



PREDICCIÓN DE LA DUREZA DE UN ACERO REVENIDO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA COMPOSICIÓN QUÍMICA

RODOLFO YANZÓN¹, VIRGINIA ARANDA¹, ARLINGTON SÁNCHEZ²,
MAXIMILIANO GIMENEZ²

¹Universidad Nacional de San Juan

Facultad de Ingeniería, Dpto. de Ingeniería Electromecánica

Av. Lib. Gral. San Martín este N° 1109 – San Juan Capital, CP5400, Prov. de San Juan, Argentina

²Universidad Nacional de San Juan

Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica Aplicada

Av. Lib. Gral. San Martín este N° 1109 – San Juan Capital, CP5400, Prov. de San Juan, Argentina

(Recibido 5 de agosto de 2013, para publicación 18 de agosto de 2013)

Resumen – En el proceso de diseño y selección de aceros es fundamental el conocimiento de las propiedades de los distintos materiales, para contrastarlas con las solicitaciones a los que la pieza o estructura será sometida. En piezas altamente cargadas, es muy común utilizar aceros tratados térmicamente. En tales circunstancias, resulta de importancia poder realizar un análisis predictivo de las propiedades que esos tratamientos pueden otorgarle. En el presente trabajo se planteó como objetivo predecir la dureza que un acero adquiere después de ser templado y revenido, en función de la composición química y la temperatura de revenido. Para ello se tomaron como referencia los trabajos de Grange, Hiribal y Porter, los de M. Wisti y M. Hingwe, entre otros y se dedujeron, en primer lugar, las ecuaciones que reproducen la influencia que tiene cada elemento aleante en la pérdida de la dureza de un acero revenido. Posteriormente se desarrollaron ecuaciones capaces de reproducir, con error admisible, las curvas de dureza de revenido en función del total de aleantes y de la temperatura de revenido. Por último, se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos, versus los datos experimentales disponibles en la literatura. Se espera que las ecuaciones deducidas puedan ser en el futuro, utilizadas para optimizar una herramienta computacional de predicción de propiedades en piezas mecánicas, desarrollada en el Área Materiales del IMA.

Palabras clave – Acero, dureza, revenido, modelo matemático.

1. INTRODUCCIÓN

Seleccionar el mejor acero para un uso determinado es un desafío que enfrenta frecuentemente un ingeniero. Son numerosos los aspectos a tener en cuenta a la hora de elegir el mejor material para una determinada aplicación, su costo global, la facilidad de su fabricación, el impacto ambiental que genera y por supuesto su comportamiento frente a las solicitaciones a las que estará sometido el mismo.

El comportamiento de un material está fuertemente ligado a sus propiedades mecánicas, las cuales dependen fundamentalmente de la estructura y una de las variables fundamentales que influye en la estructura que tenga el material, es su composición química. Otra de las variables que influye directamente en la estructura cristalina es la “historia del material”, su proceso de elaboración y los tratamientos térmicos o termomecánicos a los que haya sido sometido son parte de esa historia.

En piezas altamente cargadas, por lo general se utilizan aceros tratados térmicamente. A través de los tratamientos térmicos puede lograrse, con un mismo acero, una amplia gama de propiedades mecánicas debido a las notables transformaciones que los procesos de calentamiento y enfriamiento ocasionan en la estructura del material.

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 experimenta una pieza sometida

a tratamientos térmicos de endurecimiento [1-8]. En el presente trabajo focalizaremos nuestra atención en el tratamiento de temple y revenido.

La composición del acero y la temperatura del proceso de revenido, tienen una marcada influencia en las características de la microestructura obtenida, influyendo, en consecuencia, en las propiedades mecánicas del acero revenido. Por esta razón, diversas investigaciones han sido realizadas con el fin de conocer el efecto que estas variables tienen en la dureza y resistencia del acero revenido [1, 2,3]. El presente trabajo, toma como base los trabajos de Grange, Hiribal y Porter para desarrollar ecuaciones de predicción de la dureza en un acero templado y revenido, en función de su composición química y la temperatura. A continuación se detallan los pasos seguidos para la obtención de dichas expresiones matemáticas.

2. DESARROLLO

El trabajo puede ser dividido en las siguientes etapas fundamentales:

1. Desarrollar ecuaciones que reproduzcan **influencia que tienen el silicio, manganeso, cromo, molibdeno y níquel en la dureza** que adquiere un acero cuando es revenido, tomando tales curvas, de los trabajos publicados por Grange, C. Hiribal y Porter [1].
2. Desarrollar ecuaciones que representen la **influencia que tiene el carbono y la temperatura de revenido en la dureza** de un acero templado y revenido.
3. Desarrollar ecuaciones capaces de reproducir con error admisible, las curvas de dureza de revenido en función del total de aleantes y la temperatura.
4. Comparar estadísticamente los resultados obtenidos, con datos de bibliografía.

2.1. Determinación de la influencia de elementos aleantes en la dureza

El primer paso para determinar la influencia de los elementos aleantes fue graficar las curvas que muestran el incremento que provoca el agregado de diversos aleantes en dureza de revenido, tomando tales curvas de los trabajos publicados por Grange y C. Hiribal y otros. En dicho trabajo, se presenta el efecto de siete elementos (cromo, manganeso, molibdeno, níquel, silicio, fósforo y vanadio) en la dureza de la martensita templada, en rangos de revenido que van de 400 a 1300°F (\approx 205 a 705°C) con incrementos de 100°F (\approx 55°C), de una hora de duración. A modo de ejemplo, en la Fig. 1 se muestra dicha curva para 1100°F (\approx 595°C).

