

***Universidad Central “Marta Abreu” de Las
Villas***

***Facultad de Ingeniería Mecánica
Centro de Investigaciones de Soldadura***



Trabajo de Diploma

***Título: Determinación de la curva Jominy del acero
307C***

Autor: Pabel Lobaina Fernández

Tutores: Dr. Alejandro Duffus Scott

Msc. Enrique Velázquez Pérez

Curso 2011 - 2012

Año 54 de La Revolución

Pensamiento

La mayoría de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas y, por regla general pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos.

Albert Einstein
(1879-1955) Físico alemán.

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mis padres, mi hermano y a todos aquellos que de forma alguna ayudaron la culminación exitosa de este trabajo.

Como a los compañeros de mi año que tuvieron la facultad de ayudarme en los tiempos más difíciles de los cinco años de estudio a todos ellos.

.....Muchas Gracias

Agradecimientos

Al colectivo de profesores de la facultad de Ing. Mecánica de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas y en especial a los del Centro de Investigación de Soldadura que con dedicación e interés hicieron posible la culminación exitosa de este trabajo de diploma.

A mi tutor Alejandro Duffus que con su apoyo y asesoría, contribuyó a hacer posible la realización del presente trabajo de diploma.

Resumen

En el trabajo se realiza una revisión bibliográfica acerca de la templabilidad de los aceros, así como del ensayo de Jominy. Se propone un procedimiento experimental para la realización del ensayo de templabilidad. Se determinó las curvas de templabilidad de los aceros 1045, 40X, y 30ΓC. La dureza máxima alcanzada en el proceso de temple del acero 30ΓC, 900 °C fue de 52 HRC. Los aceros ensayados presentaron baja y mediana templabilidad.

Summary

At work we review the literature about the hardenability of steels and Jominy test. Proposes an experimental procedure for carrying out the test of hardenability. Was determined hardenability curves of steels 1045, 40X, and 30ΓC. The maximum hardness achieved in the process of quench the steel 30ΓC, 900 °C was 52 HRC. The steels tested showed low and medium hardenability

Índice

<i>Introducción</i>	1
CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO Y TEMPLABILIDAD DEL ACERO	3
1.1 <i>Introducción</i>	3
1.2 Tratamiento Térmico	3
1.3 Etapas del Tratamiento Térmico	3
1.4 De todos los tratamientos térmicos, solo haremos referencias al temple por ser el utilizado en nuestro trabajo.....	4
1.5 Tratamiento térmico del acero	5
1.6 Templabilidad	6
1.7 Ensayo Jominy	7
1.8 Curvas de Templabilidad.....	9
1.9 Aplicación de la templabilidad	14
Conclusiones Parciales	15
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS	16
2.1 <i>Introducción</i>	16
2.2 Aceros utilizados.....	16
2.3 Ensayos de dureza. Tipos.....	16
2.4 Mufla de Calentamiento.....	17
2.5 Medios utilizados para la realización del Tratamiento Térmico	19
Conclusiones Parciales	20
<i>Capítulo III: Análisis y discusión de los resultados</i>	21
3.1 <i>Introducción</i>	21
3.1 Selección de la temperatura de temple.....	21
3.2 Procedimiento Experimental del Ensayo Jominy	23

3.3 Resultados obtenidos de la dureza vs distancia Jominy	25
Conclusiones Parciales	34
<i>Conclusiones generales.</i>	35
<i>Recomendaciones</i>	36
<i>Bibliografía</i>	37
<i>Anexo</i>	38

Introducción

Los Tratamientos Térmicos son una herramienta muy utilizada para la obtención de las propiedades mecánicas adecuadas necesarias en los materiales utilizados en determinados procesos de producción. La efectividad del temple dependerá de factores tales como:

- Velocidad de enfriamiento (V_e) Viene dada por el medio de enfriamiento.
- Geometría de la pieza.
- Composición química del material

El ensayo de templabilidad por su parte es el que se ocupa de permitirnos conocer la profundidad a la que penetra en la pieza la zona templada.

Es lógico pensar que determinada zona de la pieza se enfría con mayor lentitud mientras mayor sea su espesor esto está dado precisamente por la velocidad finita de propagación del calor en un medio dado por lo que para puntos más interiores en la pieza será mayor el tiempo consumido para que la temperatura de calentamiento (T_c) se iguale a la temperatura del medio (T_m) y ello explica que piezas de mayor espesor son menos propensas a templarse en su centro que piezas de menor espesor

La realización del ensayo de Jominy ha sido normalizada en nuestro país por el Comité estatal de normalización (CEN) mediante la norma cubana NC 04-53 donde se exponen todos los materiales, equipos y metodologías del ensayo

Problema científico.

No poseer la curva de Jominy del acero 30ГC, imposibilita determinar la profundidad de la zona templada.

Hipótesis

Si se determina la curva de templabilidad del acero 30ГC, mediante el ensayo de Jominy, es posible conocer el grado de templabilidad de este acero.

Objetivo General

Determinar la curva de templabilidad del acero 30ΓC, mediante el ensayo de Jominy.

Objetivo Específico

- 1- Revisar el estado del arte acerca del ensayo de templabilidad de Jominy.
- 2- Montar en el laboratorio de tratamiento térmico del CIS, el ensayo de Jominy.
- 3- Determinar la curva de templabilidad del acero 30ΓC, mediante el ensayo de Jominy.

Tareas

- 1 . Revisión bibliográfica acerca de los aspectos fundamentales de la teoría del tratamiento térmico y la templabilidad de los aceros.
2. Llevar a cabo el montaje del ensayo de Jominy.
3. Seleccionar los aceros a ensayar.
4. Determinación de la familia de curvas de templabilidad de los aceros tratados

CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO Y TEMPLABILIDAD DEL ACERO

1.1 Introducción

El tratamiento térmico y la templabilidad de los aceros mejorables, constituye una herramienta de trabajo en cuanto a su uso y comportamiento.

1.2 Tratamiento Térmico

Uno de los procesos mediante los cuales se puede variar o modificar las propiedades de los aceros y en sentido general de los metales es mediante el proceso de tratamiento térmico, el cual se define como[1]:

Conjunto de operaciones que involucran calentamiento y enfriamientos controlados que se aplican a los materiales metálicos en estado sólido para cambiar su estructura y por lo tanto sus propiedades[2]. Al realizar un tratamiento térmico se conoce de antemano: forma, tamaño, composición química, propiedades. Diagrama de equilibrio, propiedades que se quiere obtener[3].

1.3 Etapas del Tratamiento Térmico

Un tratamiento térmico consta de tres etapas que se presentan a continuación:

- ✓ **Calentamiento hasta la temperatura fijada:** La elevación de temperatura debe ser uniforme en la pieza[4].
- ✓ **Permanencia a la temperatura fijada:** Su fin es la completa transformación del constituyente estructural de partida. Puede considerarse suficiente una permanencia de unos 2 minutos por milímetro de espesor en dependencia del tipo de acero[4].
- ✓ **Enfriamiento:** Este enfriamiento tiene que ser rigurosamente controlado en función del tipo de estructura (propiedades) que se desea obtener, así como del medio de enfriamiento en dependencia del tipo de acero[4]

Representación esquemática del tratamiento térmico en un gráfico de (Temperatura – tiempo)

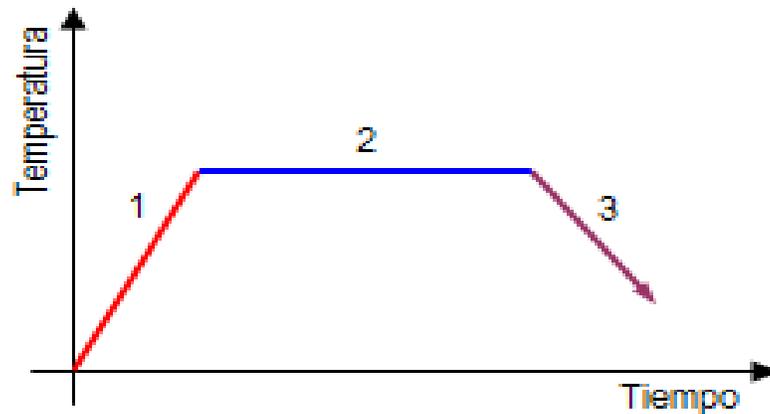


Figura 1.1: Proceso tecnológico del tratamiento térmico. 1- Proceso de calentamiento (Velocidad de calentamiento), 2- Proceso de permanencia (Tiempo de permanencia de la pieza en el horno), 3- Proceso de enfriamiento [2].

1.4 De todos los tratamientos térmicos, solo haremos referencias al temple por ser el utilizado en nuestro trabajo.

Temple: El Temple es un tratamiento térmico que tiene por objetivo aumentar la dureza y resistencia mecánica del material, transformando toda la masa en austenita con el calentamiento y después, por medio de un enfriamiento brusco (con aceites, agua o salmuera), se convierte en martensita, que es el constituyente duro típico de los aceros templados[5].

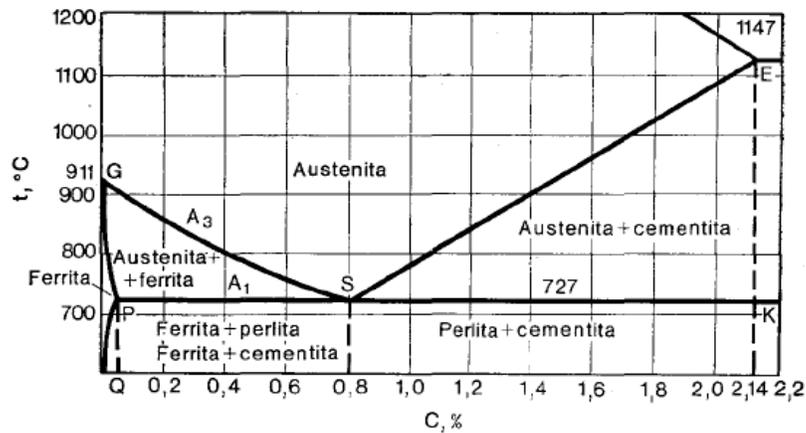
En el temple, es muy importante la fase de enfriamiento y la velocidad alta del mismo, además, la temperatura para el calentamiento óptimo debe ser siempre superior a la crítica para poder obtener de esta forma la martensita. Existen varios tipos de temple, clasificados en función del resultado que se quiera obtener y en función de la propiedad que presentan casi todos los aceros, llamada templabilidad (capacidad a la penetración del temple), que a su vez depende, fundamentalmente, del diámetro o espesor de la pieza y de la calidad del acero[4].

