CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción.

Desgaste en herramentales industriales es una causa que ha despertado el interés de los investigadores en los últimos años, principalmente en la industria metal-mecánica y fundición, donde los herramentales están en contacto con agentes erosivos. Tal es el caso de las cajas de corazones utilizadas para la fabricación de cabezas y monobloques para motores de combustión interna. El desgaste erosivo de estas cajas puede ocasionar que los corazones producidos presenten defectos dimensionales que posteriormente afecten el funcionamiento de un motor.

Durante el proceso de soplado se lleva a cabo la formación del corazón por medio de la inyección de una mezcla de arena sílica y resina, impactándose sobre el herramental. Es aquí donde ocurre el fenómeno de erosión, donde una determinada cantidad de soplos, que son traducidos a una cantidad de partículas de arena sílica, erosionan la superficie del herramental. Esto produce

que el herramental cambie sus dimensiones. Por consecuencia al existir un cambio de dimensiones en las cajas de corazones, producto de la erosión, existirá un incremento dimensional del corazón. Esto a su vez ocasionará que las paredes de la cabeza o monobloques sean más delgadas, llegando al extremo de estar fuera de especificación y poniendo en peligro la integridad de la pieza durante su operación.

El sector automotriz, siendo uno de los sectores que más apoyo han otorgado al desarrollo tecnológico, ha emprendido un amplio estudio sobre el comportamiento tribológico de los herramentales involucrados en la producción de las cajas de corazones de arena. Las empresas involucradas en este proyecto son: NEMAK S.A. de C.V. empresa de la localidad, líder mundial en la fabricación de cabezas y monobloques de aluminio, MECCANICA BASSI fabricante de herramentales con sede en Italia, y la U.A.N.L. F.I.M.E. Programa Doctoral en Ingeniería en Materiales.

Los avances tecnológicos reflejan la necesidad creciente de optimizar cada vez más los recursos así como satisfacer las necesidades industriales que se tienen, en este caso el establecer los mecanismos de desgaste es esencial para posteriormente estudiarlos y proponer soluciones factibles.

El objetivo de esta tesis es diseñar, construir, instrumentar y poner en operación una máquina tribológica que sea capaz de realizar pruebas de desgaste erosivo en aceros grado herramienta, así como explorar el comportamiento erosivo del acero grado herramienta H-13 para diferentes tratamientos térmicos con un intervalo de durezas, por el impacto de partículas de arena sílica a diferentes ángulos.

El sector industrial requiere de una optimización de los recursos utilizados en su proceso de elaboración de corazones, por lo anterior se realizó toda una metodología para llevar a cabo el estudio del desgaste erosivo producido en el

herramental. Para esto se diseñó y construyó todo un sistema capaz de simular el proceso de erosión, con la versatilidad de realizar un gran número de estudios debido a la gran cantidad de variables que intervienen.

La hipótesis que fundamenta este trabajo es: los mecanismos básicos del fenómeno de erosión encontrados en las cajas de corazón de la industria de la fundición, pueden ser reproducidos a nivel laboratorio para su estudio analítico, si y solo si se cuenta con un sistema de pruebas tribológico que reproduzca de manera controlada las variables del proceso.

El alcance experimental del presente trabajo es: El material a erosionar es acero grado herramienta H-13, en estado recocido y tratado térmicamente a durezas de 30, 40, 55 HRc, utilizando como partícula erosiva la arena sílica empleada en la fabricación de corazones, impactándose a ángulos de 20º, 40º, 75º, 90º. El presente trabajo no contempla la utilización de otro tipo de partícula erosiva o materiales a erosionar.

La metodología empleada en esta investigación fue la siguiente. Se planteó el problema, el cual forma parte de un proceso industrial. Se realizó una serie de visitas a la empresa con la finalidad de analizar el proceso. Una vez establecidas las condiciones operativas se planteó el alcance del presente trabajo el cual fue el comportamiento tribológico de los materiales bajo las condiciones antes mencionadas.

Para esto se trabajó en el diseño y construcción de una máquina para pruebas tribológicas bajo condiciones de laboratorio. Como principio para la elaboración de la metodología de pruebas tribológicas se diseño y construyó la máquina prototipo, esto con la finalidad de realizar algunas pruebas preliminares las cuales dieron como resultado cómo se comportarían algunos componentes de la máquina, así como establecer algunas restricciones dimensionales del espécimen. Se realizó el diseño y construcción de la máquina contemplando las

condiciones a las que serán elaboradas las pruebas. Se realizaron pruebas de erosión al acero H-13 y se estudiaron los resultados de las curvas de erosión para los diferentes tratamientos térmicos y ángulos de impacto.

CAPÍTULO 2

ACEROS GRADO HERRAMIENTA.

2.1 Introducción.

La revolución industrial condujo a un fuerte crecimiento de innovaciones tecnológicas y procesos de producción, marcando el cambio de un tipo de economía agrícola a una industrial. La expansión del comercio, la acumulación del capital, aunado al crecimiento de la población, fueron factores determinantes para el inicio de este proceso que se caracterizó por la utilización masiva de materiales tales como el hierro y el acero [1].

Un acero herramienta es cualquier acero utilizado para fabricar herramientas de corte, conformado o bien darle forma a un material introduciéndolo en un componente adaptado para producir una pieza. La demanda de este tipo de aceros es creciente y actualmente tienen aleaciones complejas con alto contenido de elementos aleantes como son: tungsteno, molibdeno, vanadio, manganeso y cromo entre otros. Estos aleantes permiten un incremento en las propiedades para satisfacer un servicio cada vez mas severo y un mayor control dimensional [2].

La adición de elementos aleantes permiten a los aceros tener propiedades específicas, lo que nos permite contar con diferentes tipos de aplicaciones en donde se pueden utilizar, como son: estampado, troquelado, corte, cizallado, estirado, laminado, extrusión, entre otras.

Con unas cuantas excepciones, los aceros para herramientas deben someterse a tratamientos térmicos para desarrollar combinaciones específicas para lograr una alta resistencia al desgaste, a la deformación o a la fractura bajo cargas muy altas y al ablandamiento a altas temperaturas. La mayoría de estos aceros son primeramente formados o maquinados para darles la forma, después son tratados térmicamente y finalmente maquinados a su dimensión final.

2.2 Clasificación.

Existen diversas clasificaciones de los aceros grado herramienta, las cuales pueden ser por condiciones del templado, el contenido de la aleación, o la clasificación basada en la aplicación en que se requiera.

El método de identificación y tipo de clasificación de los aceros para herramientas adoptado por la AISI (American Iron and Steel Institute), tiene en cuenta el método de templado, aplicaciones, características particulares y aceros para industrias específicas. Los aceros para herramientas que más se utilizan se han clasificado en siete grupos y cada uno es identificado por una combinación de letras y números, ver tabla 2.1 [3].

Tabla 2.1 Clasificación de los aceros herramienta [3]

Grupo	S	Tipo
Templables en agua.	W	
Resistentes al impacto.	S	
Para Trabajo en frió	O	Templable en aceite.
	A	Mediana aleación y templable en aire.
	D	Alto carbono, alto cromo.
Para Trabajo en caliente	H	(H1-H19, incluso, base cromo;
		H20-H39, incluso, base tungsteno;
		H40-H59, incluso, base molibdeno)
Alta velocidad	T	Base tungsteno.
	M	Base molibdeno.
Para moldes	P	Aceros para molde (P1-P19, incluso, bajo C
		P20-P39, incluso, otros tipos)
Propósitos específicos.	L	Baja aleación
	F	Carbono-tungsteno

2.3 Selección y propiedades.

Cuando se pretende seleccionar un acero de grado herramienta, no debe limitarse a un solo tipo o a una serie en particular. Algunas de las consideraciones que deben tomarse en cuenta son: las propiedades mecánicas, la productividad, el mantenimiento, la facilidad de elaboración y el costo por pieza unitaria hecha por la herramienta [3].

La mayoría de los aceros herramientas deberán cumplir con ciertos requerimientos como son dureza, tenacidad, maquinabilidad y resistencia al desgaste [3].

Propiedades comparativas.

Los aceros grado herramienta se califican por sus características de servicio y por la forma en que son procesados, dando lugar a gráficas comparativas como las que se muestran en la figura 2.1, donde la tenacidad, la dureza al rojo y la resistencia al desgaste se encuentran valoradas adimensionalmente del 1 al 9 para diferentes aceros.

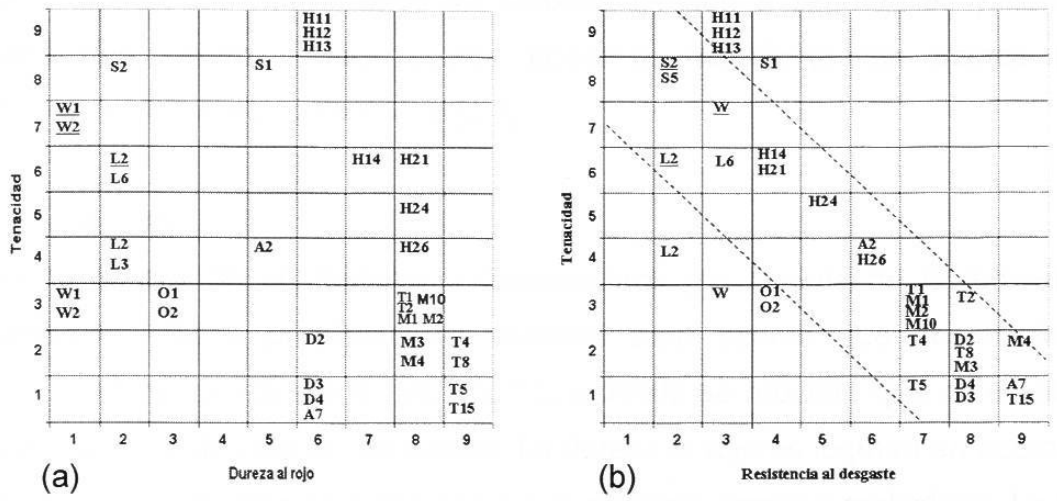

Fig. 2.1 Diagramas comparativos [2].
Tenacidad contra (a) Dureza al rojo, (b) resistencia al desgaste.

Las gráficas muestran los valores de las diferentes propiedades en un intervalo de valores que van del 1 al 9, siendo los valores más altos otorgados para aquellos con las mejores propiedades [2].

Resistencia al desgaste.

Si bien los aceros grado herramienta son considerados como aceros con buena resistencia al desgaste, la cual será dependiente de las condiciones a las que sea sometido el acero. La resistencia al desgaste considerada como una repuesta del material al sistema, será analizada a profundidad en el capítulo de desgaste.

Tenacidad.

Se define como la capacidad de un material para absorber energía durante la deformación, este término es aplicado a los aceros grado herramienta como la capacidad para resistir a la ruptura. Las herramientas deben de ser artículos rígidos. Una ligera deformación plástica en la herramienta, será motivo suficiente para no poder emplearla más. Esta propiedad es óptima en los aceros aleados al bajo y al medio carbono de los grupos S y H, los cuales

forman la base de los aceros aleados resistentes al impacto, ver figura 2.1. Por el contrario, los aceros altos en carbono tienden a ser frágiles y con baja tenacidad dentro de los cuales podemos mencionar los aceros grado herramienta para trabajo en frío [2,3].

Dureza al rojo.

Es la dureza de un material a temperaturas por encima de la temperatura ambiente. Dicha propiedad es esencial para aceros que se emplean a temperaturas por arriba de los 400 ºC, y donde se requiere que no exista una variación significativa en su dureza. La dureza al rojo es lograda en aceros que contienen elementos aleantes como el tungsteno, cromo y molibdeno. La figura 2.1(a) muestra los grupos para trabajo en caliente y alta velocidad, como los aceros con mejor dureza al rojo [2,3].

Maquinabilidad.

Debido a que un acero herramienta debe de ser llevado a determinadas dimensiones, la capacidad del material para ser cortado libremente y producir un buen terminado después de que se le maquina es indispensable. El principal factor que afecta a la maquinabilidad es la dureza en condición de recocido, la presencia de carbono en combinación con elementos formadores de carburos, como el vanadio, cromo y molibdeno, reducen notablemente la maquinabilidad [3].

En la Tabla 2.2 se encuentran los valores de maquinabilidad, en donde el acero para herramientas maquinable tipo W se le ha asignado un valor de 100, el cual a su vez equivale a una maquinabilidad del 30% de un acero libre maquinado tipo AISI B1112 el cual es empleado para fabricar tornillos [2].

Tabla 2.2 Clasificación de maquinabilidad para aceros grado herramienta [2].

Aceros Grado herramienta	
Tipo	**Maquinabilidad %**
O6	125
W1, W2, W5	100 (a)
A10	90
P2, P3, P4, P5, P6	75-90
P20, P21	65-80
L2, L6	65-75
S1, S2, S5, S6, S7	60-70
H10, H11, H12, H13, H14, H19	60-70 (b)
O1, O2, O7	45-60
A2, A3, A4, A6, A8, A9	45-60
H21, H22, H24, H25, H26, H42	45-55 (b)
T1	40-50
M2	40-50
T4	35-40
M3, clase 1	35-40
D2, D3, D4, D5, D7, A7	30-40
T15	25-30
M15	25-30

(a) Equivalente al 30% de la maquinabilidad del acero AISI B1112, (b) Para un rango de durezas de 150 a 200 HB.

Templabilidad.

La templabilidad es referida a la capacidad de endurecimiento de un acero, el cual forma martensita hasta determinada profundidad. El factor más importante que influye a que una determinada dureza sea alcanzada es la masa del metal a templar, ya que en pequeñas secciones el calor es extraíble rápidamente. Un ejemplo es visto en la figura 2.2 en la cual, muestras de diferentes diámetros de un acero con contenido de carbono de 0.54 % es templado. Para las secciones de 13 mm alcanzó una dureza superficial de 63 HRC. A medida que el diámetro de la pieza es mayor los valores de templabilidad disminuyen [4].

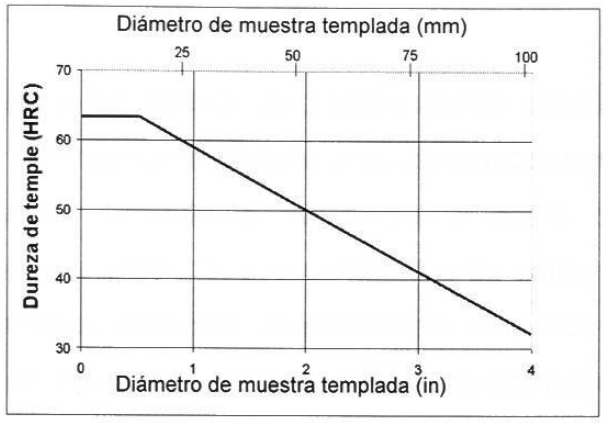

Fig. 2.2 Templabilidad con respecto al diámetro de la probeta [4].
Efecto del tamaño de sección en la dureza superficial de un acero al 0.54% C.

La importancia del carbono en la aleación radica en el máximo de dureza alcanzable que se encuentra para composiciones de 0.60% de carbono. En general la templabilidad de acero aumenta al incrementarse el contenido de elementos aleantes, a excepción del cobalto [4].

2.4 Aceros para trabajo en caliente grupo H.

El grupo H consta de aceros que son utilizados en operaciones que involucran abrasión y/o altas presiones combinadas con altas temperaturas de trabajo. El grupo de aceros herramienta H usualmente tiene contenidos de carbono que van de 0.30 a 0.45%., así como cromo, tungsteno, molibdeno y vanadio[2].

Este grupo es dividido en tres subgrupos los cuales son: aceros para trabajo en caliente al cromo (Tipos H1 al H19), aceros para trabajo en caliente al tungsteno (Tipos H20 al H39), y aceros para trabajo en caliente al molibdeno (Tipos H40 al H59), ver tabla 2.1 [2].

2.5 Aceros para trabajo en caliente al cromo.

Los aceros para trabajo en caliente al cromo cuentan con buena resistencia al ablandamiento por calentamiento debido a su contenido medio de cromo y a la adición de elementos formadores de carburos como son el molibdeno, tungsteno y vanadio, ver tabla 2.3. Los contenidos de carbono así como el bajo contenido de elementos aleantes proporcionan una buena tenacidad para durezas normales de trabajo de 40 a 55 HRC. Los contenidos de tungsteno y molibdeno incrementan la resistencia en caliente pero disminuyen ligeramente la tenacidad. El vanadio es adicionado para incrementar la resistencia al desgaste erosivo. El contenido de silicio mejora la resistencia a la oxidación a temperaturas de trabajo por arriba de los 800 ºC [2].

Tabla 2.3 Limites de composición química de aceros para trabajo en caliente al cromo [2] .

Designación	Composición % En Peso								
AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
H10	0.35 - 0.45	0.25 - 0.70	0.80 - 1.20	3.00 - 3.75	0.30 max	2.00 - 3.00	. . .	0.25 - 0.75	. . .
H11	0.33 - 0.43	0.20 - 0.50	0.80 - 1.20	4.75 - 5.50	0.30 max	1.10 - 1.60	. . .	0.30 - 0.60	. . .
H12	0.30 - 0.40	0.20 - 0.50	0.80 - 1.20	4.75 - 5.50	0.30 max	1.25 - 1.75	1.00 - 1.70	0.50 max	. . .
H13	0.32 - 0.45	0.20 - 0.50	0.80 - 1.20	4.75 - 5.50	0.30 max	1.10 - 1.75	. . .	0.80 - 1.20	. . .
H14	0.35 - 0.45	0.20 - 0.50	0.80 - 1.20	4.75 - 5.50	0.30 max	. . .	4.00 - 5.25	. . .	. . .
H19	0.32 - 0.45	0.20 - 0.50	0.20 - 0.50	4.00 - 4.75	0.30 max	0.30 - 0.55	3.75 - 4.50	1.75 - 2.20	4.00 - 4.50

El subgrupo H al cromo presenta buena profundidad de templado, los más ampliamente usados son: H11, H12, y H13 los cuales pueden ser templados al aire en secciones de hasta 152 mm. La cantidad de aire utilizado durante el temple y el contenido balanceado de la aleación conducen a una muy baja distorsión durante el templado [2].

Las propiedades más importantes de este grupo se presentan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Características de procesamiento y servicio en aceros grado herramienta grupo H base cromo [2].

AISI	Resistencia a la Decarburización	Dureza y Templado				Fabricación y Servicio			
		Templabilidad	Cantidad de Distorsión	Resistencia al Cracking	Dureza Aprox, HRC	Maquinabilidad	Tenacidad	Dureza al Rojo	Resistencia al Desgaste
H 10	Media	Profundo	Muy bajo	Excelente	39-56	Media-Alta	Alta	Alta	Media
H 11	Media	Profundo	Muy bajo	Excelente	38-54	Media-Alta	Muy alta	Alta	Media
H 12	Media	Profundo	Muy bajo	Excelente	38-55	Media-Alta	Muy alta	Alta	Media
H 13	Media	Profundo	Muy bajo	Excelente	38-53	Media-Alta	Muy alta	Alta	Media
H 14	Media	Profundo	Bajo	Excelente	40-47	Media	Alta	Alta	Media
H 19	Media	Profundo	A, bajo; O, medio	Alto	40-57	Media	Alta	Alta	Media-Alta

El subgrupo se adapta para funcionar en todo tipo de troqueles al calor, especialmente troqueles de extrusión, troqueles para piezas fundidas, troqueles para forja, mandriles y cizallas en caliente [2].

2.6 Acero Grado Herramienta H13.

El acero grado herramienta H13, siendo el material a estudio en el presente trabajo forma parte del subgrupo de aceros para trabajo en caliente al cromo; sus principales elementos aleantes son cromo, molibdeno, vanadio, silicio y manganeso, los límites de composición química están mostrados en la tabla 2.3 [2].

Dentro de sus principales características podemos mencionar: resistencia media a la decarburización, alta templabilidad, muy baja distorsión y una excelente resistencia al choque térmico, ver tabla 2.4. Cuenta con un grado de maquinabilidad de 60 a 70% en estado recocido, ver tabla 2.2. Su nivel de tenacidad es el más alto de los aceros grado herramienta, además de tener media resistencia a la erosión debido a sus altos contenidos de vanadio y

dureza al rojo, ver figura 2.1 y tabla 2.4 [2,5].Las principales aplicaciones son en formado en frió y en moldes para inyección de aluminio y plomo [2].

2.7 Tratamientos térmicos del acero H-13.

El tratamiento térmico es *"una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento, a tiempos determinados y aplicados a un metal o aleación en el estado sólido en una forma tal que producirá propiedades deseadas"* [3]

Es importante controlar la atmósfera en la que se encuentra el acero durante el tratamiento térmico o bien empaquetar la pieza para evitar la presencia de escamas o descarburización. Los medios de temple en este tipo de acero son: aceite, baños de sales o mediante corriente de aire, este último procurando que sea de forma homogénea en la pieza y libre de humedad [5].

La Tabla 2.5 muestra los límites de temperatura para el templado y revenido en el subgrupo de aceros grado herramienta para trabajo en caliente al cromo, así como los tiempos límite del austenizado y el medio de temple.

Tabla 2.5 Templado y Revenido en aceros grado herramienta grupo H base cromo [2]

	Precalentamiento	Templado Temperatura	Tiempo (min.)	Medio de	Temperatura
Tipo	° C	Templado °C	a la Temperatura	Templado (a)	Revenido °C
H10	815	1010-1040	15-40 (b)	A	540-650
H11, H12	815	995-1025	15-40 (b)	A	540-650
H13	815	995-1040	15-40 (b)	A	540-650
H14	815	1010-1065	15-40 (b)	A	540-650
H19	815	1095-1205	02-05	A ó O	540-705

(e) Tiempos aplicados para tratamiento térmico en horno abierto, (A) Aire, (O) Aceite. Abreviaturas (a) A = aire, O = aceite. (b) tiempos aplicados para tratamientos térmicos en horno abierto.

Las principales consideraciones para la realización de los tratamientos térmicos para el acero H13 son mencionadas a continuación.

Recocido.

En el recocido, la temperatura es llevada lenta y uniformemente por arriba del intervalo de temperatura de transformación. En el acero H13 las superficies deben ser protegidas contra la decarburización mediante empaquetamiento, atmósfera controlada o vació. El acero es llevado a una temperatura de 845 a 900 ºC, usándose el límite inferior para piezas pequeñas. Una vez alcanzada la temperatura de recocido deberá ser mantenida por 1 hora (piezas delgadas) a 4 horas (piezas o secciones grandes). Posteriormente un enfriamiento lento dentro del horno con valores de descenso no mayores a 28 ºC/hr, deberá ser realizado hasta alcanzar la temperatura de 540 ºC. A partir de esta temperatura un enfriamiento rápido no afectará a la dureza del material. El rango de durezas típicas del material en estado recocido se encuentra entre 12 y 20 HCR [5].

Relevado de Esfuerzos.

Calentar la pieza entre 650 y 675ºC mantenerla 1 hora o más. Enfriarla lentamente a temperatura ambiente. Este tratamiento es usado después de haberse tenido un maquinado burdo en la pieza. El objetivo del tratamiento es alcanzar gran precisión en las dimensiones de la pieza para después efectuar el maquinado fino [6].

Templado.

Para este tratamiento térmico también debe ser protegida la superficie contra la decarburización. Las piezas podrán ser introducidas al horno solo a temperaturas por debajo de los 260 ºC, elevar la temperatura a una velocidad de calentamiento no mayor a 110 ºC / hr hasta alcanzar una temperatura de

815 °C, donde se debe de mantener 1 hora por pulgada de espesor. Austenizar a 995 - 1040 °C durante un tiempo de entre 15 a 40 minutos, siendo el corto tiempo para secciones pequeñas. Una vez llevado a cabo este ciclo, el material deberá ser enfriado con aire seco de manera uniforme. Las durezas promedio de temple se encuentran entre 51 y 54 HRC [5].

Estabilizado

En este tratamiento la pieza es llevada a una temperatura de 150 a 160 °C para posteriormente enfriarlo a valores de -100 a -195 ° C. El revenido deberá ser efectuado inmediatamente después de que las piezas alcancen la temperatura ambiente [5].

Revenido

El revenido es un tratamiento térmico necesario después del templado o estabilizado del acero, su objetivo es liberar los esfuerzos internos generados en el acero por la transformación de la estructura austenítica a martensítica, produciendo una disminución en la dureza, pero aumentando la tenacidad en la pieza [5].

La tabla 2.6 muestra las propiedades mecánicas del acero H13 a temperatura ambiente para diferentes temperaturas de revenido

Inmediatamente después de que la pieza alcance una temperatura de 52 °C. puede iniciarse el revenido, en donde según la característica deseada será la temperatura de revenido a emplear [5].

Tabla 2.6 Propiedades Mecánicas del acero grado herramienta H13 [6].

Temperatura de Revenido °C	Esfuerzo de Tensión MPa	Esfuerzo de Cedencia MPa	Elongación %	Reducción de Área %	Energía de Impacto (Charpy) J	Dureza HRC
527	1960	1570	13	46,2	16	52
555	1835	1530	13,1	50,1	24	50
575	1730	1470	13,5	52,4	27	48
593	1580	1365	14,4	53,7	28,5	46
605	1495	1290	15,4	54	30	44

(Para barra redonda, templada en aceite desde una temperatura de 1010 °C con doble revenido 2 + 2h a la temperatura indicada).

Es recomendable utilizar las temperaturas de revenido por arriba de los 510 °C, esto sacrificará un poco la dureza del acero, pero mejorará su tenacidad [6]. La figura 2.3 muestra los valores de dureza obtenidos para el acero H-13 a dos diferentes temperaturas de templado, se puede apreciar que para temperaturas de revenido por arriba de 540 ° C (1030 ° F) la dureza disminuye abruptamente [5]

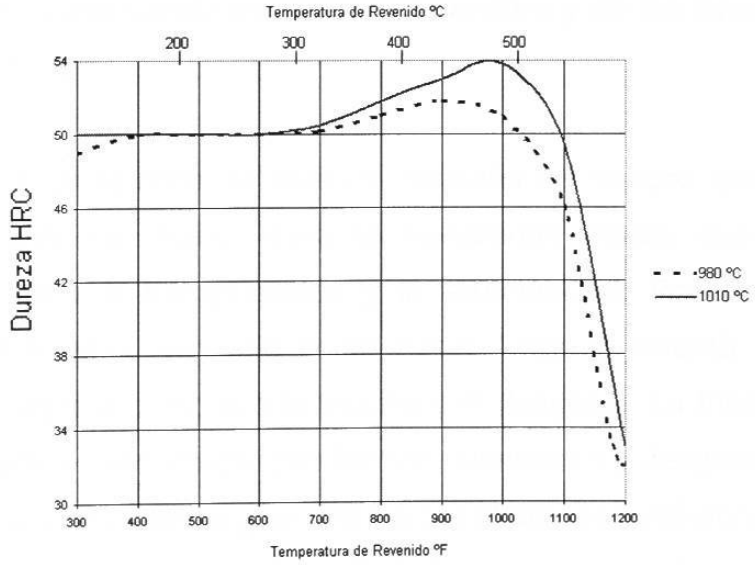

Fig. 2.3 Dureza en función de la temperatura de revenido [5].

Línea punteada, muestra comportamiento del H-13 templado en aire desde una temperatura de 980 °C y doble revenido. La línea contínua, muestra el comportamiento del H-13 templado por aire desde una temperatura de 1010 °C y doble revenido.