

126  
2ej.



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO DEL ACERO H13 PARA DATOS  
DE FORJA DE TRABAJO EN CALIENTE

T E S I S  
Que para obtener el Título de  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
p r e s e n t a

*MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN*



Director de Tesis:

Dra. Dora Ma. Krasnopolsky de Grinberg

México, D. F.

1992

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## C O N T E N I D O

	Página
Agradecimientos	
1. Introducción	1
1.1 Selección de Materiales para Dados de Forja	1
1.2 Aceros para Dados de Trabajo en Caliente	3
2. Procesos de Forja	6
2.1 Clasificación de los Procesos de Forja	7
2.2 Martillos, Prensas y Equipos Auxiliares	12
2.2.1 Martillos Para Dados Cerrados	12
2.2.2 Martillos Para Dados Abiertos	15
2.2.3 Prensas Para Dados Cerrados	17
2.2.4 Prensas Para Dados Abiertos	20
2.2.5 Transmisiones de las Prensas	20
3. Dados para Forjar	22
3.1 Dados para Forja Abierta	22
3.2 Dados Cerrados para Forja en Caliente	24
3.2.1 Impresiones para Dados de Forja Cerrada	25
3.2.2 Línea de Partición de la Pieza de Trabajo	28
3.3 Desgaste y Fallas del Dado para Forjar	29
3.4 Materiales para Herramientas y Dados	32
3.4.1 Propiedades de los Aceros Serie AISI H	37
4. Tratamientos Térmicos en Aceros para Dados de Forja	40
4.1 Precalentamiento Antes del Tratamiento Térmico de Austenitización	40
4.2 Austenitización	42
4.3 Recocido Completo	47
4.3.1 Recocido para Relevamiento de Esfuerzos	49
4.4 Temple	51
4.4.1 Temple Interrumpido (Martempering)	53
4.5 Revenido	54
4.5.1 Fragilización por Revenido	56
4.6 Baños de Sales Empleados Durante los Tratamientos Térmicos de Aceros para Herramientas	58

	Página
4.6.1 Enriquecimiento de los Baños de Sales ....	59
5. Desarrollo Experimental .....	61
5.1 Detalle de los Procedimientos Realizados Durante el Estudio del Acero AISI H 13 .....	62
5.2 Efecto de un Unico Revenido .....	72
5.3 Tratamiento Térmico de Sensibilización .....	76
5.4 Resultados del Tratamiento Térmico de Sensibilización .....	78
6. Discusión de Resultados y Conclusiones .....	81
6.1 Discusión del Efecto de un Unico Revenido sobre la Dureza e Impacto de Nuestro Acero H13 .....	81
6.2 Discusión de los resultados obtenidos sobre Dureza e Impacto Posteriores al Tratamiento Térmico de Sensibilización de nuestro Acero H13	83
6.3 Conclusiones .....	84
7 Bibliografía .....	87

## 1. INTRODUCCION

El presente trabajo se originó en un problema industrial nacional. Las empresas que emplean aceros AISI H13 para fabricar dados de forja, reportan que este tipo de aceros nacionales presentan corta vida en servicio cuando trabajan entre 500 y 550°C, aún considerando la fragilización del acero a esas temperaturas y, por lo tanto, prefieren importar el material para fabricar sus dados.

Sin embargo, el acero H13 es el de mayor empleo en la industria por tener una temperatura de austenitización relativamente baja, alta resistencia a la distorsión y bajas velocidades de oxidación cuando se enfría al aire. Bajo cambios bruscos de temperatura, el acero resiste el agrietamiento en caliente. Además, este acero tiene alta tenacidad acompañada por mayor resistencia al choque y mayor dureza en caliente si se lo compara con los aceros de las serie S, pero menor que la de los aceros H19, H21, H39 y H43, aunque cabe señalar que estos aceros son altamente costosos (1).

### 1.1 SELECCION DE MATERIALES PARA DATOS DE FORJA

La producción de prácticamente todos los productos en nuestra economía industrial necesita de herramientas, y éstas son de una variedad infinita, incluyendo herramientas de corte, dados para formado o forjado de muchos tipos de materiales, calibradores precisos para satisfacer las necesidades de tolerancias dimensionales, etc. Las propiedades que deben presentar las herramientas varían con el tipo de servicio que se requiere de ellos, pero en general, éstos incluyen alta dureza, resistencia a la deformación, resistencia al desgaste para alcanzar una vida económica de las herramientas, estabilidad

dimensional, etc (2).

En el diseño de herramientas, especialmente en punzones y otro tipo de herramientas de impacto, se debe tener sumo cuidado ya que las fracturas se producen por un mal diseño en las venas o por otros concentradores de esfuerzos locales. Si las herramientas son sometidas a esfuerzos continuos, repetitivos y prolongados, la fractura inicia en donde hay un punto localizado de concentración de esfuerzos y se propagan hasta terminar en fractura. Por esa razón, la concentración de esfuerzos localizados en un punto deberá mantenerse en un valor mínimo (3).

Los procesos para el formado de los materiales utilizan diferentes presiones para cambiar ya sea la forma, el tamaño o ambos del material que se esté trabajando. Por tal razón existe una gran variedad de procesos y equipos cuya selección depende de muchos factores, principalmente el tamaño, material, uso, costo y disponibilidad (4).

Los materiales para herramientas deberán seleccionarse después de haber realizado un cuidadoso estudio de las propiedades físicas deseadas y, en algunos casos, también las características químicas. En la mayoría de las aplicaciones de éstos, existe más de un tipo de material que satisface las propiedades buscadas, aunque finalmente se elige el material con propiedades óptimas y características económicas más bajas.

Los materiales básicos para herramientas son los aceros para herramientas, pero en muchas aplicaciones, los hierros fundidos, otros tipos de aceros, y aún materiales no ferrosos pueden usarse satisfactoriamente. En algunas aplicaciones se puede trabajar muy bien con combinaciones de aceros para herramientas, materiales no ferrosos y materiales compuestos. A éstos también se puede sumar los carburos cementados que han sido desarrollados para usos especiales.

Los aceros utilizados para herramientas generalmente tienen un contenido de carbono menor al 0.80% lográndose durezas martensíticas de menos de 60 HRC. Un contenido de carbono mayor a este valor se emplea sólo para tener carburos no disueltos en la estructura martensítica a fin de incrementar la resistencia al desgaste. Los elementos aleantes se añaden para tener una estructura específica o mejorar algunas propiedades (2).

Idealmente, se debe seleccionar un acero para herramientas para cada operación en particular, según sus características metalúrgicas o su uso, pero la mayoría de las herramientas se hacen con materiales cuya elección depende del costo, de su facilidad de fabricación y que tenga una larga vida de servicio. Anteriormente se habló del funcionamiento y costo del herramental, pues bien, la selección de los aceros para herramientas se basará también en la predicción del funcionamiento de la herramienta y en el análisis de las limitaciones de manufactura y mejoramiento de propiedades (3).