La temperatura de temple para los aceros de la mayoría de las marcas viene determinada por la posición de los puntos críticos A_{C1} y A_{C3} .

1.5 Tratamiento térmico del acero

Si la base para el estudio de tratamiento térmico de las aleaciones es el diagrama de estado correspondiente, es evidente que la base para el estudio del tratamiento térmico del acero será el diagrama hierro — carbono correspondiente a las concentraciones de hasta el 2% (o más exactamente, 2.14% de C)[6].

Como es natural, el límite superior de temperatura en el tratamiento térmico es la línea de solidus (solidus), por lo que los procesos de cristalización primaria y por consiguiente, la parte superior del diagrama no tiene en este caso gran importancia para nosotros[7].



Parte correspondiente al acero del diagrama de hierro Fe - C

La parte del diagrama de hierro — carbono que vamos a considerar es la representada en la (Figura 1.2:)[8].

Los puntos críticos se designan con la letra A.

El punto crítico inferior, que se designa por A₁, se encuentra en la línea PSK y corresponde a la transformación austenita ↔ perlita. El punto crítico superior A₃ se halla en la línea GSE y corresponde al principio de la precipitación o al final de las disoluciones de la ferrita en los aceros hipoeutectoides o de la cementita (secundaria) en los aceros hipereutectoides[9].

Para poder diferenciar el punto crítico durante el calentamiento del punto crítico durante el enfriamiento, junto a la letra A se pone una c en el primer paso y una r en el segundo[10].

Por consiguiente, el punto crítico de la transformación de la austenita en perlita designará por Ar₁ y el de la perlita en austenita, por Ac₁; el comienzo de la segregación de ferrita de la austenita se designará por Ar₃, y final de la disolución de la ferrita en la austenita, por Ac₃. El principio de la

segregación de cementita de la austenita también se denominará Ar_3 , y el fin de la disolución de la cementita secundaria en la austenita, Ac_3 (este punto se designa frecuentemente por A_{cm})[8, 11].

1.6 Templabilidad

La capacidad de un acero aleado para transformarse en martensita durante un determinado temple depende de la composición química y está relacionado con un parámetro denominado **templabilidad**. Todos los aceros aleados tienen una relación específica entre las propiedades mecánicas y el enfriamiento[12].

La templabilidad de un acero se define como la propiedad que determina la profundidad y la distribución de la dureza provocada por el temple desde la condición austenítica. La templabilidad de un acero depende principalmente de:

1. Composición del acero.
2. Tamaño de grano de la austenita.
3. La estructura del acero antes del temple.

La templabilidad no debe confundirse con la *dureza* de un acero, que es la resistencia a la deformación plástica, generalmente por indentación[13].

La templabilidad de un acero es la mayor o menor aptitud de este para que se forme una estructura martensítica en todos los puntos de su sección cuando se enfría en unas condiciones determinadas a partir de un estado austenítico.

Los aceros con alta templabilidad tienen baja soldabilidad.

La temperatura y velocidad de los procesos de calentamiento en el temple determinarán su dureza y resistencia. El tiempo de calentamiento y permanencia a la temperatura de austenización será el estrictamente necesario para que todo el carbono esté en solución y la austenita sea homogénea.

La velocidad de enfriamiento ha de ser lo suficientemente rápida para impedir que se produzcan transformaciones de la austenita antes de alcanzar la temperatura crítica inferior. En esta velocidad influyen factores que dependen de la pieza (la temperatura de temple, el tamaño del grano de la austenita y la masa, forma y dimensiones de la pieza) y factores que dependen del medio de enfriamiento (volumen, temperatura, viscosidad, temperatura de ebullición,

conductividad, calor específico, estado de reposo o movimiento, densidad, calor de vaporización, etc.

Se puede definir la **templabilidad** como la aptitud de un acero para endurecerse por formación de la martensita, como consecuencia de un tratamiento térmico. Para determinar el grado de templabilidad de un acero se realiza el ensayo Jominy. El ensayo consiste en realizar el templeado de una probeta de dimensiones determinadas según un proceso definido. El estudio de los resultados permite definir el comportamiento del material ante el tratamiento de *temple*[14].

1.7 Ensayo Jominy

En la industria la templabilidad se mide comúnmente por el ensayo Jominy de Templabilidad. En este ensayo, la probeta consiste en una barra cilíndrica con un diámetro de 1 pulg. De longitud, y con una pestaña de 1/6 pulg. (Fig.1.3 a). Puesto que la estructura previa tiene una fuerte influencia en la templabilidad, la probeta generalmente se normaliza antes del ensayo. En el ensayo Jominy, después de austenizar la probeta, se coloca una pieza fija, como se muestra en la (Fig.1.3 b), y un chorro de agua se dirige rápidamente a uno de los extremos de la probeta. Una vez fría, se mecanizan dos superficies planas paralelas en lados opuestos de la barra y se realizan medidas de dureza Rockwell C a lo largo de las superficies hasta 2.5 pulgadas del extremo de temple[13].

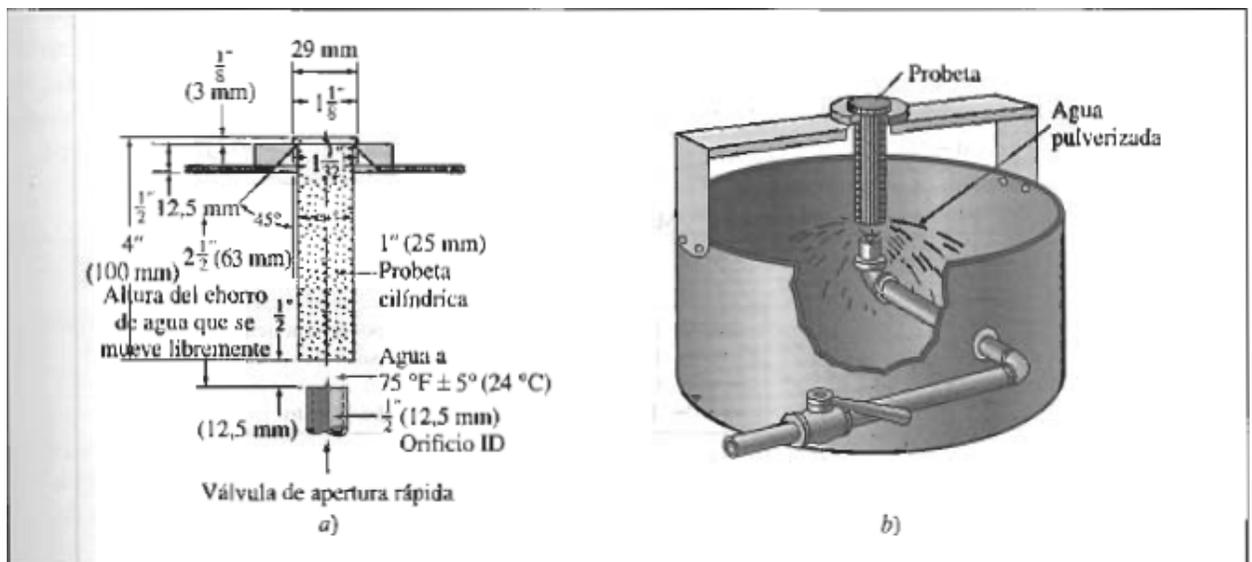


Figura 1.3: Ensayo Jominy. (a-Probeta y pieza fija para el ensayo de templabilidad de Jominy, b- Esquema de ensayo Jominy)

Para realizar el ensayo, se calienta en primer lugar la probeta cilíndrica 25mm de diámetro y 100mm de longitud, a la temperatura de austenización durante 30 minutos en atmósfera controlada[14].

Tras finalizar el calentamiento, se cuelga la probeta por un extremo de modo que un chorro de agua, a temperatura constante, incida directamente sobre su extremo inferior durante 10 minutos. La probeta se irá enfriando a distinta velocidad según la distancia respecto al punto de incidencia del chorro de agua. El extremo inferior de la probeta se enfriará rápidamente, sufriendo un temple más severo y será más duro que el otro extremo[14].

Una vez que la probeta se ha enfriado a temperatura ambiente, se desbasta una tira de 0.4 milímetros de espesor y se determina la dureza Rockwell C a lo largo de los 50 mm primeros de la probeta. En los primeros 12.5 mm las lecturas de dureza se toman a intervalos de 1.6mm y en los 37.5 mm siguientes cada 3.2 mm[14].

Después se traza una curva de templabilidad representando los valores de dureza en función de la distancia al extremo templado, obteniéndose así la **curva de templabilidad**. Si la dureza disminuye rápidamente conforme nos alejamos del extremo templado, el acero tendrá una templabilidad baja, mientras que los aceros cuyas curvas son casi horizontales serán de alta templabilidad, es decir, serán susceptibles de endurecerse rápido cuando sufren temple[14].