De los siete elementos mencionados, en el presente trabajo se consideraron para el análisis los siguientes: Silicio, Manganeso, Cromo, Molibdeno y Níquel, que son los elementos que se agregan a los aceros para aplicaciones mecánicas. El procedimiento seguido fue escanear los gráficos de Grange dados para

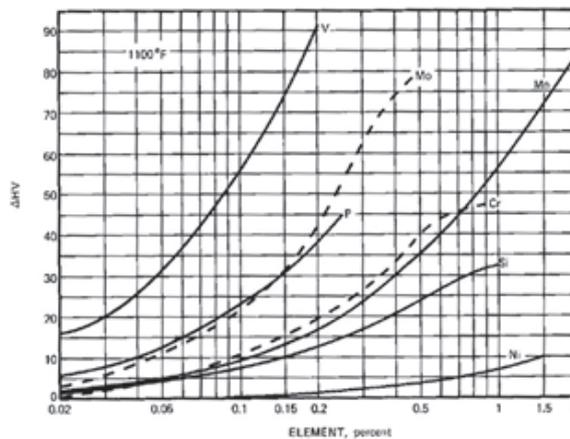


Fig. 1. Efecto de los elementos de aleación en la dureza de la martensita revenida por 1 h a 595° C [1].

Tabla 1. Incremento de la dureza (en HV) en función del porcentaje de elementos aleantes para acero revenido durante 1h a 595 °C. Datos extraídos a partir de las curvas de Grange.

Incremento de dureza (ΔHV) - Temperatura: 595 °C						
%	Mn	Ni	%	Si	Cr	Mo
0,20	16,41	1,22	0,10	7,27		21,95
0,30	23,88	2,05	0,12	8,43		26,03
0,40	30,24	2,73	0,14	9,65		29,6
0,50	35,89	3,64	0,16	10,7		33,74
0,60	40,71	4,4	0,18	11,73		38,17
0,70	45,71	5,09	0,20	12,66	19,51	43,01
0,80	49,35	5,58	0,30	16,83	26,9	64,45
0,90	53,18	6,26	0,40	20,11	34,21	75,46
1,00	56,79	6,94	0,50	23,25	40,61	79,55
1,10	60,19	7,64	0,60	26,01	44,21	
1,20	63,14	8,28	0,70		45,54	
1,30	66,26	9	0,80		46,23	
1,40	68,95	9,57	0,90		46,97	
1,50	71,43	10,14	1,00		47,37	
1,60	73,74	10,84				
1,70	75,83	11,57				
1,80	77,93	12,34				
1,90	79,91	13,22				
2,00	81,48	14,12				

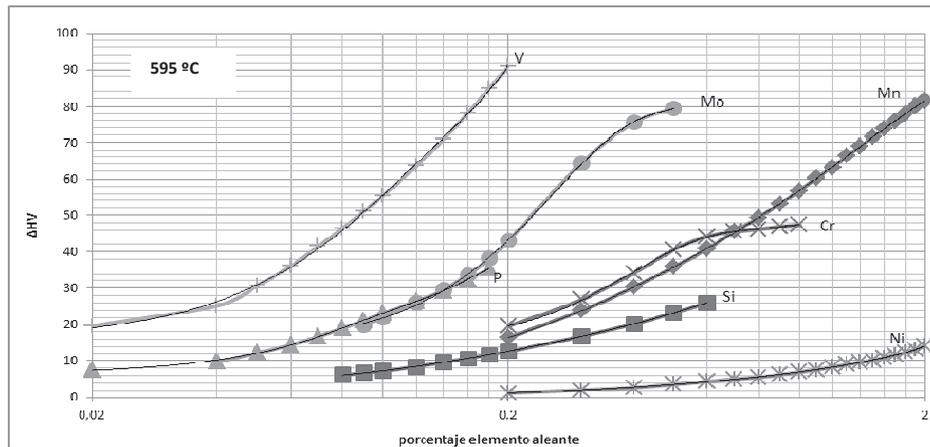


Fig. 2. Efecto de los elementos de aleación en la dureza de la martensita revenida por 1 h a 595 °C - Gráficas obtenidas en planillas de cálculo.

cada una de las temperaturas de revenido mencionadas. Luego, dichas imágenes se pasaron a Autocad y para cada una de las curvas se trazó la polinómica correspondiente. Con una aplicación computacional disponible en el mercado, se obtuvo para cada una de las polinómicas de Autocad, la serie de datos x - y correspondiente a cada curva. Luego, utilizando una planilla de cálculos se obtuvieron para cada una de las series x - y , las ecuaciones de hasta 6° grado que representan la relación cambio de dureza versus porcentaje de aleante. A modo de ejemplo se presenta para $T=595^{\circ}\text{C}$ las serie de datos x - y obtenidas y las gráficas obtenidas en la planilla de cálculo, a partir de las cuales, por regresión lineal, se obtuvieron las ecuaciones correspondientes.