### 1.2 ACEROS PARA DADOS DE TRABAJO EN CALIENTE

Los aceros de la serie AISI H para trabajo en caliente, se utilizan principalmente en dados para fundición, dados para forja, brocas, cortadores y mandriles para trabajo en caliente, herramientas para extrusión en caliente, y en dados para trabajo en caliente que involucren choque térmico ó mecánico (4).

Los aceros para dados de trabajo en caliente se caracterizan por tener un bajo contenido de carbono (0.25 y 0.6%) y alto contenido de elementos aleantes, entre los que se encuentran el cromo, el tungsteno y el molibdeno.

En general, estos aceros para herramientas de trabajo en caliente, se clasifican en tres clases; a) los que tienen como

componente principal al cromo, b) los que su aleante principal es el tungsteno o molibdeno y c) los que tienen el tungsteno y el cromo combinados en proporciones iguales, aproximadamente. Teniendo en cuenta el tenor de los aleantes, dichos aceros pueden ser clasificados en aceros H de mediana aleación y aceros H de alta aleación u). Los aceros templados de mediana aleación disminuyen rápidamente su dureza en caliente por encima de 235°C; los aceros para dados al cromo no varían su dureza en caliente hasta alcanzar 430°C y los aceros para herramientas al tungsteno mantendrán su dureza por arriba de 620°C. Estas serán las temperaturas límites de trabajo de cada tipo de acero mencionado. Se considera que los aceros al tungsteno son más duros que los de cromo a temperaturas elevadas, y el tenor de vanadio mejora su dureza a esas temperaturas w).

Las principales características físicas de los aceros de herramientas para trabajo en caliente son : a) alta resistencia al desgaste en caliente, aunque su tenacidad disminuya; b) buena resistencia a la fatiga térmica y mecánica; c) resistencia a la formación de fisuras por gradientes térmicos o fatiga mecánica; d) resistencia mecánica y al choque térmico; e) resistencia a la distorsión durante el tratamiento térmico m).

Los requisitos que deben tener los aceros para trabajo en caliente varían ampliamente dependiendo de su aplicación, por lo que no se tiene una sola clasificación de este material. En general, esto depende de la aplicación de la carga (presión) sobre los dados, del modo en cómo se comportan ante gradientes de temperatura, y de la manera en cómo son enfriados.

Para prolongar la vida del herramental fabricado con aceros H, es conveniente tomar ciertas precauciones durante sus tratamientos térmicos tales como:

- a) Hacer un precalentamiento previo al temple.



- b) Trabajar en condiciones que eviten la descarburización.
- c) Templar en medios poco drásticos como pueden ser aire, niebla, etc.
- d) Iniciar el revenido inmediatamente después del temple.
- e) Someterlos a doble o triple revenido para disminuir su fragilidad.
- f) Tratar de aprovechar el segundo endurecimiento que presentan estos aceros.

Si se hace una cuidadosa selección del material, como se mencionó anteriormente, y se realiza un tratamiento térmico adecuado, entonces, se asegurará un funcionamiento óptimo de los aceros de trabajo en caliente.

## 2. PROCESOS DE FORJA

Forjar es el proceso industrial por el cual se forman objetos mediante el uso del impacto y la presión. En el proceso de forja el metal se puede estirar de manera que aumente su longitud y disminuya su sección transversal; se puede hacer un recalcado causando un aumento en dicha sección y disminuyendo su longitud; también se puede comprimir al material en dados de impresión cerrada a manera de originar un flujo multidireccional. Por tanto, el estado de esfuerzos en la pieza es, fundamentalmente, de compresión monoaxial o triaxial.

El proceso de forja aprovecha todos los beneficios que ofrece el impacto y la presión; las distintas formas de aplicación que se han desarrollado tienen gran flexibilidad para el conformado de diversos materiales, forjar piezas grandes o hacer una producción masiva de piezas idénticas. El martillo es la herramienta que imparte esfuerzos sobre el material a trabajar por medio de impactos; mientras que la prensa, que es otro herramental utilizado en los procesos de forja, imparte esfuerzos en forma de presión sobre el material. Este último se emplea muy comúnmente para operaciones en caliente.

La forja en caliente con fragua, donde se utiliza martillo y yunque, es el tipo de forjado más antiguo para trabajar los metales. Consiste en martillar una pieza de metal caliente sobre un yunque dándole la forma deseada; en la actualidad, se sigue el mismo principio sólo que se utiliza un martillo y accionadores mecánicos para mover las piezas pesadas; generalmente este tipo de forja no es el apropiado para una producción masiva, debido a que es lento y la complejidad de la forma y el tamaño de la pieza a producir dependen de la habilidad del operario.

El sistema de calentamiento con fragua consiste de un bastidor de tres lados, de fundición, cuyo cuarto lado está construido de mampostería, que forma su base; esta mesa está atravesada por barrotes metálicos que sirven de armadura a una mampostería refractaria, que constituye el fondo cóncavo del hogar. El muro que sirve de base se eleva verticalmente sobre la cara posterior de la mesa hasta aproximadamente 0.5 m y sostiene la armazón de las planchas que constituyen la tolva superior o campana de chimenea, la que cubre la parte del hogar. Si las piezas son demasiado grandes se utilizan hornos de recalentamiento, los que están constituidos por un hogar, una cámara de calentamiento, un conducto de salida de gases y una chimenea no. En la actualidad las piezas a forjar se calientan en hornos de gas, petróleo o electricidad, aunque últimamente se utiliza también el calentamiento por inducción.

## 2.1 CLASIFICACION DE LOS PROCESOS DE FORJA

Los procesos de forja se dividen en dos grandes grupos, la forja con dados abiertos y la forja con dados cerrados. El primero se lleva a cabo entre dados planos o dados de formas sencillas, y se utiliza, generalmente, para objetos grandes o cuando la producción es pequeña. Las formas que se pueden obtener pueden ser muy diversas y relativamente complejas. Sin embargo, forjar formas complejas consume mucho tiempo y es costoso, por lo que solo se utiliza en ocasiones especiales. En algunos casos, cuando se machuca un material, las propiedades mecánicas de este no son adecuadas, es por ello que la forja se utiliza también para mejorar las propiedades del metal (a). A veces el proceso de forja en dados abiertos se utiliza cuando se quiere dar una preforma a las piezas que serán sometidas a forja con dados cerrados y se justifica, debido a que el costo de producción en dados cerrados es mayor. Todos los metales deformables se pueden forjar con dados abiertos (e).

La forja de dados cerrados consta de dos dados que tienen en sus caras una impresión o forma del objeto que se vaya a producir. Esta última puede ser más complicada que para los dados abiertos. En el proceso, la pieza se deforma bajo altas presiones en cavidades cerradas produciéndose piezas con pequeñas tolerancias dimensionales; en este tipo de proceso, pueden existir cavidades pequeñas de salida para dos propósitos: 1) para dejar salir al material excedente y 2) para regular el escape del material a manera de que se llenen todas las cavidades existentes en el molde. Entonces, la presión de forjado se incrementa cuando decrece el espesor de las cavidades de salida (6).

