

Comprobación experimental de métodos de cálculo de propiedades obtenibles mediante temple y revenido, en aceros de baja aleación

P. Tarín, Doctor, Profesor

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos,
Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

A. Salamanca, Ingeniero

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
(INTA), Torrejón de Ardoz, Madrid, España.

J. Pérez, Estudiante

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos
Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

Resumen:

Debido a la gran importancia que tienen los aceros en la industria, incluida la aeronáutica, se estudió, sistemáticamente, desde hace años, la influencia que tiene la composición (porcentaje de carbono y de elementos de aleación) y los diferentes tratamientos térmicos, en las propiedades mecánicas obtenibles con aceros de resistencia de baja aleación. Asimismo, y con el propósito de minimizar los costes derivados de la realización de ensayos experimentales, se han desarrollado diversos métodos empíricos, que permiten predecir, mediante cálculo, las propiedades y el comportamiento de esos aceros en los tratamientos térmicos, y el modo de realizarlos correctamente. En el trabajo se recopilan y exponen los métodos existentes para calcular las temperaturas de los puntos críticos en calentamiento A_{c1} y A_{c3} , y los que calculan las propiedades mecánicas obtenibles mediante tratamientos de temple y revenidos, desde el primero desarrollado por Hollomon en 1947. Se muestran sus resultados al aplicarlos a diversos aceros, y se contrasta su validez mediante comparación con los resultados experimentales obtenidos con diez aceros de baja aleación, de diferentes contenidos en carbono y elementos de aleación. Asimismo se expone la aplicación de éstos y otros métodos de cálculo, mediante un programa informático.

Palabras clave:

Aceros de baja aleación, propiedades, temple y revenido, métodos de cálculo, programa informático.

Introducción.

En el presente artículo se expone el proceso de validación de algunos métodos empíricos de cálculo de propiedades y comportamiento de aceros de baja aleación que han sido aceptados por su mayor fiabilidad en los resultados que reflejan.

Como trabajo previo, se recopilan métodos de cálculo existentes. En particular, los que predicen los valores de las temperaturas de los puntos críticos A_{c1} y A_{c3} , la dureza obtenible mediante tratamiento térmico de temple, y la dureza obtenible tras temple y revenido. Entre estos métodos se reseña una aplicación informática (Tarín y Pérez, 2004a,b), con versiones en español e inglés, que recopilando y agrupando diversos procedimientos, obtiene unas prestaciones apreciables por la amplia gama de resultados y la rapidez con que los obtiene.

Se realizan tratamientos y ensayos sobre una selección de diez aceros, representativa de los de baja aleación, con el fin de obtener valores experimentales para compararlos con los que se obtienen mediante la aplicación de los métodos seleccionados, y deducir la validez de ellos, en todos y cada uno de los aceros elegidos.

Este trabajo es una parte del realizado en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid (Salamanca, 2004) en el que se han comprobado experimentalmente la validez de otros métodos empíricos, como por ejemplo, los que predicen la curva Jominy de templabilidad.

1. Métodos de cálculo.

1.1 Métodos de cálculo de las temperaturas A_{c1} y A_{c3} .

Los métodos seleccionados para el cálculo de las temperaturas de los puntos críticos inferior y superior (A_{c1} y A_{c3} .respectivamente) en calentamiento de aceros de baja aleación son los siguientes:

- Para el cálculo de A_{c1} : Los procedimientos de Andrews (Andrews, 1965), de Grange (Grange, 1961) y de Eldis (Gorni, 2004). La aplicación de este último se limita a aceros con %C < 0,6.
- Para el cálculo de A_{c3} : Los procedimientos de Andrews (Andrews, 1965), de Grange (Grange, 1961), de Roberts (Roberts, 1988) y de Eldis (Gorni, 2004). La aplicación de este último se limita, asimismo, a aceros con %C < 0,6.

Todos estos métodos predicen el valor de estas temperaturas en función de la composición del acero.

1.2 Métodos de cálculo de la dureza obtenible tras tratamiento térmico de temple.

Los métodos seleccionados son los siguientes:

- El método de Hodge y Orehsoki (Hodge y Orehsoki, 1946), que deduce la dureza de temple completo (99 % de martensita) de un acero como dependiente únicamente de su contenido en carbono. Permite también obtener la dureza para otros porcentajes de martensita, lo que puede ser útil si se conoce ese dato, aunque la hace depender sólo del contenido en carbono y no del tipo de los constituyentes restantes que se han formado en el temple, lo que puede producir errores dependiendo del tipo de acero.
- El método de Blondeau (Brooks, 1996) propone dos expresiones; una para el cálculo de una dureza que llama máxima obtenible por temple que depende sólo del contenido en carbono (que llamaremos Método C) y otra en la que la dureza depende asimismo del contenido en algunos elementos de aleación y de la velocidad de enfriamiento en el temple (que llamaremos Método V). El mismo autor (Blondeau, 1976) propuso otras expresiones para las durezas de otros constituyentes microestructurales (bainitas o ferrita-perlita)

- El método de Andrés (Andrés, de et al., 1986) es una revisión del método, de Blondeau, modificando ligeramente las expresiones y amulando los términos de los elementos de aleación.

1.3 Métodos de cálculo de la dureza obtenible tras temple y revenido.

Todos los métodos seleccionados permiten calcular la dureza obtenible en función de la composición del acero (% de carbono y de aleantes) y de la temperatura de revenido. Asimismo presentan explícita o implícitamente la dependencia del tiempo de permanencia a esa temperatura; algunos de los métodos utilizan parámetros en los que intervienen estas dos variables, y otros utilizan el parámetro de Hollomon (Hollomon y Jaffe, 1947) de equivalencia de revenidos realizados a diferentes temperaturas, con tiempos distintos. Estos métodos son:

- Método de Grange (Grange et al., 1977). En él, la dureza obtenida se calcula a través de la aportación a la misma de cada elemento de aleación. Es únicamente válido para aceros con una estructura de temple, previa al revenido, totalmente martensítica, y está limitado a contenidos en Cromo inferiores al 1% y de Níquel inferiores al 2%.
- Método de Crafts y Lamont (Crafts y Lamont, 1947) que permite calcular el ablandamiento o diferencia de dureza respecto a la de temple, en función de diversos parámetros que tienen en cuenta el contenido de aleantes y la temperatura de tratamiento. No tiene en cuenta el posible efecto del Vanadio. El método permite calcular la dureza de revenidos para casos de temple incompleto (estructura no completamente martensítica previa al revenido), con el único dato de la dureza obtenida en el temple.
- Método de Creusot-Loire (Brooks, 1996 y Carsí, 1978), basado en la definición de un llamado parámetro de revenidos, que calcula la dureza del acero como suma de las aportaciones de los diferentes constituyentes microestructurales presentes, para cada una de las cuales presenta una expresión para calcular su microdureza en función de la composición y de un parámetro de revenidos P, que depende de la temperatura y el tiempo.
- Método de Hollomon (Hollomon y Jaffe, 1947), en el que la dureza de revenido (llamada dureza real) se calcula como diferencia entre la dureza máxima no real (que llama dureza característica) y el ablandamiento producido por el revenido. La dureza característica es función del contenido en carbono y aleantes. El ablandamiento es función de la temperatura de revenido, del contenido en carbono y del tiempo de permanencia a la temperatura de revenido. El método tiene en cuenta el diferente efecto en el revenido a diferentes temperaturas, de algunos elementos de aleación

Este método fue revisado y parcialmente modificado por Calvo Rodés (Calvo Rodés et al., 1961b).

