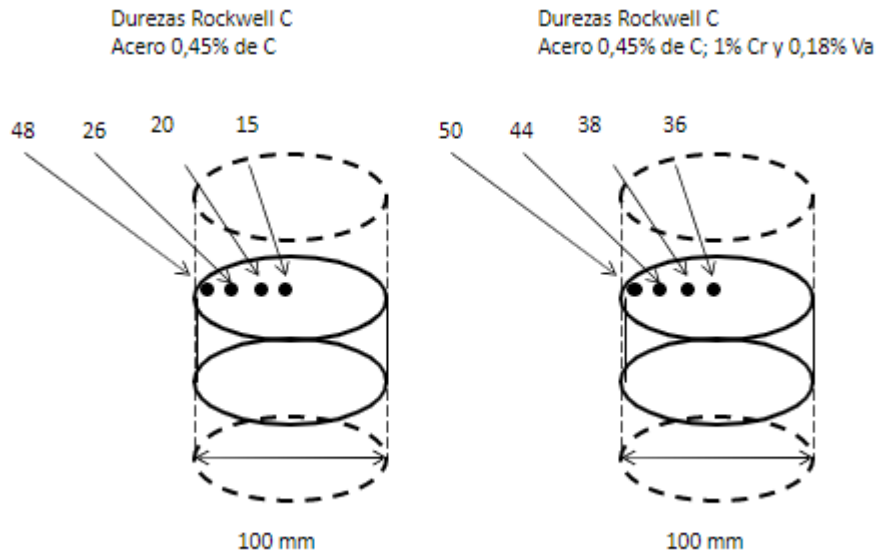


Figura 7. Durezas que se obtienen en el interior de aceros al carbono y cromo-vanadio de 100 mm de diámetro templados en agua.

Por lo que podemos observar que la dureza y la templabilidad son cosas distintas, en el acero ordinario de 0,45 % de C obtuvimos mayor dureza por ser mayor el porcentaje de C, pero en cambio la templabilidad en el redondo de 100 mm de diámetro es mucho menor en el acero al carbono que en el acero aleado. Se observa que la templabilidad influye notablemente en los resultados cuando se ensayan piezas de bastante espesor, y en cambio influye muy poco cuando se templen perfiles delgados, es decir con aceros de diferente aleación y del mismo contenido en carbono se obtienen características casi idénticas cuando se trata de pequeños diámetros y muy diferentes cuando se trata de piezas de gran espesor.

La penetración del temple o templabilidad viene determinada por los elementos aleantes y por el tamaño de grano del acero.



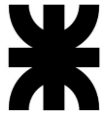
Se ha comprobado que, en los aceros aleados, especialmente los de bajo contenido en carbono, la dureza aumenta muy poco con el contenido de elementos aleantes.

Para determinar el comportamiento de los aceros en el temple se utilizan varios métodos para ponerlo de manifiesto. Los más importantes son: 1° Examen de la fractura de barras templadas, 2° Estudio de las curvas de dureza, 3° Ataque químico en las secciones transversales templadas, 4° La determinación de las zonas de 50 % de martensita y 5° Ensayo Jominy.

2.6 Ensayo Jominy

El ensayo Jominy ha adquirido a partir de 1940, una divulgación extraordinaria debido principalmente a que los datos que se obtienen en el mismo han facilitado notablemente el conocimiento de ciertas propiedades de los aceros y además ha servido también, para aclarar algunas dudas que existían sobre la utilidad de determinados elementos de aleación y sobre la eficacia de ciertas combinaciones de elementos aleados.

Hasta hace pocos años la selección de los aceros especiales, se hacía casi siempre de acuerdo con la composición química, a pesar de que se sabía, que con frecuencia discrepaban bastante, los resultados que se obtenían con aceros del mismo análisis, que además cumplían las especificaciones de composición normalmente establecidas. Sin embargo, a pesar de estas irregularidades, el sistema se seguía utilizando, porque en general es más fácil hacer el análisis químico de un acero, que determinar sus propiedades mecánicas en diferentes espesores, que era lo que verdaderamente interesaba al consumidor, y estas determinaciones se hacían muy raras por ser muy lentas y costosas, ya que exigían templar diferentes perfiles en agua, aceite o al



aire, revenirlos a diferentes temperaturas, mecanizar luego las probetas y hacer los ensayos mecánicos correspondientes.

Más recientemente, a medida que se fueron conociendo mejor las propiedades de los aceros, ya no se consideraban tan decisivas las especificaciones de la composición química, y en cambio, se fue dando cada vez más importancia a otros factores, como el tamaño de grano, la templabilidad, etc.

Al necesitar los consumidores, aceros con características mecánicas cada vez más precisas, hubo que estrechar mucho los límites de composición.

Ante estas dificultades, interesaba mucho disponer de algún ensayo sencillo que permitiera conocer rápidamente ciertas propiedades de los aceros, que sirviera para fijar condiciones de recepción y para ensayar de una forma sencilla los aceros que recibiría el consumidor.

Por lo que el ensayo Jominy pudo resolver alguna de estas dificultades.

Los resultados que se obtienen en este ensayo dependen fundamentalmente de la velocidad crítica de temple, cuyo valor viene reflejado en las curvas que se obtienen en cada caso. También señalan las durezas máximas y mínimas que aproximadamente se pueden obtener en cada acero, la influencia de los diferentes elementos de aleación sobre la velocidad crítica de temple, y se puede medir la templabilidad y prever los resultados que se obtendrán templando en agua, aceite, etc., barras de diferentes espesores.

Además, el valor de este ensayo aumenta, al haberse comprobado que muchas de las propiedades mecánicas ordinarias del acero tales como la resistencia a la tracción, límite elástico, estricción y alargamiento son función de la dureza del acero y ésta a su vez, es función de la



microestructura. Con los datos que se obtiene se llegan a conseguir velocidades de enfriamiento que son necesarias para conseguir una dureza, una microestructura y un conjunto de características determinadas.

El ensayo se utiliza normalmente en aceros de menos de 0,6 % de carbono, consiste en templar una probeta cilíndrica de 25 mm de diámetro y 100 mm de longitud, por medio de un chorro de agua que enfría solamente la parte inferior. La temperatura del agua será de 20 a 25°.

Las probetas deben obtenerse de perfiles de más de 28 mm de espesor, para que después del mecanizado quede eliminada cualquier capa superficial descarburada que pudiera existir. Antes de comenzar el mecanizado, se normaliza el material a una temperatura 80° más elevada que el punto A_{c3} , para regularizar las condiciones del ensayo. El calentamiento para el temple se hace a una temperatura de 60° más elevada que el punto A_{c3} , para regularizar las condiciones del ensayo, debiendo colocarse la probeta en el horno, dentro de un molde de grafito o de una caja de viruta de fundición, para evitar descarburaciones u oxidaciones superficiales. El acero debe permanecer a la temperatura de austenización treinta minutos aproximadamente. La colocación de la probeta en el aparato de enfriamiento debe ser muy rápida para evitar que descienda demasiado la temperatura del acero antes de iniciarse el temple por la base, debiendo efectuarse esta operación antes de cinco segundos. El enfriamiento con el chorro de agua se hará durante diez minutos, y luego ya se puede enfriar la probeta al aire, sin peligro que se modifiquen los resultados.

Empleando este método de ensayo, se consiguen en la probeta velocidades de enfriamiento variables desde 333 °C/seg a 2,2 °C/seg.



Terminando el enfriamiento se planean dos generatrices de la probeta situadas a 180° , rebajando 0,5 mm de profundidad aproximadamente, debiendo evitarse en esta operación que la probeta se caliente por encima de los 100° . Luego se mide la dureza en la línea central de la superficie plana, en puntos situados a intervalos de 1/16 de pulgada y se dibuja con los valores obtenidos la curva Jominy que corresponde al acero ensayado.

Durante el ensayo se mantiene el chorro de agua de enfriamiento a una presión constante para que la altura del chorro sea de 2,5 pulgadas. La cara inferior de la probeta se sitúa a media pulgada de distancia del orificio de salida. El orificio es de media pulgada de diámetro.

Este ensayo es el más familiar y comúnmente utilizado para evaluar la templabilidad de los aceros. Este produce un rango de curvas de enfriamiento con velocidades de enfriamiento progresivamente más bajas al aumentar la distancia de la superficie en contacto con el agua. [1].

2.6.1 Curvas Jominy

Estas curvas, (Figura 8), facilitan al usuario el conocimiento de las propiedades de los aceros después del temple. Por lo que podemos decir observando las curvas que:

La máxima dureza que se obtiene después de un temple depende del contenido en carbono del acero.

Si existen en el acero ensayado varios elementos de aleación se pueden obtener elevadas durezas aun a bajas velocidades de enfriamiento.

Pequeñas cantidades de elementos de aleación ejercen una mayor influencia en la templabilidad que un gran porcentaje de un solo elemento.

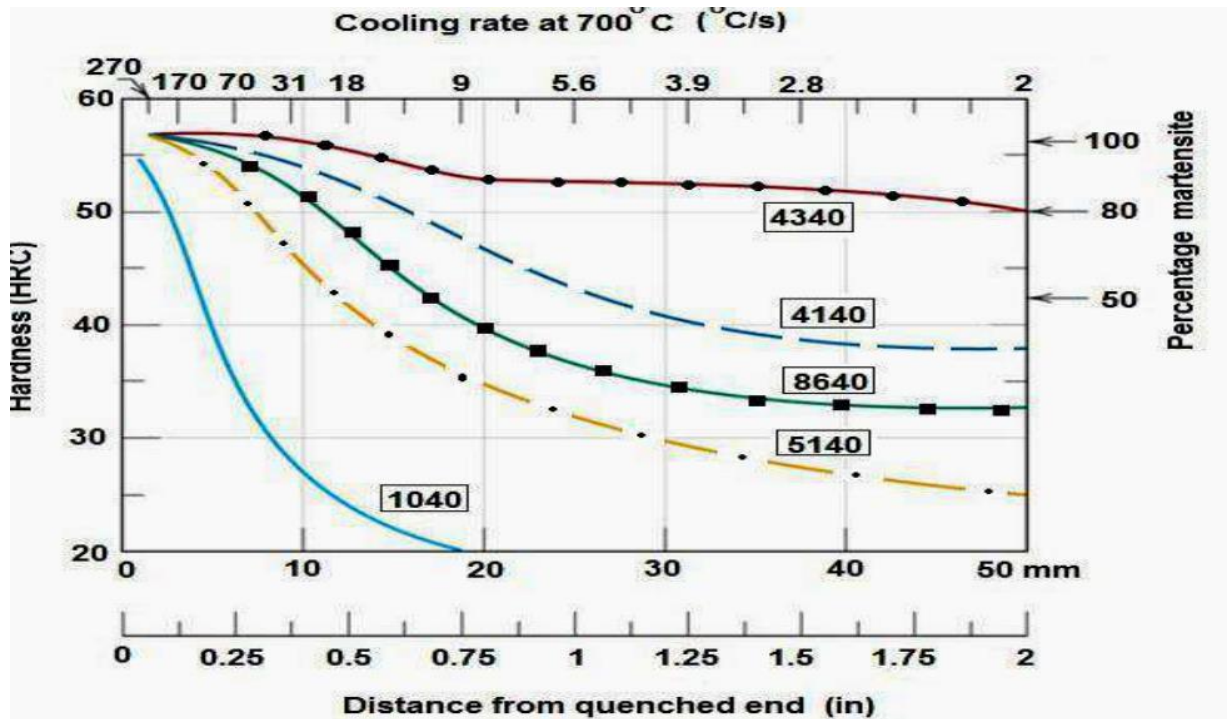


Figura 8. Curvas de templabilidad para cinco diferentes aceros aleados que contienen 0,4 % de carbono. Las composiciones aproximadas en peso (% en peso) son: 4340-1.85 Ni, 0.80 Cr, 0.25 Mo. 4140-1.0 Cr, 0.20 Mo. 8640-0.55 Ni, 0.50 Cr, 0.20 Mo. 5140-0.85 Cr. 1040 es un acero al carbono.

2.6.2 Bandas de templabilidad

Debido al gran desarrollo adquirido por el ensayo Jominy, la “Society of Automotive Engineers” y el “American Iron and Steel Institute”, han establecido para la mayoría de los aceros aleados, curvas máximas y mínimas de templabilidad que limitan unas zonas dentro de las cuales deben de estar situadas las curvas Jominy de cada acero. A estos aceros que cumplen una cierta banda de templabilidad se les ha ampliado la designación A.I.S.I. o S.A.E. normal, añadiéndoles una letra H que señala que el acero se ha fabricado para cumplir una cierta especificación de templabilidad (H. Hardenability.)

Estas curvas se utilizan como especificaciones de recepción de numerosos tipos de aceros y en muchos casos se están sustituyendo determinadas especificaciones de composición química, por las bandas de templabilidad, como podemos ver en la Figura 9.

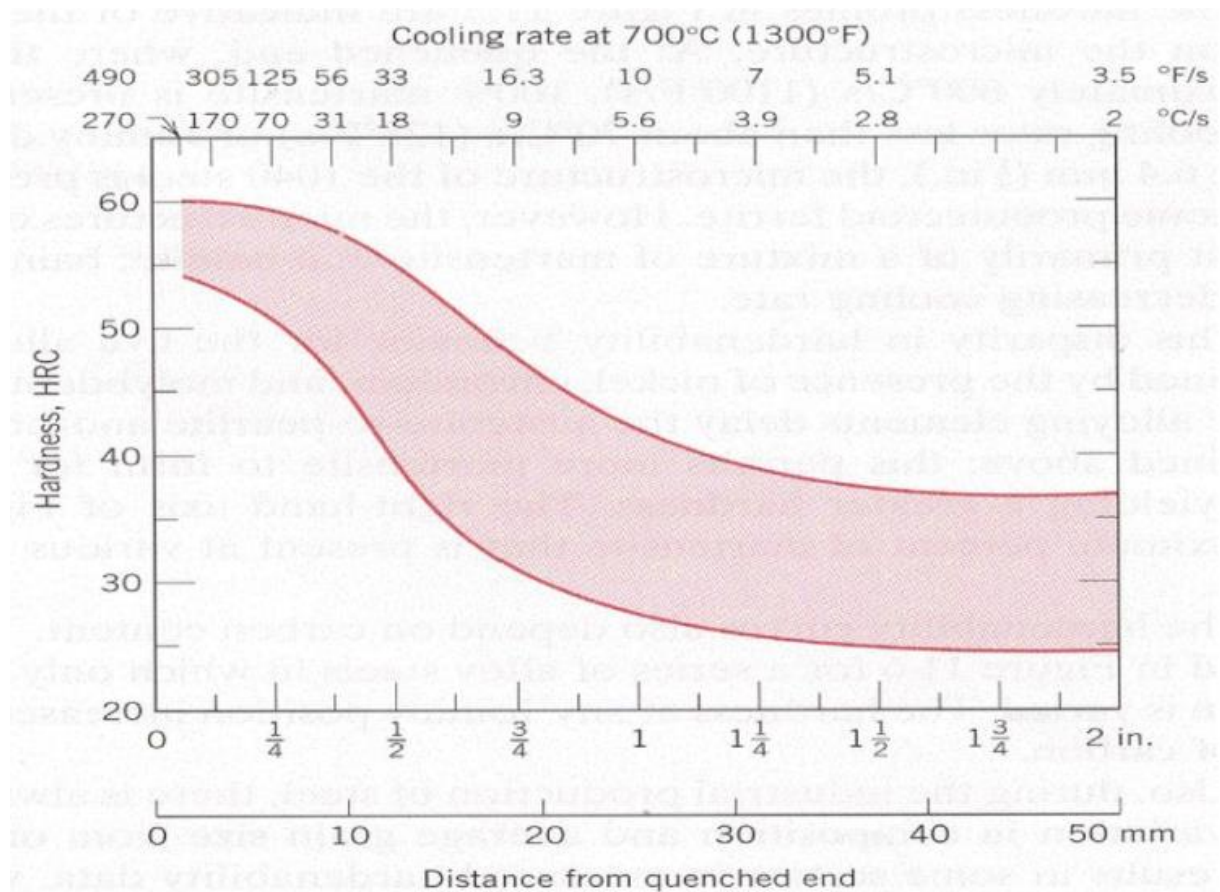


Figura 9. Banda de templabilidad de un acero 8640 con indicaciones de los límites máximos y mínimos.

2.7 Curvas de enfriamiento

Estas curvas proveen información sobre las velocidades de enfriamiento logradas en las piezas metálicas. Muchas transformaciones metalúrgicas son presentadas en términos de velocidades de enfriamiento necesarias para lograr una microestructura específica y esas velocidades pueden ser relacionadas a velocidades de enfriamiento obtenidas desde análisis de

curvas de enfriamiento del medio templante. En un determinado acero, bajas velocidades de enfriamiento producen microestructuras ferríticas mientras que una velocidad de enfriamiento progresivamente alta produce perlita, bainita, y finalmente martensita. La curva ilustrada de los tres estados es demostrada en la Figura 10.

Son considerados tres estados de remoción térmica referidos como A, B y C, asociados con el enfriamiento en un líquido.

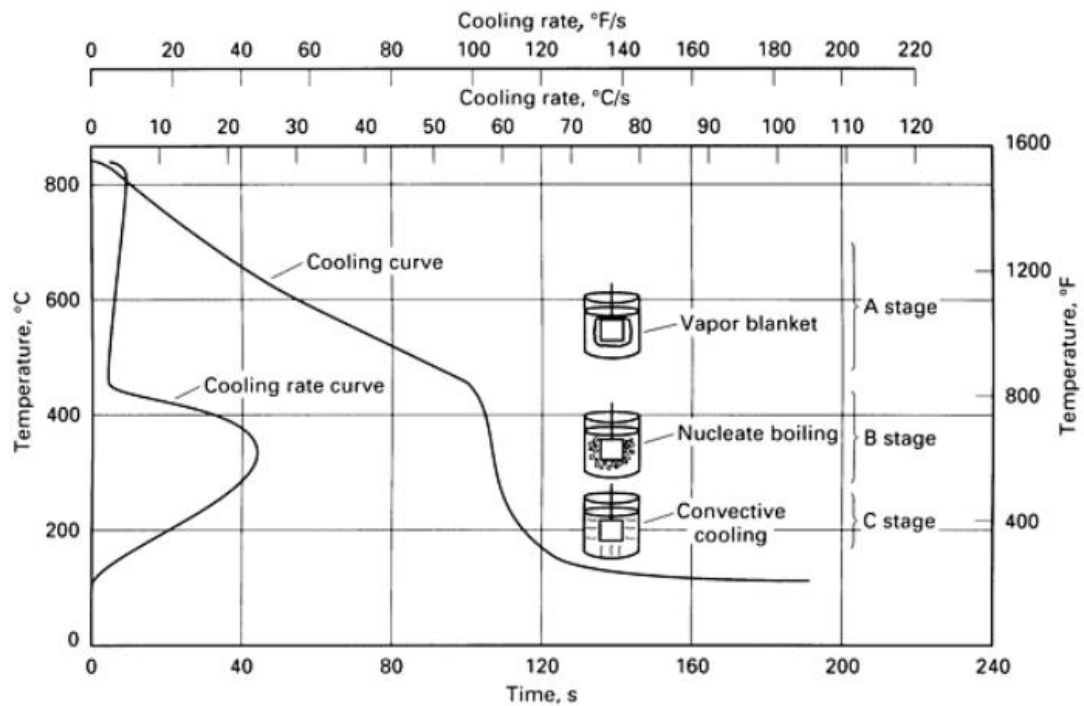


Figura 10. Diferentes estados de remoción térmica.

Etapa A: cuando el acero es introducido en el líquido como su temperatura es muy alta se forma una capa de vapor que rodea el metal y el enfriamiento se hace por conducción y radiación a través de la capa gaseosa. El enfriamiento en el comienzo de esta fase es



relativamente lento, influyendo en ello principalmente la temperatura y el punto de ebullición del líquido y también la conductibilidad del vapor.

Etapa B: cuando desciende la temperatura de la superficie del metal la película del vapor va a desapareciendo, sin embargo el líquido hierve todavía alrededor de las piezas y se forman burbujas que rodean al acero. Esta es la etapa de más rápido enfriamiento y es llamada de enfriamiento por transporte de vapor. En ella influye el calor de vaporización y la viscosidad del líquido, y la agitación del baño y de la pieza.

Etapa C: esta última etapa comienza cuando la temperatura de la superficie del metal es más baja que la temperatura de ebullición del líquido y se presenta generalmente por debajo de los 300 °C. El enfriamiento lo hace el líquido por conducción y convección, siendo ya la diferencia de temperatura entre la superficie y el medio pequeña. Esta etapa se llama de enfriamiento por líquido y es más lenta que las anteriores.

Podemos observar en la Figura 11 como se introduce un cilindro de acero a temperatura de austenización en agua y se produce el rápido enfriamiento.

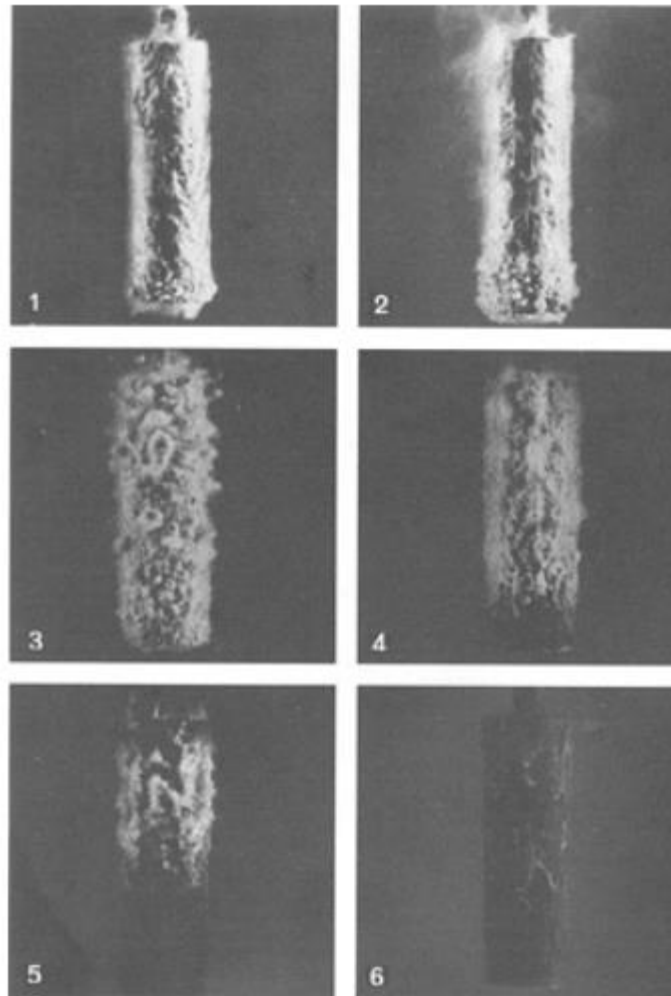


Figura 11. Secuencia de un cilindro de acero templado en agua.

2.8 Influencia de los diversos factores en el temple de los aceros

2.8.1 Influencia en la composición

Conociendo las curvas de las S de enfriamiento continuo de un acero, se puede determinar su velocidad crítica de temple, ya que es precisamente la correspondiente a la línea de enfriamiento tangente a la nariz de la curva de la S. Como se puede ver en la Figura 12.

Para conseguir un temple perfecto y una estructura totalmente martensítica, la velocidad de enfriamiento del acero deberá ser superior a la tangente citada anteriormente.

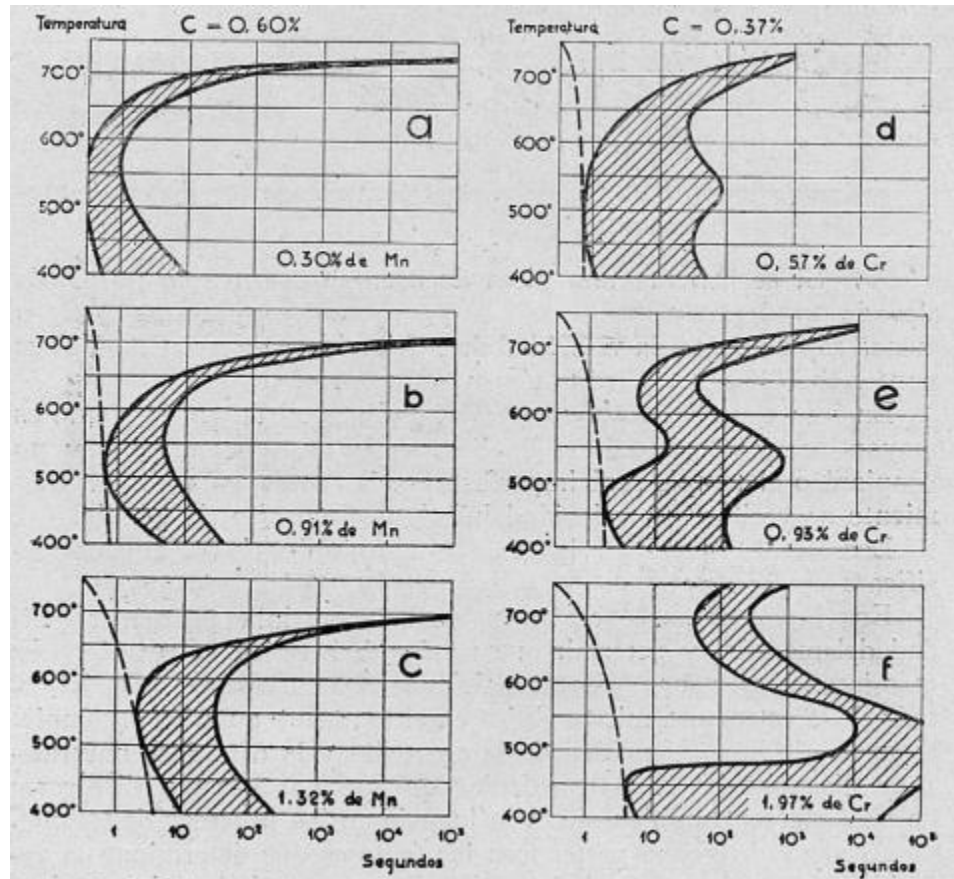


Figura 12. Curvas de las “S” de tres aceros de 0,6 % de carbono y contenidos variables de manganeso y de tres aceros de 0,35 % de carbono y contenidos variables de cromo.

