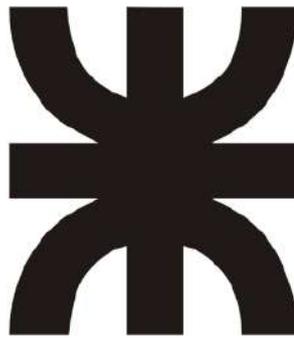


Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

FACULTAD REGIONAL CÓRDOBA

Ingeniería Metalúrgica

Proyecto Final

Autor

Costa Julio Miguel

Tutor

Ing. Articó, Nicolás Matías

Septiembre, 2022

Agradecimientos

Es mi más profundo deseo agradecer a toda mi familia y a mis amigos los cuales me apoyaron y transitaron en los buenos y en los malos momentos, es con todos ellos con los que quiero disfrutar este logro personal y a quienes se los dedico.

También quiero extender mi agradecimiento a dos instituciones que me formaron con excelencia académica. A la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba y a todo ese hermoso grupo humano que afectuosamente llamamos “la familia metalúrgica” y al Instituto Nacional de Tecnología Industrial “INTI”, lugar que me aportó gran cantidad de conocimiento y calidez humana.

Julio Miguel Costa

Resumen

En el proceso de ingeniería de una pieza es necesario seleccionar adecuadamente materiales, procesos de mecanizado, conformación, tratamientos térmicos, etc. con el objetivo de conferirle a la pieza propiedades específicas para que pueda cumplir con el propósito para la cual fue diseñada.

En el proceso de selección de aceros, una variable fundamental es la templabilidad que se puede definir como la propiedad que determina la profundidad y distribución de la dureza inducida por el temple. La templabilidad está íntimamente relacionada con la composición química del acero y se puede determinar por medio del ensayo Jominy, el cual conlleva un tiempo de realización importante y que muchas acerías intentan evitar. A lo largo de los años se han desarrollado varios métodos para poder obtener curvas de templabilidad a partir de la composición química como son los métodos de Grosman, Just o Kirkaldy. Pero todos estos métodos no pueden predecir con exactitud la curva o lo hacen para rangos muy acotados de composiciones.

El presente trabajo pretende obtener una ecuación precisa que relacione la composición química con la curva Jominy a partir de datos experimentales de una serie de ensayos realizados en aceros SAE 5160 mediante un software de cálculo. Este método de predicción también aplica para la familia 5100 con bastante aproximación.



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

ÍNDICE

1.	ALCANCE	7
2.	OBJETIVOS	7
3.	JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	7
4.	INTRODUCCIÓN	7
5.	MARCO TEÓRICO	8
5.1.	ENSAYO JOMINY	8
5.2.	CURVAS JOMINY	13
5.3.	BANDAS DE TEMPLABILIDAD	13
5.4.	TEMPLABILIDAD	14
5.5.	VARIABLES QUE DETERMINAN LA TEMPLABILIDAD DE UNA ACERO	15
5.5.1.	<i>Tamaño de Grano Austenítico</i>	16
5.5.2.	<i>Influencia del contenido en Carbono sobre la templabilidad</i>	17
5.5.3.	<i>Influencia de los elementos de aleación sobre la templabilidad</i>	18
5.5.4.	<i>Influencia del tamaño de las piezas</i>	20
5.6.	MÉTODOS PARA ESTUDIAR EL COMPORTAMIENTO DE UN ACERO AL TEMPLE	21
5.7.	DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO CRÍTICO IDEAL DE UN ACERO POR MEDIO DEL ENSAYO JOMINY	28
5.8.	MÉTODOS PARA PREDECIR LA TEMPLABILIDAD	30
5.8.1.	MÉTODO DE GROSSMAN PARA LA PREDICCIÓN	30
5.8.2.	MÉTODO DE ERWIN JUST	32
5.8.3.	MÉTODO DE KIRKALDY	33
5.9.	NUEVOS MÉTODOS	34
6.	DESARROLLO PARA DETERMINAR LA ECUACIÓN DE PREDICCIÓN	35
6.1.	MÉTODO DE TRABAJO	36
6.2.	ANÁLISIS DE REGRESIÓN	37
6.3.	ASOCIACIÓN DE LOS FACTORES A LA COMPOSICIÓN QUÍMICA	48
6.4.	PRUEBA DE DESEMPEÑO DE LA ECUACIÓN DE PREDICCIÓN	51
6.5.	CONFECIÓN DE CALCULADORA JOMINY	58
7.	CONCLUSIONES	64
8.	ANEXOS	65
8.1.	ANEXO 1– GRÁFICOS DE CADA COLADA CON SUS RESPECTIVOS DATOS EXPERIMENTALES Y PREDICCIÓN	65
8.2.	ANEXO 2– ERRORES	74
8.3.	ANEXO 3– COMPARACIONES CON OTRAS ALEACIONES DE LA FAMILIA 5100, UTILIZANDO UNA COMPOSICIÓN MEDIA DE CADA RANGO	99
9.	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	102



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.	CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS ACEROS	12
TABLA 2.	NÚMERO ASTM PARA TAMAÑOS DE GRANO	16
TABLA 3.	SEVERIDAD DE TEMPLE (H) DE DIVERSOS MEDIOS DE ENFRIAMIENTO	27
TABLA 4.	FACTORES MULTIPLICADORES	30
TABLA 5.	COMPOSICIÓN QUÍMICA PARA EJEMPLIFICAR MÉTODO DE GROSSMANN	31
TABLA 6.	ECUACIONES PARA DUREZA	31
TABLA 7.	FACTORES DIVISORES	32



Predicción de la curva teórica de templeabilidad para un Acero SAE 5160

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PROBETA DE ENSAYO EN EL APOYO Y ENFRIAMIENTO CON AGUA. DIMENSIONES DE LA PROBETA Y CONDICIONES DE ENSAYO.	9
FIGURA 2. ESQUEMA GENERAL DE EQUIPAMIENTO UTILIZADO PARA ENSAYO JOMINY.	10
FIGURA 3. DIMENSIONES FINALES DE LA PROBETA LUEGO DE REALIZADO EL ENSAYO. RESTA EL PROCEDIMIENTO DE TOMAR LOS VALORES DE DUREZA A LO LARGO DE LA MISMA.	11
FIGURA 4. GRÁFICO DISTANCIA DESDE CARA TEMPLADA VS. DUREZA. A MEDIDA QUE NOS ALEJAMOS DE LA CARA ENFRIADA RÁPIDAMENTE, LA DUREZA DISMINUYE.	11
FIGURA 5. CURVAS JOMINY DE DIVERSOS ACEROS DE DIFERENTE CONTENIDO EN CARBONO Y LOS MISMOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN. MN: 0,50%; NI: 1,75%; MO: 0,25%.	13
FIGURA 6. ENSAYO DE DUREZA TRANSVERSAL REALIZADO SOBRE BARRAS DE DIFERENTE DIÁMETRO TRATADAS TÉRMICAMENTE DE LA MISMA MANERA.	14
FIGURA 7. IZQUIERDA: VARIACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO PARA UN ACERO EUTECTOIDE. DERECHA: EFECTO DE LA DIFERENCIA EN LA DIFERENCIA EN LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN LA SUPERFICIE Y EN EL CENTRO DE UNA BARRA CILÍNDRICA SOBRE LA MICROESTRUCTURA RESULTANTE (ESQUEMÁTICO).	15
FIGURA 8. IZQUIERDA: CURVA DE LAS “S” DE UN ACERO DE GRANO FINO. DERECHA: CURVA DE LAS “S” DE UN ACERO DE GRANO GRUESO DE LA MISMA COMPOSICIÓN QUE EL ANTERIOR.	17
FIGURA 9. DIÁMETRO CRÍTICO IDEAL COMO UNA FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO Y DEL TAMAÑO DE GRANO AUSTENÍTICO PARA ALEACIONES DE HIERRO – CARBONO.	18
FIGURA 10. CURVA DE LAS “S” DE TRES ACEROS DE 0,60% DE CARBONO Y CONTENIDOS VARIABLES DE MANGANESO, Y DE TRES ACEROS DE 0,37%C.	19
FIGURA 11. CURVA DE LAS S PARA UN ACERO SAE 5160.	20
FIGURA 12. ASPECTO DE LA FRACTURA DE DOS BARRAS DE ACERO DE 0,90% DE C, TEMPLADAS A 790°C Y 850°C.	21
FIGURA 13. CURVAS DE DUREZA DEL TEMPLE DE TRES ACEROS DE 0,32% DE CARBONO Y DIFERENTE ALEACIÓN (CURVA U).	22
FIGURA 14. MONTAJE QUE SE EMPLEA PARA DETERMINAR LA PENETRACIÓN DE TEMPLE DE LOS ACEROS.	22
FIGURA 15. FORMA DE OBTENER LAS PROBETAS PARA CONOCER LA RESISTENCIA EN EL INTERIOR DE LOS REDONDOS DE ACERO TEMPLADO.	23
FIGURA 16. ATAQUE CON NITAL 5% DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE DOS BARRAS DE ACERO DE 0,70% DE CARBONO TEMPLADAS [5].	24
FIGURA 17. DUREZAS Y PORCENTAJES DE MARTENSITA MÁXIMOS Y MÍNIMOS QUE SE OBTIENEN EN LA SUPERFICIE, MITAD DEL RADIO Y CENTRO DE REDONDOS DE ACERO DE 10 A	



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

100 MM DE DIÁMETRO TEMPLADOS EN AGUA O ACEITE. CONTENIDOS EN CARBONO VARIABLES DE 0,20% A 0,50%.	25
FIGURA 18. PROFUNDIDADES DE TEMPLE QUE SE OBTIENEN EN DIVERSOS REDONDOS DE UN ACERO DE 0,41% DE C, 0,60% DE CROMO Y 1,20% DE NÍQUEL, TEMPLADOS EN AGUA Y ACEITE.	26
FIGURA 19. GRÁFICO QUE RELACIONA LOS DIÁMETROS CRÍTICOS, LAS SEVERIDADES DE TEMPLE Y LOS DIÁMETROS CRÍTICOS IDEALES DE LOS ACEROS.	28
FIGURA 20. PROMEDIO DE DUREZAS QUE SE OBTIENEN EN LOS ACEROS AL CARBONO DESPUÉS DEL TEMPLE EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO EN CARBONO Y SEGÚN EL PORCENTAJE DE MARTENSITA OBTENIDA.	29
FIGURA 21. GRÁFICO PARA DETERMINAR EL DIÁMETRO CRÍTICO IDEAL DE UN ACERO, CUANDO SE CONOCE EL PUNTO DE LA PROBETA JOMINY EN CUYA ESTRUCTURA HAY 50% DE MARTENSITA.	29
FIGURA 22. RESUMEN DEL MÉTODO DE KIRKCALDY PARA LA PREDICCIÓN (DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CÁLCULO DE LAS VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO Y ECUACIONES PARA EL CÁLCULO).	34
FIGURA 23. ENSAYO JOMINY Y PREDICCIÓN DE LA CURVA DE TEMPLABILIDAD REALIZADOS CON EL MÉTODO DE GROSMANN Y JUST.	36
FIGURA 24. INGRESO DE DATOS.	38
FIGURA 25. PREVISUALIZACIÓN DE DATOS CARGADOS.	38
FIGURA 26. ELECCIÓN DEL PROCESAMIENTO DE DATOS.	38
FIGURA 27. VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS AJUSTADOS.	38
FIGURA 28. ECUACIÓN CON MENOR ERROR EN EL AJUSTE, POSICIÓN N°1 DEL RANKING DE AJUSTE.	39
FIGURA 29. ECUACIÓN CON LA POSICIÓN N°2 DEL RANKING DE AJUSTE.	40
FIGURA 30. ECUACIÓN CON LA POSICIÓN N° 7 DEL RANKING DE AJUSTE.	40
FIGURA 31. ECUACIÓN CON LA POSICIÓN N° 8 DEL RANKING DE AJUSTE.	41
FIGURA 32. ECUACIÓN CON LA POSICIÓN N° 11 DEL RANKING DE AJUSTE.	41
FIGURA 33. ECUACIÓN CON LA POSICIÓN N° 16 DEL RANKING DE AJUSTE.	42
FIGURA 34. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA COLADA 9400.	43
FIGURA 35. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA COLADA 88775.	44
FIGURA 36. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA COLADA 96533.	45
FIGURA 37. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA COLADA 96394.	46
FIGURA 38. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA COLADA 96285.	47
FIGURA 39. VARIACIÓN DE LA FUNCIÓN DE ACUERDO CON LOS PARÁMETROS O FACTORES.	48



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

FIGURA 40. GRÁFICO DUREZA MEDIDA VS DUREZA PREDICHA	52
FIGURA 41. ERRORES DE PREDICCIÓN RESPECTO A LA POSICIÓN JOMINY.	53
FIGURA 42. ERRORES PORCENTUALES DE PREDICCIÓN RESPECTO A LA POSICIÓN JOMINY.	53
FIGURA 43. AJUSTE PARA SAE 5120.	56
FIGURA 44. AJUSTE PARA SAE 5130.	56
FIGURA 45. AJUSTE PARA SAE 5132.	56
FIGURA 46. AJUSTE PARA SAE 5135.	56
FIGURA 47. AJUSTE PARA SAE 5140.	57
FIGURA 48. AJUSTE PARA SAE 5147.	57
FIGURA 49. AJUSTE PARA SAE 5150.	57
FIGURA 50. AJUSTE PARA SAE 5155.	57
FIGURA 51. AJUSTE PARA SAE 51B40.	58
FIGURA 52. PANTALLA DE INICIO.	59
FIGURA 53. CARGA DE COMPOSICIÓN QUÍMICA.	59
FIGURA 54. SELECCIÓN DE LA BANDA DE TEMPLABILIDAD.	60
FIGURA 55. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PREDICCIÓN.	60
FIGURA 56. INSERCIÓN DEL GRÁFICO.	61
FIGURA 57. CARGA DE DATOS DE ENSAYOS JOMINY.	62
FIGURA 58. GENERACIÓN DEL INFORME.	62
FIGURA 59. EJEMPLO DE INFORME.	63



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

1. Alcance

Este trabajo está orientado a determinar una ecuación precisa que relacione la composición química del acero SAE 5160 con la curva de templabilidad, a partir de datos de composiciones químicas y ensayos Jominy realizados a 50 coladas diferentes de este acero.

2. Objetivos

Se planteó como objetivo principal obtener una ecuación de predicción de templabilidad que relacione la composición química y la dureza, con una precisión de 1 o 2 unidades Rockwell en la predicción. Lo que nos dará como resultado la creación de un método sistemático que permitirá obtener ecuaciones particulares de predicción, para cada uno de los aceros.

Dentro de los objetivos secundarios, se plantearon: la creación de una calculadora para predecir las curvas de templabilidad (programando macros en Excel que contengan los métodos de predicción más usados y los determinados en este trabajo) y lograr extrapolar la ecuación obtenida para el acero 5160 y a toda la familia 5100 de aceros SAE.

3. Justificación del trabajo

Se ha detectado por información obtenida en industrias locales de la ciudad de Córdoba del rubro metalmecánico, que cuando obtienen materias primas semielaboradas de las acerías, los certificados de calidad de los materiales que son emitidos por éstos, no incluyen información acerca de la templabilidad, ya sea por omisión o por falta de realización de ensayos pertinentes. Otras acerías directamente no tienen en cuenta la templabilidad, solo garantizan composición química y propiedades mecánicas.

Llevar a cabo ensayos jominy para corroborar las especificaciones resulta tedioso y poco práctico. Por lo que, como práctica usual se estiman los datos de templabilidad por medios empíricos o por métodos poco precisos.

La idea de tener una ecuación que permita predecir la templabilidad con cierto grado de exactitud es beneficioso por ser un método rápido, que evita realizar los ensayos ahorrando tiempo y dinero. También se podría usar en control de procesos y como método para ofrecer un servicio especializado, y así vender el acero con una determinada templabilidad a pedido del comprador.

4. Introducción

El acero es de los más importantes materiales de Ingeniería y construcción, esto se debe a que aproximadamente el 80% de todos los metales producidos corresponden al acero. Obtiene este grado de importancia debido a la combinación de resistencia y facilidad de fabricación y un amplio rango de propiedades asociadas a un bajo costo.



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Aquellos aceros que deben soportar grandes esfuerzos, normalmente se le realizan tratamientos térmicos (superficiales o en su totalidad) para obtener las propiedades deseadas. Entre ellos, el tratamiento por excelencia para aceros de medio y alto porcentaje de Carbono es el temple.

Para conocer la respuesta que tendrá un acero específico al realizarle un tratamiento de temple, es de práctica normal llevar a cabo el ensayo Jominy. Este ensayo conlleva varios pasos: extracción de la muestra, mecanizado inicial de la probeta, puesta a punto del baño, calentamiento en horno y enfriamiento brusco de la probeta, mecanizado posterior y ensayo de dureza. Vemos que se requieren varias etapas y una demanda considerable de tiempo que puede estimarse en 6 horas aproximadamente. Es precisamente por esto por el que el presente trabajo fue impulsado para elaborar una predicción de templabilidad sin llevar a cabo el ensayo jominy reduciendo los costos y agilizando los tiempos.

5. Marco Teórico

5.1. Ensayo Jominy

Este ensayo adoptado por la S.A.E. y la A.I.S.I. permite determinar características de suma importancia, sobre todo en estos momentos, en que se exige mayor precisión en la fijación de los límites entre las que varían las propiedades de los aceros normalizados. Mediante su empleo se puede conocer con mucha aproximación, la dureza máxima y mínima que alcanzará un determinado tipo de acero con tratamientos adecuados, la templabilidad, la influencia de los elementos de aleación según su porcentaje, los posibles resultados con distintos medios refrigerantes, etc.

Jominy, con el estudio y análisis de muchos y variados ensayos, también comprobó la dependencia casi directa de las características mecánicas a la tracción (resistencia, límite de elasticidad, alargamiento y estricción) con la dureza del acero, que como sabemos a su vez depende de su estructura.

El ensayo consiste primeramente en la elección de la forma o lugar de donde se debe extraer la muestra con la que se construirá la probeta, cuyas dimensiones normalizadas se indican en la figura 1.

Predicción de la curva teórica de templeabilidad para un Acero SAE 5160

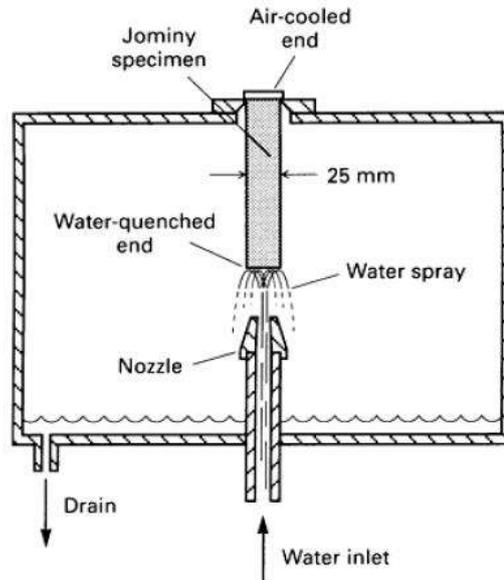


Figura 2. Esquema general de equipamiento utilizado para ensayo Jominy.

El proceso se completa enfriando la probeta al aire o, para acelerarlo, introduciéndola en un recipiente con agua, lo que no afectará en nada el resultado del ensayo.

Finalizado el tratamiento de temple, se rebajan dos generatrices diametrales mediante un rectificado, teniendo cuidado de no sobrecalentar al material (temperatura menor a 100°C) y a una profundidad de 0,45mm por cada lado.

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

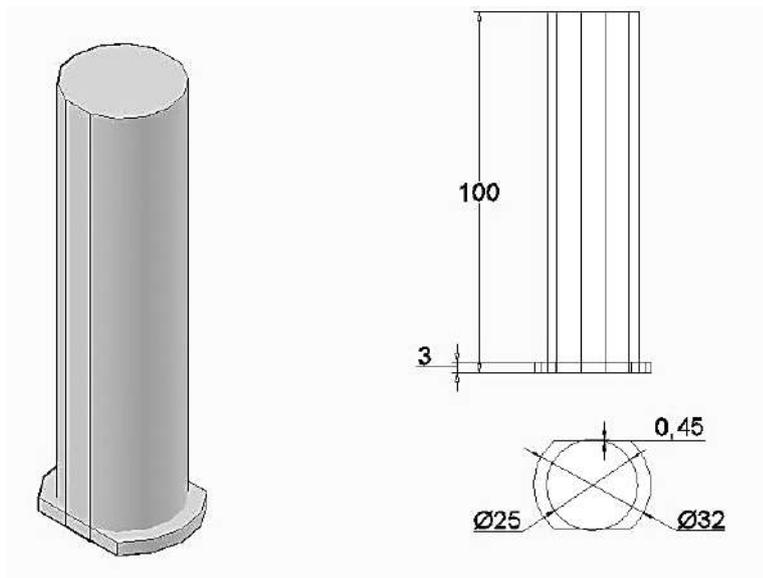


Figura 3. Dimensiones finales de la probeta luego de realizado el ensayo. Resta el procedimiento de tomar los valores de dureza a lo largo de la misma.

Sobre las superficies así obtenidas se determinará en su centro, en forma alineada y a una distancia de 1mm. Entre sí, la dureza Rockwell del material. Con esos valores se construye un gráfico que tendrá por ordenadas las durezas (promedio de las dos superficies a igualdad de distancias) y por abscisas las profundidades o distancias de la cara inferior de la probeta a cada una de las impresiones (ver figura 4).

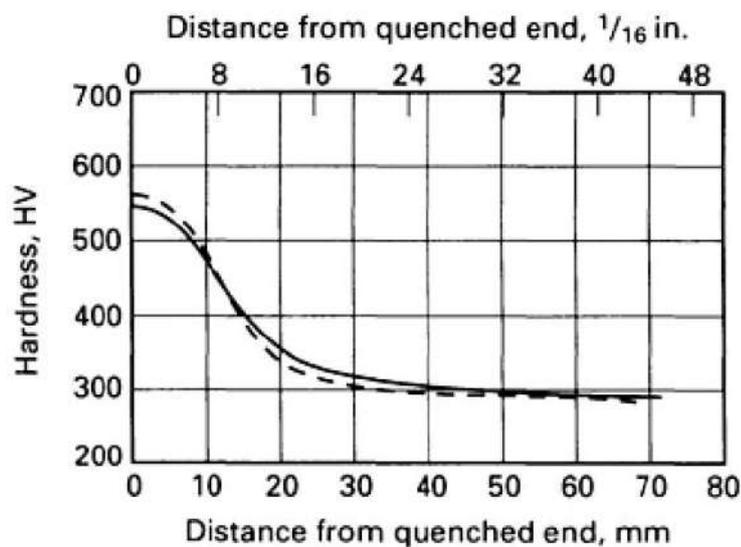


Figura 4. gráfico distancia desde cara templada vs. dureza. A medida que nos alejamos de la cara enfriada rápidamente, la dureza disminuye.



Predicción de la curva teórica de templeabilidad para un Acero SAE 5160

Para los aceros, la clasificación más corriente es la adoptada por la SAE (Society of Automotive Engineers) y AISI (American Iron & Steel Institute), donde los mismos se clasifican según sus elementos aleantes:

Designación		Tipos de Aceros
AISI-SAE	UNS	
10XX	G10XXX	Aceros al Carbono comunes
11XX	G11XXX	Aceros maquinables con alto S
12XX	G12XXX	Aceros maquinables con alto P y S
13XX	G13XXX	Aceros al Manganeso, con 1,75 % Mg
15XX	G15XXX	Aceros al Manganeso, con Mg mayos a 1 %
40XX	G40XXX	Aceros al Molibdeno, con 0,25 % Mo
41XX	G41XXX	Aceros al Cromo-Molibdeno, con 0,4 a 1,1 % Cr y 0,08 a 0,35 Mo
43XX	G43XXX	Aceros al Níquel-Cromo-Molibdeno, con 1,65 a 2% Ni, 0,4 a 0,9 %Cr y 0,2 a 0,3 Mo
46XX	G46XXX	Aceros al Níquel-Molibdeno, con 0,7 a 2% Ni y 0,15 a 0,3 % Mo
47XX	G47XXX	Aceros al Níquel-Cromo-Molibdeno, con 1,05% Ni, 0,45%Cr y 0,2 Mo
48XX	G48XXX	Aceros al Níquel-Molibdeno, con 3,25% Ni y 0,2 a 0,3 % Mo
51XX	G51XXX	Aceros al Cromo, con 0,7 a 1,1 % Cr
E5 1100	G 51986	Aceros al Cromo (horno eléctrico) con 1,0 %Cr
E52100	G 52986	Aceros al Cromo (horno eléctrico) con 1,45 %Cr
61XX	G61XXX	Aceros al Cromo-Vanadio, con 0,6 a 0,95 % Cr y 0,1 o 0,15 %V mínimo
86XX	G86XXX	Aceros al Níquel-Cromo-Molibdeno, con 0,55% Ni, 0,5%Cr y 0,2 Mo
87XX	G87XXX	Aceros al Níquel-Cromo-Molibdeno, con 0,55% Ni, 0,5%Cr y 0,25 Mo
88XX	G88XXX	Aceros al Níquel-Cromo-Molibdeno, con 0,55% Ni, 0,5%Cr y 0,3 a 0,4 Mo
9260	G92XXX	Aceros al Silicio, con 1,8 a 2,2 %Si
50BXX	G50XXX	Aceros al Cromo, con 0,2 a 0,6 % Cr y 0,0005 a 0,003 % B
51B60	G 51601	Aceros al Cromo, con 0,8 % Cr y 0,0005 a 0,003 % B
81B45	G81851	Aceros al Níquel-Cromo-Molibdeno, con 0,3% Ni, 0,45%Cr, 0,12 %Mo y 0,0005 a 0,003 % B
94BXX	G94XXX	Aceros al Níquel-Cromo-Molibdeno, con 0,45% Ni, 0,4%Cr, 0,12 %Mo y 0,0005 a 0,003 % B

Tabla 1. Clasificación general de los aceros.

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

5.2. Curvas Jominy

El estudio de las curvas Jominy facilita mucho el conocimiento de las propiedades de los aceros después del temple (ver figura 5).

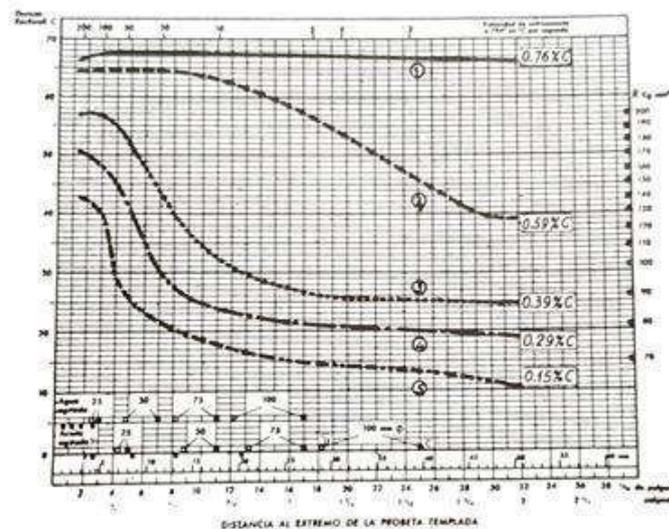


Figura 5. Curvas Jominy de diversos aceros de diferente contenido en Carbono y los mismos elementos de aleación. Mn: 0,50%; Ni: 1,75%; Mo: 0,25%

Las primeras conclusiones que se sacan de estas observaciones son las siguientes:

- La máxima dureza que se consigue en el temple de los aceros es función del contenido en Carbono y es la que se obtiene precisamente en el extremo de la probeta enfriado por el agua. La dureza que se obtiene en el otro extremo corresponde aproximadamente al estado normalizado.
- La presencia de elementos de aleación en los aceros permite obtener después del temple durezas elevadas aun aplicándose bajas velocidades de enfriamiento.
- Pequeñas cantidades de elementos aleados convenientemente seleccionados ejercen una influencia más efectiva en la templabilidad que un gran porcentaje de un solo elemento.

La curva 1 de la figura 5 pertenece a un acero de alta templabilidad, y al 5, en cambio, a un acero al Carbono de muy poca penetración de temple.

5.3. Bandas de Templabilidad

Debido al gran desarrollo adquirido por el ensayo Jominy, la S.A.E y A.I.S.I., han establecido para la mayoría de los aceros aleados de construcción, curvas máximas y mínimas de templabilidad que limitan unas zonas dentro de las cuales deben de estar situadas las curvas Jominy de cada acero.

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

A los aceros que cumplen con una determinada banda de templabilidad, se les ha ampliado la designación A.I.S.I. o S.A.E. normal, añadiéndoles una letra H que señala que el acero se ha fabricado para cumplir una cierta especificación de templabilidad.

5.4. Templabilidad

La templabilidad es la propiedad que determina la profundidad y distribución de la dureza inducida mediante el temple a partir de la condición austenítica.

Un acero aleado de alta templabilidad es aquel que endurece, o forma martensita, no sólo en la superficie sino también en su interior. Por tanto, la templabilidad es una medida de la profundidad a la cual una aleación específica puede endurecerse.

Hasta el momento se han discutido aspectos relativos al comportamiento del acero durante las diversas transformaciones posibles. Tanto los diagramas isotérmicos como los diagramas de enfriamiento continuo dan información valiosa al respecto de este comportamiento. Ellos indican, por ejemplo, que un acero puede ser enfriado más lentamente para obtener martensita cuando tiene elementos de aleación en su composición.

La profundidad a la que se obtiene el 50% de estructura martensítica en una barra de acero es una función de cierto número de variables que incluye la composición y el tamaño de grano austenítico, la severidad del temple y el tamaño de la barra. Consideremos primero el efecto del cambio en el diámetro de la barra de acero. Supóngase que un cierto número de barras del mismo acero han recibido un temple idéntico en una solución de salmuera y entonces se las ha seleccionado como para obtener contornos de dureza. Los resultados se muestran en la figura 6.

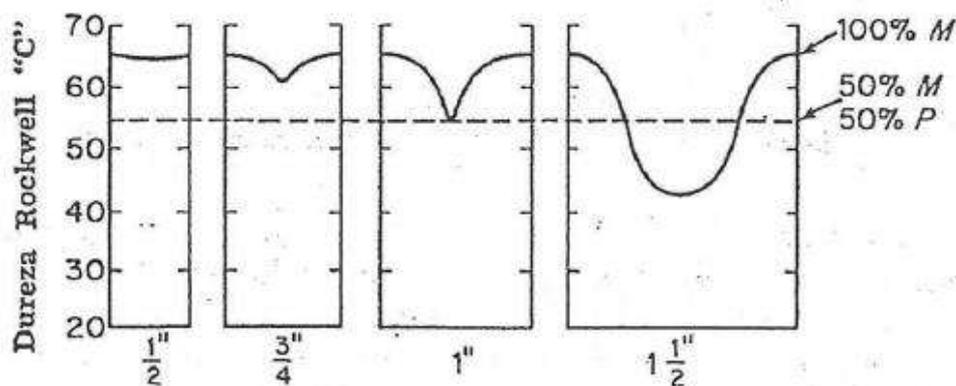


Figura 6. Ensayo de dureza transversal realizado sobre barras de diferente diámetro tratadas térmicamente de la misma manera.

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

En la figura correspondiente, el diámetro que corresponde a una pulgada tiene una estructura de 50% martensita y 50% perlita en su centro. Todas las barras con diámetros más pequeños en realidad son endurecidas en todas partes, mientras que las barras cuyos diámetros son mayores tendrán un núcleo blando conteniendo perlita. Ese diámetro particular se denomina diámetro crítico.

La adición de elementos de aleación apropiados a los aceros puede aumentar mucho su templabilidad y esto se demuestra por aumentos correspondientes en sus diámetros críticos. El diámetro crítico "D" de un acero, en consecuencia, es una medida de su templabilidad (habilidad para endurecer en profundidad), aunque depende también de la velocidad de enfriamiento.

5.5. Variables que Determinan la Templabilidad de un Acero

La templabilidad de un acero, que se expresa por su diámetro ideal (D_I), es una función de su composición química y del tamaño de los granos de austenita que contiene en el instante del temple, como se había mencionado anteriormente.

Un metal de gran templabilidad es uno cuya austenita es capaz de transformarse a martensita sin formación de perlita, aun cuando la velocidad de enfriamiento sea más bien lenta. Recíprocamente, se requieren elevadas velocidades de enfriamiento para formar martensita en los aceros de baja templabilidad. Cualquier variable que mueva las líneas de transformación de la perlita a la derecha en un diagrama de transformación – enfriamiento continuo, tal como el de la figura 7 hace posible obtener una estructura martensítica a una velocidad de enfriamiento más lenta. Un movimiento del saliente de la transformación perlítica hacia la derecha está asociado a un aumento de la templabilidad. Desde otro punto de vista, podemos decir que cualquier cosa que retarde la nucleación y crecimiento de la perlita aumenta la templabilidad de un acero.

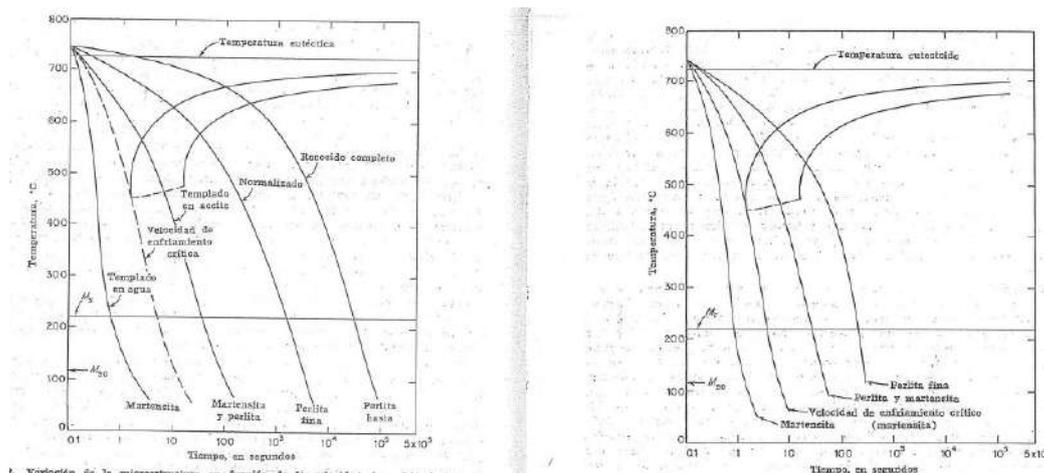


Figura 7. Izquierda: variación de la microestructura en función de la velocidad de enfriamiento para un acero eutectoide. Derecha: efecto de la diferencia en la velocidad de enfriamiento en la superficie y en el centro de una barra cilíndrica sobre la microestructura resultante (esquemático).



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

5.5.1. Tamaño de Grano Austenítico

Cuando se calienta el acero hasta la región austenítica, la estructura de baja temperatura que se transforma a la fase gamma es, en general, un agregado de cementita y ferrita (es decir, perlita). En esta transformación, los granos de austenita se forman por nucleación y crecimiento; los núcleos se forman heterogéneamente en las intercaras cementita-ferrita. Debido a la gran área interfacial disponible para la nucleación, el número de granos de austenita que aparecen es de ordinario grande. La transformación del acero por calentamiento, por tanto, se caracteriza inicialmente por un tamaño de grano austenítico pequeño. Sin embargo, en la zona austenítica, los movimientos térmicos de los átomos son lo suficientemente rápidos para causar el desarrollo de los granos, por lo que tiempos prolongados y temperaturas elevadas en la zona austenítica son capaces de aumentar mucho el tamaño de los granos de austenita iniciales.