Ninguno de los procedimientos tiene en cuenta el efecto del Cobre, aunque Hollomon (Hollomon y Jaffe, 1947) indica que cualitativamente tiene el mismo efecto que el Níquel y cuantitativamente tiene un efecto de la mitad.

Tampoco tiene en cuenta ningún método el efecto del Fósforo ni del Azufre con la excepción del método de Grange que considera el Fósforo, aunque su efecto cuantitativo que le atribuye, para los contenidos normales de los aceros de baja aleación, es inferior a 5 HV.

2. Métodos de cálculo en aplicación informática.

La aplicación de diversos métodos de cálculo se facilitó con la elaboración de diversos Calculadores y Reglas de Cálculo. Los primeros de ellos (Calvo Rodés et al., 1961b) calculaban las durezas de revenidos,

así como las templabilidades en diferentes medios y las curvas del ensayo Jominy de templabilidad. Con posterioridad se desarrollaron otros por la Climax Molybdenum Co., la Bethlehem Steel Co. y Creusot Loire (Blondeau et al., 1973). Estos tres últimos se limitaban a obtener la curva Jominy.

La aparición de los microordenadores permitió acelerar los cálculos de los métodos empíricos aplicables a los aceros de baja aleación, no sólo de los comentados anteriormente sino de un gran número de ellos, desarrollados a partir del cúmulo de experimentos, ensayos y estudios. Posibilitaron, además, la combinación de diversos métodos para conseguir resultados más amplios que los obtenidos por cada uno de ellos por separado.

Se ha desarrollado una aplicación informática que utiliza la mayoría de métodos teóricos de cierta relevancia (incluida una selección de los métodos ya citados, seleccionados por su mayor exactitud) para obtener el comportamiento y las propiedades de los aceros de baja aleación. Tras unas primeras versiones (Tarín, 1989 y Tarín, 1992), la aplicación se encuentra actualmente en su primera versión desarrollada para plataformas Microsoft Windows de 32 bits. De ella existen versiones en español (Tarín y Pérez, 2004a) y en lengua inglesa (Tarín y Pérez, 2004b).

El manejo sencillo del programa, la alta interactividad con el usuario y sus altas prestaciones lo hacen de alta utilidad para fines didácticos e industriales. Los datos que requiere el programa para realizar los cálculos son la composición del acero (contenido en carbono y aleantes) y el tamaño de grano austenítico, según normas EN o ASTM. Con ellos y los de algunos parámetros (diámetro de barras a templar, medio de enfriamiento, temperatura y tiempo de tratamiento por ejemplo) el programa obtiene los siguientes resultados:

- Cifras Clave: parámetros representativos del comportamiento del acero, según el criterio de Calvo Rodés (Calvo Rodés et al., 1961a).
- Diagrama Fe-C de transformaciones en equilibrio. Utiliza el método de Andrews (Andrews, 1965).
- Temperaturas y tiempos necesarios para la correcta realización de los tratamientos térmicos, durezas obtenibles en ellos y agrietabilidad en el temple del acero. Utiliza, entre otros métodos, los de Andrews (Andrews, 1965) y Hodge y Orehoski (Hodge y Orehoski, 1946).
- Diagramas TTT de transformaciones que se producen por permanencias isotérmicas de diferentes tiempos a diversas temperaturas. Utiliza el método de Andrews (Andrews, 1965) y uno de Haynes (Haynes, 1967).
- Diagramas TTT de transformaciones en enfriamiento continuo. Utiliza, entre otros, el método de Andrews (Andrews, 1965) y el de Grossmann (Grossmann, 1942).
- Diagramas de revenidos: propiedades mecánicas (dureza y valores de resistencia y plasticidad) que pueden obtenerse mediante tratamiento térmico de revenido, en función de la temperatura y tiempo de permanencia. Utiliza los métodos de Hollomon (Hollomon y Jaffe, 1947) y el de Crafts y Lamont (Crafts y Lamont, 1947).
- Curvas del ensayo Jominy de templabilidad para probetas templadas o templadas y revenidas. Utiliza el método de Crafts y Lamont (Crafts y Lamont, 1947).
- Distribución de durezas y resistencias en la sección de una barra de acero sometida a tratamiento de temple y revenido. Utiliza el método de Crafts y Lamont (Crafts y Lamont, 1947) y el de Lamont (Lamont, 1943).

3. Ensayos realizados y resultados obtenidos.

Previo a la realización de ensayos en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid, se procedió a realizar una calibración de todos los equipos utilizados en el trabajo: temperaturas de hornos y dilatómetro, durómetros, equipos de adquisición de datos, etc.

Para la realización de los ensayos se realizó previamente una selección de 10 aceros cuyo conjunto fuese suficientemente representativo de los de baja aleación. Entre ellos existen algunos aceros al carbono con diferentes contenidos en ese elemento, dado que es el más importante, a priori, para definir las propiedades mecánicas obtenibles. Se incluyeron otros aceros aleados procurando que existiesen las diferentes combinaciones más usuales de elementos de aleación y otros con elementos menos usuales (Vanadio, por ejemplo). En la Tabla 1 se muestra la composición de los aceros ensayados.

Previamente a los tratamientos se realizaron ensayos de dilatometría en calentamiento de todos los aceros, con el fin de identificar las temperaturas de los puntos críticos. Los ensayos se realizaron a una velocidad de 10 °C/minuto, que si bien es mayor que la más usual en ensayos para determinación de puntos críticos, es más acorde con los calentamientos realizados en la práctica industrial. La determinación de A_{c1} y A_{c3} se realizó con el criterio usual de los máximos y mínimos, respectivamente, de las curvas de dilatación-temperatura.

Tabla 1: Aceros ensayados.