Las curvas de la figura reflejan claramente la influencia que tiene la composición y el % de elementos de aleación sobre la velocidad crítica de temple. En dicha figura se observa que las curvas se desplazan hacia la derecha al aumentar el % de manganeso y cromo y por lo tanto las velocidades críticas de temple disminuyen al aumentar el contenido de elementos de aleación

2.8.2 Efecto del medio de enfriamiento

El tipo de medio de enfriamiento utilizado tiene un dramático efecto en las velocidades de enfriamiento (ver Figura 13). Esas curvas son obtenidas por ensayo Jominy en agua, polímero acuoso, aceite rápido, aceite convencional y aceite de Martempering a diferentes temperaturas. Estas curvas con diferentes formas fueron obtenidas en cada solución utilizando la misma probeta y velocidad de enfriamiento.

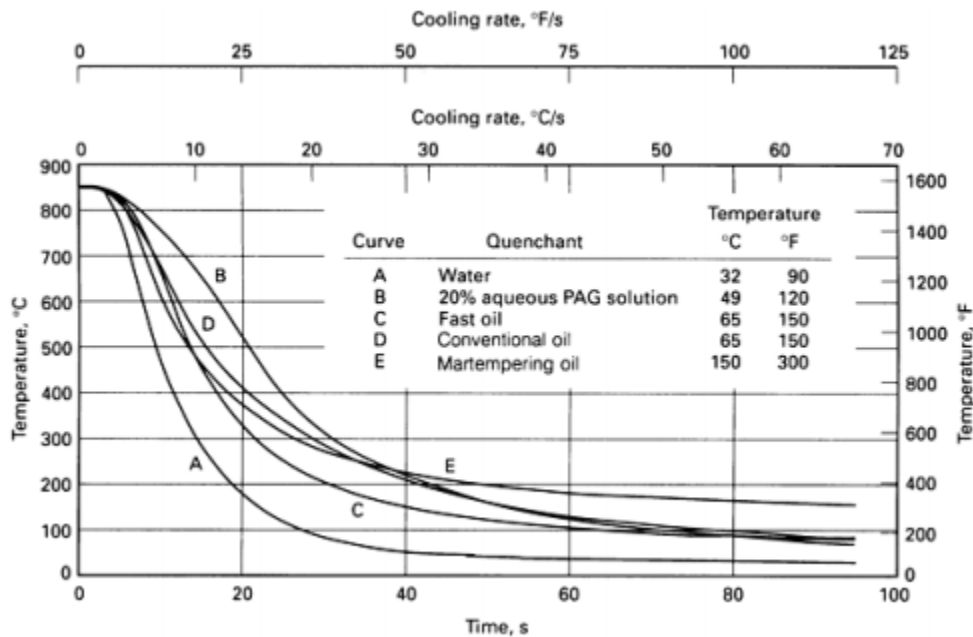


Figura 13. Se demuestran las diferentes velocidades de enfriamiento según el medio que se utilice para tal fin.

Con el enfriamiento en agua salada muy agitada se consiguen las mayores velocidades y enfriando las piezas dentro del horno se obtienen las menores.

Con el enfriamiento en aceite, al aire, en sales, etc, se consiguen velocidades intermedias, pudiendo elegirse entre todos ellos el medio que mejor cumpla las condiciones de enfriamiento deseadas en cada caso. Ver Tabla 1.

MEDIO DE ENFRIAMIENTO	Velocidad relativa de enfriamiento en el intervalo (°/Seg)	
	720°-550°	720° - 200° ()
Solucion acuosa con 10% de ClLi	2,07	1,04
Solucion acuosa con 10% de Na OH	2,06	1,36
Solucion acuosa con 10% de ClNa	1,96	0,98
Solucion acuosa con 10% de CO3Na2	1,38	1,09
Solucion acuosa con 10% de SO4H2	1,22	1,49
Agua a 0°	1,06	1,02
Agua a 18°	1	1
Mercurio	0,78	1,09
Agua a 25°	0,72	1,11
Aceites	0,25-0,15	0,05-0,15
Agua con Jabon	0,07	1,16
Agua a 75°	0,047	1,31
Agua a 100°	0,044	0,71
Aire	0,028	0,007
Vacio	0,011	0,004

Tabla 1.

En la siguiente Figura 14 se demuestran las velocidades instantáneas que se obtienen en centro de redondos de diversos diámetros templados en agua y aceite muy agitados. En esta última figura se observa que desde el comienzo del proceso va a aumentando la velocidad de enfriamiento hasta la zona 730-680 °C, donde alcanza una máximo disminuyendo luego

progresivamente hasta la temperatura del baño. Existiendo una zona entre 600-800 °C en la que las variaciones de velocidades son relativamente muy pequeñas.

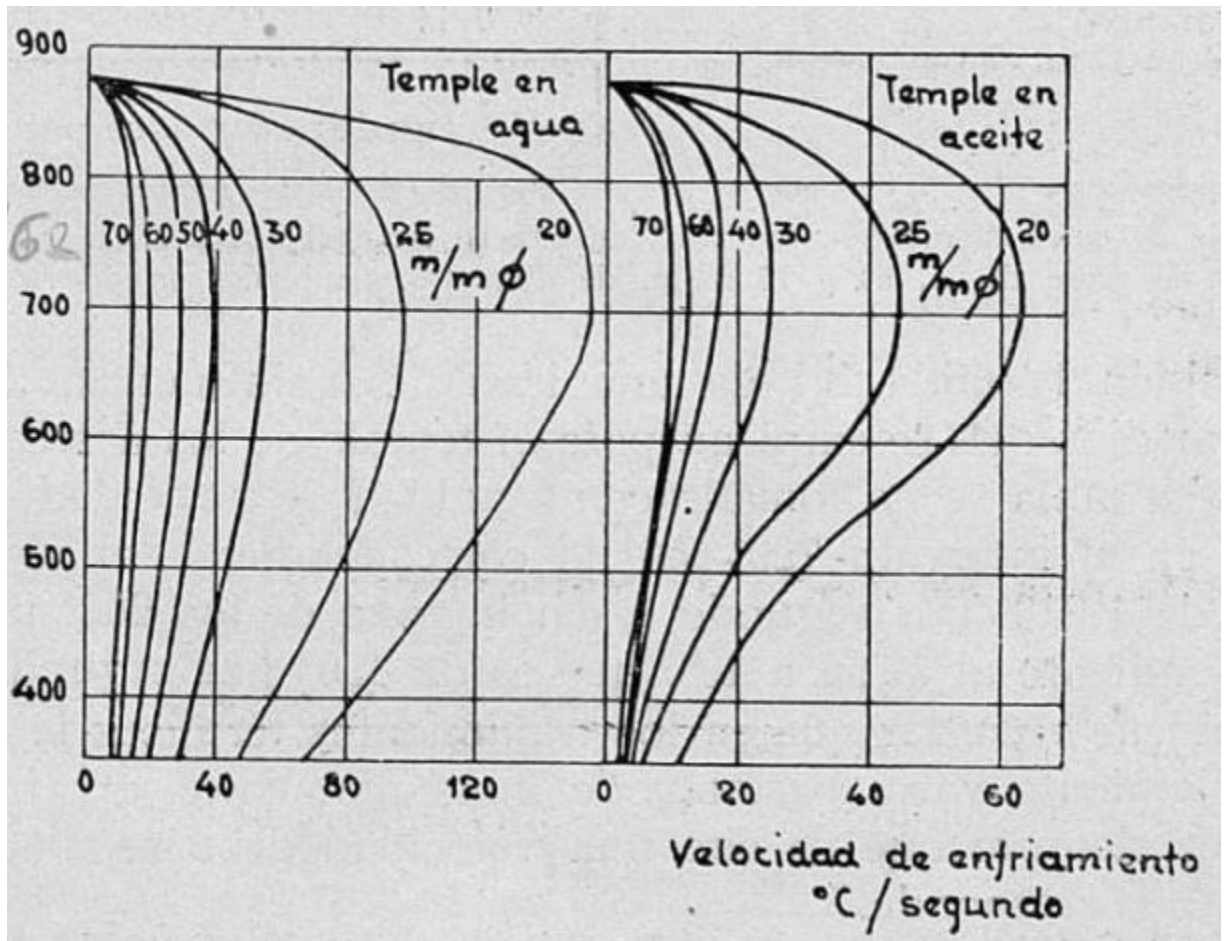


Figura 14. Velocidades instantáneas de enfriamiento a diversas temperaturas del centro de rondos de acero templados en agua y aceite muy agitados.

2.8.3 Influencia del tamaño de grano

El tamaño de grano modifica la forma de la curva de la S. Las velocidades críticas de temple de los aceros de grano grueso son menores que las velocidades de los aceros de grano fino.

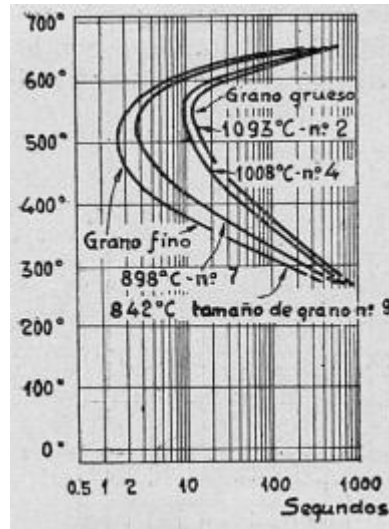


Figura 15. Curvas de las “S” correspondientes a la transformación del 50 % de austenita, de un acero de 0,63 % de carbono, austenizado a diferentes temperaturas.

En la Figura 15 se puede observar la influencia que tiene el tamaño de grano de un acero de 0,63 % de C. en este caso la diferencia de tamaño de grano es debida a que las muestras fueron calentadas a temperaturas variables desde 842 °C a 1093 °C. Las curvas de las S correspondientes a cada muestra también son distintas y como consecuencia también los serán las velocidades críticas de temple de cada uno de ellos. Estas curvas corresponden a la transformación de 50 % de la austenita.

2.8.4 Influencia del tamaño de las piezas

El volumen y espesor de las piezas tiene gran importancia en el temple de los aceros. Si estudiamos el enfriamiento en agua de un cilindro que ha sido calentado a alta temperatura, fácilmente se comprende que la capa exterior del acero es la que se enfría primero y más rápidamente. La capa siguiente no se enfría con tanta rapidez por que el calor no se transmite directamente al líquido, sino que debe a travesar antes la capa superficial del acero. Una tercera

capa del acero, situada más hacia el centro se enfría todavía más lentamente, pues cuanto más al interior se encuentra la transmisión de calor se hace cada vez con más dificultad.

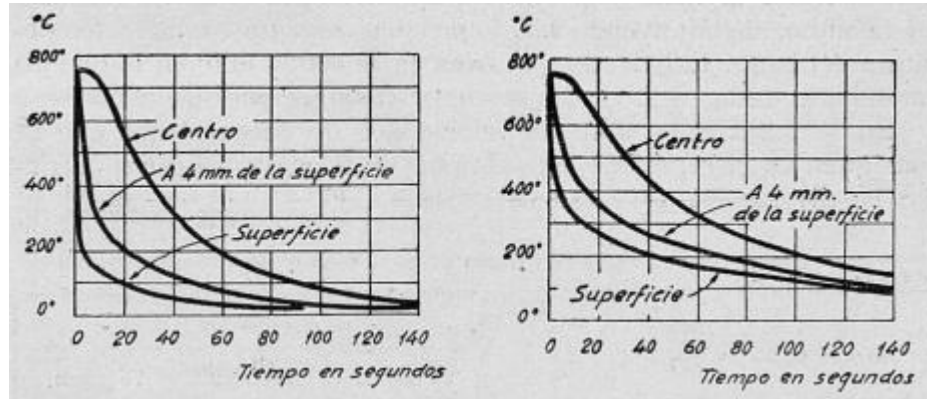


Figura 16. Curvas de enfriamiento de diversos puntos de un redondo de 50 mm de diámetro, en la figura de la derecha se realiza un temple desde 750 °C en agua agitada y en la de la izquierda en aceite agitado.

En la Figura 16 se ve el proceso de enfriamiento de varios puntos de dos redondos de 50 mm templados en agua y aceite muy agitados.

2.9 Diagramas TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación) o Curvas de las S

Son diagramas que representan el tiempo necesario a cualquier temperatura para que se inicie y termine una transformación de fase (tiempo-temperatura-transformación). Para su obtención se realizan ensayos sobre distintas probetas que se someten a diferentes velocidades de enfriamiento y se analiza su dureza y su estructura interna. Como se puede ver en la Figura 17.

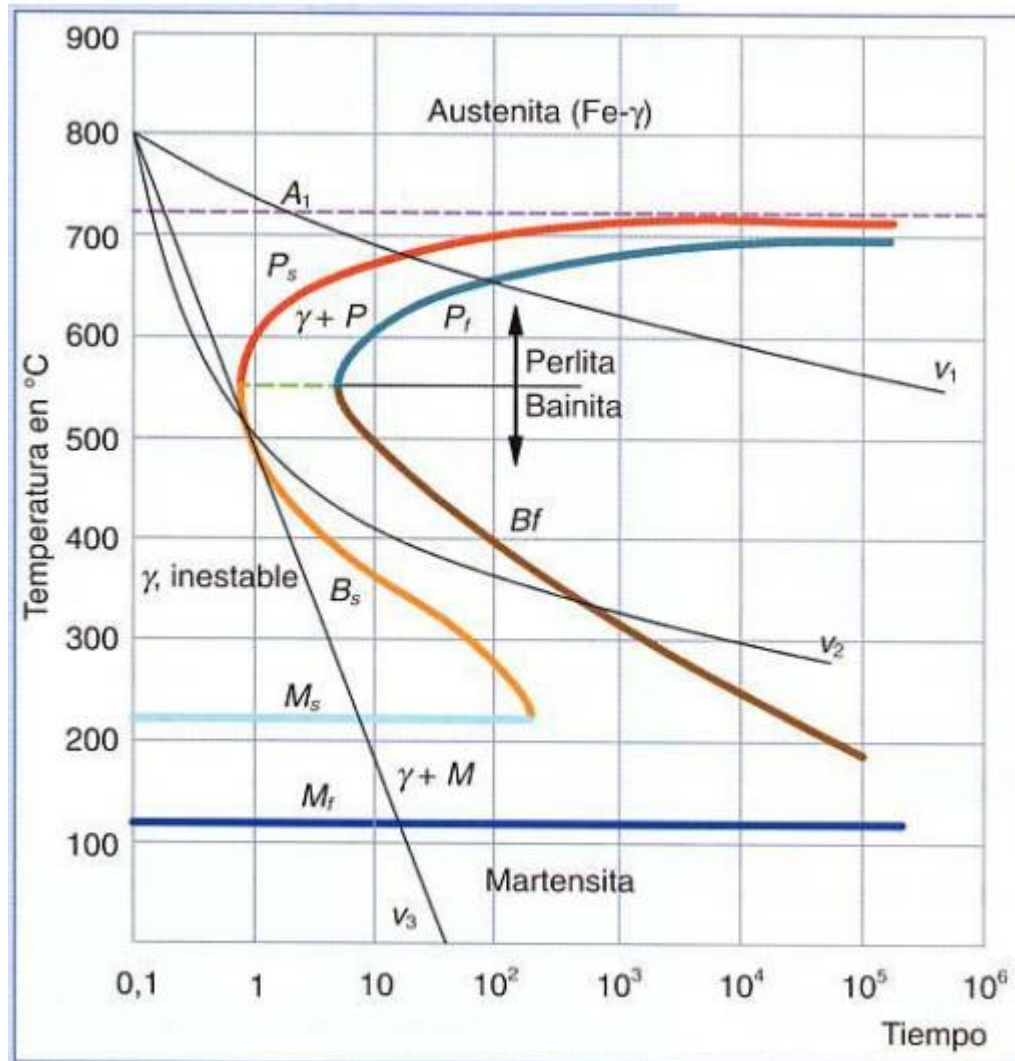


Figura 17. Curva TTT para acero eutectoide.

El significado es:

- Por encima de la temperatura A_1 toda la estructura es austenita (hierro γ más carbono).
- P_s , línea roja, indica el inicio de la transformación a perlita, P_t indica el final de la transformación. Esto sucede para enfriamientos lentos, velocidad V_1 .



- BS, línea naranja, indica el inicio de la transformación bainítica, Bf el final. Velocidades que no dan lugar al temple.
- Si las velocidades se realizan en un medio con mayor capacidad como el agua se forma la martensita. Esta velocidad debe ser mayor que V_3 y marca dos zonas, la de inicio de transformación a martensita, MS y la de final, Mf.

El temple sucede siempre que la velocidad de enfriamiento sea lo suficientemente rápida para no entrar en la zona de las S, debiendo cortar en la línea MS.

Tanto para aceros aleados como para aceros al carbono las transformaciones pueden ser:

a) Transformaciones isotérmicas (el enfriamiento isotérmico se consigue por inmersión en un baño de sales fundidas, que se mantiene a $T = \text{Cte.}$)

b) Transformaciones de enfriamiento continuo (se consigue enfriando dentro del horno, al aire, en agua, en aceite,..)

Los diagramas TTT son gráficas que representan el porcentaje de transformación en función de la temperatura (eje vertical) y del tiempo (eje horizontal, normalmente en escala logarítmica). Se elaboran con el porcentaje de transformación frente al logaritmo de las medidas de tiempo. Ver Figura 18.

Son muy útiles para entender las transformaciones de un acero que se enfría isotérmicamente. Así, por ejemplo, en el caso del acero, y más concretamente para la fase austenita, que es inestable por debajo de la temperatura de transformación eutécticoide, se necesita saber.

- Cuánto tiempo requerirá para empezar a transformarse a una temperatura subcrítica específica.
- Cuánto tiempo precisará para estar completamente transformada.
- Cuál será la naturaleza del producto de esta transformación.

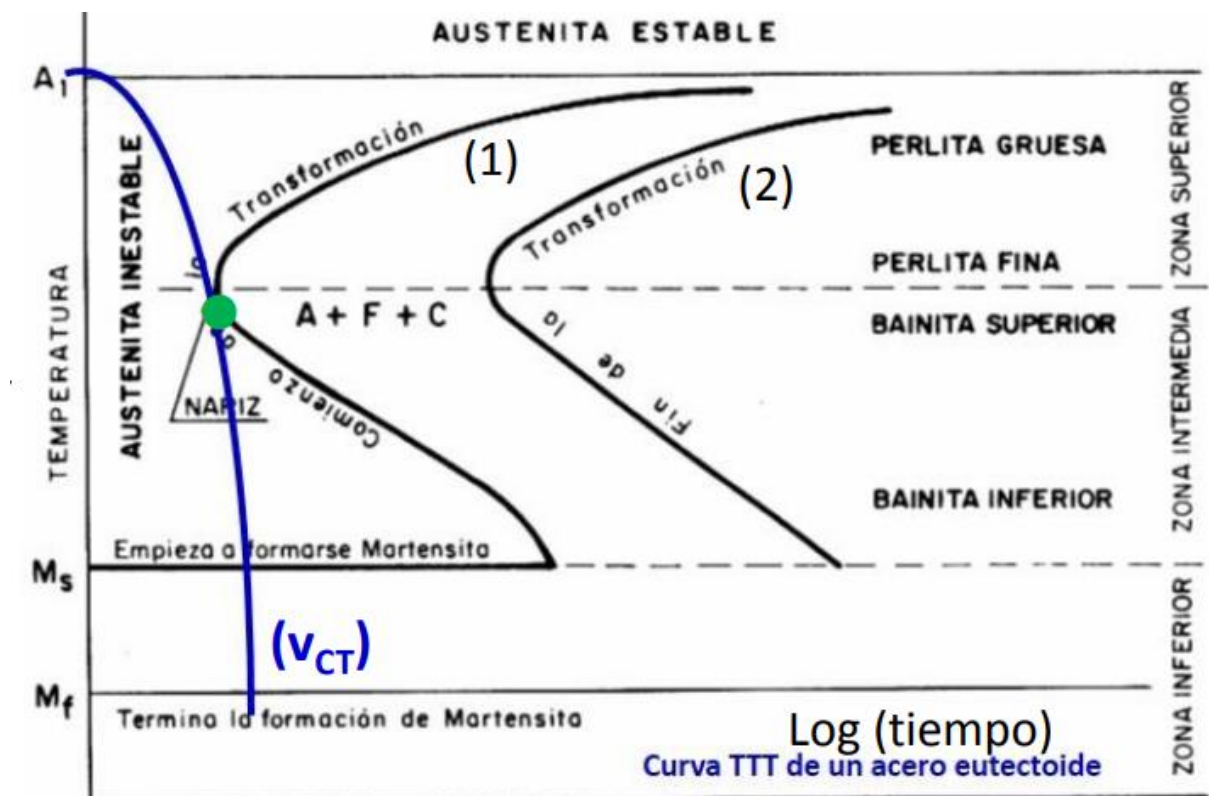


Figura 18. (1) Curva inicial de transformación. (2) Curva final de transformación. (V_{ct}) velocidad crítica de temple. (M_s) Curva inicial de transformación martensítica. (M_f) Curva final de transformación martensítica. ● Nariz perlítica.

Por debajo de M_s la evolución es independiente del tiempo, sólo es función de la temperatura a que el acero es enfriado rápidamente o templado. Una transformación de este tipo se denomina **TRANSFORMACIÓN ATÉRMICA**.



La nariz perlítica nos da el mínimo tiempo de retardo y nos define la velocidad crítica de temple del acero, que es la mínima velocidad que nos permite alcanzar una estructura 100 % martensítica, sin haber sido sometido a ninguna otra transformación en el enfriamiento.

Llamamos tiempo de retardo o periodo de incubación al tiempo necesario para que comience la transformación isotérmica de la austenita. Es distinto para cada temperatura.

La determinación práctica de las curvas TTT de cada acero constituye siempre una ayuda que orienta y hace comprender los TRATAMIENTOS TÉRMICOS.

Dicha curva sólo puede aplicarse con propiedad en tratamientos isotérmicos. Sin embargo, suele utilizarse también industrialmente en enfriamientos continuos: sobre ella pueden superponerse, sin graves errores prácticos, las curvas de enfriamiento real. Superponiendo a la curva TTT otra curva que señale la velocidad a que se desea enfriar la austenita, pueden predecirse con bastante aproximación las estructuras que se obtendrán con ese enfriamiento.

A partir de estos diagramas podemos determinar el tratamiento bajo el cual debemos someter a un material para obtener la estructura y las propiedades deseadas, y como deben ser los tiempos y las temperaturas de dichos tratamientos.

Si la velocidad de enfriamiento es muy lenta, se obtendrán estructuras de tipo perlítico. Si la velocidad de enfriamiento fuera mayor, se obtendrían estructuras bainíticas y si la velocidad fuera tal que la curva de enfriamiento no cortara a la curva TTT en ninguno de sus puntos, se obtendría estructura martensítica. Como se muestra en la Figura 19.

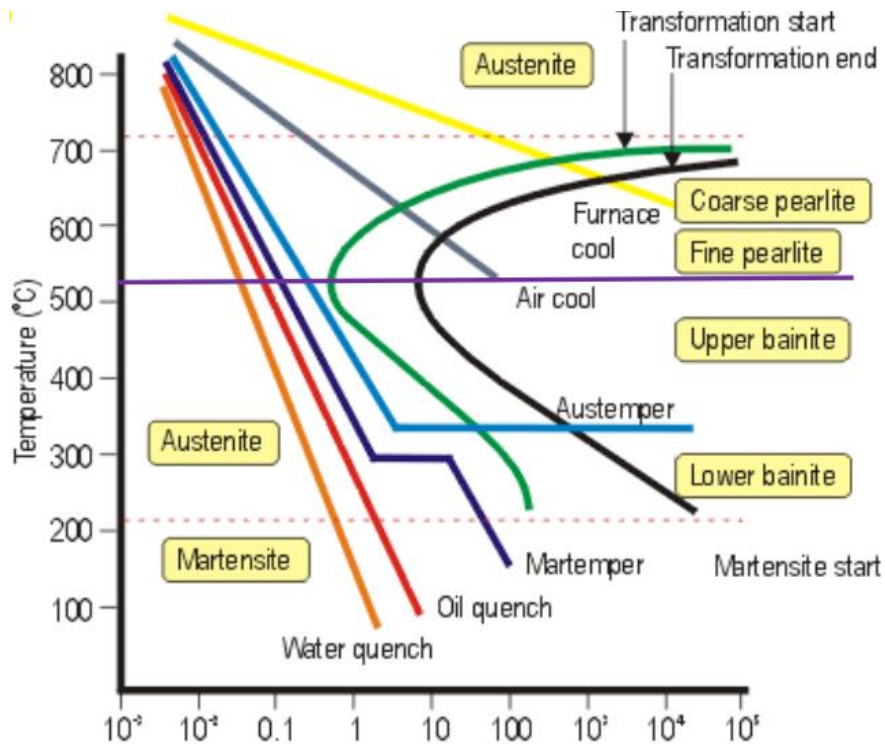


Figura 19. Imagen que ilustra las diferentes microestructuras que se pueden obtener según la velocidad de enfriamiento.

Se denomina velocidad crítica de temple V_c , a la mínima velocidad de enfriamiento requerida para evitar la transformación de la austenita en otros constituyentes antes de alcanzar la temperatura M_s .

Además de las curvas TTT, podemos hablar de las curvas TTT de enfriamiento continuo, que presentan unos tiempos mayores debido a que en el caso de enfriamiento continuo se pasa mayor cantidad de tiempo a altas temperaturas, mientras que en el caso isotérmico el material llega instantáneamente a la temperatura de transformación.