Un procedimiento similar al mostrado se realizó para cada una de las temperaturas comprendidas en el rango de 205 a 705°C con incrementos de 55°C. Para cada temperatura y cada elemento aleante, se encontró la ecuación polinómica que mejor se aproxima a la serie de datos x - y obtenida a partir de los gráficos de Grange.

Tabla 2. Ecuaciones polinómicas que representan el incremento de la dureza (en HV) en función del porcentaje de elementos aleantes para acero revenido durante 1h a 595 °C.

TEMPERAUTRA : 595 °C		
Aleante	Porcentaje	Relación Retardo en la Caída de Dureza (Δ HV) vs Aleante (%)
Mn	0,2-2	Δ HV= -0,618932x ⁶ + 7,428973x ⁵ - 33,450496x ⁴ + 76,072931x ³ - 103,759691x ² + 113,928722x - 2,782697
Si	0,08-0,6	Δ HV= 1.199,901779x ⁶ - 3.394,640773x ⁵ + 3.489,639531x ⁴ - 1.624,581817x ³ + 307,281263x ² + 32,973615x + 2,244132
Cr	0,2-1	Δ HV= -541,903974x ⁵ + 1.834,115806x ⁴ - 2.298,529002x ³ + 1.246,740479x ² - 222,921081x + 29,896445
Ni	0,2-2	Δ HV= 0,774473x ⁶ - 4,435246x ⁵ + 9,793329x ⁴ - 9,638295x ³ + 2,740985x ² + 8,220142x - 0,481027
Mo	0,09-0,5	Δ HV= 4.415,984228x ⁴ - 5.893,277922x ³ + 2.407,020625x ² - 162,009832x + 19,425470

Tabla 3. Ecuaciones polinómicas original y simplificada, que representan el incremento de la dureza en función del contenido de Silicio para un acero revenido a 595°C.

Ecuación polinómica para elemento Silicio – Temperatura 595 °C	
Original	Δ HV= 1.199,901779(%Si) ⁶ - 3.394,640773(%Si) ⁵ + 3.489,639531(%Si) ⁴ - 1.624,581817(%Si) ³ + 307,281263(%Si) ² + 32,973615(%Si) + 2,244132
Simplificada	Δ HV= - 61,26*(%Si) ² + 72,23*(%Si) + 0,7

Tabla 4. Cálculo del incremento de la dureza en función del contenido de Silicio para un acero revenido a 595 °C Utilizando las ecuaciones polinómicas original y simplificada.

% Si	Retardo en la Caída de Dureza (Δ HV)			Error Ecuación Original		Error Ecuación Simplificada	
	Curva Grange	Ecuación Original	Ec. Simplificada	Absoluto(HV)	Relativo (%)	Absoluto(HV)	Relativo (%)
0,10	7,27	7,31	7,31	0,04	0,00	0,04	0,01
0,12	8,43	8,46	8,49	0,04	0,00	0,06	0,01
0,14	9,65	9,59	9,61	-0,05	0,00	-0,04	0,00
0,16	10,70	10,68	10,69	-0,02	0,00	-0,01	0,00
0,18	11,73	11,72	11,72	-0,01	0,00	-0,02	0,00
0,20	12,66	12,71	12,70	0,04	0,00	0,03	0,00

Como puede observarse en la tabla 2, las ecuaciones originales obtenidas son bastante complejas. A fin de simplificar el modelo y tratar de encontrar ecuaciones más sencillas, capaces de reproducir con un error admisible, las curvas correspondientes a cada uno de los elementos aleantes, a dichas ecuaciones se le realizaron las siguientes modificaciones:

1. Se restringió el rango de aplicación de la fórmula, considerando el rango de especificación de aceros para construcciones mecánicas, por ej. para el silicio, en lugar de considerar todo el rango de composiciones que se presenta en las curvas de Grange se consideró el rango de 0,10 a 0,35% de Silicio, típico de los aceros para construcciones mecánicas.
2. Con este rango reducido y en los casos en los que el error obtenido fue aceptable, se buscaron ecuaciones de menor grado, no de sexto grado como las originales sino de segundo grado o de primer grado.
3. Se redondearon también los coeficientes de la ecuación, considerando sólo un decimal.

Para evaluar si las simplificaciones realizadas son admisibles, se calculó el error que presentan dichas aproximaciones con respecto a las curvas originales. A modo de ejemplo, en las tablas siguientes se presentan las simplificaciones realizadas y los resultados obtenidos para el caso del Silicio, a temperatura de revenido de 595°C (tabla 3).

Como puede observarse, el error utilizando la ecuación simplificada no aumenta significativamente, por lo que las simplificaciones realizadas se consideran aceptables (tabla 4).

Tabla 5. Ecuaciones polinómicas simplificadas que representan el incremento de dureza en función de los contenidos de Si, Mn, Cr, Mo y Ni, para distintas temperaturas de revenido.