El proceso de forja también se puede dividir en forja con martinete o forja con prensa. La forja con prensa homogeneiza la estructura de los grandes lingotes ya que la zona de deformación se extiende a través de toda la sección transversal. En ocasiones la carga utilizada se aplica en varios pasos y solamente se comprime una pequeña región en cada paso. En la forja con martinete la deformación queda restringida principalmente a las regiones superficiales, exceptuando las piezas de secciones pequeñas. La estampación en caliente, la forja con martinete y el recalado se pueden llevar a cabo con equipo ligero, aunque el martinete pueda pesar varias toneladas (6).

Cuando la forja se trabaja en frío, generalmente recibe varios nombres específicos y el término "forja" se asocia comúnmente a la forja en caliente (6).

En la forja con martinete se utilizan dados de forma, uno sujeto al martillo y otro al yunque. Cada uno de los dados presenta un contorno que corresponde a la mitad del objeto a forjar. Se coloca el material en la parte central golpeando el dado superior contra el inferior hasta que el material adquiere la forma impresa en los dados; esto se muestra en la Fig. 2.1 a) (6). Generalmente, la forja con martinete utiliza dados

progresivos; es decir, el dado presenta múltiples formas con el objeto de obtener el conformado en bruto del producto, una forma semiacabada y un objeto terminado a la forma deseada para que sólo reste realizar el recorte de la rebaba. Si el operador considera que la pieza ya tiene la forma adecuada, cambia la pieza a la siguiente cavidad continuando con la operación hasta acabar con los pasos básicos mencionados. El operador puede realizar uno o más golpes hasta obtener la forma adecuada de la pieza en cada cavidad, Fig. 2.1 b).

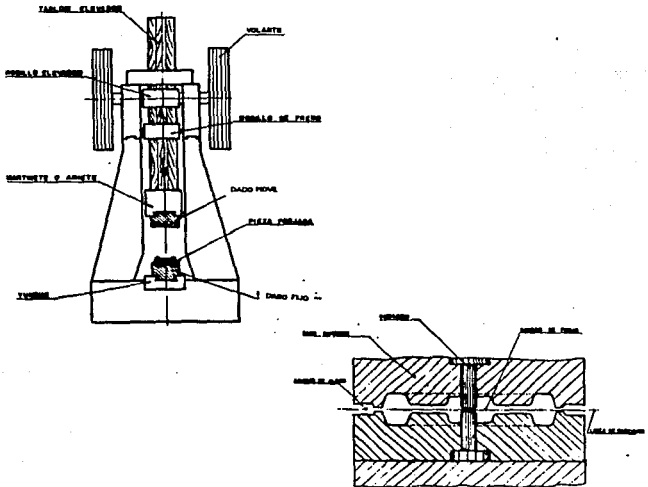


Fig. 2.1 a) Máquina para forjar del tipo martinete con martillo de caída libre. b) Dados típicos para forjar con martinete.

En la forja llamada por impacto se utilizan dos arietes horizontales motorizados que impulsan a martillos opuestos hacia la pieza de trabajo, frecuentemente la pieza a trabajar se utiliza en estado plástico (estado que se obtiene por calentamiento del material) para que posteriormente, pueda alimentar a alguna máquina por medio de dispositivos mecánicos. La forja por impacto suele hacerse tanto en frío como en caliente y se emplea para producir en serie de piezas pequeñas (a).

La forja por recalcado es similar a la forja por impacto, donde el ariete mueve a los dados en forma horizontal. En este tipo de proceso, existen dos maneras de aplicar la forja: 1) utilizando sólo un ariete con un martillo y el objeto a deformar suele ser una varilla ó cilindro que se desplaza hacia la cavidad de un dado (Fig. 2.2a) y 2) utilizando dos dados sujetadores que se juntan horizontalmente para sujetar una barra a forjar en una posición rígida, mientras el tercer dado llamado pistón recalca el material en el extremo de la barra dentro de la impresión (Fig. 2.2b). Con este tipo de forjado, se suelen hacer las cabezas de los tornillos y remaches, válvulas para motores y todo tipo de objetos que incluyan la formación de una cabeza y un vástago de menor diámetro. El tamaño de estas máquinas es variado pero su uso está limitado por el diseño de las matrices, las que consideran los siguientes puntos:

- a) El diámetro del objeto deberá ser tres veces menor a la longitud de la parte recalcada del mismo.
- b) El diámetro de la parte recalcada no debe ser mayor de 1.5 veces al diámetro de la barra de alimentación inicial.

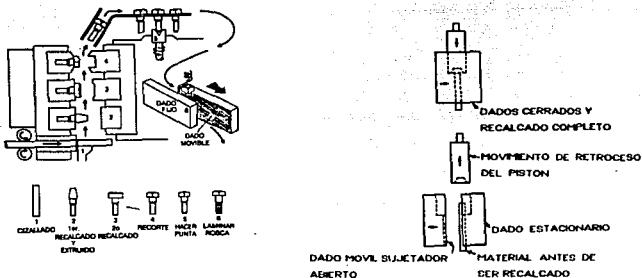


Fig. 2.2 a) Proceso de forja por recalado con movimiento de un dado. b) Forja por recalado con movimiento de un dado y un pistón.

El suajado es empleado para reducir el diámetro de objetos redondos mediante impactos repetidos, y también es posible hacer por suajado formas cónicas.

La forja a presión se distingue de los otros tipos de formado por ser una compresión lenta, es decir, sin impacto. Este proceso permite que el material fluya y tome la forma deseada. Generalmente no se utilizan dados y tanto el yunque como el martillo son planos. Las prensas se fabrican en tamaños muy grandes con capacidades de hasta  $18 \times 10^6$ ,  $35 \times 10^6$  y  $50 \times 10^6$  Kg.

El acufado es un trabajo que generalmente se hace en frío para piezas pequeñas, y suele emplearse para piezas tales como monedas, medallones, etc. donde se requieren detalles y acabados muy exactos en la superficie. Si existe un exceso de material, la

pieza acunada podrá salir defectuosa debido a que la cavidad es muy limitada, es por ello que se necesita controlar con cuidado la cantidad de material a emplear.

El clavado o proceso con dado maestro, consiste en imprimir alguna forma contra una pieza grande de metal. Es común utilizar este proceso en piezas pequeñas donde se requiera una superficie pulida (a).

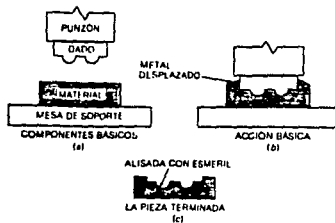


Fig. 2.3 Esquemalización del formado con dado maestro.