El tamaño de los granos de austenita previo al enfriamiento del acero es importante en la determinación de cierto número de propiedades físicas de la estructura final, incluyendo la respuesta del acero al temple.

Fórmula dada por la ASTM para tamaño de grano austenítico:

$$n = 2^{N-1}$$

Donde n es el número de granos por pulgada cuadrada según se ven en una probeta a una amplificación de 100 aumentos, y N es el número ASTM para el tamaño de grano. La zona usual de los tamaños de grano austenítico en los aceros queda entre 1 y 9. El número de granos por pulgada cuadrada en este intervalo se da en la siguiente tabla. Nótese que según se hacen más pequeños los granos (más numerosos), aumenta el número de tamaño de grano.

<i>Número ASTM para tamaños de grano</i>	<i>Número promedio de granos por pulgada cuadrada según se ven a 100 aumentos</i>
1	1
2	2
3	4
4	8
5	16
6	32
7	64
8	128

Tabla 2. Número ASTM para tamaños de grano

El efecto del tamaño de grano sobre la templabilidad ha sido explicado con relación a la manera heterogénea en la cual se nuclea la perlita en los límites de grano austenítico. Mientras que la velocidad de desarrollo G de la perlita es independiente del tamaño de grano de la

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

austenita, el número total de núcleos que se forman por segundo varía directamente con la superficie disponible para su formación. Así, en un acero de grano fino, N° 7 ASTM, hay cuatro veces más área de límite de grano que en el acero de grano grueso N°3. Por tanto, la formación de la perlita en el acero de grano más fino es más rápida que en el acero de grano grueso y, en consecuencia, el acero de grano fino tiene una templabilidad más baja.

El uso de un tamaño de grano austenítico grueso para aumentar la templabilidad está acompañado por cambios indeseables en otras propiedades, tales como un aumento en la fragilidad y pérdida de ductilidad. Las grietas de temple, o agrietamiento del acero debido al choque térmico y a las tensiones inherentes a la operación del templado, son también más comunes en probetas de grano grande. El tamaño de grano modifica la situación y forma de la curva de las S, modificándose, por tanto, como es natural, la velocidad crítica de temple. En aceros de la misma composición, las velocidades críticas de temple de los aceros de grano grueso son menores que las velocidades críticas de temple de los aceros de grano fino, como se había mencionado anteriormente.

Como se observa en la figura 8, se pueden ver las curvas de las S de los aceros al Carbono – Vanadio, de la misma composición y tamaño de grano diferente.

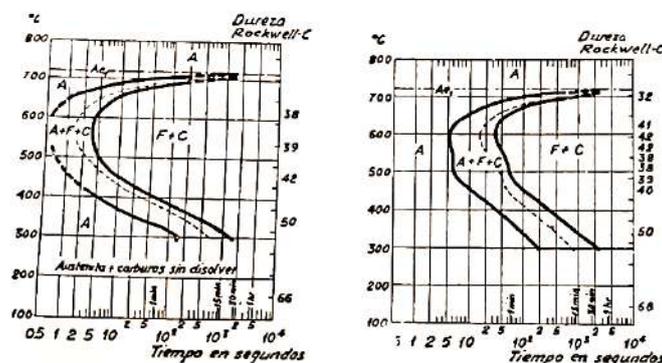


Figura 8. Izquierda: Curva de las "S" de un acero de grano fino. Derecha: curva de las "S" de un acero de grano grueso de la misma composición que el anterior.

5.5.2. Influencia del contenido en Carbono sobre la templabilidad

La templabilidad de un acero es influida fuertemente por su contenido en Carbono. Este hecho se muestra en la figura 9, en donde se grafica la variación del diámetro crítico ideal D_i con el contenido de Carbono para tres tamaños de granos diferentes. Además de mostrar que la templabilidad es mayor con el aumento en el contenido de Carbono, estas curvas demuestran la templabilidad muy baja de los aceros sin alear.

Debido a que el incremento en el contenido de Carbono está asociado con un aumento en la templabilidad, es evidente que la formación de perlita y constituyentes proeutectoides se vuelve más difícil mientras más alto sea el contenido de Carbono del acero. Esta aseveración no

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

es solamente cierta para aceros hipoeutectóides, sino también para aquellos con contenido en Carbono mayor que el de la composición eutectoide, con tal de que cada acero sea transformado completamente a austenita antes de que se mida su templabilidad. En la práctica, sucede con frecuencia que los aceros hipereutectóides son austenizados en la región de dos fases, cementita más austenita. Cuando esto sucede, casi toda la estructura se vuelve austenítica, pero una pequeña cantidad de cementita es estable y no se disuelve. En el enfriamiento, las partículas de Carbono residual favorecen la nucleación perlítica, resultando en una templabilidad más baja.

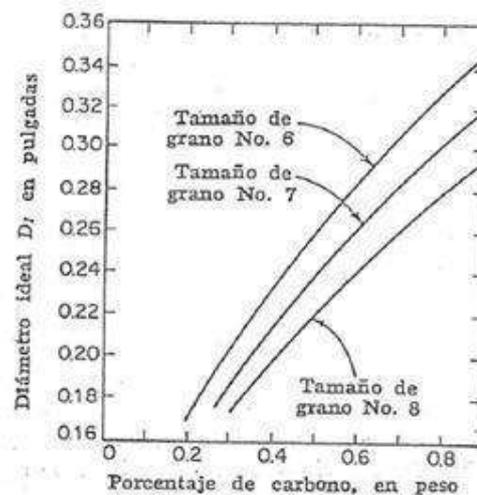


Figura 9. Diámetro crítico ideal como una función del contenido de Carbono y del tamaño de grano austenítico para aleaciones de hierro – Carbono.

5.5.3. Influencia de los elementos de aleación sobre la templabilidad

Conociendo la curva de las “S” de enfriamiento continuo de un acero, se puede determinar su velocidad crítica de temple, ya que es precisamente la correspondiente a la línea de enfriamiento tangente a la nariz de la curva de las “S”. Cuando dicha curva presenta más de un bucle o nariz, la velocidad crítica de temple queda determinada por la curva tangente, de enfriamiento más rápido (figura 10).

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

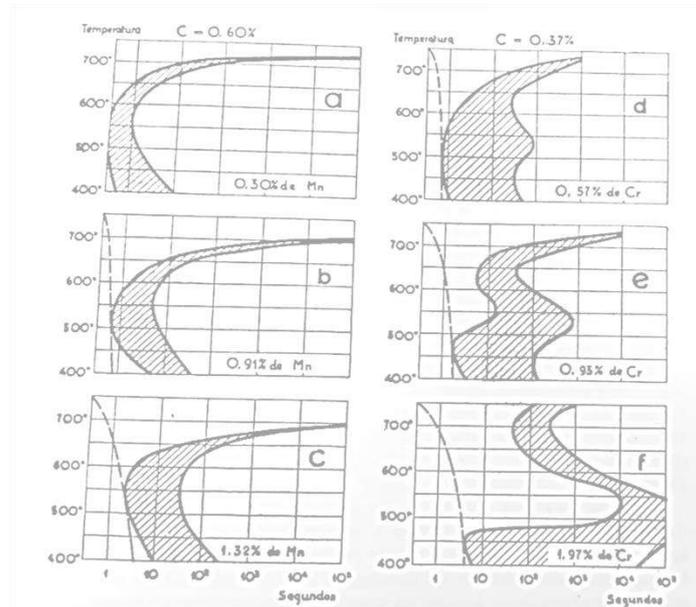


Figura 10. Curva de las "S" de tres aceros de 0,60% de Carbono y contenidos variables de Manganeso, y de tres aceros de 0,37%

Las curvas de las "S" reflejan claramente la influencia que tiene la composición y el porcentaje de elementos de aleación sobre la velocidad crítica de temple. En la figura 10 se observa que las curvas de las "S" se desplazan hacia la derecha al aumentar el porcentaje de Manganeso y Cromo y, por tanto, las velocidades críticas de temple disminuyen al aumentar el contenido de elementos de aleación.

Cada uno de los elementos químicos en un acero influye sobre su templabilidad. El grado, por supuesto, varía con el elemento en cuestión. De los elementos de aleación comunes añadidos al acero, el único que se conoce que baja la templabilidad es el Cobalto. La presencia de Cobalto en el acero aumenta tanto la velocidad de nucleación como la de desarrollo de la perlita, y los aceros que contienen este elemento son más difíciles de endurecer que los que no lo contienen.

Otros elementos de aleación comunes, hasta el extremo de que son solubles en el hierro, aumentan la templabilidad de los aceros. Entre ellos se encuentran Boro, Vanadio entre otros.

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

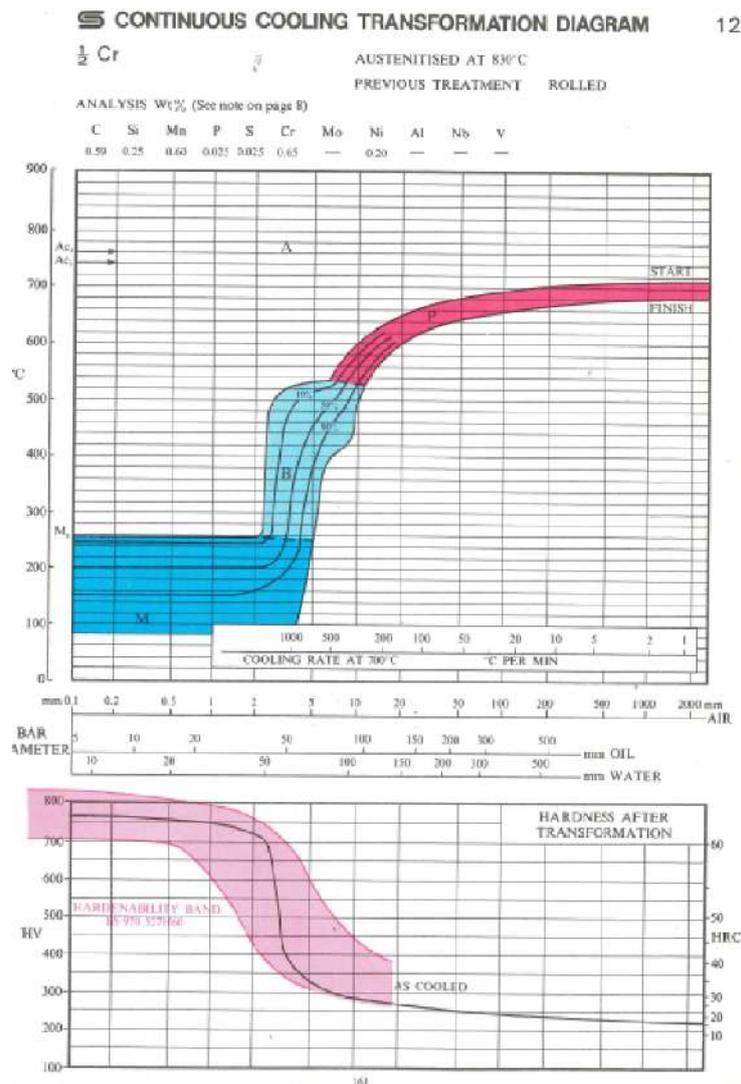


Figura 11. Curva de las "S" para un acero SAE 5160

5.5.4. Influencia del tamaño de las piezas

El volumen y espesor de las piezas tiene gran importancia en el temple de los aceros. Si estudiamos el enfriamiento en agua de un cilindro que ha sido calentado hasta la temperatura de austenización fácilmente se comprende que la capa exterior de acero, que está en contacto con el líquido, es la que se enfría primero y más rápidamente. La capa siguiente no se enfría con tanta rapidez, porque el calor no se transmite directamente al líquido, sino que debe atravesar antes la capa superficial del acero, y esta capa tiene una conductibilidad bastante limitada. Una tercera capa del acero, situada más hacia el centro, se enfría todavía más lentamente, pues cuanto más al interior se encuentra, la transmisión del calor se hace cada vez con más dificultad, ya que tiene que atravesar mayor capa de metal. Fácilmente se comprende, también, que las velocidades de enfriamiento en el interior de los perfiles delgados serán mucho mayores que en

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

los gruesos y que las velocidades en la superficie y en el interior de los redondos de acero de diversos diámetros varían mucho de unos casos a otros.

5.6. Métodos para estudiar el comportamiento de un acero al temple

Como el comportamiento de los aceros en el temple es de gran interés para decidir su utilización, se han desarrollado numerosos procedimientos para ponerlo de manifiesto. Entre ellos:

Examen de las fracturas: uno de los procedimientos más antiguos para determinar la templabilidad es el ensayo de fractura de los aceros templados. Es muy práctico y simple, aunque solo se suele utilizar en los aceros de herramientas al Carbono y al Carbono – Vanadio u otros de baja aleación.

Consiste en preparar una serie de barras cilíndricas, entalladas, de 3/4 pulgada (19,05 mm) de diámetro y 125 mm de longitud, que son templadas en agua a temperaturas de 790 °C, 815 °C, 850 °C y 875 °C después se rompen por choque y se examinan las fracturas.

Por la diferencia entre el grano de fractura, generalmente grosero en la zona central (sin templar), y fino el de la exterior (templado), se conoce fácilmente la profundidad de temple alcanzada en cada caso (figura 12).

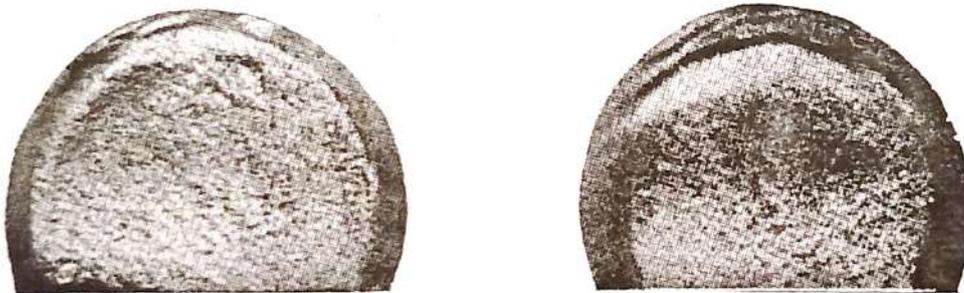


Figura 12. Aspecto de la fractura de dos barras de acero de 0,90% de C, templadas a 790°C y 850°C

Curvas de dureza de redondos de diferentes diámetros templados: Consiste en determinar después del temple la dureza en el interior de redondos de acero. Se comienza preparando por forja o laminación una serie de barras de diversos diámetros, que después de un ligero torneado se dejan medidas escalonadas. Luego se temple esos redondos y a continuación se cortan las barras y se determinan las durezas en la sección transversal, desde la periferia al centro. Con los resultados obtenidos se puede, finalmente, construir las curvas de dureza, llamadas generalmente curvas de las U que caracterizan a cada tipo de acero. Las curvas se grafican como se observa en la figura 13.

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

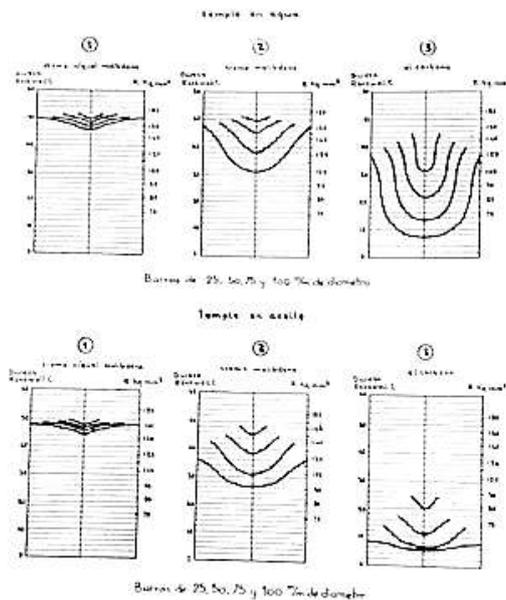


Figura 13. Curvas de dureza del temple de tres aceros de 0,32% de Carbono y diferente aleación (curva U).

Determinación de las curvas de dureza empleando discos de acero: Para determinar la penetración del temple en los aceros es muy cómodo el montaje que se señala en la figura 14.

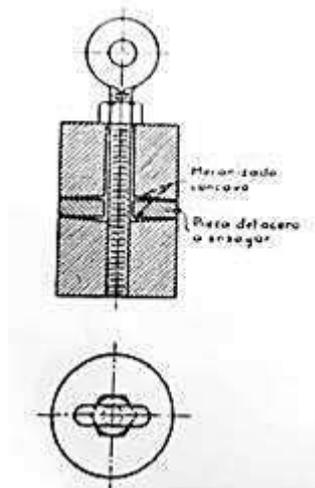


Figura 14. Montaje que se emplea para determinar la penetración de temple de los aceros.

Predicción de la curva teórica de templeabilidad para un Acero SAE 5160

Del acero que se va a ensayar, se cortan discos de 10 mm aproximadamente de espesor, del diámetro que se quiera estudiar, perforados en el centro y con las superficies planas rectificadas, para luego poder medir bien las durezas. Se coloca un disco del acero que se va a ensayar entre dos cilindros del mismo material (también pueden ser de acero al Carbono corriente) y se sujeta todo el conjunto por medio de un tornillo pasante que lo aprisiona fuertemente. De esta forma es templado y luego se sueltan las diferentes piezas y se mide la dureza del disco con gran facilidad

Curva de resistencia: Otro procedimiento que también se puede utilizar para conocer la templeabilidad de los aceros, todavía más costoso que los anteriores, consiste en sacar las probetas de tracción de diferentes zonas del interior de los redondos (figura 15), después de haber sido estos templados previamente.

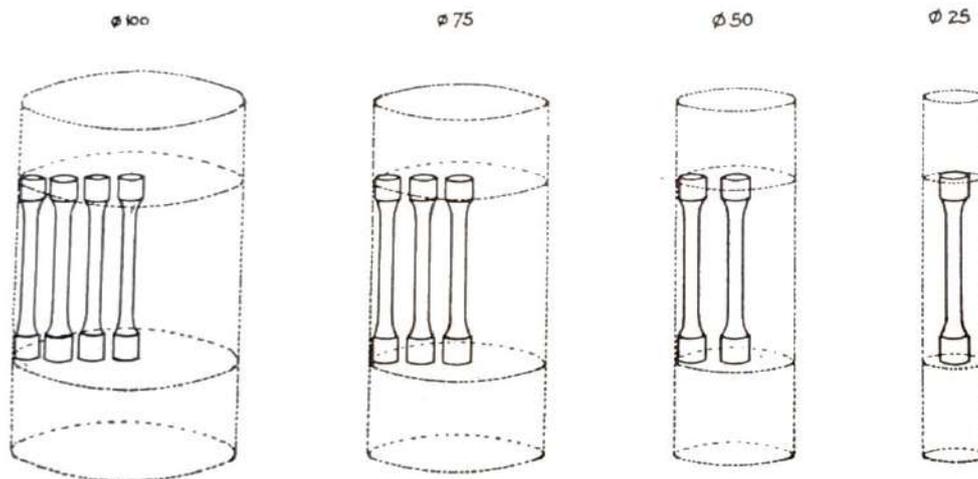


Figura 15. Forma de obtener las probetas para conocer la resistencia en el interior de los redondos de acero templado.

Las resistencias que se obtienen por este procedimiento y las durezas halladas en los otros citados anteriormente, son comparables y en las aplicaciones industriales no aparecen diferencias sensibles utilizando cualquiera de esos métodos. Al efectuar este ensayo, además de tropezar con el inconveniente de que las experiencias son largas y costosas, se presenta también la dificultad de tener que cortar materiales templados de gran dureza, siendo imposible en algunos casos hacerlo con sierras ordinarias, por lo que muchas veces hay necesidad de emplear cuchillas de acero rápido, de metales duros o discos de esmeril.

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Ataque químico de las secciones templadas: Este ensayo también es muy práctico para conocer la profundidad de temple de algunas clases de aceros. Consiste en observar las secciones transversales de barras de aceros, rotas después del temple y atacadas posteriormente con ácido. Se comienza entallando las barras, luego se templan y se rompen, luego por rectificado se genera una superficie plana de las secciones transversales. Las secciones se atacan con Nital 5%, observándose que las partes que han quedado sin templar se oscurecen, y quedan en cambio blancas y son muy poco atacadas las templadas. En la figura 16 se ve el resultado al ensayar dos barras de acero de 0,7% de Carbono; una de 10 mm y otra de 50 mm de diámetro, vemos que a pesar de ser las dos barras que se ensayan de la misma composición, la barra de 10 mm ha quedado blanca después del ataque, es decir, ha templado toda la masa y en cambio la de 50 mm no ha templado más que en la zona externa, apareciendo el núcleo central, cuya estructura es trostítica, sorbitica o perlítica, de color negro.

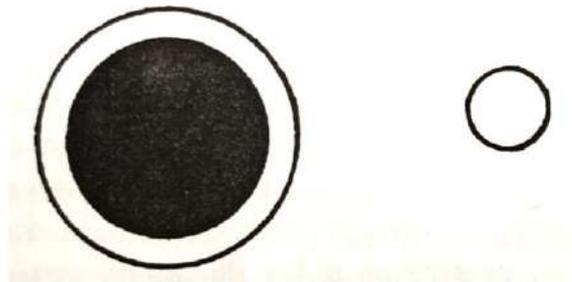


Figura 16. Ataque con Nital 5 de las secciones transversales de dos barras de acero de 0,70% de Carbono templadas [5]

Determinación de la zona con 50% de martensita: Se suelen emplear 4 métodos principales:

- Método metalográfico: más utilizado para determinar con precisión las zonas con 50% de martensita
- Método de fractura y ataque con ácido: que conviene, como hemos explicado, para aceros en los que la transición de la zona blanda a la dura es brusca. En ellos la zona de 50% de martensita se halla en el límite de separación entre la zona de grano fino y grano grueso que corresponde en las secciones atacadas al límite entre la zona blanca y la negra.
- Realizando una serie de durezas en una sección transversal del acero templado y observando luego donde se obtiene una dureza determinada que corresponde al 50% de martensita esa dureza se puede conocer con ayuda de la figura 17, en la que se dan las durezas que tienen los aceros al Carbono cuando su estructura tiene un porcentaje de martensita determinado, que se ha comprobado experimentalmente que es constante y depende exclusivamente del contenido en Carbono.



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

• Otro método para hacer esa determinación consiste en buscar el punto de inflexión de las curvas de dureza de las secciones transversales, que suele corresponder con bastante aproximación precisamente a la zona de 50% de martensita. Con ayuda de los gráficos de la figura 17, se pueden conocer las durezas y los porcentajes de martensita máximos y mínimos que se consiguen en la superficie, mitad del radio y centro de diversos aceros de la serie A.I.S.I. 8600 H templados en agua o aceite.

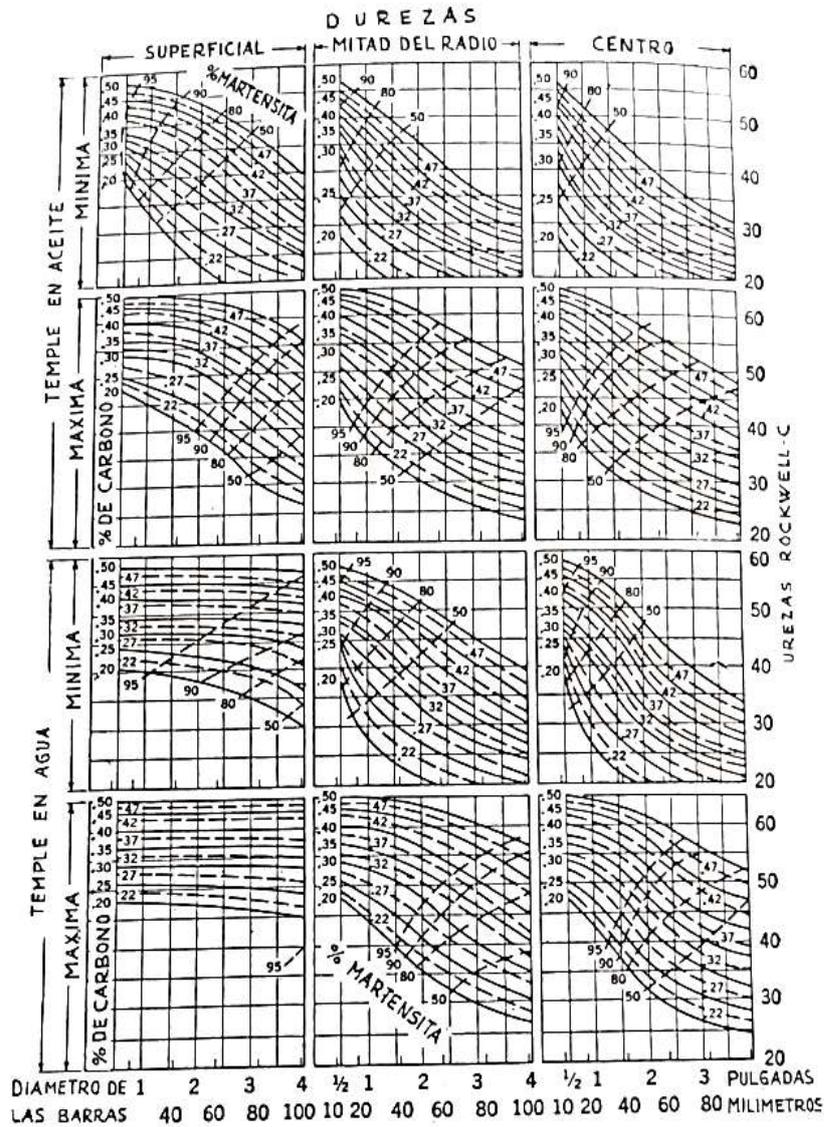


Figura 17. Durezas y porcentajes de martensita máximos y mínimos que se obtienen en la superficie, mitad del radio y centro de redondos de acero de 10 a 100 mm de diámetro templados en agua o aceite. Contenidos en Carbono variables de 0,20% a 0,50%.

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Diámetro crítico ideal: Se denomina diámetro crítico ideal D_i de un acero, al diámetro (expresado en pulgadas) del mayor redondo de ese acero, en cuyo centro se consigue una estructura microscópica con 50% de martensita, después de ser enfriado, desde la temperatura de temple, en un medio de enfriamiento teórico, cuya capacidad de absorción de calor fuese infinita. Empleando este medio teórico de enfriamiento, se conseguiría que la temperatura de la superficie de la barra bajase instantáneamente a la temperatura del medio de temple y se mantuviera así durante todo el proceso de enfriamiento.

El diámetro ideal teórico se puede determinar prácticamente en la forma que a continuación señalamos. Se halla primero para un acero y para un medio de enfriamiento el diámetro crítico D_c , que es el diámetro (expresado en pulgadas) del mayor redondo, en el que después del temple en ese medio de enfriamiento se consigue en el núcleo una estructura con 50% de martensita. Esto quiere decir, que un acero tiene para cada medio de enfriamiento un diámetro crítico fijo.

Si se quiere determinar el diámetro crítico correspondiente a un acero templado en agua, se prepara una serie de redondos de diferentes diámetros que se templan en agua. Luego se cortan transversalmente las barras observándose el efecto del temple en las secciones transversales y se determina la situación de la zona de 50% de martensita empleando uno de los medios explicados anteriormente. Supongamos que se ha empleado el ataque con ácido (ver figura 18)

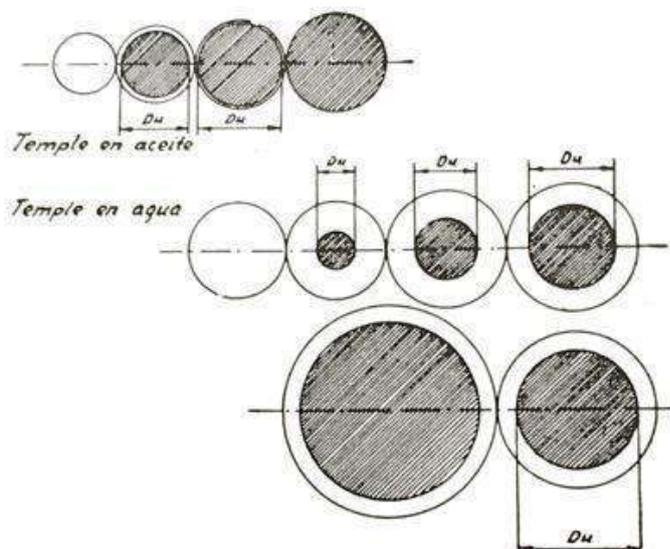


Figura 18. Profundidades de temple que se obtienen en diversos redondos de un acero de 0,41% de C, 0,60% de Cromo y 1,20% de níquel, templados en agua y aceite.



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Luego se construye la curva correspondiente a ese ensayo (temple en agua), tomando en cada caso en abscisas el diámetro D del redondo (en pulgadas) que se ha ensayado, y en ordenadas el diámetro D_u de la zona que ha quedado sin templar (con menos de 50% de martensita).

La intersección de la curva que determina los puntos obtenidos en el ensayo, con el eje de abscisas, señala el valor del diámetro crítico correspondiente al acero que se está ensayando templado en agua. Esa intersección nos señala el diámetro del redondo en el que no ha quedado ninguna parte sin templar, $D_u = 0$.

Para hallar luego el diámetro crítico ideal, se determina previamente el valor numérico de la severidad de temple correspondiente al enfriamiento empleado, que depende del medio y del grado de agitación del líquido (tabla 3). Esa tabla fue preparada por Grossman y sus colaboradores, designando con el nombre de severidad de temple (H) los valores del poder refrigerante de los diferentes medios de enfriamiento.

Finalmente, en la figura 19, también preparado por Grossman, se determina el diámetro crítico que corresponde a una severidad de temple de valor infinito, al que se llama diámetro crítico ideal. (D_i).

Clase de enfriamiento	Aire	Aceite	Agua	Agua Salada
<i>Pieza y medio de enfriamiento tranquilo</i>	0,02	0,3	1	2,2
<i>Pieza movida moderadamente y medio de enfriamiento tranquilo</i>	---	0,4-0,6	1,5-3	---
<i>Pieza agitada fuertemente y medio de enfriamiento tranquilo</i>	---	0,6-0,8	3-6	7,5
<i>Refrigeración muy intensa de la pieza en el agua o empleo de ducha</i>	---	1-1,7	6-12	---

Tabla 3. Severidad de temple (H) de diversos medios de enfriamiento.

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

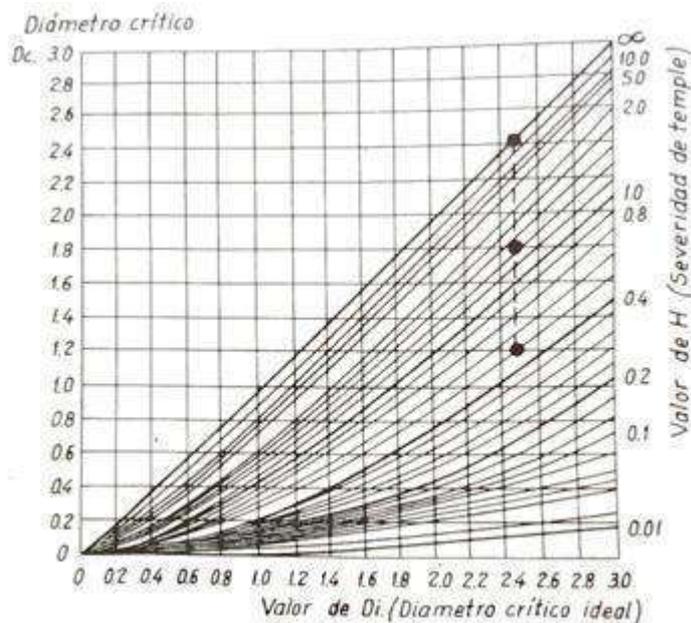


Figura 19. Gráfico que relaciona los diámetros críticos, las severidades de temple y los diámetros críticos ideales de los aceros.

5.7. Determinación del diámetro crítico ideal de un acero por medio del ensayo Jominy

Conociendo la curva Jominy de un acero se puede determinar con ayuda de la figura 21, el diámetro crítico ideal. Para ello basta con hallar la dureza en el acero que se estudia, correspondiente al 50% de martensita, que viene señalada en función del contenido en Carbono de cada acero en la figura 20, y determinar luego en la curva Jominy la distancia a que se ha obtenido esa dureza. Finalmente, con ayuda del gráfico de la citada figura 19, hallaremos el diámetro crítico ideal que corresponde a esa distancia Jominy.

Predicción de la curva teórica de templeabilidad para un Acero SAE 5160

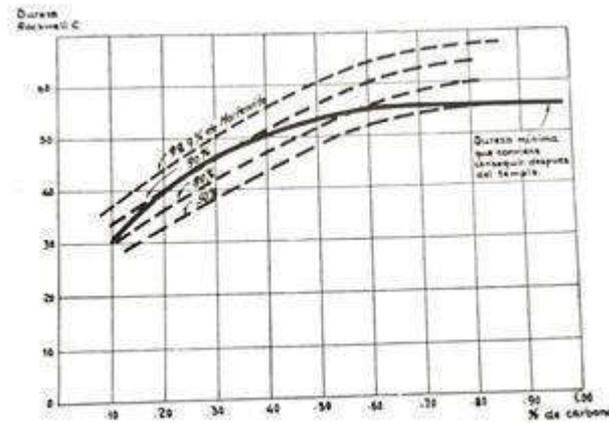


Figura 20. Promedio de durezas que se obtienen en los aceros al Carbono después del temple en función del contenido en Carbono y según el porcentaje de martensita obtenida.

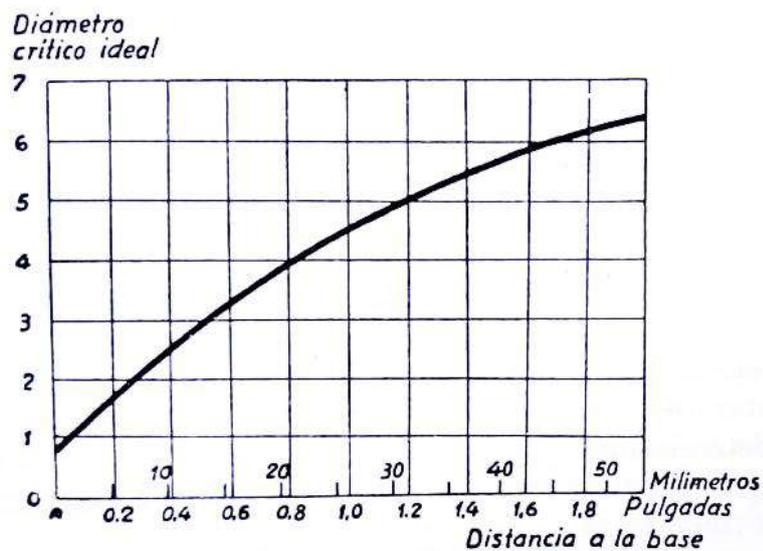


Figura 21. Gráfico para determinar el diámetro crítico ideal de un acero, cuando se conoce el punto de la probeta Jominy en cuya estructura hay 50% de martensita.