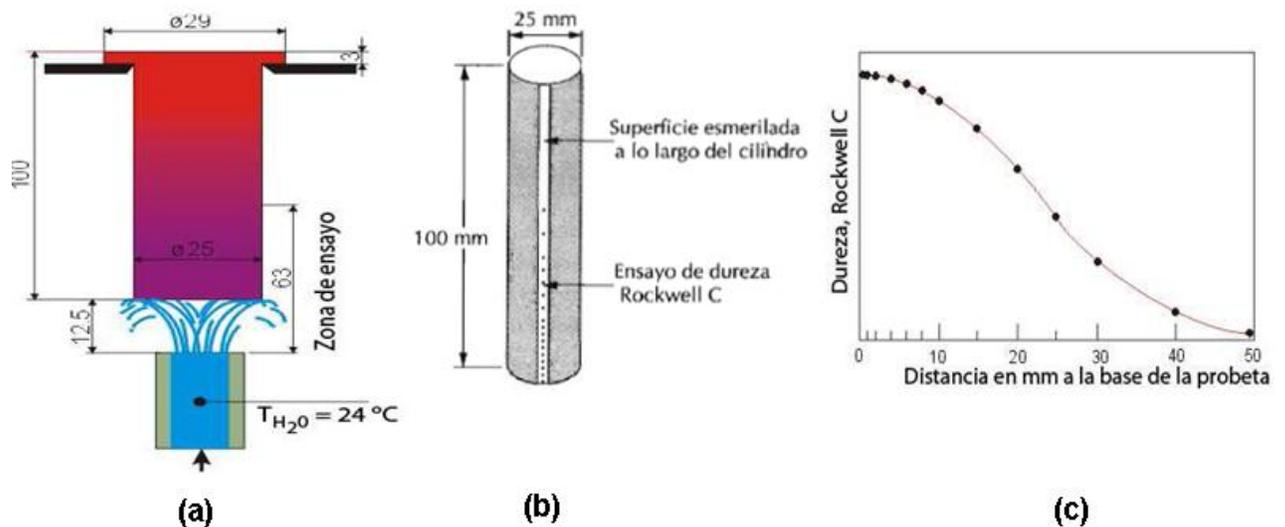


Figura 1.4: Representación esquemática de la probeta del ensayo Jominy (a) instaurada durante el temple, (b) después del ensayo de dureza a partir del extremo templado y a lo largo de la arista y (c) curvas de templabilidad[14]

1.8 Curvas de Templabilidad

En la figura 1.5 se reproduce una curva de templabilidad típica. El extremo templado se enfriará más rápidamente y presenta un máximo de dureza; en esta posición y en la mayoría de los aceros, la microestructura coincide con 100% de martensita. La velocidad de enfriamiento decrece con la distancia del extremo templado y la dureza también disminuye, como indica la figura 1.5. Al disminuir la velocidad de enfriamiento, el carbono dispone de más tiempo para la difusión de perlita más blanda, que puede estar mezclada con martensita y bainita.

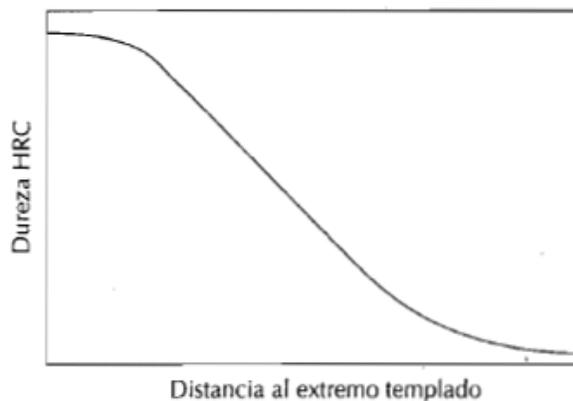


Figura 1.5: Gráfico típico de templabilidad: dureza Rockwell C en función de la Distancia al extremo templado[15]

A veces es más conveniente relacionar la dureza con la velocidad de enfriamiento que con la distancia al extremo templado de una probeta Jominy estándar. La velocidad de enfriamiento (tomada a partir de 700°C) se suele indicar en el eje horizontal de un diagrama de templabilidad presentada aquí. La relación entre distancia y velocidad de enfriamiento es la misma para el acero al carbono que para el acero aleado, porque la velocidad de transferencia térmica es casi independiente de la composición. A veces, la velocidad de enfriamiento térmico de la distancia Jominy es 1/16 pulgada = 1.6mm: la unidad de distancia Jominy.

Se puede trazar una correlación entre distancia al extremo templado de la probeta Jominy y las transformaciones por enfriamiento continuo. Por ejemplo, la figura 1.6 es un diagrama de transformación por enfriamiento continuo de un acero aleado eutectoide, donde también se han dibujado las curvas de enfriamiento a cuatro diferentes posiciones Jominy y se han indicado las microestructuras resultantes. También se incluyen las curvas de templabilidad de estos aceros[15].

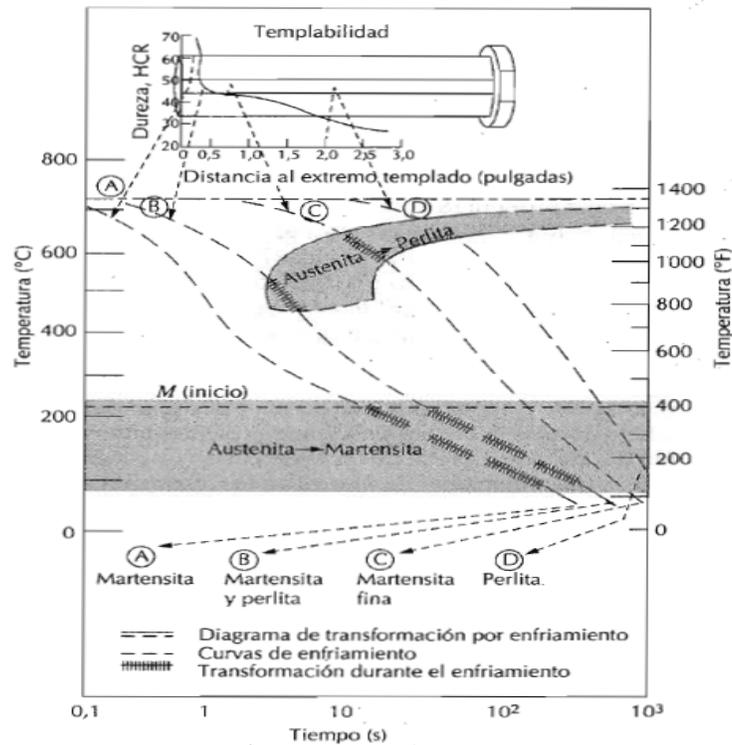


Figura 1.6: Correlación entre templabilidad e información del enfriamiento continuo del acero de composición eutectoide[15]

La figura 1.7 muestra las curvas de templabilidad para cinco diferentes aceros aleados que contienen 0,40%C y diferentes cantidades de estos elementos aleantes. Una probeta es de acero al carbono (1040) y las otras cuatro correspondientes (4140, 4340, 5140 y 8640) son aceros aleados. La composición de estos aceros se indica en el pie de la figura ya que se destacan algunos detalles. Las cinco aleaciones tiene la misma dureza en el extremo templado (57HRC); cuya magnitud sólo depende del contenido de carbono, que es el mismo en todas estas aleaciones[15].

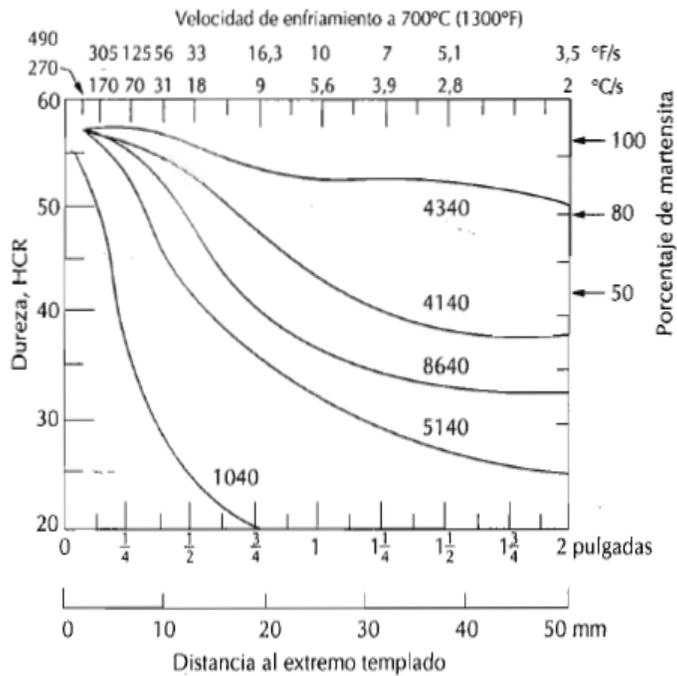


Figura 1.7: Curvas de templabilidad para cinco diferentes aceros aleados que contienen 0.4%. Las composiciones aproximadas (% en peso) son: 4340-1.85Ni, 0.80 Cr y 0.25 Mo; 4140-1.0 Cr y 0.20 Mo; 8640-0.55 Ni, 0.50 Cr y 0.20 Mo; 5140-0.85 Cr; 1040 es un acero al carbono[15]

Nota: Cuando la curva de templabilidad disminuye bruscamente, se dice que el acero es de **baja templabilidad (1040)**, cuando la dureza se mantiene prácticamente constante, se dice que el acero es de **alta templabilidad (4340)** y cuando la dureza disminuye suavemente, se acostumbra a decir que el acero es de **mediana templabilidad (4140, 8640 y 5140)**.

Probablemente la característica más sobresaliente de estas curvas es su forma, relacionada con la templabilidad. La templabilidad del acero al carbono 1040 es baja porque la dureza desciende precipitadamente a 30 HRC después de una distancia Jominy relativamente corta (1/4 pulgada = 6.4mm). Por el contrario, las disminuciones de dureza en los otros cuatro aceros aleados son claramente más graduales. Por ejemplo, a una distancia Jominy de 2 pulgadas (50mm) las durezas de las aleaciones 4340 y 8640 son 50 y 32 HRC, respectivamente; así, la aleación 4340 es más dura que la 8640. Una probeta de acero al carbono 1040 sólo endurece la zona próxima a la superficie, mientras que en los otros cuatro aceros aleados la elevada dureza del temple profundiza mucho más.

Los perfiles de dureza de la Figura 1.7 indican la influencia de la velocidad de enfriamiento en la microestructura. En el extremo templado, donde la velocidad de temple es aproximadamente de 600°C/s, se forma martensita 100% en las cinco aleaciones. A velocidades de enfriamiento

menores de 70°C/s o distancias Jominy mayores de 6.4mm, la microestructura del acero 1040 es predominante perlítica con restos de ferrita proeutectoide. Sin embargo, la microestructura de los cuatro aceros aleados consta fundamentalmente de una mezcla de martensita y de bainita; el contenido de bainita crece al disminuir la velocidad de enfriamiento[15].

Esta disparidad en el comportamiento de la templabilidad de las cinco aleaciones de la Figura 1.7 se explica por la presencia de níquel, cromo y molibdeno en los aceros aleados. Estos elementos aleantes retrasan las reacciones austenita- perlita y/o bainita, lo que permite que se forme más martensita para una velocidad de enfriamiento determinada, originando mayor dureza. El eje vertical derecho de la Figura 1.7 muestra la fracción aproximada de martensita presente a varios valores de dureza para estas aleaciones.

Las curvas de templabilidad también dependen del contenido en carbono. Este efecto se demuestra en la figura 1.8 para una serie de aceros aleados en los que sólo varía la concentración de carbono.