## 2.2 MARTILLOS, PRENSAS Y EQUIPOS AUXILIARES

### 2.2.1 MARTILLOS PARA DADOS CERRADOS

Los martillos con tabloncillos son ampliamente utilizados en la industria; el mazo se levanta por una o más tablas y pasa a través de rodillos de fricción a la parte superior del martillo. Las tablas se elevan mediante los rodillos en forma mecánica.



permitiendo que el mazo caiga desde cualquier altura que se desee. Para levantar el mazo es necesaria la fuerza de uno o más motores. Los martillos pueden aplicar una carga (por su propio peso de caída) desde 170 hasta 4.500 Kg, aunque comercialmente se utilizan entre 450 y 2.300 Kg (w). La altura desde donde se deja caer el mazo varía con el tamaño del martillo y puede ir desde 90 cm para martillos de 170 Kg hasta alrededor de 1.90 m para martillos de 3.400 Kg. Durante el servicio del martillo, la altura de caída y la fuerza de deformación se mantienen constantes y no se alteran a menos de que se detenga la máquina y se ajusten los parámetros. Los yunques de este tipo de martillos son de 20 a 25 veces más pesados que los mazos.

Cuando los martillos con tabloncillos se utilizan para forja en dados cerrados, el metal se calienta y se coloca sobre la cavidad del dado inferior, después, el mazo cae sobre el material comenzando el proceso de deformación. Cuando el operador pone en funcionamiento a la máquina, el mazo cae en un solo paso y regresa a su posición original, esto se hace en repetidas ocasiones hasta que el material ha sido completamente deformado. En la práctica, si se tienen piezas pequeñas, la máquina no se detiene y el proceso, para una producción en línea, es continuo.

Los martillos de caída libre son similares a los anteriores, en el sentido en que la fuerza de forja se ejerce con la caída del mazo del dado superior, pero en este caso, el mazo regresa a su posición inicial por medio de presión del aire o vapor. El mazo se mantiene en su posición superior mediante un seguro que se encuentra en la barra del pistón, el cual es impulsado por el cilindro usando aire comprimido. Este tipo de martillos tiene las capacidades que van desde 230 a 4.500 Kg cuya carga es la misma que en los martillos de tabloncillos (w).

Los martillos de potencia comúnmente llamados martillos neumáticos, se usan exclusivamente para forja con dados cerrados.

En la mayoría de ellos es más común utilizar aire que vapor. La diferencia entre los martillos anteriores y éstos es que, bajo presiones de 620 a 860 KPa, la fuerza de gravedad aumenta en su carrera descendente. En general, este tipo de martillos es de los de mayor potencia para la producción por forja en dados cerrados por medio de presiones de impacto. En él, existe un bloque tipo yunque pesado que soporta dos columnas, las cuales, sirven de guía para el movimiento vertical del mazo o ariete; dichas armaduras soportan un cilindro de vapor en su parte superior, el cual contiene un émbolo con una barra larga que es la que mueve al ariete.

El movimiento del pistón se controla por una válvula que admite vapor cuando el pistón se encuentra en la parte más alta o en la parte más baja del cilindro. La capacidad de los martillos es de 230 a 18,000 Kg y ocasionalmente llega hasta 22,600 Kg. En este último caso, el peso del ariete, del pistón y de la barra que está sujeta al pistón tendrán un peso de aproximadamente 20,500 Kg. La velocidad que se obtiene por la presión del pistón algunas veces sobrepasa los 7.60 m/s  $\omega$ .

Los martillos de contraflujo o contragolpe son una variedad de los martillos de potencia; la diferencia consiste en que desarrollan una fuerza de impacto debida al movimiento de dos arietes que trabajan simultáneamente. De esta manera se aprovechan los sentidos opuestos de cada ariete para localizar un punto medio para su encuentro.

Algunos de estos martillos actúan por medios neumáticos o hidráulicos, mientras que otros incorporan un sistema mecánico-hidráulico o uno mecánico-neumático. En este tipo de martillo, el flujo es admitido en la parte superior del cilindro, moviendo el ariete superior hacia abajo y al mismo tiempo existen pistones conectados al ariete inferior que actúan a través de conexiones hidráulicas, forzando la subida del mismo. Los

arietes de los martillos de contragolpe son capaces de hacer golpes repetitivos a velocidades de 4.80 a 6 m/s (a).

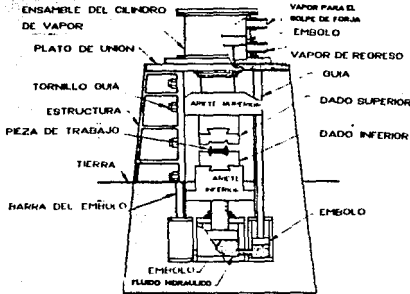


Fig. 2.4 Martillos para forjar del tipo contragolpe.

### 2.2.2 MARTILLOS PARA DADOS ABIERTOS

Los martillos para forja en dados abiertos se conocen comúnmente como "martillos pilones para forjar" o "martillos de dados planos" y son herramientas básicas de fácil adquisición. En capacidad, se clasifican en martillos pequeños de 12 a 23 Kg, hasta martillos grandes de 10.800 Kg. Cabe puntualizar que se consideran máquinas forjadoras aquellas cuya capacidad sobrepasa los 450 Kg.

Los martillos de forja abierta se operan por vapor o aire comprimido a presiones de 890 a 830 KPa si se trata de vapor o de 620 a 690 KPa si se trata de aire. Dichas condiciones son similares a las de los martillos de potencia que se usan para los dados de forja cerrada, y la diferencia básica consiste en que

este último se opera y controla por un pedal de pie, mientras que en los martillos de forja abierta se operan y controlan a través de dos elevadores manuales. Uno de los elevadores se conecta al regulador de aire comprimido o vapor, el otro elevador controla la longitud para el golpeo de la forja.

Otra diferencia en el diseño del martillo es que el yunque se encuentra separado de la estructura del martillo que contiene al ariete y al dado superior. Por otro lado, estos martillos se construyen con una estructura simple (conocida como estructura C o de simple efecto) o con estructura doble llamada de doble efecto. El forjado en estos martillos es ventajoso debido a que se puede usar casi cualquier posición alrededor del yunque, particularmente si se tienen variaciones dimensionales no comunes en la pieza, incluyendo superficies curvas.

La longitud de desplazamiento que debe tener el martillo de dados abiertos y la magnitud de la fuerza aplicable deberá ser controlada durante el ciclo de forja. Los martillos de forja con mayor potencia se emplean en producciones de piezas donde se requieren cargas de  $5 \times 10^3$  Kg. Para producciones donde se requiere de mayores capacidades se emplean las prensas hidráulicas.