TEMP °C	SILICIO 0,15 - 0,35 %	MANGANESO 0 -1,00 %
205	$\Delta HV = 50 * Si + 2,3$	
260	$\Delta HV = 45 * Si + 0,8$	
315	$\Delta HV = 141,32 * Si^2 + 53,19 * Si + 2,49$	$\Delta HV = -9,32 * Mn^3 + 17,29 * Mn^2 + 28,14 * Mn + 1,24$
370	$\Delta HV = 20,4 * Si^2 + 36,25 * Si + 1,1$	$\Delta HV = 1,52 * Mn^2 + 51,78 * Mn + 1,92$
425	$\Delta HV = -84,91 * Si^2 + 98,13 * Si + 3,01$	$\Delta HV = 17,73 * Mn^3 - 42,82 * Mn^2 + 66,92 * Mn + 8,84$
480	$\Delta HV = 47,6 * Si^2 + 40,19 * Si + 0,26$	$\Delta HV = 9,39 * Mn^3 - 36,35 * Mn^2 + 64,35 * Mn + 21,25$
540	$\Delta HV = -34,66 * Si^2 + 63,28 * Si + 0,95$	$\Delta HV = 10,64 * Mn^3 - 48,36 * Mn^2 + 98,95 * Mn - 9,73$
595	$\Delta HV = -61,26 * Si^2 + 72,23 * Si + 0,7$	$\Delta HV = -11,04 * Mn^2 + 56,92 * Mn + 10,9$
650	$\Delta HV = -86,67 * Si^2 + 87,05 * Si - 1,1$	$\Delta HV = -8,49 * Mn^2 + 54,09 * Mn + 4,19$
705	$\Delta HV = 40,31 * Si + 2,36$	$\Delta HV = -11,428 * Mn^4 + 63,84 * Mn^3 - 133,79 * Mn^2 + 124,73 * Mn + 5,77$

TEMP °C	CROMO 0,2 - 1,2 %	MOLIBDENO 0,15 -0,35 %	NÍQUEL 0,6 - 2,00 %
205	$\Delta HV = 68,1 * Cr^3 - 200,19 * Cr^2 + 193,32 * Cr - 33,06$		$\Delta HV = 7,48 * Ni - 3,04$
260	$\Delta HV = -22,67 * Cr^2 + 54,9 * Cr - 8,04$	$\Delta HV = 41,93 * Mo - 2,68$	$\Delta HV = 6,84 * Ni - 0,23$
315	$\Delta HV = 36,77 * Cr^3 - 115,19 * Cr^2 + 121,37 * Cr - 5,5$	$\Delta HV = -230,6 * Mo^2 + 187,4 * Mo - 5,8$	$\Delta HV = 6,53 * Ni + 0,05$
370	$\Delta HV = 68,1 * Cr^3 - 200,19 * Cr^2 + 193,32 * Cr - 33,06$	$\Delta HV = -536,5 * Mo^2 + 389,1 * Mo - 26,96$	$\Delta HV = 6,7 * Ni + 0,1$
425	$\Delta HV = 1606,54 * Cr^3 - 6447,54 * Cr^2 + 10055,12 * Cr - 7605,27 * Cr^2 + 2808,35 * Cr - 352,6$	$\Delta HV = -299,6 * Mo^2 + 280,3 * Mo - 14,33$	$\Delta HV = 7,28 * Ni - 1$
480	$\Delta HV = 45,73 * Cr^3 - 117,8 * Cr^2 + 128,2 * Cr + 0,2$	$\Delta HV = -554,6 * Mo^2 + 423,4 * Mo - 28,24$	$\Delta HV = 6,75 * Ni - 0,06$
540	$\Delta HV = 60,8 * Cr^3 - 179,68 * Cr^2 + 179,5 * Cr - 17,37$	$\Delta HV = -172,6 * Mo^2 + 261 * Mo - 3,88$	$\Delta HV = 6,97 * Ni - 1$
595	$\Delta HV = 56,33 * Cr^3 - 169,77 * Cr^2 + 170,5 * Cr - 9,84$	$\Delta HV = -315,6 * Mo^2 + 360,6 * Mo - 15,93$	$\Delta HV = 6,76 * Ni + 0,2$
650	$\Delta HV = 154,22 * Cr^4 - 276,55 * Cr^3 + 56,9 * Cr^2 + 119,87 * Cr - 13,23$	$\Delta HV = -416,7 * Mo^2 + 363,6 * Mo - 17,7$	$\Delta HV = 2,27 * Ni^3 - 7,02 * Ni^2 + 12,86 * Ni - 1,87$
705	$\Delta HV = 28,3 * Cr^3 - 96,07 * Cr^2 + 114,74 * Cr - 7,7$	$\Delta HV = -408,3 * Mo^2 + 365,8 * Mo - 35,35$	$\Delta HV = 6,35 * Ni + 0,52$

Se advierte que el manganeso y el molibdeno no tienen efecto sobre la dureza a 205 °C

Realizando un procedimiento similar al descrito, para cada aleante y cada temperatura considerada, se obtuvieron una serie de ecuaciones simplificadas que representan la influencia que tiene cada aleante en la caída de la dureza de revenido. La tabla 5 resume las ecuaciones obtenidas en cada caso.

2.2. Determinación de la influencia del contenido de carbono y la temperatura de revenido

De los elementos de aleación presentes en el acero, obviamente el carbono es el principal y el que mayor influencia tiene en las propiedades de un acero. Por este motivo, se analiza en forma separada del resto de los elementos.

En el trabajo de Grange se muestra la dureza de la martensita revenida, en función del porcentaje de carbono, a distintas temperaturas. Dicho gráfico fue obtenido ensayando distintas muestras de aceros al carbono, con cantidades despreciables de otros elementos. Por lo tanto, estas curvas pueden considerarse como base de la dureza, a la cual luego deberá sumarse la dureza extra obtenida al agregar elementos aleantes. En la tabla 6 se muestran los datos extraídos de dicha curva.

Con los datos extraídos de la Fig. 3, se trazaron las curvas mostradas en la Fig. 4. En dichas curvas, en lugar de graficar dureza en función del contenido de carbono, tomando como parámetro la temperatura, se graficó la dureza en función de la temperatura, considerando al porcentaje de carbono como parámetro.

Tabla 6. Dureza (en HV) de martensita revenida de una aleación hierro-carbono, en función del porcentaje de carbono y la temperatura de revenido. Datos extraídos a partir de las curvas de Grange.

Temp Rev (°C)	PORCENTAJE DE CARBONO										
	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
205	498	540	558	585	612	640	662	683	702	720	731
260	442	465	485	510	533	555	574	588	612	626	640
315	380	400	418	435	450	466	481	494	508	520	532
370	337	355	375	390	410	428	445	460	471	483	491
425	266	280	295	310	323	338	353	368	380	392	404
480	220	228	236	245	253	263	270	282	293	306	314
540	200	210	220	228	232	238	246	251	260	265	270
595	175	180	186	192	197	205	212	220	225	230	235
650	148	154	160	168	176	183	190	197	203	210	215
705	132	138	142	148	153	159	164	170	175	181	187

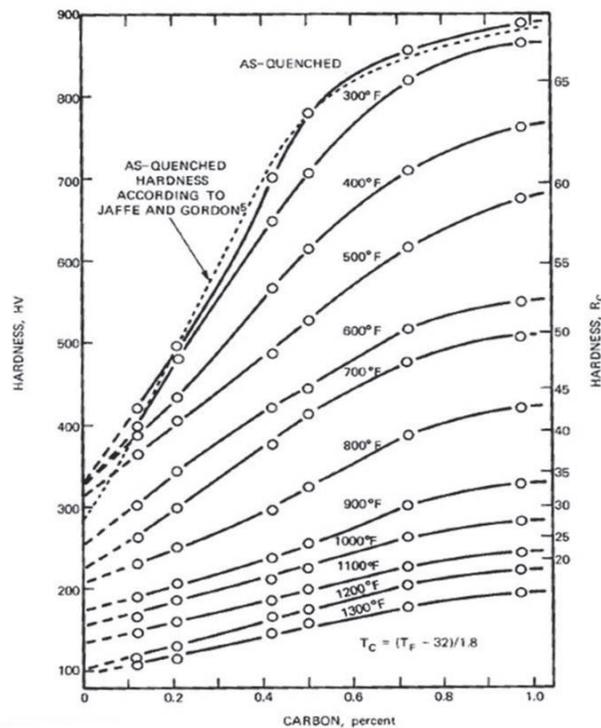


Fig. 3. Dureza de la martensita revenida de una aleación Fe-C [1].

Se determinaron entonces las líneas de tendencia de cada serie de datos. Se obtuvo de esta manera, para cada uno de los porcentajes de carbono analizados (de 0,30 a 0,80%), una curva polinómica de segundo grado que estima la dureza de la martensita revenida, en función de la temperatura de revenido, para aceros al carbono sin ningún otro aleante presente en cantidades significativas. En la tabla 7 se muestran las ecuaciones obtenidas.

Para cada porcentaje de carbono entre 0,30 y 0,80%, se tiene una ecuación que representa la dureza versus la temperatura de revenido. Dichas ecuaciones son polinómicas de segundo grado, es decir, tienen la forma:

$$H_o = a T^2 + b T + c$$

donde:

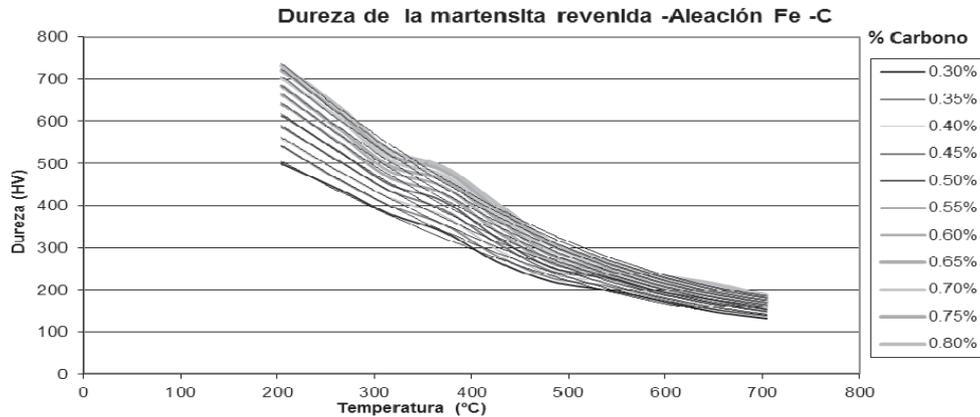


Fig. 4. Curvas de dureza de la martensita revenida en función de la temperatura de revenido, para aceros al carbono con cantidades despreciables de otros aleantes.

Tabla 7. Ecuaciones polinómicas que representan la dureza en función de la temperatura de revenido (temperatura en °C) para distintos contenidos de carbono.

% Carbono	Ecuación (T= Temperatura en °C)
0,30	$0,001043 T^2 - 1,69 T + 807,47$
0,35	$0,001226 T^2 - 1,92 T + 882,95$
0,40	$0,001199 T^2 - 1,93 T + 906,48$
0,45	$0,001292 T^2 - 2,06 T + 956,30$
0,50	$0,001388 T^2 - 2,19 T + 1.006,56$
0,55	$0,001469 T^2 - 2,30 T + 1.053,86$
0,60	$0,001505 T^2 - 2,37 T + 1.087,97$
0,65	$0,001523 T^2 - 2,41 T + 1.114,90$
0,70	$0,001563 T^2 - 2,48 T + 1.148,91$
0,75	$0,001586 T^2 - 2,53 T + 1.173,82$
0,80	$0,001591 T^2 - 2,55 T + 1.191,04$

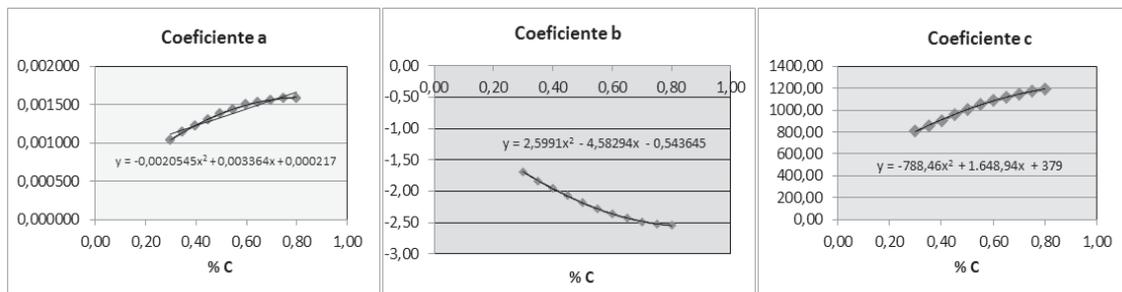


Fig. 5. a, b y c. Coeficientes de la ecuación “Dureza vs Temperatura de revenido”, graficados en función del porcentaje de carbono del acero.

H_o es la dureza de la martensita revenida en HV para una aleación hierro – carbono, con contenidos despreciables de otros aleantes, T la temperatura de revenido en °C y a, b, c son los coeficientes de la ecuación de segundo grado.

Para cada porcentaje de carbono se tiene un set de coeficientes a, b, c diferentes. El siguiente paso realizado, fue encontrar tres ecuaciones que representen cómo varían con el porcentaje de carbono, cada uno de los mencionados coeficientes. Para ello, se graficaron las tres curvas mostradas en la Fig. 5 y se buscó

Tabla 8. Ecuaciones que representan los coeficientes de la ecuación Dureza vs Temperatura de revenido, calculados en función del porcentaje de carbono del acero.

Coeficientes de la ecuación $H = a T^2 + b T + c$	Ecuación en función del porcentaje de Carbono
a	$a = - 0,0020545 * \% C^2 + 0,0033637 * \% C + 0,000217$
b	$b = 2,5991 * \% C^2 - 4,58294 * \% C - 0,54365$
c	$c = - 788,46 * \% C^2 + 1648,94 * \% C + 379$

para cada una de dichas curvas, su correspondiente línea de tendencia. Las ecuaciones encontradas se muestran en tabla 8.

2.3. Determinación de dureza de un acero revenido en función de la composición química y la temperatura de revenido

Vinculando las ecuaciones obtenidas en los dos ítems anteriores, la dureza de un acero, puede calcularse de la siguiente manera:

1. Teniendo en cuenta la temperatura de revenido y el porcentaje de carbono del acero en cuestión, calcular la dureza H_o (dureza de un acero con cantidades despreciables de otros elementos). Para dicho cálculo se utiliza la ecuación: $H_o = a T^2 + b T + c$
Donde T es la temperatura en °C. Los coeficientes a , b , c son función del contenido de carbono del acero, y se calculan utilizando las fórmulas detalladas en tabla 8.
2. Teniendo en cuenta los porcentajes de silicio, manganeso, cromo, molibdeno y níquel, presentes en el acero, calcular el incremento que dichos aleantes ocasionan en la dureza de la martensita revenida. Los cálculos se realizan utilizando las ecuaciones detalladas en tabla 5. Dichas ecuaciones, como puede observarse en las tablas mencionadas, varían con la temperatura. El rango de temperaturas considerado va de 205 a 705°C con incrementos de 55°C.
3. Habiendo determinado por un lado, la dureza de una aleación de hierro y carbono- con cantidades despreciables de otros elementos- y por otro lado, el incremento en la dureza provocado por el agregado de aleantes, la dureza del acero en cuestión puede calcularse entonces como sigue:

$$H = H_o + \Delta H_{Si} + \Delta H_{Mn} + \Delta H_{Cr} + \Delta H_{Mo} + \Delta H_{Ni}$$

2.4. Verificación de los resultados obtenidos

A fin de verificar la validez del modelo desarrollado, se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos, versus diversos datos experimentales disponibles en la literatura. Se realizaron las siguientes verificaciones:

1. Se calcularon con el modelo descrito las curvas de dureza en función de la composición química y la temperatura de revenido de los aceros que figuran en las Hojas de Características del IAS [9]. Se compararon los resultados del cálculo con los que proveen los gráficos de las mencionadas hojas.
2. Un análisis similar se realizó comparando los resultados del modelo, con los datos disponibles en el trabajo de Grossmann [10] y en el Metal Handbook [11].

Se analizaron los siguientes aceros: IRAM 1541- 4140 - 4340- 5130 -5140 - 5160 - 8640 - 9840 SAE 1030 -1035 - 1040 - 1045 - 1050 - 1055 - 1060 - 1065 - 1070 - 1075 - 1080. En tabla 9 se muestra, a modo de ejemplo, el análisis comparativo realizado para el acero IRAM 4140.

Un análisis similar se realizó para todos los aceros arriba mencionados. En la mayor parte de los casos, la diferencia porcentual no superó el 5% y en todos los casos dicha diferencia fue inferior al 10%. En la Fig. 6 pueden verse las comparaciones entre las curvas teóricas y la curvas extraídas de la bibliografía para el grupo de aceros analizados.

Tabla 9. Cálculo teórico de la dureza de acero 4140, templado y revenido, en función de la composición química y la temperatura de revenido.

Temperatura °C	Dureza Calculada HV	Dureza Hoja Características		Diferencia	
		HB	HV ¹	Absoluta (HV)	Porcentual (%)
205	596	580	616	-20,46	-3,32
260	557	536	570	-13,05	-2,29
315	520	495	527	-6,87	-1,30
370	484	456	485	-1,16	-0,24
425	448	418	444	4,08	0,92
480	413	381	404	8,55	2,11
540	374	342	362	12,04	3,33
595	338	308	324	13,54	4,18
650	301	274	288	13,09	4,55
705	263	240	252	10,48	4,15

¹ Para la conversión de Brinell a Vickers se utilizó la siguiente fórmula: $1,241223 * 10^{-11} + HB^5 - 2,25791 * 10^{-8} + HB^4 + 1,5281 * 10^{-5} + HB^3 - 4,71576 * 10^{-2} * HB^2 + 1,718 * HB - 34,92$.