En la producción industrial del acero, siempre se producen pequeñas variaciones de una hornada a otra, en cuanto a la composición y al tamaño de grano, lo que modifica los datos de templabilidad. Por este motivo, estos datos se suministran en forma de banda, donde están representados los valores máximos y mínimos para una aleación particular. En la Figura 1.9 se ha representado la banda de templabilidad del acero 8640. Una aleación específica designada con una H final (p.ej., 8649H) indica la composición y característica de esta aleación, las cuales se manifiestan dentro de la curva de templabilidad mostrada en la figura 1.9[15].

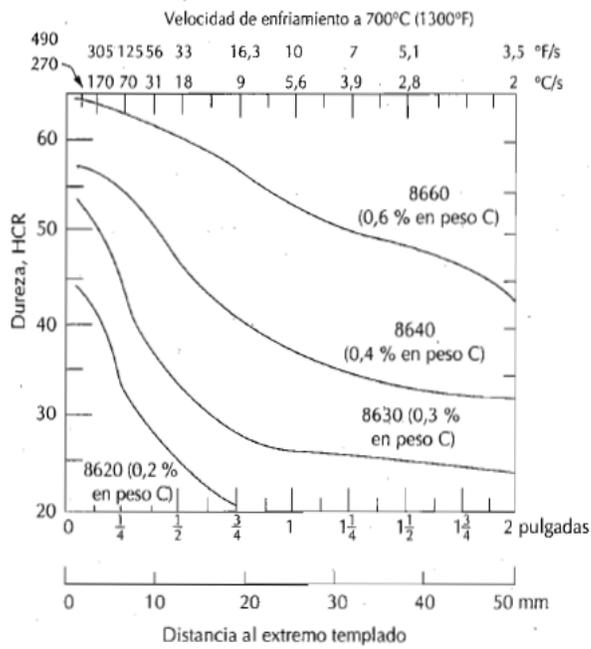


Figura 1.8: Curvas de templabilidad para cuatro aceros aleados de la serie 8600 cuyo contenido en carbono se indica[15]

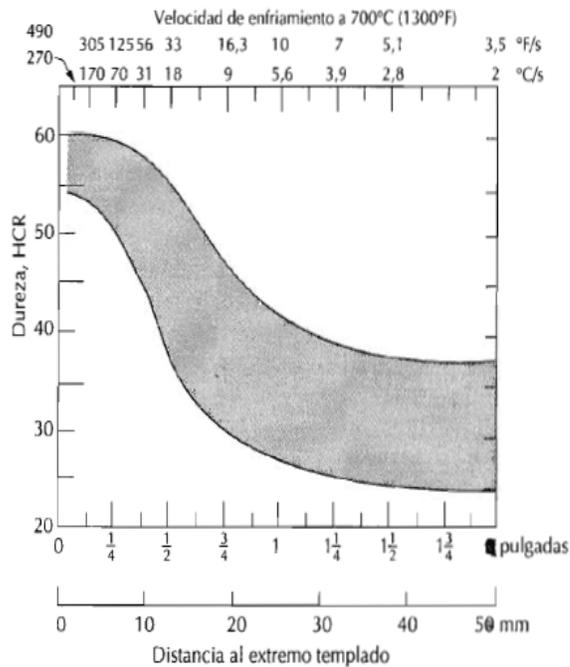


Figura 1.9 Banda de templabilidad de un acero 8640 con indicación de los límites máximo y mínimo[15]

1.9 Aplicación de la templabilidad

Para muchos aceros no existen los diagramas (transformación, tiempo temperatura) TTT. En su lugar, para comprobar la templabilidad de los aceros, se utiliza el ensayo de **Jominy**. La distancia desde el extremo es la **distancia Jominy** y está relacionada con la velocidad de enfriamiento (Tabla de enfriamiento).

Tabla 1.1 Relación entre la rapidez de enfriamiento y la distancia Jominy

Distancia Jominy (plg)	Rapidez de enfriamiento (C/s)
1/16	315
2/16	110
3/16	50
4/16	36
5/16	28
6/16	22
7/16	17
8/16	15
10/16	10
12/16	8
16/16	5
20/16	3
24/16	2.8
28/16	2.5
36/16	2.2

Conclusiones Parciales

- 1- En la revisión realizada, los datos relacionados con el tratamiento térmico del acero 30ГC, son muy pobres.
- 2- A pesar de existir en la literatura especializada curvas de templabilidad de varios aceros mejorables, no se encontró curva de templabilidad obtenida por el ensayo de Jominy para el acero 30 ГC.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción.

En el presente capítulo se presenta los aceros ensayados, los medios utilizados y el equipamiento empleado.

2.2 Aceros utilizados

Se utiliza a una pancha de acero del tipo 30ГC, entre otros. Dicho acero presenta un espesor de 30 mm, cuya composición química nominal se muestra en la (tabla 2.1)[16].

Tabla 2.1 Composición química de los aceros AISI 1045, 40X; 30ГC y 30XГC.

Acero	% C	% Mn	%Si	% Cr	% Ni	% P	% Cu
AISI 1045	0.45	0.75	0.49	0.17	0.12	0.033	0.15
40X	0.44	0.8	0.37	1.1	≤0.3		0.3
30ГC	0.28-0.35	0.8-1.1	0.9-1.2	0.2	< = 0.30	< = 0.025	

Acero	Diámetro Crítico (mm)	Umbral de Fragilidad en frío, °C
AISI 1045	12	-20
40X	15	-50
30ГC	25	-20

2.3 Ensayos de dureza. Tipos

Dureza Vicker: El penetrador utilizado es un elemento de base cuadrada que en sus caras opuestas forman un ángulo de 136°. Las cargas aplicadas van de 1-120Kg. (las más usadas son 30-50Kg). El ensayo consiste en dejar la huella del indentador en la pieza y con la ayuda del microscopio medir las diagonales de la huella saca un promedió utilizando la formula $DV=1.854P/D$ [14, 17].

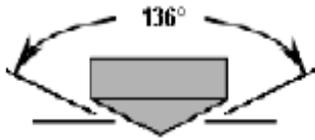


Figura 2.1: Identador (Pirámide de diamante) para ensayo de dureza Vicker[14]

Dureza Rockwell: Se basa en medir la diferencia de penetración que hay en aplicar una carga inicial de 10Kg y una final mayor (60-100-150). Se clasifican en:

- ✓ **Rockwell B:** El penetrador usado es una esfera de acero duro de 1/16" de diámetro. La carga inicial es de 10Kg. Y la final de 100Kg. Se utiliza para medir la dureza de materiales blandos.
- ✓ **Rockwell C:** El penetrador utilizado es de diamante con forma esfero- cónica cuya esfera tiene un radio de 0.2 mm. La carga inicial es de 10Kg. Y la carga final de 150Kg. Se utiliza para medir la dureza de los materiales duros. La dureza del material la da directamente el aparato de medición [14].

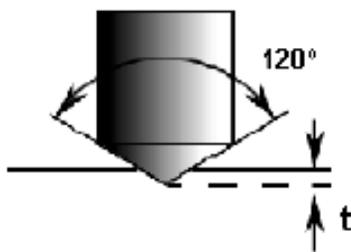


Figura 2.2: Identador (Cono de diamante. Identador de 120° y 2 mm de radio) para ensayo de dureza Rockwell[14]

2.4 Mufla de Calentamiento

Se utilizó una mufla con sistema de control de temperatura automatizado. El calentamiento se realizó con la introducción de la probeta Jominy en la mufla una vez que la misma alcanza la temperatura de tratamiento térmico.

Los datos y características de la mufla utilizada en el tratamiento térmico, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.4 Datos de la mufla WTC Binder

Datos del horno	
No. Inventario: 278090	No. Inventario: 3112240
Marca: WTC Binder	Marca: WTC Binder.
Modelo: Select - Hon	Modelo: Select - Hon
País: Alemania.	País: Alemnia

Características técnicas:

- Voltaje: 220 V.
- Frecuencia: 60 Hz.
- Rango de temperatura de operación: 200 – 1200°C.



Figura 2.3 Mufla utilizada para tratamiento térmico

2.5 Medios utilizados para la realización del Tratamiento Térmico

1. Guantes de amianto; resistentes al calor 900°C para proteger al operario al cargar la probeta.
2. Tenaza
3. Instalación de agua
4. Reloj

Conclusiones Parciales

- 1- Se verificó la composición Química del acero 307C, para la plancha de 30 mm de espesor utilizada.
- 2- La composición química del acero 40X, se corresponde con la verificación realizada por el método de análisis espectral de emisión atómica, solo en el contenido de cromo.

Capítulo III: Análisis y discusión de los resultados.

3.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para los diferentes aceros ensayados y se analizan los mismos.

3.1 Selección de la temperatura de temple.

La selección de la temperatura de temple de cada acero ensayado, se realizó con ayuda del programa computacional Calculation welding[18] y la misma se estimó mediante la siguiente relación[19]:

$$A_{C_3} + (30 \leftrightarrow 50^{\circ}C)$$

$$A_{C_3} + 50^{\circ}C$$

$$A_{C_3} = 937.2 - (436.5 * C) + (56 * S_i) - (19.7 * M_n) - (16.3 * C_u) - (26.6 * N_i) - (4.9 * C_r) + (38.1 * M_o) + (124.8 * V) + (136.3 * T_i) - (19.1 * N_b) + (198.4 * A_l) + (331.5 * B)$$

Chemical Composition Input (wt%)				Carbon Equivalents (wt%)	
C(<0.8)	<input type="text" value="0.34"/>	Mo(<1.0)	<input type="text" value="0.0"/>	CE(IIW)	0.584
Si(<1.5)	<input type="text" value="1.1"/>	V(<0.1)	<input type="text" value="0.0"/>	CE(WES)	0.629
Mn(<3.0)	<input type="text" value="1.1"/>	Nb(<0.1)	<input type="text" value="0.0"/>	Pcm	0.447
P(<0.025)	<input type="text"/>	Ti(<0.1)	<input type="text" value="0.0"/>	CEn	0.629
S(<0.025)	<input type="text"/>	Al(<0.1)	<input type="text" value="0.0"/>	Transformation Temp (°C) (Mn<2,Cu<1,Cr<2.5,Mo<0.5)	
Cu(<2.0)	<input type="text" value="0.01"/>	N(<0.01)	<input type="text"/>	Ac3	827.7
Ni(<10.0)	<input type="text" value="0.0"/>	O(<0.01)	<input type="text"/>	Ac1	755.2
Cr(<10.0)	<input type="text" value="0.3"/>	B(<0.003)	<input type="text" value="0.0001"/>	Ms	344.6