En estos diagramas la temperatura eutectoide (727°C) se representa mediante una línea horizontal; a temperaturas superiores a la eutectoide y para todos los tiempos, existe sólo austenita. La transformación austenita-pearlita sólo ocurre si se enfría por debajo de la

temperatura eutectoide, donde las curvas indican el tiempo necesario para el inicio y el final de la transformación para cada temperatura. Las curvas de inicio y final de transformación son casi paralelas y se aproximan asintóticamente a la línea eutectoide.

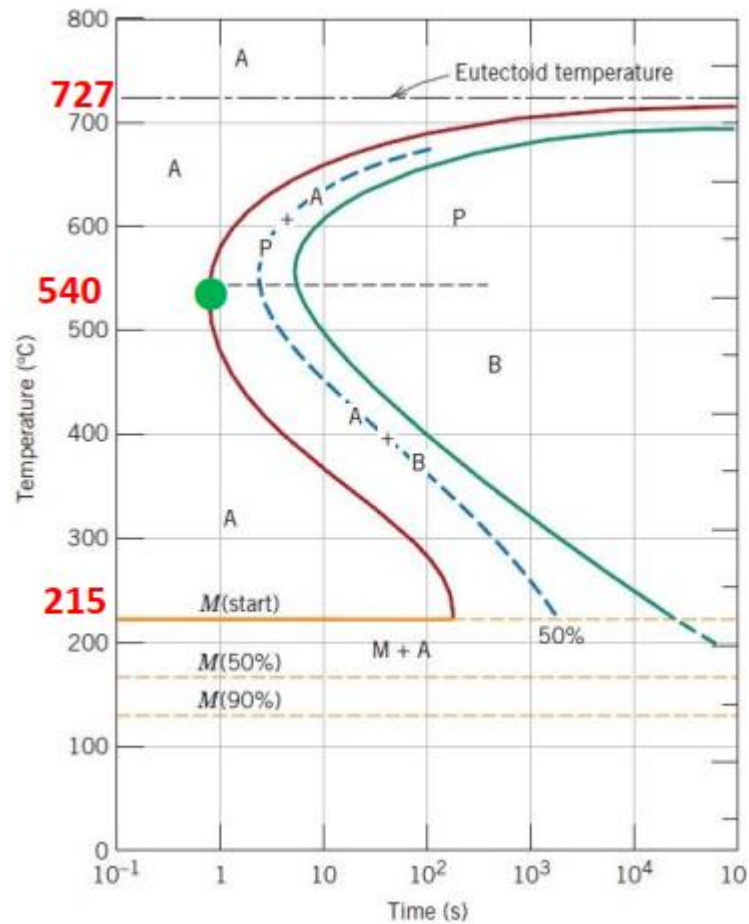


Figura 20. Diagrama de transformación isotérmica de un acero eutectoide con las transformaciones austenita-perlita (A-P) y austenita-bainita (A-B).

A la izquierda de la curva de inicio de transformación sólo existe la austenita (inestable), mientras que, a la derecha de la curva de final de transformación, sólo existe la perlita. Entre ambas curvas hay austenita transformándose en perlita: ambos microconstituyentes están presentes.



La velocidad de transformación a una temperatura determinada es inversamente proporcional al tiempo necesario para que la reacción transcurra hasta el 50% (línea discontinua). Cuanto menor es el tiempo mayor es la velocidad. En la figura se aprecia que a temperaturas próximas al eutectoide (correspondientes a pequeños subenfriamientos) se necesitan tiempos muy grandes (del orden de 10^5 s) para conseguir un 50 % de transformación y la velocidad de reacción es muy lenta. La velocidad de transformación aumenta al descender la temperatura hasta que a 540 °C sólo necesitan 3 s para llegar al 50 % de la transformación. Ver Figura 20.

El diagrama TTT muestra el tiempo necesario para transformar una fracción de la 3 muestra en función de la temperatura. La velocidad de transformación está limitada por una nucleación lenta a altas temperaturas y un crecimiento lento a baja temperatura.

2.10 Variables de transferencia de calor

2.10.1 Numero de Biot

Es evidente que el análisis de sistemas concentrados es muy conveniente en el estudio de la transferencia de calor y naturalmente que interesa saber cuándo resulta apropiado para usarlo. El primer paso en el establecimiento de un criterio para la aplicabilidad del análisis de sistemas concentrados es definir la longitud característica como

$$L_c = \frac{V}{A_s} \quad (1)$$

L_c = longitud característica



V = volumen

A_s = área superficial

y un número de Biot, Bi como

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \quad (2)$$

Bi = número de Biot

h = coeficiente de transferencia de calor por convección

k = conductividad térmica de un acero

La longitud característica L_c que se utiliza en el número de Biot para formas geométricas simples en las que la transferencia de calor es unidimensional, como una pared plana larga de $2L$ de espesor, un cilindro largo de radio r_o , y una esfera de radio r_o , se convierte en L (medio espesor), $r_o/2$ y $r_o/3$, respectivamente. La ecuación (2) también se puede expresar como en la Figura 21.

$$Bi = \frac{h \Delta T}{\frac{k}{L_c} \Delta T} = \frac{\text{Conveccion en la superficie del cuerpo}}{\text{Conduccion dentro del cuerpo}} \quad (3)$$

o bien,

$$Bi = \frac{\frac{L_c}{k}}{\frac{1}{h}} = \frac{\text{Resistencia a la conduccion dentro del cuerpo}}{\text{Resistencia a la conveccion en la superficie del cuerpo}} \quad (4)$$



Cuando un cuerpo sólido se calienta por el fluido más caliente que lo rodea (como una papa que se está horneando), en principio el calor es llevado por convección hacia el cuerpo y, a continuación, conducido hacia el interior del cuerpo. El número de Biot es la razón de la resistencia interna de un cuerpo a la conducción de calor con respecto a su resistencia externa a la convección de calor. Por lo tanto, un número pequeño de Biot representa poca resistencia a la conducción del calor y, por lo tanto, gradientes pequeños de temperatura dentro del cuerpo.

En el análisis de sistemas concentrados se supone una distribución uniforme de temperatura en todo el cuerpo, el cual es el caso sólo cuando la resistencia térmica de éste a la conducción de calor (la resistencia a la conducción) sea cero. Por consiguiente, el análisis de sistemas concentrados es exacto cuando $Bi=0$ y aproximado cuando $Bi > 0$. Por supuesto, entre más pequeño sea el número Bi , más exacto es el análisis de los sistemas concentrados.

En la mayor parte de los casos, un 15% de incertidumbre en el coeficiente de transferencia de calor por convección h se considera “normal” y “esperado”. Suponer que h es constante y uniforme también es una aproximación de validez cuestionable, en especial para configuraciones geométricas irregulares. Por lo tanto, en ausencia de suficientes datos experimentales para la configuración geométrica considerada, no se puede afirmar que los resultados sean mejores que $\pm 15\%$, incluso cuando $Bi > 0$. Si éste es el caso, la introducción de otra fuente de incertidumbre en el problema difícilmente tendrá algún efecto sobre la incertidumbre total, siempre que sea de poca importancia. En general se acepta que el análisis de sistemas concentrados es aplicable si

$$Bi \leq 0,1 \quad (5)$$



Cuando se satisface este criterio, las temperaturas dentro del cuerpo con relación a la de los alrededores (es decir, $T - T_{\infty}$) permanecen dentro de un margen de 5% entre sí, incluso para configuraciones geométricas bien redondeadas como la de una esfera. Como consecuencia, cuando $Bi \leq 0.1$, la variación de la temperatura con la ubicación dentro del cuerpo es ligera y, de manera razonable, se puede considerar como si fuera uniforme.

Note que el número de Biot es la razón entre la convección en la superficie con respecto a la conducción dentro del cuerpo, y debe ser tan pequeño como sea posible para que el análisis de sistemas concentrados sea aplicable. Por lo tanto, los cuerpos pequeños con conductividad térmica alta son buenos candidatos para este tipo de análisis, en especial cuando se encuentran en un medio que sea un mal conductor del calor (como el aire u otro gas) que esté inmóvil.

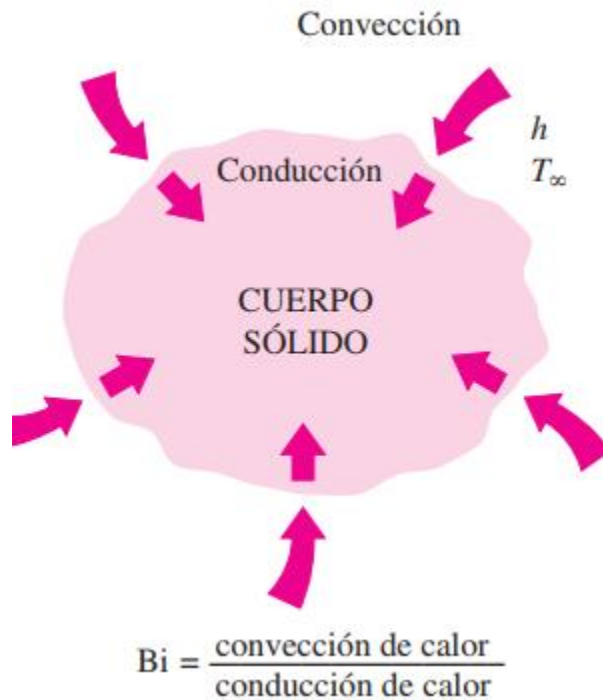


Figura 21. Ejemplificación de la ecuación del número de Biot.

El número de Biot se puede concebir como la razón entre la convección en la superficie del cuerpo con respecto a la conducción dentro de éste como se muestra en la Figura 21.

2.10.2 Número de Fourier

En física e ingeniería el Número de Fourier (Fo) o Módulo de Fourier, llamado así en honor a Joseph Fourier, es un número adimensional que caracteriza la conducción de calor. Conceptualmente es la relación entre la velocidad de la conducción de calor y la velocidad del almacenamiento de energía. Se define como:

$$Fo = \tau = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (6)$$



α = difusividad térmica del material

t = tiempo

L = medio espesor de una pared plana

2.10.3 Funciones de Bessel

En matemáticas, las funciones de Bessel, son soluciones canónicas $y(x)$ de la ecuación diferencial de Bessel;

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + (x^2 - \alpha^2)y = 0 \quad (7)$$

La Ecuación de Bessel aparece cuando se buscan soluciones a la ecuación de Laplace por el método de separación de variables en coordenadas cilíndricas o esféricas. Cuando se resuelven sistemas en coordenadas cilíndricas, se obtienen funciones de Bessel de orden entero ($\alpha = n$) y en problemas resueltos en coordenadas esféricas, se obtienen funciones de Bessel de orden semientero ($\alpha = n + 1/2$) por ejemplo:

- Conducción del calor en objetos cilíndricos



3. Materiales

3.1 Equipamiento

La presente tesis se desarrolló con una computadora que presenta las siguientes características:

- Notebook Positivo BGH Modelo A-490
- Windows 10 Home Edition
- Procesador I3 de segunda generación 2.2 GHz
- 6 gb de Memoria Ram
- Disco rígido de 500 GB

Para la utilización del software de predicción, es necesaria una computadora básica que reúna al menos las características listadas anteriormente.

3.2 Software

3.2.1 Matlab

Es una herramienta computacional con un lenguaje de alto nivel, diseñado para facilitar cálculos, visualización y programación en un entorno adecuado para utilizar. Matlab posee un lenguaje de programación propio muy versátil llamado lenguaje M. La interfaz posee líneas de comandos para resolver problemas lineales y no lineales. Proporciona una forma simple de tratar los problemas y resolverlos debido a su notación numérica, que radica en el manejo de matrices eficientes, incluyendo su propio compilador lo cual permite extender su uso permitiendo al usuario crear sus propios comandos, clases y funciones.



Es una herramienta muy útil para el ámbito ingenieril y está destinado para el cálculo científico basado en matrices. Entre sus prestaciones básicas se hallan:

Realizar cálculos aritméticos

Realizar cálculo simbólico

Realizar gráficos matemáticos

Implementación de algoritmos

Creación de interfaces de usuario (GUI)

3.2.2 Características Matlab

Matlab es un programa que se destaca de otros similares en los cálculos numéricos, especialmente en los relacionados con matrices y gráficas. Por ello permite efectuar cualquier operación con matrices de forma sencilla. Se pueden hacer cálculos con vectores o escalares, pero su elemento básico es la matriz, tanto de datos numéricos como de información no numérica. Por ello en dicho programa todo elemento es considerado como matriz, ya sea un escalar (matriz 1×1), un vector (matriz con una sola fila) o una cadena de caracteres.

Matlab es un intérprete de comandos que permite efectuar cualquier operación con matrices de forma sencilla y rápida. Es un sistema interactivo cuyo elemento básico es la matriz (y como caso particular, vectores o escalares), tanto de datos numéricos como de información no numérica. En el Matlab todo elemento es considerado como una matriz: por ejemplo, un escalar es una matriz de (1×1) ; un vector es una matriz con solo una fila o una columna; una cadena de caracteres es una matriz fila de elementos (uno por letra), etc.



Al ser un intérprete, en la ventana principal aparece evaluado el último comando suministrado al programa. Para evitar su visualización, conviene terminar los comandos con punto y coma “;”. Esto es también útil cuando se ejecutan programas con varias órdenes, si no se desea que todos los resultados de las operaciones sean volcados en la pantalla.

Si no se especifica el nombre de una variable para almacenar un resultado, por defecto este se vuelca en una variable temporal “ans”.

Todas las variables que se utilicen durante una sesión quedan en el espacio de trabajo de Matlab, y pueden utilizarse mientras no se salga del programa o se eliminen. Para revisar las variables existentes en el espacio de trabajo de Matlab, se utiliza `who` o `whos`. Al visualizar la salida de esta orden, se puede destacar el uso de las variables como matrices y la distinción de si tienen o no elementos complejos.

En la mayoría de los sistemas, la forma de invocar a Matlab es con el comando del shell ‘Matlab’. Matlab muestra un mensaje inicial indicando que está listo para aceptar instrucciones y haciendo algunas sugerencias de comandos para iniciar. A partir de allí se pueden escribir comandos inmediatamente.

Si se presenta algún tipo de dificultad, se puede interrumpir la tarea que está realizando Matlab con ‘Control – C’ (usualmente escrito como ‘C – c’ para abreviar). Para salir de Matlab simplemente se debe escribir ‘exit’ en el prompt. En aquellos sistemas que soportan control de tareas (como Linux y la mayoría de los sistemas Unix, VMS, etc.) se puede suspender Matlab (u Octave según sea el caso) enviando una señal ‘SIGSTP’ (usualmente ‘C–z’).

Si se es novato en el uso de Matlab, es recomendable tratar de reproducir los ejemplos que se muestran. Las líneas marcadas como ‘>>’ son líneas que se deben escribir terminándolas con un retorno de carro (tecla ‘enter’ de la PC). Matlab responderá con un resultado o un gráfico.

Una vez iniciado el programa, la primera ventana que se muestra contiene pequeñas ventanas en su interior, entre ellas la denominada Ventana de Comando (Command Window), Ventana del Directorio Actual (Current Directory) y la Ventana del Histórico de Comandos (Command History).

En la figura Figura 22 se muestra la visión por defecto que se presenta en Matlab.

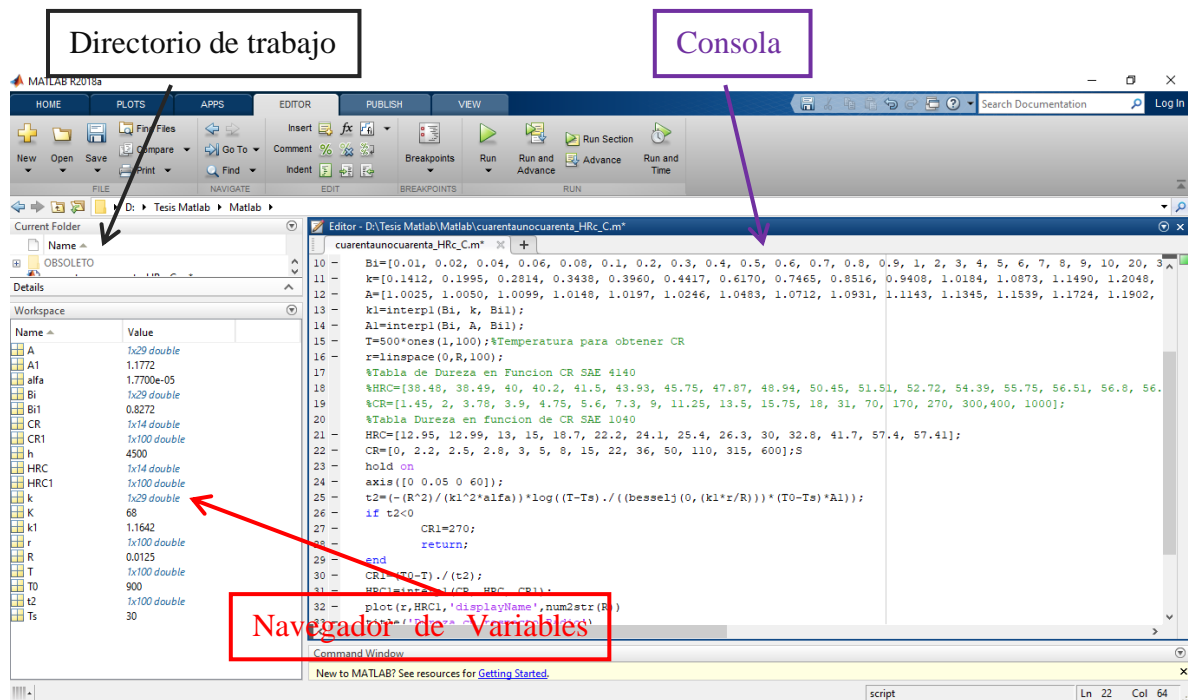
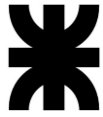


Figura 22. Visión por defecto del software Matlab.



3.2.3 Característica de ventana de comandos

La Ventana de Comandos es la ventana principal de Matlab, se abre cuando se inicia la aplicación. Las funciones introducidas (o "entradas") se ejecutan pulsando la tecla Enter. Al escribir los nombres de las funciones o de los comandos, es importante recordar que Matlab distingue entre mayúsculas y minúsculas (habitualmente, las funciones se escriben en minúsculas).

Asimismo, tras seleccionar una zona de esta ventana, el botón derecho del ratón despliega un menú emergente que permite, entre otras opciones, evaluar dicha selección, e igualmente, abrirla con el Editor/Debugger como un M-fichero.

Seleccionar File → Preferences... permite especificar el formato numérico a emplear y otras opciones de presentación en pantalla. De igual forma, es posible seleccionar el tipo y el color de las fuentes de texto.

3.2.4 Principales comandos Matlab

Los principales comandos de la ventana de comandos son los que a continuación se describen en la Tabla 2:

Comandos	Descripción
» load	Lee todas o algunas de las variables de un fichero.
» open	Abre, entre otros, los ficheros .mat, M-ficheros o ficheros .fig de gráficos. Un fichero también puede abrirse seleccionando <i>File</i> → <i>Open...</i> De modo equivalente, las variables pueden importarse eligiendo <i>File</i> → <i>Import Data...</i>
» clear	Elimina algunas o todas las variables del espacio de trabajo. Igualmente, <i>Edit</i> → <i>Clear Workspace</i> elimina todas las variables del espacio de trabajo.

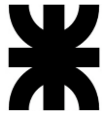


» clc	Borra la <i>ventana de comandos</i> (no elimina las variables). Este comando equivale a seleccionar <i>Edit</i> → <i>Clear Workspace</i> .
» format modo	Determina el formato de salida en la <i>ventana de comandos</i> . Entre los distintos "modos", pueden destacarse: short (muestra hasta 5 dígitos) long (muestra hasta 15 dígitos) y rat (formato racional).
» cd	Permite conocer y cambiar el directorio actual.
» cd..	Disminuye un nivel en el árbol de carpetas. El directorio puede ser igualmente modificado en la <i>ventana de directorio actual</i> .
» who	Muestra un listado con las variables del espacio de trabajo. Estas variables aparecen, igualmente, en la <i>ventana de espacio de trabajo</i> .
» dir	Muestra un listado con los archivos del directorio actual. Esta información también es asequible a través de la <i>ventana de directorio actual</i> .
» edit M-fichero	Abre una <i>ventana de edición</i> con un M-fichero. Si no se especifica un M fichero la <i>ventana de edición</i> se abre en blanco. Igualmente puede seleccionarse <i>File</i> → <i>New</i> → <i>M-file</i> , o hacer clic en el botón de la barra de herramientas.
» save	Guarda todas o algunas de las variables del espacio de trabajo. Análogamente, puede seleccionarse <i>File</i> → <i>Save Workspace As...</i>
» exit/quit	Cierra el programa Matlab. Igualmente es posible cerrar el programa mediante <i>File</i> → <i>Exit Matlab</i>

Tabla 2. Botones de comando.

Algunas teclas o combinaciones de teclas resultan especialmente interesantes en la ventana de comandos:

- Las teclas ↑ y ↓ permiten recuperar comandos escritos con anterioridad.
- La tecla Esc elimina todo el texto escrito en una línea.
- La combinación de teclas Control + c aborta la ejecución de una sentencia.



3.2.5 M-FILES

Aunque Matlab se utiliza como un sofisticado calculador, su verdadera potencia radica en su capacidad para leer y ejecutar ficheros escritos por el usuario. Sin embargo, cuando se van a realizar una serie de operaciones más complicadas y de forma repetitiva, se utilizan los llamados ficheros M que tienen una extensión .m. Es una buena práctica escribir comandos directamente en un fichero M y guardarlos en un subdirectorío apropiado. Si se comete un error, es mucho más fácil editar el fichero para encontrarlo que buscar el error entre varios comandos y, además, un fichero M puede guardarse y recuperarse en otro momento.

Hay fundamentalmente dos tipos diferentes de ficheros M: los ficheros script y los ficheros function. Un fichero script contiene una sucesión de comandos Matlab que se ejecutan cuando el nombre del fichero se introduce en la ventana de comandos del sistema. Un fichero function requiere una entrada que procesa y devuelve el resultado como salida.

Matlab contiene un gran número de ficheros function en su interior.

Esos ficheros van desde las funciones elementales (por ejemplo, exp y sin) hasta un gran número de funciones especiales. Todos los ficheros function están caracterizados por su capacidad para coger una entrada de la línea de comandos y devolver una salida en la ventana de comandos sin que haya necesidad de editar el fichero. Un ejemplo sencillo de un fichero function es la función exponencial $\exp(x)$ es decir, ex. Se introduce:

$$y = \exp(1)$$

y se obtiene:

$$y = 2.7183$$



Si se introduce:

$$y = \exp(0)$$

la salida es:

$$y = 1$$

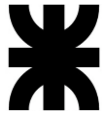
3.2.6 Operaciones con vectores

Para definir una matriz o un vector no hace falta establecer de antemano su tamaño. Matlab puede operar con matrices por medio de operadores y por medio de funciones. Los operadores matriciales de Matlab son los siguientes (Tabla 3):

Símbolo	Descripción
+	Adición o suma
-	Sustracción o resta
*	Multiplicación
2	Traspuesta
^	Potenciación
\	División izquierda
/	División derecha
.*	Producto elemento a elemento
./	División elemento a elemento
.^	Elevar a una potencia elemento a elemento

Tabla 3. Operadores matriciales de Matlab.

Estos operadores se aplican también a las variables o valores escalares, aunque con algunas diferencias.



Todos estos operadores son coherentes con las correspondientes operaciones matriciales: por ejemplo, no se puede sumar matrices que no sean del mismo tamaño. Si los operadores no son utilizados de manera correcta, se obtiene un mensaje de error.

Los operadores se pueden aplicar también de modo mixto, es decir con un operando escalar y otro matricial. En este caso la operación con el escalar se aplica a cada uno de los elementos de la matriz. Considérese el siguiente ejemplo:

```
>> A=[1 2; 3 4]
A =
 1 2
 3 4
>> A*2
ans =
 2 4
 6 8
>> A-4
ans =
-3 -2
-1 0
```

Matlab utiliza el operador de división / para dividir por un escalar todos los elementos de una matriz o vector.

3.2.7 Representaciones Gráficas

Matlab ofrece gran número de posibilidades a la hora de realizar representaciones gráficas. La representación de cualquier serie de datos es uno de los puntos fuertes de Matlab. Dispone de funciones para representar series de puntos, superficies, curvas de nivel, entre otros.

Permite agrupar y superponer representaciones. Todo ello con variaciones de estilo y de coordenadas. Permite a su vez realizar gráficos de tipo estadístico: de barra, histogramas, etc. Prácticamente cualquier cosa puede representarse gráficamente en Matlab.



Por las características propias del programa, los gráficos, en concreto los 2D, están orientados a la representación gráfica de vectores. Se utiliza una ventana especial para la creación de los gráficos: la ventana gráfica o de dibujo y, dichos gráficos se guardan en ficheros de extensión .fig.

Ciertos comandos ejecutados sobre la línea de comandos son los que abren esta ventana, otros dibujan sobre la ventana activa, bien sustituyendo lo que había en ella, bien añadiendo nuevos elementos gráficos a los que había.

3.2.8 Funciones básica para las gráficas

Existe una orden que evalúa cuidadosamente la función que se va a representar y asegura que todas sus peculiaridades se representen en la gráfica de salida. El comando básico para la representación de gráficos 2D es el comando plot. Su sintaxis puede ser:

plot(x,y): dibuja el conjunto de puntos (x,y) donde las abscisas de los puntos se encuentran en el vector x y las ordenadas en el y .

Para representar una función $f(x)$ es necesario conocer los valores de puntos de la forma $(x,f(x))$. Para ello puede seguirse alguno de estos caminos:

- Definir un vector x con el rango de variación donde se desea pintar la función. Para ello puede ser muy útil el comando `linspace(xmin,xmax,n)`. Crear el vector y evaluando f en x . Por ejemplo:

```
>> x=linspace(0,10,100);
```

```
>> y=sin(x);
```




```
>> plot(x,y)
```

Por defecto, Matlab dibuja uniendo los puntos con línea continua de color azul y un grosor determinado, opciones todas que se podrán alterar como veremos.