Acero	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
C25R	0,25	0,67	0,23	0,012	0,026	0,29	0,19	0,07	---	0,22
C45R	0,45	0,73	0,27	0,017	0,031	0,17	---	---	---	---
C60E	0,64	0,76	0,27	0,016	0,016	0,30	0,21	---	---	0,25
F123	0,28	0,62	0,26	0,009	0,034	0,68	2,71	0,03	---	0,21
42CrMoS4	0,42	0,86	0,24	0,008	0,020	1,04	---	0,19	---	0,14
51CrV4	0,53	0,90	0,29	0,019	0,022	0,99	0,16	---	0,15	0,14
F1280	0,38	0,56	0,15	0,018	0,028	0,62	0,69	0,16	---	0,27
F1270	0,34	0,78	0,36	0,017	0,016	0,69	1,75	0,15	---	0,19
Plastic	0,36	1,27	0,36	0,028	0,008	1,91	0,96	0,22	0,11	0,18
F1260	0,33	0,55	0,20	0,011	0,009	1,36	3,96	0,29	---	---

Para determinar la temperatura de austenización se tuvieron en cuenta el resultado de dilatometría, cotejándola con los datos obtenidos de diferentes normas y datos de los aceros y la temperatura de austenización obtenida por una fórmula empírica empleada en el programa informático ya citado (Tarín y Pérez, 2004 a, b), que tiene en cuenta la conveniencia de elevar esa temperatura si se tienen en la composición del acero elementos de aleación capaces de formar carburos.

Se realizaron ensayos previos que comprobaron que a las temperaturas elegidas se realizaba una austenización completa y correcta.

Para los ensayos de temple y revenido se emplearon discos de 25 mm de diámetro y 6 mm de espesor. El medio de enfriamiento para el temple se eligió, en cada caso, el que fuese suficientemente rápido para conseguir un temple completo martensítico, de acuerdo con el tamaño y geometría de la pieza y la templabilidad del acero deducida al cotejar los resultados obtenidos, por un lado, mediante cálculo según el método de Grossmann (Grossmann, 1942) teniendo en cuenta las correcciones de Siebert (Siebert y Doane, 1977), y los resultados del ensayo Jominy de templabilidad realizado para cada uno de los aceros.

Tras el temple se comprobó metalográficamente que la estructura obtenida era completamente martensítica. En caso contrario se modificaban adecuadamente los parámetros del tratamiento: temperatura de austenización o medio de enfriamiento.

Tras el temple se sometieron las probetas a tratamientos de revenido a temperaturas comprendidas entre 400 °C y 650 °C (a intervalos de 25 °C), con permanencia a temperatura de dos horas. El enfriamiento posterior se realizó al aire.

Para comprobar el efecto del tiempo de permanencia a temperatura de revenido se realizaron revenidos a 400 °C y 650 °C a tres aceros seleccionados, dos al carbono (C25R y C45R) y otro aleado con acusado contenido en elementos formadores de carburos (51CrV4) Los tiempos de permanencia a ambas temperaturas fueron de 15', 30', 1 hora, 2 horas, 4 horas y 8 horas.

Para minimizar los errores de tiempos reales de permanencia a temperatura, (sobre todo en tiempos cortos) los calentamientos se realizaron en baños de sales y se utilizaron discos de un espesor de 3-4 mm.

Las medidas de dureza se realizaron todas en las escalas Rockwell C (HRC). En algunos casos se realizaban medidas Vickers (HV), convirtiéndolas posteriormente a HRC de acuerdo con los valores que da la norma ASTM (ASTM, 1984).

4. Comparación de resultados.

4.1 Métodos de cálculo de las temperaturas A_{c1} y A_{c3} .

En las Tablas 2 y 3 se muestran los resultados obtenidos para los valores de las temperaturas de los puntos críticos A_{c1} y A_{c3} por dilatometría y mediante la aplicación de los diferentes métodos teóricos.

Tabla 2: Valores de A_{c1} (°C): Experimental y obtenidos mediante diversos métodos.

Acero	Ensayo Dilatómetrico.	Método de Grange	Método de Andrews	Método de Eldis
C25R	737	721	728	703
C45R	737	723	730	706
C60E	738	720	728	701
F123	717	695	694	661
42CrMoS4	758	739	742	714
51CrV4	757	737	740	709
F1280	741	721	724	698
F1270	738	709	711	680
Plastic	750	743	740	701
F1260	705	694	684	650

Tabla 3: Valores de A_{c3} (°C): Experimental y obtenidos mediante diversos métodos.

Acero	Ensayo Dilatómetrico.	Método de Grange	Método de Andrews	Método de Eldis	Método de Roberts
C25R	817	805	802	751	814
C45R	785	775	775	714	784
C60E	750	735	738	677	763
F123	770	756	751	710	803
42CrMoS4	810	775	761	718	764
51CrV4	797	754	762	698	762
F1280	801	769	771	710	782
F1270	784	765	764	715	797
Plastic	789	766	766	722	775
F1260	760	724	728	679	787

Los valores que se obtienen con los métodos de Andrews y de Grange tanto para A_{c1} como para A_{c3} son muy similares salvo el valor de A_{c1} para aceros al carbono que Grange da unos 10°C más bajos. El método de Andrews calcula valores inferiores en unos 10 °C para los aceros al carbono (tanto para A_{c1} como para A_{c3}) y para los aceros aleados unos 20 °C para A_{c1} y unos 30 °C para A_{c3} .

Los valores que dan el método de Eldis son muy inferiores a los experimentales, con errores muy grandes, lo que parece acorde con el hecho de que las propias expresiones pueden resultar inaceptables.

El método de Roberts calcula valores para A_{c3} con errores más erráticos.

4.2 Métodos de cálculo de la dureza obtenible tras tratamiento térmico de temple.

En la Tabla 4 se muestran los valores de las medidas experimentales de dureza correspondiente a una estructura completamente martensítica y los valores obtenidos mediante la aplicación de los diversos métodos empíricos.

**Tabla 4: Valores de la dureza de temple martensítico (HRC):
Experimental y obtenidos con diversos métodos.**

Acero	Valor Experimental	Método de Hodge y Orehoski	Método C de Blondeau	Método V de Blondeau	Método de Andrés
C25R	47.5	47.0	47.0	49.0	49.0
C45R	58.5	58.0	58.0	60.0	59.5
C60E	65.5	65.5	63.0	66.0	65.5
F123	49.0	48.5	49.0	52.5	50.5
42CrMoS4	56.5	56.5	57.0	59.0	57.5
51CrV4	61.5	61.5	61.0	63.5	62.0
F1280	54.5	54.5	55.0	57.0	56.0
F1270	51.5	52.0	52.5	55.5	53.5
Plastic	53.5	53.5	54.0	56.5	53.0
F1260	52.0	51.5	52.0	55.0	51.0

Los valores experimentales se han obtenido en los discos templados y en el extremo templado de la probeta del ensayo Jominy o en puntos próximos. En los discos templados se ha comprobado que la microestructura obtenida era completamente martensítica, desechando los valores que no cumplían esa condición. Para deducir la dureza martensítica de la probeta Jominy se ha tenido en cuenta las singularidades que se presentan en las medidas de dureza del extremo templado y en sus puntos próximos, debido al específico enfriamiento de la probeta.