May 12, 2007 updated
Source code by N.Y

Figura 3.1 Cálculo de la temperatura de los puntos críticos A_{C_3} del Acero 30ΓC

Chemical Composition Input (wt%)				Carbon Equivalents (wt%)	
C(<0.8)	<input type="text" value="0.44"/>	Mo(<1.0)	<input type="text" value="0.0"/>	CE(IIW)	0.760
Si(<1.5)	<input type="text" value="0.3"/>	V(<0.1)	<input type="text" value="0.0"/>	CE(WES)	0.772
Mn(<3.0)	<input type="text" value="0.6"/>	Nb(<0.1)	<input type="text" value="0.0"/>	Pcm	0.535
P(<0.025)	<input type="text"/>	Ti(<0.1)	<input type="text" value="0.0"/>	CEn	0.773
S(<0.025)	<input type="text"/>	Al(<0.1)	<input type="text" value="0.02"/>	Transformation Temp (°C) (Mn<2,Cu<1,Cr<2.5,Mo<0.5)	
Cu(<2.0)	<input type="text" value="0.01"/>	N(<0.01)	<input type="text"/>	Ac3	748.9
Ni(<10.0)	<input type="text" value="0.0"/>	O(<0.01)	<input type="text"/>	Ac1	760.3
Cr(<10.0)	<input type="text" value="1.1"/>	B(<0.003)	<input type="text" value="0.000"/>	Ms	324.9

May 12, 2007 updated
Source code by N.Y

Figura 3.2 Calculo de la temperatura de los puntos críticos A_{C3} del Acero 40X.

Chemical Composition Input (wt%)				Carbon Equivalents (wt%)	
C(<0.8)	<input type="text" value="0.45"/>	Mo(<1.0)	<input type="text" value="0.04"/>	CE(IIW)	0.635
Si(<1.5)	<input type="text" value="0.49"/>	V(<0.1)	<input type="text" value="0.0"/>	CE(WES)	0.642
Mn(<3.0)	<input type="text" value="0.75"/>	Nb(<0.1)	<input type="text" value="0.0"/>	Pcm	0.524
P(<0.025)	<input type="text"/>	Ti(<0.1)	<input type="text" value="0.02"/>	CEn	0.653
S(<0.025)	<input type="text"/>	Al(<0.1)	<input type="text" value="0.02"/>	Transformation Temp (°C) (Mn<2,Cu<1,Cr<2.5,Mo<0.5)	
Cu(<2.0)	<input type="text" value="0.15"/>	N(<0.01)	<input type="text"/>	Ac3	755.6
Ni(<10.0)	<input type="text" value="0.12"/>	O(<0.01)	<input type="text"/>	Ac1	734.0
Cr(<10.0)	<input type="text" value="0.17"/>	B(<0.003)	<input type="text" value="0.000"/>	Ms	325.8

May 12, 2007 updated
Source code by N.Y

Figura 3.2 Calculo de la temperatura de los puntos críticos A_{C3} del Acero 1045.

Las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 muestran los resultados obtenidos de la temperatura crítica para cada uno de los aceros analizados.

Tabla 3.1 muestra un resumen de los resultados obtenidos para cada acero.

Tabla 3.1 Punto crítico de los aceros analizados para el ensayo Jominy

Acero	Punto crítico $A_{c3}^{\circ C}$	Temperatura de temple ($A_{c3} + 50^{\circ C}$)
1045	755	805
40X	748	798
30ГC	827	877

3.2 Procedimiento Experimental del Ensayo Jominy

Para realizar esta prueba se debe tener en cuenta la estandarización de la probeta de ensayo (Figura 3.4), con el fin de garantizar la repetitividad del ensayo.

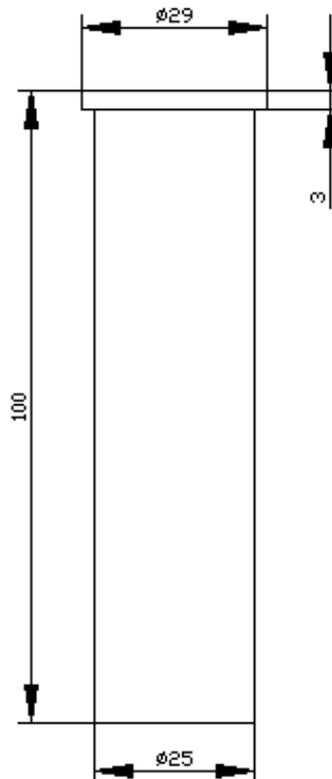


Figura 3.4: Probeta para el Ensayo Jominy

1. Se introduce la probeta Jominy en el horno de tratamiento térmico, el cual ha sido precalentado a la temperatura de austenización a 900°C.
2. Luego de haber transcurrido el tiempo de mantenimiento (30 min), extraiga rápidamente la probeta del horno y colóquela en el sostén de la cuba Jominy., como muestra la (figura 3.5).

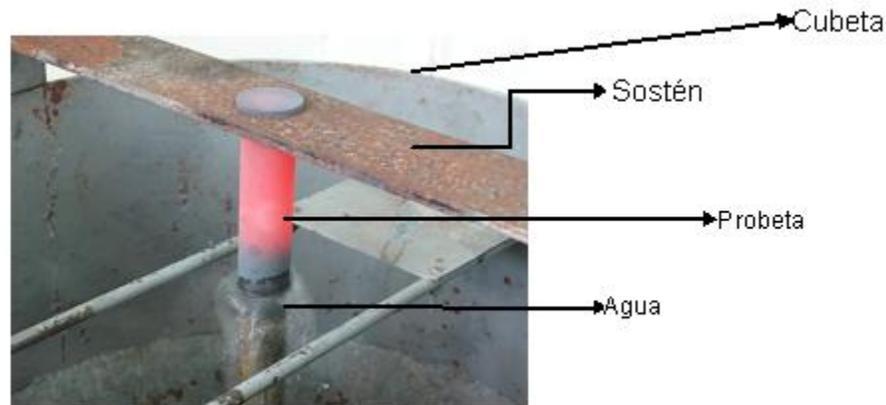


Figura 3.5 Sostén de la cuba Nomina, mostrando la muestra saca del horno

3. Realice el enfriamiento durante el tiempo 10 minutos estipulado en la norma ASTM-A255. Una vez transcurrido el tiempo de ensayo, retire la probeta del sostén y termínela de enfriar en agua.
4. Luego de ensayadas las probetas se mecanizan dos superficies planas, paralelas longitudinalmente y diametralmente opuestas, con una profundidad de 0,4 mm.
5. Realice las mediciones de dureza en función de la distancia desde el extremo templado. De la siguiente forma:
 - ✓ A lo largo de los primeros 50mm de la probeta. Se dividirá a la mitad por lo tanto los primeros 12.5mm las lecturas de dureza se tomaran a intervalos de 1.6mm; y en los restantes 37.5mm los intervalos son de 3.2mm.
6. Después de realizadas las mediciones de dureza en función de la distancia desde el extremo templado. Estos datos le servirán para obtener la gráfica dureza vs. distancia del extremo templado y así obtener la **curva de templabilidad** del acero ensayado.

3.3 Resultados obtenidos de la dureza vs distancia Jominy

La tabla 3.2 Muestra los resultados obtenidos de dureza HV y HRC contra la distancia de extremo templado de la probeta Jominy y con los mismos se construyen las graficas de las figuras 3.6 y 3.7.

Tabla 3.2 Medidas de dureza en la probeta de acero 1045, en estado de temple

Resultado			
# de ensayos	Vickers (HV)	Rockwell C (HRC)	Distancia (mm)
1	376	38.0	1.5
2	281	27.1	4.5
3	253	23.1	7.5
4	245	21.3	10.5
5	240	20.3	13.5
6	236	20.0	19.5