- También es posible dibujar una función con el comando `fplot` cuya sintaxis es la siguiente: `fplot('f(x)',[xmin,xmax])`. Así, este comando admite como argumento un nombre de función o de un fichero `.m` en el que está definida la función a representar.

Por ejemplo:

```
>> fplot('sin(x)',[-3*pi,3*pi,-1,1])
```

En general, si no se cierra la ventana de dibujo generada al evaluar un comando como los anteriores, si se vuelve a ejecutar uno de ellos, se dibuja sobre dicha ventana perdiéndose el primer dibujo. Si se desea representar varias funciones a la vez las opciones son:

- `plot(x,y,x,z)` donde `x` el vector de las abscisas, común para las dos representaciones, y es el de las ordenadas de la primera representación y `z` las de la segunda.

- `fplot('f1(x),f2(x),...',[xmin,xmax])` donde `f1`, `f2`, ... son las funciones a representar en el intervalo de variación marcado por `xmin` y `xmax`.

- `hold on`, `hold off`. Todos los gráficos que se ordene dibujar entre los comandos `hold on` y `hold off` se representan en la misma figura. Si hay una figura abierta se dibujan en ésta.

Ejemplo:

```
>> hold on
```

```
>> x=[-3*pi:1:3*pi];
```

```
>> plot(x,sin(x))
```

```
>> plot(x,tan(x),'r')
```



```
>> hold off
```

- El comando subplot. Una ventana gráfica se puede dividir en “m” particiones horizontales y “n” verticales para representar mxn figuras.

Cada una de las particiones tendrá sus ejes aunque las propiedades serán comunes a todas ellas. La sintaxis es: subplot(m,n,i), donde m y n son el número de subdivisiones e i la subdivisión activa. Por ejemplo:

```
>> x=0:0.1:2*pi;
```

```
>> y=sin(x);z=cos(x);t=exp(-x);v=x^2;
```

```
>> subplot(2,2,1), plot(x,y)
```

```
>> subplot(2,2,2), plot(x,z)
```

```
>> subplot(2,2,3), plot(x,t)
```

```
>> subplot(2,2,4), plot(x,v)
```

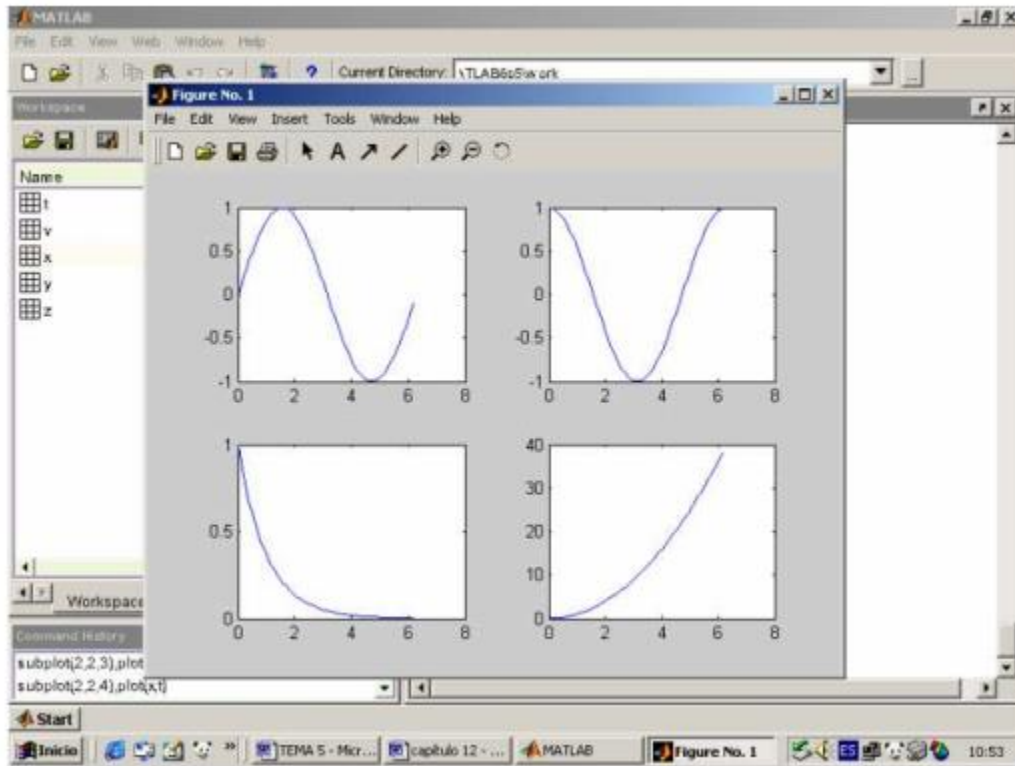
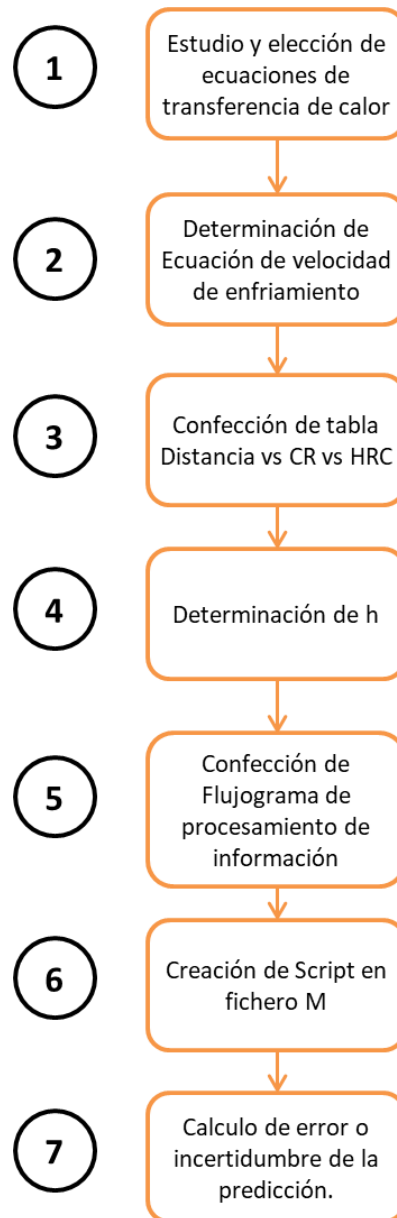


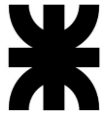
Figura 23. Ejemplo de tipos de gráficos plot.

4. Metodología

Para llevar adelante el desarrollo de la herramienta computacional propuesta, fue necesario confeccionar una metodología de trabajo. La misma, contempla las siguientes etapas:



Flowsheet 1



1- **Estudio y elección de las ecuaciones de transferencia de calor.** Estas fórmulas son las necesarias para determinar a qué velocidad se enfría un redondo en su interior, conociendo el medio de enfriamiento, la temperatura de este y la temperatura inicial en que se encuentra la pieza antes de templarla, tipo de acero, etc.

2- **Determinación de ecuación de velocidad de enfriamiento.** Mediante las fórmulas de transferencia de calor se determina el intervalo de tiempo que cada punto de la sección de un redondo pasa de la temperatura de austenización a 500°C.

3- **Confección de tabla Distancia vs CR vs HRC.** Con ayuda de la bibliografía, se escogen las curvas de Jominy adecuadas. De acuerdo con estas curvas se confecciona una tabla donde se separa por 1/16” las durezas de la probeta Jominy de esos aceros con respecto a la velocidad de enfriamiento. Se tienen en cuenta los valores máximos y mínimos correspondientes a los límites de la banda de templabilidad, por lo que se toman valores de la curva máxima y la mínima.

4- **Confección de tabla de valores de coeficiente de transferencia de calor por convección (h).** El valor correspondiente a este coeficiente es dado según la severidad del medio de temple. Los valores, fueron obtenidos de tablas pertenecientes al Metal Handbook de “Coeficiente de film de los medios de enfriamientos”.

5- **Confección de Flujograma (flowsheet) de procesamiento de información.** Se confecciona un esquema ordenado para poder desarrollar el procesamiento de datos dentro de la interfase correspondiente. La herramienta computacional seguirá el paso a paso propuesto en esta etapa.



6- Elaboración de la programación para la predicción de valores de dureza. Con los datos de las etapas anteriores, se realiza la programación en el software Matlab. Este sistema permite obtener las durezas en la sección de un redondo con un margen de error que está dentro de la banda de templabilidad.

7- Cálculo de error o incertidumbre de la predicción. Se calculan las desviaciones obtenidas entre los resultados arrojados por la herramienta computacional y los datos de ensayos reales obtenidos de la bibliografía. De esta manera, se busca informar cual es la precisión en la predicción desarrollada.

4.1 Estudio y elección de las ecuaciones de transferencia de calor

Para determinar las Curvas U de Dureza (CUD) de un acero redondo, es importante conocer las ecuaciones de conducción y transferencia de calor sobre este tipo de geometría. Esto es debido a que como se explicó en la sección 2.8 las durezas en los aceros están íntimamente relacionadas con la velocidad de enfriamiento.

Por ello este apartado se centra en el estudio de las ecuaciones termodinámicas utilizadas para cálculo de velocidad de enfriamiento de un cilindro.

Para este cálculo, se tratan a las piezas como Sistemas concentrados. Esto implica que la resistencia interna es despreciable. Dicho de otro modo, la temperatura del cilindro permanece uniforme en su sección todo el tiempo y se puede hablar de esa temperatura sin referir a una ubicación específica.



El primer paso para la aplicación de estos sistemas es el cálculo de número de Biot. Este número adimensional, es una medida de la resistencia interna de un cuerpo a la conducción de calor con respecto a su resistencia externa a la convección de calor.

Para los sistemas concentrados la exactitud depende de la proximidad del valor de Bi a cero, siendo exacto cuando es cero y aproximado cuando es menor a cero, ecuaciones (2) y (5).

La longitud característica (L_c) utilizada en la ecuación (2) se adapta bien para formas geométricas simples como un cilindro de radio r_0 , que es para el tipo de pieza que se quiere evaluar su velocidad de enfriamiento.

Para resolver el problema de coordenadas internas de gradiente de temperatura se plantea la siguiente ecuación que es la apropiada para estos casos. [5]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

Se especifican una condición inicial y dos condiciones de borde

Condición inicial.

$$T(x, 0) = T_i \quad (9)$$

Esta presume una distribución de temperatura uniforme en el $t=0$

Condiciones de Borde:

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

$$-k \frac{\delta T(R, t)}{\delta x} = h[T(R, t) - T_{\infty}] \quad (11)$$

La primera indica el requerimiento de simetría en el centro del cilindro y la otra describe las condiciones de superficie experimentada. [5]

Las variables involucradas entonces serán según la siguiente ecuación:

$$T = T(x, t, T_i, T_{\infty}, R, k, \alpha, h) \quad (12)$$

Considerando un cilindro largo de radio r_0 (Figura 24), en el instante $t=0$ cada configuración geométrica se coloca en un medio grande que está a una temperatura constante T_{∞} y se mantiene en ese medio para $t > 0$, la transferencia de calor se lleva a efecto entre el cilindro y el medio ambiente por convección, con un coeficiente de transferencia de calor h uniforme y constante. El cilindro es simétrico con respecto a su línea central ($r = 0$). Se desprecia la transferencia de calor por radiación entre estos cuerpos y sus superficies circundantes, o bien, se incorpora el efecto de la radiación en el coeficiente de transferencia de calor por convección h .

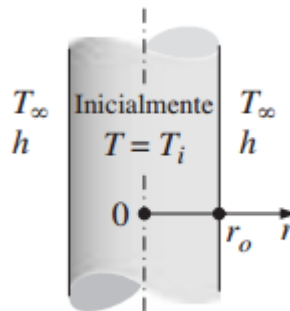


Figura 24. Cilindro largo.

Al sumergir la pieza en un medio de enfriamiento se crea un gradiente de temperatura, donde el perfil de temperatura se hace más y más aplanado conforme pasa el tiempo como resultado de la transferencia de calor y llega el momento en que se vuelve uniforme en $T = T_{\infty}$. Es decir, la pared alcanza el equilibrio térmico con sus alrededores. (Figura 25)

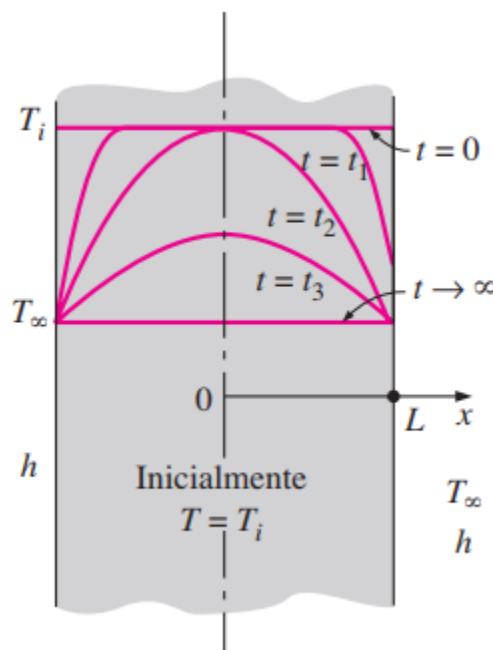


Figura 25. Perfiles de temperatura transitoria en una pared expuesta a convección desde sus superficies para $T_i > T_{\infty}$.

4.1.1 Conducción transitoria adimensional, solución exacta

La formulación de problemas de conducción de calor para la determinación de la distribución unidimensional transitoria de temperatura conduce a una ecuación diferencial en derivadas parciales; comúnmente, la solución de este tipo de ecuación está relacionada con series infinitas y ecuaciones trascendentes, que no resulta conveniente usar. [5]



La ecuación diferencial final luego de una serie de técnicas analíticas y numéricas, incluido los métodos de la transformada de Laplace, el método de separación de variables, el de diferencias finitas y el de elementos finitos se resume en:

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\lambda_n} \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)} e^{-\lambda_n^2 \tau} J_0\left(\frac{\lambda_n r}{r_0}\right) \quad (13)$$

$$Bi = \lambda_n \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0(\lambda_n)} \quad (14)$$

Bi: Numero de Biot

J₀ y J₁: Funciones de Bessel

λ_n: Raíces de la ecuación

4.1.2 Soluciones aproximadas, analíticas y graficas [5]

En el presente trabajo de tesis nos basamos en soluciones aproximadas ya que existe una motivación clara para simplificar las soluciones analíticas con el fin de presentar las soluciones en forma tabular, usando relaciones sencillas.

Como se demuestra en la Figura 26 , los términos en la suma decrecen con rapidez conforme “n” y, por consiguiente, λ_n crecen, debido a la función exponencial de decaimiento e^{-λ_n²τ}. En especial, este caso se presenta cuando el tiempo adimensional τ es grande. Por lo tanto, suele ser adecuada la evaluación de unos cuantos de los primeros términos de la serie infinita (en este caso, sólo el primer término) con el fin de determinar la temperatura adimensional θ.

$$\theta_n = A_n e^{-\lambda_n^2 \tau} \cos(\lambda_n X)$$

$$A_n = \frac{2}{\lambda_n} \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)}$$

$$\lambda_n \tan \lambda_n = \text{Bi}$$

Para Bi = 5, X = 1, y t = 0.2:

n	λ_n	A_n	θ_n
1	1.3138	1.2402	0.22321
2	4.0336	-0.3442	0.00835
3	6.9096	0.1588	0.00001
4	9.8928	-0.876	0.00000

Figura 26. Los términos de la serie que presenta la solución de los problemas de conducción transitoria decrecen con rapidez conforme crece n y, por consiguiente, ln, debido a la función exponencial de decaimiento con el exponente $-\lambda_n \tau$.

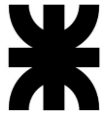
Por lo anterior mencionado, a la ecuación de solución exacta esta se puede resumir para $\tau > 0,2$, si se conserva el primer término de la serie y se desprecian todos los restantes, se tiene como resultado un error por debajo del 2%. Por lo que resulta muy conveniente expresar la solución usando esta aproximación de un término dada como:

$$A1 = \frac{2}{\lambda_n} \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)} \tag{15}$$



$$\theta_{cil} = \frac{T(r, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} J_0 \left(\frac{\lambda_1 r}{r_0} \right), \quad \tau > 0,2 \quad (16)$$

Donde las constantes A_1 y λ_n son funciones sólo del número Bi , y en la Tabla 4 se da una lista de sus valores con respecto al número Bi , para la configuración de un cilindro.



Cilindro		
Numero Bi	λ_1	A1
0.01	0.1412	10.025
0.02	0.1995	10.050
0.04	0.2814	10.099
0.06	0.3438	10.148
0.08	0.3960	10.197
0.1	0.4417	10.246
0.2	0.6170	10.483
0.3	0.7465	10.712
0.4	0.8516	10.931
0.5	0.9408	11.143
0.6	10.184	11.345
0.7	10.873	11.539
0.8	11.490	11.724
0.9	12.048	11.902
1.0	12.558	12.071
2.0	15.995	13.384
3.0	17.887	14.191
4.0	19.081	14.698
5.0	19.898	15.029
6.0	20.490	15.253
7.0	20.937	15.411
8.0	21.286	15.526
9.0	21.566	15.611
10.0	21.795	15.677
20.0	22.880	15.919
30.0	23.261	15.973
40.0	23.455	15.993
50.0	23.572	16.002
100.0	23.809	16.015

Tabla 4.

Dado que $J_0(0) = 1$, esta relación se simplifica en la ecuación (16) para dar la siguiente en el centro de un cilindro.



$$\theta_{0,cil} = \frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \quad (17)$$

Si se comparan las ecuaciones (16) y (17), se observa que en cualquier parte de un cilindro, las temperaturas adimensionales están relacionadas con la temperatura en el centro por

$$\frac{\theta_{cil}}{\theta_{0,cil}} J_0 \left(\frac{\lambda_1 r}{r_0} \right) \quad (18)$$

Lo cual muestra que la dependencia de la temperatura adimensional respecto al tiempo, dentro de una configuración geométrica dada, es la misma en toda la extensión. Es decir, si la temperatura adimensional en el centro θ_0 disminuye 20% durante un tiempo especificado, del mismo modo disminuye la temperatura adimensional θ_0 en cualquier otra parte del medio, durante el mismo tiempo.

Una vez que se conoce el número Bi, se pueden usar estas relaciones para determinar la temperatura en cualquier parte del medio. La determinación de las constantes A_1 y λ_1 suele requerir interpolación.

4.2 Determinación de la ecuación de velocidad de enfriamiento

De lo detallado en el título anterior para un cilindro largo de radio R se puede graficar las siguientes curvas de enfriamiento (T vs t), donde la línea azul indica el centro de cilindro y la naranja la superficie (Figura 27), demostrando así que la velocidad de enfriamiento es mas rápida en la periferia y va disminuyendo hasta llegar al centro.

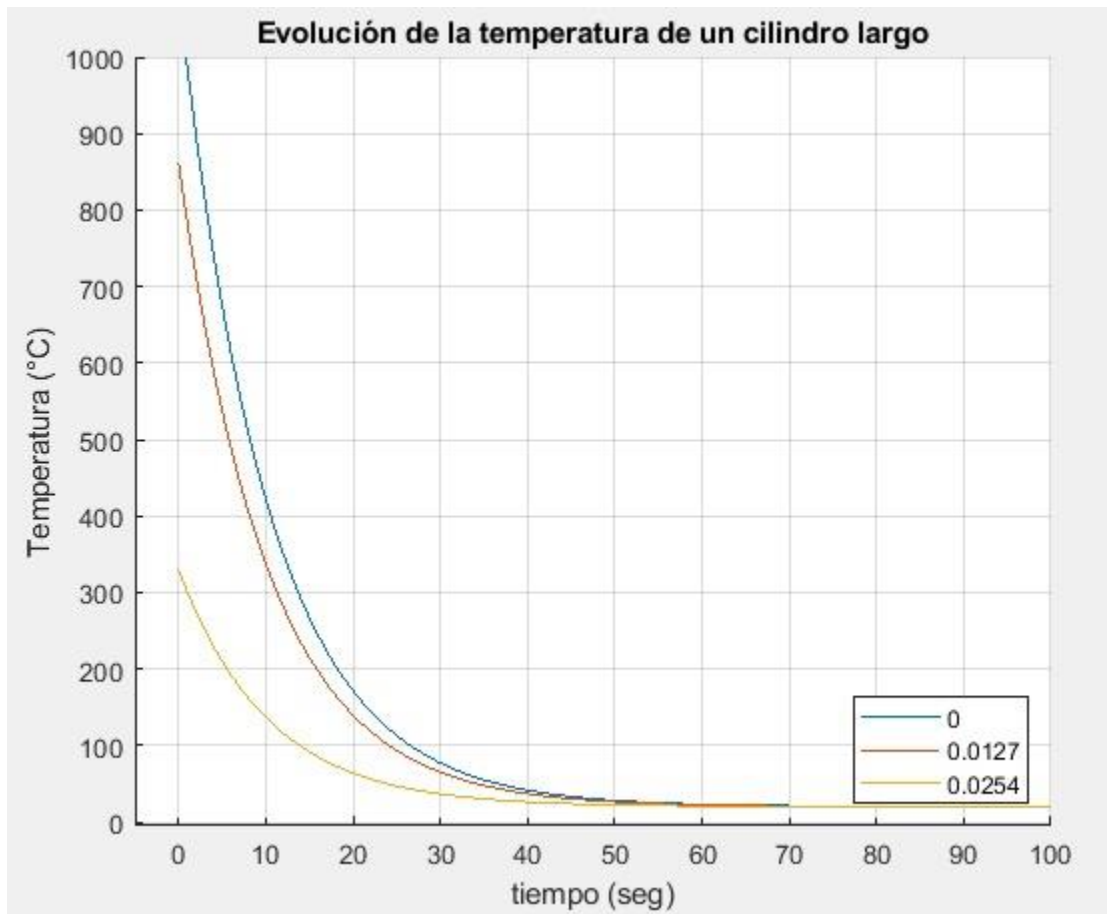
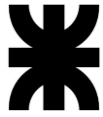


Figura 27. Curvas de enfriamiento de un acero de 25 mm de diámetro calculado por Matlab.

Debido a que se busca la dureza, es que resulta importante conocer el tiempo que lleva en determinada zona del cilindro pasar de una T_o a T_f .

Utilizando la ecuación (17) se determina una fórmula por despeje de la ecuación de conducción de calor, el tiempo que lleva la temperatura de la pieza en un cierto punto de su sección llegar desde la temperatura de austenización a la temperatura de 500 °C. Este intervalo de temperatura se eligió como referencia de la “Velocidad crítica de enfriamiento o temple”, la temperatura de 500 °C se encuentra aproximadamente en la nariz perlítica de la mayoría de los aceros.



$$t = -r^2 / (\lambda_1^2 \alpha) \log \frac{(T(r, t) - T_\infty)}{J_0\left(\frac{\lambda_1 r}{r_0}\right) (T_i - T_\infty) A_1} \quad (19)$$

De acuerdo con esta ecuación se determina la velocidad de enfriamiento de ese punto de la sección de la pieza. Esta ecuación se dedujo de la ecuación de Newton (20). [5].

$$\frac{dT}{dt} = k(T_i - T) \quad (20)$$

Dando como resultado la ecuación deducida de:

$$CR = \frac{(T_i - T)}{t} \quad (21)$$

CR= Velocidad de enfriamiento en el intervalo de T_i y T

T_i = Temperatura inicial de austenización

T = Temperatura 500°C

t = Tiempo que demora la temperatura de la pieza en un cierto punto de su sección enfriarse desde T_i a T .

Para corroborar las formulas calculadas, se compara el gráfico de curvas de enfriamiento de un acero SAE 1060 de 2" enfriado en aceite [3]. Esto se puede ver en la Figura 28 donde se observa un buen grado de ajuste en la curva de la superficie como en el centro de la probeta.

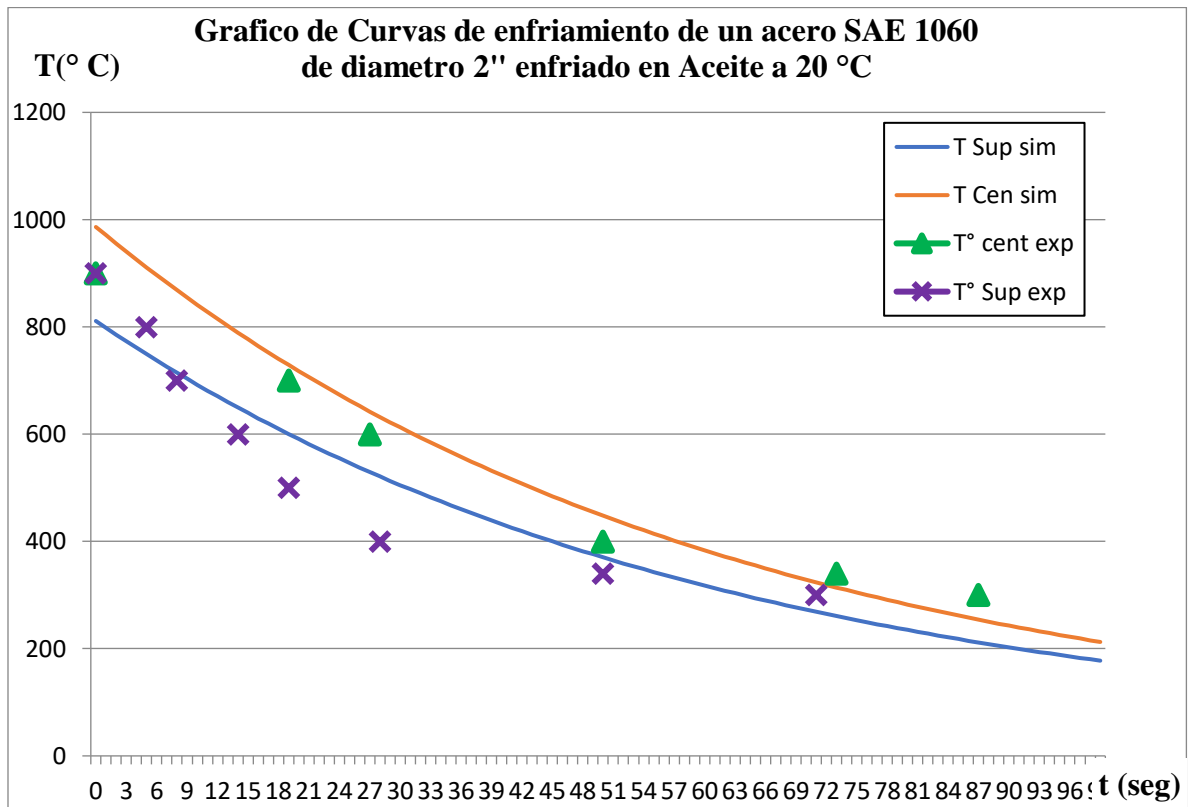


Figura 28. Curvas de enfriamiento acero SAE 1060, diámetro 2", enfriado en aceite a 20 °C.