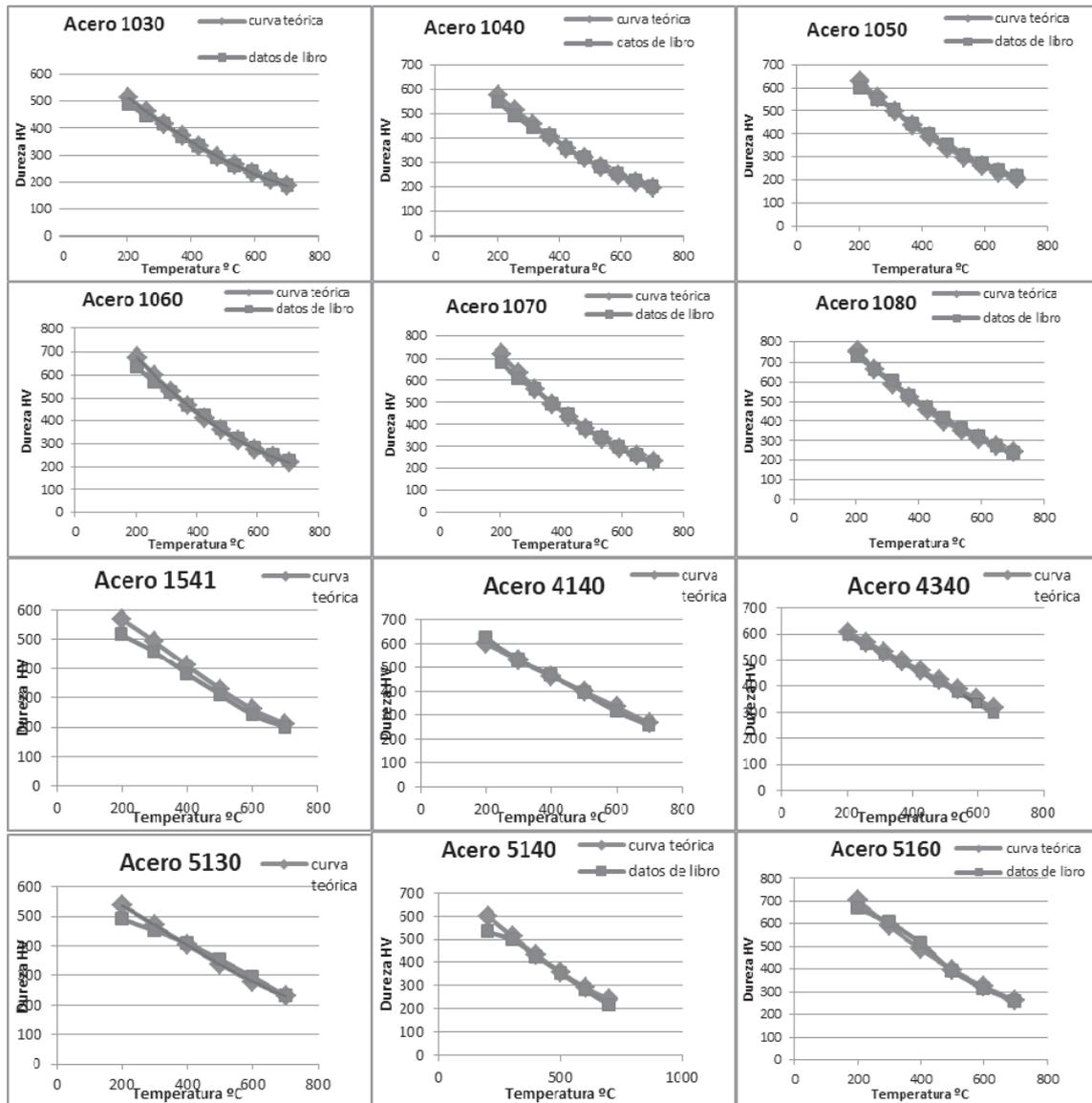


Fig. 6. Comparación curvas de dureza vs temperatura de revenido calculadas teóricamente vs curvas obtenidas de datos experimentales de bibliografía.

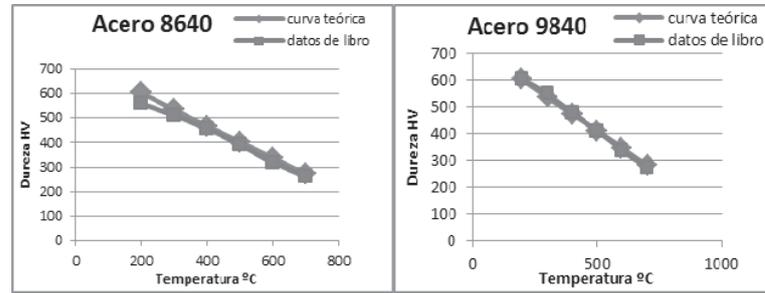


Fig. 6 (cont.). Comparación curvas de dureza vs temperatura de revenido calculadas teóricamente vs curvas obtenidas de datos experimentales de bibliografía.

3. CONCLUSIONES

A través de expresiones matemáticas relativamente sencillas fue posible calcular la dureza de un acero templado y revenido en función de su composición química y su temperatura de revenido. El método reproduce datos experimentales, con errores que en la mayor parte de los casos son menores a $\pm 5\%$.

Las expresiones deducidas contemplan la influencia de los principales elementos de aleación presentes en aceros para construcciones mecánicas. En este trabajo no se contempló la influencia de elementos como el vanadio ya que no es un elemento de aleación que se use para este tipo de aplicaciones. A futuro, podría ampliarse el estudio para contemplar la influencia de éste y otros elementos de aleación, ampliando de esta manera el rango de aplicación del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Grange, R. Hribal, C., "Hardness of tempered martensite in carbon low alloy steels", *Metallurgical and Materials Transactions A*, **8**(11), 1775-1785 (1977)
- [2] Wisti, M., Hingwe, M., *Tempering of Steel*, ASM Handbook, Vol. 4, 8ª Ed ASM (1991)
- [3] Chapman, R.D., Jominy, W.E., "Hardness Variations in Carbon-Molybdenum Steels after Tempering", *Metal Progress*, 57 (1950)
- [4] Kirkaldy, J.S., *Quantitative Prediction of Transformation Hardening of Steels*, *Metals Handbook*, Vol. IV, 8ª Edición, ASTM (1991)
- [5] Bates, C., Totten, G., Brennan, R., *Quenching of steels*, *Metals Handbook*, Vol. IV, 8ª Edición, ASM (1991)
- [6] 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)
- [7] Grossmann, M.A., "Hardenability Calculated from Chemical Composition", *Transactions AIME*, **150**, 227-259 (1942)
- [8] Yanzón, R., Bocca, J., Rebollo, D. et al., "Predicción de dureza en piezas mecánicas construidas con acero templado y revenido", *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, **13**(2), 25-45 (2009)
- [9] Instituto Argentino de Siderurgia "Aceros para construcciones mecánicas. Hojas de características" (1994)
- [10] Grossman, M.A., Bain, E.C., *Principios de Tratamientos Térmicos*, Editorial Blume (1972)
- [11] U.S. Steel, (1991) U.S. Atlas, *Metals Handbook*, Vol. IV, Eight Edition, ASTM

PREDICTION OF A TEMPERING STEEL HARDNESS AS A FUNCTION OF TEMPERATURE AND CHEMICAL COMPOSITION

Abstract – In the steels design and selection process is essential to have a precise knowledge of the different materials properties, to contrast them with the loads at which the piece or structure shall be submitted. In highly loaded parts, it is very common to use treated steels. In such circumstances, it is important to perform a predictive analysis of the properties that can be obtained through these treatments. The main goal of this work is to predict the hardness of a quench and tempered steel, from chemical composition and tempering temperature. In order to achieve this objective, the work of Grange, Hiribal and Porter, M. Wisti and M. Hingwe, among others were taken as a reference. Firstly, equations which reproduced the effect of each chemical element on hardness were deduced. Subsequently, equations reproducing the curves of hardness of tempered martensite depending on the total alloys content and the tempering temperature were developed. Finally, the results obtained with the modeled equations, were compared versus the experimental data available in the literature. It is expected that the deduced equations, could be used to optimize a computational tool for prediction of mechanical properties, developed in IMA Materials Area.

Keywords – Steel, Hardness, Tempering, Mathematical model.