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

5.8. Métodos para predecir la Templabilidad

5.8.1. Método de Grossman para la predicción

El método de Grossman para la predicción se basa en el cálculo del DI “diámetro crítico ideal”. La determinación de diámetro se obtiene a partir de la composición química del acero con el cual se determina una serie de factores que al multiplicarlos entre si se obtiene el “DI”. Grossman determinó en su trabajo de investigación de 1940 que la contribución de los elementos de aleación es multiplicativa y no aditiva como se creía. Las siguientes ecuaciones determinan los factores multiplicadores de acuerdo a los elementos de aleación y el porcentaje de estos.

Carbono / tamaño de grano 7	
Hasta 0,39 % incluido	$MF = 0,54 \times (\%C)$
Desde 0,39 % hasta 0,55%	$MF = 0,171 + 0,001 \times (\%C) + 0,265 \times (\%C)^2$
Desde 0,55 % hasta 0,65 %	$MF = 0,115 + 0,268 \times (\%C) - 0,038 \times (\%C)^2$
Desde 0,65 % hasta 0,75 %	$MF = 0,143 + 0,2 \times (\%C)$
Desde 0,75 % hasta 0,90 %	$MF = 0,062 + 0,409 \times (\%C) - 0,135 \times (\%C)^2$
Manganeso	
Hasta 1,2 % incluido	$MF = 3,3333 \times (\%Mg) + 1,00$
Desde 1,2 % hasta 1,95 %	$MF = 5,10 \times (\%Mg) - 1,12$
Silicio hasta 2,00 %	$MF = 1,00 + 0,7 (\%Si)$
Níquel	
Hasta 1,50% incluido	$MF = 1,00 + 0,363 \times (\%Ni)$
Desde 1,50% hasta 3,5 %	$MF = 0,3211 + 1,4501 \times (\%Ni) - 0,6119 \times (\%Ni)^2 + 0,1253 \times (\%Ni)^3$
Cromo hasta 2,50 %	$MF = 1,00 + 2,16 \times (\%Cr)$
Molibdeno hasta 0,55 %	$MF = 1,00 + 3,00 (\%Mo)$
Cobre hasta 0,55 %	$MF = 1,00 + 0,365 (\%Cu)$
Vanadio hasta 0,55 %	$MF = 1,00 + 1,73 \times (\%V)$
Zirconio hasta 0,25 %	$MF = 1,00 + 2,5 (\%Zr)$

Tabla 4. Factores multiplicadores



Predicción de la curva teórica de templeabilidad para un Acero SAE 5160

Ejemplo de aplicación: dado un acero con la composición química indicada en la siguiente tabla, a partir de esta composición se determinan los factores multiplicadores con las ecuaciones antes mencionadas

<i>Elemento</i>	<i>%</i>	<i>Factor Multiplicador</i>
Carbono	0,22	0,119
Manganeso	0,80	3,667
Silicio	0,18	1,126
Níquel	0,10	1,036
Cromo	0,43	1,929
Molibdeno	0,25	1,750
Corbe	0,10	1,040

Tabla 5. Composición química para ejemplificar método de Grossmann

$$DI = 0,119 \times 3,667 \times 1,126 \times 1,036 \times 1,929 \times 1,750 \times 1,040 = \mathbf{1,79 \text{ pulgadas}}$$

Una vez determinado el DI se procede a determinar el valor de dureza inicial y la dureza correspondiente a la zona de 50 % de martensita por medio de las siguientes ecuaciones.

Ecuaciones para Dureza inicial y dureza con 50% de martensita

Dureza inicial	$H = 33,087 + 50,723x + 33,662 x^2 - 2,7048 x^3 - 107,02 x^4 + 43,523x^5$
Dureza 50% martensita	$H = 21,93 + 27,153 x + 226,89 x^2 - 717,17 x^3 + 958,62 x^4 - 491,25 x^5$

H = dureza; x = contenido de Carbono (%)

Tabla 6. Ecuaciones para dureza

Con la ecuación de dureza inicial se obtiene el valor de dureza para la posición Jominy 1 (J1), para obtener los valores de dureza de las posiciones restantes se debe dividir el valor de dureza inicial por un factor divisor para cada posición, el factor divisor se obtiene por las siguientes ecuaciones en las cuales la variable independiente adopta el valor del diámetro crítico ideal obtenido anteriormente.



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Ecuaciones para los factores divisores sin contenido de Boro

Distancia "J" (1/16) [in]	DI	Factor divisor
2	Hasta 2,1 incluido Mayor 2,1	DF = 4,68961 – 11,00832x + 13,83314x ² – 8,80283x ³ + 2,78698x ⁴ – 0,34880x ⁵ DF = 1,00
3	Hasta 3,1 incluido Mayor 3,1	DF = 2,34904 – 0,28254x – 1,42995x ² + 1,16697x ³ – 0,33813 x ⁴ + 0,03403x ⁵ DF = 1,00
4	Hasta 4,1 incluido Mayor 4,1	DF = 5,66795 – 6,14648 x + 3,52874x ² – 1,06026x ³ + 0,16301x ⁴ – 0,01015 x ⁵ DF = 1,00
5	Hasta 4,4 incluido Mayor 4,4	DF = 4,52902 – 2,90739x + 0,986508x ² – 0,163586x ³ + 0,012095x ⁴ – 0,000257202x ⁵ DF = 1,00
6	Hasta 5,0 incluido Mayor 5,0	DF = 4,39436 – 2,16072x + 0,56027x ² – 0,08145x ³ + 0,00840x ⁴ – 0,000530827x ⁵ DF = 1,00
7	Hasta 5,3 incluido Mayor 5,3	DF = 4,15002 – 1,43154x + 0,00235893x ² + 0,112947x ³ – 0,0237546x ⁴ + 0,0150903x ⁵ DF = 1,00
8	Hasta 5,6 incluido Mayor 5,6	DF = 4,44473 – 1,79085x + 0,24617x ² + 0,03378x ³ – 0,01189x ⁴ + 0,000841843x ⁵ DF = 1,00
9	Hasta 5,8 incluido Mayor 5,8	DF = 4,95421 – 2,43521x + 0,62983x ² – 0,07914x ³ + 0,00399154x ⁴ – 0,0000120363x ⁵ DF = 1,00
10	Hasta 6,1 incluido Mayor 6,1	DF = 5,31610 – 2,80977x + 0,84183x ² – 0,141781x ³ + 0,0130138x ⁴ – 0,000512388x ⁵ DF = 1,00
12	Hasta 6,6 incluido Mayor 6,6	DF = 5,63649 – 2,89264x + 0,90309x ² – 0,17297x ³ + 0,01881x ⁴ – 0,00086593x ⁵ DF = 1,00
14		DF = 5,863649 – 2,99646x + 0,94088x ² – 0,17734x ³ + 0,17734x ⁴ – 0,000790018x ⁵
16		DF = 6,06952 – 3,15198x + 0,99297x ² – 0,18010x ³ + 0,0172029x ⁴ – 0,000664079x ⁵
18		DF = 7,32018 – 4,60605x + 1,68442x ² – 0,338443x ³ + 0,0345114x ⁴ – 0,00138927x ⁵
20		DF = 7,81382 – 5,10022x + 1,921410x ² – 0,394591x ³ + 0,040784 x ⁴ – 0,00165327x ⁵
24		DF = 9,18138 – 6,69048x + 2,75891x ² – 0,611613x ³ + 0,0677165x ⁴ – 0,002930700x ⁵
28		DF = 9,27904 – 6,21461x + 2,33158x ² – 0,46972x ³ + 0,0472654x ⁴ – 0,00186035x ⁵
32		DF = 8,62857 – 5,16125x + 1,81214x ² – 0,35489x ³ + 0,035687x ⁴ – 0,001434x ⁵

Tabla 7. Factores divisores

5.8.2. Método de Erwin Just

Erwin Just proporcionó un sistema integral, en su trabajo publicado en Metal Progres de 1969, para la distribución de la dureza (HRC) en una barra Jominy, quien desarrolló una forma de curva Jominy universal en términos de penetración "E" en dieciseisavos de pulgada y realizó una regresión lineal de los coeficientes para los porcentajes en peso de todos los constituyentes excepto el Carbono. Como consecuencia de las tendencias observadas, al Carbono se le otorga una raíz cuadrada en lugar de una dependencia lineal. El conjunto de datos principales usados para realizar la regresión fue tomando la línea central de las bandas SAE-AISI en las especificaciones de composición química media. La fórmula resultante para las durezas Rockwell C (HRC) en función de la profundidad (4-25 dieciseisavos de pulgada), independientemente del tamaño del grano, es:



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

$$J_{4-25} = 98\sqrt{C} - 0,025E^2\sqrt{C} + 20Cr + 6,4Ni + 19Mn + 34Mo + 28V - 24\sqrt{E} + 2,85E - 7$$

La regresión de 37 aceros obtenidos de la U.S. Steel Atlas, para los cuales se dan los tamaños de grano A de ASTM, produce una fórmula similar:

$$J_{4-40} = 88\sqrt{C} - 0,0135E^2\sqrt{C} + 19Cr + 6,3Ni + 16Mn + 35Mo + 5Si - 0,82A - 20\sqrt{E} + 2,11E - 2$$

Las dos ecuaciones juntas sugieren una fórmula compuesta más general:

$$J_{4-32} = 98\sqrt{C} - 0,025E^2C + 20Cr + 6,4Ni + 19Mn + 34Mo + 28V + 5Si - 24\sqrt{E} + 2,86E - 0,82A - 1$$

La dureza del extremo templado (profundidad 0) viene dada empíricamente por:

$$J_0 = 60\sqrt{C} + 20$$

5.8.3. Método de Kirkaldy

A diferencia del método de Grossman de naturaleza empírica, el método de Kirkaldy describe un procedimiento para el cálculo de la templabilidad a través del uso de datos de la cinética y la termodinámica, este método está dirigido a los aceros eutectoides de baja aleación e involucra el cálculo de las curvas de velocidad de perlita y CCT dependientes de la concentración basadas en las teorías actuales de nucleación y crecimiento. Las combinaciones de curvas de enfriamiento con estos cálculos y el modelo de crecimiento de perlita basado en la saturación de los bordes de granos, ver figura 22.

Este método de predicción consta de los siguientes pasos, los cuales se describen brevemente:

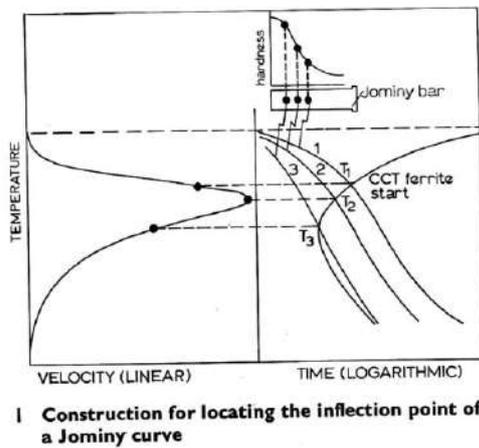
- 1) Calcule las curvas de enfriamiento para un conjunto representativo de posiciones Jominy, utilizando la ecuación de Fourier dependiente del tiempo para la conducción de calor.
- 2) Transformar el eje de tiempo de las curvas de enfriamiento para que el tiempo cero de cada curva corresponda a la temperatura eutectoide de la aleación.
- 3) Calcular el tiempo de incubación (curva de inicio TTT) en función del subenfriamiento.
- 4) Transforme la curva TTT en una curva CCT y superponga el conjunto de curvas de enfriamiento transformadas en el tiempo.
- 5) Calcular la velocidad de la perla en función de la temperatura. Luego, procediendo a lo largo de cada curva de enfriamiento, integre la ecuación de velocidad desde un tiempo cero en la curva CCT y para las colonias esféricas que se originan en cada uno de los sitios nucleados saturados y para el tamaño de grano especificado. Esta



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

integración da la fracción de perlita en función de la temperatura, cantidad que alcanza un valor máximo a bajas temperaturas. La curva crítica de enfriamiento, que es la tangente a la curva CCT debajo de la nariz, define la distancia Jominy en la que la dureza comienza a disminuir.

- 6) Convertir la fracción de perlita a fracción de martensita. Este último se puede convertir empíricamente en dureza si se desea.
- 7) Trazar la fracción de martensita (o dureza) en función de la profundidad para obtener la curva de Jominy.



$$T - T_o = (T_s - T_o) \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{th}t}}$$

Ecuación para la conducción del calor para el cálculo de curvas de enfriamiento

$$v = \xi \cdot D_B \frac{(\Delta T)^3}{\Delta C}$$

Ecuación para el crecimiento de la perlita en sistemas binarios por difusión en bordes de grano

$$\tau = \frac{xT}{D_B(\Delta T)^3}$$

Ecuación para el cálculo de tiempo de incubación de la perlita (inicio curva CCT)

Figura 22. Resumen del método de Kirkaldy para la predicción (diagrama esquemático del cálculo de las velocidades de enfriamiento y ecuaciones para el cálculo)

5.9. Nuevos métodos

En el desarrollo de nuevos métodos para la predicción de la templabilidad no ha habido grandes cambios en la metodología usada para llegar a una ecuación o método de predicción, si ha habido grandes avances tecnológicos en softwares e inteligencia artificial que son aplicados a los métodos antes descritos y que mejoran sustancialmente la predicción. En el análisis de las publicaciones disponibles se pueden distinguir básicamente 3 líneas de trabajo usadas para mejorar la predicción, los cuales se describen brevemente.

Uno de los métodos usados para mejorar la predicción se basa en el método de Kirkaldy en la que por medio de simulación computacional se mejora la determinación de las curvas de velocidad de enfriamiento a lo largo de la probeta Jominy, así también como se simulan la difusión e incubación de la perlita en borde de grano y se determina con mayor exactitud las curvas de enfriamiento continuo (CCT).



Predicción de la curva teórica de templeabilidad para un Acero SAE 5160

Otra línea de trabajo está orientada al uso de inteligencia artificial que, por medio de varios algoritmos de aprendizaje aplicados a una base de datos con una gran cantidad de aceros con información de composición química, ensayos de templeabilidad y curvas CCT, determinan la templeabilidad de diversos aceros.

La última línea de trabajo en la que se basan es en el uso de redes neuronales artificiales las cuales consisten en un conjunto de unidades, llamadas neuronas artificiales conectadas entre sí para transmitirse señales. La información de entrada atraviesa la red neuronal (donde se somete a diversas operaciones) produciendo unos valores de salida. Cada neurona está conectada con otras a través de unos enlaces. En estos enlaces el valor de salida de la neurona anterior es multiplicado por un valor de peso. Estos pesos en los enlaces pueden incrementar o inhibir el estado de activación de las neuronas adyacentes. Del mismo modo, a la salida de la neurona, puede existir una función limitadora o umbral, que modifica el valor resultado o impone un límite que no se debe sobrepasar antes de propagarse a otra neurona. Esta función se conoce como función de activación.

Si bien los métodos nuevos, mejoran los resultados de las predicciones respecto a los métodos originales, estos también padecen del mismo problema subyacente que tienen los métodos originales que es cuando se abarca mayor cantidad o variedad de aceros el error en la predicción aumenta considerablemente y cuando se restringe la variedad de aceros la predicción mejora. Además estos métodos requieren conocimientos especiales en programación de redes neuronales o inteligencia artificial, conocimientos que exceden al campo de acción del ingeniero metalúrgico o requieren el uso de softwares especializados en cálculos por elementos finitos y cuyo uso conlleva costos elevados para su adquisición y licencia de uso.

6. Desarrollo para determinar la ecuación de predicción

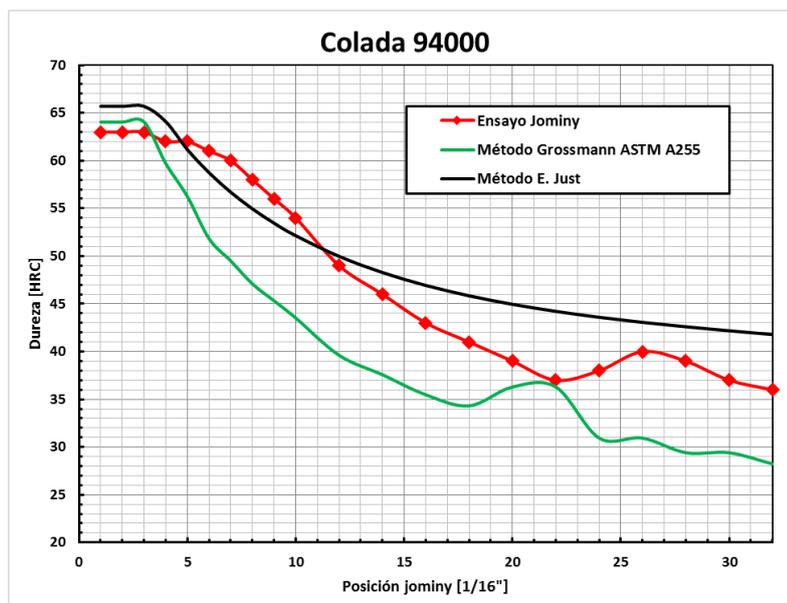
Al aplicar los métodos de predicción de Grossmann y de E. Just a una colada de acero 5160 y comparándolo con su ensayo Jominy podemos observar que hay una gran desviación en las predicciones respecto al ensayo (figura 23), errores del orden de 4 a 8 unidades HRC. Para obtener una predicción más precisa que se aproxime al del resultado del ensayo Jominy podemos optar por dos tipos de soluciones, la primera es la de modificar algunos de los dos métodos existentes para obtener resultados más precisos o la segunda opción es la de generar un nuevo método o ecuación para la predicción.

Después de analizar las opciones antes mencionadas, se optó por la segunda opción, la de crear un nuevo método. Esta elección se basa en las siguientes razones, la primera es que la programación de redes neuronales e inteligencia artificial requiere un nivel de conocimientos correspondientes a un nivel de doctorado y requiere además gran experiencia en el tema. La segunda razón es que al modificar uno de los métodos existentes no hay un aporte sustancial en el aprendizaje ni un enfoque diferente al abordar este desafío, en el estudio previo de las publicaciones se observa que siguiendo esta línea de acción se obtienen resultados similares a los métodos originales con algunas mejoras en la predicción.

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

La creación de una nueva ecuación de predicción conlleva un desafío mayor, ya que requiere un análisis profundo de los datos y establecer guías de acción para llegar al objetivo deseado. Además, la intención del presente trabajo es la de obtener resultados aceptables y reproducibles usando los medios que son de uso común en cualquier industria (Excel) o son de fácil acceso. Es importante remarcar la necesidad de conocer lenguajes de programación, en este caso particular programar macros en Excel, para poder generar una aplicación que permita un uso sencillo para cualquier operario o técnico de laboratorio, para predecir la templabilidad.

Luego de estudiar los métodos de predicción descritos en el punto 5.8 se decidió seguir una línea de trabajo similar a la de Erwin Just y crear una ecuación integral para predecir la curva de templabilidad en función de la posición Jominy y la composición química.



Composición Química					
C	Mn	Si	P	S	Cr
0,58	0,83	0,29	0,02	0,006	0,83

Figura 23. Ensayo jominy y predicción de la curva de templabilidad realizados con el método de Grossmann y Just

6.1. Método de trabajo

Para poder obtener una ecuación de predicción que arroje resultados aceptables es necesario trabajar sobre la base de datos precisos y reales, por esta razón se obtuvieron, gracias a INTI, datos reales de ensayos Jominy con su respectivo análisis químico, de 50 coladas diferentes de aceros SAE 5160. La elección del acero SAE 5160 no se realizó bajo una razón en



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

particular, sino por la disponibilidad de acceso a esta base de datos, se puede seguir el mismo razonamiento lógico que el utilizado en este trabajo para determinar una ecuación de predicción para cualquier tipo de acero

Sobre esta base de datos se extrajo una porción de curvas sobre las cuales se realizó un estudio de regresión numérica para poder determinar una ecuación específica que se ajuste a los datos de ensayos.

Una vez determinada la ecuación pasaremos a una etapa de asociación y asignación de los coeficientes de la ecuación con los elementos de la composición química. Seguido de esto se realizará una corrección de los coeficientes para disminuir el error de predicción.

Una vez ajustada la ecuación se pasará a una prueba de desempeño de ésta, utilizando la ecuación para predecir las curvas de templabilidad de las 50 coladas de nuestra base de datos y calculando el error de la predicción con respecto a la curva del ensayo Jominy de cada una de las coladas. Otra prueba de desempeño es utilizar la ecuación con el resto de la familia 5100 de aceros SAE, usando como datos de composición química, la composición media de cada elemento de la familia y observando si la curva predicha da resultados razonables.

6.2. Análisis de Regresión

Para el estudio de regresión numérica se utilizó el software TableCurve, para el ajuste de los datos experimentales de la base de datos (Dureza vs Posición Jominy).

TableCurve es un software para análisis de datos con más de 3600 ecuaciones integradas con las cuales ajusta curvas lineales y no lineales en forma automática y las clasifica instantáneamente desde la ecuación con el menor error de ajuste hasta la ecuación con el mayor error, lo que permiten encontrar fácilmente el modelo ideal para los datos en segundos.

TableCurve fue desarrollado originalmente por Ron Brown de AISN Software. La primera versión de TableCurve se lanzó en 1989. La primera versión fue un producto DOS. El primer producto basado en Windows se introdujo en el último trimestre de 1992.

El uso del software es bastante intuitivo, solo se importan los datos experimentales a través de un archivo .txt (figura 24), una vez importado el archivo se previsualiza los datos del archivo para verificar que los datos han sido cargados correctamente (figura 25).



Predicción de la curva teórica de templeabilidad para un Acero SAE 5160

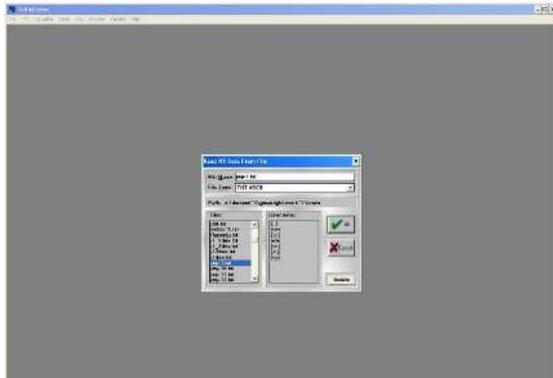


Figura 24. Ingreso de datos

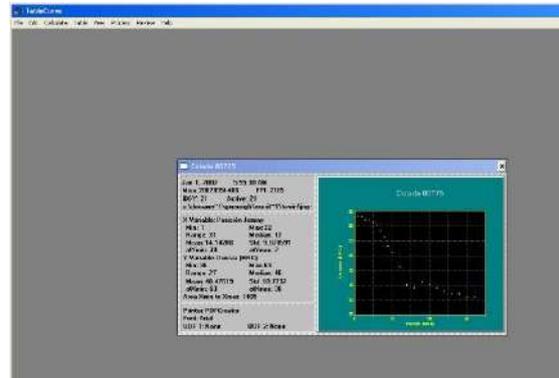


Figura 25. Previsualización de datos cargados

El paso siguiente es procesar los datos, para esto se va a la solapa Process donde se despliega las opciones de ajuste (figura 26), si se desea ajustar con todas las ecuaciones: lineales, logarítmicas, polinómicas o funciones de usuarios. Una vez seleccionado el conjunto de funciones a ser utilizado el software calcula los ajustes para cada ecuación de la librería y las ordena según el error de ajuste, desde la de menor hasta la de mayor error.

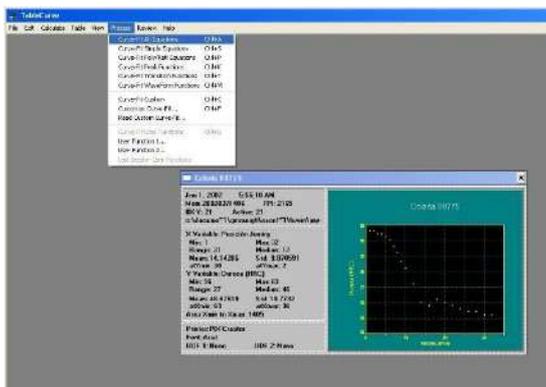


Figura 26. Elección del procesamiento de datos

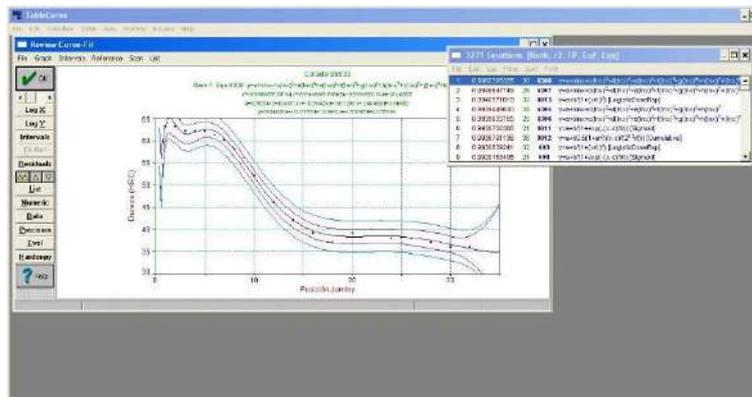
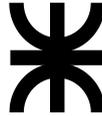


Figura 27. Visualización de los datos ajustados

Luego se despliega la pantalla para la visualización de los resultados donde se van seleccionando las diferentes ecuaciones y en el gráfico muestra los datos experimentales la curva de ajuste y las curvas de los errores de ajuste (figura 27). En esta pantalla también podemos exportar los resultados de cada uno de los ajustes, entregando los valores de ajuste de cada coeficiente, error de ajuste R^2 , desviación estándar, primera y segunda derivada, máximos, mínimos, etc.).

Para determinar la ecuación de predicción del acero SAE 5160, se seleccionaron al azar 5 coladas de la base de datos, el 10 % del total (coladas 94000, 88775,96533, 96394 y 96285) sobre las cuales se realizó el análisis de regresión numérica para ajustar los datos experimentales a una ecuación específica que satisfaga nuestras necesidades.



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

En las figuras 28 a 33 se muestran a modo de ejemplificar algunas de las ecuaciones de ajuste de mayor interés, obtenidas por el software para la colada 94000.

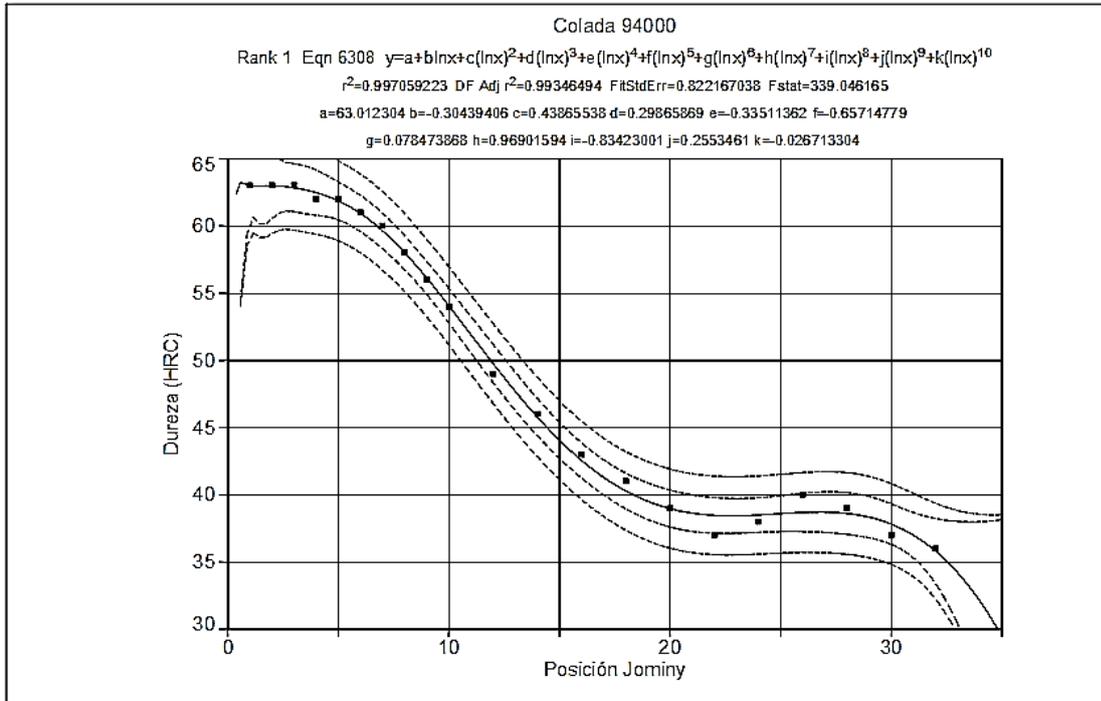


Figura 28. Ecuación con menor error en el ajuste, posición N°1 del ranking de ajuste



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

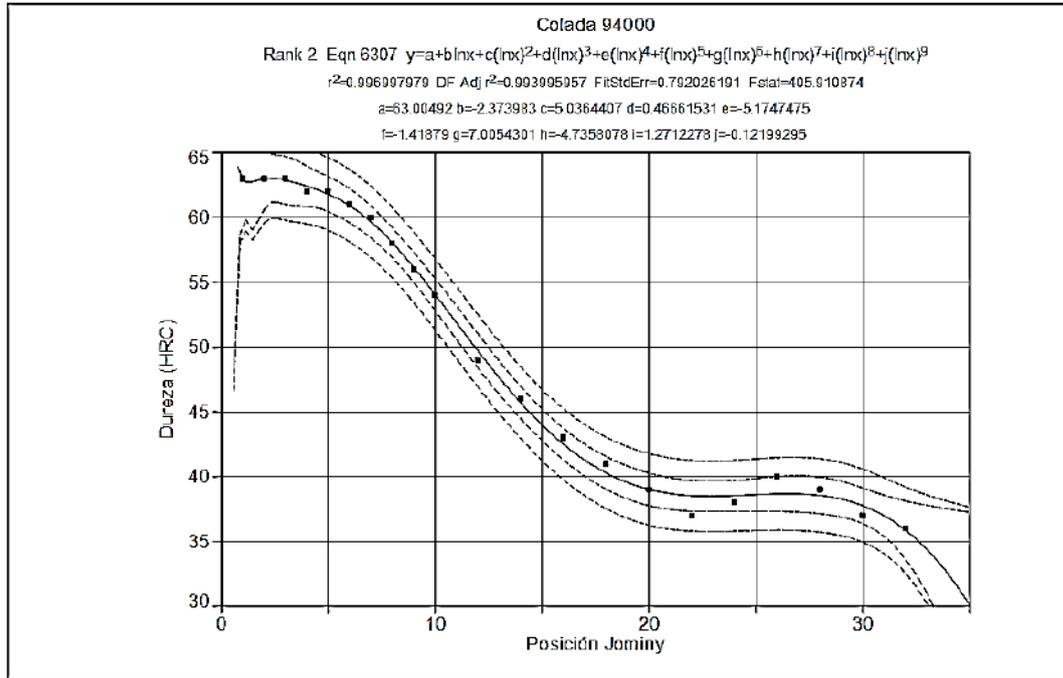


Figura 29. Ecuación con la posición N°2 del ranking de ajuste

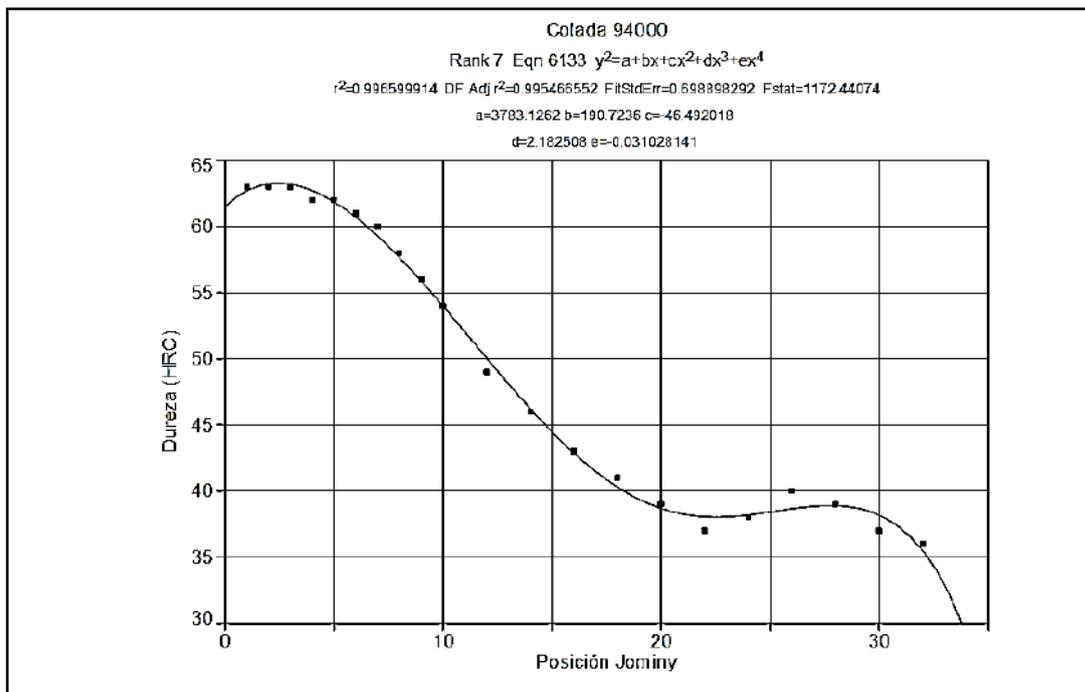
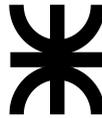