Para el cálculo de los valores mediante el método de Hodge y Orehoski (Hodge y Orehoski, 1946) y el método C de Blondeau (Brooks, 1996) se requiere únicamente el contenido en carbono y el resultado lo da directamente en dureza HRC.

La aplicación del resto de los métodos requiere el dato de la velocidad de enfriamiento y el resultado lo da en dureza HV. El valor de la velocidad utilizado en los cálculos es el indicado por Blondeau (Brooks, 1996) para cada medio de enfriamiento utilizado en el temple de los discos de los distintos aceros, cotejando ese valor con el que se deduce de la que expresión que da French (Crafts y Lamont, 1949) para diferentes geometrías y medios de enfriamiento. De los valores de dureza HV obtenidos se han

determinado sus equivalencias a HRC según los valores de la Norma ASTM (ASTM, 1984). Todos los valores de dureza HRC se han redondeado a 0.5 HRC.

De los resultados anteriores se deduce que el método más exacto es el Hodge y Orehoski. El método C de Blondeau da resultados muy aproximados pero con diferencias que llegan a las 2 HRC.

El método V de Blondeau da, en general, valores más altos, sobre todo en aceros muy aleados, debido a la contribución a la dureza de la martensita que considera el efecto que tienen algunos elementos de aleación. Asimismo considera que existe una contribución importante de la velocidad de enfriamiento a la dureza, lo que si bien cualitativamente puede ser acorde con el hecho de que la dureza obtenida en temple completos martensíticos con enfriamientos lentos es menor (por posible revenido de la primera martensita formada y por un mayor contenido en austenita retenida), cuantitativamente supondría una diferencia mínima entre la dureza de puntos de la probeta Jominy superior a la medida en las de algunos aceros de muy alta templabilidad, lo que no es acorde con lo obtenido en muchas curvas Jominy. La corrección realizada por De Andrés a este método ofrece resultados más aproximados.

4.3 Métodos de cálculo de la dureza obtenible tras temple y revenido.

En las Fig. 1 a 9 se muestran algunas de las comparaciones de los resultados experimentales obtenidos con los diez aceros y los cuatro métodos de cálculo reseñados en el apartado 1.3. Todas las medidas de dureza se han realizado en las escalas HRC y HV. Se muestran los valores en la escala que coincide con la usada en el método de cálculo correspondiente. De las comparaciones pueden deducirse las siguientes conclusiones

El método de Grange (Grange et al., 1977) proporciona buenos resultados (Fig. 1 a 4) en los aceros que ha podido aplicarse (excepto en el 51CrV4, para altas temperaturas), aunque parece que infravalora ligeramente el efecto del Cromo en revenidos del orden de los 500 °C y sobrevalora el efecto del Vanadio. Se obtienen buenos resultados con contenidos en Níquel (hasta 4%), modificando la función que valora su influencia.

El método de Crafts y Lamont (Crafts y Lamont, 1947) ofrece buenos resultados (Fig. 5 a 7) con la excepción de que da valores apreciablemente bajos para contenidos en carbono muy altos y la consideración de que no tiene en cuenta en los cálculos el efecto del Vanadio.

El método de Creusot-Loire (Brooks, 1996) es errático en sus resultados dado que proporciona buenos resultados en algunos y apreciablemente malos en otros, sin que parezca posible sacar conclusiones. Tal vez la razón de ello resida en el llamado parámetro de revenido de difícil interpretación y que confiere a la curva de revenidos una morfología poco acorde con las reales y que limita mucho el margen de temperaturas para el que es válido el método (usualmente superiores a 550 °C).

El método de Hollomon (Hollomon y Jaffe, 1947) obtiene muy buenos resultados (Fig. 8 y 9) para toda gama de aceros con la excepción de los aceros de contenidos muy bajos o muy altos para los que calcula valores de dureza menores y mayores, respectivamente que los experimentales. De ello parece deducirse que la valoración del efecto del carbono, que el método supone lineal con el contenido, debe ser creciente con el % Carbono pero relativamente decreciente con el (de ley parabólica por ejemplo), como deducen otros métodos como el de Grange o el de Crafts y Lamont.

La valoración que hace Hollomon del efecto del tiempo de revenido da resultados muy acorde con los valores experimentales (Fig. 10), a las dos temperaturas ensayadas.

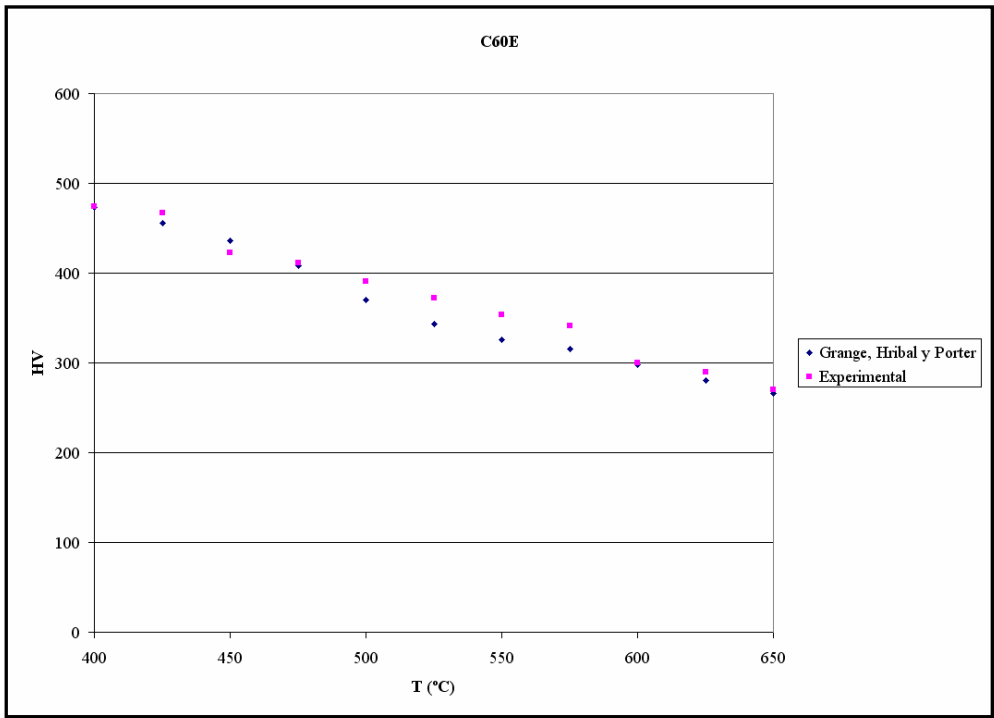


Figura 1: Dureza de revenido (2 horas) del acero C60E: Valores experimentales y del método de Grange (Grange et al., 1977).