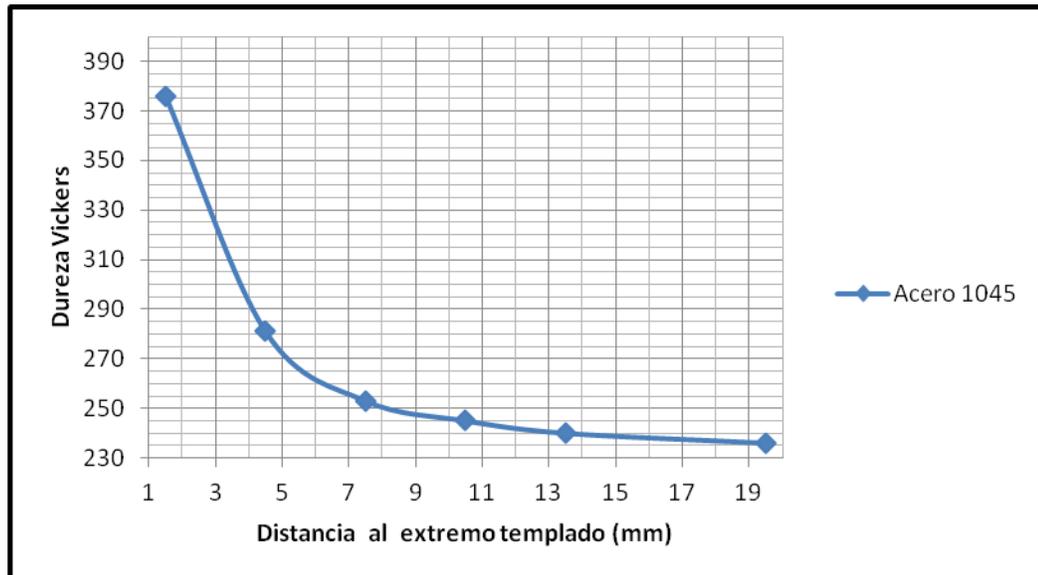


Figura 3.6: Curva de templabilidad para el acero 1045

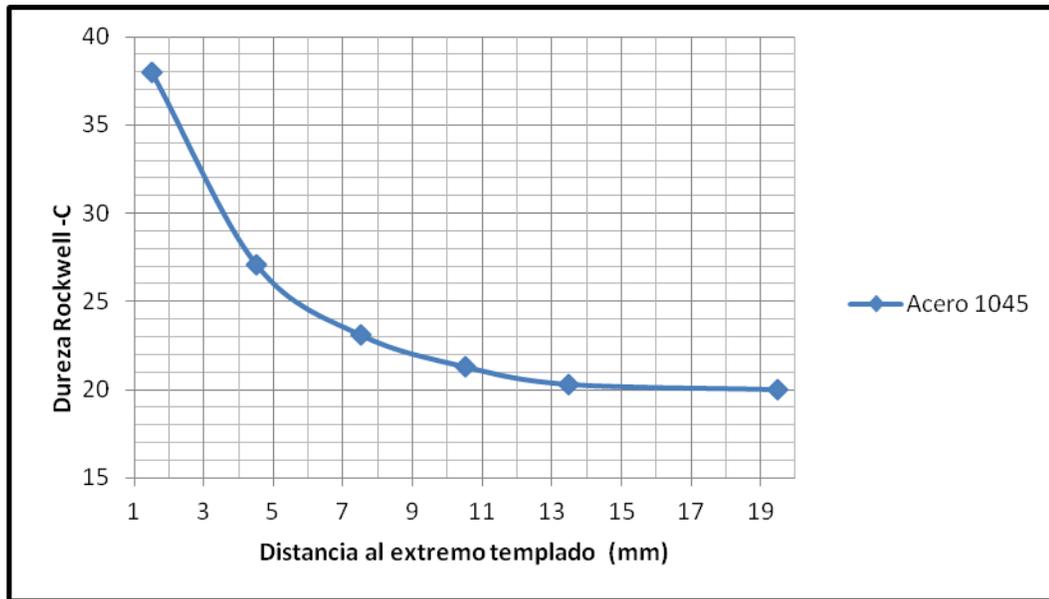


Figura 3.7: Curva de templabilidad para el acero 1045

En las curvas de templabilidad mostradas en las figuras 3.6 y 3.7 sobre el acero 1045, se observa claramente, que a partir de 11mm desde el extremo templado, la dureza disminuye rápidamente, lo cual dice que estamos en presencia de un acero de **baja templabilidad, este resultado experimental coincide con los datos reportados en la literatura[15].**

Utilizando la norma cubana NC: 04-53-1981, para los resultados obtenidos, el índice de templabilidad del acero 1045, sería J 38-11, que quiere decir, **que el índice de templabilidad del acero es 38 HRC y comienza a disminuir a una distancia $d= 11\text{mm}$ del extremo templado[20].**

La tabla 3.3 Muestra los resultados obtenidos de dureza HV y HRC contra la distancia de extremo templado de la probeta Jominy y con los mismos se procede igualmente a construir las gráficas de las figuras 3.7 y 3.8.

Tabla 3.3: Medidas de dureza en la probeta 1 del acero 30ΓC, en estado de temple

<i>Dureza Vickers (HV)</i>	<i>Dureza Rockwell C (HRC)</i>	<i>Distancia (mm)</i>
550.4	52.4	1.6
519.17	50.4	3.2
501.8	49.2	4.8
489.7	48.4	6.4
455.3	45.8	8.0
437.2	44.2	9.6
410.2	41.8	11.2
390.8	39.9	12.8
362.1	36.8	16.0
340.5	34.3	19.2
336.0	34.1	22.4
312.5	31.3	25.6
285.3	27.8	28.8
267.3	25.2	32.0
260.1	24.6	35.2
244.9	21.3	37.5
243.1	21.0	40.7

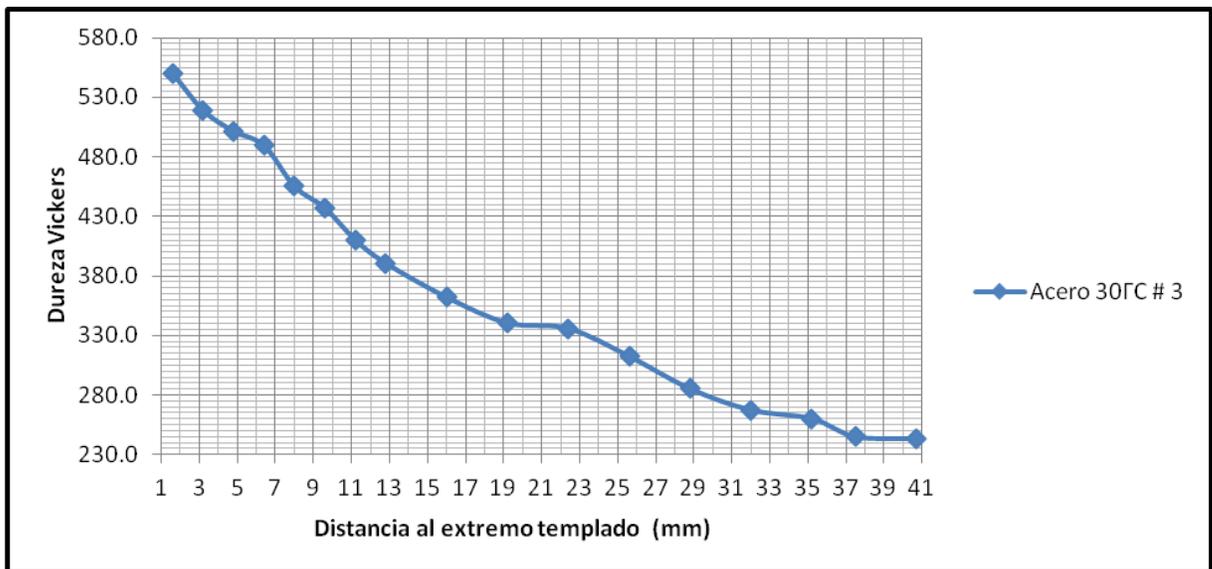


Figura 3.7: Curva de templabilidad para el acero 30ГC; (probeta 1)

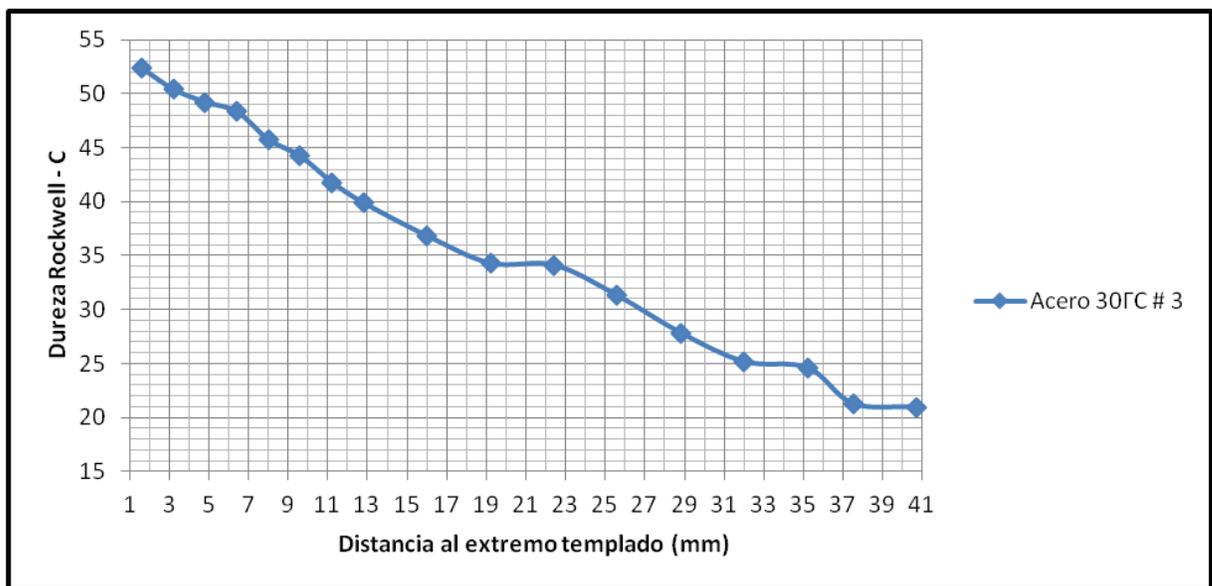


Figura 3.8: Curva de templabilidad para el acero 30ГC; (probeta 1)

En las curvas de templabilidad mostradas en las figuras 3.7 y 3.8, para el acero 30ГC, se puede observar, que la dureza máxima alcanzada a la distancia Jominy de 1.6 mm es de 52 HRC, a partir de 19 mm desde el extremo templado, la dureza disminuye rápidamente, lo cual dice que estamos en presencia de un acero de **mediana templabilidad**.

Tabla 3.4 Medidas de dureza en la probeta 2 del acero 30ГC, en estado de temple

<i>Dureza Vickers (HV)</i>	<i>Dureza Rockwell C (HRC)</i>	<i>Distancia (mm)</i>
559,0	52,9	1.6
538,3	51,6	3.2
529,3	51,1	4.8
488,2	48,2	6.4
477,8	47,5	8.0
447,7	44,9	9.6
428,9	43,5	11.2
396,7	40,5	12.8
392,6	40,0	14.4
381,0	38,8	17.6
350,6	35,5	20.8
341,3	34,4	24.0
317,7	31,8	27.2
282,9	27,4	30.4
261,3	24,1	33.6
256,2	23,3	36.8
252,7	22,8	40.0