Figura 30. Ecuación con la posición N° 7 del ranking de ajuste



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

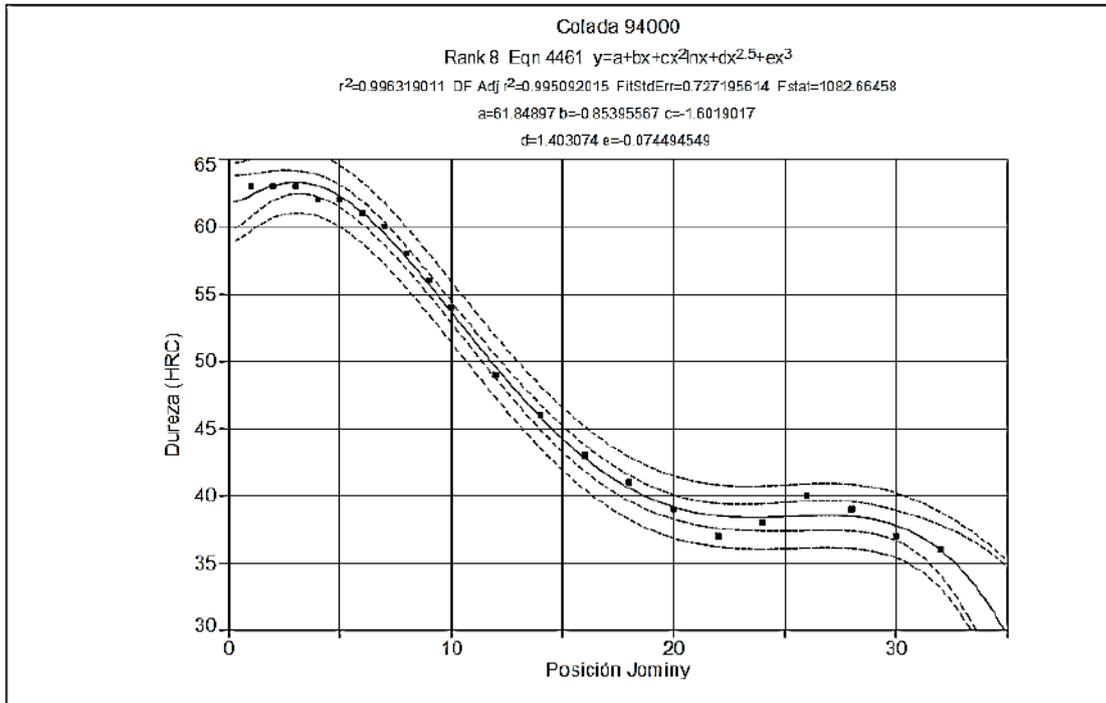


Figura 31. Ecuación con la posición N° 8 del ranking de ajuste

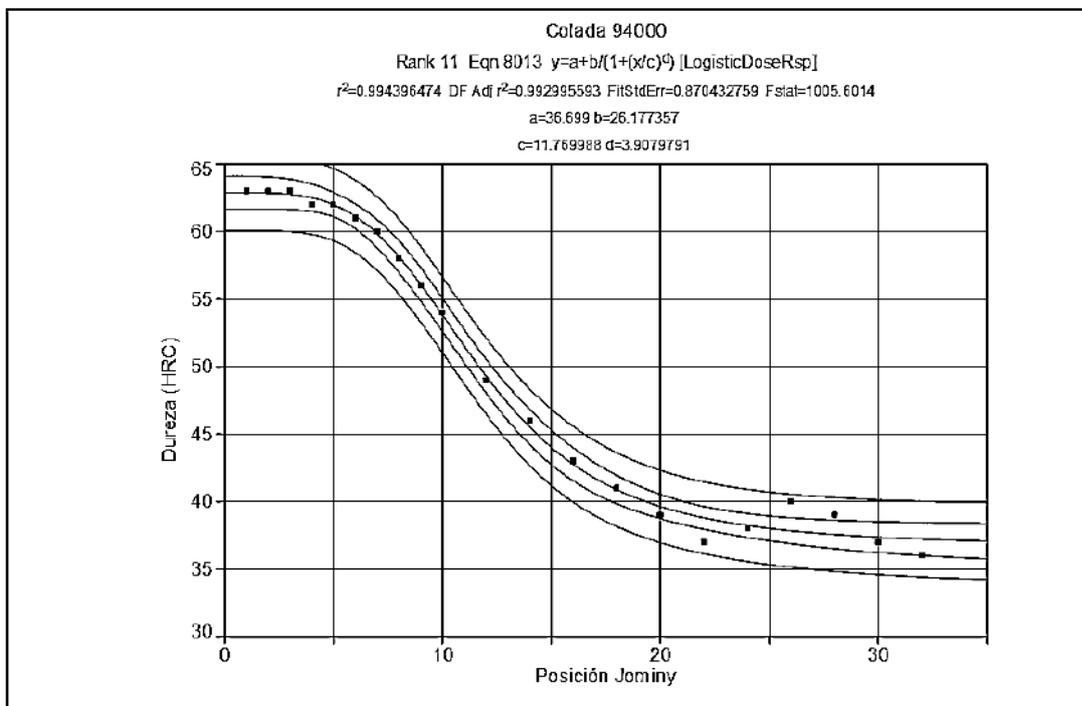


Figura 32. Ecuación con la posición N° 11 del ranking de ajuste (Logistic Dose Response)

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

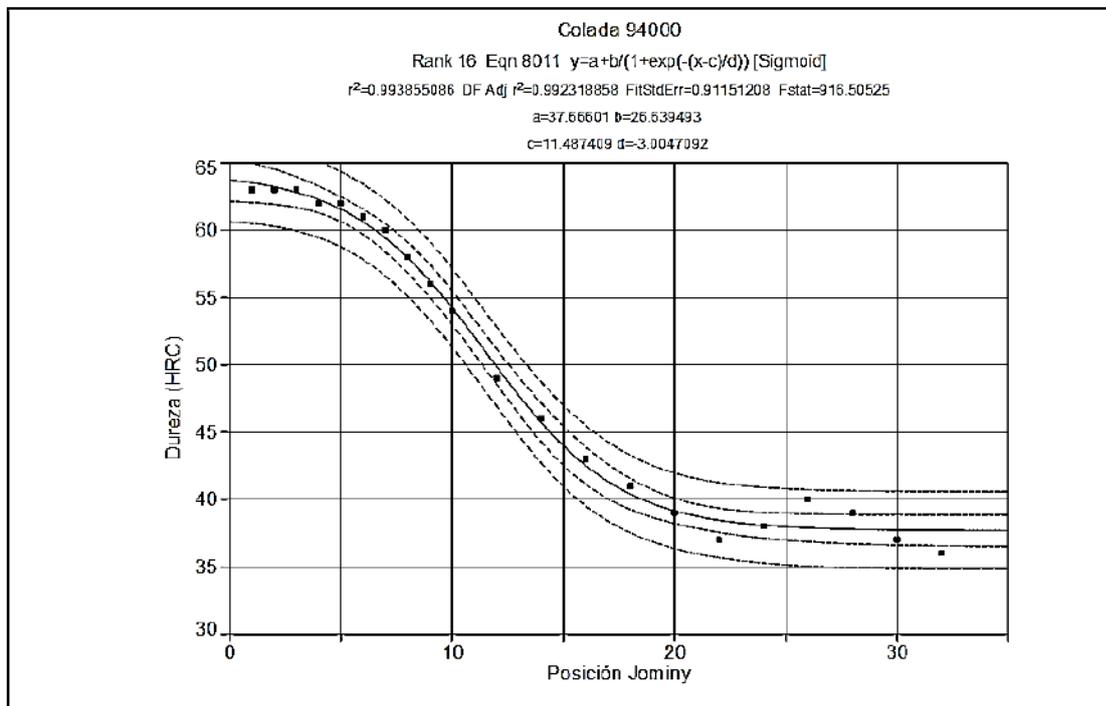


Figura 33. Ecuación con la posición N° 16 del ranking de ajuste (Sigmoid)

Para seleccionar una de las ecuaciones obtenidas se impusieron algunas condiciones para continuar trabajando. Las cuales son las siguientes:

- La ecuación o función seleccionada debe tener un R^2 mayor a 0,98.
- La función debe seguir la forma de los datos utilizados los más parecida posible.
- El error entre la función y los datos experimentales debe ser de menor a 3 HRC.
- La función seleccionada debe tener 4 parámetros para poder asociarlos con los elementos de la aleación (C, Mn, Si, Cr).

De acuerdo con las condiciones impuestas descartamos las cuatro primeras funciones a pesar de que estas tienen los menores errores de ajuste, debido a que tienen entre 5 a 10 coeficientes, por lo que es muy complejo asociar 10 parámetros a los 4 elementos de la composición química.

De las dos funciones restantes, se optó por la función Sigmoid (figura 33) ya que la función Logistic Dose Response (figura 32) es caso particular de la Sigmoid. Otras razones que hace atractiva a esta función es que tiene una característica de forma de "S", forma que está presente en muchos de los procesos metalúrgicos. Además, la ecuación Sigmoid es utilizada para la descripción de varios procesos naturales, como la curva de aprendizaje de sistemas complejos, en procesos físicos, usando para determinar el rendimiento del cultivo de trigo o en el procesamiento de señales de audio, también es usado en la activación de redes neuronales artificiales.



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

A continuación, se incluyen en las figuras 34 a 38 los resultados obtenidos por el software TableCurve para las 5 coladas seleccionadas con el ajuste mediante la función Sigmoid.

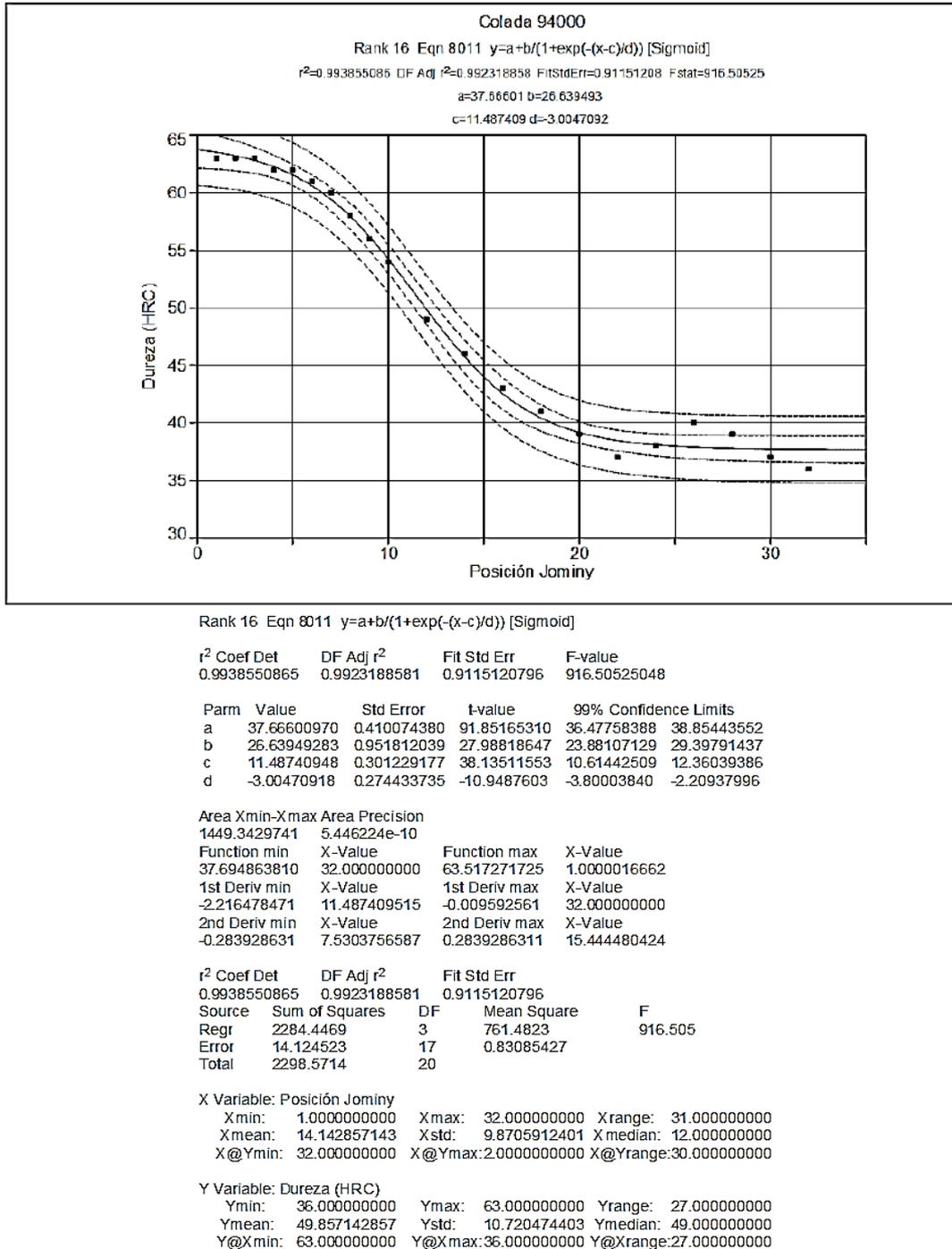
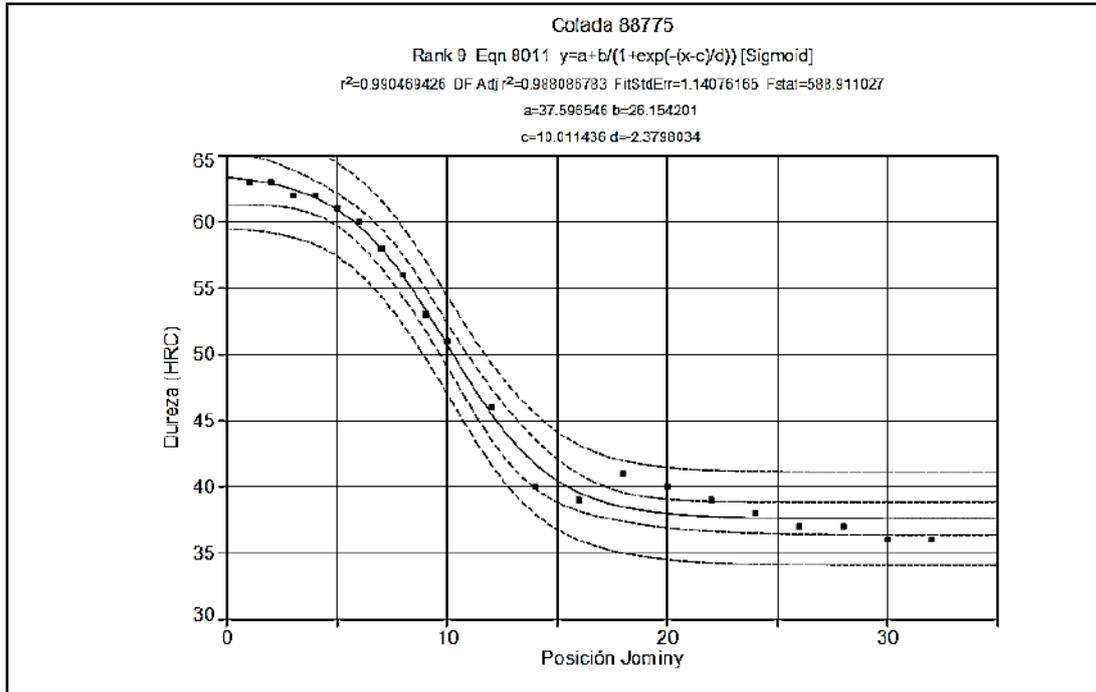


Figura 34. Resultados obtenidos para la colada 9400



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160



Rank 9 Eqn 8011 $y=a+b/(1+\exp(-(x-c)/d))$ [Sigmoid]

r^2 Coef Det	DF Adj r^2	Fit Std Err	F-value
0.9904694261	0.9880867826	1.1407616463	588.91102713

Parm	Value	Std Error	t-value	99% Confidence Limits
a	37.59654635	0.434413228	86.54558363	36.33758475 38.85550795
b	26.15420133	1.062714483	24.61075083	23.07437633 29.23402634
c	10.01143627	0.296118573	33.80887650	9.153262787 10.86960975
d	-2.37980335	0.276966329	-8.59239230	-3.18247222 -1.57713449

Area	Xmin-Xmax	Area Precision	
1402.5691912	7.609776e-11		
Function min	X-Value	Function max	X-Value
37.599085964	32.000000000	63.170928385	1.0000016662
1st Deriv min	X-Value	1st Deriv max	X-Value
-2.747517068	10.011436700	-0.001067049	32.000000000
2nd Deriv min	X-Value	2nd Deriv max	X-Value
-0.444372772	6.8773452772	0.4443727722	13.145517091

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F
Regr	2299.1154	3	766.37179	588.911
Error	22.122731	17	1.3013371	
Total	2321.2381	20		

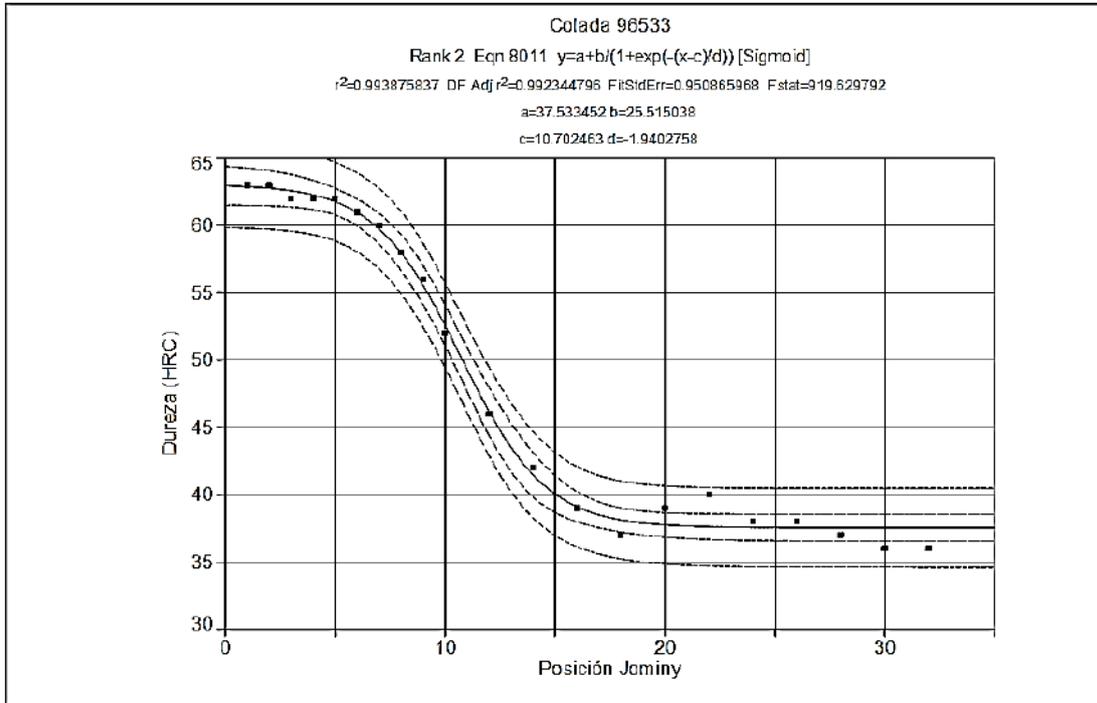
X Variable: Posición Jominy
 Xmin: 1.0000000000 Xmax: 32.000000000 Xrange: 31.000000000
 Xmean: 14.142857143 Xstd: 9.8705912401 Xmedian: 12.000000000
 X@Ymin: 30.000000000 X@Ymax: 2.0000000000 X@Yrange: 28.000000000

Y Variable: Dureza (HRC)
 Ymin: 36.000000000 Ymax: 63.000000000 Yrange: 27.000000000
 Ymean: 48.476190476 Ystd: 10.773203087 Ymedian: 46.000000000
 Y@Xmin: 63.000000000 Y@Xmax: 36.000000000 Y@Xrange: 27.000000000

Figura 35. Resultados obtenidos para la colada 88775



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160



Rank 2 Eqn 8011 $y=a+b/(1+\exp(-(x-c)/d))$ [Sigmoid]

r^2	Coef Det	DF	Adj r^2	Fit Std Err	F-value
0.9938758366	0.9923447958	0.9508659679	919.62979244		

Parm	Value	Std Error	t-value	99% Confidence Limits	
a	37.53345243	0.347025710	108.1575554	36.52774631	38.53915855
b	25.51503802	0.684364042	37.28284431	23.53170052	27.49837553
c	10.70246291	0.206210891	51.90057052	10.10484853	11.30007730
d	-1.94027576	0.182879419	-10.6095906	-2.47027382	-1.41027771

Area Xmin-Xmax Area Precision
 1411.4271555 9.295976e-10

Function min	X-Value	Function max	X-Value
37.533888679	32.000000000	62.877816712	1.0000016662
1st Deriv min	X-Value	1st Deriv max	X-Value
-3.287553050	10.702463942	-0.000224834	32.000000000
2nd Deriv min	X-Value	2nd Deriv max	X-Value
-0.652164906	8.1472257429	0.6504614005	13.400016499

r^2	Coef Det	DF	Adj r^2	Fit Std Err
0.9938758366	0.9923447958	0.9508659679		
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F
Regr	2494.439	3	831.47968	919.63
Error	15.370484	17	0.90414609	
Total	2509.8095	20		

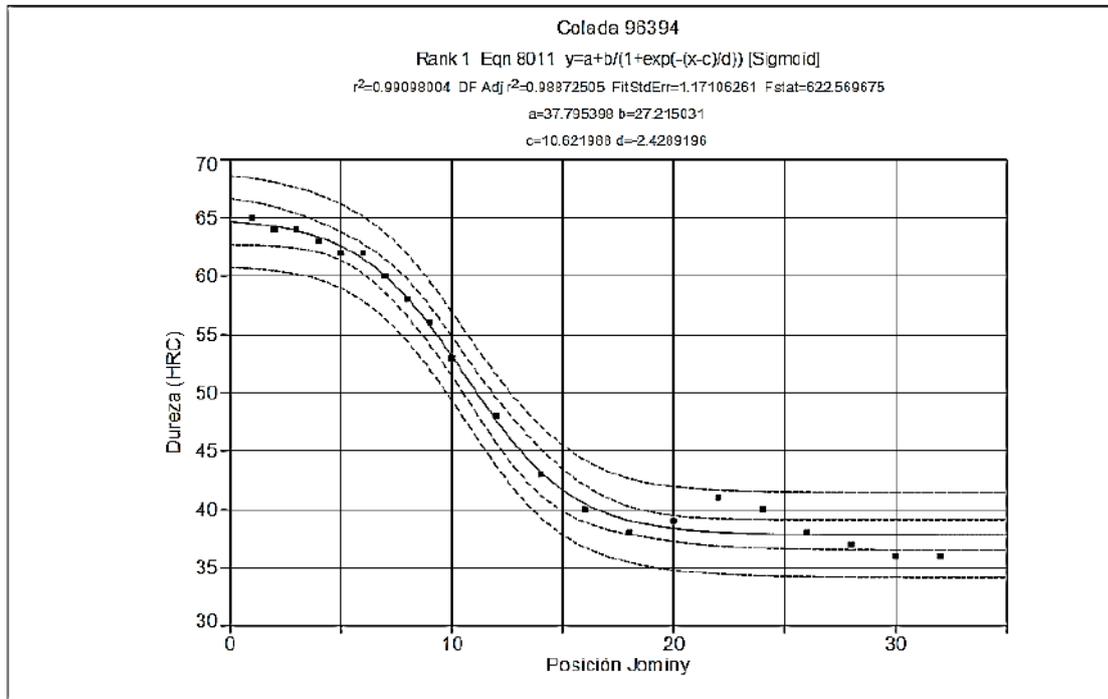
X Variable: Posición Jominy
 Xmin: 1.000000000 Xmax: 32.000000000 Xrange: 31.000000000
 Xmean: 14.142857143 Xstd: 9.8705912401 Xmedian: 12.000000000
 X@Ymin: 30.000000000 X@Ymax: 2.0000000000 X@Yrange:28.000000000

Y Variable: Dureza (HRC)
 Ymin: 36.000000000 Ymax: 63.000000000 Yrange: 27.000000000
 Ymean: 48.904761905 Ystd: 11.202253175 Ymedian: 46.000000000
 Y@Xmin: 63.000000000 Y@Xmax: 36.000000000 Y@Xrange:27.000000000

Figura 36. Resultados obtenidos para la colada 96533



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160



Rank 1 Eqn 8011 $y=a+b/(1+\exp(-(x-c)/d))$ [Sigmoid]

$r^2=0.9909800400$ DF Adj $r^2=0.9887250500$ Fit Std Err=1.1710626124 Fstat=622.56967520

Parm	Value	Std Error	t-value	99% Confidence Limits	
a	37.79539766	0.458607121	82.41345566	36.46632038	39.12447495
b	27.21503114	1.040804042	26.14808362	24.19870421	30.23135807
c	10.62198803	0.296958478	35.76927020	9.761380448	11.48259562
d	-2.42891955	0.271431289	-8.94856139	-3.21554746	-1.64229164

Area Xmin-Xmax Area Precision
 1434.7565900 1.090173e-11

Function min	X-Value	Function max	X-Value
37.799493313	32.000000000	64.502042723	1.0000016662
1st Deriv min	X-Value	1st Deriv max	X-Value
-2.801145793	10.621988604	-0.001685948	32.000000000
2nd Deriv min	X-Value	2nd Deriv max	X-Value
-0.443885234	7.4232317146	0.4438852327	13.820669095

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F
Regr	2561.3531	3	853.78436	622.57
Error	23.31359	17	1.3713876	
Total	2584.6667	20		

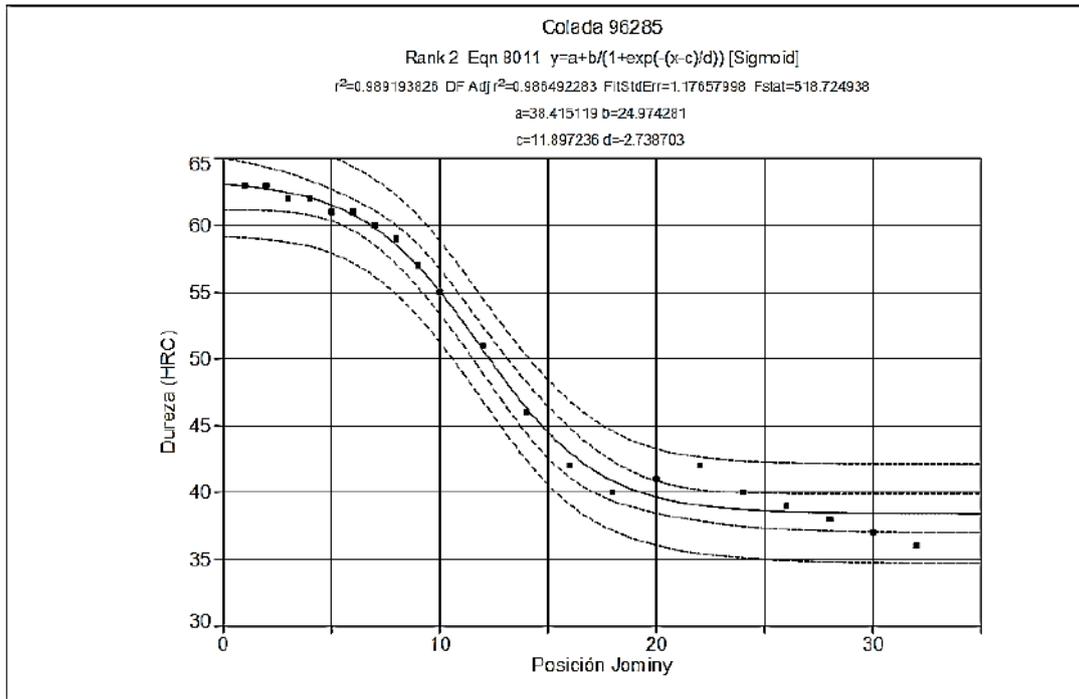
X Variable: Posición Jominy
 Xmin: 1.000000000 Xmax: 32.000000000 Xrange: 31.000000000
 Xmean: 14.142857143 Xstd: 9.8705912401 Xmedian: 12.000000000
 X@Ymin: 32.000000000 X@Ymax: 1.0000000000 X@Yrange:31.000000000

Y Variable: Dureza (HRC)
 Ymin: 36.000000000 Ymax: 65.000000000 Yrange: 29.000000000
 Ymean: 49.666666667 Ystd: 11.368083978 Ymedian: 48.000000000
 Y@Xmin: 65.000000000 Y@Xmax: 36.000000000 Y@Xrange:29.000000000

Figura 37. Resultados obtenidos para la colada 96394



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160



Rank 2 Eqn 8011 $y=a+b/(1+\exp(-(x-c)/d))$ [Sigmoid]

r^2 Coef Det DF Adj r^2 Fit Std Err F-value
 0.9891938265 0.9864922831 1.1765799787 518.72493792

Parm	Value	Std Error	t-value	99% Confidence Limits	
a	38.41511854	0.510273088	75.28345006	36.93630947	39.89392761
b	24.97428135	1.063522772	23.48260141	21.89211386	28.05644884
c	11.89723613	0.368997524	32.24204866	10.82785408	12.96661819
d	-2.73870296	0.329672777	-8.30733729	-3.69411899	-1.78328692

Area Xmin-Xmax Area Precision
 1464.2424826 6.247611e-09

Function min	X-Value	Function max	X-Value
38.431313549	32.000000000	62.930838844	1.0000016662
1st Deriv min	X-Value	1st Deriv max	X-Value
-2.279754482	11.897233920	-0.005909553	32.000000000
2nd Deriv min	X-Value	2nd Deriv max	X-Value
-0.320399082	8.2903993847	0.3203990811	15.503989245

r^2 Coef Det	DF Adj r^2	Fit Std Err		
0.9891938265	0.9864922831	1.1765799787		
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F
Regr	2154.2757	3	718.09191	518.725
Error	23.533788	17	1.3843404	
Total	2177.8095	20		

X Variable: Posición Jominy
 Xmin: 1.000000000 Xmax: 32.000000000 Xrange: 31.000000000
 Xmean: 14.142857143 Xstd: 9.8705912401 Xmedian: 12.000000000
 X@Ymin: 32.000000000 X@Ymax: 2.0000000000 X@Yrange: 30.000000000

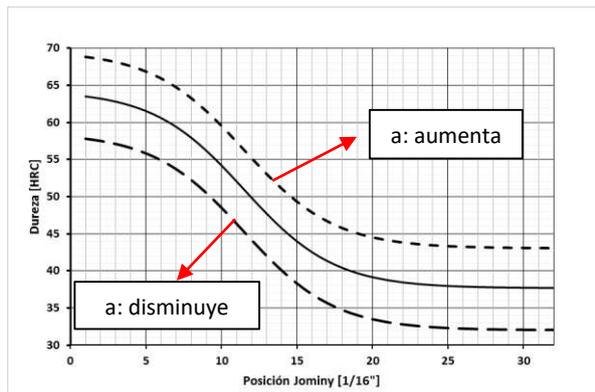
Y Variable: Dureza (HRC)
 Ymin: 36.000000000 Ymax: 63.000000000 Yrange: 27.000000000
 Ymean: 50.238095238 Ystd: 10.435059951 Ymedian: 51.000000000
 Y@Xmin: 63.000000000 Y@Xmax: 36.000000000 Y@Xrange: 27.000000000

Figura 38. Resultados obtenidos para la colada 96285

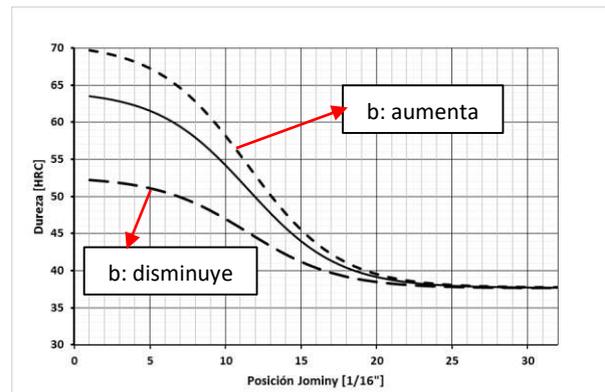
Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

6.3. Asociación de los factores a la composición química

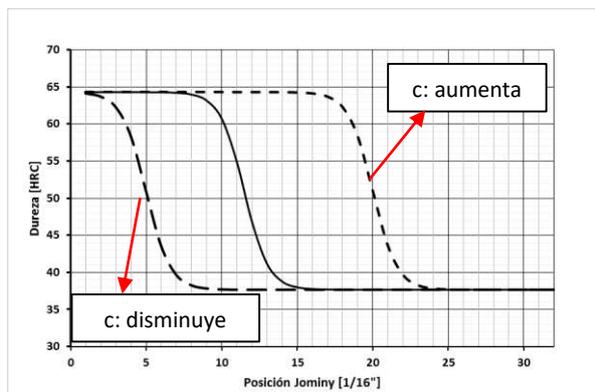
Una vez determinada la función de ajuste, se procedió a determinar de qué forma cada factor de la función modifica la forma de la curva. Para esto se mantuvieron tres factores constantes y se hace variar el cuarto y se registra como varía la función. En figura 39 se resumen esta variación.



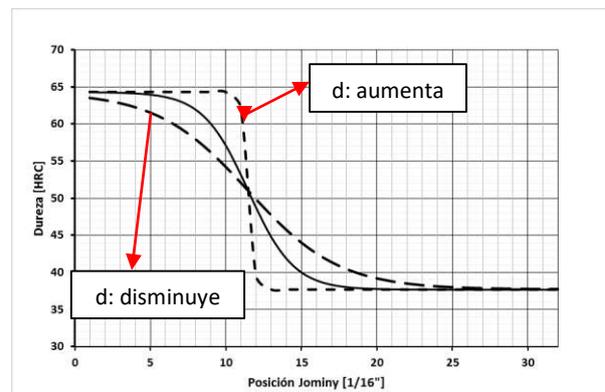
Variación de la función cuando varía el parámetro a



Variación de la función cuando varía el parámetro b



Variación de la función cuando varía el parámetro c



Variación de la función cuando varía el parámetro d

Figura 39. Variación de la función de acuerdo con los parámetros o factores

La asociación de los factores de la función Sigmoid con los elementos químicos se realizó observando y analizando cuidadosamente las 50 curvas de templabilidad con su respectivo análisis químico. La observación consistió en ir detectando y comparando los cambios de las curvas entre sí y analizando la composición observando cómo varían los contenidos de C, Mn, Si y Cr de cada una. En primera instancia se buscaron curvas con niveles de dureza similar o igual y se comparó la composición química de estas para ir detectando cambios en la composición, además poder ir cuantificando errores en la medición de dureza (en los casos de curvas con igual



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

composición y durezas sensiblemente diferentes). No se tienen en cuenta los contenidos de Fósforo y Azufre ya que sus efectos se contrarrestan entre sí.

Del análisis anterior se asoció al Carbono con el factor “a” ya que es el principal elemento de aleación que modifica la dureza durante el tratamiento térmico, esto se puede verificar al observar las curvas de templabilidad de la base de datos, en la cual se puede evidenciar que cuando se producen aumentos o disminuciones del contenido de Carbono hay aumentos o disminuciones de la dureza a lo largo de la toda la curva, así también se verifica que para contenidos de Carbono similar se observa una dureza inicial parecida.

Luego se seleccionaron aquellas coladas que tuvieran el mismo contenido de Carbono y se observó las diferencias en la forma de las curvas Jominy resultantes de los ensayos, para poder determinar qué elementos de la composición química era diferente entre las coladas y así de a poco poder ir asociando los elementos de aleación con los factores de la ecuación Sigmoid.

De las observaciones realizadas podemos inferir que cuando hay un aumento o disminución del contenido Cr se observa un aumento o disminución respectivo de toda la curva, así como ocurre con el Carbono, pero las variaciones observadas no son del tenor de las observadas con el Carbono, alrededor de 1 a 3 unidades Rockwell a lo largo de curva, por lo cual se puede asociar también al Cr con factor “a” de la función.

Respecto al Manganeso se observó que las variaciones de este generan aumento o disminución de la dureza, pero solo en la zona a la izquierda del punto de inflexión de la curva, por esta razón podemos asociar en primera instancia al Mn al factor “b” de la función.

También se pudo observar un efecto doble del Carbono y Silicio en las curvas. Estas variaciones son sutiles y su observación requirió bastante tiempo y un análisis detallado de las curvas. Del análisis se puede inferir que la variación del Carbono junto con la del Silicio producen un efecto de desplazamiento a la derecha o a la izquierda de la zona de inflexión por lo que ambos elementos se los puede asociar al factor “c” de la función.

El segundo efecto que se observó y puede ser atribuido a la variación del Silicio es una acentuación de la zona de inflexión de la función por lo que se lo puede asociar al factor “d” de la función.

En resumen, podemos inferir que el factor “a” de la función va a depender de los contenidos de C y Cr, el factor “b” va a depender del Mn, el factor “c” va a depender del C y del Si y el factor “d” solo va a depender del Si y la variable independiente a la posición Jominy.

Una vez determinados como los elementos de aleación afectan a la curva de templabilidad, debemos modificar los valores numéricos de los factores de la función que obtuvimos en el análisis de regresión para que estos incluyan los porcentajes en peso de cada elemento.