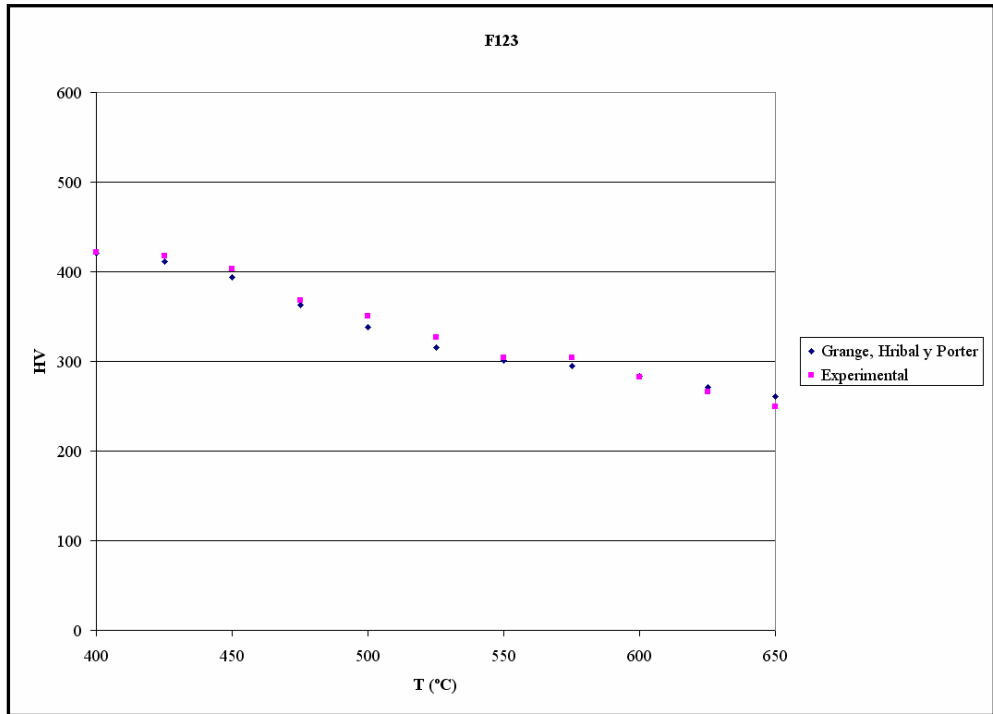


Figura 2: Dureza de revenido (2 horas) del acero F123: Valores experimentales y del método de Grange (Grange et al., 1977).

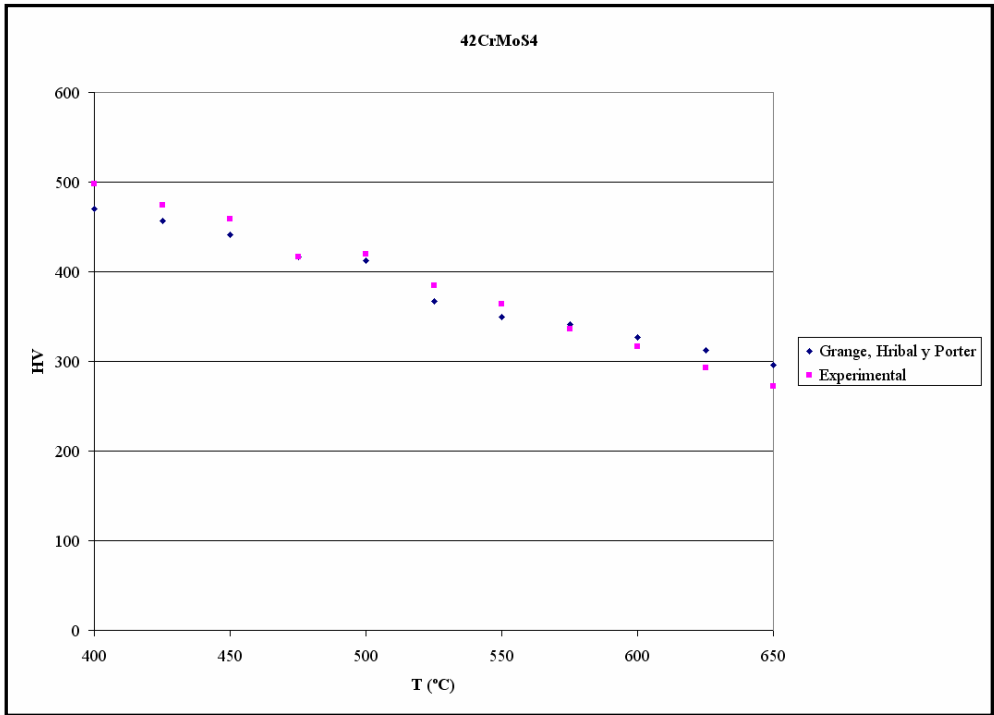


Figura 3: Dureza de revenido (2 horas) del acero 42CrMoS4: Valores experimentales y del método de Grange (Grange et al., 1977).