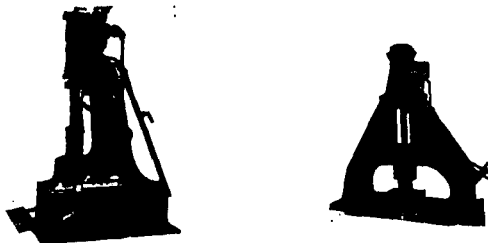


Fig. 2.5 Martillos para forja abierta tipo "C" y de "doble efecto"

## 2.2.3 PRENSAS PARA DADOS CERRADOS

Estas unidades forjadoras son capaces de efectuar una variedad de operaciones de forja por medio de la presión ejercida sobre un material calentado. El elemento que hace accionar a las prensas para forja se encuentra, generalmente, incorporado al ariete que se mueve en dirección vertical en el momento de comprimir la pieza de trabajo. A diferencia de los martillos, estas son impulsadas a base de movimientos de émbolo-pistón que provocan golpeteos de impacto en la pieza de trabajo. Dependiendo de la potencia que se requiera en las prensas, éstas se pueden dividir en prensas mecánicas y prensas hidráulicas (éstas últimas, tienen un tonelaje sobre 2,000 Ton), pudiendo reproducir todos los tipos de forjas que se hacen con los martillos. Las capacidades de las prensas son desde 300 hasta 8.000 toneladas, cuyos tipos se muestran en las Figs. 2.6 y 2.7 (11).

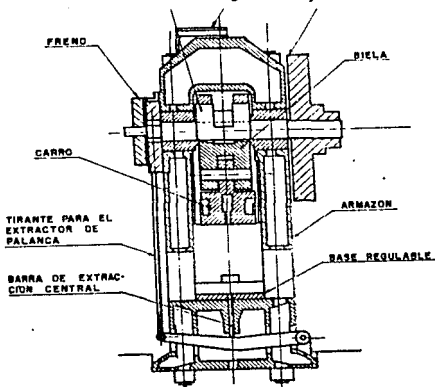


Fig. 2.6 Prensa mecánica excéntrica

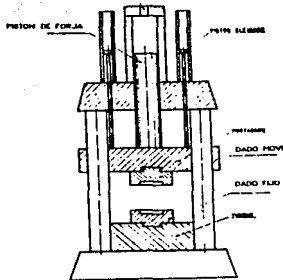


Fig. 2.7 Prensa hidráulica vertical

Las prensas mecánicas se manejan por medio de motores y se controlan por embragues de aire, son del tipo de ejes excéntricos, los cuales, hacen la labor de aplicar las compresiones. No obstante, la fuerza de compresión no se aplica en forma constante debido a que se requiere una fuerza máxima al final de la carrera para formar la rebaba.

Otra característica importante de las prensas mecánicas es que la carrera del ariete es más corta que la de los martillos debido a que es deseable que las matrices se pongan en contacto con el metal al menor tiempo posible para evitar el enfriamiento de las piezas de trabajo y el deterioro de la matriz. La capacidad de aplicación de carga de este tipo de prensas varía desde  $3 \times 10^5$  a  $8 \times 10^6$  Kg  $\varnothing$ .

Algunas ventajas y desventajas que presentan las prensas mecánicas con respecto a los martillos son:

- Son recomendables para grandes producciones.
- Los dados pueden fabricarse con menos material y mayor dureza debido a que no hay conformado por impacto.
- Se requiere de personal operario con menor entrenamiento.
- El costo inicial es mayor comparado con los martillos.
- No son aptas para dar una preforma debido a que la magnitud de las fuerzas aplicadas de compresión son todas iguales.
- Se aplican con menor frecuencia en la producción de piezas asimétricas comparadas con los martillos.

Las prensas hidráulicas contienen arietes, que como su nombre lo indica, son movidos por pistones en cilindros hidráulicos los cuales forman parte de todo un sistema hidráulico o hidroneumático. La manera de operar de esta máquina es realizar un acercamiento rápido del ariete (el cual está acoplado al dado) hacia la pieza de trabajo, en seguida se realiza un movimiento lento mientras se tiene la acción de compresión en la pieza de trabajo. Las velocidades de presión pueden ser controladas con precisión a manera de permitir el control de la velocidad del flujo del metal, lo que resulta ventajoso cuando se quiere producir piezas con tolerancias cerradas. Las capacidades de las prensas hidráulicas se encuentran entre  $3 \times 10^5$  y  $50 \times 10^6$  Kg  $\phi$ .

En esta maquinaria, así como en la anterior, existen ciertas ventajas y desventajas las que son:

- La presión puede cambiarse en cualquier punto de la carrera sólo ajustando la válvula de control de presión.
- Los rangos de deformación pueden ser controlados, y aún cambiados durante la carrera si esto fuera requerido. Esto es importante para forjar metales que pudieran romper si fueran sujetos a grandes deformaciones.
- Su costo inicial es mayor comparado con las prensas mecánicas para una capacidad equivalente.
- La acción de empuje es más lenta que la de las prensas

mecánicas lo que ocasiona un mayor tiempo de contacto entre el dado y la pieza de trabajo, aunque su vida sea más corta.

Las prensas de múltiples arietes consta de varios arietes que convergen en la pieza de trabajo en planos verticales u horizontales alternativamente o en combinación de ambos, la cavidad de los dados se llena por la acción del flujo del metal, desde el centro al exterior, debido a uno o más de los punzones utilizados. Una ventaja que presenta el uso de múltiples arietes es el ahorro considerable de material cuando se trata de piezas con cavidades poco complejas, ya que un punzón penetra en la pieza desplazando el material hacia los lados mientras que otro punzón lo junta hacia el interior. Otra ventaja que presenta este tipo de forja es que no existen rebabas ó líneas de partición que pudieran funcionar como concentradores de esfuerzos.

#### 2.2.4 PRENSAS PARA DADOS ABIERTOS

Las prensas hidráulicas son diseñadas para forjar en dados abiertos; las que se usan con capacidad de 1000 a 20,000 toneladas de fuerza. La diferencia entre éstas y las usadas en dados cerrados es la misma que la que se estableció con los martillos de forja.

#### 2.2.5 TRANSMISIONES DE LAS PRENSAS

Hasta aquí, hemos mencionado el funcionamiento de los tipos de transmisiones, sólo nos resta decir que esas prensas también pueden funcionar por impulsión de articulación. (llamada también acción de rodilla) la cual, nos da la ventaja de tener una operación multidireccional teniendo mayor ventaja mecánica; sirve para el formado de lámina y placa o para materiales de espesores pequeños y medianos «u».

Por seguridad, todas las prensas tienen controles dobles ya



que muchas de ellas son de acción rápida causando un serio peligro para las manos del operario, a causa de que el operador necesita quitar las manos de la zona de presión para accionar dos o más interruptores o controles de la máquina al mismo tiempo.

### 3. DADOS PARA FORJAR

Los dados para forjar sirven para dar las formas deseadas a las masas de material que se deban trabajar, y cada uno de ellos contiene el semimolde del objeto que se quiere obtener (sea plano o con cavidades), el cual se completa por un contradado que presenta el semiperfil del hueco que ajusta con el precedente.

#### 3.1 DADOS PARA FORJA ABIERTA

En el proceso de forja con dados abiertos, el metal no está contenido completamente en el dado; la pieza es formada gradualmente debido a rápidos y sucesivos golpes de martillo, es por ello que este tipo de forja se usa principalmente para lotes pequeños o medianos, además se puede utilizar para producir piezas pesadas con tolerancias abiertas.

La vida de los dados para forja abierta es mayor que para los dados de impresión de forja cerrada. Esto se debe a que la vida de los dados depende de la producción por hora que se realiza y no del número de impactos producidos.

Por ejemplo, no es común que los dados que se usan en martillos de vapor operen por más de 800 hrs, ya que en cierto período necesitan rectificarse. El rectificado consiste en aplanar o fresar las caras de los dados para quitar lo dañado o deteriorado del metal y reestablecer el paralelismo que se pudiera haber perdido a través del uso. Normalmente, los dados se fresan a menos de 6.0 mm, y generalmente están diseñados para soportar de 8 a 10 rectificaciones lo que equivale entre 4.800 a 6.000 hrs de vida útil.

La mayoría de los procesos de forja en dados abiertos se produce en parejas de dados planos, uno unido al martillo o ariete de la prensa y el otro al yunque. Las formas que pueden tener este tipo de dados son parejas semicirculares, en "V" y en combinación de un dado en "V" con un dado plano; en ocasiones especiales, se puede tener una combinación de dados planos con semicirculares como se muestra en al Fig. 3.1.

Los aceros usados para los dados de forja abierta dependen de la selección que realice el usuario, pero con frecuencia son los mismos aceros que se utilizarían para el proceso de forja con dados cerrados, aunque generalmente, la dureza de este tipo de dados es menor que la dureza de los dados cerrados.

El paralelismo es una parte muy importante al colocar los dados para forjar ya que, si las caras del dado que van montadas a un martillo o prensa no son paralelos con los dados de los yunques, la desviación de los dados causará un ahusamiento o adelgazamiento en el proceso de forja, lo que producirá que las tolerancias dimensionales estén fuera de lo especificado por los reglamentos establecidas para éste proceso.

En algunas ocasiones la forja con dados cerrados se combina con la de dados abiertos, a manera de que primero se utilicen los dados abiertos para dar una preforma a la pieza de trabajo, y posteriormente dar acabados finales con dados cerrados, esto se emplea con éxito cuando se requiere una producción de piezas de precisión.

La forja con dados abiertos también se emplea cuando se tienen lingotes grandes y se quieren conformar para desaparecer defectos de la fundición, tales como contracciones, porosidades y estructuras de fundición típicas (dendritas).

Con este tipo de dados se pueden forjar tochos grandes de

aceros aleados, donde éstos se deberán calentar cuidadosamente para minimizar la descarburización o para prevenir la fractura que pudiera ocasionarle algún calentamiento rápido durante el proceso; sin embargo, los dados se utilizan relativamente fríos ya que su temperatura no es tan crítica como la de los dados cerrados aunque los dados de forma, como los de curvatura o en "V", algunas veces se entibian cuando se operan con martillo para evitar fisuras en las secciones de concentración de esfuerzos.

Para la forja de dados abiertos no se requiere lubricación excepto cuando el flujo del metal sea problemático. El desarrollo sustancial de deformación en el centro de un tocho rompe la estructura de fundición y quita cualquier porosidad, dependiendo de la capacidad de presión y la proporción del ancho del dado o la profundidad del tocho. Si la presión es pequeña, y el dado es más angosto que el tocho, la penetración o la profundidad de deformación será también pequeña.

En muchas aplicaciones, la forja con dados abiertos es competitiva con la de dados cerrados en relación a su costo, ya que éste depende de las partes adicionales que se requieran durante el proceso de forjado.



Fig. 3.1 Dados para forja abierta. a) Planos, b) Curvos y c) Forma en "V".

### 3.2 DADOS CERRADOS PARA FORJA EN CALIENTE

Los dados de forja cerrados se fabrican de bloques de acero

aleado al níquel-cromo-molibdenu, que han sido forjados para obtener el mayor refinamiento de grano y resistencia al impacto, a la vez que se asegure una gran resistencia al desgaste mediante un tratamiento térmico doble. Lo primero que se hace en un dado para forjar es la cola donde irá sujeto al martinete o prensa, normalmente estas colas tienen la forma de "colas de milano" para que puedan encajar de manera exacta en las hendiduras del martillo o prensa. Después, se aplanan las superficies de golpeo, o si las superficies de golpeo deben estar en dos o más planos, se conforman las caras para una buena concordancia.

Posteriormente, se traza un dibujo o modelo de la parte a forjar trasladándose a plantillas de metal, las cuales a su vez, se emplean para el trazado de los dados.

### 3.2.1 IMPRESIONES PARA DADOS DE FORJA CERRADA

La forja con dados cerrados utiliza un calentamiento completo del metal, de las paredes y de las cavidades de los dados encerrando en su totalidad a la pieza de trabajo. La impresión puede estar en cualquiera de los dos dados ó dividida entre el dado superior e inferior. Las barras a forjar, que generalmente son cuadradas, se cortan a una longitud suficiente como para llenar sus cavidades.

La forja con dados cerrados consiste en hacer varias impresiones en un solo dado a manera de ir formando el material de trabajo hasta obtener la pieza final. Los diferentes tipos de impresiones están diseñados para servir a una función específica durante una secuencia de forjado, y se van incorporando a manera de tener los pasos de preforma, forma y acabado, en relación al procedimiento de subsecuentes impresiones. En particular, el diseño de una impresión deberá tener una localización exacta sobre la pieza de trabajo de tal manera que pueda quedar en

buena posición para la siguiente impresión.

Las impresiones de preforma se clasifican en seis tipos diferentes, los cuales son: la impresión reductora, la desbastadora, la aproximadora, la de alisado, la de curvatura y la de acabado, tales impresiones se utilizan para tener un contorno completo según las necesidades de forma deseada. Estas impresiones se pueden apreciar en la Fig. 3.2.

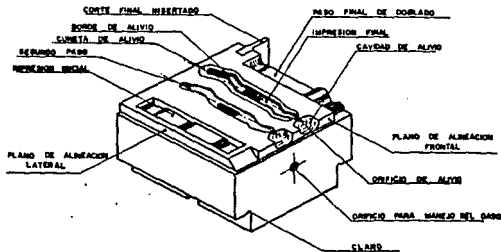


Fig. 3.2 Impresiones para dados cerrados.

Las impresiones reductoras, se usan para disminuir la sección transversal del material y alargarlo en su sección longitudinal. Estas impresiones tienen forma elíptica u oval con el objeto de obtener un flujo óptimo del metal sin producir rezagos o pliegues. Generalmente se usan en combinación con las impresiones desbastadora y aproximadora, o como una sola impresión previa a las impresiones tipo prensado o tipo acabado. En una secuencia de forjado, las impresiones reductoras, normalmente se utilizan en el primer paso y son colocadas en las orillas de los dados.

Las impresiones desbastadoras se utiliza para distribuir el

material sobre todo el molde, especialmente en secciones pesadas como paso previo a las impresiones del tipo prensado o acabado. De esta manera, se puede decir que la acción de estas impresiones es opuesta a la de las impresiones reductoras, y generalmente se colocan a la otra orilla de los dados. Esta impresión hace una distribución del material a manera que se llene sin tener un desperdicio en excesivo.

La impresión aproximadora da al material de trabajo su forma general y la manera de realizarlo es llenar la cavidad del molde con material que proviene de la impresión desbastadora y así tener una nueva redistribución preparando al material para su próxima impresión. Esta operación es similar a la anterior sólo que en este caso, envía el material a todos los rincones de la impresión, añadiendo radios más grandes de los ángulos interiores y de las esquinas para permitir con facilidad el flujo del metal, cabe señalar que estos moldes son de poca profundidad.

Las impresiones de alisado, se utilizan en la misma forma que las anteriores, pero en este caso, se suele girar el material 90° para una nueva redistribución reduciendo el ancho del material y a su vez prepararlo en forma dimensional para la próxima impresión. Es por ello que el material comienza a aproximarse a las dimensiones finales.

Las impresiones acabadoras, dan la forma final sobre toda la pieza de trabajo. Si existe algún exceso del material de trabajo, este tipo de impresión forzará a quitarlo por medio de una canal que se añade a su alrededor, a través del cual sale fuera de la impresión cuando la forja es martillada a su tamaño final. A pesar de su nombre, no se necesita utilizar la impresión de acabado en el último paso del proceso de forja, ya que, para una operación extra-final o posterior, se recomiendan impresiones de tipo curva o angular, o realizar procesos de

acuñación en caliente.

Las impresiones curvas o angulares pueden ser de flujo libre o de conservación final. Las primeras encierran al material en la curva mientras este fluye, usualmente el acabado consta de una sola curva; la segunda, atrapa al material en la curvatura a manera de estampado, generalmente, este tipo de impresiones consta de varias curvas.

Las impresiones aproximadora, acabadora y angular, se cortan con mucho cuidado en bloques mediante el uso de una fresadora, diseñada especialmente para ahondar los dados. Se emplean cortadores de varios tipos de acuerdo con la forma de cada sección de la impresión. Cuando las impresiones del dado a forjar están completas, los bloques se sujetan unidos en la posición que tendrán durante la operación de forja, y se vierte dentro de la impresión acabadora una aleación de plomo y antimonio. La pieza fundida resultante se utiliza para verificar la exactitud de las dimensiones de la forja.

Debido a que el acero se contrae al enfriarse desde su temperatura de forja mientras que la aleación de plomo no, es necesario tener en cuenta esta contracción al verificar las dimensiones de la fundición de plomo. Generalmente, la corrección es de  $1/64$  in por pulgada. Una vez verificada la fundición de plomo, se maquina una canal a los lados, el rebaje para la rebaba y el desbastador como trabajo final y la pieza fundida de plomo se emplea como modelo para que se puedan hacer con precisión las herramientas auxiliares. Estas herramientas incluyen los dados de punzonar, recortar y reconformar.

### 3.2.2 LINEA DE PARTICION DE LA PIEZA DE TRABAJO

La línea de partición es el plano que divide al dado superior y al inferior en un proceso de forja con dados



cerrados, generalmente, se localiza en la parte media del área transversal máxima de la pieza de trabajo y puede ser plana o multidireccional dependiendo del diseño de la forja. La forma y ubicación del plano de partición determinan considerablemente el costo del dado aumentado a su vez el costo del proceso.

Cuando la línea de partición está inclinada con respecto al plano de forja o las dimensiones principales de la pieza están en planos coordenados girados, el ángulo de salida debe estar en la misma dirección de la carrera de la prensa o martillo. Se llama ángulo de salida a la conicidad dada a las paredes interiores y exteriores de una pieza para facilitar su extracción de la cavidad del dado. Los ángulos de salida no sólo reducen las dificultades de producción durante el proceso de forja sino que también reducen la fatiga del dado.

En la mayoría de los casos, los ángulos de salida menores de 5° impiden el uso de martillos de forja, es por ello que se requiere la adición de un mecanismo con pernos expulsores (botadores), para extraer la pieza forjada de la cavidad.

Las líneas de partición multidireccionales casi siempre nos dan un ahorro en el maquinado de los dados. Estas pueden seguir la trayectoria del alma de la pieza si se encuentra situada en varios planos.

### 3.3 DESGASTE Y FALLAS DEL DADO PARA FORJAR

La mayor parte de las piezas forjadas de aceros se conforman a temperaturas entre 1150 y 1300°C. En estas condiciones el material se expande ligeramente, y durante el proceso de enfriamiento hay una contracción, como ya se mencionó anteriormente. Es difícil controlar tanto el calentamiento como el enfriamiento de un material dentro de límites estrechos durante el proceso de forja. En consecuencia, es difícil hacer

que la forja deje la impresión del dado a una temperatura que sea exactamente igual a la contracción de  $1/84$  in/in, que es la escala de contracciones a la que se llega cuando el material a forjar es acero.

Por tanto, el desgaste del dado es la cantidad de diferencia dimensional que se produce por la abrasión normal de la impresión. Esta llega a estar en el intervalo de 0.39 a 0.79 mm sobre las superficies externas de los dados y una cantidad parecida en las superficies interiores tales como salientes en forma de tapón.

El diseñador de dados de forja puede controlar las variaciones de tolerancias aplicando un valor superior o inferior al real. Si un sobrante excesivo es expulsado a través de las caras del dado y se vuelve demasiado frío, la rebaba tenderá a evitar que los dados se cierren totalmente. Para prevenir esto, el espesor de la rebaba dentro del dado se deberá mantener tan grande como sea posible.

Durante el proceso de forja, se experimentan ciertos desgastes en las caras de los dados provocado por el contacto de las mismas. Una manera de disminuir dicho desgaste es proporcionando una área de golpeo amplia con un acabado superficial terso en ambas caras. La escasez dimensional también puede ser producida por la cascarilla que cae dentro de la cavidad del dado, pero el diseñador no puede tener control sobre este factor.

Por otro lado, existen una serie de fallas que ocasionan un desgaste excesivo en los dados cuya clasificación la podemos dividir en tres grupos: sobrecarga del dado, abrasión o sobrecalentamiento.

La falla por sobrecarga es menos frecuente que las otras dos

pero si se tiene un dado sobrecargado se tenderá a desgastar rápidamente hasta llegar a la fractura. La sobrecarga puede evitarse si se consideran los siguientes factores: a) se debe tener una cuidadosa selección del acero y de la dureza que se vaya a emplear en el dado durante el proceso de forjado, b) se deberán utilizar dados de tamaños adecuados dependiendo de la presión de impacto requerida, c) se debe tener un diseño apropiado del dado de tal manera que permita un movimiento libre del flujo del metal de trabajo, y d) deberá asegurarse un alineamiento apropiado en los martillos y prensas.

