



PREDICCIÓN DE DUREZA EN PIEZAS CONSTRUIDAS CON ACERO TEMPLADO Y REVENIDO

RODOLFO C. YANZÓN, JOSÉ C. BOCCA, DANIEL REBOLLO, ARLINGTON R.
SÁNCHEZ

Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de San Juan
Departamento Área Materiales del Instituto de Mecánica Aplicada
Av. Lib. Gral. San Martín oeste – N° 1109 CP 5400 – San Juan – República Argentina

(Recibido 29 de marzo de 2006, revisado 1 de abril de 2008, para publicación 5 de septiembre de 2008)

Resumen – Este trabajo tiene como objetivo desarrollar una herramienta computacional sencilla, que permita predecir propiedades mecánicas en puntos de una pieza sometida a un tratamiento de temple y revenido. Para ello, se tiene en cuenta la información suministrada por autores como J.S Kirkaldy [1], C. Bates *et al.* [2], M. Gergely *et al.* [3], y los trabajos de W. Jominy *et al.* [4], M. Grossman [5] y otros. Sobre la base de esa información, se procura desarrollar un método de cálculo, que permita obtener los valores de dureza que tendrán puntos a lo largo del diámetro de una pieza, luego de haber sido sometida al proceso de revenido que siempre debe aplicarse después de un temple. La metodología utilizada consiste en adjudicar a los puntos de la pieza templada, la dureza que tienen los puntos de una probeta Jominy de la misma composición química que se enfrían con la misma velocidad, extendiendo la similitud si ambos son revenidos después de manera idéntica. Para la comparación de velocidades de enfriamiento entre pieza y probeta, en el instante que pasan por 705°C, se utiliza un algoritmo desarrollado a partir del método de volúmenes finitos. La dureza de los puntos de las probetas Jominy revenidas a temperaturas variables, se calcula teóricamente con ecuaciones polinómicas, desarrolladas a partir del tratamiento de datos experimentales y teórico/ideales, utilizando como modelo del trabajo al acero SAE 4340H. Todos estos elementos se pueden introducir en una herramienta computacional que solo requiera los datos necesarios para definir: a) el acero utilizado b) el diámetro de la pieza, c) los tratamientos térmicos a que la misma será sometida. El proceso informático debe proveer como resultado, la predicción del valor de dureza que tendrá el material en cualquier punto de un redondo representativo de la sección de la pieza, con un margen de error aceptable.

Palabras clave – Dureza, pieza, acero, templado, revenido.

1. INTRODUCCIÓN

Nadie puede desconocer la importancia que tienen para los aceros, las transformaciones estructurales martensíticas y/o bainíticas, por las notables modificaciones que las mismas producen en sus propiedades mecánicas.

Pero debido a que esas transformaciones de producen casi sin excepción a través de procesos de calentamiento y enfriamiento, tienen marcada influencia en los resultados de las transformaciones, tanto el material de que se trate, como las condiciones en que cada punto de una pieza es calentado y enfriado. Por esa razón, ha sido objeto de muchos trabajos de investigación, el análisis de las variaciones estructurales y las consiguientes modificaciones de propiedades mecánicas, que tiene desde la superficie hacia el centro, una pieza sometida a tratamientos térmicos de endurecimiento.

Se puede decir también, que son numerosos los trabajos realizados para obtener software de simulación de procesos térmicos [2], y clasificarlos por sus objetivos en:

- a) programas de predicción de propiedades
- b) programas de planificación de procesos, selección de materiales y bases de datos
- c) programas para el análisis técnico y económico de procesos térmicos

- d) aplicación de elementos finitos para la modelación de los efectos de la severidad de temple, el control dimensional y la distorsión en piezas

Debido a que este trabajo tiene como objeto la predicción de dureza en distintos puntos de una pieza, puede ubicarse dentro del grupo de programas de predicción de propiedades. Para este tipo de programas, en los últimos años, se han desarrollado varios modelos matemáticos, con diferentes grados de exactitud y complejidad. Los mismos pueden clasificarse en tres tipos:

- Modelos estáticos basados en formulas empíricas
- Modelos dinámicos basados en ecuaciones diferenciales o sistemas de ecuaciones diferenciales
- Programas con modelos estáticos y dinámicos en conjunto

Como ejemplo clásico de los primeros se puede mencionar el calculo teórico de las curvas Jominy de un acero, a partir de su composición química y el tamaño de grano austenítico (trabajos de M.A. Grossmann [5], Just [6], U.S. Steel [7] y otros). De los segundos, la modelación de los fenómenos de transformación de la austenita en condiciones de enfriamiento continuo, trabajo realizado por investigadores de Creusot-Loire Industries de Francia [8] o el software de predicción de estructuras y propiedades de piezas de acero, del Steel Advisory Centre for Industrial Technologies de Hungría [3]. De los últimos, los trabajos de M. Gergely, P Tardy y T. Réti [9], aplicados a modelación de procesos de transformaciones estructurales en aceros, son un buen ejemplo.

Básicamente, el trabajo que se expone está orientado a desarrollar una herramienta computacional sencilla, que permita predecir los valores de dureza, que tendrá a lo largo de su diámetro, una pieza mecánica redonda, a ser fabricada con acero de construcción, templado y revenido. Es decir, obtener lo que usualmente se denomina “Curva U de Dureza” (CUD). Los datos que serán requeridos son, las dimensiones de la pieza, la composición química y el tamaño de grano austenítico del acero con que la misma será construida, y los datos relativos a los procesos térmicos, es decir el medio de enfriamiento utilizado en el temple y la temperatura y tiempo de revenido.

Cabe aclarar que si bien este trabajo recorre caminos ya transitados por otros investigadores, difiere de lo realizado por alguno de ellos en dos aspectos: 1) por que se propone la obtención de esas mismas “Curvas U”, pero en piezas revenidas, dado que ese tratamiento, puede modificar totalmente los valores de dureza en toda la sección de la pieza, y por lo tanto, las CUD a considerar en el proceso de diseño. 2) por la simplicidad de las herramientas matemáticas y computacionales utilizadas. A tal fin, se han realizado mediciones de dureza en probetas Jominy revenidas y se han adjudicado valores a partir de la bibliografía disponible, de modo de poder procesar matemáticamente esos datos y deducir ecuaciones representativas de comportamiento.

Las expresiones matemáticas obtenidas a partir de las actividades descriptas, han sido introducidas en un programa sencillo, que provee los valores de la curva “U” buscada. El resultado, absolutamente perfeccionable, pretende ser una herramienta de diseño sencilla y con márgenes aceptables de error, que permita, en el momento de seleccionar el acero a usar en una pieza mecánica, una verificación rápida de las prestaciones del material tratado, para compararlas con los esfuerzos previstos por el cálculo de solicitaciones.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y DEFINICIÓN DE PROCEDIMIENTOS

2.1. Fundamentos

El principio en que se basa este trabajo se puede expresar de la siguiente manera: “Los puntos de un redondo enfriado en un medio de severidad de temple H y los puntos de una probeta Jominy construida con un acero de características idénticas, que se enfríen con la misma velocidad, tendrán la misma dureza. Y seguirán teniendo la misma dureza, si ambos puntos son revenidos a la misma temperatura y tiempo” Al considerar en esta etapa del trabajo a la pieza como de sección circular, se evita la influencia de sus formas, por la incidencia que pueden tener las transformaciones de fase y las consecuentes tensiones que los tratamientos generan en piezas de formas complicadas. Las Figuras 1 y 2 dan una explicación gráfica de lo expuesto.

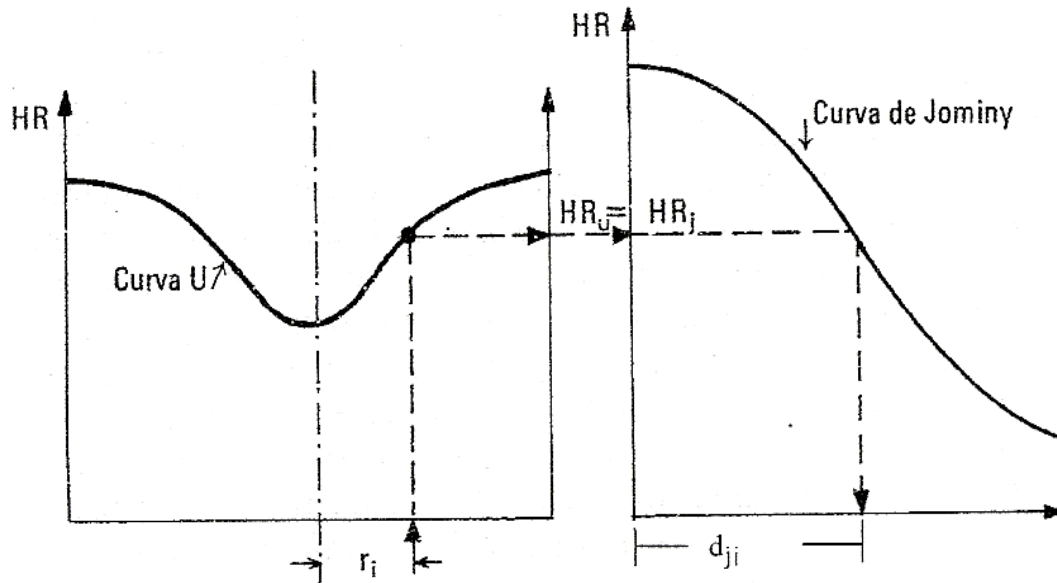


Fig. 1. Un algoritmo determina la velocidad de enfriamiento de los puntos de la pieza, en función del medio de temple, para adjudicarles la dureza de los puntos Jominy que se enfrían con la misma velocidad.