4.3 Confección de tabla de Distancia vs CR vs HRC

Obtenidos los valores de velocidad de enfriamiento (CR), se confecciona una tabla donde se relacionan los valores de sestimos (distancia al extremo de la probeta), velocidad de enfriamiento y dureza de un acero. Estos valores se obtienen de acuerdo a curvas de un acero específico que relaciona las tres variables ya citadas.

Para realizar las comprobaciones de durezas, de este proyecto, decidimos trabajar con el acero SAE 1045. Obtuvimos las curvas Jominy, según norma SAE J1268 de este material, que posee un gráfico con dos curvas, una máxima y otra mínima, que representan el rango de

templabilidad para esta aleación (Figura 29). Este rango de templabilidad es debido a las tolerancias de composición según SAE.

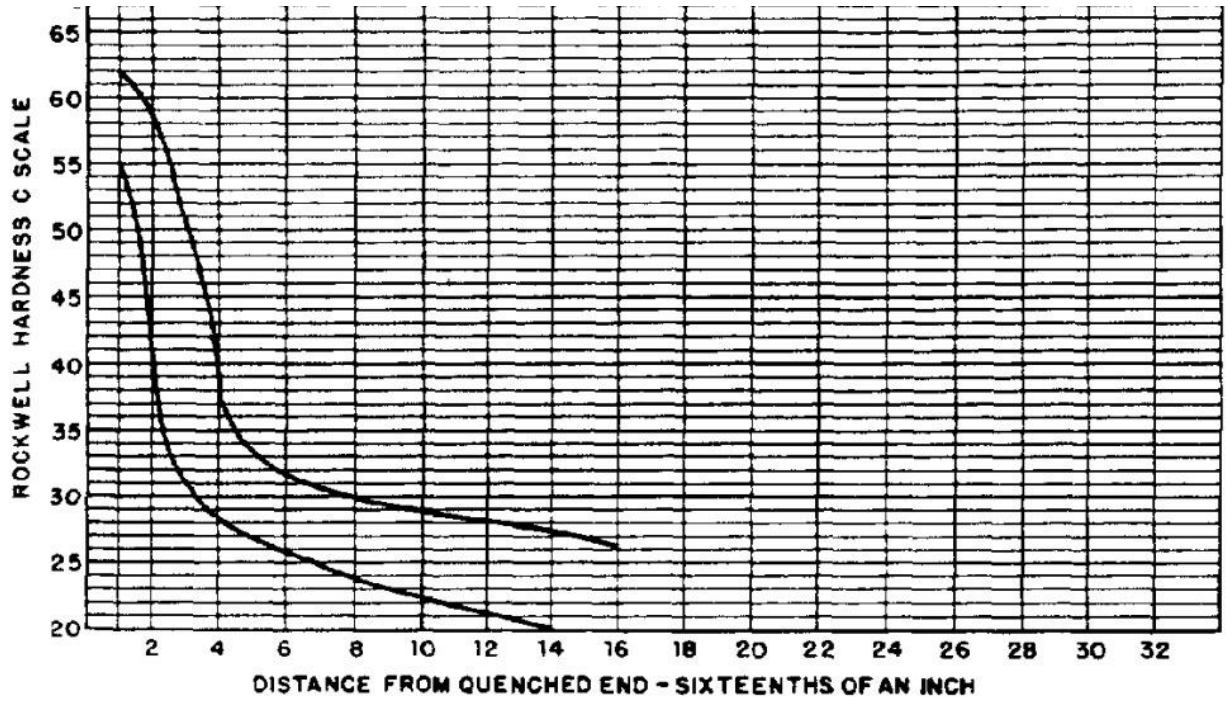
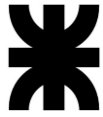


Figura 29. Curvas Jominy del acero SAE 1045 según norma SAE J1268.

De acuerdo con estas curvas se confecciona la Tabla 5, donde se colocan los valores de velocidad de enfriamiento y dureza máxima y mínima, con respecto a la distancia.



Sestimos (1/#)	in	JD (mm)	Metal Handbook CR JT	1045	
				HRCmax	HRCmin
1	0,0625	1,59	270,00	62	55
2	0,125	3,18	170,00	59	42
3	0,1875	4,76	110,00	50	31
4	0,25	6,35	70,00	39	28
5	0,3125	7,94	43,00	33	27
6	0,375	9,53	31,00	32	26
7	0,4375	11,11	23,00	31	25
8	0,5	12,70	18,00	30	24
9	0,5625	14,29	14,00	29	23
10	0,625	15,88	11,90	29	22
11	0,6875	17,46	10,50	28,5	22
12	0,75	19,05	9,10	28	21
13	0,8125	20,64	8,00	28	21
14	0,875	22,23	6,90	27	20
16	1	25,40	5,60	26	20
20	1,25	31,75	3,90	26	20

Tabla 5. Valores de velocidad de enfriamiento y dureza máxima y mínima, con respecto a la distancia.

4.4 Determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección

(h)

La transferencia de calor por convección, a menudo denominada simplemente convección, es la transferencia de calor de un lugar a otro por el movimiento de fluidos. La convección suele ser la forma dominante de transferencia de calor en líquidos y gases [15].

El coeficiente de transferencia de calor por convección “h” se puede definir como: la tasa de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de superficie por unidad de diferencia de temperatura.



A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la tasa de transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa convenientemente por la ley de enfriamiento de Newton, que establece que:

La tasa de pérdida de calor de un cuerpo es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y sus alrededores, siempre que la diferencia de temperatura sea pequeña y la naturaleza de la superficie radiante permanezca igual.

$$q = h\Delta T \quad (22)$$

q = densidad de flujo de calor

h = Coeficiente de transferencia de calor

ΔT = diferencia de temperatura

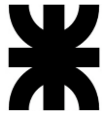
Tener en cuenta que, ΔT viene dado por la temperatura de la superficie o la pared, la pared T y la temperatura total T_{∞} , que es la temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie.

Como se puede ver, la constante de proporcionalidad será crucial en los cálculos y se conoce como el coeficiente de transferencia de calor por convección, h . El coeficiente de transferencia de calor por convección, h , se puede definir como:

$$h = \frac{q}{\Delta T} \quad (23)$$

La velocidad de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de superficie por unidad de diferencia de temperatura.

El coeficiente de transferencia de calor por convección depende de las propiedades físicas del fluido y la situación física. El coeficiente de transferencia de calor por convección no es una



propiedad del fluido. Es un parámetro determinado experimentalmente cuyo valor depende de todas las variables que influyen en la convección, como la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades del fluido y la velocidad del fluido a granel [13].

Los coeficientes de transferencia de calor por convección, cuyo valor se mide según la severidad del medio de temple, fueron tomados de tabla de Metal Handbook de “Coeficiente de film de los medios de enfriamientos”.

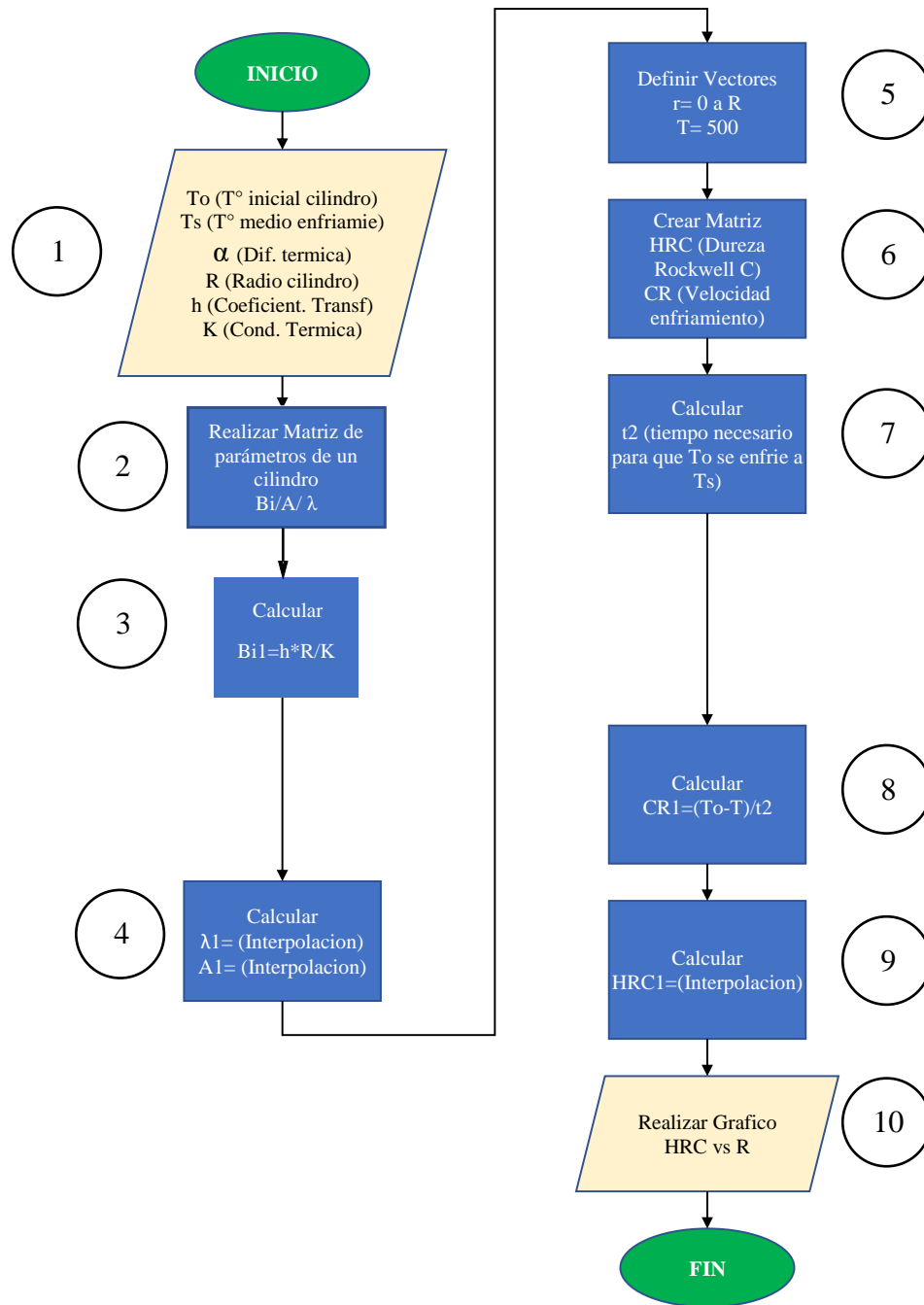
La severidad del medio de enfriamiento es dependiente en su habilidad para transferir el calor entre la interfaz del metal caliente durante el enfriamiento. La variación de enfriamientos puede ocurrir en un mismo medio de temple según el grado de agitación y mientras más rápida es la velocidad de agitación más rápido es la transferencia de calor entre el líquido y el acero a ser enfriado. Además, según se puede ver en la tabla el coeficiente h también disminuye cuando se aumenta la temperatura. Si bien la tabla se tomó del Metal Handbook, algunos valores de h fueron corregidos para adaptarse a la realidad de los resultados finales de durezas obtenidas con el software computacional.

MEDIO DE TEMPLE	TEMPERATURA DEL MEDIO (°C)	VELOCIDAD DEL MEDIO (m/s)	h=Coficiente de transferencia de calor por convección (W/m ²)
Agua	32	0	2000
		0,25	9000
		0,51	12000
		0,76	12000
	55	0	1000
		0,25	2500
		0,51	6500
		0,76	10500
Aceite Rapido	60	0	1000
		0,25	1500
		0,51	5000
		0,76	6500
Aceite Convencional	43	0,51	1000
Aceite de Martenpering	150	0,51	800
Aire	27	0	200
		2,54	250
		5,08	350

Tabla 6. Tabla con valores de h (coeficiente de transferencia de calor por convección) para cada medio de enfriamiento.

4.5 Confección del Flujograma de procesamiento de información

Antes de comenzar con el desarrollo del programa de predicción, es necesario diagramar de forma ordenada cómo será el procesamiento de los datos. Aquí se detallará el paso a paso que debe seguir la programación a desarrollar en el software, para poder procesar la información de forma correcta y obtener los resultados buscados. Los pasos propuestos son los siguientes:



Flowsheet 2.

4.6 Creación de Script en fichero M según Flowsheet 2

Al abrir el software Matlab se inicia un nuevo fichero de tipo M utilizando el botón “New” y luego “Script”. También se puede usar la combinación de teclas “Ctrl+N”, ver Figura 30. Este tipo de fichero va a permitir cargar datos y variables, fórmulas y tablas necesarias para desarrollar el programa en la forma de un script.

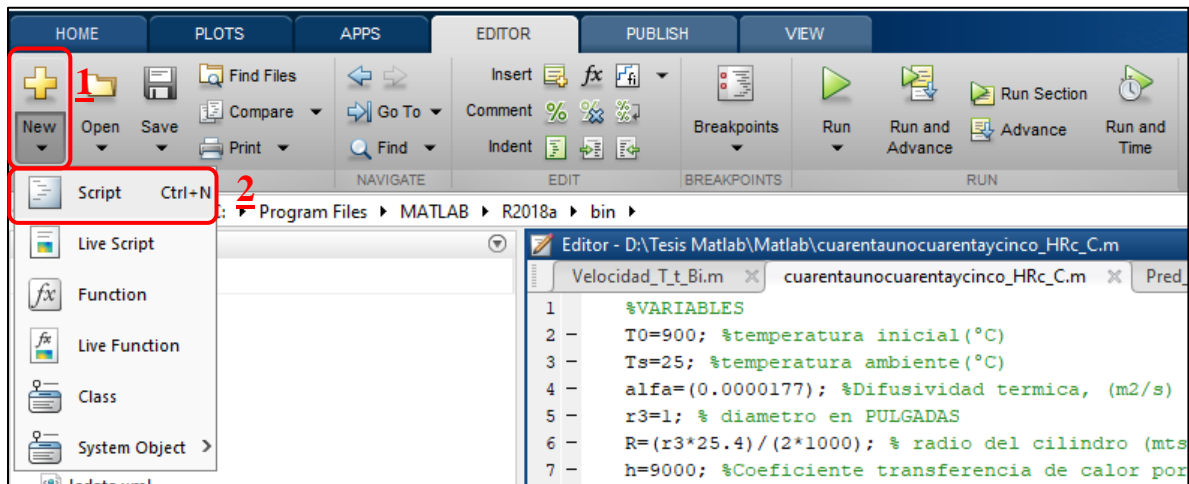


Figura 30. 1° etapa de creación de fichero M.

Luego se procede a guardar dicho script con el nombre del archivo que en este caso es “Pred_Sis_Tesis”. Es importante que el nombre no tenga espacios o de lo contrario el sistema no permite guardar el archivo. Como se muestra en la Figura 31.

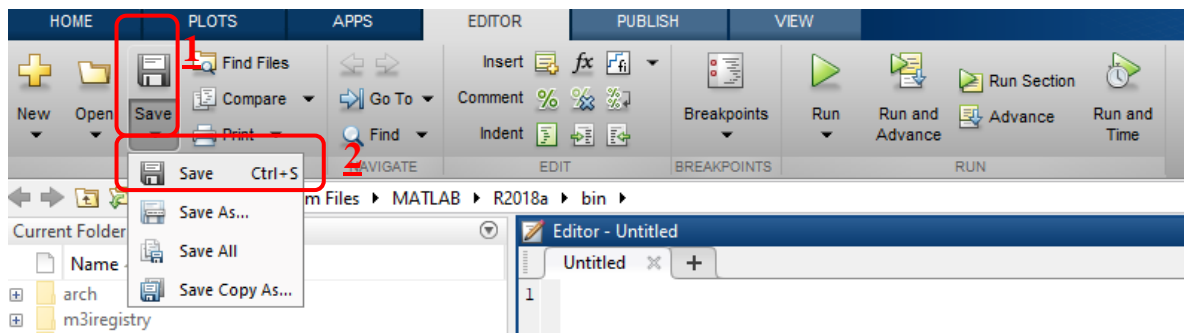


Figura 31. Guardado de script.



Con el script en blanco en el editor de Matlab, se continúa con la carga de información siguiendo los pasos según Flowsheet 2:

- Paso 1

En esta etapa se detallan las variables o parámetros a cargar dentro del sistema de predicción de dureza, estos datos introducidos dependen del tratamiento térmico a realizar.

```
%VARIABLES  
T0=900; %temperatura inicial(°C)  
Ts=30; %temperatura medio enfriamiento(°C)  
alfa=0.0000177; %Difusividad térmica, (m2/s) (alfa=k/p*Cp)  
R=0.025; % radio del cilindro (mts)  
h=4500; %Coeficiente transferencia de calor por conveccion (W/m2)  
K=60; %Conductividad térmica (W/m*K)
```

- Paso 2

Una vez realizado el paso anterior debemos detallar el número de Biot y las constantes “A” y “λ” (en script se utiliza “k” para simbolizar esta variable). Estos datos obtenidos de la Tabla 4 se colocan de manera matricial según como se describe a continuación:

```
Bi=[0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7,  
0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50, 100];  
k=[0.1412, 0.1995, 0.2814, 0.3438, 0.3960, 0.4417, 0.6170, 0.7465,  
0.8516, 0.9408, 1.0184, 1.0873, 1.1490, 1.2048, 1.2558, 1.5995, 1.7887,  
1.9081, 1.9898, 2.0490, 2.0937, 2.1286, 2.1566, 2.1795, 2.2880, 2.3261,  
2.3455, 2.3572, 2.3809];
```



```
A=[1.0025, 1.0050, 1.0099, 1.0148, 1.0197, 1.0246, 1.0483, 1.0712,  
1.0931, 1.1143, 1.1345, 1.1539, 1.1724, 1.1902, 1.2071, 1.3384, 1.4191,  
1.4698, 1.5029, 1.5253, 1.5411, 1.5526, 1.5611, 1.5677, 1.5919, 1.5973,  
1.5993, 1.6002, 1.6015];
```

- Paso 3

Para calcular el número de Biot se utiliza la siguiente formula:

$$Bi1 = (h * R) / (K)$$

- Paso 4

Los valores de las constantes A1 y K1 se obtienen mediante interpolación con los datos de las matrices cargadas anteriormente. Se utiliza el comando “interp1” para conseguir esta acción. Esta fórmula toma el valor Bi1

```
k1=interp1(Bi, k, Bi1)
```

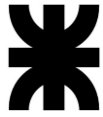
```
A1=interp1(Bi, A, Bi1)
```

- Paso 5

Se definen los vectores T (temperatura de transformación austenítica) que está definida con el valor de 500 °C para los aceros. El otro vector utilizado es el r que mediante el comando “linspace” define un conjunto de valores (100 valores) que van de 0 a R (radio total del cilindro a ensayar).

```
T=500*ones(1,100)
```

```
r=linspace(0,R,100)
```



- Paso 6

Continuando con el desarrollo del Script, se crean las matrices de HRC (dureza) y CR (velocidad de enfriamiento) del acero que se quiere analizar, en este caso utilizaremos los valores correspondientes al acero SAE 1045. Estas matrices muestran las curvas de dureza máximas y mínimas.

```
%Tabla Dureza en función de CR SAE 1045 MAXIMA DUREZA
```

```
HRC=[26, 26, 27, 28, 28, 28.5, 29, 29, 30, 31, 32, 33, 39, 50, 59, 62];  
CR=[3.9, 5.6, 6.9, 8, 9.1, 10.50, 11.9, 14, 18, 23, 31, 43, 70, 110, 170,  
270];
```

```
%Tabla Dureza en función de CR SAE 1045 MINIMA DUREZA
```

```
HRC=[20, 20, 20, 21, 21, 22, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 31, 42, 55];  
CR=[3.9, 5.6, 6.9, 8, 9.1, 10.50, 11.9, 14, 18, 23, 31, 43, 70, 110, 170,  
270];
```

- Paso 7

El siguiente paso busca calcular el valor “t2”, tiempo que tarda en descender la temperatura de la pieza desde T0 (temperatura de austenización) a T (temperatura ubicada a la altura de la nariz de las curvas de las S, cuyo valor aproximado es 500 °C según el intervalo establecido).

```
t2=(-(R^2)/(k1^2*alfa))*log((T-Ts)./(besselj(0,(k1*r/R)))*(T0-  
Ts)*A1));
```

Para evitar errores de cálculo por valores de t2 negativos, se utiliza el comando descripto a continuación:

```
if t2<0  
    CR1=270  
    Return
```



El mismo indica que para valores menores a 0 se elige una alta velocidad de enfriamiento que para los ensayos tomamos como 270 °C/s.

- Paso 8

Luego, se calcula CR1 (velocidad de enfriamiento) de acuerdo a la temperatura de descenso de T0 a T sobre t2.

$$CR1 = (T0 - T) ./ (t2)$$

- Paso 9

Finalmente, para calcular la dureza deseada con respecto al radio, se utiliza el comando “HRC1” mediante interpolación de datos. Obtenido CR1 por el sistema la función “interp1” relaciona este valor con la matriz CR del acero a ensayar y toma el valor de dureza más aproximado.

$$HRC1 = \text{interp1}(CR, HRC, CR1)$$

A modo de ejemplo, se comparte esquema sencillo del funcionamiento del comando Interpl. Para un valor de CR1=16, se quiere conocer la correspondiente dureza con respecto a la tabla de un acero SAE 1040. Dicho valor de CR no figura dentro de dicha tabla, pero por interpolación de datos, el sistema toma los valores entre los intervalos inmediatos de CR=14 y 18, y luego calcula el valor aproximado de HRC=51, que es el dato buscado.

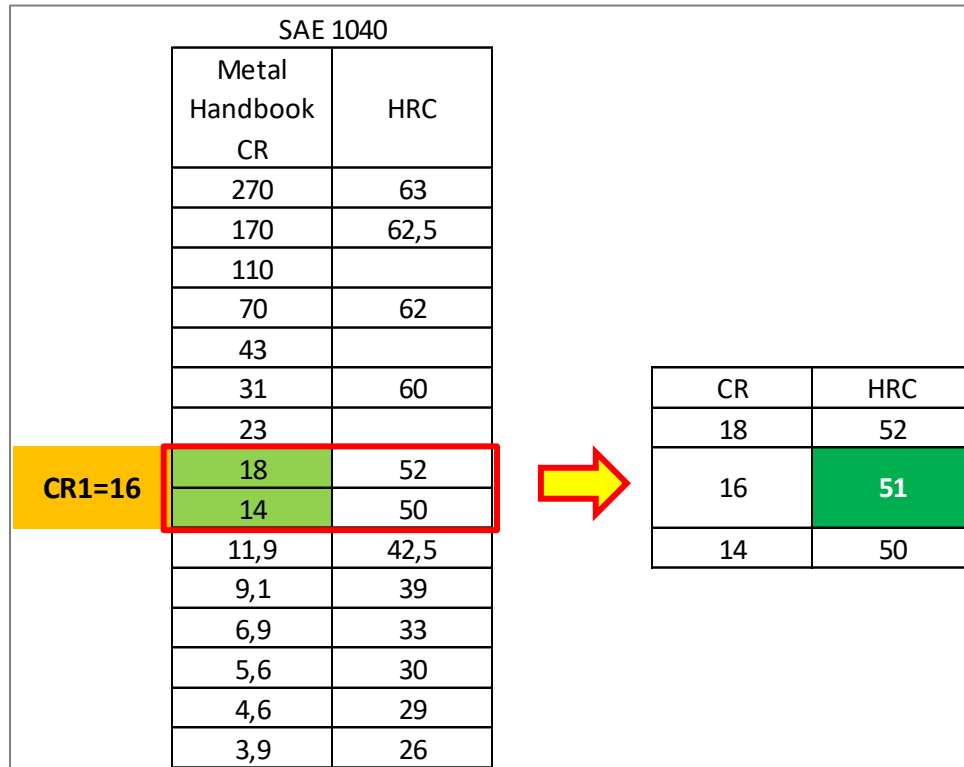


Figura 32. Funcionamiento comando Interpl.

- Paso 10

La curva finalmente se obtiene mediante el comando plot con los valores arrojados por las etapas anteriores.

```

plot(r,HRC1,'displayName',num2str(R))
title('Dureza cn respecto Radio')
xlabel('r=Radio')
ylabel('HRC')
legend('-DynamicLegend','location','southeast')
grid on
hold off
  
```

Teniendo todos los pasos cargados correctamente se ejecuta el programa presionando el botón Run (Figura 33).