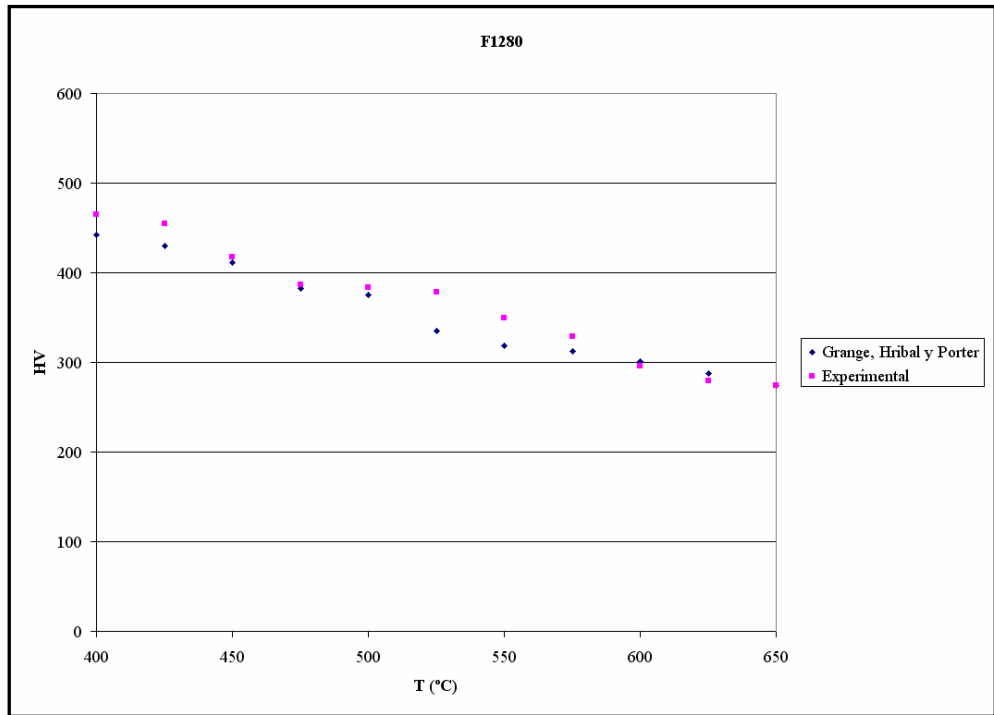


Figura 4: Dureza de revenido (2 horas) del acero F1280: Valores experimentales y del método de Grange (Grange et al., 1977).

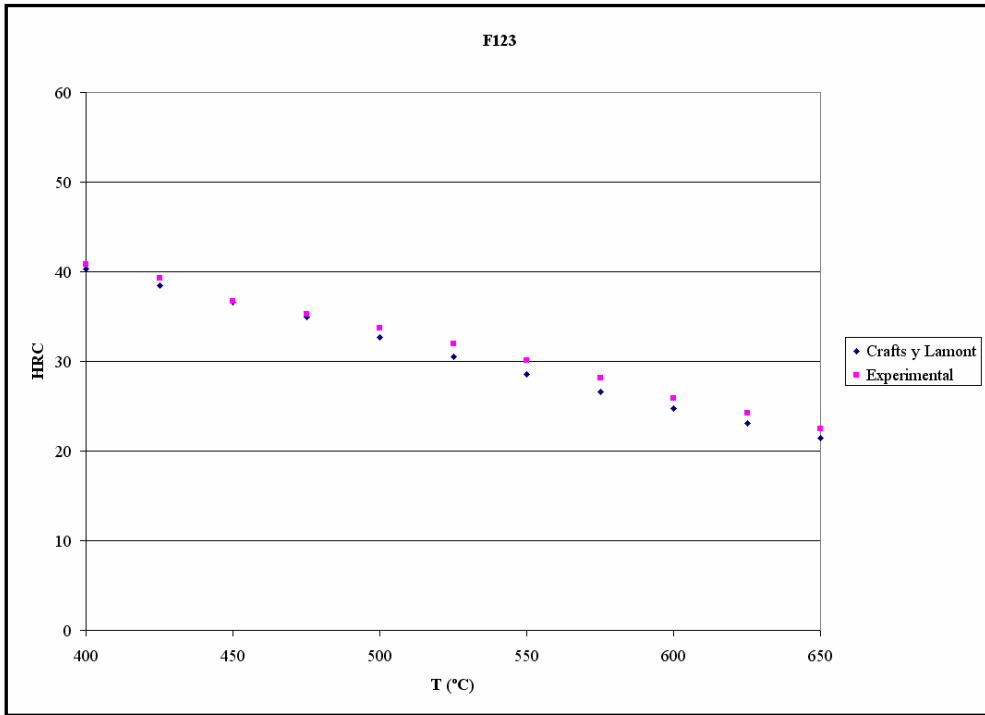


Figura 5: Dureza de revenido (2 horas) del acero F123: Valores experimentales y del método de Crafts (Crafts y Lamont, 1947).

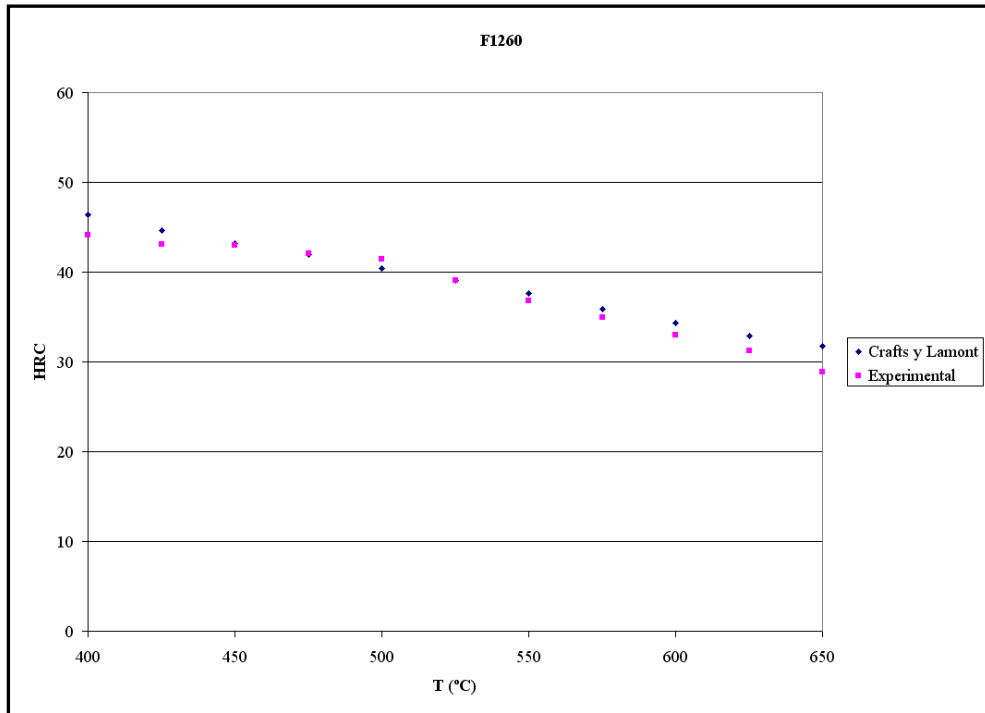


Figura 6: Dureza de revenido (2 horas) del acero F1260: Valores experimentales y del método de Crafts (Crafts y Lamont, 1947).