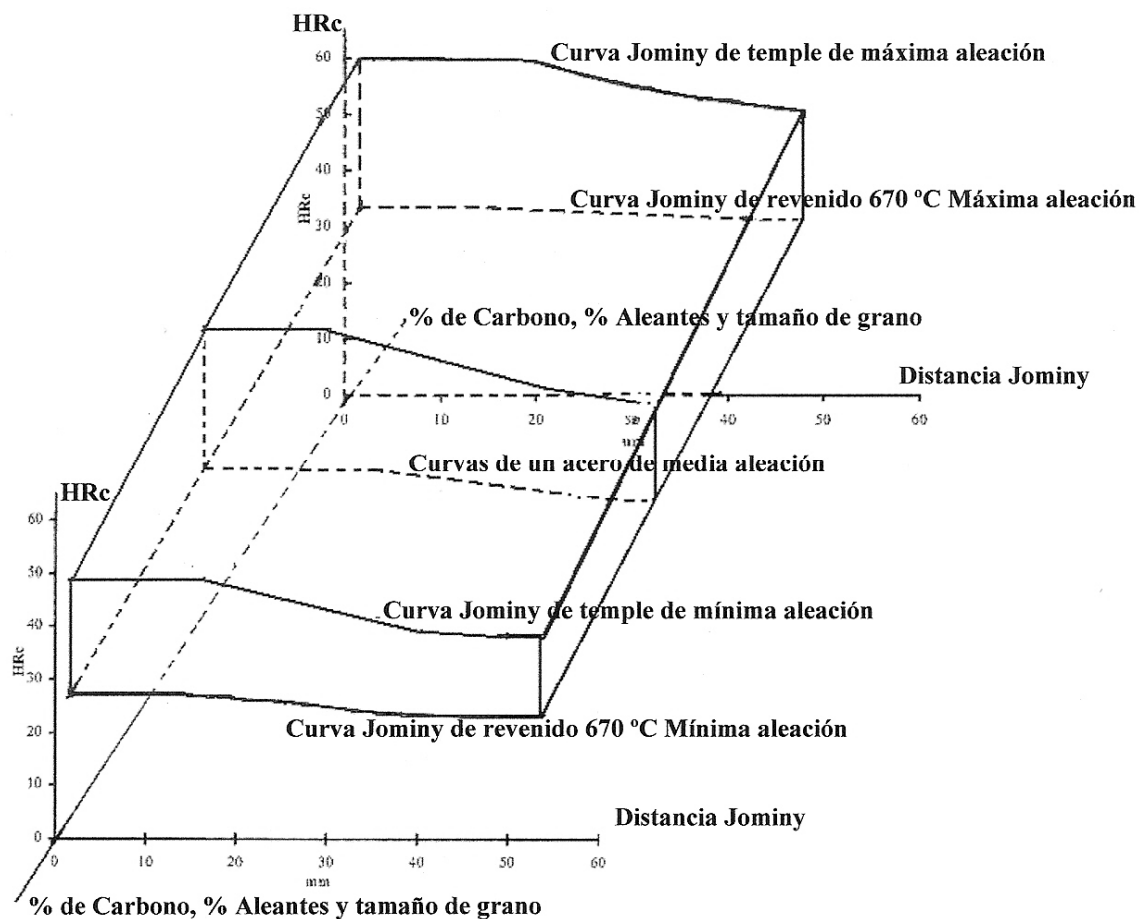


Fig. 2. La dureza del punto Jominy se obtiene mediante fórmulas polinómicas, en función de la distancia al extremo templado, la composición química y el tamaño de grano austenítico del acero, y la temperatura de revenido.

2.2 Definición de procedimientos

El trabajo puede ser dividido en cinco etapas fundamentales:

- Generación de una base de datos que abarque el volumen de la Fig. 2., es decir, el volumen comprendido por curvas Jominy de revenido entre 190 y 670°C, correspondientes, en un extremo, a un determinado acero SAE con la máxima composición química admitida por Norma [10,11], y en el otro extremo, al acero de la misma designación SAE pero con la mínima composición.
- Desarrollo de expresiones matemáticas que, deducidas a partir de la base de datos generada en la etapa anterior, sean capaces de predecir la dureza que tiene los puntos de una probeta Jominy revenida. Los valores se obtienen en función de: a) la composición química del acero utilizado, con la condición que esté dentro del rango aceptado por la Norma SAE, b) el tamaño de grano austenítico del acero, de 5 a 8 clasificación ASTM, c) la temperatura a que se realiza el revenido de la probeta, que puede ser cualquiera comprendida entre 190 y 670 °C, durante una hora.
- Desarrollo de un algoritmo matemático que defina la velocidad con que se enfrían los distintos puntos de un redondo templado con diversos medios, para adjudicarles la dureza que tienen los puntos Jominy que se enfrían con esa misma velocidad [2].
- Modificar los resultados de dureza obtenidos en la etapa anterior, en función del tiempo de revenido que se le aplicará a la pieza.
- Con los resultados de las etapas anteriores, generar un proceso computacional sencillo, que contando con los datos necesarios, pueda predecir en un grado de aproximación aceptable, los valores de la CUD que tendrá la pieza que esta siendo diseñada.

3. GENERACIÓN DE LA BASE DE DATOS

3.1. Fabricación y tratamiento térmico de probetas Jominy

Se ejecutó de acuerdo a lo especificado en la Norma MERCOSUR 259:2001 [12]. Los aceros procesados fueron especificados para la compra como de designación SAE “H” Se procesaron entre otros, barras de aceros SAE 4340H que es el que se utiliza como ejemplo para mostrar los resultados del trabajo. De cada una de las barras se extrajeron nueve probetas Jominy, se templaron según norma y se obtuvo de todas, en dos planos rectificadas, las curvas de temple correspondientes. Posteriormente cada probeta Jominy fue revenida a una de las nueve temperaturas indicadas en la Tabla 1 y se rectificaron dos nuevos planos, a 90° de los iniciales. En estos nuevos planos se ejecutaron las mediciones de dureza requeridas para obtener las curvas Jominy de revenido de cada temperatura. La dureza Rockwell C se midió de acuerdo a lo especificado por la norma IRAM IAS 500-105 [13], en puntos distribuidos a partir de 1,5 mm del extremo templado, con intervalos de 2 mm en las zonas cercanas el extremo templado y de 5 mm en zonas mas alejadas. Los tratamientos térmicos fueron realizados en una mufla eléctrica, con control electrónico de temperatura (error $< \pm 5^{\circ}\text{C}$). Para evitar la descarburación, se introdujeron en horno frío de a tres, dentro de tubos con viruta de fundición sellados con arcilla. Alcanzada la temperatura de austenización, permanecieron a esta por 45', 55', y 65'. La exposición al chorro de agua en su extremo templado, fue de 10'. La permanencia a temperatura de revenido fue de una hora, con enfriamiento al aire. El mecanizado de los planos, se hizo mediante proceso de desbaste por fresado y posterior rectificado con plato magnético y doble chorro de agua. En las probetas no revenidas se verificó la ausencia de zonas blandas mediante el procedimiento combinado de ácido nítrico y clorhídrico establecido por la Norma. La medición del tamaño de grano ASTM se hizo atacando con reactivo de Vilella, por el método de comparación, según Normas IRAM-IAS U-00-122 y MERCOSUR 241:2001 [14].

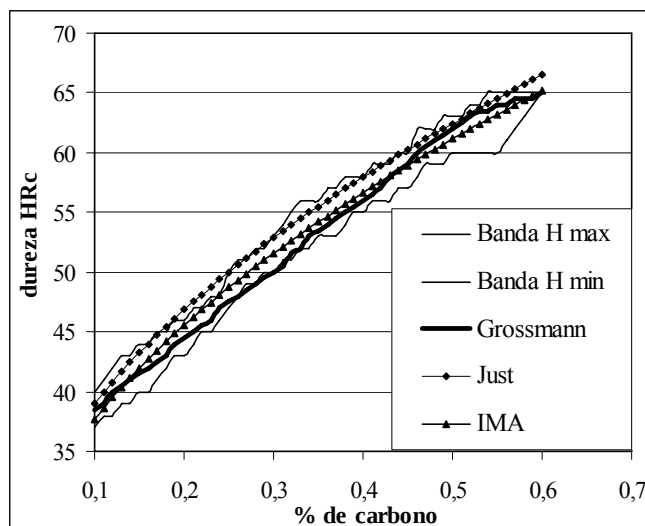


Fig. 3. Comparación de valores de dureza en los primeros puntos de probetas Jominy, según distintos autores.

3.2. Creación de curvas Jominy idealizadas

Para ampliar el universo de mediciones experimentales, de manera que el banco de datos cubriese el más amplio rango posible, se analizaron muestras de distintas barras en la esperanza de encontrar algunas que tuviesen composiciones químicas alejadas con respecto a las ya medidas. Lamentablemente, los análisis hechos en las muestras recibidas de los proveedores habituales, dieron composiciones químicas muy similares a las barras tratadas.

Por esa razón y para establecer un método, se tomó la decisión de incorporar a la base de datos, curvas Jominy creadas a partir de la información suministrada por la bibliografía disponible. Para eso se trazaron curvas Jominy de revenido correspondientes a nueve aceros SAE 4340, tres con máximo carbono, tres con medio y tres con mínimo carbono y a su vez, con máxima, media y mínima cantidad de los demás aleantes, todo en función de lo definido por las bandas “H”. Se los supuso con un grano tamaño 6 según ASTM. El procedimiento seguido se basó en calcular las curvas teóricas de temple de cada uno y a partir de ellas, trazar curvas Jominy revenidas a determinadas temperaturas, adjudicándoles los decaimientos de dureza y las formas, en función de la información que pudo extractarse de la bibliografía [15, 16, 17, 18, 19] y teniendo en cuenta los valores obtenidos en las probetas efectivamente medidas.

En la elección de la fórmula utilizada para calcular teóricamente las curvas Jominy de temple, se tuvo en cuenta las conclusiones de un trabajo anterior de los autores [20], en el que se comparan los resultados que proveen las expresiones de: a) Grossmann [5], b) Just [6], c) U.S. Steel Atlas, obtenida por regresión de datos [7], d) una combinación que hace Kirkaldy de las dos anteriores [1].

Del mencionado trabajo surge que, introduciendo en esas fórmulas las composiciones medias de los aceros SAE “H” y comparando los resultados, con las Bandas de Templabilidad tomadas por ejemplo de las Hojas de características del IAS [11], la combinación propuesta por Kirkaldy es la más aproximada. Pero también allí se expone, que tal como muestra el gráfico de la Fig. 3, es posible mejorar el grado de aproximación de los resultados obtenidos, modificando la fórmula propuesta por Just para calcular la dureza de los primeros puntos de curvas Jominy.

Por las razones expuestas, las fórmulas que se usaron para proveer los puntos de las curvas Jominy de temple son las siguientes:

Formula de Just modificada por los autores

$$HRC_{0-X} = 60\sqrt{C} + 18,7 \quad (1)$$

Fórmula de Just modificada por Kirkaldy

$$\text{HRC}_{X-32} = 98 \sqrt{C - 0,025E^2 \sqrt{C + 20Cr + 6,4Ni + 19Mn + 34Mo + 28V + 5Si - 24\sqrt{E} + 2,86E - 0,82A - 1,00}} \quad (2)$$

donde:

HRC_{0-X-32} : Dureza HRC, para valores de E de 0 a X y de X a 32, donde X varía en función de la composición química del acero

E: Distancias al extremo templado en 1/16"

A: Tamaño de grano austenítico ASTM

El resultado de lo que se ha expuesto en este punto, son las curvas Jominy de temple y de revenido mostradas en la Fig. 4. Los planos que estas curvas definen son los planos de curvas de máxima y mínima composición de la Fig. 2.

4. PREDICCIÓN DE CURVAS JOMINY DE REVENIDO. MÉTODO DE LAS ECUACIONES POLINÓMICAS

4.1. Dureza en función de la temperatura de revenido

El procedimiento seguido para encontrar expresiones matemáticas capaces de representar la dureza que tienen los puntos de una probeta Jominy revenida, teniendo como datos, la composición química y el tamaño de grano del acero utilizado, más la temperatura de revenido, tuvo varios pasos.

El primero fue encontrar una fórmula que pudiese cuantificar la dureza que tiene un punto, de una probeta Jominy construida con un acero determinado, revenida a temperaturas variables, exclusivamente en función de la temperatura de revenido. A tal fin se introdujeron en planilla de cálculos los datos generados experimentalmente, más los provistos por bibliografía disponible y se pudo verificar que tal expresión matemática puede ser una ecuación polinómica de grado variable entre 2 y 6. El grado de exactitud de resultados depende directamente del grado de la ecuación, que es naturalmente de la siguiente forma:

$$H_{rij} = A_{ij} \cdot \text{Temp}^n + B_{ij} \cdot \text{Temp}^{n-1} + \dots + E_{ij} \cdot \text{Temp}^2 + F_{ij} \cdot \text{Temp} + G_{ij} \quad (3)$$

donde:

H_{rij} : Dureza teórica en un punto de la probeta revenida

Temp : Temperatura de revenido para la cual se hace la predicción deseada (variable entre 190 y 670 °C)

A_{ij} , B_{ij} , E_{ij} , F_{ij} y G_{ij} : coeficientes de la ecuación que expresa la dureza que tiene un punto ij en probetas Jominy construidas con un acero definido, revenidas a temperaturas Temp .

En lo expuesto en la Tabla 1 y la Fig. 5, el procedimiento ha sido aplicado para predecir valores de dureza en el punto 1,5 mm de curvas Jominy, en función de las temperaturas de revenido. La primera columna de la Tabla muestra las temperaturas a que se revinieron las probetas del acero denominado 4340-1, la segunda son las durezas efectivamente medidas en los puntos 1,5 mm de cada probeta, la tercera se forma con los resultados calculados por la ecuación polinómica que corresponde a la curva de tendencia que tienen los valores medidos y que aparece en el gráfico de la Fig. 5, la cuarta muestra la diferencia entre durezas medidas y calculadas y la quinta indica el error porcentual

Aplicando este procedimiento para un número suficiente de puntos ij , es posible reproducir curvas teóricas de revenido como las de la Fig. 6, para cualquier temperatura, siempre en relación al acero medido o uno de una composición química muy aproximada. Trabajando con ecuaciones de segundo grado, el error máximo es $\pm 4\%$, es decir alrededor de ± 2 HRC para altas durezas y ± 1 HRC en las bajas.

4.2. Dureza en función de la temperatura, la composición química y el tamaño de grano

El siguiente paso fue encontrar una expresión matemática, capaz de predecir la dureza de las curvas Jominy de revenido, no solo en función de la temperatura del tratamiento, si no también de la composición química del acero. En base a lo explicado en 4.1, que muestra como una polinómica de segundo grado, puede reproducir curvas de revenido con un error igual a $\pm 4\%$ respecto de los valores medidos, se decidió extender el método para aceros de cualquier composición encontrando la forma en

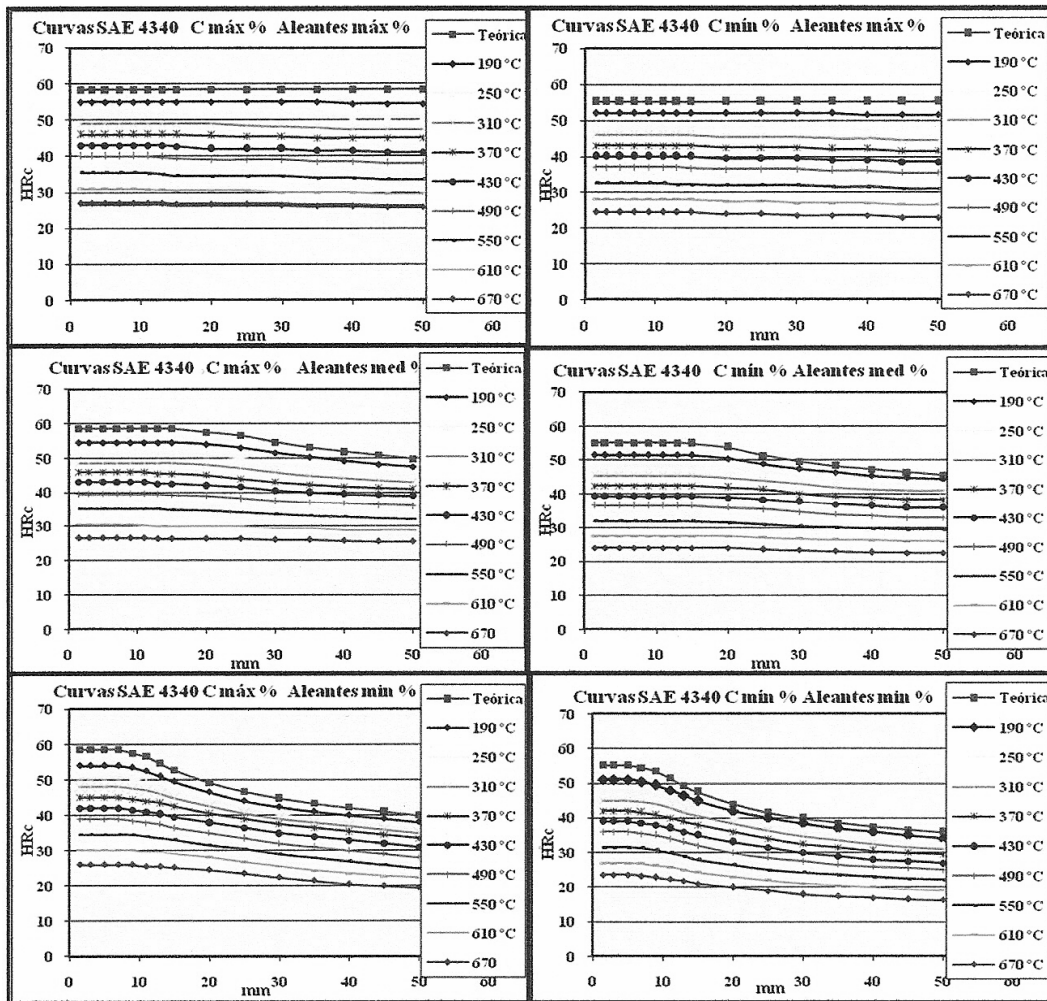


Fig. 4. Curvas Jominy de revenido deducidas para aceros SAE 4340 "H", con el máximo y mínimo contenido de carbono y máxima, media y mínima composición en aleantes, admitidas por Norma.

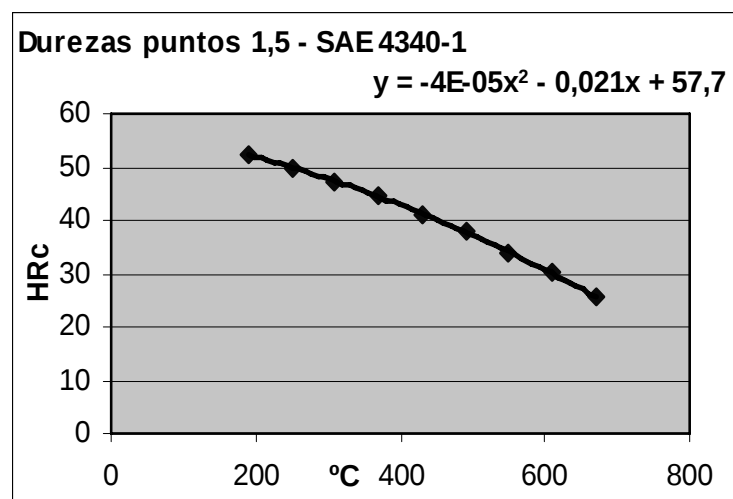


Fig. 5. Ejemplo de deducción de la ecuación predictiva de durezas para el punto 1.5 mm.

Tabla 1. Resultados de aplicar para el punto 1.5 mm, la ecuación deducida en la Fig. 5.

Revenido ° C	HRC medida	HRC calculada	Diferencia	Error en %
190	52,00	52,27	-0,27	-0,51
250	49,00	49,95	-0,95	-1,94
310	46,00	47,35	-1,35	-2,93
370	44,00	44,45	-0,45	-1,03
430	42,00	41,27	0,73	1,73
490	39,00	37,81	1,19	3,06
550	35,00	34,05	0,95	2,71
610	30,00	30,01	-0,01	-0,02
670	25,00	25,67	-0,67	-2,70

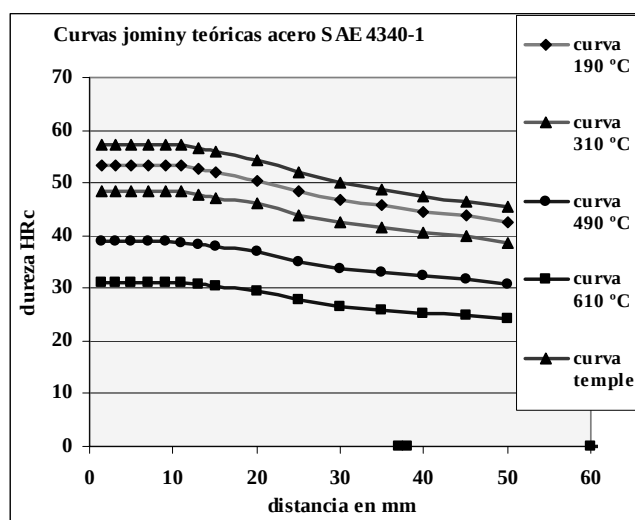


Fig. 6. Curvas Jominy teóricas de temple y revenido acero SAE 4340-1.

que los coeficientes de la ecuación de segundo grado varían en función de la composición química del acero de que se trate.

4.2.1 Separación de los aceros según su contenido de carbono

En este punto debió tenerse en cuenta que, a diferencia de cualquier otro elemento aleante de los aceros, el carbono actúa marcadamente en dos sentidos [2,15,16,17]. Por un lado, y en el mismo sentido que otros elementos, aumenta la templabilidad. Por el otro, y eso lo distingue de los demás, aumenta la dureza de la martensita en proporción al contenido con que esté presente en ella.

Es cierto que desde hace tiempo, autores como Bain [21] han proporcionado datos que indican que hay otros elementos, por ejemplo el Mo, que también tienen un efecto endurecedor sobre la martensita, pero los contenidos usuales de esos elementos en los aceros para los cuales pretende ser válido este trabajo, permite una simplificación en tal sentido.

Por lo expuesto, se decidió separar la actuación del carbono en sus dos roles, es decir, encontrar primero la relación entre las curvas Jominy de revenido y los aleantes, con el carbono actuando como uno más y luego, encontrar la expresión que muestre la influencia del carbono, actuando como principal elemento endurecedor de la martensita. Siguiendo ese lineamiento, se pasó a considerar no ya al acero SAE 4340 simultáneamente en toda la gama de composiciones posibles, sino que se lo dividió en ocho tipos de acero, cada uno con un porcentaje de carbono fijo y con el resto de los aleantes variando en toda la amplitud que admite la norma SAE.

El banco de datos quedó conformado entonces por: tres aceros con 0,44% de carbono, uno con máxima, otro con media y el tercero con mínima composición en aleantes, otros tres también con la misma variación en aleantes pero con 0,43% de carbono, tres más para 0,42% y así sucesivamente, hasta llegar a los tres correspondientes a 0,37% de carbono.

Es decir, que las expresiones matemáticas buscadas pasaron a deducirse de las curvas de revenido de 26 aceros, contando que para C=0,41% fueron cinco por agregarse los medidos experimentalmente. Si consideramos que cada acero daba lugar a 9 curvas de revenido y que se trabajó representando a cada curva con 15 puntos, fueron 3510 los valores de dureza incluidos en la base de datos, entre los medidos y los deducidos.

4.2.2 La magnitud representativa de la influencia de los elementos aleantes

Para que la expresión matemática de predicción de dureza en curvas Jominy de revenido, incluyese la influencia de los elementos aleantes se resolvió representar a tales elementos con el número que resulta de la sumatoria de los coeficientes que Grossmann propone para el cálculo teórico del Diámetro Crítico Ideal (Martensita 50%). En su método de calcular el DC Ideal, Grossmann hace participar a más elementos aleantes que otros autores. Por eso, al elegir un número que pudiese representar a la composición química, en la búsqueda de su relación con respecto del ablandamiento producido por el revenido, se optó por hacer participar en esta relación a un mayor número de elementos químicos, usando estos coeficientes. Esto también puede tener relevancia con los actuales métodos de análisis químico, por que podrá tenerse en cuenta incluso, la influencia de pequeñas cantidades de elementos.

Se buscaron entonces ecuaciones que diesen los valores de tales coeficientes, en función del contenido de elemento químico relacionado. Introduciendo en esas expresiones la composición de cada acero y realizando la correspondiente sumatoria, se pudo adjudicar a cada uno de los aceros que formaba parte del banco de datos, un número representativo de su composición química. e incluso de su tamaño de grano. Tal número aparece en las ecuaciones con el nombre *Sumatoria aleantes* (4).

4.2.3 La incidencia del tamaño de grano

Como es sabido, Grossmann hace participar al carbono en su acción sobre la templabilidad con cuatro coeficientes posibles que están relacionados con los tamaños de granos ASTM que van del 5 al 8. Por eso es posible que al momento de calcular el valor *Sumatoria aleantes*, la influencia del tamaño de grano sobre el coeficiente del Carbono, permita hacer extensiva esa influencia, sobre las expresiones predictivas de curvas de revenido.

4.2.4 Ecuaciones predictivas de los coeficientes de Grossmann [5]

Las siguientes ecuaciones fueron deducidas en planillas Excel, con datos tomados de [22].

- Coef Mn = $-0,116583 (\%Mn)^4 + 0,587761 (\%Mn)^3 - 1,101088 (\%Mn)^2 + 1,258795 (\%Mn) + 0,007416$
- Coef Si = $0,011720 (\%Si)^3 - 0,074872 (\%Si)^2 + 0,292919 (\%Si) + 0,000931$
- Coef Ni = $0,009237 (\%Ni)^3 - 0,036804 (\%Ni)^2 + 0,162275 (\%Ni) - 0,000270$
- Coef Cr = $0,09 (\%Cr)^3 - 0,39 (\%Cr)^2 + 0,79 (\%Cr) + 0,01$
- Coef Mo = $0,383407 (\%Mo)^3 - 0,930183 (\%Mo)^2 + 1,154869 (\%Mo) + 0,006013$
- Coef V = $455.509,69 (\%V)^6 - 191.612,42 (\%V)^5 + 27.206,65 (\%V)^4 - 1.048,3 (\%V)^3 - 92,04 (\%V)^2 + 8,31 (\%V) - 0,02$
- Coef P = $6,021756 (\%P)^3 - 2,470862 (\%P)^2 + 1,206507 (\%P) - 0,000967$
- Coef S = $-13,986 (\%S)^3 + 1,4744 (\%S)^2 - 0,3263 (\%S) + 0,0001$
- Coef Al = $95,486 (\%Al)^4 - 28,482 (\%Al)^3 + 2,4621 (\%Al)^2 + 0,4676 (\%Al) + 0,0014$
- Coef Ti = $-5,698 (\%Ti)^3 + 0,193 (\%Ti)^2 - 0,877 (\%Ti) + 0$

- Coef Carbono₅ = 0,218684 Ln(%C) + 0,599588 (para tamaño de grano ASTM 5)
- Coef Carbono₆ = 0,218057 Ln(%C) + 0,562774 (para tamaño de grano ASTM 6)
- Coef Carbono₇ = 0,217482 Ln(%C) + 0,529174 (para tamaño de grano ASTM 7)
- Coef Carbono₈ = 0,215813 Ln(%C) + 0,492708 (para tamaño de grano ASTM 8)
- *Sumatoria aleantes* = Coef Carbono_(x) + Coef Mn + + Coef otro (4)

$$\text{DC Ideal (50\%)} = 0,20541 \times \Sigma^6 - 0,6102 \times \Sigma^5 + 1,15048 \times \Sigma^4 - 0,60275 \times \Sigma^3 + 0,578 \times \Sigma^2 + 0,173 \times \Sigma + 0,106 \quad (5)$$

donde

$\Sigma = \text{Sumatoria aleantes}$
DC Ideal en pulgadas

4.3. Método de las Polinómicas

La manera de encontrar la relación entre los coeficientes de la ecuación de segundo grado (3) y la composición en aleantes, consistió en encontrar curvas representativas de tal relación, en hojas de cálculo Excel, modificando su forma hasta lograr un error menor a $\pm 4\%$. Para obtener un orden de complejidad aceptable, las ecuaciones de tendencia de tales curvas debían ser del menor orden posible, no mayor que dos en esta etapa.

La Tabla 2 es ejemplo de lo realizado con los datos correspondientes a aceros de carbono 0,41%. En ella se muestra el rango de la hoja de cálculo Excel, de donde se obtuvieron las ecuaciones de tendencia de las curvas que surgen usando, a las columnas Coef. *A*, Coef. *B* y Coef. *C*, como series en función de *Sumatoria aleantes*.

Como consecuencia del procedimiento aplicado y como se ve en la Tabla 3, los coeficientes *A*, *B* y *C* de (3), se transforman en [*b* de *A*]₁, [*c* de *A*]₁, [*b* de *B*]₁, etc. y el resultado de (6) aplicado en el ejemplo, provee la dureza del punto situado a 15 mm del extremo templado, de una probeta Jominy revenida, en función de la temperatura de revenido y la composición química, si la probeta esta construida con un acero comprendido dentro de la designación SAE 4340 “H”, con carbono 0,41%. La Tabla 2 también muestra la comparación que se hace entre los valores obtenidos usando (6) y los valores considerados como datos, para curvas revenidas a 190 °C.

La ecuación (6), con los coeficientes mostrados en la Tabla 3, es de la forma:

$$\text{HR}_{c15} = ([b \text{ de } A]_1 \cdot \text{Sumatoria aleantes} + [c \text{ de } A]_1) \cdot \text{Temp}^2 + ([b \text{ de } B]_1 \cdot \text{Sumatoria aleantes} + [c \text{ de } B]_1) \cdot \text{Temp} + ([a \text{ de } C]_1 \cdot \text{Sumatoria aleantes}^2 + [b \text{ de } C]_1 \cdot \text{Sumatoria aleantes} + [c \text{ de } C]_1) \quad (6)$$

donde:

$\text{HR}_{c15\text{mm}}$: dureza a 15 mm del extremo templado, de una probeta en SAE 4340, C=0,41%, en función de su composición química, tamaño de grano y temperatura de revenido

Temp: temperatura del revenido

Sumatoria aleantes: resultado de (4), en función de la composición del acero

Con el valor de *Sumatoria aleantes* de cada uno de los 26 aceros introducido en (6), se obtuvo la Fig. 7, que muestra las 26 curvas de variación de la dureza de los puntos ubicados a 15 mm del extremo templado, en función de la temperatura de revenido.

4.4. Dureza en función de distancias Jominy

Para encontrar las expresiones capaces de predecir el valor de la dureza en cualquier punto de las curvas Jominy revenidas, se continúa aplicando el método de polinómicas. Poniendo en columnas a los coeficientes de las expresiones (6), aplicadas a un número suficientemente representativo de distancias Jominy y considerándolos series en función de distancia, se obtienen los polinomios de sexto grado cuyos coeficientes se indican en la Tabla 4.

Tabla 2. Ejemplo del rango de hoja de cálculo, usado para poner los coeficientes *A*, *B* y *C* en función de *Sumatoria aleantes*.

ACERO	Sumatoria aleantes	Coef. A	Coef. B	Coef. C	HRc según (6) Temp = 190 °C	HRc medida ó deducida	HRc Diferencia	ERROR %
41máx	2,117	-0,000042	-0,0213	58,35	52,79	53,7	0,91	1,69
4340-2	1,932	-0,000040	-0,0205	56,65	51,30	52	0,70	1,35
41med	1,913	-0,000040	-0,0204	56,41	51,08	52,5	1,42	2,71
4340-1	1,849	-0,000039	-0,0202	55,53	50,27	51	0,73	1,44
41mín	1,69	-0,000038	-0,0195	52,76	47,68	48	0,32	0,66

Tabla 3. Coeficientes en función de la composición química. Punto 15 mm en aceros de carbono 0,41%.

Ecuación	Coeficientes	Valores
(6)	[b de A] ₁	- 0,00000937
	[c de A] ₁	- 0,0000221
	[b de B] ₁	- 0,0041
	[c de B] ₁	- 0,0126
	[a de C] ₁	- 16,0
	[b de C] ₁	+74,0
	[c de C] ₁	- 26,6

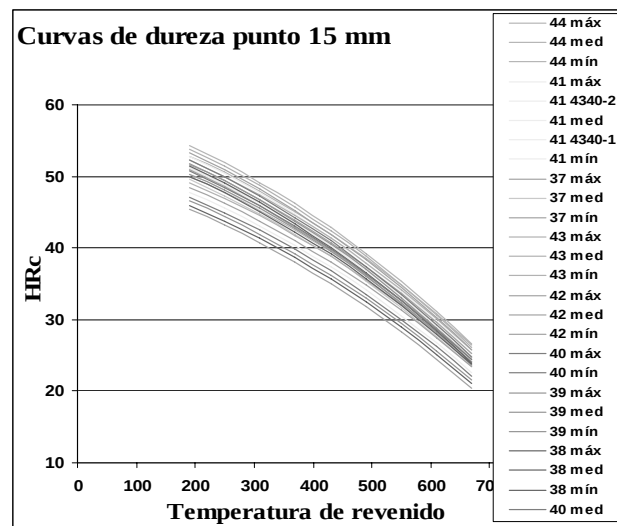


Fig. 7. Curvas de dureza del punto 15 mm, obtenidas mediante polinómicas de segundo grado, en función de la temperatura de revenido y de la composición química.

Al introducirle los coeficientes de la Tabla 4, la expresión (6) se convierte en (7), que siempre con la forma de una ecuación de segundo grado, con la temperatura de revenido como variable, tiene ahora a sus coeficientes en función de: a) la composición química en aleantes del acero de que se trate y el tamaño de grano, a través del valor *Sumatoria aleantes* y b) la distancia al extremo templado, representada por d_{ij} .

La ecuación (7) es:

$$HR_{C0,41} = ([b \text{ de } A]_2 \cdot Sumatoria \text{ aleantes} + [c \text{ de } A]_2) \cdot Temp^2 + ([b \text{ de } B]_2 \cdot Sumatoria \text{ aleantes} + [c \text{ de } B]_2) \cdot Temp + ([a \text{ de } C]_2 \cdot Sumatoria \text{ aleantes}^2 + [b \text{ de } C]_2 \cdot Sumatoria \text{ aleantes} + [c \text{ de } C]_2) \quad (7)$$

Con esta expresión, es posible hallar los valores de dureza que adquiere, una probeta Jominy revenida a cualquier temperatura comprendida entre 190 y 670°C, construida con un acero de cualquier composición química admitida por la norma SAE para la denominación 4340H, con la limitación de que su porcentaje de carbono debe ser igual a 0,41.

Tabla 4. Coeficientes de la ecuación (7), función de la distancia al extremo templado. Carbono 0,41%.

Ecuación N°	Coeficientes	Valores
(7)	$[b \text{ de } A]_2$	$6,2088E-14 dij^6 - 8,0124E-12 dij^5 + 3,3284E-10 dij^4 - 3,07126E-09 dij^3 - 1,05974E-07 dij^2 + 1,2086E-06 dij - 2,405E-06$
	$[c \text{ de } A]_2$	$-1,1282E-13 dij^6 + 1,435426E-11 dij^5 - 5,78293E-10 dij^4 + 4,30867E-09 dij^3 + 2,211513E-07 dij^2 - 2,39806E-06 dij - 3,5284E-05$
	$[b \text{ de } B]_2$	$8,70445E-11 dij^6 - 1,257783E-08 dij^5 + 6,47497E-07 dij^4 - 1,34905E-05 dij^3 + 8,02325E-05 dij^2 + 1,104E-05 dij - 4,46E-04$
	$[c \text{ de } B]_2$	$-1,970046E-10 dij^6 + 2,861834E-08 dij^5 - 1,485288E-06 dij^4 + 3,14059E-5 dij^3 - 1,94495E-04 dij^2 + 4,40872E-05 dij - 2,109E-02$
	$[a \text{ de } C]_2$	$1,9645822E-07 dij^6 - 2,9334933E-05 dij^5 + 1,5697674E-03 dij^4 - 3,364346E-02 dij^3 + 1,67323E-01 dij^2 + 3,881E-01 dij - 2,165$
	$[b \text{ de } C]_2$	$-8,793854E-07 dij^6 + 1,3045033E-04 dij^5 - 6,926059E-03 dij^4 + 1,4694735E-01 dij^3 - 7,07653E-01 dij^2 - 1,8941 dij + 13,285$
	$[c \text{ de } C]_2$	$9,75781E-07 dij^6 - 1,4393186E-04 dij^5 + 7,587073E-03 dij^4 - 1,592868E-01 dij^3 + 7,34436E-01 dij^2 + 2,352 dij + 39,92$

Tabla 5. Valor que toman los coeficientes $[b \text{ de } A]_2$ para $dij = 5 \text{ mm}$, según % de carbono

% Carbono	$[b \text{ de } A]_2$	$[c \text{ de } A]_2$	$[b \text{ de } B]_2$	$[c \text{ de } B]_2$	$[a \text{ de } C]_2$	$[b \text{ de } C]_2$	$[c \text{ de } C]_2$
0,44	0,0000008	-0,0000415	0,000295	-0,02265	0,62	1,33	54,59
0,43	0,0000008	-0,0000415	0,000295	-0,02265	0,63	1,08	54,49
0,42	0,0000008	-0,0000415	0,000295	-0,02265	0,64	0,82	54,45
0,41	0,0000008	-0,0000415	0,000295	-0,02265	0,65	0,56	54,44
0,40	0,0000008	-0,0000415	0,000295	-0,02265	1,01	-0,94	55,70
0,39	0,0000008	-0,0000415	0,000295	-0,02265	1,38	-2,43	56,91
0,38	0,0000008	-0,0000415	0,000295	-0,02265	1,75	-3,94	58,14
0,37	0,0000008	-0,0000415	0,000295	-0,02265	2,11	-5,44	59,40

Repitiendo el procedimiento para carbono 0,44 a 0,37%, es posible contar con nueve ecuaciones, una para cada porcentaje de carbono. Eligiendo la ecuación en función de ese dato, se puede predecir la dureza de todos los puntos de una curva Jominy, revenida a cualquier temperatura entre 190 y 670°C, en todas las combinaciones químicas admitidas por la norma para el acero SAE 4340 H.

4.5. Dureza en función de todas las variables, incluido contenido en carbono

Si se continúa aplicando el mismo método, aún es posible encontrar una ecuación que exprese el valor de la dureza buscada, en función de todas las variables incluyendo como tal al carbono. Para ello es necesario poner a los coeficientes de la ecuación (7) de cada punto ij , en función de esa variable. Como el proceso es extenso, solo se describirá a modo de ejemplo como se han obtenido las expresiones que predicen la dureza del punto $ij = 5 \text{ mm}$, de una probeta revenida a 190°C, construida con acero de 0,41% de carbono y una composición química cuyo valor de *Sumatoria aleantes* es igual 1,932

Si se repite el procedimiento realizado para carbono 0,41% descrito en el punto 4.4 y se encuentran los coeficientes $[x \text{ de } X]_2$ para los porcentajes de 0,44 a 0,37%, reemplazando d_{ij} por 5, se construye la Tabla 5.

Tomando a cada columna como una serie, se encuentran las ecuaciones que expresan como varía cada coeficiente en función del porcentaje de carbono. Los coeficientes de tales ecuaciones son $[x \text{ de } X]_3$ en la Tabla 6 y permiten obtener, mediante la expresión (8), la dureza del punto 5 mm. Con el procedimiento descrito, se puede predecir la dureza de todos los puntos de una curva Jominy, revenida a cualquier temperatura entre 190 y 670°C, en todas las combinaciones químicas admitidas por la norma para el acero SAE 4340 H.

La expresión (7) se transforma en (8)

Tabla 6. Coeficientes para el cálculo de dureza del punto $ij = 5$, en función del contenido de Carbono (C).

Coeficientes Ecuación (8)	Para $ij = 5 \text{ mm}$
$[b \text{ de } A]_3$	$0,0000000 \text{ C} + 0,0000008$
$[c \text{ de } A]_3$	$-0,0000000 \text{ C} - 0,0000415$
$[b \text{ de } B]_3$	$-0,0000000 \text{ C} + 0,000295$
$[c \text{ de } B]_3$	$0,000000 \text{ C} - 0,02265$
$[a \text{ de } C]_3$	$-603042394,5938 \text{ C}^6 + 1476437132,7472 \text{ C}^5 - 1504642399,7061 \text{ C}^4 + 816976484,1383 \text{ C}^3 - 249267446,6287 \text{ C}^2 + 40520717,6562 \text{ C} - 2741801,4457$
$[b \text{ de } C]_3$	$-3233411834 \text{ C}^6 + 7913185012,73 \text{ C}^5 - 8061151098,8846 \text{ C}^4 + 4375270480,3816 \text{ C}^3 - 1334432503,4897 \text{ C}^2 + 216843692,6449 \text{ C} - 14666815,6719$
$[c \text{ de } C]_3$	$3169697675 \text{ C}^6 - 7759435278,625 \text{ C}^5 + 7907063904,4063 \text{ C}^4 - 4293187181,5385 \text{ C}^3 + 1309922208,5977 \text{ C}^2 - 212954513,0197 \text{ C} + 14410693,7613$

Tabla 7. Comparación de valores calculados y medidos.

Distancia ij	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50
HRc calculada	52,3	52,3	52,3	52,3	52,2	52	51,8	51,5	50,9	50,4	49,9	49,6	49,2	48,8	48,4
HRc medida	53	53	53	53	53	52,5	52,5	52	51,5	51	50,5	50	49	48,3	47,5
% Error	1,38	1,38	1,34	1,36	1,60	1,03	1,43	0,90	1,13	1,22	1,13	0,88	-0,39	-0,93	-1,89

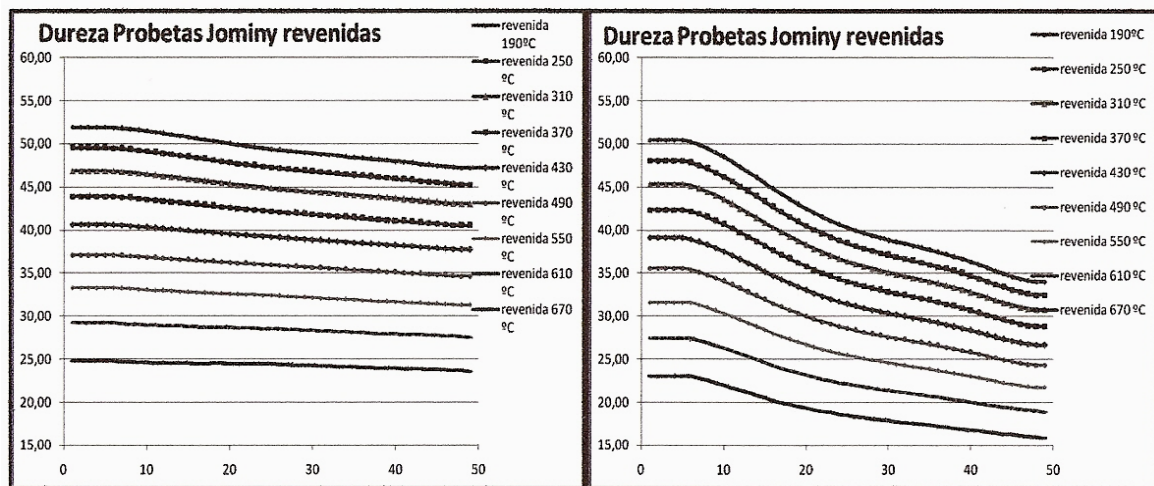


Fig. 8. Curvas Jominy teóricas. Aceros: a) C = 0,40 % media aleación b) C = 0,37 % mínima aleación.

$$HR_{c \text{ 5mm}} = (([b \text{ de } A]_3 \cdot \text{Sumatoria aleantes} + [c \text{ de } A]_3) \cdot \text{Temp}^2) + (([b \text{ de } B]_3 \cdot \text{Sumatoria aleantes} + [c \text{ de } B]_3) \cdot \text{Temp}) + ([a \text{ de } C]_3 \cdot \text{Sumatoria aleantes}^2 + [b \text{ de } C]_3 \cdot \text{Sumatoria aleantes} + [c \text{ de } C]_3) \quad (8)$$

donde

$$HR_{c \text{ 5mm}} = 52,3 \text{ si Carbono} = 0,41\%, \text{ Sumatoria aleantes} = 1,932 \text{ y Temp} = 190 \text{ }^\circ\text{C}$$

La Tabla 7 muestra los resultados del cálculo de dureza en algunos otros puntos de la curva de revenido, con los datos suministrados para la expresión (8) y compara esos resultados con mediciones experimentales. Las Figuras 8, muestran las curvas teóricas de dureza de probetas Jominy, revenidas a las temperaturas indicadas, para aceros SAE 4340H de dos composiciones distintas, tamaño de grano ASTM 6. Todos los valores de dureza que el cálculo teórico adjudica a estas curvas, tienen un error menor a $\pm 4\%$ respecto de aquellos tomados como datos.

5. RELACIÓN ENTRE LOS PUNTOS JOMINY Y LOS PUNTOS DE LA PIEZA

5.1. Velocidad de enfriamiento

En la búsqueda del procedimiento más adecuado para encontrar las velocidades de enfriamiento de los puntos de la pieza al templarse, para relacionarlos con los puntos de las probetas Jominy, se analizaron las siguientes alternativas:

- Aplicación de algoritmos desarrollados por herramientas matemáticas tal como elementos finitos o diferencias finitas, aplicadas a procesos de transferencia de calor [23]
- Utilización del “factor de temple”, que se define como un número que interrelaciona la velocidad de enfriamiento y la transformaciones cinéticas del acero que en particular está siendo templado. (Trabajos de Bates, Avrami, Scheil *et al.* [2])
- Aplicación de fórmulas matemáticas deducidas por procesos de regresión (Trabajos de Liscic y Filetin, Wuning, Tensi) [2]
- Datos obtenidos de curvas experimentales [24]

Si bien se analizó que la utilización de métodos como los mencionados en b) y c) podrían proveer resultados más exactos, la necesidad de simplificar las tareas hizo que se optara por la aplicación de métodos matemáticos del tipo a). De cualquier manera, debido a la necesidad de establecer pautas comunes a cualquiera de los métodos de cálculo seleccionados, se hizo necesario definir con exactitud el concepto “Velocidad de enfriamiento”, toda vez que es la magnitud de comparación. Es decir, que debía precisarse la forma en que dicha magnitud se mide, para posteriormente verificar el cumplimiento de la igualdad que se expresa a continuación:

$$v_{ei} = v_{eij} \quad (9)$$

donde:

v_{ei} es la velocidad de enfriamiento en el punto i de la pieza.

v_{eij} es la velocidad en el punto de la probeta Jominy con que se corresponde.

Existen dos opciones en este sentido. Una es considerarla en el valor instantáneo que tiene a una cierta temperatura, otra es tener en cuenta el tiempo transcurrido para que la temperatura baje desde un valor a otro. Jominy elaboró sus teorías considerando que si las velocidades de enfriamiento eran iguales al pasar por la temperatura de 705°C, los valores de dureza serían siempre aproximadamente iguales. Otros investigadores consideran en cambio que es más razonable era tomar la velocidad entre un lapso de temperaturas, específicamente entre la de temple y una media entre la del temple y la del medio (850-435°C).

Teniendo en cuenta que existen, en la bibliografía especializada, tablas que indican las velocidades de enfriamiento que le corresponden a cada uno de los puntos de la probeta Jominy, al pasar por 705°C [2] y que esa información permite contar de un modo sencillo con una de las magnitudes a comparar, fue elegida la opción de la velocidad instantánea.

5.2. Velocidad de enfriamiento de los puntos de la pieza

El modelo matemático a resolver, está constituido por la ecuación diferencial de la conducción del calor en coordenadas cilíndricas, unidimensional, para estado no estacionario y sin fuente de calor. Es la expresión indicada como (10)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

donde r es el radio, T la temperatura, t el tiempo y α la difusividad térmica del material dada por la expresión (11), en la cual

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (11)$$

donde ρ es la densidad del material, c_p es el calor específico a presión constante del material y k la conductividad térmica del material. Las propiedades físicas del material se suponen constantes.

Las condiciones de borde aplicadas para resolver esta ecuación diferencial corresponden a una condición de simetría en el centro del cilindro, expresada por (12)

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (12)$$

y de una condición de borde de convección en la superficie, dada por la expresión (13), que expresa que el calor que se transmite por conducción en la pieza es igual al calor transmitido por convección en el medio (expresiones de Fourier y Newton)

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_e} = h(T_{r_e} - T_{\infty}) \quad (13)$$

donde r_e es el radio exterior de la pieza, h es el coeficiente de convección del fluido de enfriamiento y T_{∞} es la temperatura del fluido de enfriamiento.

Para resolver la ecuación diferencial, junto con las condiciones de borde, se ha utilizado el método de los volúmenes finitos, resolviendo el sistema de ecuaciones resultantes en forma implícita, por el método conocido como TDMA (*Tri-Diagonal Matrix Algorit*). Para discretizar el radio se han utilizado 100 volúmenes de control de tamaño uniforme. Con el campo de temperaturas determinado para cada instante, se definen las velocidades de enfriamiento de los puntos de la pieza en función del medio de enfriamiento de la Tabla 8.

5.3. Severidad de temple.

La influencia del medio de enfriamiento ha sido considerada en el algoritmo descrito en el punto anterior, mediante la magnitud definida por Grossmann como “Severidad de temple HG”. El mismo se deduce a partir de considerar que el coeficiente de transferencia calórica h es:

$$h = q / S (T_1 - T_2) \quad (14)$$

donde:

- q : calor transferido desde la pieza al medio
- T_1 : temperatura de la pieza
- T_2 : temperatura del medio
- S : área considerada

Grossmann define el denominado “coeficiente de severidad de temple” a partir de:

$$“HG” = h/2k \quad (15)$$

siendo:

- k : conductividad del metal

Los valores tradicionalmente aceptados para “HG” son los que se detallan en la Tabla 8, debiéndose tener en cuenta que la descripción del medio y su estado, es solo indicativa.

5.4. Distancias Jominy en función de la velocidad de enfriamiento

Con datos de tabla tomada de [2] se pueden deducir expresiones que tengan como resultado la velocidad de enfriamiento que tienen los puntos dij de las probetas Jominy al pasar por 705°C.

Para dij que va desde 1,5 a 25 mm:

$$\begin{aligned} ^\circ\text{C}/\text{sg } 705^\circ\text{C} = & 0,0000069445 \, dij^6 - 0,00079716 \, dij^5 + 0,0382829 \, dij^4 - 0,986995 \, dij^3 + 14,49872 \, dij^2 - \\ & 116,937 \, dij + 424,36 \end{aligned} \quad (16)$$

Tabla 8. Valores H_G y Coef. de película para distintos medios y condiciones [2,23].

Fluido	Temperatura del fluido	Velocidad entre pieza y medio	Grossmann $H=h/2k$ (*)	h Coef. de película fluido
	°C	m/s		$W/m^2 \cdot K$
Agua	18	0,00	1,00	4.500
		0,00	1,10	5.000
	32	0,25	2,10	9.000
		0,51	2,70	12.000
		0,76	2,80	12.000
		0,00	0,20	1.000
	55	0,25	0,60	2.500
		0,51	1,50	6.500
		0,76	2,40	10.500
		0,00	0,50	2.000
Agua salada 10% ClNa	32	0,00	2,00	9.000
		0,51	5,00	20.000
Aceite rápido	60	0,25	1,00	4.500
		0,51	1,10	5.000
		0,76	1,50	6.500
		0,00	0,80	3.500
25% polyvinyl pirrolidone	43	0,25	1,30	6.000
		0,51	1,50	6.500
		0,76	1,80	7.500
		0,00	0,30	1.200
Aceite convencional	30	0,25	0,50	2.000
	65	0,51	0,70	3.000
	150	0,51	1,20	5.000
Aceite martenpering	27	0,00	0,05	200
		2,54	0,06	250
		5,08	0,08	300

Para d_{ij} que va desde 26 mm a 31 mm:

$$^{\circ}C/sg \ 705^{\circ}C = -0,299 \ d_{ij} + 13,4 \quad (17)$$

Para d_{ij} que va desde 32 mm a 50 mm:

$$^{\circ}C/sg \ 705^{\circ}C = -0,00013 \ d_{ij}^3 + 0,02108 \ d_{ij}^2 - 1,168 \ d_{ij} + 23,9 \quad (18)$$

Usando los resultados de estas fórmulas como serie de datos, pudieron hallarse las expresiones (19) y (20), que ponen a la distancia Jominy en función de la velocidad de enfriamiento, por ser este el dato que para cada punto de la pieza provee el algoritmo desarrollado en el punto 5.2. De modo que teniendo en cuenta (9), será

$$d_{ij} = -3,62 \ln v_{ei} + 21,83 \quad \text{para } v_{ei} \text{ desde } 274 \text{ hasta } 27^{\circ}C/sg \quad (19)$$

y

$$d_{ij} = 73 \ v_{ei}^{-6,15} + 0,3 \quad \text{para } v_{ei} \text{ menor a } 27^{\circ}C/sg \quad (20)$$

6. INCIDENCIA DEL TIEMPO DE REVENIDO

6.1. Procedimiento

Debido a que los valores de dureza son calculados para revenidos de una hora, es necesario modificarlos en base al tiempo de revenido previsto para la pieza. Para ello se utiliza la expresión (21) desarrollada por J.H. Hollomon y L.D. Jaffe [25,15], que permite extender el resultado del cálculo a distintas combinaciones temperatura-tiempo, por fijar la relación entre estas dos magnitudes y el ablandamiento que produce el revenido.

$$T_{eq} = T \cdot (c + \log t) \quad (21)$$

donde:

c : constante función del % de carbono del acero, igual a 18 para valores entre 0,30 y 0,60%

T : temperatura en grados Kelvin

t : tiempo de revenido en hs

Dado que el tiempo utilizado para el revenido de las probetas fue de una hora, la expresión (21) se transforma en:

$$HR_{cr} = HR_{cc} \cdot \frac{(18 + \log 1)}{(18 + \log t)} \quad (22)$$

donde:

HR_{cc} = HRc calculada para revenido de una hora

HR_{cr} = HRc real función del tiempo de revenido

7. HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

7.1. Introducción

Con las ecuaciones descritas en los puntos anteriores y utilizando cualquier software de creación de programas, es posible obtener la herramienta computacional buscada. A continuación, se describe un programa desarrollado mediante una combinación de dos de ellos. Los pasos generales del programa se hicieron en base a MATLAB, en tanto que las velocidades de enfriamiento de la pieza fueron provistas por un ejecutable hecho en base a FORTRAN. En la Fig. 9 se muestra un diagrama simplificado del programa desarrollado.

7.2. Descripción del Programa

7.2.1 Introducción

Utilizando MATLAB y su función GUIDE se programa un entorno visual compuesto de:

- celdas para introducir los datos necesarios
- un botón para iniciar el cálculo
- celdas que entreguen los resultados obtenidos

7.2.2 Descripción de pasos

- Paso 1

Introducir diámetro de la pieza (entre 30 y 180 mm).

- Paso 2

Cargar datos de composición química del acero. Valores dentro del rango aceptado por la Norma SAE para el acero de que se trate.

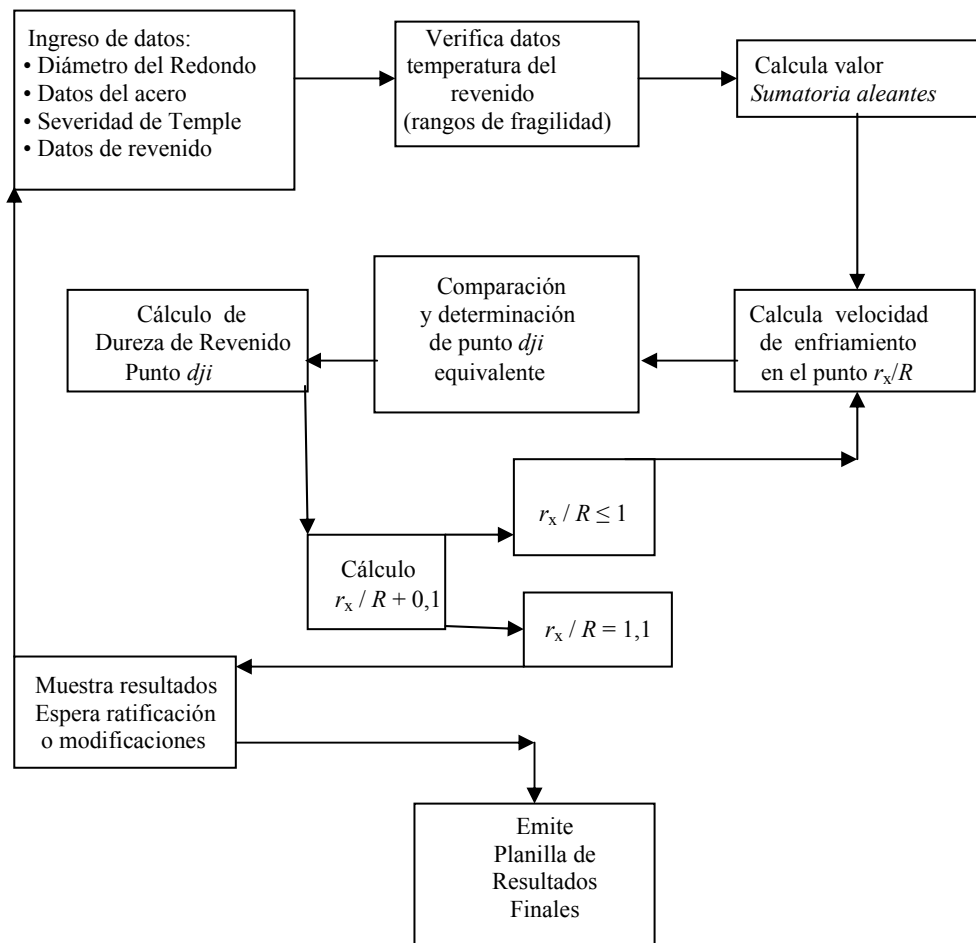


Fig. 9. Diagrama de bloques.

- Paso 3

Introduce tamaño de grano ASTM (5 a 8).

- Paso 4

Introducir el “coeficiente de película” si se le conoce. En caso contrario se deja en blanco y se va al paso siguiente.

- Paso 5

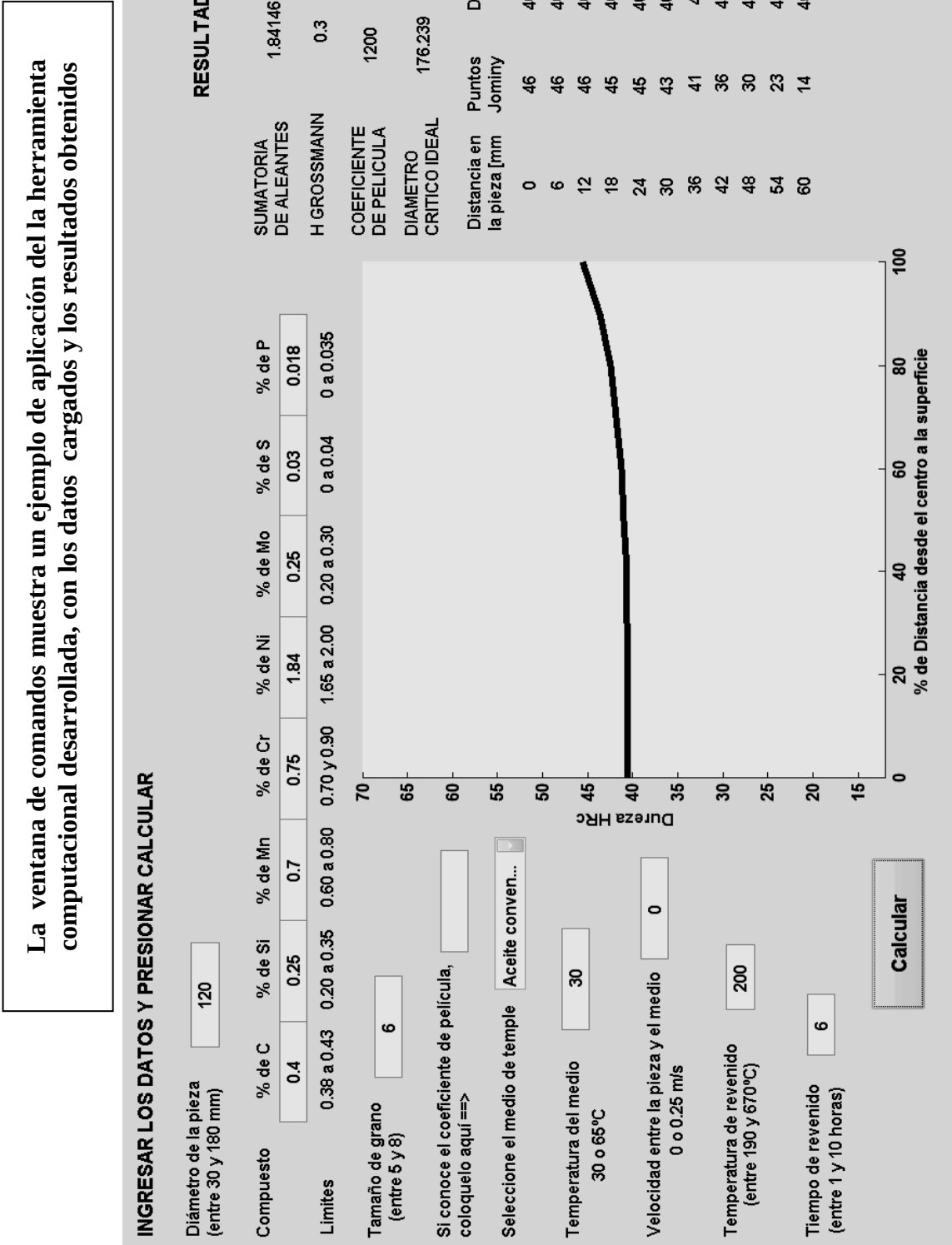
Se elige el medio, temperatura y velocidad relativa respecto de la pieza, cargando información en una serie de celdas que dan las mismas opciones que la Tabla 8 del Punto 5. La elección da como resultado el valor de la severidad de temple “H_G” y concomitantemente provee al programa, el valor del Coeficiente de Película del medio.

- Paso 6

Se introduce la temperatura de revenido en la celda correspondiente. El rango va desde los 190 a los 670°C y si la temperatura elegida está entre 220°C y 390°C ó 450°C y 525 °C, pide confirmación con un aviso que dice “Zonas de posible fragilidad”.

- Paso 7

Se introduce el tiempo de revenido comprendido entre 1 y 10 hs.



- Paso 8

Se presiona el botón “CALCULAR” y el programa ejecuta las siguientes operaciones:

Paso 8.1 Calcula el valor *Sumatoria aleantes* con la expresión (5).

Paso 8.2 Un programa realizado con sentencias FORTRAN, resuelve las expresiones (10), (11) y (12) de acuerdo a lo expuesto en el punto 5 y provee las velocidades de enfriamiento para 11 puntos de la pieza, distribuidos desde el centro a la superficie.

Paso 8.3 Introduciendo los 11 valores de velocidad de enfriamiento en las expresiones (19 y (20), el programa encuentra los puntos Jominy que tienen la misma velocidad de enfriamiento que los 11 puntos de la pieza.

Paso 8.4 Calcula el valor de dureza de los 11 puntos Jominy, mediante la expresión (8) que le corresponde a cada uno.

Paso 8.4 Utilizando la expresión (22), se afecta, en función del tiempo de revenido, el valor de dureza determinado para cada punto Jominy y por consiguiente, los puntos correspondientes de la pieza.

- Paso 9

El programa muestra en la ventana de comando, los resultados en forma de columnas donde la primera indica los puntos de la pieza, la segunda los puntos Jominy con la misma velocidad de enfriamiento y la tercera, la dureza calculada para cada punto.

- Paso 10

El Programa muestra en la ventana, un gráfico con la Curva de Durezas Teóricas en la pieza (Fig. 10).

8. CONCLUSIONES

Si bien al momento de redactar este trabajo, no están totalmente terminadas todas las pruebas en piezas reales con distintos diámetros, aceros y tratamientos, se puede aseverar que:

- El método de las polinómicas reproduce datos experimentales, con error menores a $\pm 5\%$
- El algoritmo que define las velocidades de enfriamiento en la pieza, provee resultados que difieren en $\pm 1\%$ respecto de los que se obtienen aplicando Lamont [23].
- Procesos de regresión, realizados en base a curvas Jominy de revenido experimentalmente medidas, permitirían ampliar la base de datos, aumentar la capacidad del programa y mejorar la exactitud de resultados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren manifestar su agradecimiento al Dr. Ing. Lucio Iurman, por su constante apoyo y sus generosos consejos. Desean además informar que en este trabajo participaron alumnos de 4º y 5º año de la Carrera de Ing. Mecánica de la Universidad Nacional de San Juan. Por la trascendencia que esa participación tuvo, los autores desean expresar a esos alumnos, los Srs. Ignacio Oliva, Heber Chaparro, René Faíd, Matías Beltramo, Matías Beraghi, Martín Cena, Javier Flores, Diego Aguilera y Fernando Zabaleta, su más sincero reconocimiento.

REFERENCIAS

- [1] Kirkaldy, J.S., *Quantitative Prediction of Transformation Hardening of Steels*, Metals Handbook, Vol. IV, 8ª Edición, ASTM (1991)
- [2] Bates, C., Totten, G., Brennan, R., *Quenching of steels*, Metals Handbook, Vol. IV, 8ª Edición, ASM (1991)
- [3] Gergely, M., Somogyi, S., *Computerized Properties Prediction and Technology Planning in Heat Treatment of Steels*, Metals Handbook, Vol. IV, 8ª Edición, Steel Advisory Center for Industrial Technologies, Hungary, ASM (1991)

- [4] Jominy, W.E., Boegehold, A.L., "A Hardenability Test for Carburizing Steels", *Transactions ASM*, **26** (1938)
- [5] Grossmann, M.A., "Hardenability Calculated from Chemical Composition", *Transactions AIME*, **150**, 227-259 (1942)
- [6] Just, E., *New Formulas for Calculating Hardenability Curves*, Metallurgical Progress (1969)
- [7] U.S. Steel, *U. S. Atlas, Metals Handbook*, Vol. IV, Eight Edition, ASTM (1991)
- [8] Doane, D.V., Kirkaldy, J.S., Maynier, Ph., Jungmann, B., Dolet, J., "Creusot-Loire System for the prediction of the Mechanical Properties of Low alloy Steel Products, Hardenability Concepts with applications to steel," *Metallurgical Society of AIME*, 518-545 (1978)
- [9] Reti, T., Gergely, M., Tardi, P., "Mathematical Treatment of Non-isothermal Transformations", *Material Science Technology*, **3**(5), 365-371 (1987)
- [10] The Iron and Steel Society, *Steel bar product guidelines* (1996)
- [11] Instituto Argentino de Siderurgia "Aceros para construcciones mecánicas. Hojas de características" (1994)
- [12] IRAM - IAS "Norma Mercosur 259:2001 Acero - Determinación de templabilidad por temple del extremo (ensayo Jominy)" (2001)
- [13] IRAM - IAS "Norma IRAM IAS 500 - 105 Método de Ensayo Rockwell Escala C" (1967)
- [14] IRAM - IAS "Norma Mercosur 241 - IRAM-IAS Determinación del tamaño de grano austenítico" (2001)
- [15] Grange, R. Hribal, C., "Hardness of tempered martensite in carbon low alloy steels", *Metallurgical and Materials Transactions A*, **8**(11), 1775-1785 (1977)
- [16] Wisti, M., Hingwe, M., *Tempering of Steel*, ASM Handbook, Vol. 4, 8ª Ed ASM (1991)
- [17] Chapman, R.D., Jominy, W.E., "Hardness Variations in Carbon-Molybdenum Steels after Tempering", *Metal Progress*, **57** (1950)
- [18] Atkins, M., *Atlas of continuous cooling transformations diagrams for engineering steels*, ASM&BSC (1978)
- [19] Hoytt, S., *Metals Properties*, ASME Handbook – McGraw-Hill Co London (1954)
- [20] Yanzón, R., Rodríguez, C. *et al.*, "Predicción de dureza en piezas construidas con acero templado y revenido", *6º Congreso de Metalurgia y Materiales CONAMET/SAM*, Chile (2006)
- [21] Bain, E.C., Paxton, H.W., *Alloying Elements in Steel*, ASM (1961)
- [22] Maroni, P.J., *Templabilidad. Un método para seleccionar aceros*, Ed. Mitre (1976)
- [23] Castro, M.A., "Problema Inverso de la conducción de calor en aceros", *Proc. 80 Reunión Anual de la Asociación Física Argentina* (2001)
- [24] Lamont, J.L., "How to estimate hardening depth in bars", *Iron Age*, **152**(14), 64–70 (1943)
- [25] Hollomon, H., Jaffe, L.D., "Time temperature relations in tempering steel", *Transactions AIME*, **162**, 223-249 (1945)

PREDICTION OF HARDNESS IN MECHANICAL PARTS BUILT WITH HARDENED AND TEMPERED STEEL

Abstract – The objective of the work is to predict the "U curve" of hardness of a cylindrical part, built in steel quenched and tempered to temperatures understood between 190 and 670°C. It is assumed that a point of a quenched part has the same hardness that a point that cools down at the same speed, in a Jominy test probe of the same chemical composition, extending the similarity if the compared points are tempered at the same temperature and time. For the comparison of cooling speeds at 705°C between part and test probe, a finite volumes algorithm is used. The hardness of the points of the Jominy test probes, tempered at variable temperatures, is calculated theoretically with formulas developed starting from the treatment of experimental and theoretical/ideal data, deduced by use of the Just – Kirkaldy formulas, with a modification introduced by the authors, using as model a SAE 4340 steel. The influence of the time is calculated with the formula of Hollomon and Jaffe. All these elements were introduced in a computational tool that can be described in the following way: Entrance data: the diameter of the part, the chemical composition and the size of grain of the used steel, the severity of the quenching means, and the temperature and time of the foreseen tempering. Exit data: Hardness HRC in points of the part diameter. That result will allow an appropriate selection, so much of the material, as of the variables of the thermal treatment.

Keywords – Hardness, Parts, Steel, Quenched, Tempered.