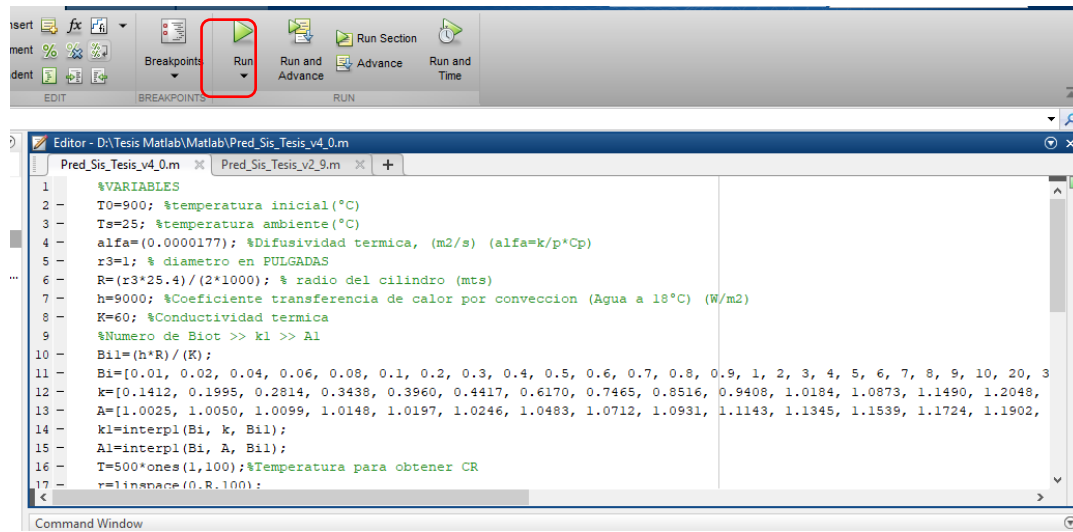


Figura 33. Ejecución del software utilizando el botón Run.

A modo de ejemplo se muestran en la Figura 34 las curvas de dureza de un mismo acero considerando tres diámetros diferentes.

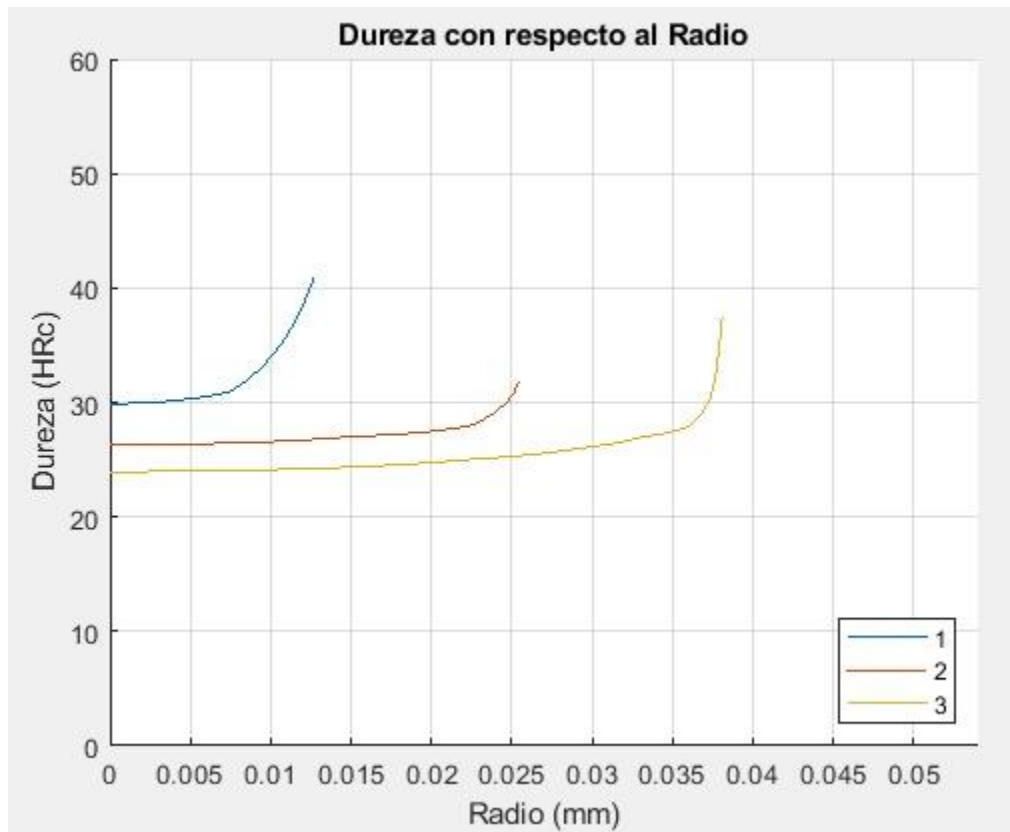


Figura 34. Curvas de dureza de un mismo acero considerando tres diámetros diferentes.

4.7 Creación de interfaz

Para realizar la interfaz del sistema de predicción se utiliza el modo GUIDE de Matlab. Este tipo de operación permite la creación de interfaces de acuerdo con los scripts desarrollados, y permite personalizar botones, box de carga de datos, gráficos, tablas, etc. De esta manera se desarrolla dicha interfaz de acuerdo a los gustos del programador.

En este trabajo se realizó la interfaz de manera que el usuario pueda cargar los datos de manera simple e intuitiva. Para ello, antes de iniciar esta etapa, se diseñó una interfaz tentativa con las cualidades que se buscaba poder manipular en el programa.

Para crearla, se inicia dentro de la interfaz del software escribiendo “guide” en una ventana “comando” de Matlab. Luego se presiona Blank GUI y Ok (Figura 35).

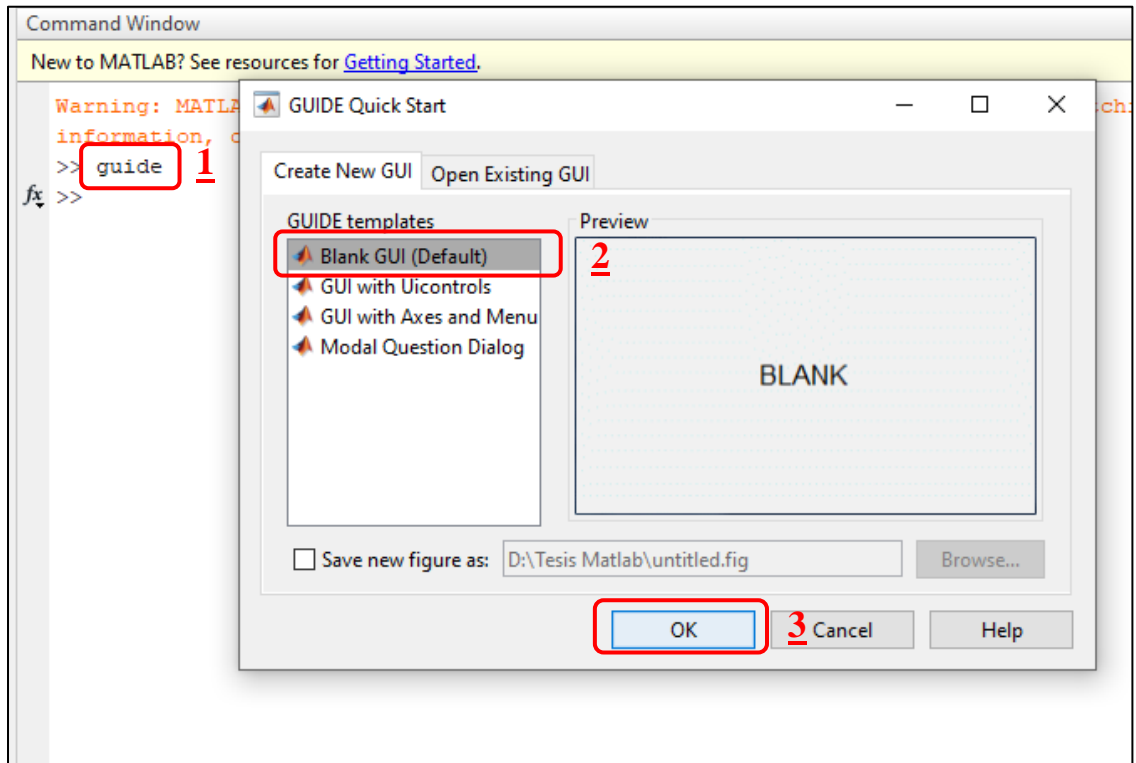


Figura 35. Creación de la interfase.

Aparecerá una ventana como en la Figura 36, donde a la izquierda figura la barra de herramientas y el espacio cuadrículado es donde se colocarán las características deseadas en este trabajo.



Figura 36. Utilización barra de herramientas.

De la barra de herramientas se utilizan 4 “panels” donde van a estar distribuidos a la izquierda de la interfaz. Dentro de cada panel se colocan los “Popupmenu” que permiten tener una lista desplegable con los valores que necesita cada tratamiento. Esto se lo puede observar en la Figura 37.

En “Condiciones iniciales de contorno” se utilizaron los “edit” para carga de valores de temperatura y radios. También se utilizaron los “text” a para describir los box de carga de datos.

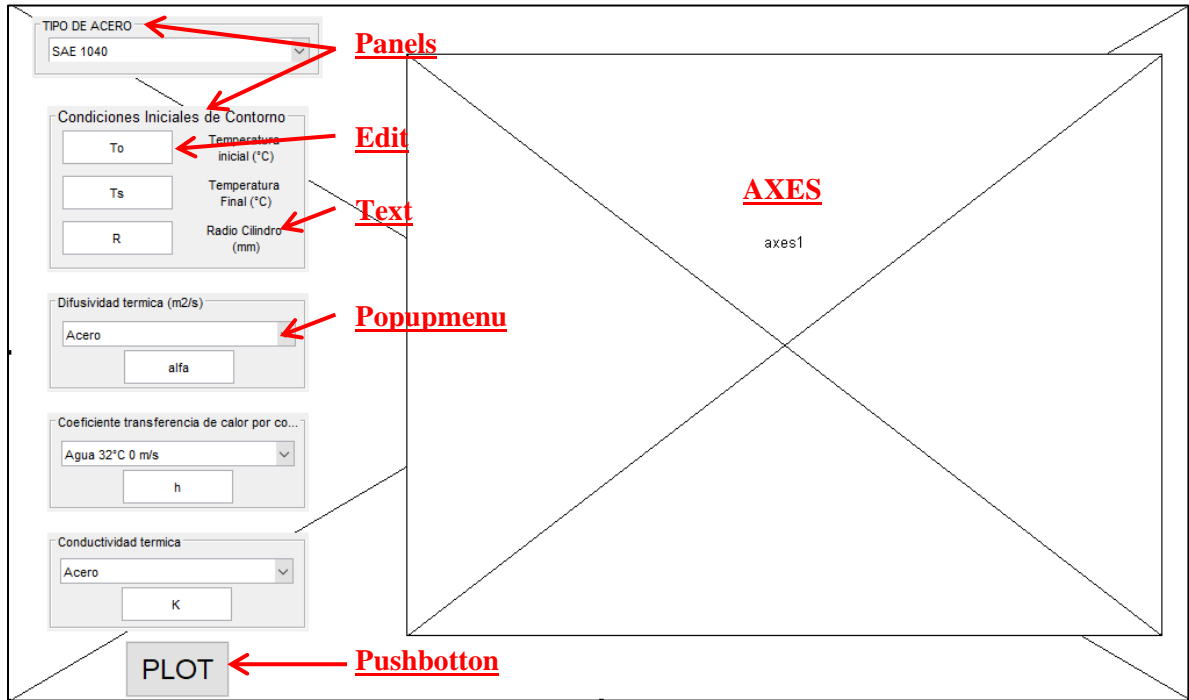


Figura 37. Formación de los Popupmenu.

Se utiliza solo un “pushbutton” con el nombre de Plot, que es el nombre que se utilizó para graficar las curvas de durezas con los parámetros ya establecidos (Figura 37).

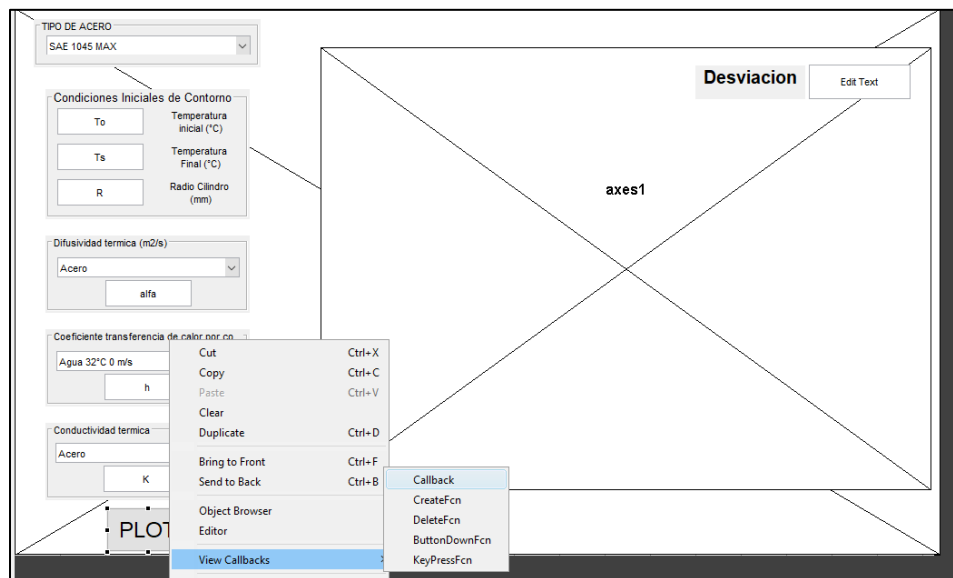


Figura 38. Configuración botón PLOT.

Para configurar el funcionamiento del botón PLOT, dentro de GUIDE, se debe realizar un click derecho sobre el mismo, e ir a la opción Callback, como se muestra en la Figura 38.

La opción Callback abre una ventana del tipo Fichero M (script). Aquí, debajo de la función pushbotton_1, se debe copiar todo el Script detallado en la sección 4.6. La diferencia es que para manipular valores que se colocan dentro de los cuadros de la interfaz, se utilizan distintas funciones, de las cuales no se entrará en detalle.

```

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

%VARIABLES
T0=str2double(get(handles.edit1,'String')); %temperatura inicial(T°C)
Ts=str2double(get(handles.edit2,'String')); %temperatura ambiente (T°C)
alfa=str2double(get(handles.edit5,'String')); %Difusividad termica,
(m²/s) (alfa=k/p* Cp)
ra=str2double(get(handles.edit3,'String')); % radio del cilindro (mts)
R=ra/1000;
h=str2double(get(handles.edit7,'String')); %Coeficiente transferencia de
calor por conveccion (W/m2)
K=str2double(get(handles.edit8,'String')); %Conductividad termica
%Numero de Biot >> kl >> Al
Bi=(h*R)/(K);
Bi=[0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8,
0.9, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50, 100];
k=[0.1412, 0.1995, 0.2814, 0.3438, 0.3960, 0.4417, 0.6170, 0.7465,
0.8516, 0.9408, 1.0184, 1.0873, 1.1490, 1.2048, 1.2558, 1.5995, 1.7887,
1.9081, 1.9898, 2.0490, 2.0937, 2.1286, 2.1566, 2.1795, 2.2880, 2.3261,
2.3455, 2.3572, 2.3809];
A=[1.0025, 1.0050, 1.0099, 1.0148, 1.0197, 1.0246, 1.0483, 1.0712,
1.0931, 1.1143, 1.1345, 1.1539, 1.1724, 1.1902, 1.2071, 1.3384, 1.4191,
1.4698, 1.5029, 1.5253, 1.5411, 1.5526, 1.5611, 1.5677, 1.5919, 1.5973,
1.5993, 1.6002, 1.6015];
kl=interp(Bi, k, Bi);
Al=interp(Bi, A, Bi);
T=500*ones(1,100);%Temperatura para obtener CR
r=linspace(0,R,100);
%Tabla Dureza en funcion de CR SAE 1045 MAXIMA DUREZA
HRCmax=[26, 26, 26, 27, 28, 28, 28.5, 29, 29, 30, 31, 32, 33, 39, 50, 59,
62, 62];
CRmax=[0.5, 3.9, 5.6, 6.9, 8, 9.1, 10.50, 11.9, 14, 18, 23, 31, 43, 70,
110, 170, 270, 1000];
%Tabla Dureza en funcion de CR SAE 1045 MINIMA DUREZA
HRCmin=[20, 20, 20, 20, 21, 21, 22, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 31, 42,
55];
CRmin=[0.5, 3.9, 5.6, 6.9, 8, 9.1, 10.50, 11.9, 14, 18, 23, 31, 43, 70,
110, 170, 270];
hold on
axis([0 0.05 20 60]);
t2=(-(R²)/(kl²*alfa))*log((T-Ts)/((besselj(0,(kl*r/R)))*(T0-Ts)*Al));
if t2<0
CRl=270;
return;
end
  
```

Figura 39. Tabla de máxima dureza y mínima dureza.

La carga de valores de dureza se agrega de la misma manera, que lo detallado en 4.6, sin modificaciones (ver Figura 39 en “Tabla de MÁXIMA DUREZA y MÍNIMA DUREZA”). Si se desea cargar las durezas de otros tipos de aceros, estos se deberían cargar de la misma manera que el acero 1045, en forma matricial.

Por último se insertan dos “Axes” que son cuadros para gráficos. En Axes1 se utiliza para colocar los gráficos de durezas deseados. Mientras que en Axes2 se utiliza para colocar una imagen de fondo al programa. El resultado final se puede observar en la Figura 40.

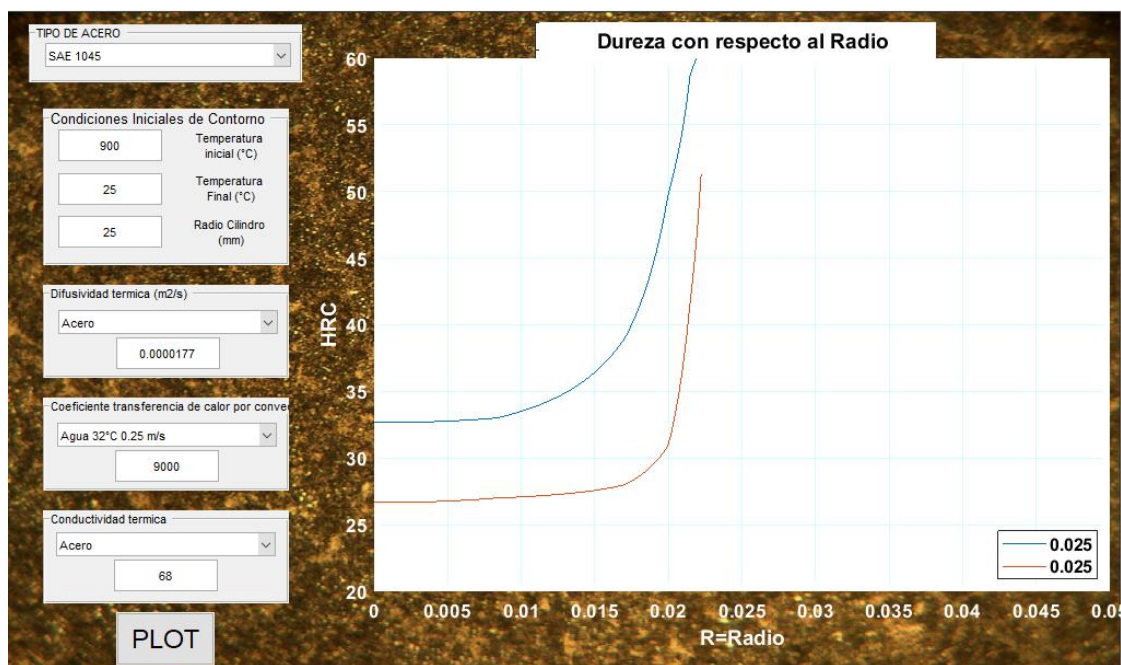
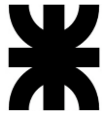


Figura 40. Resultado final.



4.8 Cálculo de error o incertidumbre

Para el cálculo de error o incertidumbre, se utilizaron las siguientes ecuaciones [17]:

$$X_{med} = \frac{x_{med1} + x_{med2} + x_{med3} \dots + x_{medi}}{n} \quad (24)$$

X_{med} es la media de los valores reales medios de durezas obtenidos por Grossman y “n” la cantidad de muestras consideradas.

El *error absoluto* se define como la diferencia positiva entre el valor real X_{med} por cada valor de dureza estimado.

$$E_{abs} = \frac{|X_{med} - x_i|}{n_i} \quad (25)$$

El *error relativo* se define como el cociente del error absoluto y el valor real, x , de la magnitud. Esta la expresamos en porcentajes (%).

$$E_r = \frac{E_{abs}}{X_{med}} \quad (26)$$

El cálculo de la *varianza* es la medida de la variación de una serie de observaciones respecto de la media. Equivale a la dispersión respecto de la media en una serie de datos continuos.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_{med})^2}{n - 1} \quad (27)$$

En general, es difícil interpretar el significado del valor de una varianza, porque las unidades en las que se le expresa son valores elevados al cuadrado. Debido en parte a esta razón, es más frecuente el uso de la raíz cuadrada de la varianza, representada por la letra griega σ o S .



$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_{med})^2}{n - 1}} \quad (28)$$

Para calcular las formulas antes dicha, se utilizó el Excel y se agregaron estos valores a cada gráfico de curva generada por Matlab.

Por último se calcula el *coeficiente de variación*. Este equivale a la desviación típica expresada en porcentaje respecto de la media aritmética.

$$Cv = \frac{S}{X_{med}} \quad (29)$$

A continuación se detallan los errores o incertidumbres calculados con ayuda de las ecuaciones citadas anteriormente, dichos errores se deben potencialmente a los siguientes aspectos:

1) Ecuaciones originales de conducción de calor a problema en forma adimensional: Las ecuaciones originales de conducción de calor poseen 8 variables independientes. Con la ayuda de la expresión en forma adimensional se reduce el número de variables independientes y de parámetros, de ocho a tres como se muestra en la Figura 41. Esto hace que sea muy práctico realizar estudios paramétricos y evitar resultados en forma gráfica. Esta reducción de variables trae aparejado la pérdida de precisión al momento de calcular con las ecuaciones adimensionales.



a) Problema original de conducción de calor:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad T(x, 0) = T_i$$

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = 0, \quad -k \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = h[T(L, t) - T_\infty]$$

$$T = F(x, L, t, k, \alpha, h, T_i, T_\infty)$$

b) Problema en forma adimensional:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} = \frac{\partial \theta}{\partial \tau}, \quad \theta(X, 0) = 1$$

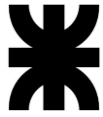
$$\frac{\partial \theta(0, \tau)}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial \theta(1, \tau)}{\partial X} = -\text{Bi}\theta(1, \tau)$$

$$\theta = f(X, \text{Bi}, \tau)$$

Figura 41. Reducción del número de variables.

2) Tiempo adimensional mayor a 0,2 que resume la ecuación a un término: Como se explicó en 4.1.2 para el cálculo de la ecuación (13), suele ser necesaria el cálculo de una serie infinita de problemas analíticos y por lo tanto la evaluación de un número infinitos de términos. Pero debido a que a medida que la suma de los términos crece conforme aumenta n, θ decrece rápidamente acercándose a cero. Por lo tanto, se toma los primeros términos de la ecuación (13) y esta queda resumida en la ecuación (16).

3) El primer paso en la aplicación del análisis de sistemas concentrados es el cálculo del número de Biot y la valoración de la aplicabilidad de este procedimiento. Es posible que se desee utilizar este tipo de análisis, incluso cuando no se satisface el criterio $\text{Bi} < 0.1$ (gran precisión), si una gran exactitud no es la preocupación principal.



Debido a que se eligieron las ecuaciones de conducción transitoria de calor, por su mera simplicidad, es que se pierde mucha exactitud al momento de utilizar el sistema de predicción. Por ejemplo para 1 pulgada se tiene un valor 15 veces mayor a 0.1 y a medida que el diámetro de la probeta aumenta mayor es el número de Bi y por ende menor la precisión en los cálculos de cilindros más gruesos.

$$Bi = 1,4817 \text{ (1 pulgada)}$$

$$Bi = 7,4083 \text{ (5 pulgadas)}$$

4) Se debe mencionar que, en la mayor parte de los casos, un 15% de incertidumbre en el coeficiente de transferencia de calor por convección h se considera “normal” y “esperado”. Suponer que h es constante y uniforme también es una aproximación de validez cuestionable, en especial para configuraciones geométricas irregulares. Por lo tanto, en ausencia de suficientes datos experimentales para la configuración geométrica considerada, no se puede afirmar que los resultados sean mejores que $\pm 15\%$.

5) Las variaciones del gradiente de temperatura, dentro de un cilindro, sin importar su espesor puede ser de alrededor del 5%. En las fórmulas utilizadas para este trabajo, se tomó este gradiente como uniforme. Esta afirmación solo se condice cuando se satisface que $Bi < 0,1$. Sin embargo como se explicó en el apartado 3 de este título, el número de Bi calculado en el software es mayor 0.1. Por ende nuestro trabajo posee una incertidumbre al tomar el gradiente de temperatura como uniforme en la sección del cilindro.

5. Aplicación del programa de predicción al Acero SAE 1045

5.1 Propiedades del Acero SAE 1045

5.1.1 Características

La aleación elegida para el análisis de datos en este trabajo fue el acero SAE 1045 el cual es un acero de aplicación universal que proporciona un nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo con respecto a los aceros de baja aleación. Frecuentemente se lo utiliza para elementos endurecidos a la llama o por inducción. Este acero puede ser usado en condiciones de suministro laminado en caliente o con tratamiento térmico (templado en aceite y revenido, templado en agua y revenido).

Es un acero de baja templabilidad que puede ser endurecido totalmente en espesores delgados por temple en agua. En secciones más gruesas se puede obtener un endurecimiento parcial de la sección de la pieza y el incremento de la resistencia será proporcional a la capa o espesor endurecido, al ser deformado en frío se presenta un incremento en la dureza y la resistencia mecánica.

Su composición química se puede ver en la siguiente Tabla 7.