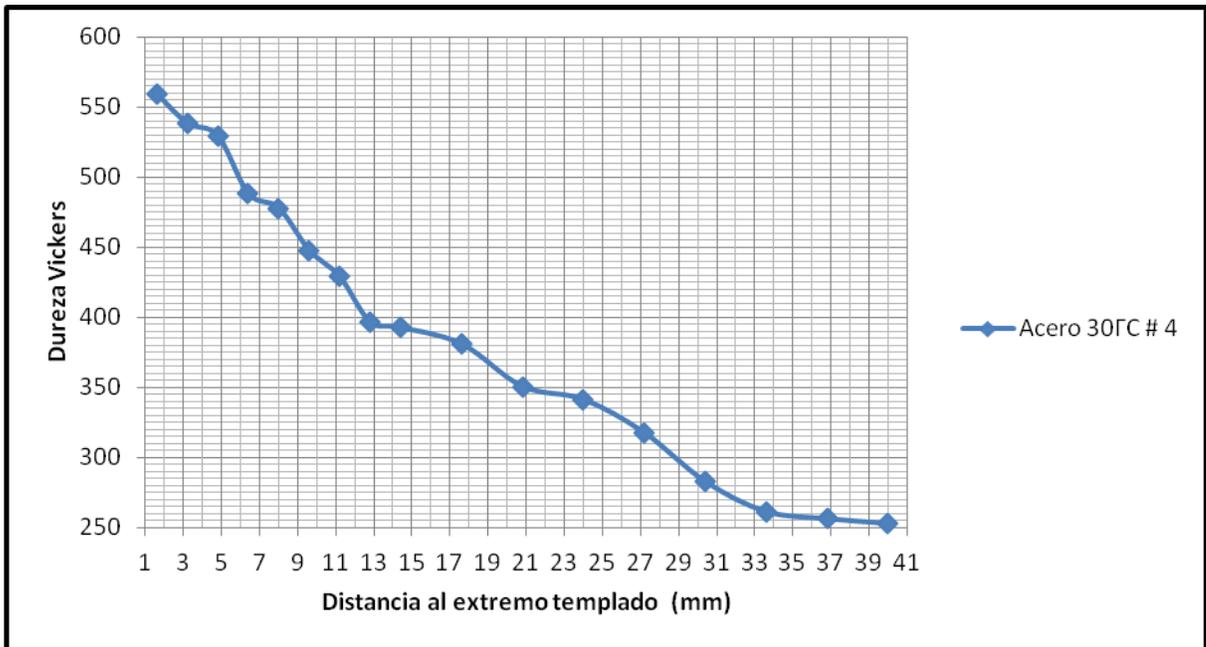


Figura 3.9: Curva de templabilidad para el acero 30ГC; (probeta 2)

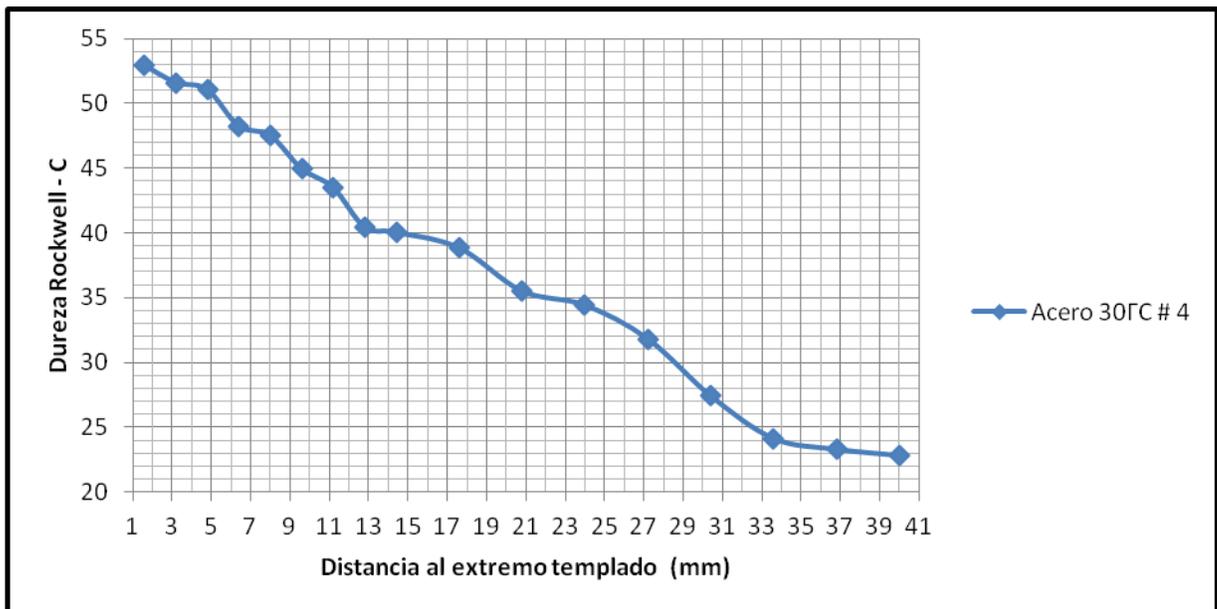


Figura 3.10: Curva de templabilidad para el acero 30ГC; (probeta 2)

Los resultados de las probetas 1 y 2 correspondiente al acero 30ГC, son idénticos.

Con los resultados que se muestran en la tabla 3.5, se construyó las graficas 3.11 y 3.12.

Tabla 3.5 Medidas de dureza del acero 40X, en estado de temple

<i>Dureza Vickers (HV)</i>	<i>Dureza Rockwell C (HRC)</i>	<i>Distancia (mm)</i>
366,1	37,2	1.6
364,4	37,0	3.2
319,2	32,0	4.8
301,1	29,7	6.4
294,4	29,0	8.0
290,8	28,9	9.6
286,5	27,7	11.2
284,1	27,6	12.8
283,3	27,6	16.0
281,1	27,5	19.2
280,6	27,3	22.4
278,7	27,2	25.6
278,5	26,9	28.8
278,4	26,9	32.0
277,4	26,8	35.2
276,9	26,6	38.4

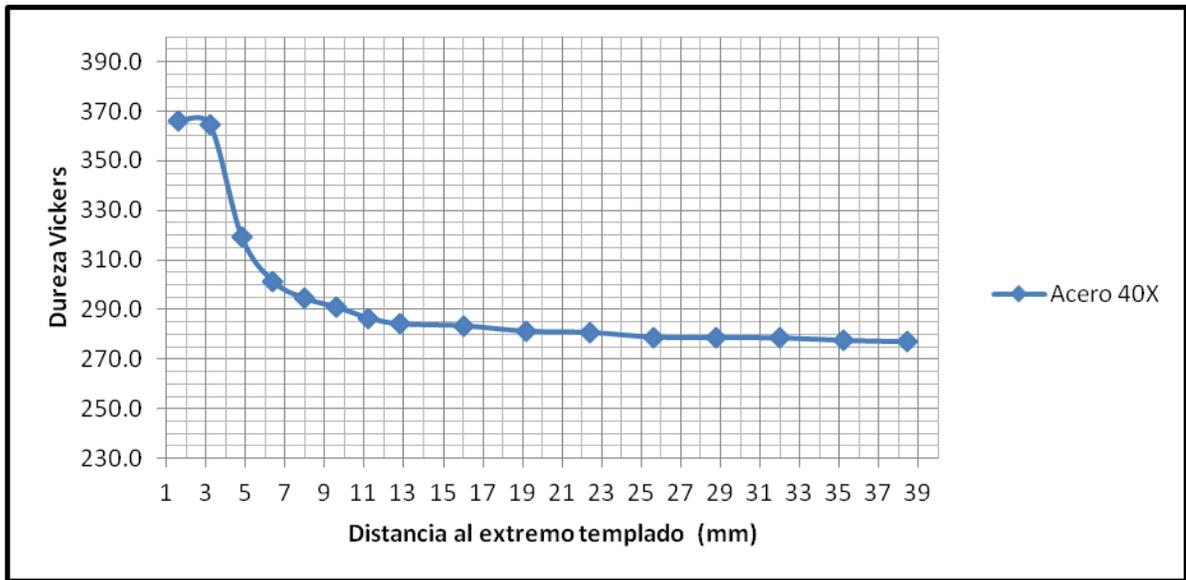


Figura 3.11: Curva de templabilidad para el acero 40X

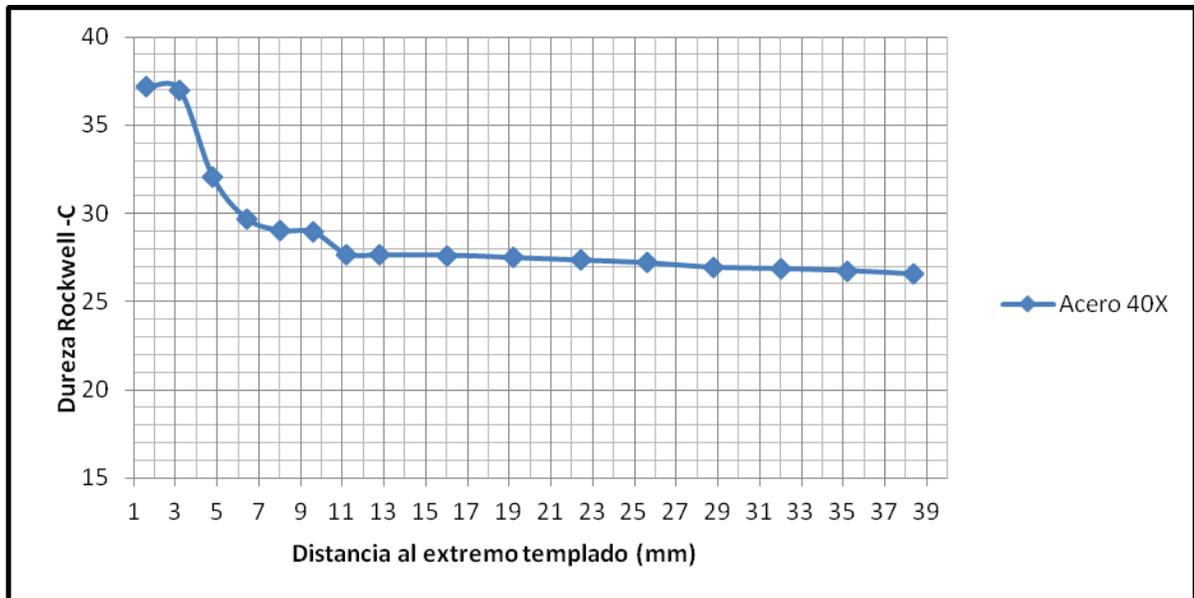


Figura 3.12: Curva de templabilidad para el acero 40X

Se observa en la grafica de la figura 3.12, el valor máximo de dureza es de 37 HRC, desde el extremo templado hasta 3mm y luego el valor de la dureza disminuye rápidamente, comportándose como un acero de **baja de templabilidad**. Este resultado no se corresponde con la "supuesta" composición química del acero 40X.

La figura 3.12 muestra las curvas de templabilidad de los aceros 1045, 30ГC y 40X, en las mismas queda claro, los diferentes índice de templabilidad de estos aceros.