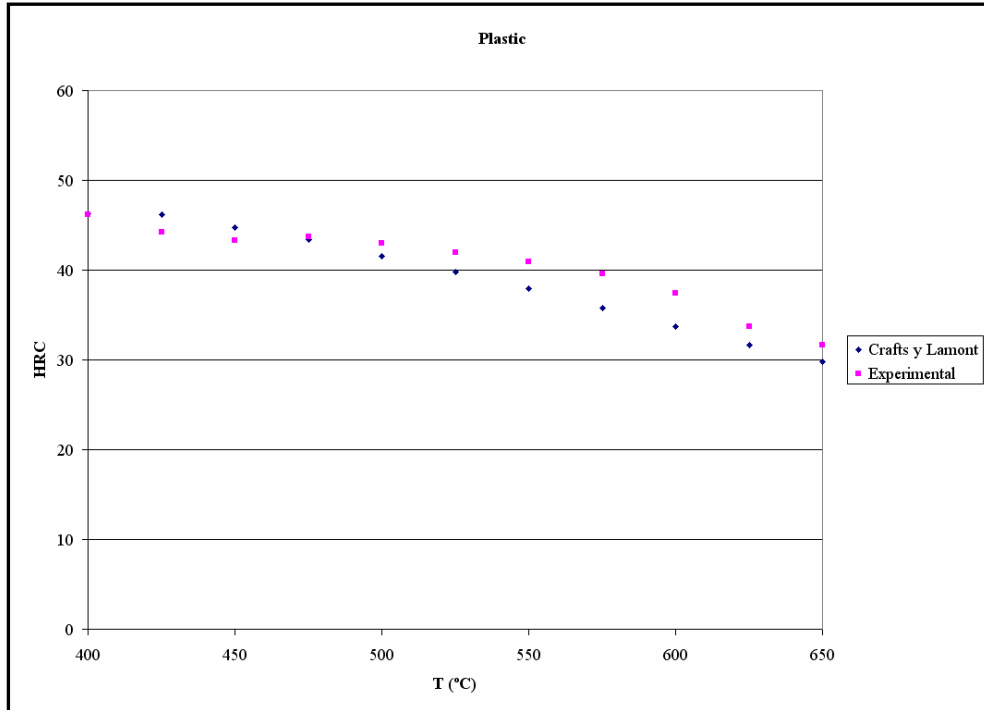


Figura 7: Dureza de revenido (2 horas) del acero Plastic: Valores experimentales y del método de Crafts (Crafts y Lamont, 1947).

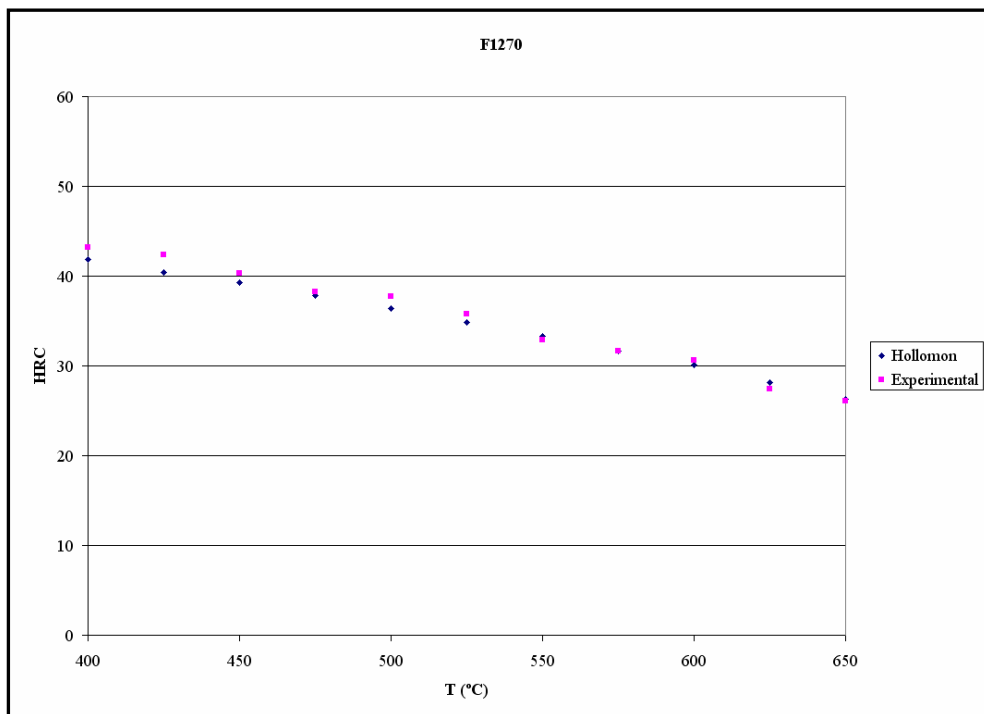


Figura 8: Dureza de revenido (2 horas) del acero F1270: Valores experimentales y del método de Hollomon (Hollomon y Jaffe, 1947).

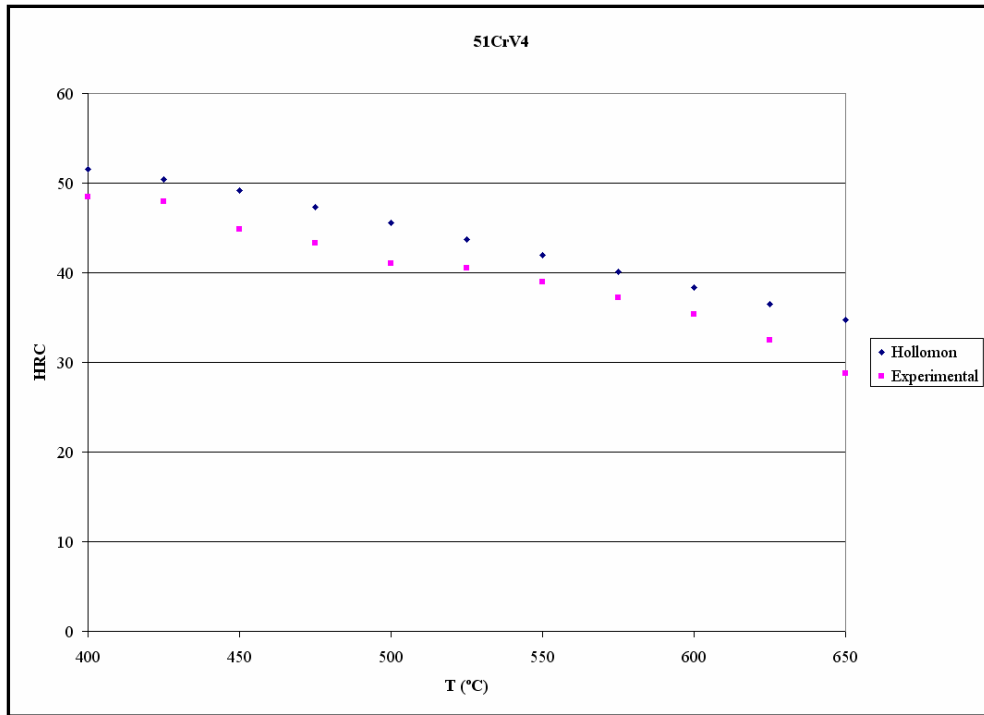


Figura 9: Dureza de revenido (2 horas) del acero 51CrV4: Valores experimentales y del método de Hollomon (Hollomon y Jaffe, 1947).