COMPOSICION QUÍMICA	C %	Mn %	P máx. %	S máx. %	Si máx. %
Análisis típico en %	0.43 0.50	0.6 0.9	0.04	0.05	0.2 0.4

Tabla 7. Composición química del acero SAE 1045.



5.1.2 Maquinabilidad

Puede ser mecanizado fácilmente en estado recocido, normalizado o templado, tomando como referencia al 12L14 (100% de maquinabilidad). El acero 1045 presenta la siguiente maquinabilidad:

En estado calibrado = 55%

En estado recocido = 68 - 70%

Este acero presenta un buen acabado superficial y su mecanizado se caracteriza por presentar una larga vida útil de la herramienta de corte.

5.1.3 Conformabilidad

SAE 1045 puede ser conformado fácilmente en caliente a temperaturas entre 980 y 1230 °C. Este material no debe ser deformado en frío extensivamente sin realizar recocidos intermedios. Un recocido subcrítico será suficiente excepto cuando un trabajo severo en frío ha de ser seguido por más trabajo en frío en cuyo caso se requiere de un recocido total.

5.1.4 Soldabilidad

El acero SAE 1045 está cerca al límite superior de aceros con porcentaje de carbono que pueden ser soldados satisfactoriamente por todos los métodos comunes. Sin embargo, precalentamiento y postcalentamiento pueden ser necesarios en función del espesor Usualmente hay menos necesidad de precalentamiento y postcalentamiento con procesos de soldadura con gas que con métodos de soldadura por arco debido a que el proceso de soldadura por gas genera una zona afectada por el calor mayor que el proceso de arco eléctrico y por tal razón el enfriamiento es más lento. Se recomienda el uso de electrodos de bajo hidrogeno.



5.1.5 Aplicaciones

Este acero de medio carbono se usa cuando la resistencia y dureza obtenidas por el tratamiento térmico o por deformación en frío, son suficientes para satisfacer las condiciones de servicio requeridas. Es utilizado en la industria automotriz (productos forjados y estampados). Se usa en partes de máquinas que requieran dureza y tenacidad como: manivelas, chavetas, pernos, bulones, engranajes de baja velocidad, acoplamientos, árboles, bielas, cigüeñales, ejes de maquinaria de resistencia media, piezas de armas, cañones de fusiles, espárragos, barras de conexión, tornillería grado 5, pernos de anclaje, fabricación de herramientas agrícolas, mecánicas y de mano forjadas de todo tipo como: hachas, azadones, rastrillos, picas. martillos, palas, barretones, llaves, etc.

5.2 Curvas de dureza U para un acero SAE 1045

A continuación se observan los gráficos de las curvas U de un acero SAE 1045 con la siguiente composición: *carbón 0,48%, manganeso 0,60%, fósforo 0,022%, sulfuro 0,016%, silicio 0,17%*.

En la primera imagen (Figura 42) se muestran distintos diámetros de probetas ensayadas con un tratamiento de temple en agua. En dicho gráfico se percibe el aumento de la dureza con la disminución del diámetro de la pieza. Esto es debido al efecto masa.

Si realizamos un temple en agua de piezas de diámetro pequeño podemos observar un rápido enfriamiento en la superficie y núcleo, consiguiendo una estructura martensítica en toda la sección. No sucede lo mismo con piezas de gran tamaño, como por ejemplo en probetas de 5 pulgadas de diámetro, las cuales se enfriarán más lentamente en comparación con piezas de

menor sección. El efecto masa, y su consecuente menor evacuación del calor en la probeta devienen en la obtención de una estructura que no es totalmente martensítica, sino que también se obtienen estructuras perlíticas con una eventual disminución de la dureza en la superficie de las mismas.

Por lo que podemos observar, que la dureza será progresivamente más baja a medida que aumentamos el tamaño de la pieza (figura 42).

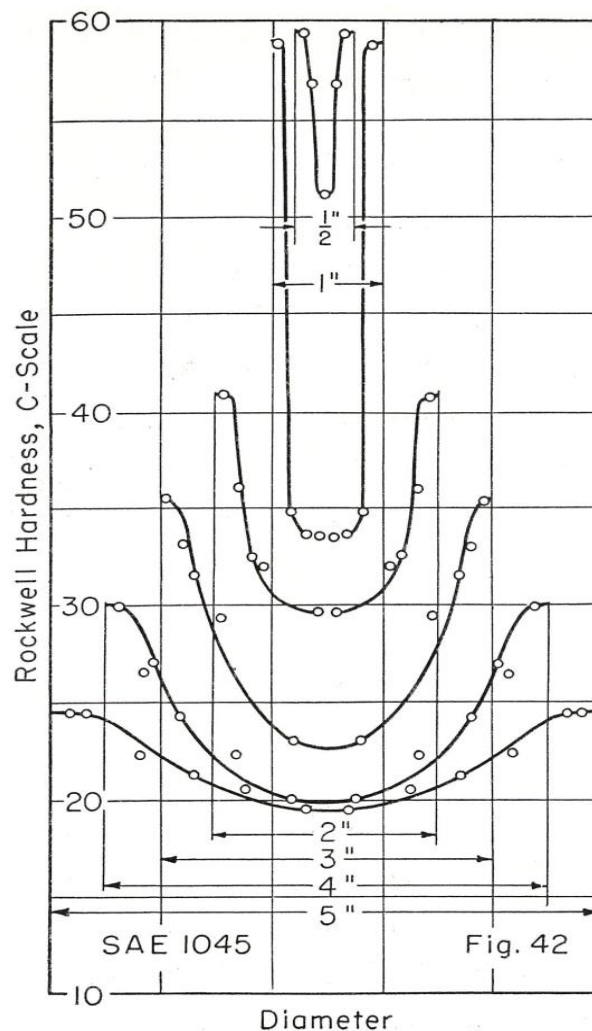


Figura 42. Curvas U de Grossman para un acero SAE 1045 de diferentes diámetros templados en agua.

La Figura 43 muestra ensayos de probetas de distintos diámetros con un tratamiento de temple en aceite, el cual es uno de los medios de enfriamiento más utilizados para temple, cuando se necesita que el mismo sea menos drástico.

La velocidad de enfriamiento es solo un tercio de la velocidad de las mismas probetas templadas en agua, y como resultado la dureza obtenida es menor.

Cuando la pieza más chica es templada en agua la superficie se convierte completamente en martensita, pero, cuando es templada en aceite esta superficie se convierte en perlita que es más blanda. Esto significa que un acero tal como el 1045, tiene baja templabilidad y la dureza cae cuando es templado en aceite.

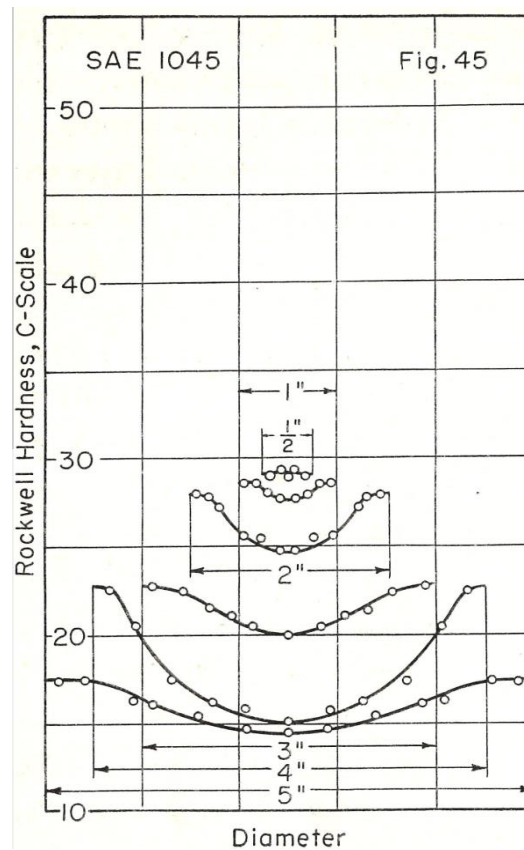


Figura 43. Curvas U de Grossman para un acero SAE 1045 de diferentes diámetros templados en aceite.



5.3 Resultados de la predicción

A continuación, se resumirán los resultados obtenidos mediante la utilización del sistema de predicción desarrollado, para probetas de acero SAE 1045 enfriadas en agua y en aceite.

Dichos resultados serán comparados con los datos que proporcionan las curvas U de Grossman obtenidas de la bibliografía; y finalmente, se calcularán las desviaciones encontradas entre los valores predictos y los obtenidos por la bibliografía.

Comparativo de las curvas U de Grossman vs Sistema predictivo para templado en Agua

Las variables elegidas para graficar las curvas en el sistema predictivo fueron las siguientes:

- $T_o = 900 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_s = 32 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\alpha = 0,0000177 \text{ m}^2/\text{s}$.
- Radios= 1, 2, 3, 4 y 5 pulgadas
- $h = 9000 \text{ W/m}^2$. Correspondiente al agua a $32 \text{ }^\circ\text{C}$ agitada a $0,25 \text{ m/s}$
- $K = 60 \text{ W/m}\cdot\text{ }^\circ\text{C}$. Conductividad térmica del acero SAE 1045

El libro de Grossman especifica las variables correspondientes al tipo de acero, su composición y los radios de las probetas ensayadas. Los parámetros de T_o , T_s y h , se eligieron de acuerdo a un ensayo convencional de tratamiento de temple en agua.

El comparativo se realizó con la ayuda de software Microsoft Excel, donde se introdujeron los datos obtenidos por el sistema de predicción. Estos corresponden a la dureza

máxima (HRCmax) y dureza mínima (HRCmin), en escala Rockwell C, con respecto al radio. Esto se grafica como dos curvas continuas, donde la máxima es en azul y la mínima en color naranja.

Luego se realizó una tabla de coordenadas de durezas versus radio según las curvas de la Figura 42. En los gráficos se muestran como puntos solidos de color violeta y son descriptos como “HRC (Grossman)”.

A continuación se muestran las curvas comparativas de las probetas de diámetro 1 a 5 pulgadas.

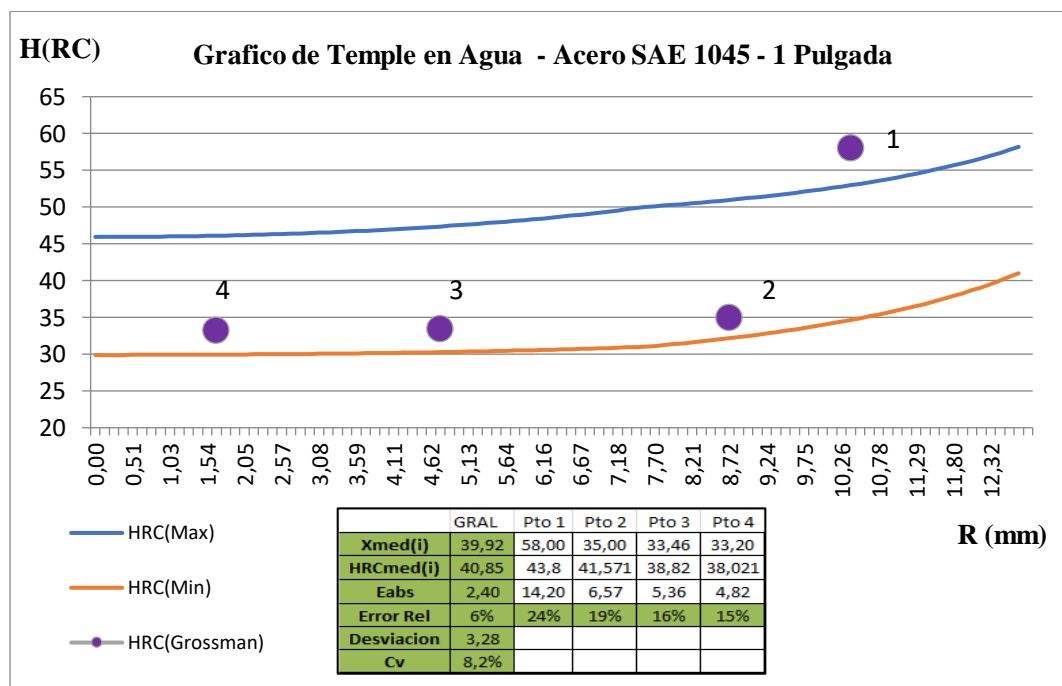


Figura 44. Gráfico de temple en agua para el acero SAE 1045 de 1 pulgada de diámetro.

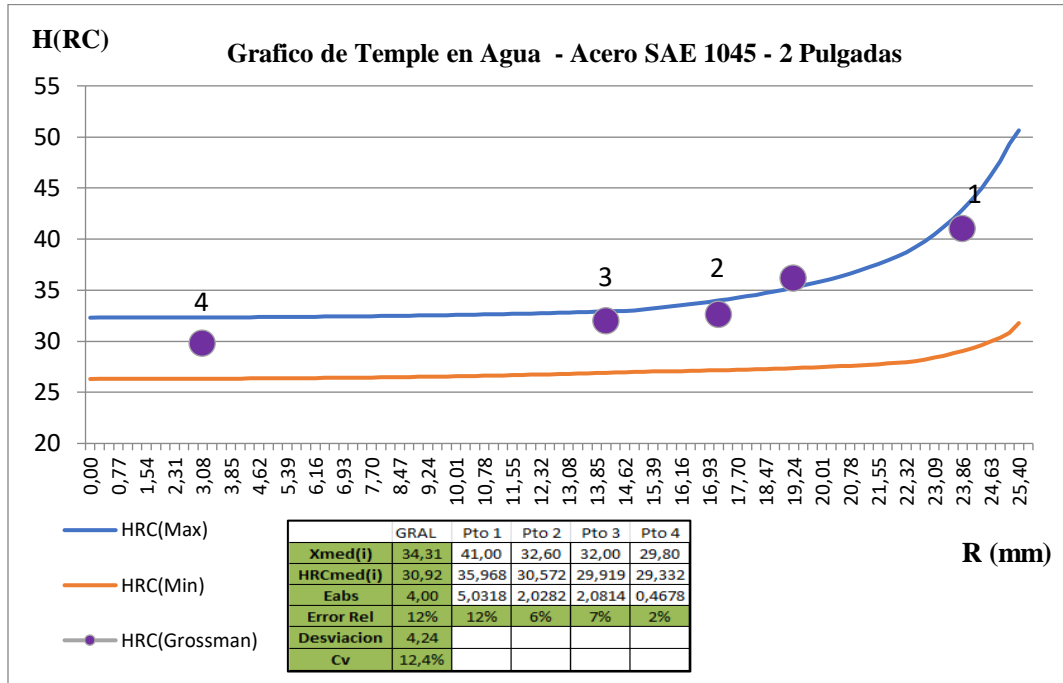


Figura 45. Gráfico de temple en agua para el acero SAE 1045 de 2 pulgadas de diámetro.

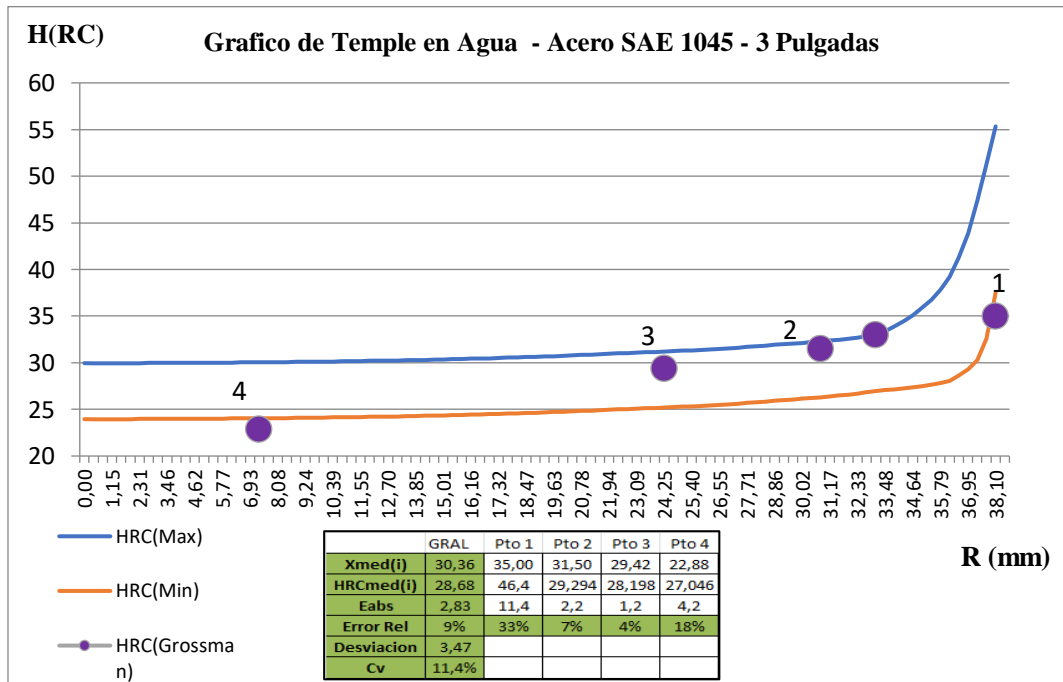


Figura 46. Gráfico de temple en agua para el acero SAE 1045 de 3 pulgadas de diámetro.

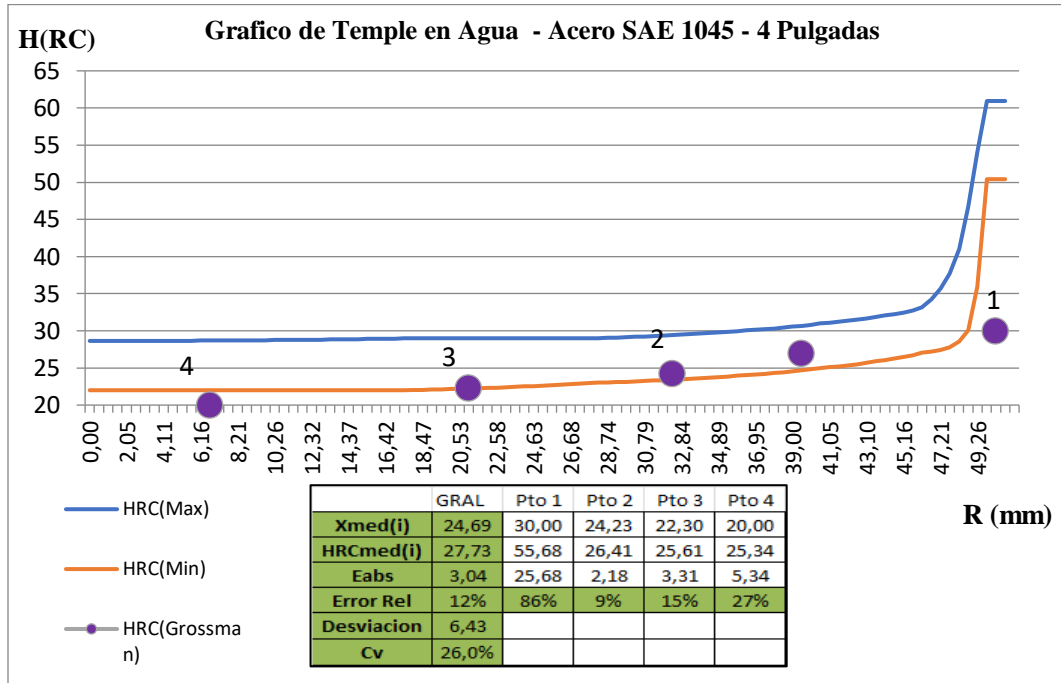


Figura 47. Gráfico de temple en agua para el acero SAE 1045 de 4 pulgadas de diámetro.

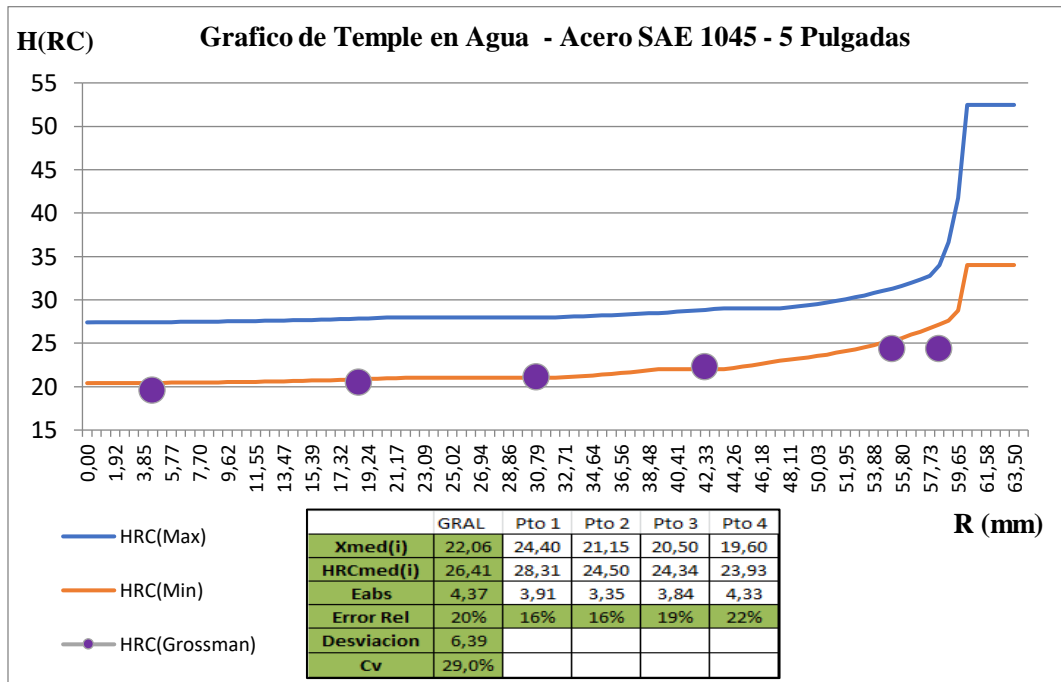


Figura 48. Gráfico de temple en agua para el acero SAE 1045 de 5 pulgadas de diámetro.



Cada uno de los gráficos posee anexada una tabla en donde se calculan los errores correspondientes a distintos puntos de la sección de la probeta en análisis. Se calculan los errores absoluto y relativo entre el valor calculado y el valor medio obtenido del cálculo entre el valor máximo y mínimo para las curvas en dicho punto de análisis. También se calcula la desviación estándar y el coeficiente de variación como se describió en el punto 4.8.

A continuación, se muestra el cálculo de los errores anteriormente mencionados pero tomando como referencia todos los valores de dureza del centro y la superficie de todas las probetas (de 1 a 5 pulgadas).

Xmed(sup)	37,7 HRC	Xmed(cen)	24,94 HRC
HRC med (sup)	47,22 HRC	HRC med (cen)	28,682 HRC
Eabs (sup)	12,92 HRC	Eabs (cen)	3,938 HRC
Erelativo (sup)	34%	Erelativo (cen)	16%
Desviacion (sup)	15,6 HRC	Desviacion (cen)	4,3 HRC
Coef Var. (sup)	41%	Coef Var.(cen)	17%

Tabla 8. Cálculo de incertidumbre en la superficie y el centro de probetas templadas en agua.

En líneas generales podemos observar que un gran porcentaje de los puntos de durezas ensayados de la Figura 42 se encuentran dentro de las bandas de templabilidad obtenidas por el sistema predictivo, para los cinco diámetros templados en agua.

Sin embargo, el coeficiente de variación general de cada gráfico aumenta al aumentar el diámetro de la probeta.

También se puede evidenciar según Tabla 8 que la incertidumbre es mayor en la superficie que en el centro de la probeta.

Sin embargo la forma del gráfico del sistema de predicción es contraria a la que se puede visualizar en las curvas de dureza de Grossman. En el sistema predictivo se tiene un aumento



pronunciado de la dureza mientras mayor es el diámetro de la probeta, en cambio, en las curvas de Grossman las durezas en la superficie disminuyen y se aplanan mientras mayor es el diámetro.

Comparativo de las curvas U de Grossman vs Sistema predictivo para templado en Aceite

Las variables elegidas para graficar las curvas en el sistema predictivo fueron las siguientes:

- $T_o = 900 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_s = 43 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\alpha = 0,0000177 \text{ m}^2/\text{s}$.
- Radios= 1, 2, 3, 4 y 5 pulgadas
- $h = 1000 \text{ W/m}^2$. Correspondiente a aceite convencional a $43 \text{ }^\circ\text{C}$ agitado a $0,51 \text{ m/s}$
- $K = 60 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$. Conductividad térmica del acero SAE 1045

Tanto los datos como el análisis comparativo se realizaron de igual manera que para el templado en agua explicado en el punto anterior.

A continuación, se muestran las curvas comparativas de las muestras de diámetro 1 a 4 pulgadas para temple en aceite.

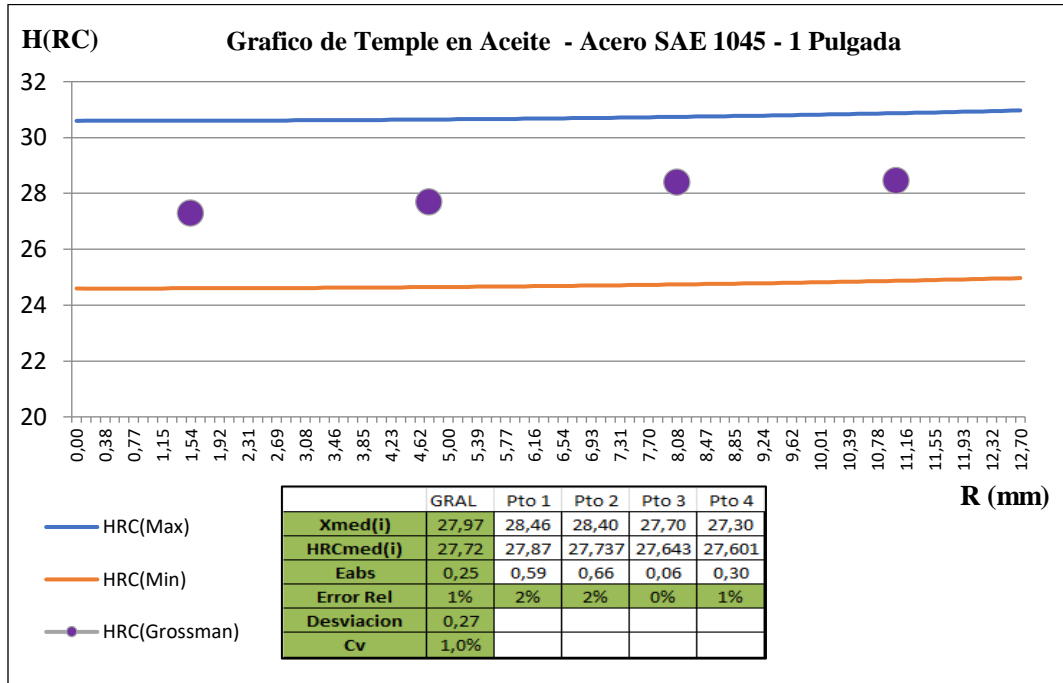


Figura 49. Gráfico de temple en aceite para el acero SAE 1045 de 1 pulgada de diámetro.