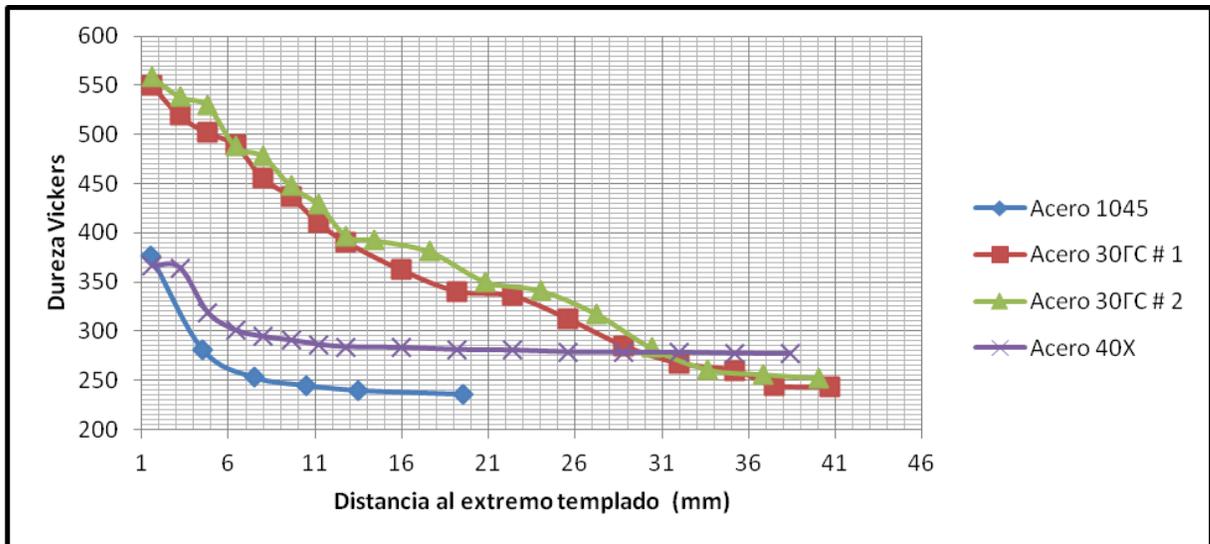


Figura 3.13: Curvas de templabilidad para los aceros 1045, 40X y 30ГC

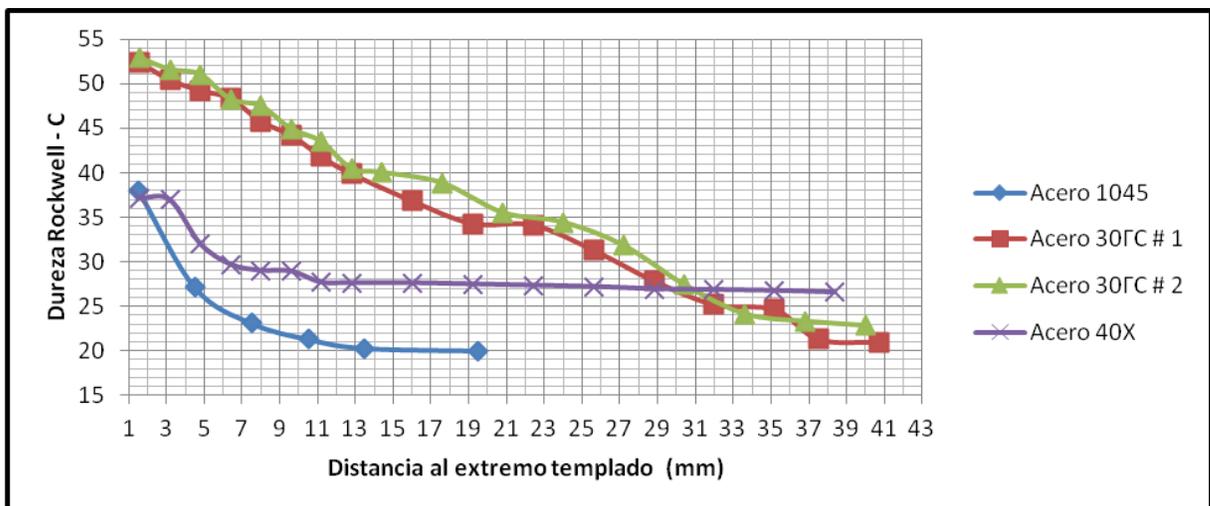


Figura 3.14: Curvas de templabilidad para los aceros 1045, 40X y 30ГC

Conclusiones Parciales

- 1- Se obtuvo las curvas de templabilidad de los aceros 1045, 40X y 30ГC, mediante el método del ensayo de Jominy.
- 2- La curva de templabilidad del acero 40X, no se corresponde con la composición química del acero, es muy probable, que el contenido de carbono y cromo de este acero sea mucho menor de lo indicado por norma..
- 3- Los tres aceros estudiados presentan índice de templabilidad, que clasifican en **baja y mediana templabilidad.**

Conclusiones generales.

- 1- Se puso a punto el ensayo de Jominy en el laboratorio de tratamiento térmico del centro de investigaciones de soldadura.
- 2- Se determinó la curva de templabilidad del **acero 30ΓC** y el mismo clasificó como un acero de **mediana templabilidad**.
- 3- **La dureza máxima alcanzada en el proceso de temple del** acero 30ΓC, a la temperatura de 900 °C fue de 52 HRC.
- 4- Se estableció un procedimiento experimental para la determinación de la templabilidad de aceros (Ensayo Jominy)

Recomendaciones

- 1- Realizar el ensayo de Jominy a otros aceros mejorables.
- 2- Caracterizar metalográficamente la sección transversal de la probeta de Jominy a diferentes distancias del extremo templado, constatar la estructura en diferentes zonas.

Bibliografía

1. Dra. Nilda, C., Stevens, *Manual de práctica tecnológica de tratamiento térmico Compilación de texto*. Vol. 1. 2010, Ciudad de la Habana, Cuba.
2. *Laboratorio Virtual de Tratamiento Térmico*, in *Tema IV: Materiales para la Ingeniería*.
3. *ANÁLISIS TÉRMICO I. TRATAMIENTOS TÉRMICOS* [cited; Available from: RINCONDELVAGO.COM.
4. *TRATAMIENTOS TÉRMICOS*. [Cited; EDICION 2008-2:]
5. *Capítulo 2. Tratamientos térmicos*. 2011 [cited; Available from: <http://www.slideshare.net/raecabrera/capitulo-2-tratamientos-trmicos-9246981>.
6. Bochvar, A.A., *fundamentos de tratamiento térmico de las aleaciones*. 1940.
7. Shteinberg, S.S., *Tratamiento térmico del acero*, M. Moscú, Editor. 1960.
8. GULIÁEV, A.P., *METALOGRAFÍA*, ed. E.M.-. MOSCÚ. Vol. TOMO 1. 1983.
9. Nóvikov, I.I., *Teoría del tratamiento térmico de los metales*. Metalurgia, ed. Moscú. 1974.
10. Lisak, L.I., *Fundamentos físicos del tratamiento térmico del acero*. Teecnika, ed. Kíev. 1975.
11. PRODUCCION, F.I.I.L.D. (2008-2009) *TRATAMIENTOS TÉRMICOS PROTOCOLO Curso de Materiales. Volume,*
12. A. Malishev, G.N., Yu. Shuvalov, *Tecnología de los metales*. Mir ed, ed. tercera. 1970, Moscú.
13. Smith, W.F., *Ciencia e Ingeniería de Materiales*, ed. A.N.I.e.Q.W.B.S.A. Silvia Figueras. 1993.
14. *ANÁLISIS TÉRMICO II. ENSAYOS MECÁNICOS* [cited; Available from: RINCONDELVAGO.COM.
15. WILLIAM D. CALLISTER, J., *INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES*, ed. S.A.B.B.A.C.M. REVERTÉ. 1995.
16. *Aceros al carbono*. [cited; Available from: www.empresasotero.cl.
17. autores, C.d., *ASM Handbook*. Vol. 4. 1991.
18. Test, T.J.E.Q., Yurioka, Editor. 2007.
19. Pérez, I.F.M. *Metodología para el cálculo de la templabilidad de piezas de acero* **Volume,**
20. Cubana, N., *Determinación de la templabilidad de los aceros*. 1981.

Anexo

TABLA 6. Composición de los aceros de construcción mejorables (según las normas GOST 4543-71)

Grupo	Acero	Contenido de elementos, %							Díámetro crítico, mm	Umbral de fragilidad en frío T _{an} , °C
		C	Mn	Si	Cr	Ni	otros			
I	40	0,37-0,44	—	—	—	—	—	10	-20	
	45	0,42-0,49	—	—	—	—	—	12	-20	
II	40X	0,38-0,44	—	—	0,8-1,1	—	—	45	-50	
	40XP	0,37-0,45	—	—	0,8-1,1	—	0,002-0,005 B	20	-30	
III	30XM	0,28-0,34	—	—	0,8-1,1	—	—	20	-60	
	40XT	0,36-0,45	0,9-1,2	—	0,9-1,2	—	—	25	-20	
	40FP	0,37-0,45	0,7-1,0	—	0,9-1,1	—	0,002-0,005 B	30	-20	
	30XTT	0,24-0,32	0,8-1,1	—	1,0-1,3	—	0,06-0,12 Ti	20	-20	
	30XTC	0,28-0,35	0,8-1,1	0,9-1,2	0,8-1,1	—	—	25	-20	
	40XH	0,36-0,44	—	0,17-0,37	0,45-0,75	1,0-1,4	—	25	-60	
IV	40XHP	0,35-0,42	0,6-0,9	0,17-0,37	0,6-0,9	0,4-0,8	—	35	-40	
	40XTHP	0,35-0,45	0,8-1,1	0,17-0,37	0,8-1,1	0,5-0,8	0,002-0,005 B	40	-20	
	40XHM	0,37-0,44	—	0,17-0,37	0,6-0,9	1,2-1,6	0,05-0,25 Mo	40	-80	
	42XMΦ	0,40-0,45	0,5-0,8	0,17-0,37	0,8-1,1	—	0,20-0,30 Mo	40	-60	
		—	—	—	—	—	0,8-0,14 V	—	—	
V	30XH3	0,27-0,34	—	—	0,6-1,9	2,75-3,45	—	50	-100	
	30XH2BΦ	0,27-0,34	—	—	0,6-0,9	2,0-2,4	0,5-0,8 W	100	-80	
	38XH3MΦ	0,30-0,42	—	—	1,2-1,5	3,0-3,4	0,15-0,30 V 0,35-0,45 Mo 0,1-0,2 V	100	-100	