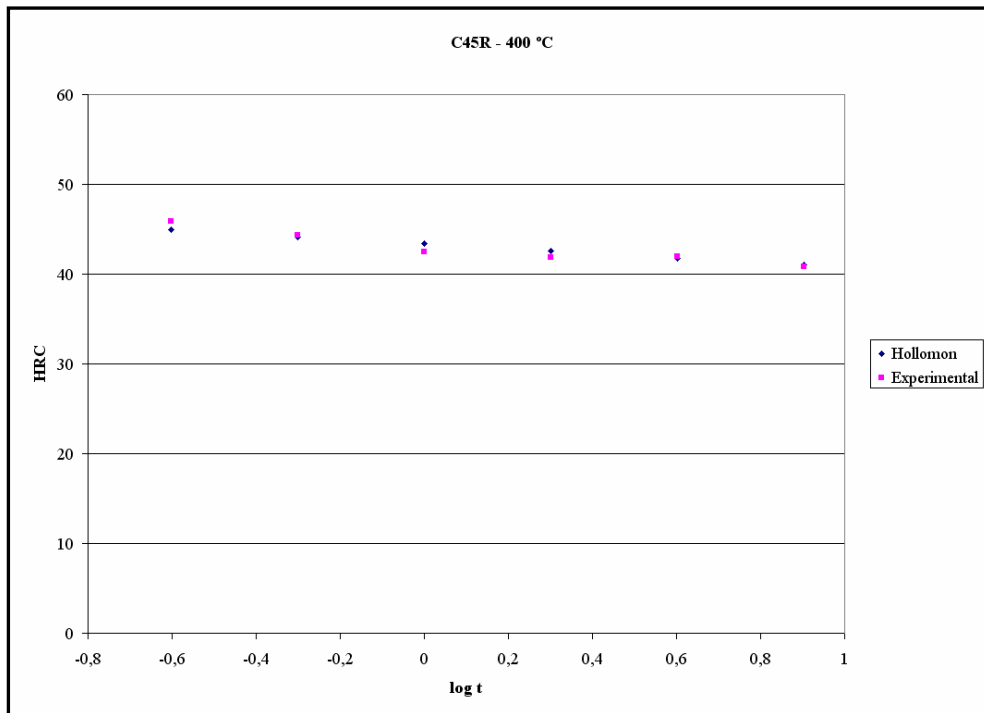


Figura 10: Influencia del tiempo en la dureza de revenido del acero C45: Valores experimentales y del método de Hollomon (Hollomon y Jaffe, 1947).

Referencias.

- Andrés, de, M. P. et al. (1986). *Rev. Metal. Madrid*, Vol. 22, No. 4, pp 243-252.
- Andrews, K.W. (1965). *Journal of the Iron and Steel Institute*, Vol. 203, No. 7, pp 721-727.
- ASTM, (1984). *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM E 140-83.
- Blondeau, R., Maynier, Ph. y Mollet, J. (1973). *Mem. Sci. Rev. Metall.* Vol. LXX, N° 12.
- Blondeau, R. et al. (1976). *Heat Treatment '76*, The Metals Society, London, pp 189-200.
- Brooks, C.R. (1996). *Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels*, ASM International.
- Calvo Rodés, R. et al. (1961a). *A Suggested Code System for Low-Alloy Steels Relating Composition and Performance*. SAE International Congress, Detroit, Publication 292B.
- Calvo Rodés, R. et al. (1961b). *Descripción e instrucciones para el manejo del Calculador de Aceros y de la Regla de Cálculo de propiedades representativas de los aceros*. INTA, Madrid.
- Carsí, M. y Andrés, de M. P. (1978). *Revista Técnica Metalúrgica*, pp 13-22.
- Crafts, W., Lamont, J. L. (1947). *Traes. AIME*, Vol. 172, pp 222.
- Gorni, A. A. (2004). "Useful formulas for steel forming and heat treating", Release 10#, São Vicente, Brazil.
- Grange, R.A. (1961). *Metal Progress*, pp 73.
- Grange, R.A. et al. (1977). *Met. Trans.*, Vol. 8A, pp 1775-1785.
- Grossmann, M.A., (1942). *Trans. Am. Inst. Mining Met. Eng.* Vol. 150, pp 226-259.
- Haynes, A.G., (1967). *Il Nickel*. Vol. 125. June 1965. Vol. 126, Sept 1967.
- Hodge, J.M. and Orehoski, M.A. (1946). *Trans. AIME*, Vol. 167, pp 502-512.
- Hollomon, J.H. and Jaffe, L. (1947). *Ferrous Metallurgical Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Lamont, J.L., (1943). *Iron Age*. Vol. 152.Oct, pp 64-70.
- Roberts, W.L. (1988). *Flat processing of Steel*, Marcel Dekker Inc., New York.
- Salamanca, A. (2004). "Optimización de los métodos empíricos de cálculo de propiedades y comportamiento en servicio de aceros de uso aeronáutico", Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Siebert, C.A., Doane, D.V., Breen, D.H., (1977). *The Hardenability of Steels*, America Society for Metals. ASM International.

Tarín-Remohí, P. (1989) *SteCal*, ASM International.

Tarín, P. (1992). *SteCal 2.0*, ASM International.

Tarín, P., Pérez, J.. (2004a). *AceCal 3.0*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.

Tarín, P., Pérez, J. (2004b). *SteCal 3.0*. ASM International.

Información Biográfica

Dr. Pascual TARÍN REMOHÍ. Prof. Tarín Remohí es Catedrático de Materiales Metálicos y Director del Departamento de Materiales y Producción Aeroespacial de la Universidad Politécnica de Madrid, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos y ha sido Director de esta Escuela.

Ing. Ángel SALAMANCA GARCÍA. Ing. Salamanca García es Titulado Superior de Investigación y Laboratorio del Departamento de Materiales y Estructuras del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial de Torrejón de Ardoz (Madrid).

Javier PÉREZ MARTÍN. Sr. Pérez Martín es estudiante de último curso de Ingeniería Aeronáutica en la Universidad Politécnica de Madrid y colaborador de su Departamento de Materiales y Producción Aeroespacial.

Autorización y Cesión de Derechos

Los autores autorizan a LACCEI a publicar este trabajo en las Actas de la Conferencia en CD y en la Red. Ni LACCEI ni los editores se responsabilizarán del contenido o de las implicaciones de lo expresado en el trabajo.