En esta nueva etapa de trabajo utilizamos una sola colada y su ajuste inicial y sólo sobre este ajuste iremos modificando cada uno de los factores y luego para verificar utilizamos la



Predicción de la curva teórica de templeabilidad para un Acero SAE 5160

nueva función con las 49 coladas restantes y analizamos si esta función predice en forma correcta las curvas experimentales, con un nivel de error impuesto de 2 HRC.

La colada que utilizaremos para esta etapa es la colada 94000, cuya curva experimental y resultados de regresión se muestran en la figura 34. La forma de trabajo para determinar los nuevos coeficientes fue de forma empírica de prueba y error, partimos de los factores encontrados en el ajuste con la función Sigmoid.

Factor	Valor calculado en el ajuste
a:.....	37,66609
b:.....	26,63949
c:.....	11,48740
d:.....	-3,40071

Para modificar los factores anteriores suponemos:

$$\begin{aligned}a' * C + a'' * Cr &\approx 37,66609 \\ b' * Mn &\approx 26,63949 \\ c' * (C + Si) &\approx 11,48740 \\ d' * Si &\approx -3,40071\end{aligned}$$

En primera instancia se fueron despejando los valores de d' , c' y b' de las ecuaciones y luego se fueron variando los valores de a' y a'' en la función hasta poder aproximar ecuación a los datos experimentales de la colada 94000 con un error de 1 a 2 unidades Rockwell. Luego de obtener esta primera función, se aplicó la ecuación obtenida a la colada 88775 y se observó que esta no se ajusta muy bien a los valores experimentales, por lo que se modificaron nuevamente los parámetros a' , a'' , b' , c' y d' buscando soluciones de compromiso hasta que los factores se aproximen a los valores experimentales de la colada 88775 con un nivel de error mayor al impuesto. Los nuevos valores obtenidos de los factores fueron usados otra vez en la colada 94000 y fueron ajustados nuevamente, siempre buscando soluciones de compromiso y aumentando el nivel de error para que la ecuación de predicción pueda ajustarse a cualquier composición química y de resultados aceptables. Este proceso de prueba y error se repitió varias veces hasta tener variaciones con los resultados experimentales de 3 a 4 unidades Rockwell, en las dos coladas.

La función final obtenida se muestra a continuación y en el anexo 1 se muestran los gráficos de las 50 coladas aplicando la función final obtenida, los datos de la composición química y los datos experimentales de los ensayos Jominy de cada uno. En el anexo 2 se resumen los errores encontrados con los datos experimentales y la función obtenida.



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

$$H = \left(54,1 \left(C + \frac{Cr}{8} \right) \right) + \frac{32,05Mn}{\left(1 + e^{\frac{-(J - (13,26(C+Si)))}{(-10,34Si)}} \right)}$$

Donde:

H: dureza

C: % Carbono

Cr: % Cromo

Mn: % Manganeso

Si: % Silicio

J: Posición Jominy

6.4. Prueba de desempeño de la ecuación de predicción

Una vez determinada y ajustada la ecuación de predicción procedemos a realizar una prueba de desempeño de la ecuación obtenida prediciendo las curvas teóricas de templabilidad y comparándolas con el ensayo Jominy real de todas las coladas de la base de datos.

En el anexo 8.1 se pueden observar cada una de las curvas de templabilidad, la teórica (color verde) y la del ensayo real (color rojo) juntos con las bandas de templabilidad del acero SAE 5160H (color negro).

En el anexo 8.2 se aprecian las tablas con los datos de los ensayos Jominy de cada colada, los valores de dureza obtenida por la ecuación de predicción para cada posición Jominy de 1 a 32, con los cálculos de los errores nominales y porcentuales de cada posición.

En las figuras 40, 41 y 42 se pueden observar en forma resumidas los errores obtenidos en la prueba de desempeño de la ecuación. La figura 40 se grafica todos los valores de durezas obtenidos en la medición real vs la dureza predicha por la ecuación, en el caso que la predicción fuese perfecta esta describiría una recta a 45°, representada por la recta color negra, si tenemos en cuenta los errores producidos por la medición en si más los errores en la predicción, tenemos que considerar una banda de aceptación para los resultados de la predicción, las líneas de color negra punteadas representan un error de $\pm 2\text{HRC}$ (valor de incertidumbre impuesto al inicio del trabajo) y el segundo grupo de líneas negras punteadas representa el error de $\pm 4\text{HRC}$, valor impuesto cuando se realizaban el ajuste de los parámetros de la ecuación.

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

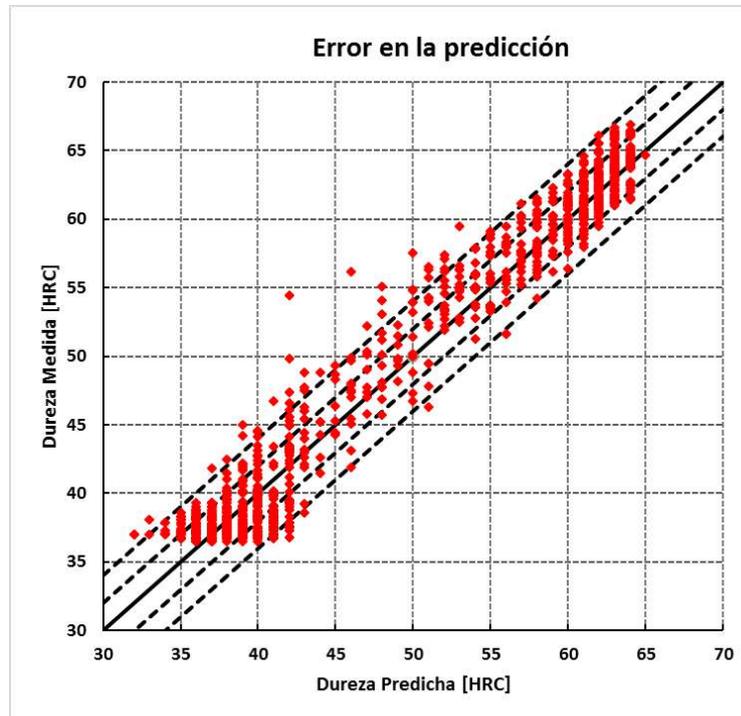


Figura 40. Gráfico dureza Medida vs Dureza Predicha

Analizando el gráfico anterior podemos asegurar que la predicción de la ecuación alcanza una exactitud con ± 2 HRC de un 80 a 90% en dos rangos de durezas de 55 a 65 HRC y de 35 a 40 HRC y alcanza una exactitud en la predicción de 90 a 100% en los mismos rangos de dureza pero con un nivel de exactitud de ± 4 HRC. En el rango medio de 40 a 55 HRC tenemos una exactitud del 60 % en la predicción con ± 2 HRC y de 70 a 80 % de exactitud de predicción con un rango de ± 4 HRC.

En las figuras 41 y 42 se representan los errores nominales y porcentuales de todas las coladas respecto a la posición Jominy.



Predicción de la curva teórica de templeabilidad para un Acero SAE 5160

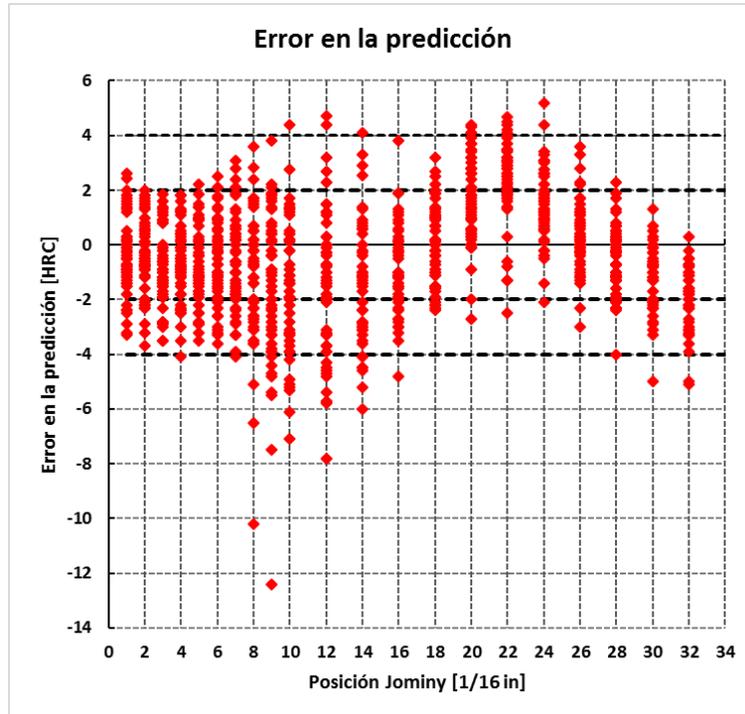


Figura 41. Errores de predicción respecto a la posición Jominy

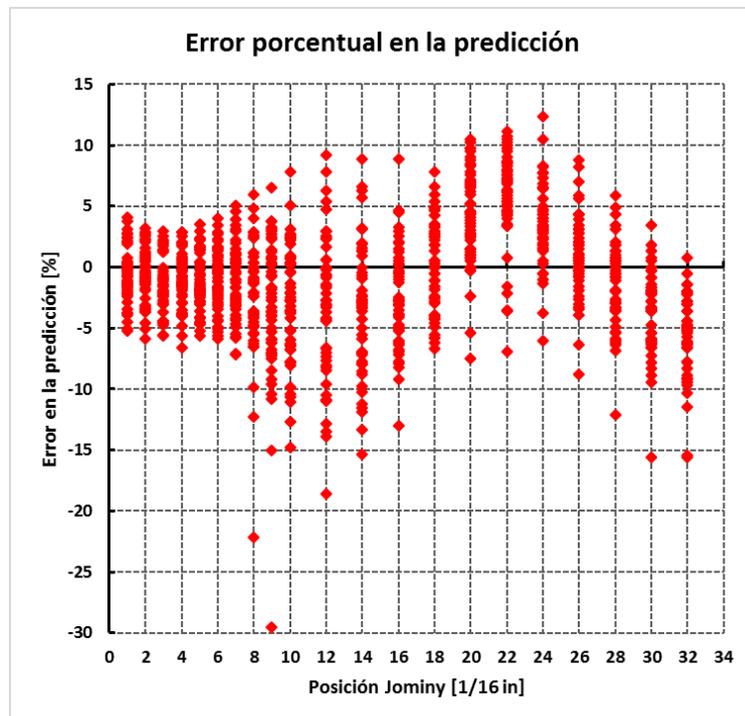


Figura 42. Errores porcentuales de predicción respecto a la posición Jominy



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

La segunda prueba de desempeño propuesta fue usar la ecuación obtenida y predecir la curva de templabilidad del resto de los aceros que componen la familia de aceros 5100. Para esto se utilizó la composición química media de cada acero, en el anexo 8.3 se observan las curvas de predicción obtenidas y en las que se puede observar que la predicción no es exacta, al menos no cae en la zona media de la banda de templabilidad. A medida que el porcentaje de C aumenta en los aceros de la familia se observa que la predicción mejora pero sigue siendo poco exacta.

De lo expuesto anteriormente se deduce que la ecuación encontrada en este trabajo no puede ser utilizada con otros aceros de la familia, al menos que se modifiquen los parámetros de la ecuación. Para obtener parámetros nuevos para cada acero se trabajó de forma similar al del acero SAE 5160, pero en este caso el ajuste con la ecuación Sigmoid se realizó usando los valores de dureza promedio obtenidos de las bandas de templabilidad, superior e inferior, de cada acero. Así se obtuvieron nuevos parámetros, a, b, c, y d, de la función y si asumimos que es correcta la aseveración expuesta en el punto 6.3 en la forma en que la composición química afecta a cada parámetro, entonces podemos encontrar una función específica para cada acero de la familia 5100.

Las ecuaciones encontradas para cada acero de la familia son las siguientes:

$$H(5120) = \left(66,09 \left(C + \frac{Cr}{8} \right) \right) + \frac{54,55Mn}{\left(1 + e^{\frac{-(J-(3,22(C+Si)))}{(-8,74Si)}} \right)}$$

$$H(5130) = \left(47,03 \left(C + \frac{Cr}{8} \right) \right) + \frac{214,25Mn}{\left(1 + e^{\frac{-(J-(-18,42(C+Si)))}{(-31,53Si)}} \right)}$$

$$H(5132) = \left(52,72 \left(C + \frac{Cr}{8} \right) \right) + \frac{87,79Mn}{\left(1 + e^{\frac{-(J-(1,60(C+Si)))}{(-20,68Si)}} \right)}$$

$$H(5135) = \left(55,14 \left(C + \frac{Cr}{8} \right) \right) + \frac{57,22Mn}{\left(1 + e^{\frac{-(J-(9,22(C+Si)))}{(-16,23Si)}} \right)}$$



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

$$H(5140) = \left(53,40 \left(C + \frac{Cr}{8} \right) \right) + \frac{58,17Mn}{\left(1 + e^{\frac{-(J-(6,62(C+Si)))}{(-20,39Si)}} \right)}$$

$$H(5147) = \left(55,26 \left(C + \frac{Cr}{8} \right) \right) + \frac{60,74Mn}{\left(1 + e^{\frac{-(J-(4,10(C+Si)))}{(-35,69Si)}} \right)}$$

$$H(5150) = \left(50,52 \left(C + \frac{Cr}{8} \right) \right) + \frac{64,21Mn}{\left(1 + e^{\frac{-(J-(6,31(C+Si)))}{(-25,18Si)}} \right)}$$

$$H(5155) = \left(50,98 \left(C + \frac{Cr}{8} \right) \right) + \frac{51,18Mn}{\left(1 + e^{\frac{-(J-(9,14(C+Si)))}{(-23,12Si)}} \right)}$$

$$H(50B40) = \left(56,40 \left(C + \frac{Cr}{8} \right) \right) + \frac{38,63Mn}{\left(1 + e^{\frac{-(J-(15,72(C+Si)))}{(-15,52Si)}} \right)}$$

Como no se pudo corroborar estas ecuaciones con datos experimentales reales, quedará para trabajos futuros la corroboración y modificación de estos. En las figuras 43 a la 51 se observan las curvas de ajuste (curva color verde) de cada acero de la familia con la curva media de dureza (curva color roja).



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

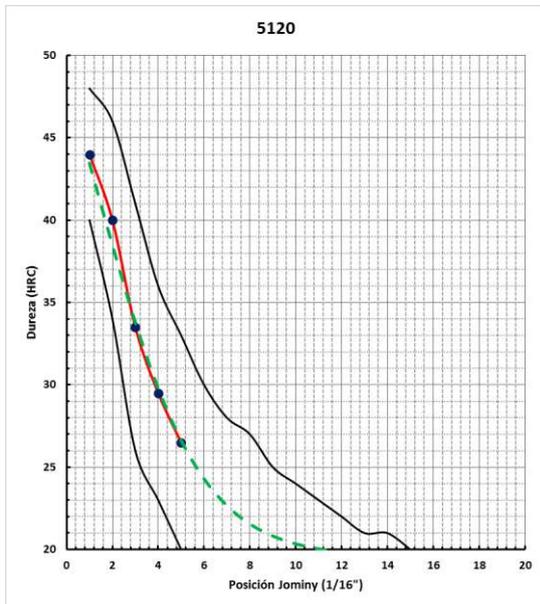


Figura 43. Ajuste para SAE 5120

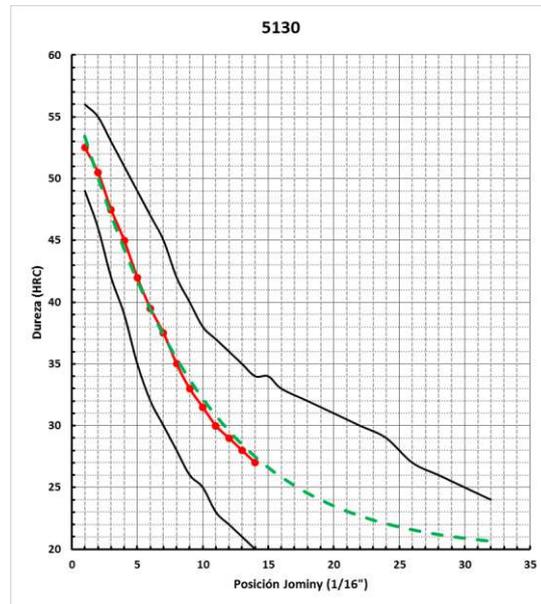


Figura 44. Ajuste para SAE 5130

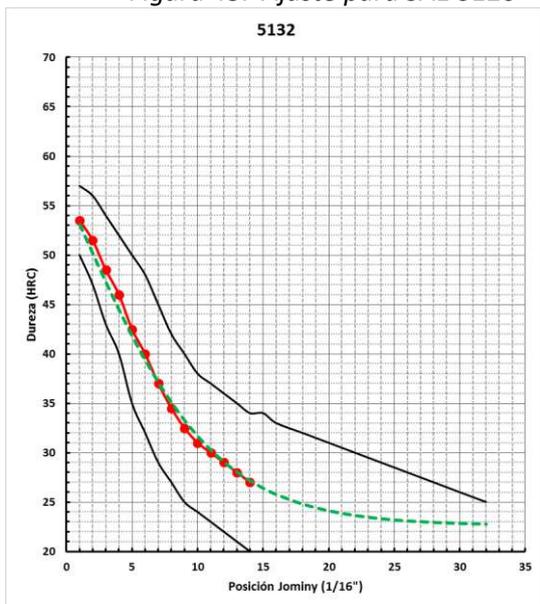


Figura 45. Ajuste para SAE 5132

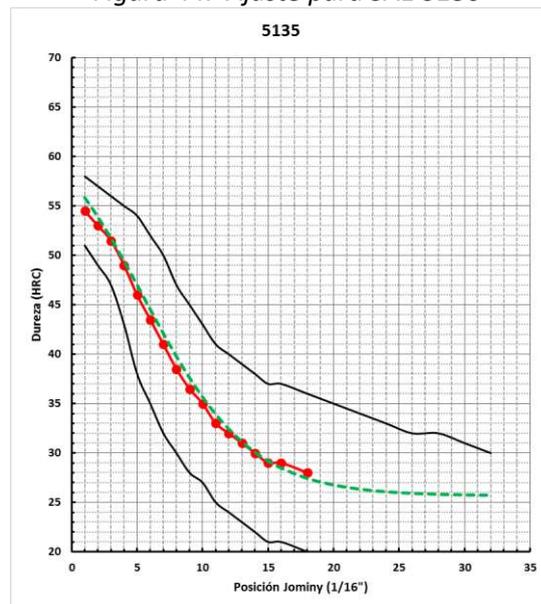


Figura 46. Ajuste para SAE 5135



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

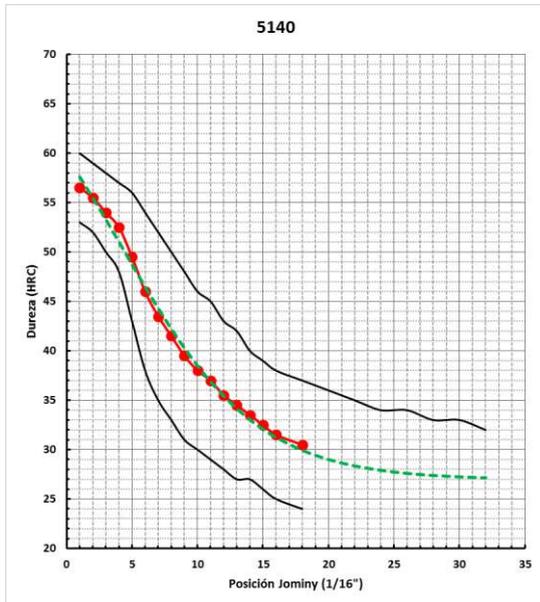


Figura 47. Ajuste para SAE 5140

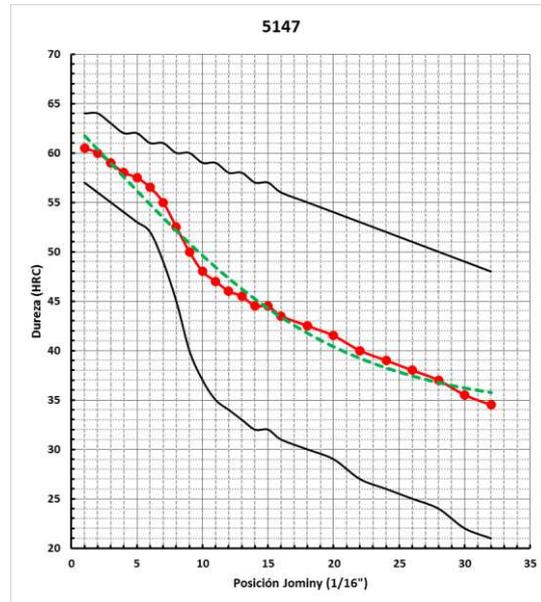


Figura 48. Ajuste para SAE 5147

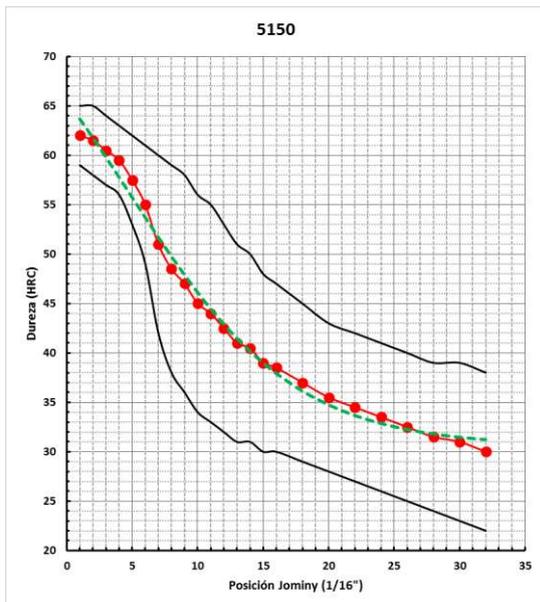


Figura 49. Ajuste para SAE 5150

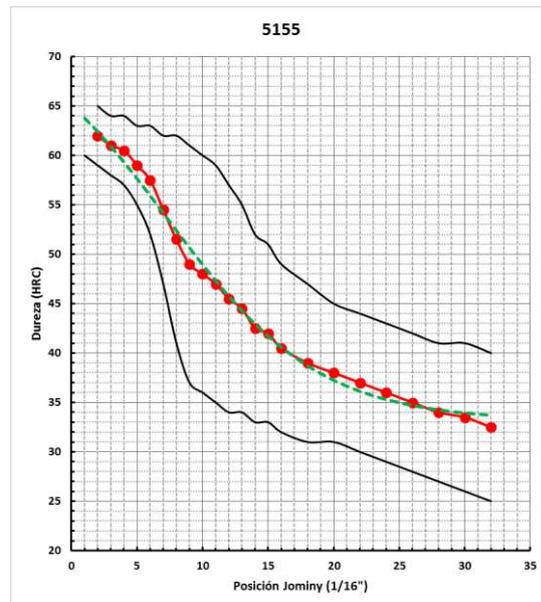


Figura 50. Ajuste para SAE 5155

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

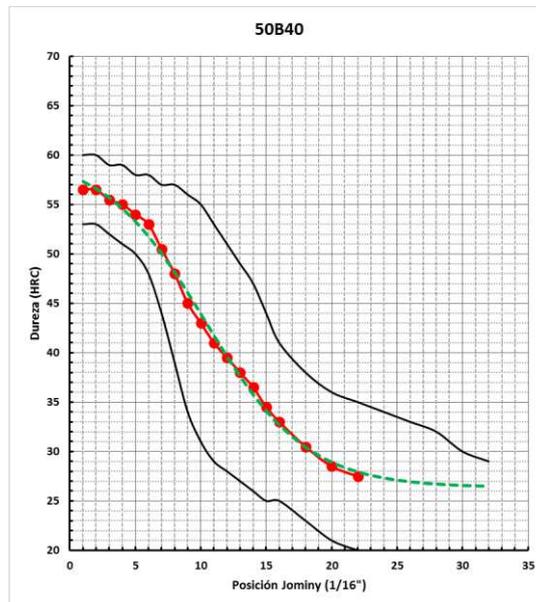


Figura 51. Ajuste para SAE 51B40

6.5. Confección de Calculadora Jominy

Se creó una aplicación a través del cual se pueda determinar curvas de templabilidad de los métodos de Grossman (ASTM A255), de Just y las ecuaciones encontradas en el presente trabajo, también incluye la posibilidad de ingresar datos experimentales de ensayos de templabilidad, además contienen la base de datos de las bandas de templabilidad de los aceros SAE.

La calculadora de templabilidad se desarrolló programando macros en el software Excel, en las figuras 52 a 59 se observa las interfaces de la aplicación. En la figura 52 se observa la pantalla de inicio de la hoja Excel.



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160



Figura 52. Pantalla de inicio

Para el uso de este, si se desea calcular una curva teórica primero se debe cargar la composición química del acero, oprimiendo el botón “Cargar Composición Química” se desplegará una ventana para la carga de los porcentajes de la composición solicitados, tamaño de grano y si la aleación posee Boro o no (figura 53), la carga definitiva se realiza por medio del botón cargar de esta ventana. Luego se selecciona la banda de templabilidad por medio del botón, la cual despliega una ventana con una lista para la selección de las bandas de los aceros (figura 54). Una vez seleccionada la banda de templabilidad se procede a “calcular la curva teórica” oprimiendo el botón con el mismo nombre, al oprimirlo se desplegará una nueva ventana en la que se elige el método de predicción deseado (figura 55). Para visualizar la curva se oprime el botón insertar gráfico, el cual inserta el gráfico dureza vs posición con las bandas de templabilidad y la curva teórica figura 56.

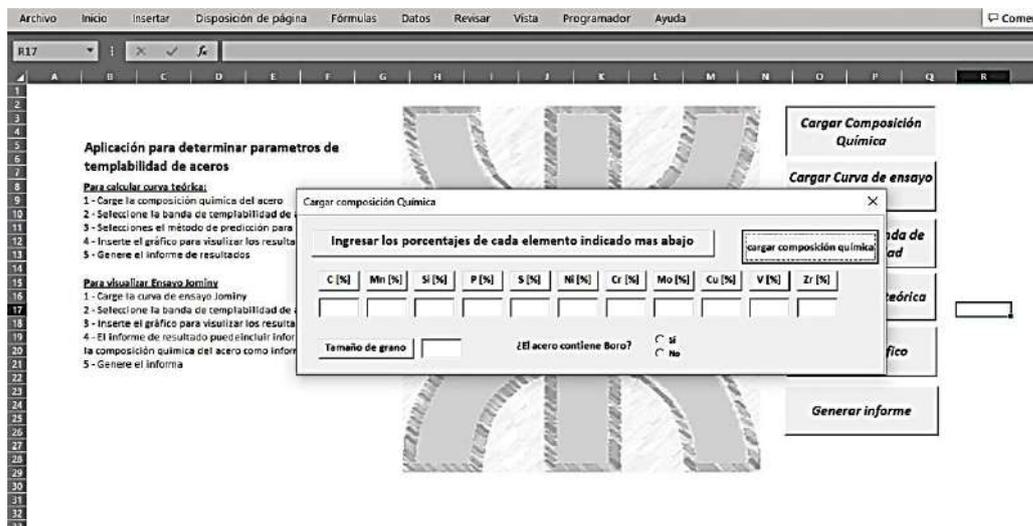


Figura 53. Carga de composición química



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

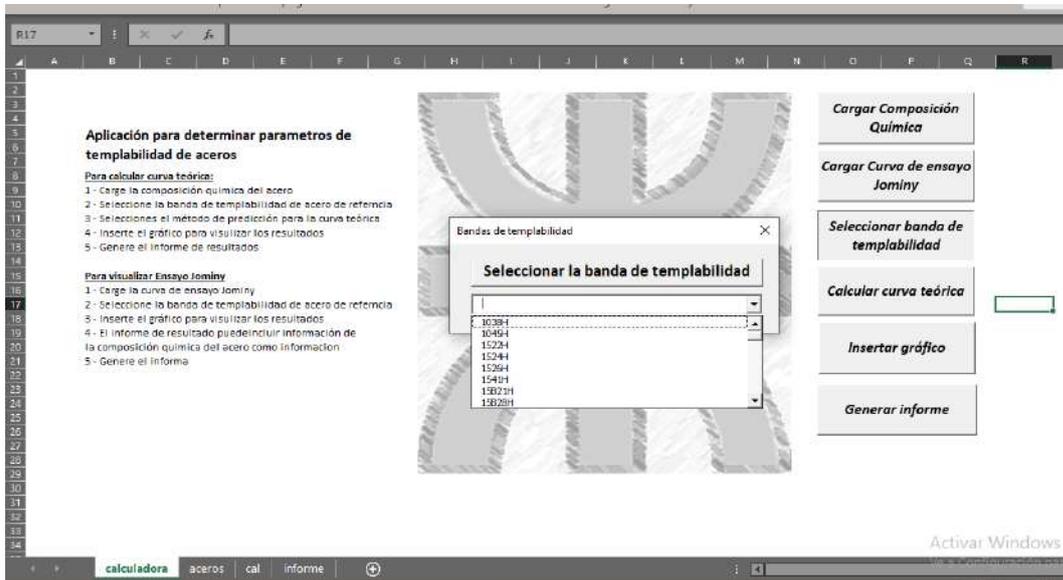


Figura 54. Selección de la banda de templabilidad

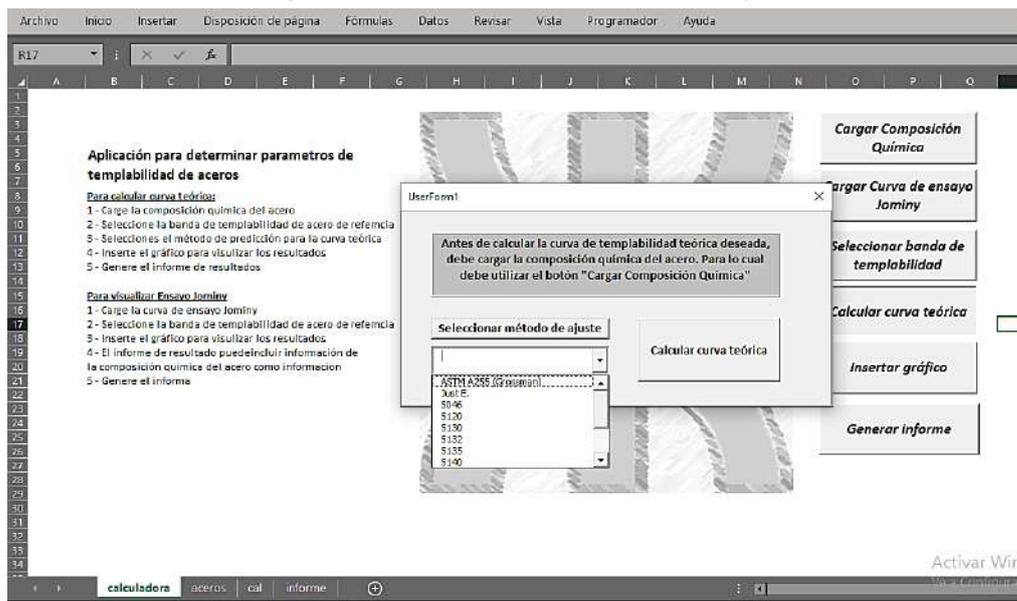


Figura 55. Selección del método de predicción

Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

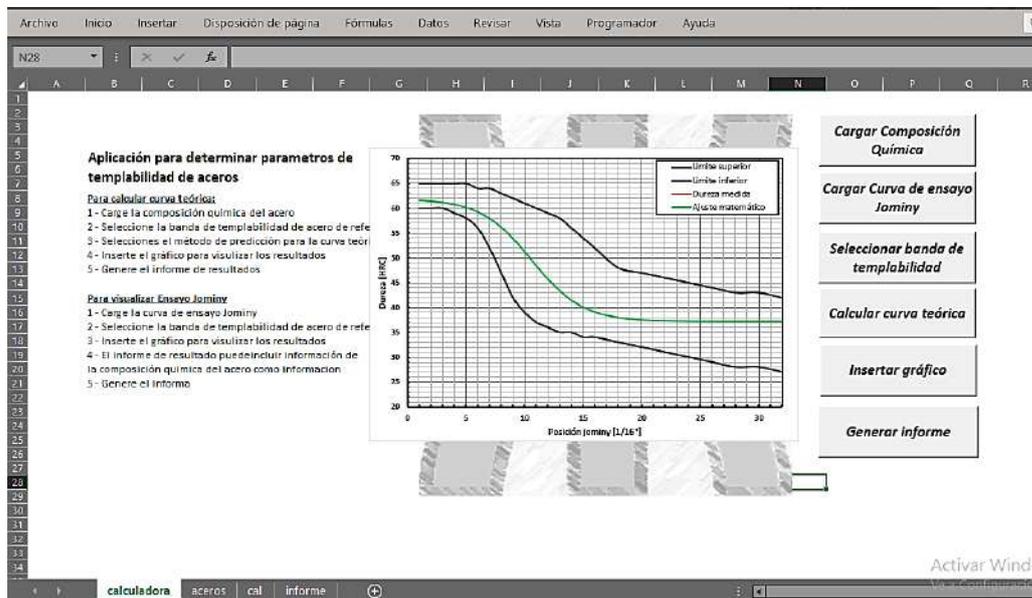


Figura 56. Inserción del gráfico

En el caso que no se realice el ensayo Jominy se puede ingresar los valores de dureza de cada posición por medio del botón "Cargar Curva de Ensayo Jominy" (figura 57). La aplicación permite utilizar los métodos simultáneamente (cargar curva de ensayo real y curva teórica)

Una vez insertado el gráfico se pueden ir variando parámetros de composición, bandas o selección de curva teórica y el gráfico se modifica instantáneamente. Una vez terminado los cálculos deseados se puede generar un informe en formato PDF, como el mostrado en la figura 58 y figura 59.



Predicción de la curva teórica de templeabilidad para un Acero SAE 5160

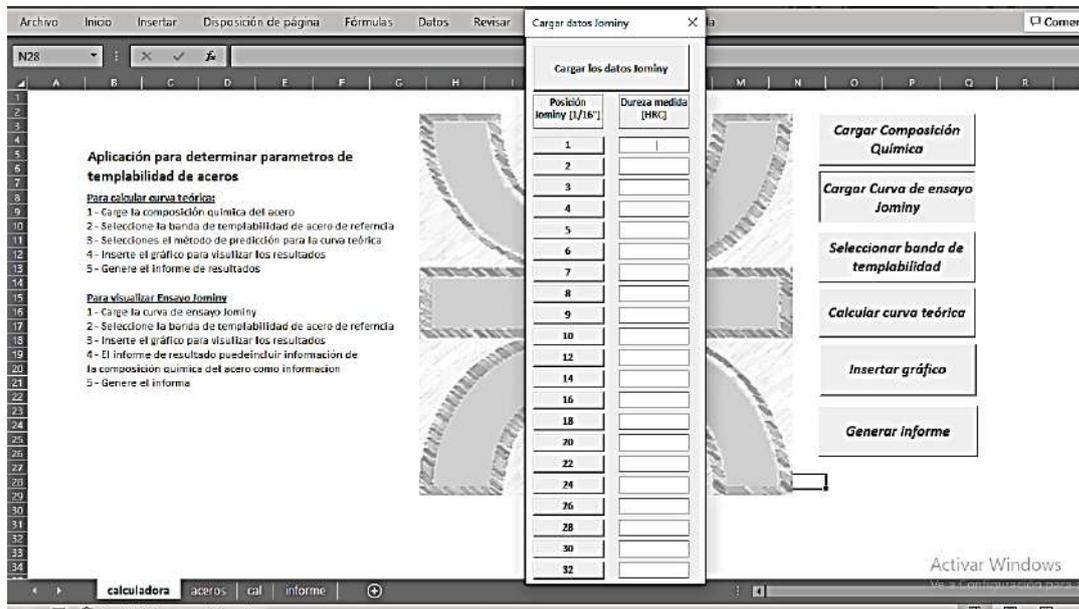


Figura 57. Carga de datos de ensayos Jominy

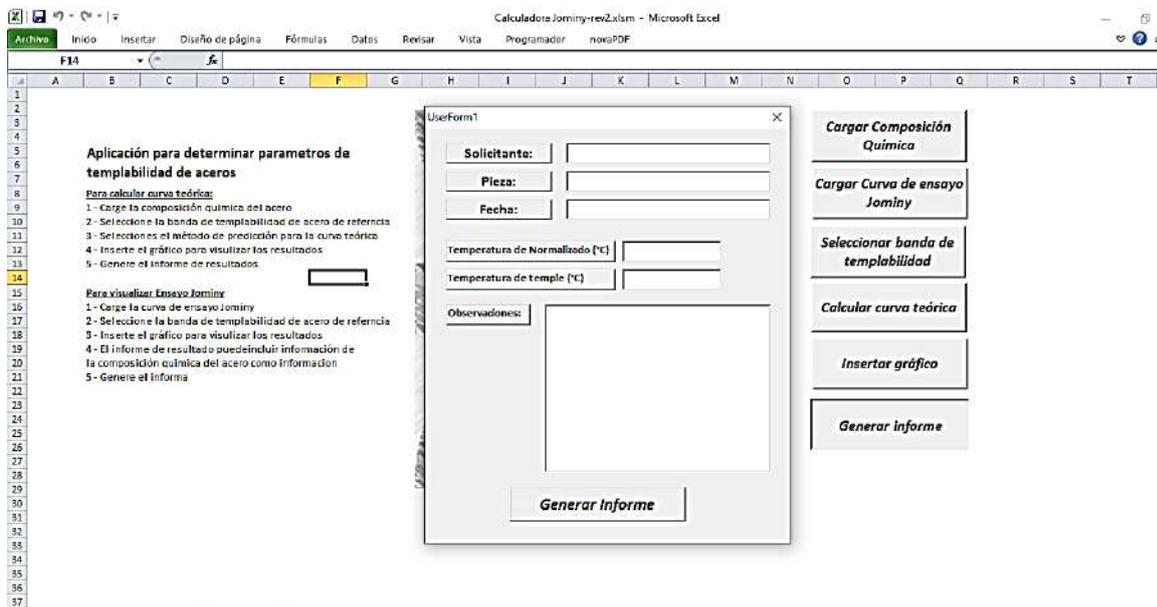


Figura 58. Generación del informe



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

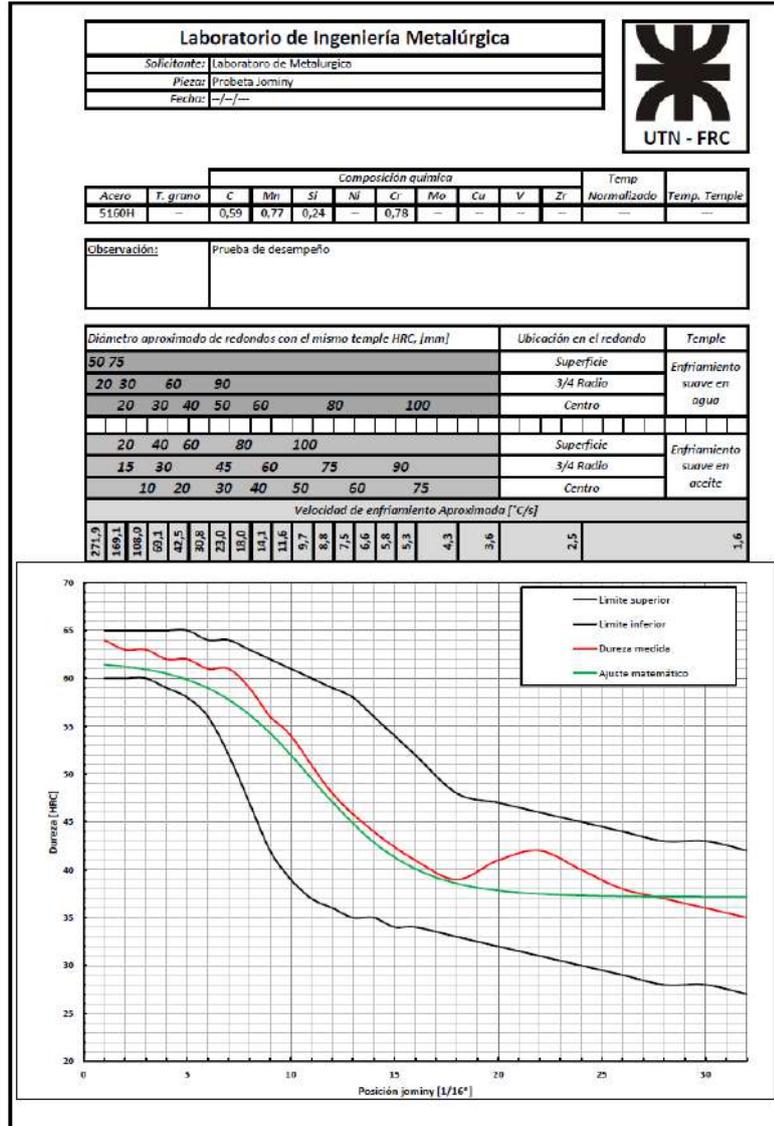


Figura 59. Ejemplo de informe



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

7. Conclusiones

Del análisis de los datos obtenidos con la función propuesta en el presente trabajo y de los datos experimentales podemos concluir:

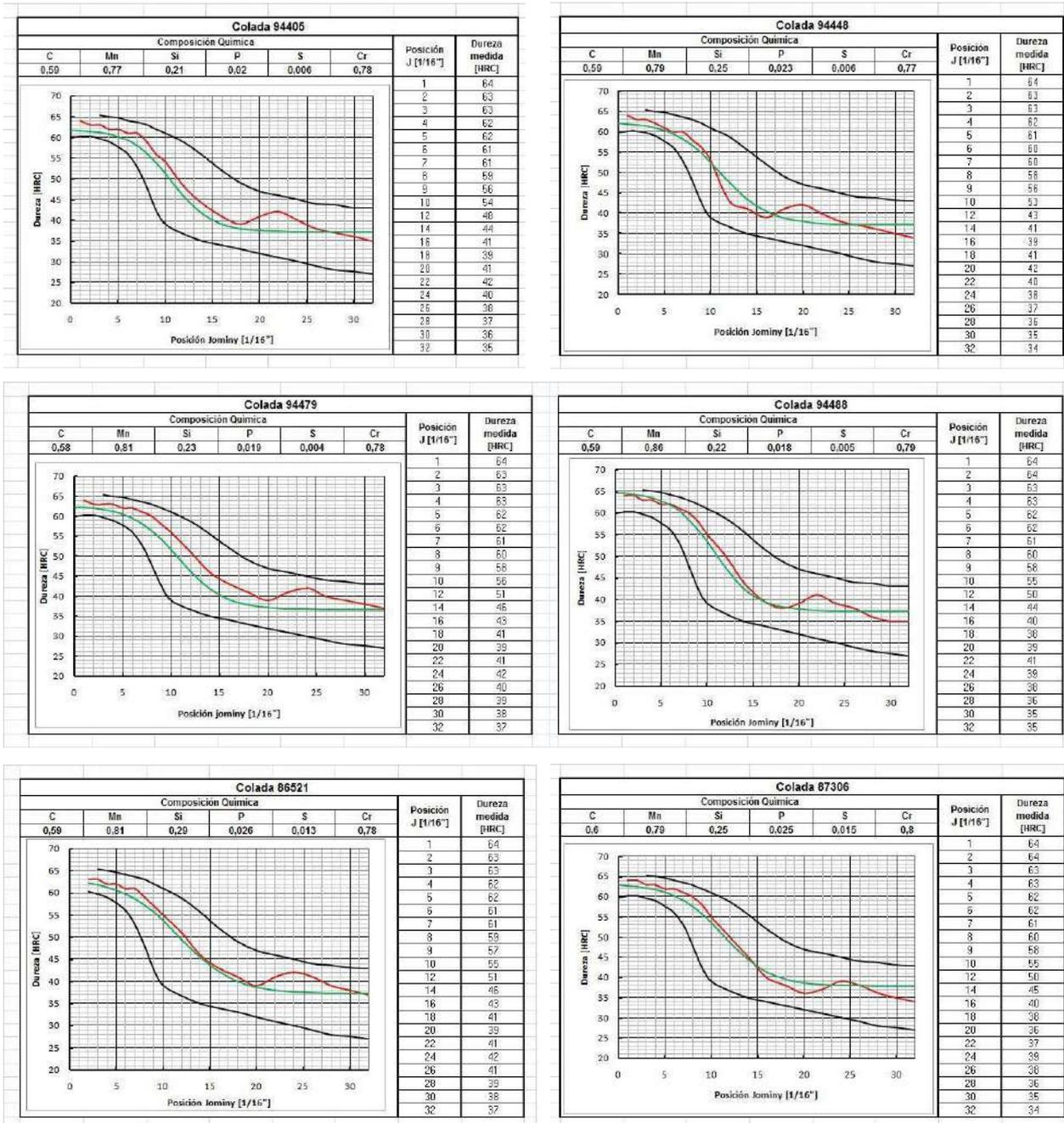
- La función propuesta cumple con los requisitos impuestos de predecir la curva de templabilidad con un error de ± 2 HRC aproximadamente en un 70 % de los casos. Pero si se tienen buenos resultados prediciendo la curva con un nivel de error de ± 4 HRC esto ocurre en un 85 a 90 % de las veces.
- El método usado para determinar la curva de predicción se considera confiable y se considera que la ecuación Sigmoid es buena opción para la predicción. Y el tiempo que lleva determinar la ecuación no es demasiado excesivo.
- Si se dispone de una base de datos más amplia se pueden hacer ajustes más precisos y unificar algunas de las ecuaciones de las familias 5100.
- La función propuesta no puede predecir el aumento de dureza debido a la precipitación de carburos observada en la parte final de las curvas de templabilidad. El método de Grossman puede predecir dicho aumento de dureza pero con un error importante.
- Cuando la colada posee gran contenido de C, Mn y Cr próximo a los límites superiores establecidos para la aleación, la función predice mayor dureza en las primeras posiciones Jominy.



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

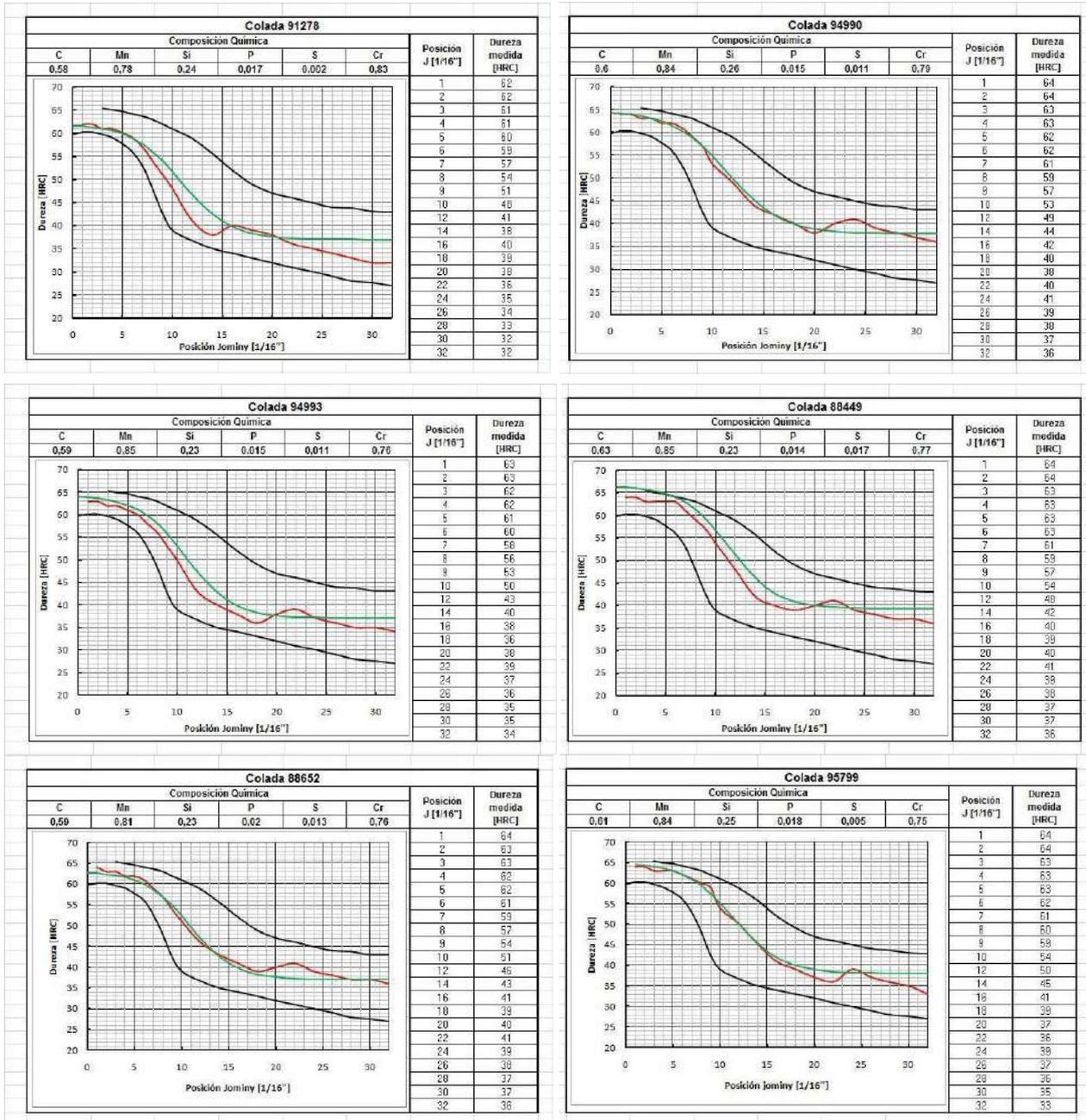
8. Anexos

8.1 Anexo 1– Gráficos de cada colada con sus respectivos datos experimentales y predicción



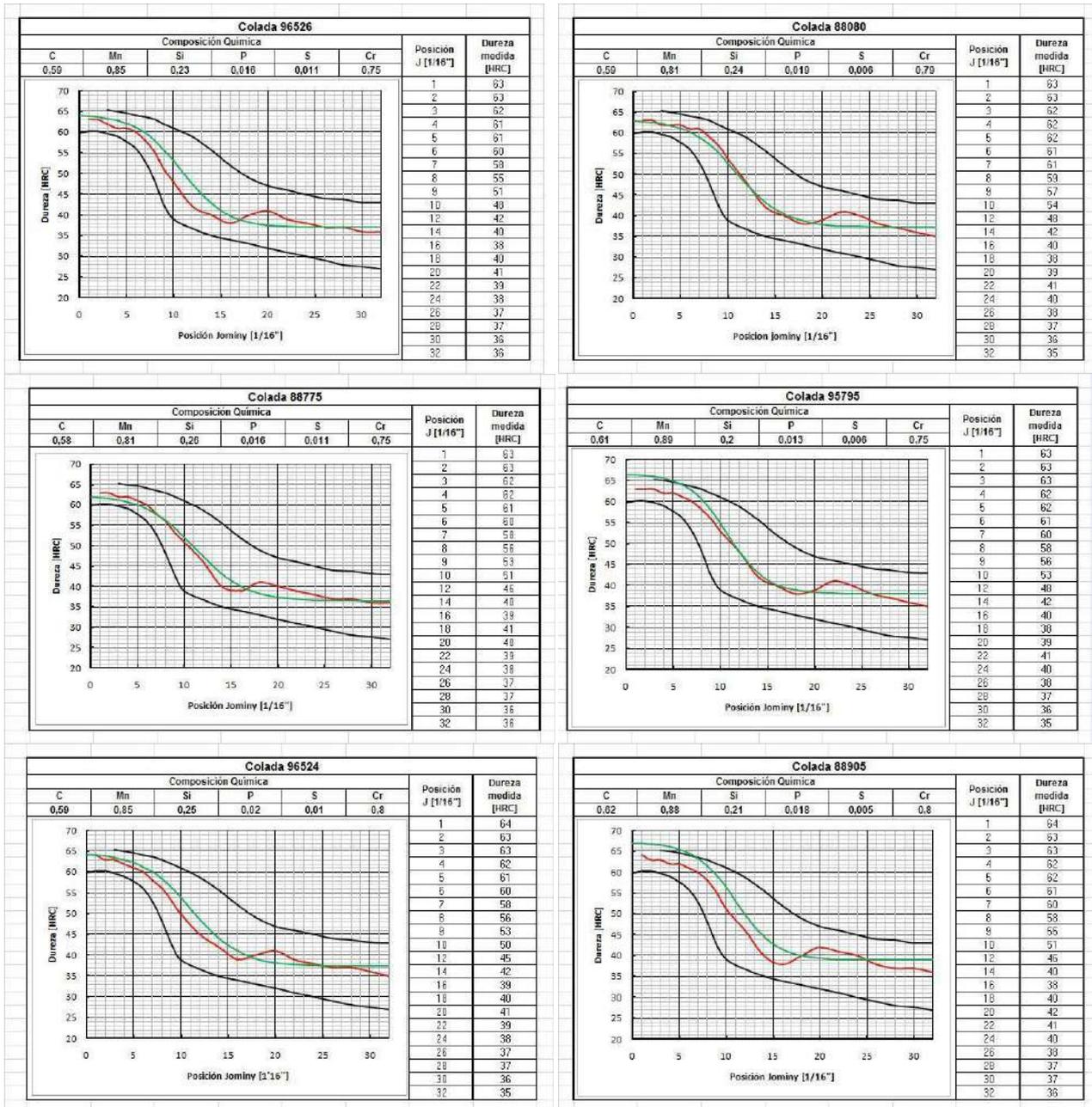


Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160



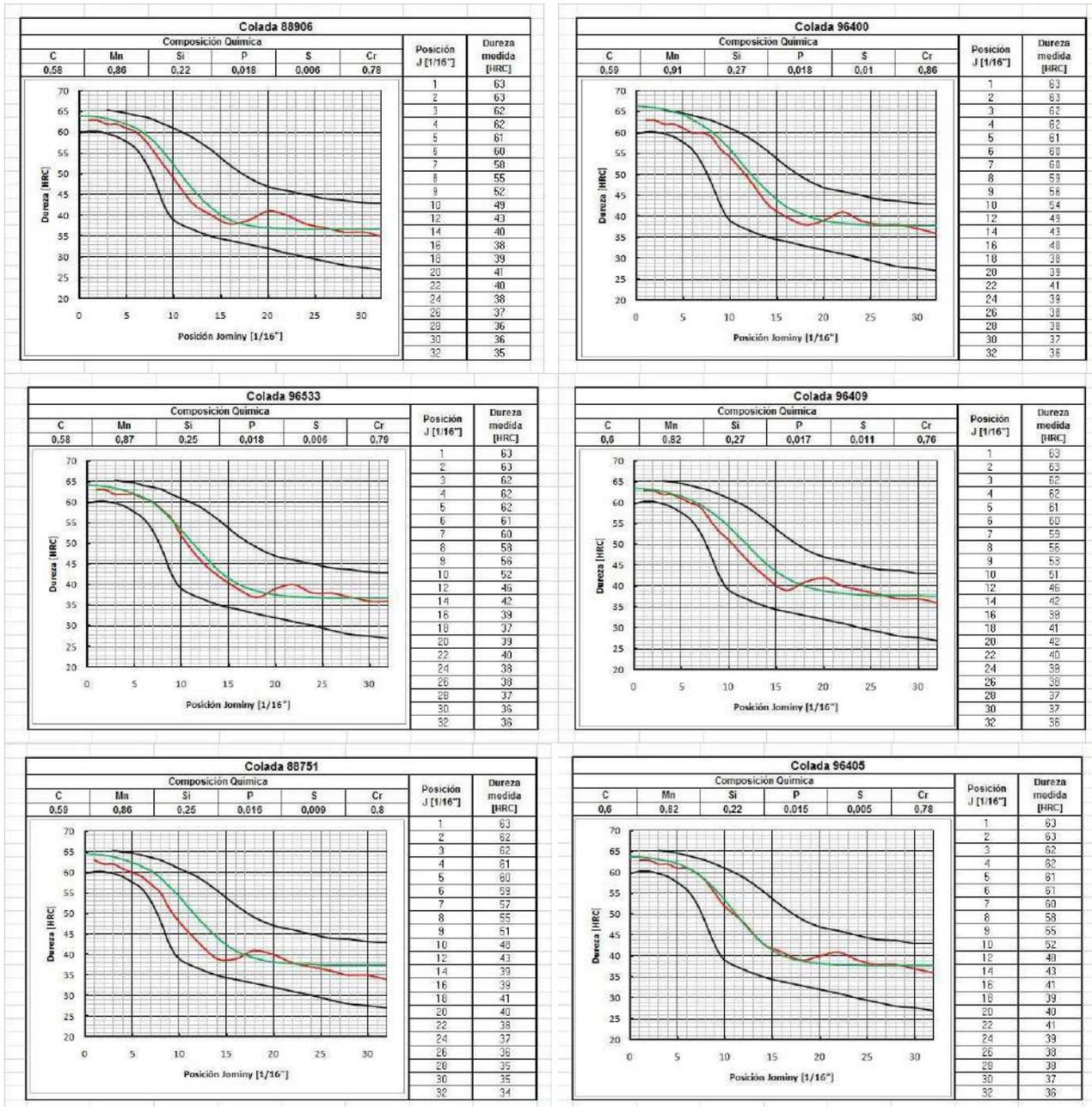


Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160



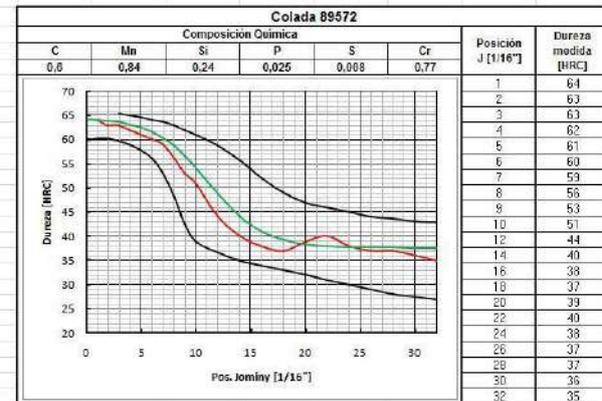
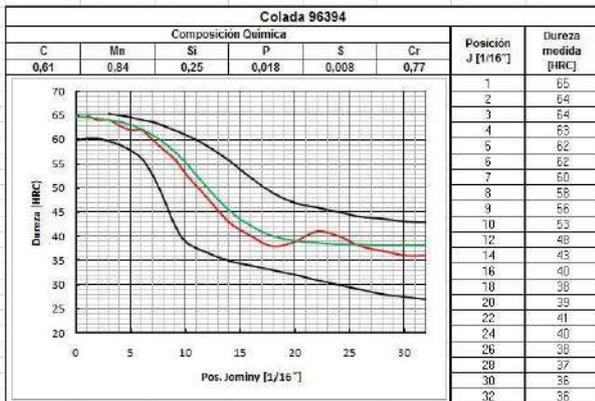
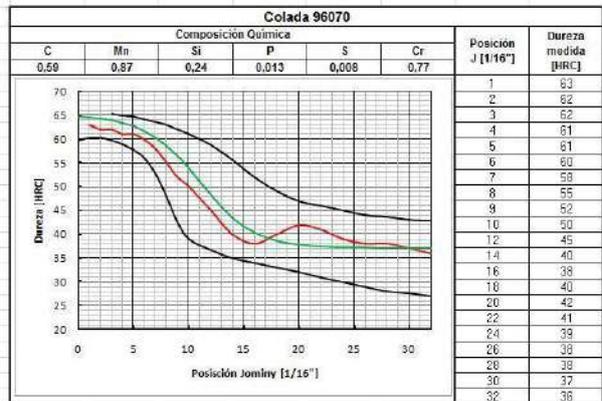
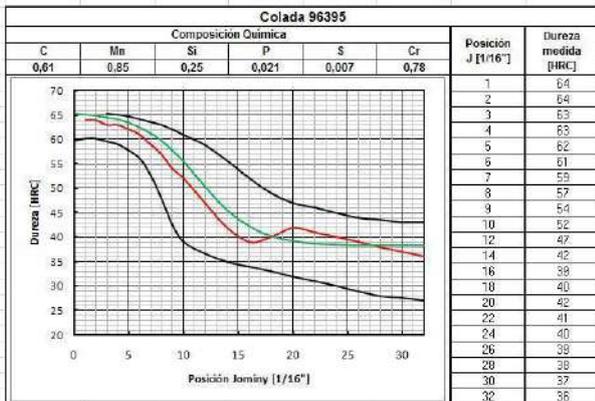
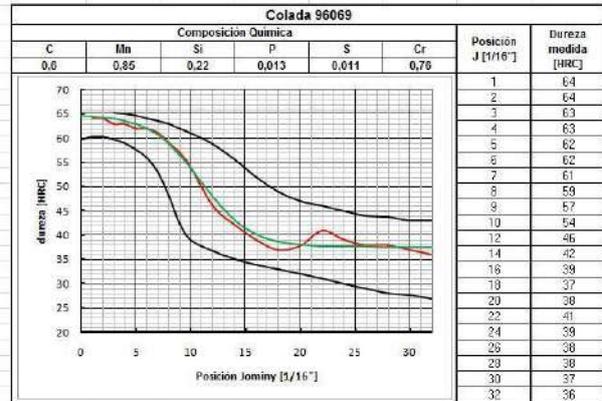
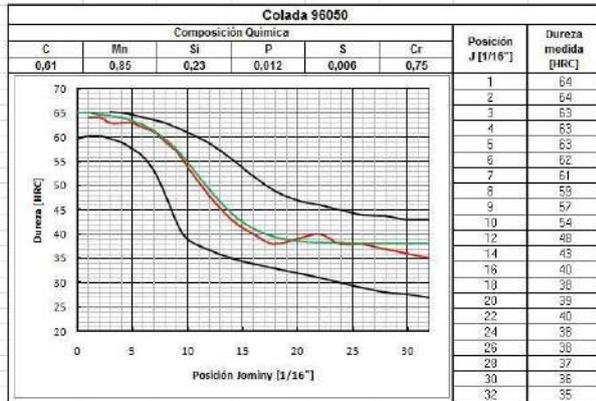


Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160



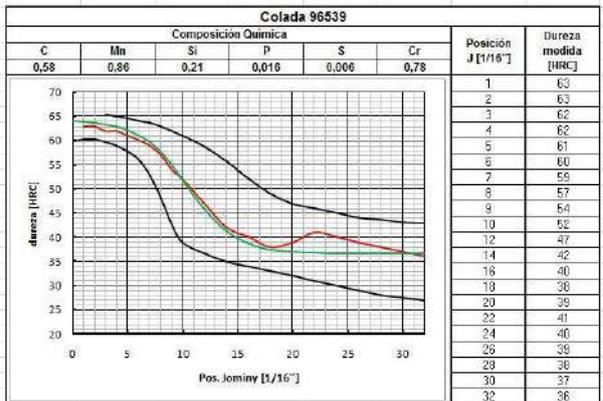
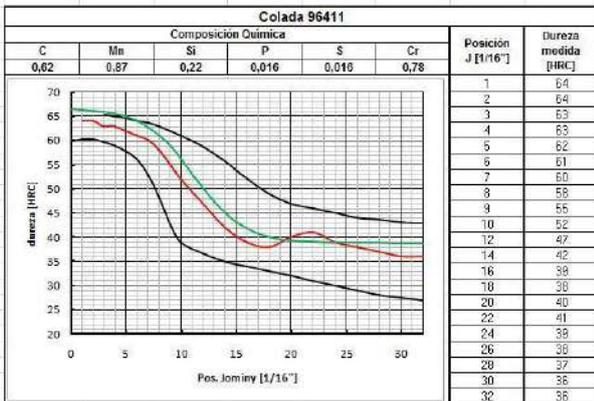
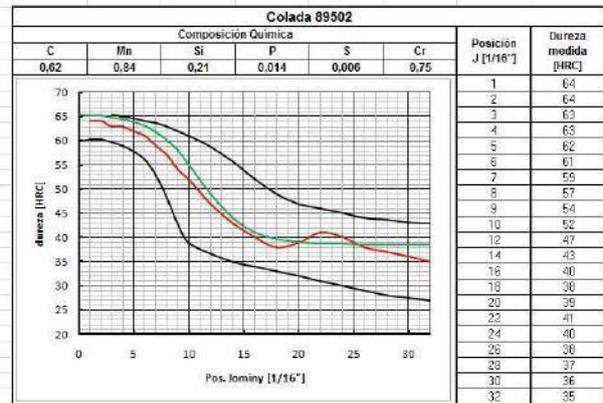
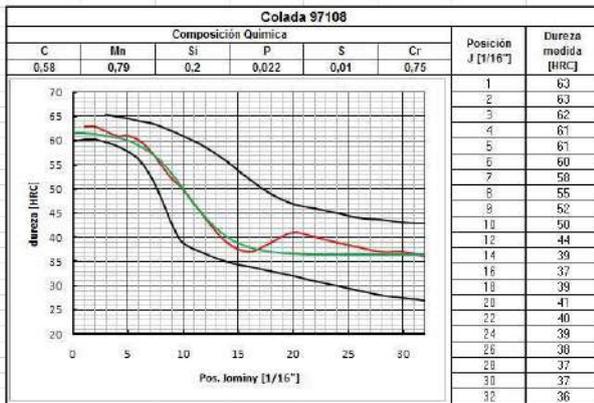
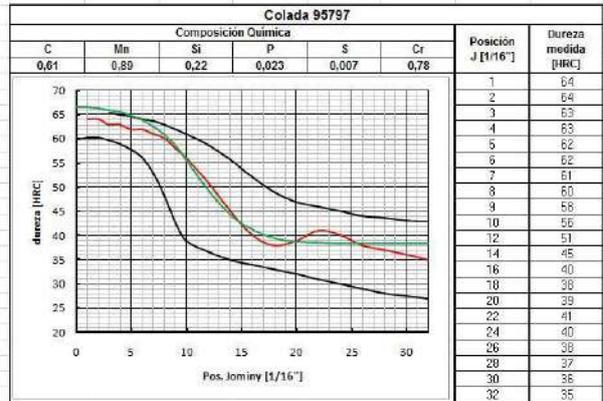
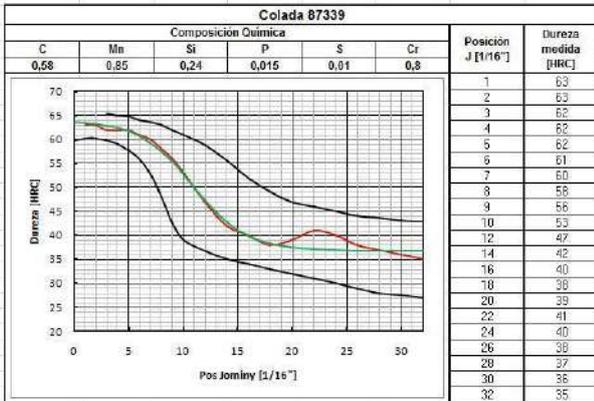


Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160



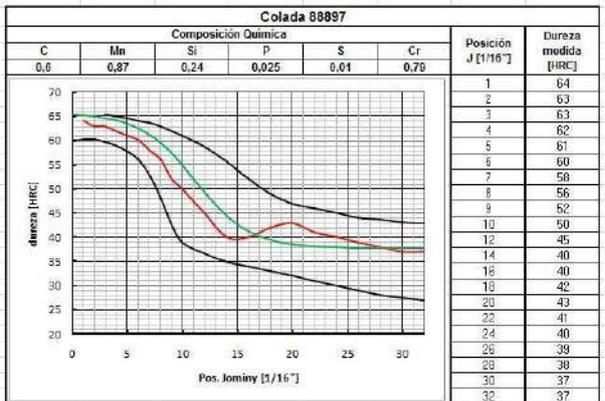
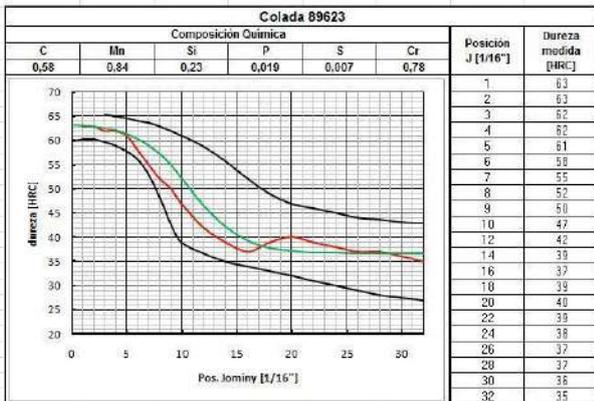
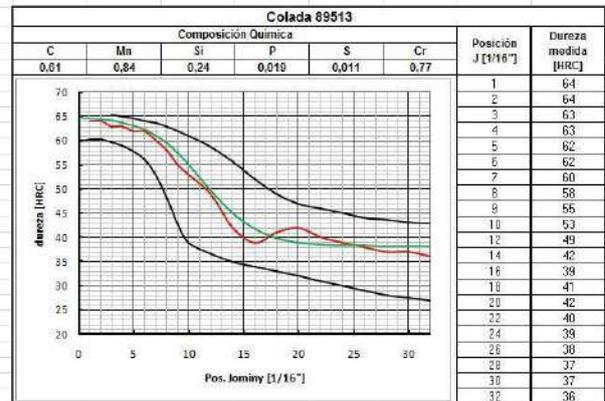
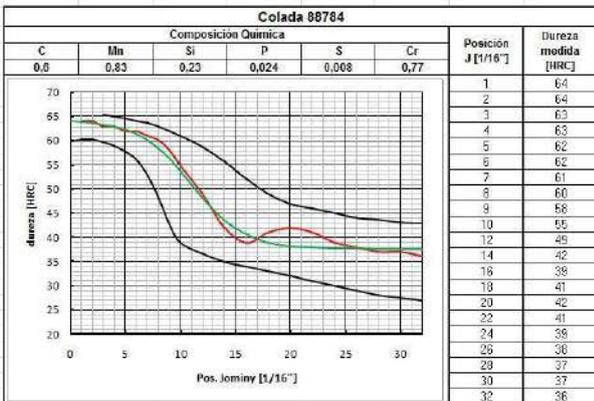
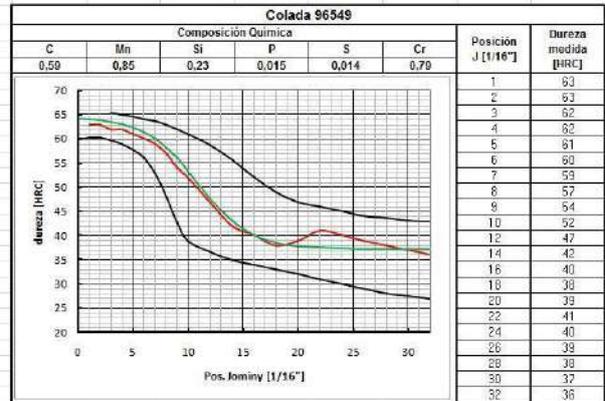
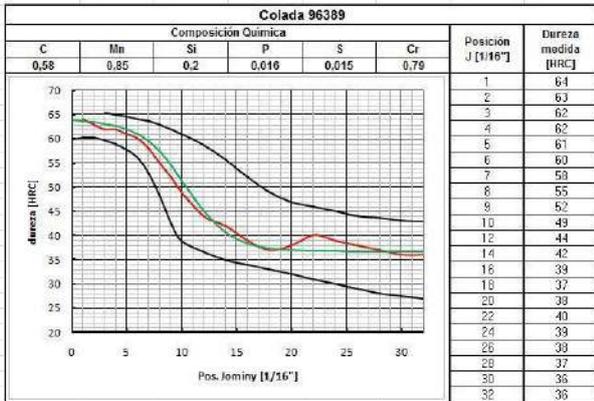


Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160



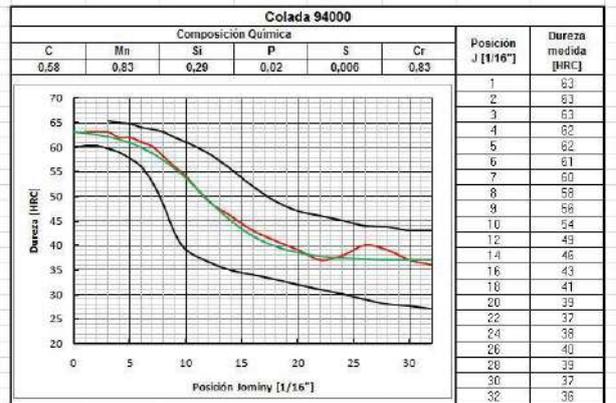
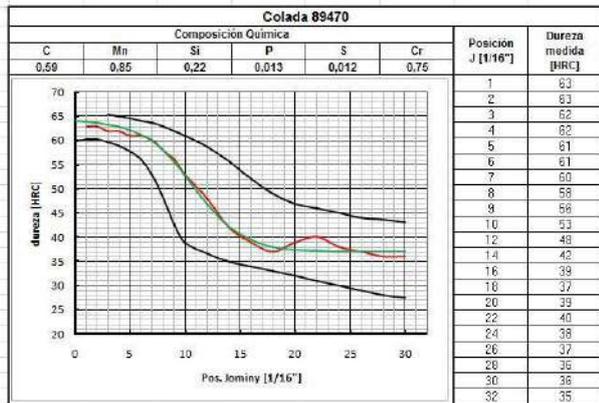
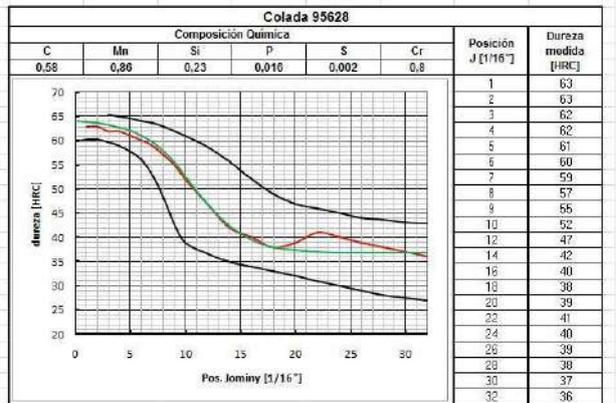
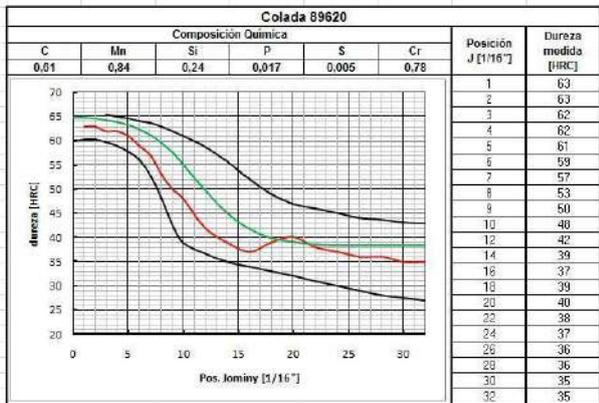
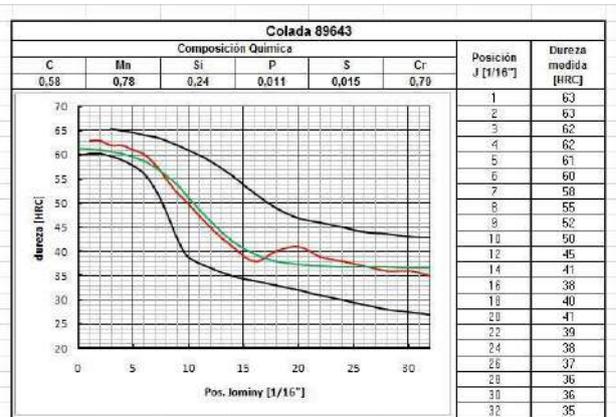
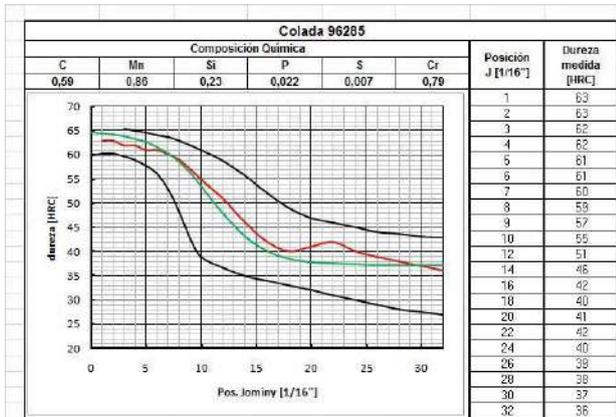


Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160



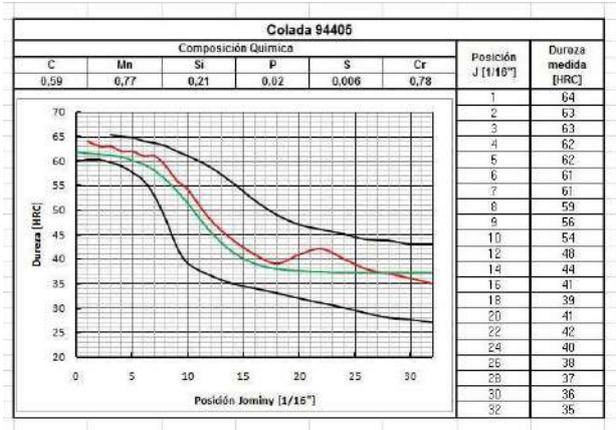
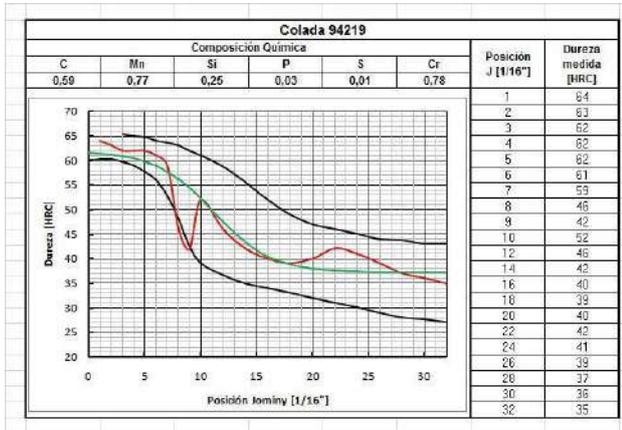


Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160





Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160





Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

8.2 Anexo 2– Errores

Colada 94000					Colada 94219				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	63	62,8	0,2	0,3	1	64	61,4	2,6	4,1
2	63	62,5	0,5	0,7	2	63	61,2	1,8	2,9
3	63	62,1	0,9	1,4	3	62	60,9	1,1	1,8
4	62	61,6	0,4	0,6	4	62	60,4	1,6	2,6
5	62	60,9	1,1	1,8	5	62	59,8	2,2	3,6
6	61	60,0	1,0	1,7	6	61	58,9	2,1	3,4
7	60	58,8	1,2	2,0	7	59	57,7	1,3	2,2
8	58	57,3	0,7	1,1	8	46	56,2	-10,2	-22,2
9	56	55,6	0,4	0,7	9	42	54,4	-12,4	-29,4
10	54	53,6	0,4	0,7	10	52	52,2	-0,2	-0,4
12	49	49,3	-0,3	-0,5	12	46	47,5	-1,5	-3,3
14	46	45,1	0,9	1,9	14	42	43,3	-1,3	-3,2
16	43	41,9	1,1	2,6	16	40	40,5	-0,5	-1,1
18	41	39,8	1,2	3,0	18	39	38,8	0,2	0,5
20	39	38,5	0,5	1,3	20	40	37,9	2,0	5,1
22	37	37,8	-0,8	-2,1	22	42	37,6	4,4	10,6
24	38	37,4	0,6	1,6	24	41	37,6	3,6	8,9
26	40	37,2	2,8	7,0	26	39	37,3	1,7	4,4
28	39	37,1	1,9	4,9	28	37	37,2	-0,2	-0,6
30	37	37,0	0,0	-0,1	30	36	37,2	-1,2	-3,4
32	36	37,0	-1,0	-2,8	32	35	37,2	-2,2	-6,3



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 94405					Colada 94448				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	64	61,58	2,4	3,8	1	64	62,0	2,0	3,2
2	63	61,41	1,6	2,5	2	63	61,7	1,3	2,0
3	63	61,15	1,8	2,9	3	63	61,4	1,6	2,5
4	62	60,75	1,3	2,0	4	62	60,9	1,1	1,7
5	62	60,14	1,9	3,0	5	61	60,3	0,7	1,2
6	61	59,23	1,8	2,9	6	60	59,4	0,6	1,0
7	61	57,93	3,1	5,0	7	60	58,2	1,8	3,0
8	59	56,16	2,8	4,8	8	58	56,6	1,4	2,3
9	56	53,90	2,1	3,7	9	56	54,7	1,3	2,2
10	54	51,25	2,8	5,1	10	53	52,5	0,5	0,9
12	48	45,71	2,3	4,8	12	43	47,7	-4,7	-10,9
14	44	41,47	2,5	5,7	14	41	43,4	-2,4	-5,9
16	41	39,10	1,9	4,6	16	39	40,5	-1,5	-3,8
18	39	37,99	1,0	2,6	18	41	38,8	2,2	5,4
20	41	37,52	3,5	8,5	20	42	37,9	4,1	9,7
22	42	37,32	4,7	11,1	22	40	37,5	2,5	6,3
24	40	37,25	2,8	6,9	24	38	37,3	0,7	1,8
26	38	37,21	0,8	2,1	26	37	37,2	-0,2	-0,6
28	37	37,20	-0,2	-0,5	28	36	37,2	-1,2	-3,2
30	36	37,20	-1,2	-3,3	30	35	37,1	-2,1	-6,1
32	35	37,20	-2,2	-6,3	32	34	37,1	-3,1	-9,2



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 94479					Colada 94488				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	64	62,2	1,8	2,8	1	64	64,4	-0,4	-0,7
2	63	62,0	1,0	1,6	2	64	64,2	-0,2	-0,4
3	63	61,6	1,4	2,1	3	63	63,9	-0,9	-1,5
4	63	61,2	1,8	2,9	4	63	63,5	-0,5	-0,7
5	62	60,5	1,5	2,4	5	62	62,8	-0,8	-1,3
6	62	59,5	2,5	4,0	6	62	61,8	0,2	0,4
7	61	58,2	2,8	4,7	7	61	60,4	0,6	1,0
8	60	56,4	3,6	6,0	8	60	58,5	1,5	2,6
9	58	54,2	3,8	6,6	9	58	56,1	1,9	3,3
10	56	51,6	4,4	7,8	10	55	53,3	1,7	3,2
12	51	46,3	4,7	9,3	12	50	47,3	2,7	5,4
14	46	41,9	4,1	8,9	14	44	42,6	1,4	3,2
16	43	39,2	3,8	8,8	16	40	39,7	0,3	0,6
18	41	37,8	3,2	7,7	18	38	38,4	-0,4	-0,9
20	39	37,2	1,8	4,7	20	39	37,7	1,3	3,3
22	41	36,9	4,1	10,1	22	41	37,5	3,5	8,6
24	42	36,8	5,2	12,5	24	39	37,3	1,7	4,3
26	40	36,7	3,3	8,3	26	38	37,3	0,7	1,9
28	39	36,7	2,3	6,0	28	36	37,3	-1,3	-3,5
30	38	36,7	1,3	3,5	30	35	37,3	-2,3	-6,5
32	37	36,7	0,3	0,9	32	35	37,3	-2,3	-6,5



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 86521					Colada 87306				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	64	62,4	1,6	2,4	1	64	62,7	1,3	2,0
2	63	62,2	0,8	1,3	2	64	62,5	1,5	2,3
3	63	61,8	1,2	1,9	3	63	62,2	0,8	1,3
4	62	61,3	0,7	1,2	4	63	61,8	1,2	2,0
5	62	60,6	1,4	2,2	5	62	61,1	0,9	1,4
6	61	59,7	1,3	2,1	6	62	60,3	1,7	2,8
7	61	58,6	2,4	3,9	7	61	59,1	1,9	3,1
8	59	57,3	1,7	3,0	8	60	57,6	2,4	4,0
9	57	55,6	1,4	2,5	9	58	55,8	2,2	3,9
10	55	53,7	1,3	2,4	10	55	53,6	1,4	2,6
12	51	49,5	1,5	3,0	12	50	48,8	1,2	2,5
14	46	45,4	0,6	1,4	14	45	44,4	0,6	1,3
16	43	42,1	0,9	2,0	16	40	41,4	-1,4	-3,4
18	41	40,0	1,0	2,4	18	38	39,6	-1,6	-4,3
20	39	38,7	0,3	0,7	20	36	38,7	-2,7	-7,5
22	41	38,0	3,0	7,3	22	37	38,3	-1,3	-3,4
24	42	37,6	4,4	10,4	24	39	38,1	0,9	2,4
26	41	37,4	3,6	8,8	26	38	38,0	0,0	0,1
28	39	37,3	1,7	4,3	28	36	37,9	-1,9	-5,3
30	38	37,3	0,7	2,0	30	35	37,9	-2,9	-8,3
32	37	37,2	-0,2	-0,6	32	34	37,9	-3,9	-11,4



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 91278					Colada 94990				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	62	61,5	0,5	0,8	1	64	64,2	-0,2	-0,3
2	62	61,3	0,7	1,1	2	64	63,9	0,1	0,1
3	61	61,0	0,0	0,0	3	63	63,6	-0,6	-0,9
4	61	60,5	0,5	0,8	4	63	63,1	-0,1	-0,2
5	60	59,8	0,2	0,3	5	62	62,4	-0,4	-0,7
6	59	58,9	0,1	0,1	6	62	61,5	0,5	0,7
7	57	57,7	-0,7	-1,1	7	61	60,3	0,7	1,1
8	54	56,0	-2,0	-3,7	8	59	58,8	0,2	0,3
9	51	54,0	-3,0	-5,9	9	57	56,9	0,1	0,2
10	48	51,7	-3,7	-7,6	10	53	54,7	-1,7	-3,2
12	41	46,7	-5,7	-13,9	12	49	49,8	-0,8	-1,6
14	38	42,5	-4,5	-11,9	14	44	45,2	-1,2	-2,8
16	40	39,8	0,2	0,5	16	42	41,9	0,1	0,2
18	39	38,3	0,7	1,7	18	40	39,9	0,1	0,2
20	38	37,6	0,4	1,0	20	38	38,9	-0,9	-2,3
22	36	37,3	-1,3	-3,5	22	40	38,3	1,7	4,2
24	35	37,1	-2,1	-6,0	24	41	38,0	3,0	7,2
26	34	37,0	-3,0	-9,0	26	39	37,9	1,1	2,8
28	33	37,0	-4,0	-12,2	28	38	37,9	0,1	0,4
30	32	37,0	-5,0	-15,6	30	37	37,8	-0,8	-2,2
32	32	37,0	-5,0	-15,6	32	36	37,8	-1,8	-5,0



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 94993					Colada 88449				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	63	63,9	-0,9	-1,4	1	64	66,2	-2,2	-3,4
2	63	63,7	-0,7	-1,1	2	64	66,0	-2,0	-3,2
3	62	63,3	-1,3	-2,2	3	63	65,8	-2,8	-4,4
4	62	62,9	-0,9	-1,4	4	63	65,4	-2,4	-3,8
5	61	62,2	-1,2	-1,9	5	63	64,8	-1,8	-2,9
6	60	61,2	-1,2	-2,0	6	63	64,0	-1,0	-1,6
7	58	59,8	-1,8	-3,2	7	61	62,8	-1,8	-3,0
8	56	58,0	-2,0	-3,6	8	59	61,3	-2,3	-3,9
9	53	55,8	-2,8	-5,3	9	57	59,3	-2,3	-4,0
10	50	53,2	-3,2	-6,3	10	54	56,8	-2,8	-5,2
12	43	47,5	-4,5	-10,5	12	48	51,2	-3,2	-6,7
14	40	42,8	-2,8	-7,1	14	42	46,1	-4,1	-9,8
16	38	39,9	-1,9	-5,0	16	40	42,7	-2,7	-6,8
18	36	38,4	-2,4	-6,5	18	39	40,9	-1,9	-4,8
20	38	37,6	0,4	1,0	20	40	40,0	0,0	0,0
22	39	37,3	1,7	4,3	22	41	39,6	1,4	3,4
24	37	37,2	-0,2	-0,5	24	39	39,4	-0,4	-1,1
26	36	37,1	-1,1	-3,1	26	38	39,3	-1,3	-3,5
28	35	37,1	-2,1	-5,9	28	37	39,3	-2,3	-6,3
30	35	37,1	-2,1	-5,9	30	37	39,3	-2,3	-6,2
32	34	37,1	-3,1	-9,0	32	36	39,3	-3,3	-9,2



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 88652					Colada 95799				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	64	62,6	1,4	2,2	1	64	64,5	-0,52	-0,82
2	63	62,4	0,6	0,9	2	64	64,3	-0,30	-0,48
3	63	62,1	0,9	1,4	3	63	64,0	-0,99	-1,57
4	62	61,7	0,3	0,6	4	63	63,5	-0,54	-0,86
5	62	61,0	1,0	1,6	5	63	62,9	0,09	0,14
6	61	60,1	0,9	1,5	6	62	62,0	-0,03	-0,05
7	59	58,8	0,2	0,4	7	61	60,8	0,15	0,25
8	57	57,0	0,0	-0,1	8	60	59,3	0,70	1,16
9	54	54,9	-0,9	-1,7	9	59	57,4	1,62	2,75
10	51	52,4	-1,4	-2,7	10	54	55,1	-1,10	-2,04
12	46	47,0	-1,0	-2,2	12	50	50,0	0,01	0,02
14	43	42,6	0,4	1,0	14	45	45,3	-0,29	-0,64
16	41	39,8	1,2	3,0	16	41	42,0	-0,96	-2,35
18	39	38,3	0,7	1,8	18	39	40,0	-1,02	-2,61
20	40	37,6	2,4	6,0	20	37	39,0	-2,01	-5,43
22	41	37,3	3,7	9,0	22	36	38,5	-2,51	-6,98
24	39	37,2	1,8	4,7	24	39	38,3	0,72	1,85
26	38	37,1	0,9	2,4	26	37	38,2	-1,17	-3,16
28	37	37,1	-0,1	-0,2	28	36	38,1	-2,12	-5,88
30	37	37,1	-0,1	-0,2	30	35	38,1	-3,09	-8,84
32	36	37,1	-1,1	-3,0	32	33	38,1	-5,08	-15,40



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 96526					Colada 88080				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	63	63,8	-0,8	-1,3	1	63	62,8	0,2	0,4
2	63	63,6	-0,6	-0,9	2	63	62,6	0,4	0,7
3	62	63,3	-1,3	-2,1	3	62	62,2	-0,2	-0,4
4	61	62,8	-1,8	-2,9	4	62	61,8	0,2	0,4
5	61	62,1	-1,1	-1,8	5	62	61,1	0,9	1,4
6	60	61,1	-1,1	-1,9	6	61	60,2	0,8	1,4
7	58	59,8	-1,8	-3,0	7	61	58,9	2,1	3,4
8	55	58,0	-3,0	-5,4	8	59	57,3	1,7	2,9
9	51	55,7	-4,7	-9,2	9	57	55,2	1,8	3,1
10	48	53,1	-5,1	-10,6	10	54	52,8	1,2	2,2
12	42	47,4	-5,4	-13,0	12	48	47,7	0,3	0,7
14	40	42,8	-2,8	-6,9	14	42	43,2	-1,2	-3,0
16	38	39,8	-1,8	-4,8	16	40	40,3	-0,3	-0,8
18	40	38,3	1,7	4,3	18	38	38,7	-0,7	-1,9
20	41	37,6	3,4	8,4	20	39	37,9	1,1	2,7
22	39	37,2	1,8	4,5	22	41	37,6	3,4	8,4
24	38	37,1	0,9	2,4	24	40	37,4	2,6	6,5
26	37	37,0	0,0	-0,1	26	38	37,3	0,7	1,8
28	37	37,0	0,0	0,0	28	37	37,3	-0,3	-0,8
30	36	37,0	-1,0	-2,8	30	36	37,3	-1,3	-3,5
32	36	37,0	-1,0	-2,8	32	35	37,3	-2,3	-6,5



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 88775					Colada 95795				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	63	61,8	-1,4	-2,2	1	63	66,3	-3,3	-5,3
2	63	61,6	-1,4	-2,3	2	63	66,2	-3,2	-5,1
3	62	61,2	-1,5	-2,5	3	63	65,9	-2,9	-4,7
4	62	60,7	-1,6	-2,7	4	62	65,5	-3,5	-5,7
5	61	60,0	-1,7	-2,9	5	62	64,9	-2,9	-4,7
6	60	59,1	-1,9	-3,2	6	61	64,0	-3,0	-4,9
7	58	57,8	-2,0	-3,4	7	60	62,6	-2,6	-4,3
8	56	56,2	-2,1	-3,7	8	58	60,6	-2,6	-4,5
9	53	54,3	-2,1	-3,8	9	56	58,0	-2,0	-3,6
10	51	52,1	-2,0	-3,8	10	53	54,9	-1,9	-3,5
12	46	47,4	-1,6	-3,3	12	48	48,1	-0,1	-0,3
14	40	43,1	-1,0	-2,4	14	42	43,0	-1,0	-2,3
16	39	40,1	-0,6	-1,6	16	40	40,2	-0,2	-0,4
18	41	38,3	-0,5	-1,3	18	38	38,9	-0,9	-2,4
20	40	37,4	-0,5	-1,3	20	39	38,4	0,6	1,6
22	39	36,9	-0,5	-1,3	22	41	38,2	2,8	6,8
24	38	36,7	-0,5	-1,4	24	40	38,1	1,9	4,7
26	37	36,6	-0,5	-1,4	26	38	38,1	-0,1	-0,2
28	37	36,5	-0,5	-1,4	28	37	38,1	-1,1	-2,9
30	36	36,5	-0,5	-1,5	30	36	38,1	-2,1	-5,8
32	36	36,5	-0,5	-1,5	32	63	66,3	-3,3	-5,3



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 96524					Colada 88905				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	64	64,0	0,0	-0,1	1	64	66,9	-2,9	-4,5
2	63	63,8	-0,8	-1,3	2	63	66,7	-3,7	-5,9
3	63	63,5	-0,5	-0,7	3	63	66,5	-3,5	-5,5
4	62	63,0	-1,0	-1,5	4	62	66,1	-4,1	-6,6
5	61	62,3	-1,3	-2,1	5	62	65,5	-3,5	-5,6
6	60	61,3	-1,3	-2,1	6	61	64,6	-3,6	-5,9
7	58	60,0	-2,0	-3,4	7	60	63,3	-3,3	-5,5
8	56	58,3	-2,3	-4,2	8	58	61,5	-3,5	-6,0
9	53	56,3	-3,3	-6,2	9	55	59,1	-4,1	-7,5
10	50	53,9	-3,9	-7,8	10	51	56,3	-5,3	-10,3
12	45	48,7	-3,7	-8,2	12	46	49,9	-3,9	-8,4
14	42	44,1	-2,1	-5,0	14	40	44,6	-4,6	-11,6
16	39	40,9	-1,9	-5,0	16	38	41,5	-3,5	-9,3
18	40	39,1	0,9	2,2	18	40	40,0	0,0	-0,1
20	41	38,2	2,8	6,9	20	42	39,4	2,6	6,2
22	39	37,7	1,3	3,3	22	41	39,1	1,9	4,6
24	38	37,5	0,5	1,3	24	40	39,0	1,0	2,4
26	37	37,4	-0,4	-1,1	26	38	39,0	-1,0	-2,6
28	37	37,4	-0,4	-1,0	28	37	39,0	-2,0	-5,3
30	36	37,3	-1,3	-3,7	30	37	39,0	-2,0	-5,3
32	35	37,3	-2,3	-6,7	32	36	39,0	-3,0	-8,2



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 88906					Colada 96400				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	63	63,8	-0,8	-1,3	1	63	66,2	-3,2	-5,1
2	63	63,6	-0,6	-1,0	2	63	65,9	-2,9	-4,6
3	62	63,3	-1,3	-2,1	3	62	65,5	-3,5	-5,7
4	62	62,8	-0,8	-1,3	4	62	65,0	-3,0	-4,8
5	61	62,1	-1,1	-1,7	5	61	64,2	-3,2	-5,3
6	60	61,0	-1,0	-1,7	6	60	63,2	-3,2	-5,4
7	58	59,5	-1,5	-2,6	7	60	61,9	-1,9	-3,2
8	55	57,6	-2,6	-4,7	8	59	60,2	-1,2	-2,1
9	52	55,1	-3,1	-6,0	9	56	58,2	-2,2	-4,0
10	49	52,3	-3,3	-6,7	10	54	55,9	-1,9	-3,5
12	43	46,3	-3,3	-7,8	12	49	50,8	-1,8	-3,6
14	40	41,7	-1,7	-4,3	14	43	46,0	-3,0	-6,9
16	38	39,0	-1,0	-2,7	16	40	42,4	-2,4	-6,1
18	39	37,7	1,3	3,4	18	38	40,2	-2,2	-5,9
20	41	37,1	3,9	9,5	20	39	39,0	0,0	0,0
22	40	36,8	3,2	7,9	22	41	38,4	2,6	6,4
24	38	36,7	1,3	3,3	24	39	38,1	0,9	2,4
26	37	36,7	0,3	0,9	26	38	37,9	0,1	0,3
28	36	36,7	-0,7	-1,8	28	38	37,8	0,2	0,5
30	36	36,7	-0,7	-1,8	30	37	37,8	-0,8	-2,1
32	35	36,7	-1,7	-4,7	32	63	66,2	-3,2	-5,1



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 96533					Colada 96409				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	63	64,0	-1,0	-1,6	1	63	63,3	-0,3	-0,5
2	63	63,8	-0,8	-1,2	2	63	63,0	0,0	-0,1
3	62	63,4	-1,4	-2,3	3	62	62,7	-0,7	-1,1
4	62	62,9	-0,9	-1,4	4	62	62,2	-0,2	-0,4
5	62	62,1	-0,1	-0,2	5	61	61,6	-0,6	-0,9
6	61	61,1	-0,1	-0,1	6	60	60,7	-0,7	-1,2
7	60	59,7	0,3	0,5	7	59	59,6	-0,6	-0,9
8	58	58,0	0,0	0,1	8	56	58,1	-2,1	-3,8
9	56	55,8	0,2	0,3	9	53	56,3	-3,3	-6,3
10	52	53,3	-1,3	-2,6	10	51	54,3	-3,3	-6,4
12	46	48,0	-2,0	-4,4	12	46	49,7	-3,7	-7,9
14	42	43,4	-1,4	-3,3	14	42	45,3	-3,3	-7,8
16	39	40,2	-1,2	-3,2	16	39	42,0	-3,0	-7,7
18	37	38,5	-1,5	-4,0	18	41	40,0	1,0	2,5
20	39	37,6	1,4	3,7	20	42	38,8	3,2	7,6
22	40	37,1	2,9	7,2	22	40	38,2	1,8	4,5
24	38	36,9	1,1	2,9	24	39	37,9	1,1	2,8
26	38	36,8	1,2	3,1	26	38	37,7	0,3	0,7
28	37	36,8	0,2	0,7	28	37	37,7	-0,7	-1,8
30	36	36,7	-0,7	-2,1	30	37	37,6	-0,6	-1,7
32	36	36,7	-0,7	-2,0	32	36	37,6	-1,6	-4,5



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 88751					Colada 96405				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	63	64,4	-1,4	-2,2	1	63	63,7	-0,7	-1,1
2	62	64,1	-2,1	-3,4	2	63	63,5	-0,5	-0,8
3	62	63,8	-1,8	-2,8	3	62	63,2	-1,2	-2,0
4	61	63,3	-2,3	-3,7	4	62	62,8	-0,8	-1,3
5	60	62,5	-2,5	-4,2	5	61	62,2	-1,2	-1,9
6	59	61,6	-2,6	-4,4	6	61	61,3	-0,3	-0,4
7	57	60,3	-3,3	-5,7	7	60	60,0	0,0	0,1
8	55	58,6	-3,6	-6,5	8	58	58,2	-0,2	-0,4
9	51	56,5	-5,5	-10,8	9	55	56,0	-1,0	-1,8
10	48	54,1	-6,1	-12,7	10	52	53,4	-1,4	-2,6
12	43	48,8	-5,8	-13,6	12	48	47,7	0,3	0,7
14	39	44,2	-5,2	-13,3	14	43	43,0	0,0	-0,1
16	39	41,0	-2,0	-5,1	16	41	40,2	0,8	1,9
18	41	39,1	1,9	4,5	18	39	38,8	0,2	0,4
20	40	38,2	1,8	4,5	20	40	38,2	1,8	4,5
22	38	37,7	0,3	0,7	22	41	37,9	3,1	7,5
24	37	37,5	-0,5	-1,4	24	39	37,8	1,2	3,0
26	36	37,4	-1,4	-3,9	26	38	37,8	0,2	0,6
28	35	37,4	-2,4	-6,8	28	38	37,7	0,3	0,7
30	35	37,3	-2,3	-6,7	30	37	37,7	-0,7	-2,0
32	34	37,3	-3,3	-9,8	32	36	37,7	-1,7	-4,8



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 96050					Colada 96069				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	64	64,9	-0,9	-1,5	1	64	64,5	-0,5	-0,8
2	64	64,7	-0,7	-1,2	2	64	64,3	-0,3	-0,5
3	63	64,5	-1,5	-2,3	3	63	64,0	-1,0	-1,6
4	63	64,0	-1,0	-1,6	4	63	63,6	-0,6	-0,9
5	63	63,4	-0,4	-0,6	5	62	62,9	-0,9	-1,5
6	62	62,5	-0,5	-0,8	6	62	62,0	0,0	0,0
7	61	61,2	-0,2	-0,4	7	61	60,6	0,4	0,6
8	59	59,6	-0,6	-1,0	8	59	58,8	0,2	0,3
9	57	57,4	-0,4	-0,8	9	57	56,5	0,5	0,8
10	54	54,9	-0,9	-1,7	10	54	53,8	0,2	0,4
12	48	49,3	-1,3	-2,6	12	46	47,9	-1,9	-4,2
14	43	44,4	-1,4	-3,2	14	42	43,1	-1,1	-2,6
16	40	41,2	-1,2	-3,0	16	39	40,2	-1,2	-3,0
18	38	39,5	-1,5	-4,0	18	37	38,7	-1,7	-4,7
20	39	38,7	0,3	0,7	20	38	38,1	-0,1	-0,2
22	40	38,4	1,6	4,1	22	41	37,8	3,2	7,8
24	38	38,2	-0,2	-0,5	24	39	37,7	1,3	3,4
26	38	38,1	-0,1	-0,3	26	38	37,6	0,4	1,0
28	37	38,1	-1,1	-3,0	28	38	37,6	0,4	1,0
30	36	38,1	-2,1	-5,8	30	37	37,6	-0,6	-1,6
32	35	38,1	-3,1	-8,8	32	36	37,6	-1,6	-4,5



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 96395					Colada 96070				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	64	65,0	-1,0	-1,6	1	63	64,5	-1,5	-2,4
2	64	64,8	-0,8	-1,3	2	62	64,3	-2,3	-3,7
3	63	64,5	-1,5	-2,4	3	62	63,9	-1,9	-3,1
4	63	64,0	-1,0	-1,7	4	61	63,4	-2,4	-4,0
5	62	63,4	-1,4	-2,3	5	61	62,7	-1,7	-2,8
6	61	62,5	-1,5	-2,5	6	60	61,7	-1,7	-2,9
7	59	61,3	-2,3	-3,9	7	58	60,4	-2,4	-4,1
8	57	59,8	-2,8	-4,8	8	55	58,6	-3,6	-6,6
9	54	57,8	-3,8	-7,1	9	52	56,4	-4,4	-8,5
10	52	55,5	-3,5	-6,7	10	50	53,9	-3,9	-7,7
12	47	50,3	-3,3	-7,1	12	45	48,3	-3,3	-7,4
14	42	45,6	-3,6	-8,5	14	40	43,5	-3,5	-8,9
16	39	42,2	-3,2	-8,2	16	38	40,4	-2,4	-6,4
18	40	40,2	-0,2	-0,6	18	40	38,7	1,3	3,3
20	42	39,2	2,8	6,6	20	42	37,9	4,1	9,9
22	41	38,7	2,3	5,6	22	41	37,5	3,5	8,6
24	40	38,5	1,5	3,8	24	39	37,3	1,7	4,4
26	39	38,4	0,6	1,6	26	38	37,2	0,8	2,1
28	38	38,3	-0,3	-0,8	28	38	37,2	0,8	2,2
30	37	38,3	-1,3	-3,5	30	37	37,1	-0,1	-0,4
32	36	38,3	-2,3	-6,3	32	36	37,1	-1,1	-3,1



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 96394					Colada 89572				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	65	64,7	0,3	0,5	1	64	64,1	-0,1	-0,2
2	64	64,4	-0,4	-0,7	2	63	63,9	-0,9	-1,5
3	64	64,1	-0,1	-0,2	3	63	63,6	-0,6	-1,0
4	63	63,7	-0,7	-1,1	4	62	63,2	-1,2	-1,9
5	62	63,0	-1,0	-1,7	5	61	62,5	-1,5	-2,5
6	62	62,2	-0,2	-0,3	6	60	61,6	-1,6	-2,6
7	60	61,0	-1,0	-1,6	7	59	60,3	-1,3	-2,2
8	58	59,4	-1,4	-2,5	8	56	58,7	-2,7	-4,8
9	56	57,5	-1,5	-2,7	9	53	56,6	-3,6	-6,8
10	53	55,2	-2,2	-4,2	10	51	54,2	-3,2	-6,2
12	48	50,1	-2,1	-4,4	12	44	48,8	-4,8	-10,9
14	43	45,4	-2,4	-5,6	14	40	44,1	-4,1	-10,3
16	40	42,1	-2,1	-5,2	16	38	41,0	-3,0	-7,9
18	38	40,2	-2,2	-5,7	18	37	39,3	-2,3	-6,1
20	39	39,1	-0,1	-0,4	20	39	38,4	0,6	1,5
22	41	38,6	2,4	5,7	22	40	38,0	2,0	5,0
24	40	38,4	1,6	4,0	24	38	37,8	0,2	0,5
26	38	38,3	-0,3	-0,8	26	37	37,7	-0,7	-2,0
28	37	38,3	-1,3	-3,4	28	37	37,7	-0,7	-1,9
30	36	38,2	-2,2	-6,2	30	36	37,7	-1,7	-4,7
32	36	38,2	-2,2	-6,2	32	35	37,7	-2,7	-7,6



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 87339					Colada 95797				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	63	63,5	-0,5	-0,8	1	64	66,5	-2,5	-3,8
2	63	63,3	-0,3	-0,5	2	64	66,3	-2,3	-3,5
3	62	62,9	-0,9	-1,5	3	63	66,0	-3,0	-4,7
4	62	62,4	-0,4	-0,7	4	63	65,5	-2,5	-4,0
5	62	61,7	0,3	0,5	5	62	64,9	-2,9	-4,7
6	61	60,7	0,3	0,5	6	62	64,0	-2,0	-3,2
7	60	59,3	0,7	1,2	7	61	62,6	-1,6	-2,7
8	58	57,5	0,5	0,8	8	60	60,8	-0,8	-1,3
9	56	55,3	0,7	1,2	9	58	58,4	-0,4	-0,8
10	53	52,8	0,2	0,4	10	56	55,6	0,4	0,6
12	47	47,4	-0,4	-0,8	12	51	49,5	1,5	3,0
14	42	42,8	-0,8	-1,9	14	45	44,3	0,7	1,5
16	40	39,9	0,1	0,4	16	40	41,1	-1,1	-2,8
18	38	38,2	-0,2	-0,7	18	38	39,5	-1,5	-4,0
20	39	37,5	1,5	3,9	20	39	38,8	0,2	0,5
22	41	37,1	3,9	9,5	22	41	38,5	2,5	6,1
24	40	36,9	3,1	7,7	24	40	38,4	1,6	4,1
26	38	36,8	1,2	3,0	26	38	38,3	-0,3	-0,8
28	37	36,8	0,2	0,5	28	37	38,3	-1,3	-3,5
30	36	36,8	-0,8	-2,2	30	36	38,3	-2,3	-6,3
32	35	36,8	-1,8	-5,1	32	35	38,3	-3,3	-9,4



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 97108					Colada 89502				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	63	61,5	1,5	2,4	1	64	65,3	-1,3	-2,0
2	63	61,3	1,7	2,7	2	64	65,1	-1,1	-1,7
3	62	61,1	0,9	1,5	3	63	64,9	-1,9	-3,0
4	61	60,6	0,4	0,6	4	63	64,5	-1,5	-2,4
5	61	60,0	1,0	1,7	5	62	63,9	-1,9	-3,1
6	60	59,0	1,0	1,7	6	61	63,1	-2,1	-3,4
7	58	57,6	0,4	0,7	7	59	61,9	-2,9	-4,8
8	55	55,6	-0,6	-1,1	8	57	60,1	-3,1	-5,5
9	52	53,1	-1,1	-2,1	9	54	57,9	-3,9	-7,2
10	50	50,2	-0,2	-0,3	10	52	55,1	-3,1	-6,0
12	44	44,3	-0,3	-0,7	12	47	49,0	-2,0	-4,4
14	39	40,1	-1,1	-2,9	14	43	44,0	-1,0	-2,4
16	37	38,0	-1,0	-2,7	16	40	41,1	-1,1	-2,7
18	39	37,1	1,9	5,0	18	38	39,6	-1,6	-4,3
20	41	36,7	4,3	10,5	20	39	39,0	0,0	-0,1
22	40	36,5	3,5	8,7	22	41	38,8	2,2	5,4
24	39	36,5	2,5	6,5	24	40	38,7	1,3	3,3
26	38	36,5	1,5	4,0	26	38	38,6	-0,6	-1,7
28	37	36,5	0,5	1,5	28	37	38,6	-1,6	-4,4
30	37	36,5	0,5	1,5	30	36	38,6	-2,6	-7,3
32	36	36,5	-0,5	-1,3	32	35	38,6	-3,6	-10,3



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 96411					Colada 96539				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	64	66,4	-2,4	-3,7	1	63	63,9	-0,9	-1,4
2	64	66,2	-2,2	-3,4	2	63	63,7	-0,7	-1,1
3	63	65,9	-2,9	-4,7	3	62	63,4	-1,4	-2,2
4	63	65,5	-2,5	-4,0	4	62	62,9	-0,9	-1,4
5	62	64,9	-2,9	-4,7	5	61	62,2	-1,2	-1,9
6	61	64,1	-3,1	-5,0	6	60	61,1	-1,1	-1,8
7	60	62,8	-2,8	-4,7	7	59	59,6	-0,6	-1,0
8	58	61,1	-3,1	-5,3	8	57	57,5	-0,5	-0,9
9	55	58,9	-3,9	-7,0	9	54	54,9	-0,9	-1,7
10	52	56,2	-4,2	-8,0	10	52	51,9	0,1	0,1
12	47	50,1	-3,1	-6,7	12	47	45,8	1,2	2,6
14	42	45,0	-3,0	-7,1	14	42	41,2	0,8	1,9
16	39	41,8	-2,8	-7,1	16	40	38,7	1,3	3,4
18	38	40,1	-2,1	-5,6	18	38	37,5	0,5	1,3
20	40	39,4	0,6	1,6	20	39	37,0	2,0	5,1
22	41	39,1	1,9	4,8	22	41	36,8	4,2	10,3
24	39	38,9	0,1	0,2	24	40	36,7	3,3	8,2
26	38	38,9	-0,9	-2,3	26	39	36,7	2,3	6,0
28	37	38,8	-1,8	-5,0	28	38	36,7	1,3	3,5
30	36	38,8	-2,8	-7,8	30	37	36,7	0,3	0,9
32	36	38,8	-2,8	-7,8	32	36	36,7	-0,7	-1,8



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 96389					Colada 96549				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	64	63,7	0,3	0,5	1	63	64,1	-1,1	-1,7
2	63	63,5	-0,5	-0,8	2	63	63,9	-0,9	-1,4
3	62	63,2	-1,2	-1,9	3	62	63,5	-1,5	-2,5
4	62	62,8	-0,8	-1,2	4	62	63,1	-1,1	-1,7
5	61	62,1	-1,1	-1,7	5	61	62,4	-1,4	-2,3
6	60	61,0	-1,0	-1,7	6	60	61,4	-1,4	-2,3
7	58	59,4	-1,4	-2,5	7	59	60,0	-1,0	-1,8
8	55	57,3	-2,3	-4,2	8	57	58,2	-1,2	-2,2
9	52	54,6	-2,6	-5,0	9	54	56,0	-2,0	-3,7
10	49	51,5	-2,5	-5,0	10	52	53,4	-1,4	-2,6
12	44	45,2	-1,2	-2,6	12	47	47,7	-0,7	-1,5
14	42	40,7	1,3	3,1	14	42	43,0	-1,0	-2,4
16	39	38,4	0,6	1,6	16	40	40,1	-0,1	-0,2
18	37	37,4	-0,4	-1,0	18	38	38,6	-0,6	-1,5
20	38	37,0	1,0	2,7	20	39	37,8	1,2	3,0
22	40	36,8	3,2	8,0	22	41	37,5	3,5	8,5
24	39	36,8	2,2	5,8	24	40	37,4	2,6	6,6
26	38	36,7	1,3	3,3	26	39	37,3	1,7	4,3
28	37	36,7	0,3	0,7	28	38	37,3	0,7	1,9
30	36	36,7	-0,7	-2,0	30	37	37,3	-0,3	-0,7
32	36	36,7	-0,7	-2,0	32	36	37,3	-1,3	-3,5



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 88784					Colada 89513				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	64	63,9	0,1	0,2	1	64	64,7	-0,7	-1,1
2	64	63,7	0,3	0,5	2	64	64,5	-0,5	-0,8
3	63	63,4	-0,4	-0,6	3	63	64,2	-1,2	-1,9
4	63	62,9	0,1	0,1	4	63	63,8	-0,8	-1,2
5	62	62,3	-0,3	-0,5	5	62	63,1	-1,1	-1,8
6	62	61,4	0,6	1,0	6	62	62,3	-0,3	-0,4
7	61	60,1	0,9	1,5	7	60	61,0	-1,0	-1,7
8	60	58,4	1,6	2,7	8	58	59,4	-1,4	-2,5
9	58	56,3	1,7	3,0	9	55	57,4	-2,4	-4,4
10	55	53,7	1,3	2,3	10	53	55,0	-2,0	-3,9
12	49	48,2	0,8	1,6	12	49	49,7	-0,7	-1,4
14	42	43,5	-1,5	-3,7	14	42	44,9	-2,9	-7,0
16	39	40,6	-1,6	-4,0	16	39	41,7	-2,7	-6,9
18	41	39,0	2,0	4,9	18	41	39,9	1,1	2,7
20	42	38,3	3,7	8,9	20	42	39,0	3,0	7,2
22	41	37,9	3,1	7,5	22	40	38,6	1,4	3,6
24	39	37,8	1,2	3,1	24	39	38,4	0,6	1,6
26	38	37,7	0,3	0,7	26	38	38,3	-0,3	-0,7
28	37	37,7	-0,7	-1,9	28	37	38,2	-1,2	-3,4
30	37	37,7	-0,7	-1,8	30	37	38,2	-1,2	-3,3
32	36	37,7	-1,7	-4,6	32	36	38,2	-2,2	-6,2



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 89623					Colada 88897				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	63	63,1	-0,1	-0,2	1	64	65,2	-1,2	-1,9
2	63	62,9	0,1	0,1	2	63	65,0	-2,0	-3,2
3	62	62,6	-0,6	-0,9	3	63	64,7	-1,7	-2,7
4	62	62,1	-0,1	-0,1	4	62	64,2	-2,2	-3,5
5	61	61,4	-0,4	-0,6	5	61	63,5	-2,5	-4,1
6	58	60,3	-2,3	-4,0	6	60	62,6	-2,6	-4,3
7	55	58,9	-3,9	-7,2	7	58	61,3	-3,3	-5,6
8	52	57,1	-5,1	-9,8	8	56	59,5	-3,5	-6,3
9	50	54,8	-4,8	-9,7	9	52	57,4	-5,4	-10,4
10	47	52,2	-5,2	-11,0	10	50	54,9	-4,9	-9,8
12	42	46,6	-4,6	-11,0	12	45	49,3	-4,3	-9,7
14	39	42,1	-3,1	-8,0	14	40	44,5	-4,5	-11,2
16	37	39,3	-2,3	-6,2	16	40	41,2	-1,2	-3,1
18	39	37,9	1,1	2,9	18	42	39,5	2,5	6,1
20	40	37,2	2,8	7,0	20	43	38,6	4,4	10,3
22	39	36,9	2,1	5,4	22	41	38,1	2,9	7,0
24	38	36,8	1,2	3,3	24	40	38,0	2,0	5,1
26	37	36,7	0,3	0,8	26	39	37,9	1,1	2,9
28	37	36,7	0,3	0,9	28	38	37,8	0,2	0,4
30	36	36,7	-0,7	-1,8	30	37	37,8	-0,8	-2,2
32	35	36,7	-1,7	-4,7	32	37	37,8	-0,8	-2,2



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 96285					Colada 89643				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	63	64,4	-1,4	-2,2	1	63	61,3	1,7	2,8
2	63	64,2	-1,2	-1,9	2	63	61,0	2,0	3,1
3	62	63,9	-1,9	-3,0	3	62	60,7	1,3	2,1
4	62	63,4	-1,4	-2,2	4	62	60,2	1,8	2,8
5	61	62,7	-1,7	-2,7	5	61	59,6	1,4	2,3
6	61	61,7	-0,7	-1,1	6	60	58,6	1,4	2,3
7	60	60,3	-0,3	-0,5	7	58	57,4	0,6	1,1
8	59	58,5	0,5	0,9	8	55	55,7	-0,7	-1,4
9	57	56,2	0,8	1,4	9	52	53,7	-1,7	-3,3
10	55	53,5	1,5	2,6	10	50	51,4	-1,4	-2,8
12	51	47,8	3,2	6,2	12	45	46,4	-1,4	-3,2
14	46	43,1	2,9	6,3	14	41	42,2	-1,2	-3,0
16	42	40,1	1,9	4,5	16	38	39,5	-1,5	-4,0
18	40	38,6	1,4	3,6	18	40	38,1	1,9	4,9
20	41	37,8	3,2	7,7	20	41	37,3	3,7	8,9
22	42	37,5	4,5	10,7	22	39	37,0	2,0	5,1
24	40	37,4	2,6	6,6	24	38	36,8	1,2	3,0
26	39	37,3	1,7	4,3	26	37	36,8	0,2	0,6
28	38	37,3	0,7	1,9	28	36	36,7	-0,7	-2,1
30	37	37,3	-0,3	-0,7	30	36	36,7	-0,7	-2,0
32	36	37,3	-1,3	-3,5	32	35	36,7	-1,7	-4,9



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

Colada 89620					Colada 95628				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	63	64,8	-1,8	-2,8	1	63	63,9	-0,9	-1,4
2	63	64,6	-1,6	-2,5	2	63	63,7	-0,7	-1,1
3	62	64,3	-2,3	-3,7	3	62	63,3	-1,3	-2,1
4	62	63,8	-1,8	-3,0	4	62	62,8	-0,8	-1,3
5	61	63,2	-2,2	-3,6	5	61	62,1	-1,1	-1,8
6	59	62,3	-3,3	-5,6	6	60	61,0	-1,0	-1,7
7	57	61,1	-4,1	-7,2	7	59	59,6	-0,6	-1,0
8	53	59,5	-6,5	-12,3	8	57	57,7	-0,7	-1,3
9	50	57,5	-7,5	-15,0	9	55	55,4	-0,4	-0,7
10	48	55,1	-7,1	-14,8	10	52	52,7	-0,7	-1,3
12	42	49,8	-7,8	-18,5	12	47	47,0	0,0	0,0
14	39	45,0	-6,0	-15,4	14	42	42,4	-0,4	-0,9
16	37	41,8	-4,8	-12,9	16	40	39,5	0,5	1,2
18	39	40,0	-1,0	-2,4	18	38	38,0	0,0	-0,1
20	40	39,1	0,9	2,4	20	39	37,3	1,7	4,3
22	38	38,6	-0,6	-1,7	22	41	37,0	4,0	9,7
24	37	38,4	-1,4	-3,9	24	40	36,9	3,1	7,8
26	36	38,3	-2,3	-6,5	26	39	36,8	2,2	5,6
28	36	38,3	-2,3	-6,4	28	38	36,8	1,2	3,1
30	35	38,3	-3,3	-9,4	30	37	36,8	0,2	0,6
32	35	38,3	-3,3	-9,4	32	36	36,8	-0,8	-2,2



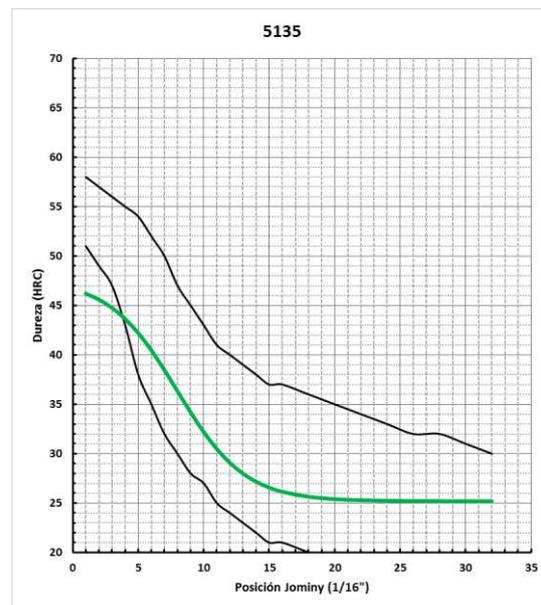
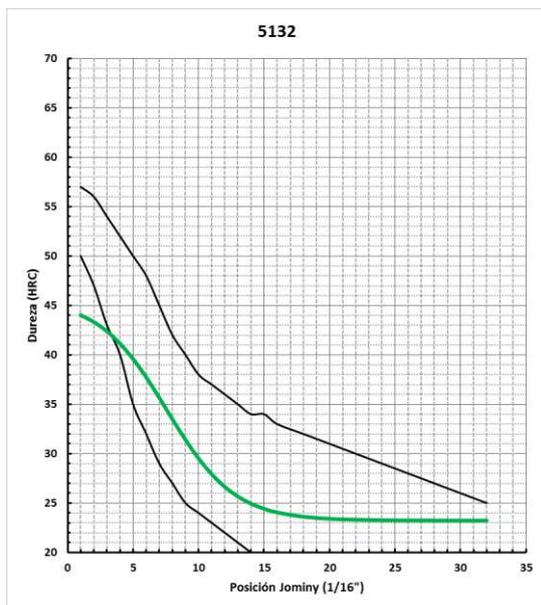
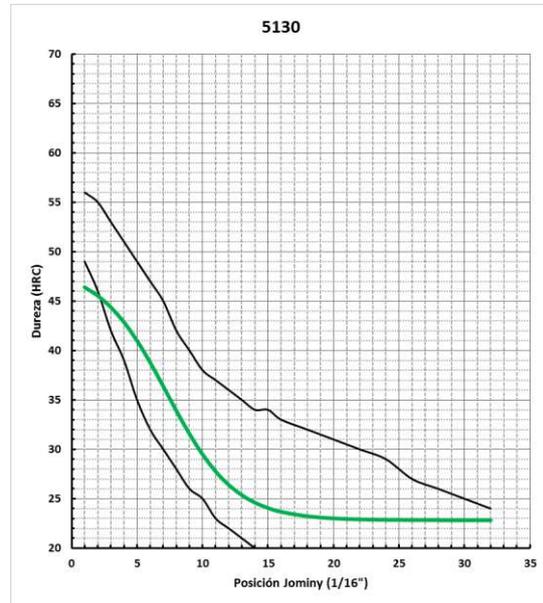
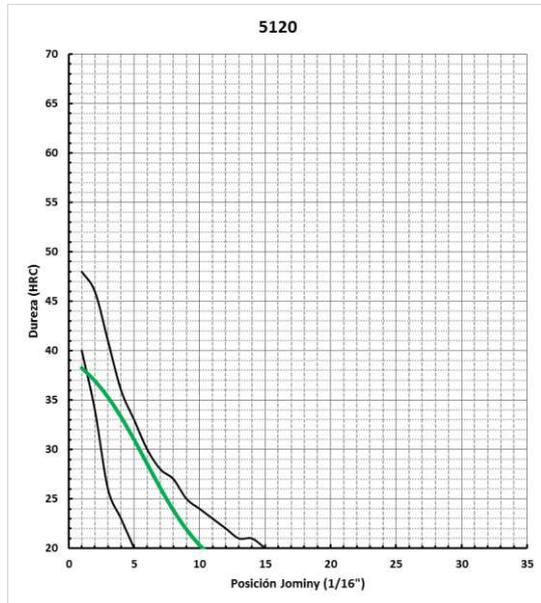
Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

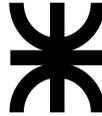
Colada 89470					Colada 89529				
Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]	Posición [1/16"]	Dureza medida [HRC]	Dureza predicha [HRC]	Error [HRC]	Error [%]
1	63	63,9	-0,9	-1,4	1	64	66,4	-2,4	-3,7
2	63	63,7	-0,7	-1,0	2	64	66,2	-2,2	-3,4
3	62	63,4	-1,4	-2,2	3	63	65,8	-2,8	-4,5
4	62	62,9	-0,9	-1,4	4	63	65,4	-2,4	-3,8
5	61	62,2	-1,2	-2,0	5	62	64,8	-2,8	-4,5
6	61	61,2	-0,2	-0,4	6	62	63,9	-1,9	-3,1
7	60	59,8	0,2	0,3	7	61	62,7	-1,7	-2,8
8	58	58,0	0,0	0,1	8	61	61,2	-0,2	-0,3
9	56	55,6	0,4	0,7	9	59	59,2	-0,2	-0,4
10	53	52,8	0,2	0,4	10	58	56,9	1,1	1,9
12	48	46,9	1,1	2,2	12	56	51,6	4,4	7,8
14	42	42,2	-0,2	-0,6	14	50	46,7	3,3	6,6
16	39	39,4	-0,4	-1,1	16	43	43,2	-0,2	-0,4
18	37	38,1	-1,1	-2,9	18	40	41,1	-1,1	-2,7
20	39	37,4	1,6	4,0	20	41	40,0	1,0	2,5
22	40	37,2	2,8	7,0	22	42	39,4	2,6	6,1
24	38	37,1	0,9	2,4	24	40	39,2	0,8	2,1
26	37	37,0	0,0	-0,1	26	39	39,1	-0,1	-0,1
28	36	37,0	-1,0	-2,8	28	38	39,0	-1,0	-2,6
30	36	37,0	-1,0	-2,8	30	37	39,0	-2,0	-5,3
32	35	37,0	-2,0	-5,7	32	37	39,0	-2,0	-5,3



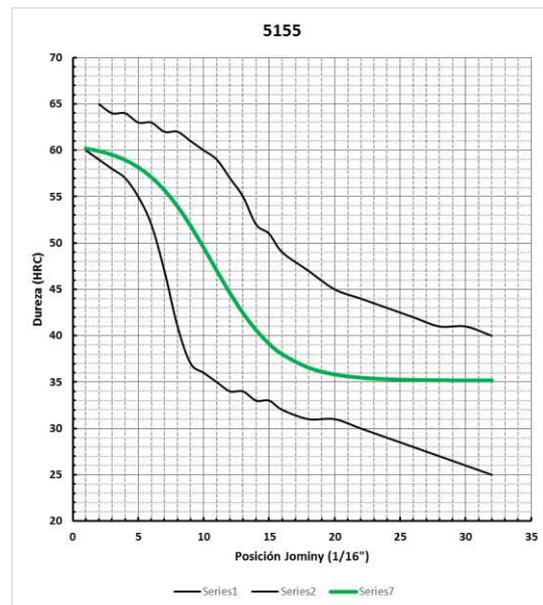
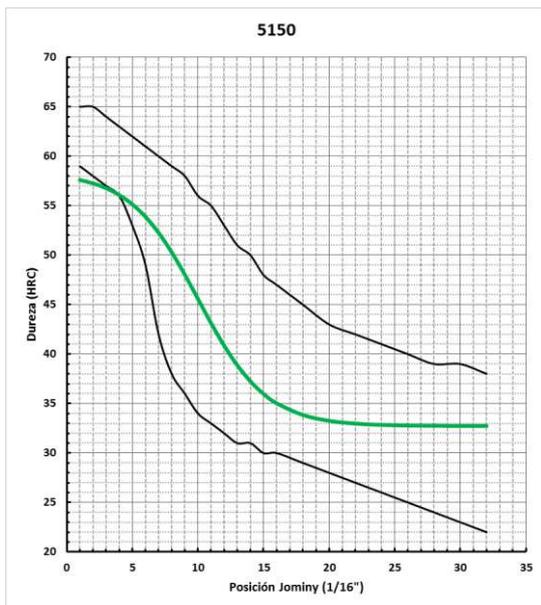
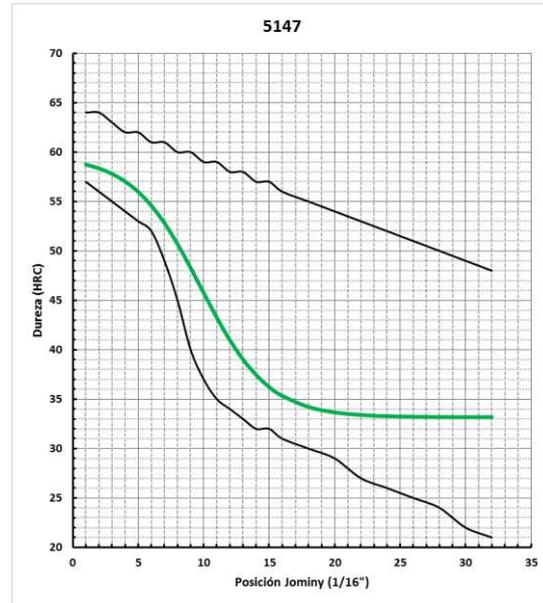
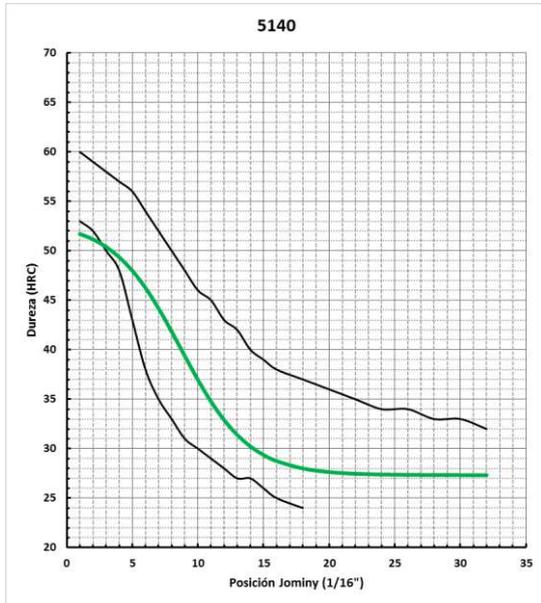
Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

8.3 Anexo 3– Comparaciones con otras aleaciones de la familia 5100, utilizando una composición media de cada rango



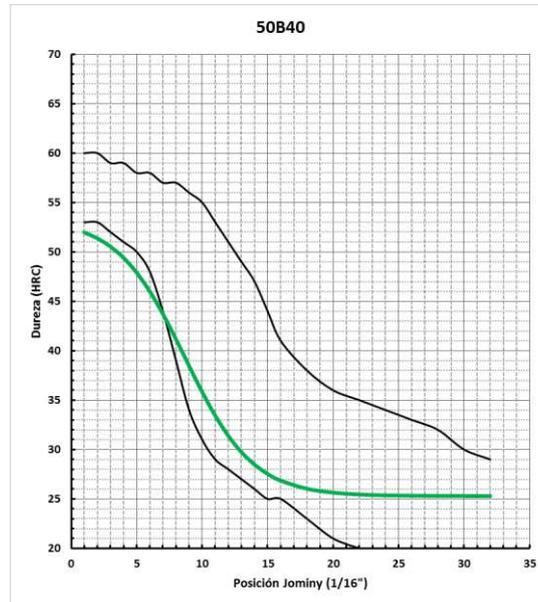


Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160





Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160





Predicción de la curva teórica de templeabilidad para un Acero SAE 5160

9. Bibliografía y referencias

- [1] Norma ASTM A255 - 2010.
- [2] ASM International. ASM Handbook Volume 4: Heat Treating. (2002).
- [3] Análisis del desgaste progresivo en la herramienta de maquinado utilizando la ecuación de Taylor. Carlos Flores Galvan. (2015).
- [4] Estudio y clasificación de los aceros
(<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn101.html>).
- [5] Tratamientos térmicos de los aceros. José Apraiz Barreiro. Editorial Dossat. (1958).
- [6] Norma ASTM E112 – 13:1996.
- [7] Atlas of Continuous Cooling Transformation Diagrams for Engineering Steels. ASM INTL. ISBN – 10: 087170093X (June 1980).
- [8] Norma IRAM IAS 5160.
- [9] Principios de metalurgia física. Robert E. Reed–Hill. Editorial Continental SA Mexico (1972).
- [10] Hardenability Concepts whith Aplicaciones to Steel – Editors D.V Doane & J.S. Kirkaldy. (1977).
- [11] Prediction of Alloy Hardenability from Thermodynamic and Kinetic Data – J. S. Kirkaldy – Metallurgical Transactions – october 1973.
- [12] Heat Treatment ´76: proceedings of the 16th International Heat Treatment Conference. ISBN: 0904357058. May 1976.
- [13] Prediction of Hardenability Curves for Non-Boron Steels via a Combined Machine Learning Model – Xiaoxiao Geng, Shuize Wang, Asad Ullah, Guilin Wu and Hao Wang - Revista Materials 2022,15,3127.
- [14] A Computational Model for the Prediction of Steel Hardenability - M. VICTOR LI, DAVID V. NIEBUHR, LEMMY L. MEEKISHO, and DAVID G. ATTERIDGE – Metallurgical and materials Transactions B. Volumen 29B, June 1998.
- [15] Prediction of Jominy Hardness Profiles of Steels Using Artificial Neural Networks – Journal of materials and engineering an Performance, W G Vermeulen, Volumen (5) 1, February 1996.



Predicción de la curva teórica de templabilidad para un Acero SAE 5160

- [16] The modelling of hardenability using neural networks, L.A. Dobrzanaski, W. Sitek, Journal of Materials Processing Technology 92-93 (1999).
- [17] The Prediction of Hardenability Using Neural Networks - M. KNAP, J. FALKUS, A. ROZMAN, K. KONOPKA, J. LAMUT - ARCHIVES OF METALLURGY AND MATERIALS – Volumen 59 – 2014.



Anexo I

Fecha: 03/03/22

SOLICITUD DE TEMA DE TRABAJO FINAL DE GRADO

Sr. Director de Departamento:

Me dirijo a Ud. a fin de solicitar la aprobación del tema de TRABAJO FINAL que propongo a continuación:

TEMA:

Nombre: Predicción de la curva teórica de templabilidad para un acero SAE 5160

Descripción: *Se pretende obtener una ecuación precisa que relacione la composición química del acero con la curva de templabilidad (Jominy), a partir de datos experimentales.*

En la actualidad, si bien existen distintos métodos para predecir las curvas de templabilidad de un determinado acero, presentan demasiado sesgo respecto a las curvas experimentales. Por lo que el objetivo del trabajo es la de determinar una ecuación específica con un nivel bajo de error de entre 1 o 2 unidades Rockwell C entre la curva real obtenida del ensayo respecto de la teórica.

Tutor de Trabajo Final:

Nombre: Nicolas Matías Articó

Cargo: Adicional Dedicación Simple

Dirección Personal o Laboral: Santa Rosa 2761

Tel:351-2672871 e-mail: nicolasartico@gmail.com

Firma del Tutor:.....

Datos del Alumno

Nombre y Apellido: Julio Miguel Costa

Carrera: Ingeniería Metalúrgica

Matrícula: 69286

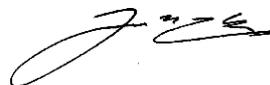
Materias que faltan aprobar: Proyecto Final

Dirección: Marcelo T de Alvear 685 – 7° F

Localidad: Córdoba Provincia: Córdoba

Tel: [351-6956637](tel:351-6956637) e-mail: jcosta@inti.gob.ar; juliomicosta@gmail.com

Firma del Alumno:





Anexo II

Fecha: 12/03/2022

TRIBUNAL DE ACEPTACIÓN DE TEMA PARA EL DESARROLLO DE TRABAJO FINAL DE GRADO

Tema: Predicción de la curva teórica de templabilidad para un acero SAE 5160

Integrantes:

- 1 Presidente: L. Sanchez
- 2 Integrante: D. Suarez
- 3 Integrante: L. Aldet

Sr. Profesor

De mi mayor consideración:

Me dirijo a Ud. con la finalidad de solicitarle analice la descripción del tema de trabajo final de grado propuesto por el alumno: Julio Miguel Costa.

De acuerdo al sistema vigente, como integrante del tribunal, deberá **analizar** el tema propuesto para su **aceptación, rechazo y/o realización de observaciones**, de acuerdo al Anexo III.

La aprobación del tema propuesto es requisito imprescindible, para que los alumnos puedan dar inicio a su trabajo final, de manera que agradeceré devolver su opinión dentro de los próximos **7 (siete) días**.

Asimismo de acuerdo a lo establecido en el reglamento vigente:

5.a) - El tema del trabajo final de grado será de elección del alumno y podrá pertenecer a cualquiera de las áreas de la profesión a la cual se postula.

5.b) – En cuanto a su originalidad y antecedentes, el tema podrá ser:

- Parte integrante de un desarrollo más complejo, para ser continuado o completado en el futuro, o como continuador de otra u otras Trabajos Finales desarrollados anteriormente.
- Original y desarrollado integralmente, sin dejar previsto futuras ampliaciones

5.c) - Se define como "original" al realizado por el alumno (no es un plagio). Esto es, cuando no existe otro de las mismas características entre los trabajos finales ya realizados. Por lo tanto, podrán proponerse también, trabajos finales con temas ya realizados, siempre y cuando se propongan nuevos enfoques, o técnicas o aplicaciones respecto a los anteriores (aplicación de nuevas tecnologías, nuevos métodos, profundización de algún tema desarrollado anteriormente, etc.).

Sin otro particular, saludo a Ud. muy atentamente.

Director de Departamento:



Anexo III

Fecha: 16/03/2022

INFORME DE ACEPTACIÓN DE TEMA PARA TRABAJO FINAL DE GRADO

Título del trabajo: Predicción de la curva teórica de templabilidad para un acero SAE 5160.....

- El tema puede aceptarse en su forma actual sin modificaciones.
- El tema puede aceptarse pero el/los alumno/s debería/n considerar las correcciones sugeridas.
- Rechazar.

Observaciones:

.....

Firma del Titular



Anexo IV

Fecha: 06/09/2022

PRESENTACIÓN DEL INFORME DEL TRABAJO FINAL DE GRADO

Sr. Director Departamento

De mi consideración:

Habiendo finalizado la confección del informe de mi trabajo final de grado, me dirijo a Ud. a fin de solicitar la evaluación del mismo, de acuerdo al artículo. 10.b) del "REGLAMENTO GENERAL DE TRABAJO FINAL DE GRADO".

Firma del Alumno:

Visto Bueno:

Firma del Tutor:



Anexo V

Fecha: 07/09/2022

SOLICITUD DE EVALUACIÓN DEL TRABAJO FINAL DE GRADO

Tema: Predicción de la curva teórica de templabilidad para un acero SAE 5160

Alumno/s: Julio M. Costa

Integrantes del Tribunal:

- 1- Presidente de la Mesa: L. Sanchez
- 2- Integrante de la Mesa: D. Suarez
- 3- Integrante de la Mesa: L. Aldet

Sr. Profesor

De mi mayor consideración:

Me dirijo a usted con el fin de acercarle la copia del presente trabajo final de grado. De acuerdo a la reglamentación, como integrante de la Mesa, deberá corregir el trabajo realizando las observaciones pertinentes y confeccionando un informe de acuerdo al formulario adjunto. El tiempo establecido para la corrección es de **quince (15) días**, transcurrido el mismo se deberá devolver el informe con la correspondiente evaluación (Anexo VI).

Asimismo, solicito me indique su disponibilidad de horarios para combinar la realización del examen final.

Sin otro particular, saludo a Ud. muy atentamente.

Director de Departamento



Anexo VI

Fecha: 14/09/2022

INFORME DE ACEPTACIÓN DEL TRABAJO FINAL DE GRADO

Título del Trabajo: Predicción de la curva teórica de templabilidad para un acero SAE 5160

- El trabajo debe aceptarse en su forma actual sin modificaciones.
- El trabajo debe aceptarse pero el/los autor/es deberá/n considerar las correcciones opcionales sugeridas.
- Rechazar.

Observaciones:

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Presidente Mesa
Firma

2º Integrante Mesa
Firma

3º Integrante Mesa
Firma

Horarios disponibles para el examen: Viernes 23 de Octubre 18:00 hs.

.....
.....