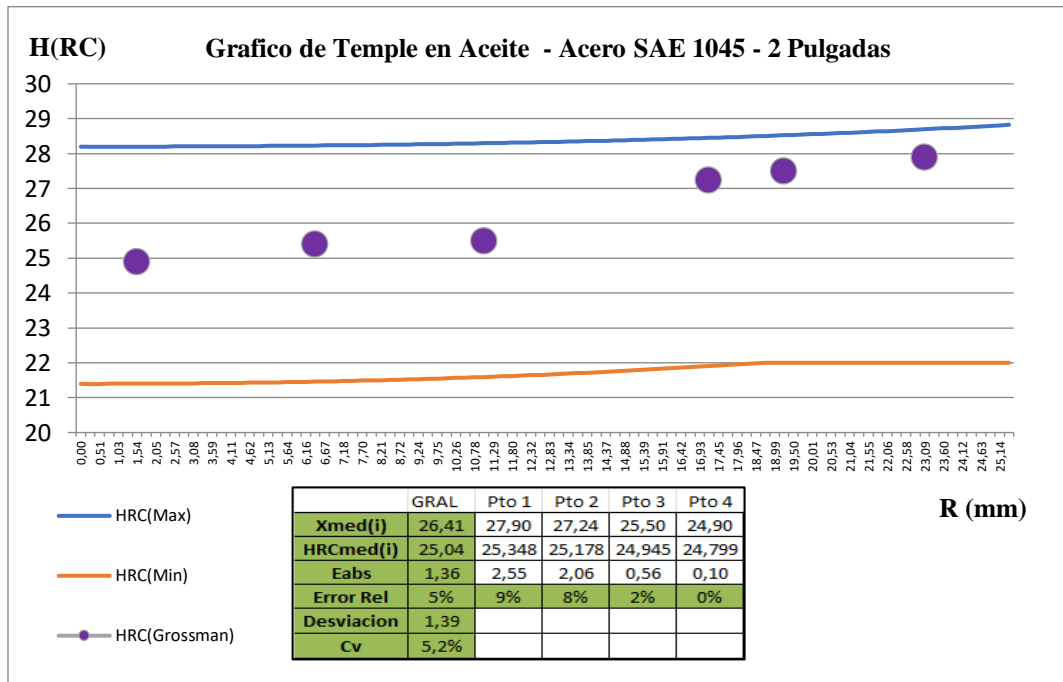


Figura 50. Gráfico de temple en aceite para el acero SAE 1045 de 2 pulgadas de diámetro.

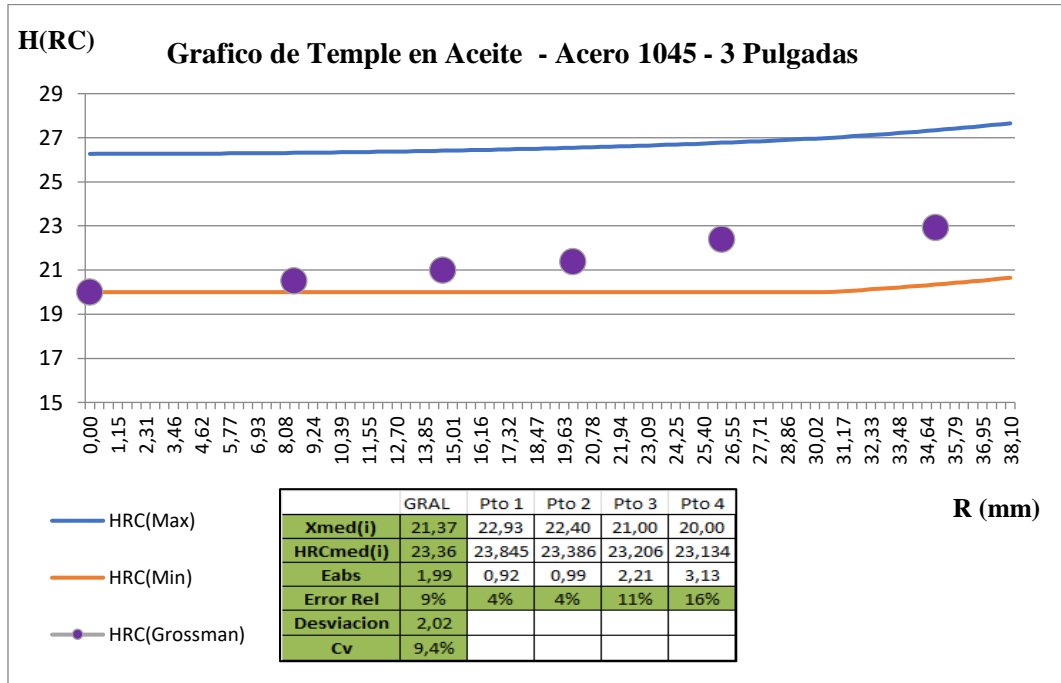


Figura 51. Gráfico de temple en aceite para el acero SAE 1045 de 3 pulgadas de diámetro.

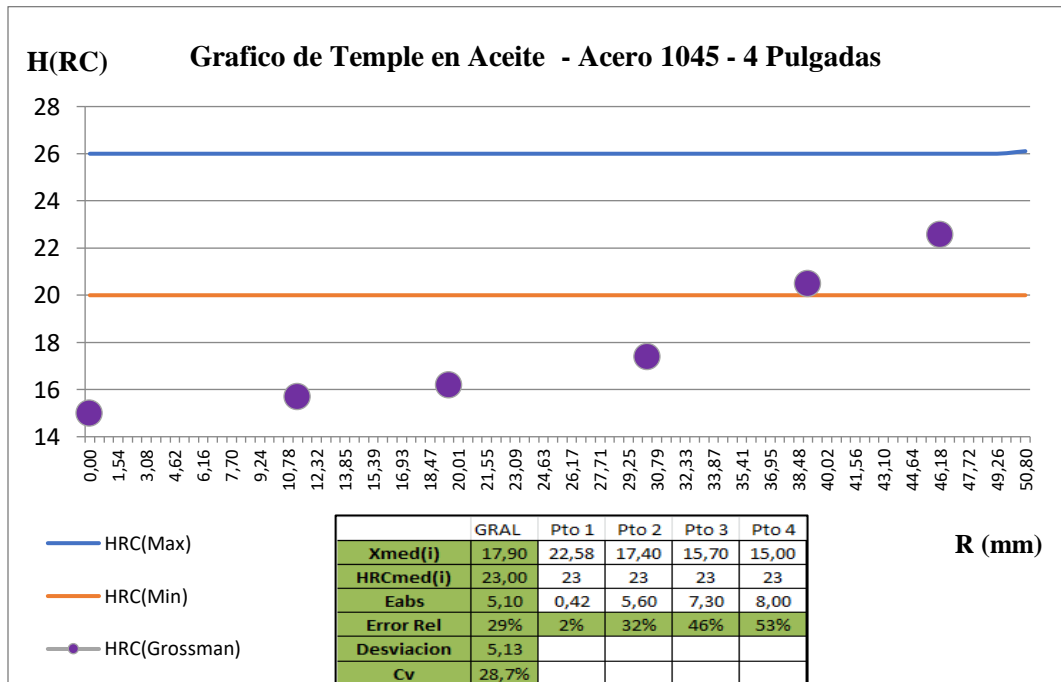


Figura 52. Gráfico de temple en aceite para el acero SAE 1045 de 4 pulgadas de diámetro.

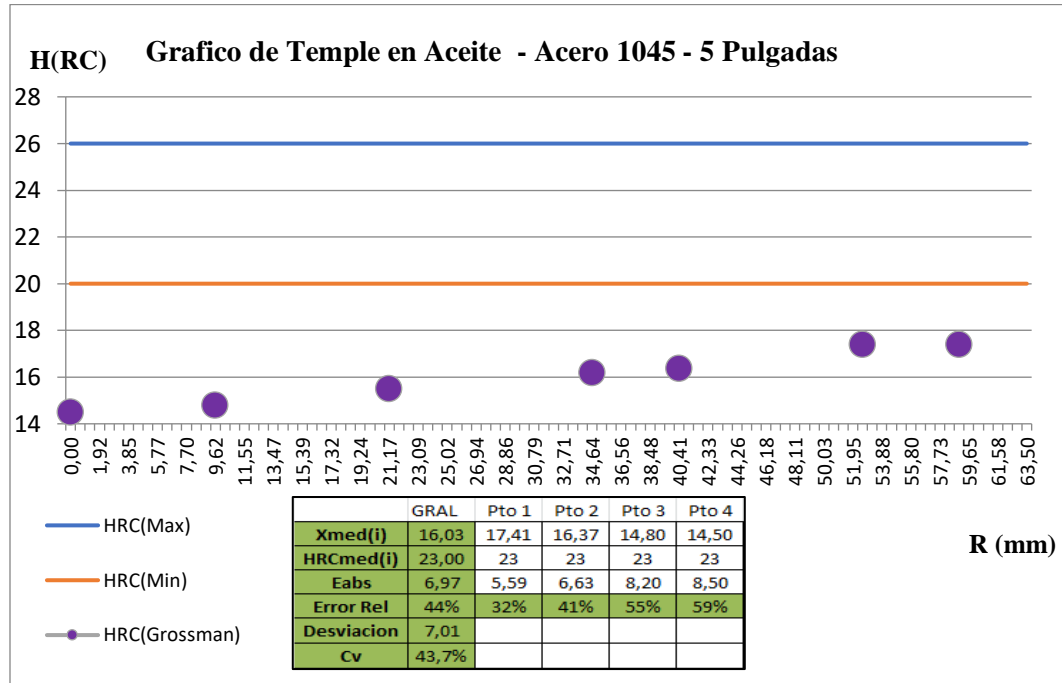


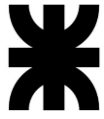
Figura 53. Gráfico de temple en aceite para el acero SAE 1045 de 5 pulgadas de diámetro.

Xmed(sup)	23,86 HRC	Xmed(cen)	20,3 HRC
HRC med (sup)	32,84 HRC	HRC med (cen)	24,3 HRC
Eabs (sup)	10,18 HRC	Eabs (cen)	4,0 HRC
Erelativo (sup)	0,43 %	Erelativo (cen)	0,2 %
Desviacion (sup)	20,66 HRC	Desviacion (cen)	5,4 HRC
Coef Var. (sup)	87 %	Coef Var.(cen)	27 %

Tabla 9. Cálculo de incertidumbre en la superficie y el centro de probetas templadas en aceite.

Podemos apreciar que en los cilindros de 1 y 2 pulgadas de diámetro los puntos experimentales tomados de la bibliografía [4] se encuentran entre la banda de templabilidad.

En el caso del cilindro de 3 pulgadas de diámetro las durezas ensayadas se encuentran más próximas a la banda de templabilidad mínima, asimismo es un resultado aceptable ya que como vemos se encuentran entre ambas curvas y el error relativo de cada punto de la probeta es menor al 25 %.



En los cilindros de 4 y 5 pulgadas se divisan errores relativos por encima del 25%. Estos valores son pocos certeros y se alejan mucho de la realidad.

Al igual que lo visto en la tabla de temple por agua (Tabla 8), en la Tabla 9 se puede observar que la incertidumbre es mayor en la superficie que en el centro, pero en este caso con valores de incertidumbre muy elevados como para considerar correcto el resultado predictivo.

Las desviaciones que se evidenciaron en este apartado se deben a que el sistema no tiene en cuenta el efecto masa de las probetas. Esto quiere decir que la disipación de calor en la superficie de una pieza, es mucho más lenta cuando mayor es su diámetro, por ello se puede apreciar que en los gráficos de [13] la dureza en la superficie disminuye al aumentar el espesor, mientras que en los gráficos del sistema se mantiene casi constante la dureza superficial al aumentar el diámetro. Otros factores a tener en cuenta al hablar de los desvíos, es todo lo explicado en 4.8, donde se explican las simplificaciones de ecuaciones teóricas.

La última desviación observada es la de la gran diferencia de valores cuando el coeficiente de transferencia de calor h disminuye. Esto es debido a que mientras menor es h el sistema calcula curvas casi constantes. Este es otro efecto de los errores detallados en 4.8.



6. Conclusiones

6.1 Conclusión general

Finalmente se logró desarrollar una herramienta computacional que permitió la determinación de durezas de cilindros de distintos tipos de aceros y diámetros enfriados en distintos medios de temple.

Mediante las ecuaciones de transferencia de calor utilizadas se alcanzó la obtención de curvas de durezas para el acero SAE 1045 enfriado en agua y en aceite. De las 10 curvas ejecutadas por el sistema predictivo, 6 de ellas arrojaron valores certeros con respecto a las curvas de ensayos experimentales. Estos corresponden a los diámetros de 1 a 3 pulgadas enfriados en agua y aceite, donde se evidenciaron errores relativos menores al 25 %.

Los resultados con mayor divergencia se obtuvieron en los cilindros de 4 y 5 pulgadas enfriados en aceite.

Por lo dicho anteriormente, se llega a la conclusión que el sistema de predicción logra resultados acordes para probetas con diámetro menor o igual a 3 pulgadas de diámetro templadas en agua o en aceite. Mientras mayor es el diámetro y menor sea el coeficiente de transferencia de calor (h) mayor va a ser la discrepancia encontrada. El sistema no obtiene valores confiables para probetas de diámetro mayor a 3 pulgadas.



6.2 Conclusiones específicas

- ✓ Mediante la utilización del fichero M del software Matlab R2018a se logró la programación de un script para la predicción de valores de dureza mediante la utilización de ecuaciones teóricas de transferencia calor y velocidad de enfriamiento.
- ✓ Para la relación entre dureza y velocidad de enfriamiento de un acero se llegó a las siguientes conclusiones:
 - La dureza es proporcional a la velocidad de enfriamiento.
 - Cada punto de una pieza tiene su velocidad de enfriamiento, esta velocidad depende de la posición.
 - Los puntos de una pieza templada más cercanos al medio del temple tienen mayor velocidad de enfriamiento que los puntos interiores, los cuales se enfrían con menor velocidad por lo que es necesario prestarle especial atención pues de ellos depende que la pieza llegue al estado esperado.
 - La velocidad de enfriamiento de la pieza es mayor en piezas de menor tamaño.
 - Piezas de acero con distintos contenidos de carbono, de igual forma y tamaño, se enfrían en el mismo medio prácticamente con igual velocidad.
- ✓ Se observó que h (coeficiente de transferencia de calor por convección) para el agua es mayor que en los demás medios de temple y que aumenta al aumentar el grado de agitación o velocidad del medio, en cualquiera de los fluidos. Por último se comprobó que el coeficiente h es inversamente proporcional a la temperatura.



- ✓ Se logró obtener una interfaz simple y comprensible logrando una rápida carga de datos para la obtención de los resultados de acuerdo al script creado.
- ✓ Para un acero SAE 1045 templado en agua a 32 °C agitada a 0,25 m/s y templado en aceite convencional a 43 °C agitado a 0,51 m/s, los valores de incertidumbre fueron $C_v < 25\%$ para diámetros entre 1-3 pulgadas, los cuales son valores aceptables que permiten el uso del software con poco margen de error. Mientras que para diámetros mayores, los valores de incertidumbre calculados fueron $C_v > 25\%$ por lo que el sistema no logra ser preciso en estas condiciones.

6.3 Propuesta de mejora

Del análisis profundo realizado en este proyecto se plantean las siguientes recomendaciones para futuros trabajos:

- Trabajar con ecuaciones originales de conducción de calor en lugar de la utilización de ecuaciones en forma adimensional.
- Estudiar la diferenciación de cálculo en la superficie y el resto de la pieza.
- Trabajar las ecuaciones de calor (10) y (11) por volúmenes finitos, resolviendo el sistema de ecuaciones resultantes en forma implícita.
- Cálculo de velocidad de enfriamiento por aplicación de fórmulas matemáticas deducidas por procesos de regresión.



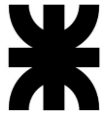
7. Lista de referencia y bibliografía

- [1] Tratamientos Térmicos de los Aceros, Apraiz Barreiro.
- [2] Predicción de dureza en piezas construidas con acero templado y revenido. Rodolfo C. Yanzón, José c. Bocca, Daniel rebollo, Arlington r. Sánchez.
- [3] ASM Metals HandBook Volume 4 - Heat Treating, Varios Autores.
- [4] Principles of Heat Treatment, Marcus Aurelius Grossmann. 1955.
- [5] Transferencia de Calor y Masa. Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar. 4 Ed.
- [6] Manual de Interfaz Gráfica de Usuario en Matlab. Diego Orlando Barragán Guerrero.
- [7] Matlab y sus aplicaciones en las ciencias y la ingeniería. César Pérez López.
- [8] Matlab ® para ingenieros. Holly Moore.
- [9]https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/DMMF/DMMF04/es_DFM_DMMF04_Contenidos/wbsite_43_tratamientos_trmicos_de_los_aceros.html
- [10] SAE J1268. Mayo, 1995.
- [11] Unidad III - 1 Tratamientos Térmicos. Escuela Industrial Ernesto Bertelsen Temple. Ing. Luis Suárez.
- [12]<https://sites.google.com/site/gobanengineeringnotes/materials-testing/hardness-testing/vickers-hardness-test>.
- [13]<https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-coeficiente-de-transferencia-de-calor-por-conveccion-definicion/>.
- [14]<https://www.hardnesstesters.com/test-types/rockwell-hardness-testing>.

[15]https://es.wikipedia.org/wiki/Transferencia_de_calor_por_convecci%C3%B3n#:~:text=La%20transferencia%20de%20calor%20por,calor%20en%201%C3%ADquidos%20y%20gases.

[16]<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7826/VasquezTorresEdwinLibardo2013Anexos.pdf?sequence=2>

[17]https://www.mclibre.org/otros/daniel_tomas/diversificacion/matematicas/Calculo_de_errores.pdf



Anexo I

Fecha:11/04/2020

SOLICITUD DE TEMA DE TRABAJO FINAL DE GRADO

Sr. Director de Departamento:

Me dirijo a Ud. a fin de solicitar la aprobación del tema de TRABAJO FINAL que propongo a continuación:

TEMA:

Nombre: "Simulación de durezas en cilindros teniendo en cuenta sus curvas de enfriamientos y análisis químico"

Descripción: *(Agregar Apéndice con descripción técnica detallada, diagrama de bloques y otros datos que permitan una interpretación completa del tema a desarrollar)*


Tutor de Trabajo Final: *(si el trabajo cuenta con dos o más tutores, repetir este formulario de datos).*

Nombre: Cantero Santiago Marcelo

Cargo: Ayudante primera

Dirección Personal o Laboral: Corriente 68

Tel: 3541651478 e-mail: santiagomcantero@hotmail.com

Firma del Tutor: 

Datos del Alumno: *(si el trabajo es realizado por dos alumnos, repetir este formulario de datos).*

Nombre y Apellido: Esteban Samuel Jimenez

Carrera: Ingeniería Metalúrgica

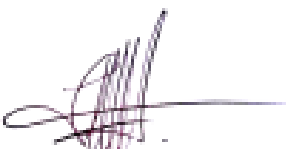
Matrícula: 56698

Materias que faltan aprobar: Conformación Plástica, Aleaciones de metales no ferrosos, Soldadura

Dirección: Evasio Garrone 6940

Localidad: Córdoba Provincia: Córdoba

Tel: 3512617072 e-mail: esteban.sjimenez@gmail.com

Firma del Alumno: 

Datos del Alumno: *(si el trabajo es realizado por dos alumnos, repetir este formulario de datos).*

Nombre y Apellido: Fernando Ezequiel Vaccarello

Carrera: Ingeniería Metalúrgica


Matrícula: 56703

Materias que faltan aprobar: Fundición de metales ferrosos y no ferrosos, Soldadura

Dirección: Vimey del Campo 4314

Localidad: Córdoba Provincia: Córdoba

Tel: 3513114166 e-mail: eevaco@hotmail.com

Firma del Alumno: 



Anexo II

Fecha: 11/04/2020

TRIBUNAL DE ACEPTACIÓN DE TEMA PARA EL DESARROLLO DE TRABAJO FINAL DE GRADO

Tema: "Simulación de durezas en cilindros teniendo en cuenta sus curvas de enfriamientos y análisis químico"

Integrantes:

- 1 Presidente: Suarez Diego
- 2 Integrante: Sanchez Leandro
- 3 Integrante: Peveris Ismael

Sr. Profesor

De mi mayor consideración:

Me dirijo a Ud. con la finalidad de solicitarle analice la descripción del tema de trabajo final de grado propuesto por el alumno: Jimenez Esteban Samuel y Vaccarello Fernando Ezequiel

De acuerdo al sistema vigente, como integrante del tribunal, deberá analizar el tema propuesto para su aceptación, rechazo y/o realización de observaciones, de acuerdo al Anexo III.

La aprobación del tema propuesto es requisito imprescindible, para que los alumnos puedan dar inicio a su trabajo final, de manera que agradeceré devolver su opinión dentro de los próximos 7 (siete) días.

Asimismo de acuerdo a lo establecido en el reglamento vigente:

- 5.a) - El tema del trabajo final de grado será de elección del alumno y podrá pertenecer a cualquiera de las áreas de la profesión a la cual se postula.
- 5.b) - En cuanto a su originalidad y antecedentes, el tema podrá ser:
 - Parte integrante de un desarrollo más complejo, para ser continuado o completado en el futuro, o como continuador de otra u otras Trabajos Finales desarrollados anteriormente.
 - Original y desarrollado integralmente, sin dejar previsto futuras ampliaciones
- 5.c) - Se define como "original" al realizado por el alumno (no es un plagio). Esto es, cuando no existe otro de las mismas características entre los trabajos finales ya realizados. Por lo tanto, podrán proponerse también, trabajos finales con temas ya realizados, siempre y cuando se propongan nuevos enfoques, o técnicas o aplicaciones respecto a los anteriores (aplicación de nuevas tecnologías, nuevos métodos, profundización de algún tema desarrollado anteriormente, etc.).

Sin otro particular, saludo a Ud. muy atentamente.

Director de Departamento:

Anexo III

Fecha: 11/04/2020

INFORME DE ACEPTACIÓN DE TEMA PARA TRABAJO FINAL DE GRADO

Titulo del trabajo: "Simulación de durezas en cilindros teniendo en cuenta sus curvas de enfriamientos y análisis químico"

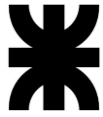
- El tema puede aceptarse en su forma actual sin modificaciones.
- El tema puede aceptarse, pero el/los alumno/s debería/n considerar las correcciones sugeridas.
- Rechazar.

Observaciones: Tema aceptado sin modificaciones

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....



Firma del Titular



Anexo IV

Fecha: 29/06/2021

PRESENTACIÓN DEL INFORME DEL TRABAJO FINAL DE GRADO

Sr. Director Departamento

De mi consideración:

Habiendo finalizado la confección del informe de mi trabajo final de grado, me dirijo a Ud. a fin de solicitar la evaluación del mismo, de acuerdo al artículo. 10.b) del "REGLAMENTO GENERAL DE TRABAJO FINAL DE GRADO".

Firma del Alumno:

Firma del Alumno:

Visto Bueno:

Firma del Tutor:



Anexo V

Fecha: 16/07/2021

SOLICITUD DE EVALUACIÓN DEL TRABAJO FINAL DE GRADO

Tema: "Simulación de durezas en cilindros teniendo en cuenta sus curvas de enfriamientos y análisis químico"

Alumno/s: Jimenez Esteban Samuel, Vaccarello Fernando Ezequiel

Integrantes del Tribunal:

- 1- Presidente de la Mesa: Suarez Diego
- 2- Integrante de la Mesa: Sanchez Leandro
- 3- Integrante de la Mesa: Aldet Leandro

Sr. Profesor

De mi mayor consideración:

Me dirijo a usted con el fin de acercarle la copia del presente trabajo final de grado. De acuerdo a la reglamentación, como integrante de la Mesa, deberá corregir el trabajo realizando las observaciones pertinentes y confeccionando un informe de acuerdo al formulario adjunto. El tiempo establecido para la corrección es de quince (15) días, transcurrido el mismo se deberá devolver el informe con la correspondiente evaluación (Anexo VI).

Asimismo, solicito me indique su disponibilidad de horarios para combinar la realización del examen final.

Sin otro particular, saludo a Ud. muy atentamente.

Director de Departamento

Anexo VI

Fecha: 16/07/2021

INFORME DE ACEPTACIÓN DEL TRABAJO FINAL DE GRADO

Título del Trabajo: "Simulación de durezas en cilindros teniendo en cuenta sus curvas de enfriamientos y análisis químico"

- El trabajo debe aceptarse en su forma actual sin modificaciones.
- El trabajo debe aceptarse pero el/los autor/es deberá/n considerar las correcciones opcionales sugeridas.
- Rechazar.

Observaciones:

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....



Presidente Mesa
Firma



2º Integrante Mesa
Firma



3º Integrante Mesa
Firma

Horarios disponibles para el examen: