

SOFTWARE DE PREDICCIÓN DE DUREZAS EN PUNTOS DE UNA PIEZA MECÁNICA CONSTRUIDA CON ACERO TEMPLADO Y REVENIDO

**Rodolfo Yanzón, Carlos Rodríguez, Daniel Rebollo, Ricardo Sánchez,
Ignacio Oliva y René Faíd**

*Instituto de Mecánica Aplicada – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan
Av. Gral. San Martín 1109 oeste, (5400) San Juan, Argentina - e-mail: ryanzon@unsj.edu.ar.*

RESUMEN

El software desarrollado permite predecir la curva “U” de dureza que tendrá la sección de una pieza redonda, que se construya con aceros de construcciones mecánicas, para ser posteriormente templada en alguno de los medios usuales y revenida a la temperatura fijada por las propiedades finales requeridas. Para ello se calcula la velocidad con que se enfrían distintos puntos de la sección de la pieza, cuando es templada con distintos medios, utilizando para ese cálculo un algoritmo matemático desarrollado a partir del método de los volúmenes finitos. Los valores de velocidad de enfriamiento obtenidos se comparan con los que sufren los distintos puntos de una probeta Jominy, adjudicando la misma dureza a los puntos que enfrían a la misma velocidad al pasar por la temperatura de 705 °C. La base de datos de probetas Jominy se ha elaborado con 9 probetas por cada uno de 8 aceros de construcción, de distinta composición química, revenidas cada una a una de nueve temperaturas comprendidas entre los 190 °C y los 670 °C. Los datos que el software requiere son: el diámetro de la pieza, la composición química y el tamaño de grano del acero utilizado, la severidad del medio de temple y la temperatura y tiempo del revenido previsto. El resultado predice la dureza HRC que tendrán varios puntos lo largo del radio de la pieza, datos que permiten en el momento de diseñarla, una rápida verificación de la adecuada selección tanto del material como de las variables del tratamiento térmico.

Palabras Claves: predicción dureza pieza templada revenido.

1. INTRODUCCIÓN

Son numerosos los trabajos realizados para obtener software de simulación de procesos térmicos [1]. Y dentro de ellos, existen los que tienen como objeto la predicción de propiedades resultantes. Para la obtención de sus resultados, se han aplicado con diferentes grados de exactitud y complejidad, varios modelos matemáticos diferenciados de la siguiente manera:

- 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 podemos mencionar el calculo teórico de las curvas Jominy [2] de un acero, a partir de su composición química y el tamaño de grano austenítico (Trabajos de M. A. Grossmann; Just; Kirkaldy y otros [3-6]). 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 [7] o el software de predicción de estructuras y propiedades de piezas de acero, del Steel Advisory Centre for Industrial Technologies de Hungría [1]. Y como ejemplo de los últimos, podemos mencionar los trabajos de M. Gergely, P Tardy y T. Réti [8], de modelación de procesos de transformaciones estructurales en aceros. En esta presentación, se describe una herramienta computacional sencilla, iniciada [9] con modelos del primer tipo, y en proceso de evolución hacia uno del tercero. El objetivo es la predicción de los valores de dureza que tendrá a lo largo de su diámetro, una pieza mecánica de sección circular, fabricada con acero de los denominados “de construcciones mecánicas”, templado con diversos medios y revenido a temperatura y tiempo a definir. Es decir, la predicción de la “**Curva U de Dureza**” (**CUD**) de una pieza templada y revenida. Los datos necesarios serán: el diámetro de la pieza, la composición química y el tamaño de grano austenítico del acero, el medio de enfriamiento utilizado en el temple y la temperatura y tiempo de revenido.

2.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y DEFINICIÓN DE PROCEDIMIENTOS

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 enfrían 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 la forma de la pieza por la incidencia que pueden tener, en las transformaciones de fase, las tensiones que se desarrollan con diferentes geometrías. Las Figuras 1 y 2, dan una explicación gráfica de lo expuesto.

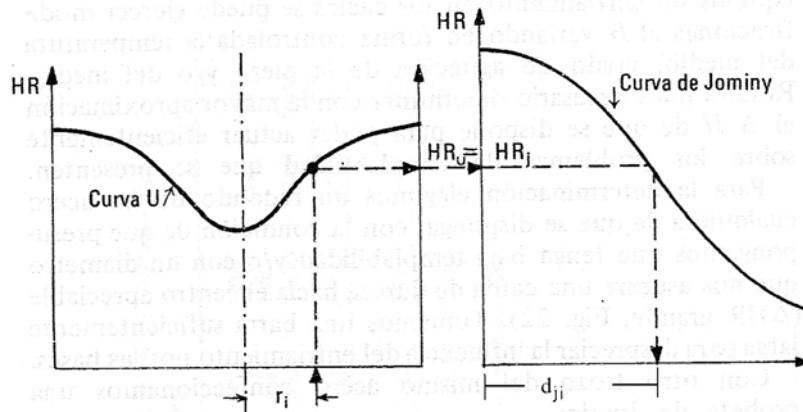


Figura 1 Un algoritmo matemático, determina la velocidad de enfriamiento que tienen puntos de la pieza considerando distintos medios de temple, para adjudicarles la dureza que tienen los puntos de la probeta Jominy que se enfrían con la misma velocidad.

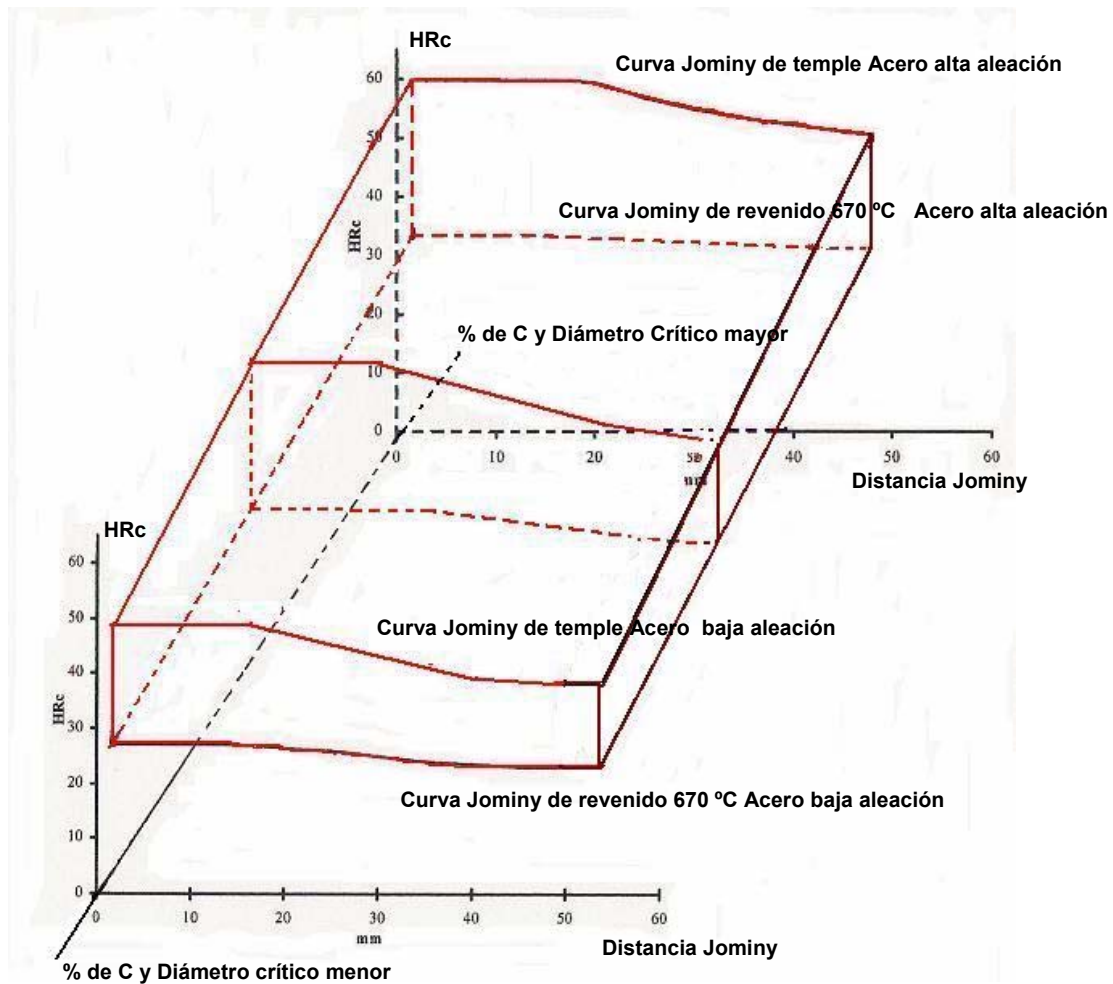


Figura 2 El valor de dureza que corresponde al punto de la probeta jominy del acero elegido, se obtiene por interpolación dentro del volumen que muestra la figura y que constituye la base de datos. Es seleccionado en función de: 1) el % de carbono representado por el eje 2) Dentro de ese plano, selecciona al acero en función de la influencia de los restantes elementos químicos, mediante el cálculo de su diámetro crítico ideal. 3) Finalmente considera la influencia de la temperatura y tiempo de revenido

El trabajo se ha realizado entonces, en tres etapas fundamentales:

- Generación de una base de datos que provea la dureza que tendría, cada uno de los puntos de una probeta Jominy del acero seleccionado, revenida a determinada temperatura.
- Desarrollo de un algoritmo matemático que defina la velocidad con que se enfrían los distintos puntos de un redondo sometido a diversos procesos de temple, para adjudicarles la dureza que tienen aquellos puntos Jominy que se enfrían con esa misma velocidad. [10]
- Introducir los resultados de las etapas anteriores en un proceso computacional sencillo, de modo que con un mínimo de datos, se puedan predecir los valores de la (CUD) que tendrá la pieza que esta siendo diseñada.

3. DESARROLLOS

3.1 Generación de la Base de Datos

3.1.1 Fabricación y tratamiento térmico de Probetas Jominy

Se realizó de acuerdo a lo especificado en la Norma MERCOSUR 259:2001 [2]. Los aceros procesados fueron especificados para la compra como de designación SAE (por tener "Banda H" [11] y ser comercialmente comunes). En una primera etapa se procesaron barras de aceros SAE 1040, 1060, 4140, 4340 y 9260. Para ello se fabricaron diez probetas Jominy de cada acero, de una que quedó templada sin revenir se obtuvo la curva de temple, y de las restantes nueve, revenidas a las temperaturas indicadas en la Tabla 1, se obtuvieron las curvas Jominy de revenido. Los tratamientos térmicos fueron realizados en una mufla eléctrica, con control electrónico de temperatura (error $< \pm 5$ ° 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 35', 45' y 55'. 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, (dos a 180°), 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. Posteriormente se procesaron barras de aceros 1045, 4140, 4340 y 9260, todos de distinta composición a los primeros, y modificando el procedimiento, Para ello se fabricaron nueve probetas de cada uno, se templaron según Jominy y se obtuvo de todas, en dos planos rectificados, las curvas de temple correspondientes. Posteriormente fueron revenidas cada una a distinta temperatura, 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 a cada temperatura. Se ejecutaron en puntos distribuidos a partir de 1,5 mm del extremo templado, primero con intervalos de 2 mm y de 5 mm en zonas mas alejadas, y de acuerdo a lo especificado por la norma IRAM IAS 500-105 [12] Con respecto a los tamaños de grano ASTM, las determinaciones se hicieron en las zonas más adecuadas,

pulidas y atacadas con reactivo de Vilella, y por el método de comparación, según Norma MERCOSUR 241:2001 [13]

3.1.3 Procesamiento matemático de los datos

Con los datos obtenidos experimentalmente y de bibliografía consultada [14], se procuró desarrollar un proceso matemático que permita calcular la dureza que tendrán cada uno de los puntos de una probeta Jominy, revenida según una determinada relación temperatura/tiempo. Fueron analizados dos métodos de tratamiento de datos, de ellos y sus resultados se hace una breve descripción, con ecuaciones, valores y gráficos demostrativos. La incidencia del tiempo de revenido fue incorporada a los resultados mediante la expresión de Hollomon y Jaffe [15]

a) Método polinomial

El método se basa, en representar la pérdida de dureza que tiene cada punto de la probeta revenida a varias temperaturas, usando ecuaciones polinómicas. La Ecuación (1) provee un valor que definimos como "Magnitud de ablandamiento para la temperatura indicada"

$$"M_{abl}" = H_{ijm} - a_{ij} X^n + b_{ij} X^{n-1} + \dots + e_{ij} X^2 + f_{ij} X + g_{ij} \quad (1)$$

donde:

H_{ijm} = Dureza **medida** en cada punto de la probeta **templada**

X = Temperatura de revenido para la cual se hace la predicción deseada (entre 190 y 670 °C)

a_{ij}, b_{ij}, ..., e_{ij}, f_{ij} y g_{ij} = coeficientes de la ecuación representativa de la caída de dureza sufrida por cada punto **ij**, en probetas templadas y revenidas entre 190 y 670 °C.

La Ecuación (2) provee la **H_{rij}** (**Dureza Teórica** que tiene cada punto de la probeta revenida)

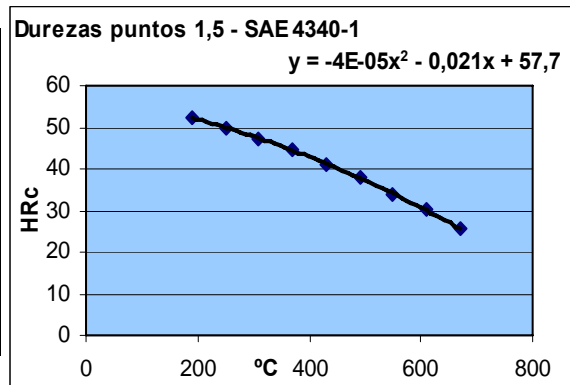
$$H_{rij} = H_{ijc} - M_{abl} \quad (2)$$

donde:

H_{ijc} = Dureza que tiene cada punto **ij**, según el cálculo teórico de curvas Jominy, para probetas **templadas** (Fórmula de Kirkaldy [5] modificada según IMA [9])

Tabla 1 Valores medidos y teóricos calculados para el punto 1,5, de una probeta de acero SAE 4340 Los coeficientes son obtenidos de la ecuación representativa de la curva de tendencia del gráfico.

° C	HRC medida	HRC calculada	Diferencia en HRC	% Error
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
-----	-------	-------	-------	-------

Se verifica que el método permite predecir valores de dureza en curvas Jominy, para cualquier temperatura de revenido, con errores admisibles para rangos de composición cercanos a los de la aleación medida. Como se verá en el ejemplo, con ecuaciones de **2º grado**, el error máx es $\pm 4 \%$, es decir hasta $\pm 2,2$ HRc para altas durezas y $\pm 0,9$ HRc en las bajas.

La segunda columna de la Tabla 1 de la página anterior, muestra los valores de dureza medidos en probetas de uno de los aceros SAE 4340 procesados, revenidas a las temperaturas indicadas por la primera columna. Ambas columnas permiten obtener la curva de tendencia y la ecuación representativa de la misma. Los coeficientes de esa ecuación, introducidos en las Ecuaciones (1) y (2) dan como resultado los valores indicados en la tercera columna de la tabla. Las columnas cuarta y quinta dan las diferencias y el error porcentual entre lo medido y lo calculado.

A continuación, las Ecuaciones (3) y (4) muestran como se han obtenido los valores de la tercera columna de la Tabla, proveyendo la dureza teórica en el punto a 1,5 mm del extremo templado de una probeta revenida a 190°C

$$M_{abl-190^\circ \text{C}} = 57 - 0,00004 \cdot 190^2 - 0,021 \cdot 190 + 57,7 = 4,73 \text{ HRc} \quad (3)$$

$$HRC_{1,5} = \text{Dureza en la probeta templada} - M_{abl-190} = 57,1 - 4,73 = 52,37 \text{ HRc} \quad (4)$$

Aplicando el procedimiento descrito para todos los puntos *ij* de la probeta, es posible reproducir curvas teóricas de revenido como las de la Figura 3, para cualquier temperatura, de aceros cuya composición este en un rango cercano al del acero medido.

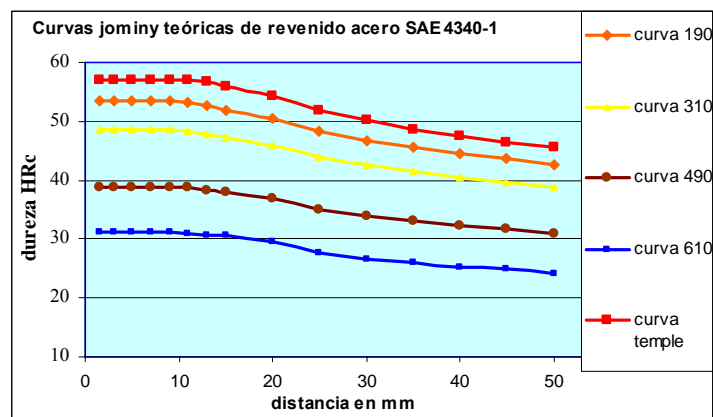


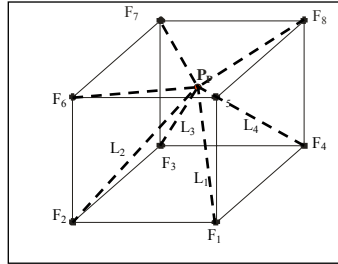
Figura 3 Curvas teóricas de dureza, de probetas jominy revenidas a las temperaturas indicadas

b) Método de Interpolación multidimensional lineal

El otro método que se ha utilizado para describir la pérdida de durezas que sufren los puntos de una probeta templada, cuando es revenida a cualquier temperatura, es un proceso de

interpolación lineal multidimensional [16], que calcula el valor de una función $F(x, y, z)$ en una distribución arbitraria de puntos. El valor buscado es provisto por la Ecuación (5)

$$F_p = \frac{\sum_{i=1}^n F_i l_i}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (5)$$



donde

F : el valor de la función; L : distancia entre el punto interpolado y su vecino; n : número de vecino; p : punto interpolado; i : punto vecino y las distancias l_i se obtienen de la Ecuación (6)

$$l_i = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p)^2} \quad (6)$$

(x, y, z) son coordenadas: distancia jominy, composición y temperatura de revenido,

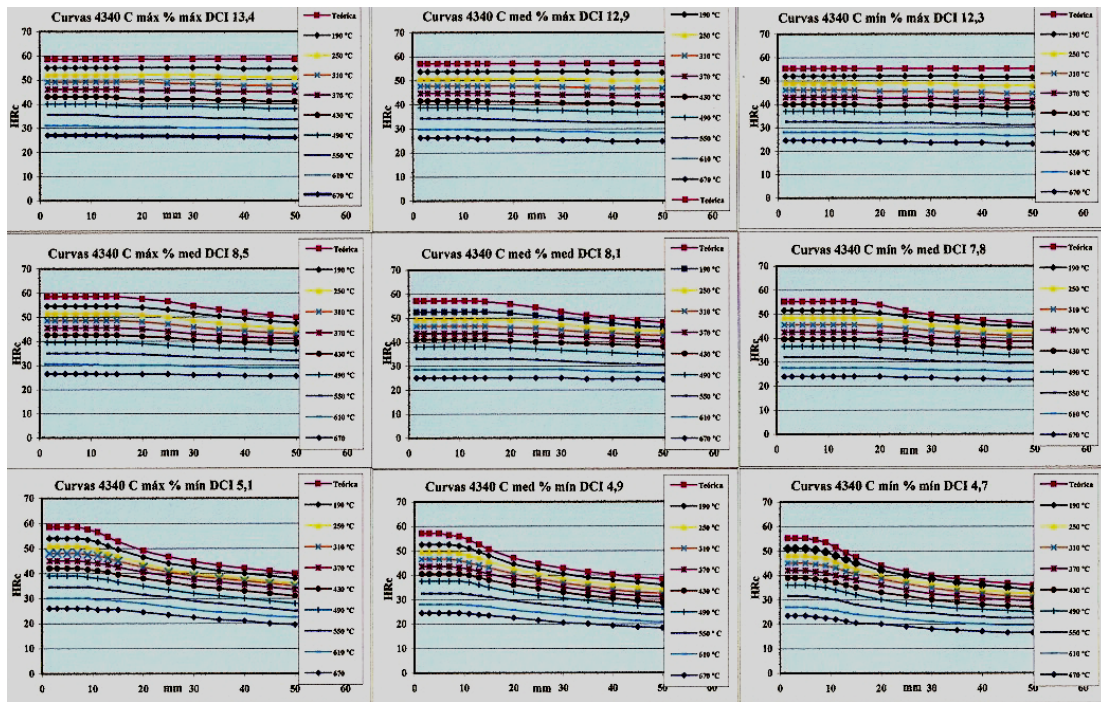


Figura 4 Ejemplo de curvas idealizadas, para aceros con las máximas, medias y mínimas composiciones de carbono y aleantes, admitidas por las bandas H del acero SAE 4340

La Figura 4 muestra un ejemplo de las curvas idealizadas, que deducidas a partir de las curvas experimentales, se crearon para máximo, medio y mínimo carbono, y alta media y baja aleación. Esos datos, a modo de aproximación y junto a los de mediciones reales, forman las bases de datos utilizadas en la herramienta computacional.

3.2 Formulación matemática de determinación del campo de temperaturas de la pieza

El modelo matemático a resolver esta constituido por la ecuación diferencial de la conducción del calor en coordenadas cilíndricas, Ecuación (7)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

donde r es el radio, T la temperatura, t el tiempo y α la difusividad térmica del material

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (8)$$

La Ecuación (8) da el valor de α , siendo ρ la densidad del material, c_p es su calor específico a presión cte. y k su conductividad térmica (Las propiedades físicas del material se consideran constantes) Las condiciones de borde aplicadas para resolver esta ecuación diferencial, corresponden a una condición de simetría en el centro del cilindro, Ecuación (9)

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (9)$$

y a una condición de convección en la superficie, dada por la Ecuación (10)

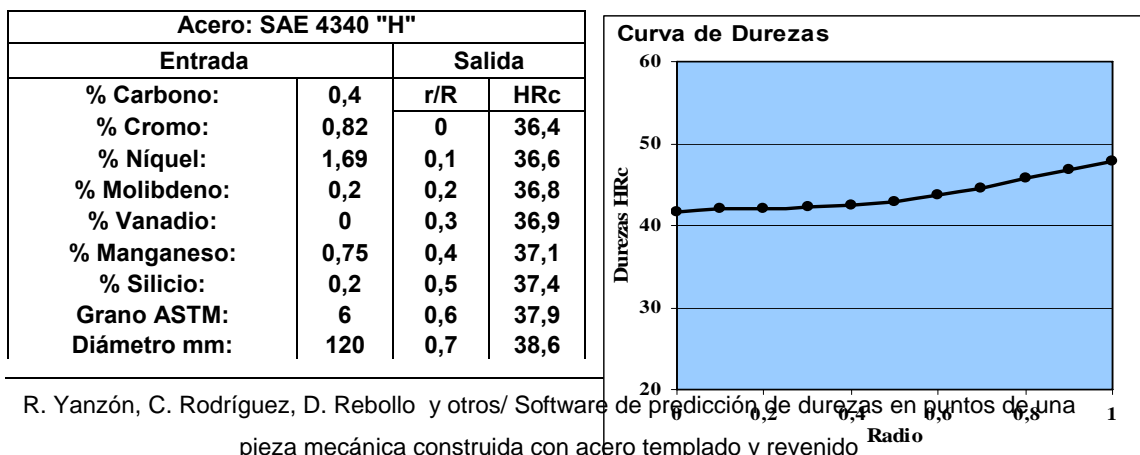
$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_e} = h(T_{r_e} - T_\infty) \quad (10)$$

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.

La ecuación diferencial, junto con las condiciones de borde, han sido resueltas utilizando el método de los volúmenes finitos resolviendo el sistema de ecuaciones en forma implícita por el método conocido como TDMA. Para discretizar el radio se ha 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, función del medio de enfriamientos dado por la tabla tomada de [10] Esta velocidad es comparada con que sufren los puntos de la probeta Jominy, para adjudicarles la dureza calculada en la base de datos

3.3 La Herramienta Computacional

Tabla 2 Ejemplo de datos de entrada y salida y curva U graficada con los resultados



Severidad "H _C ":	1,5	0,8	39,4
Temp. Revenido °C:	400	0,9	39,8
Tiempo Revenido Hs	2,5	1	39,8

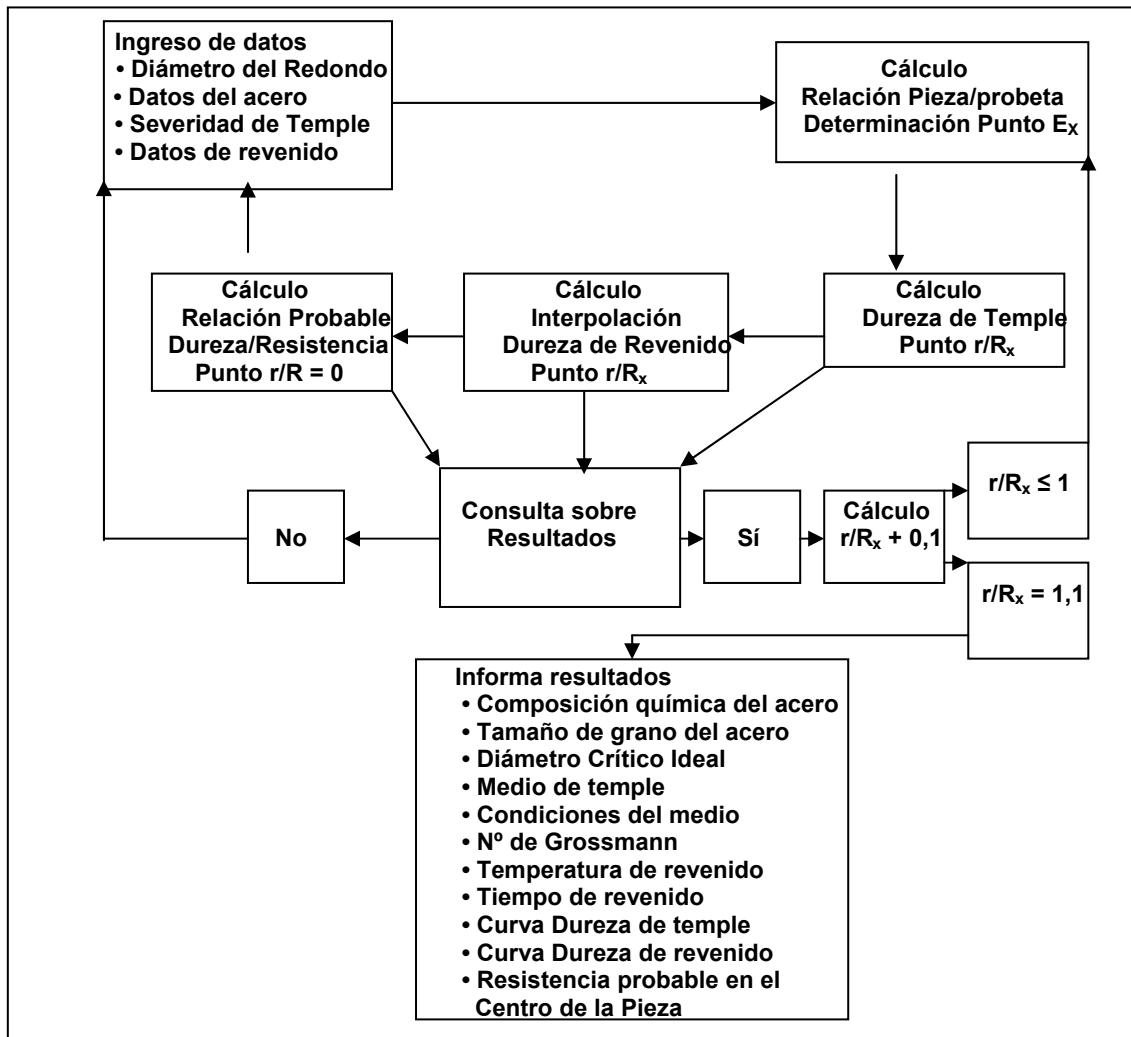


Figura 5 Diagrama en bloque simplificado

4. Conclusiones

Si bien al momento de redactar este trabajo no se han efectuado pruebas exhaustivas en piezas reales de distintos diámetros y aceros, sometidas a tratamientos diversos, si es posible tener las siguientes conclusiones

- El algoritmo matemático que define las velocidades de enfriamiento en la pieza, provee resultados que divergen en $\pm 1\%$ respecto de los que se obtienen aplicando Lamont [17]
- Al introducir en el programa datos de los aceros verificados experimentalmente, para diversos diámetros, medio de temple, temperaturas y tiempo de revenido, se obtienen resultados más completos y con mayor rapidez, si se los compara con métodos tradicionales.

- Si se introducen datos de acero cuyas composiciones estén intermedias o cercanas a las de los aceros medidos, se obtienen resultados proporcionales a las diferencias de composición.
- Procesos de regresión aplicados sobre curvas Jominy de revenido, tal como los utilizados para el cálculo de curvas de temple según la Norma SEP 1664 [6], permitirían ampliar la base de datos, aumentando la capacidad del programa y la exactitud de sus resultados.

5. Referencias Bibliográficas

- [1] M. Gergely y S. Somogyi, Steel Advisory Center for Industrial Technologies, Hungary “Computerized Properties Prediction and Technology Planning in Heat Treatment of Steels” - *Metals Handbook*, Vol. IV pag. 638 8ª Edición, ASM, USA – 1991
- [2] Norma Mercosur 259:2001 “Acero - Determinación de templabilidad por temple del extremo (ensayo Jominy)” - 2001
- [3] M. A. Grossmann “Hardenability Calculation from Chemical Composition” *Transactions AIME* Vol. 150, pag 227 - 1942
- [4] E. Just “New Formulas for Calculating Hardenability Curves”– *Met. Progress*, pag 87 - 1969
- [5] J. S. Kirkaldy “Quantitative Prediction of Transformation Hardening of Steels” - *Metals Handbook* pag 28 Vol.IV, 8ª Edición, ASTM, USA - 1991
- [6] Norma SEP 1664 “Derivation of equations by multiple regressions for de the calculation of hardenability in the Jominy.....” Verlag Stahleissen GmbH, Dusserfold. 2004
- [7] D. Doane, J. Kirkaldy “Hardenability Concepts with applications to steels” *Metallurgical Society of AIME*, pag. 518 - 1978
- [8] T. Reti, M. Gergely y P. Tardi “Mathematical Treatment of Non-isothermal Transformations”, *Material Science Technology* **Vol. 3**, pag 365 - 1987
- [9] R.Yanzón, C.Rodríguez y otros, *Anales 6º Congreso de Metalurgia y Mat. CONAMET/SAM* “Predicción de dureza en piezas construidas con acero templado y revenido” – Chile, 2006.
- [10] C. Bates, G. Totten, R. Brennan “Quenching of steels” - *Metals Handbook* Vol. IV pags. 72 y 83; 8ª Edición ASM, USA -1991
- [11] “Steel bar product guidelines” - *The Iron and Steel Society*, USA 1996
- [12] Norma ASTM E 18 y IRAM IAS 500-105 “Método de Ensayo Rockwell Escala C” 1967
- [13] Norma Mercosur 241 - IRAM-IAS “Determinación del tamaño de grano austenítico”- :2001
- [[14] R. D. Chapman, W.E Jominy “Hardness Variations in Carbon-Molybdenum Steels after Tempering” – *Metal Progress*, **Vol. 57**, pag 491, 1950
- [15] H. Hollomon y L.D. Jaffe “Time temperature relations in tempering steel” - *Transactions AIME*, Vol. 162, pag 223-249, 1945

- [16] S. Chapra y R. Canale "Numerical Methods for Engineers" - *Mc Graw Hill*, USA 1998
- [17] J. L. Lamont "How to estimate Hardening Depth in Bars", *Iron Age*, Vol. 152 pag 64, 1943