La acción abrasiva es independiente del flujo y de la propagación del metal caliente en la impresión de un dado de forja. Sin embargo, la abrasión es particularmente severa conforme aumenta la complejidad del diseño de la pieza a forjar, si el metal presenta alta resistencia al rojo ó si existe escamación en el metal de trabajo. Aunque la abrasión no puede eliminarse, sus efectos pueden ser disminuidos si: a) se tiene un buen diseño del dado, b) si se realiza una buena selección de la composición química y dureza del mismo, c) si la técnica de forja incluye un apropiado calentamiento que evite la escamación y d) si se tiene una correcta lubricación del dado.

Cuando los dados comienzan a calentarse su resistencia al desgaste disminuye, y si el dado se sobrecalienta existe un desgaste más rápido que da lugar a la fractura. A ésta acción se le conoce como falla del dado por sobrecalentamiento. El sobrecalentamiento comunmente ocurre en aquellas áreas de la impresión donde se encuentran proyectadas cavidades internas. Si existe una producción continua de piezas forjadas, también habrá sobrecalentamiento del dado.

Si un sistema interno de enfriamiento del dado que sea el adecuado para prevenir sobrecalentamiento no se pudiera anexas por razones económicas, los dados o porciones de dados, que sean

susceptibles a sobrecalentamiento deberán construirse con aceros de muy alta resistencia al calor.

Resumiendo, la vida del dado depende de varios factores, incluyendo el material del dado y la dureza, la composición del material a forjar, de la temperatura de forja, de las condiciones del material a trabajar, del tipo de equipo que se use y del diseño de la pieza de trabajo. Si se altera alguno de estos factores, casi siempre se afectan a los otros cuyos efectos no serán constantes a través de la vida del dado.

### 3.4 MATERIALES PARA HERRAMIENTAS Y DADOS

La selección de los materiales para herramientas es el resultado de un estudio cuidadoso de sus propiedades físicas. En el caso de los aceros, la selección es complicada debido a que cada uno de estos presenta propiedades especiales, entre las que podemos mencionar: su resistencia al rojo, a la abrasión, al impacto, a la deformación o distorsión durante el temple, y la facilidad que pudieran tener para maquinarse. Ningún acero presenta esas propiedades en un grado óptimo, pero se han desarrollado diferentes aceros cuyas características cumplen con los requisitos establecidos para la función que desempeña cada herramienta.

Los aceros para herramientas listados a continuación, se aplican adecuadamente en el 95% de todas las operaciones de formado del metal. La lista contiene 19 aceros, nueve de los cuales son ampliamente usados y aprovechados. Los otros aceros incluidos, presentan una pequeña variación en su composición a fin de mejorar el funcionamiento de la herramienta, y su uso, se justifica algunas veces debido a consideraciones especiales.

Serie	C	Mn	Si	W	Mo	Cr	V	Co
W1	1.00							
W2	1.00						0.25	
O1	0.90	1.00		0.50		0.50		
O2	0.90	1.50						
O7	1.20			1.75	0.25	0.75		
A2	1.00				1.00	5.00		
A4	1.00	2.00			1.00	1.00		
A5	1.00	3.00			1.00	1.00		
A6	0.70	2.00			1.00	1.00		
D2	1.50				1.00	12.00		
D3	2.25					12.00		
D4	2.25				1.00	12.00		
D6	2.25		1.00	1.00		12.00		
S1	0.50			2.50		1.50		
S2	0.50		1.00		0.50			
S4	0.50	0.80	2.00					
S5	0.50	0.80	2.00		0.40			
H11	0.35				1.50	5.00		
H12	0.35			1.50	1.50	5.00	0.40	
H13	0.35				1.50	5.00	1.00	
H21	0.35			9.00		3.50		
H28	0.50			18.00		4.00	1.00	
T1	0.70			18.00		4.00	1.00	
T15	1.50			12.00		4.00	5.00	5.00
M2	0.85			6.25	5.00	4.00	2.00	
M3	1.00			6.00	5.00	4.00	2.40	
M4	1.30			5.50	4.50	4.00	4.00	
L2	0.50					1.00	0.20	
L3	1.00					1.50	0.20	Ni
L6	0.70					0.75		1.50
F2	1.25			3.50				

Tabla 3.1. Composición química de los aceros

Los aceros para herramientas se identifican por símbolos de letras y números como se denota en la tabla 3.1. Todos los aceros de la lista, excepto en los grupos S y H se pueden tratar térmicamente y aumentar su dureza por encima de 82 HRC, por lo que se consideran materiales duros, fuertes y resistentes al desgaste. Frecuentemente la dureza es proporcional a la resistencia al desgaste, pero esto no siempre sucede, ya que la resistencia al desgaste normalmente se incrementa con el contenido de elementos aleantes mientras que la dureza aumenta con el contenido de carbono.

Por otro lado, la tenacidad de los aceros es inversamente proporcional a la dureza y se incrementa marcadamente con el contenido de aleante o cuando el contenido de carbono se disminuye.

La clasificación general de los aceros para herramientas en base a su naturaleza y aplicación es la siguiente:

*Serie W aceros para herramientas endurecidos en agua (Water Hardening Tool Steels)* Este grupo incluye a los aceros al carbono (W1) y a los aceros al carbono-vanadio (W2). Los aceros al carbono fueron los primeros que se emplearon y son ampliamente usados debido a su bajo costo, a sus cualidades de resistencia a la abrasión y al impacto, a su fácil maquinabilidad, y a su facilidad para ser afilados. Ambos aceros presentan poca templabilidad.

*Serie O Aceros para herramientas endurecidos en aceite (Oil Hardening Tool Steels)* Los aceros para herramientas templados en aceite son del tipo O1 y O2, al manganeso, son de fácil utilidad y resultan de bajo costo. Esos aceros no son empleados con tanta frecuencia como los aceros templables en agua, y presentan la misma tenacidad cuando se encuentran en su máximo nivel de endurecimiento. La resistencia al desgaste mejora respecto a los aceros endurecidos en agua con el mismo contenido de carbono. El acero O7 es más resistente al desgaste debido a su contenido de tungsteno y su alto contenido de carbono.

*Serie A Aceros para herramientas endurecidos al aire (Air Hardening Die Steels)* El acero A2 es el tipo representativo de los aceros templables al aire. Tiene una distorsión mínima cuando se lo temple y tiene el más alto nivel de tenacidad comparados con los aceros para dados templables en

aceite, con igual o mayor resistencia al desgaste. Los aceros A4, A5 y A6 pueden ser templados a bajas temperaturas pero tienen menor resistencia al desgaste y mayores propiedades ante la distorsión.

*Serie D Aceros para dados al alto carbono y cromo (High Carbon High Chromium Die Steels)* Los aceros del tipo D2 son los principales en su clase. Estos encuentran un amplio rango de aplicaciones donde se emplean dados en jornadas continuas y prolongadas de trabajo. Tienen templabilidad profunda, son poco tenaces y tienen buena resistencia al desgaste. Los aceros D3, D4, y D6 presentan un contenido adicional de carbono, mayor resistencia al desgaste y baja tenacidad. Los aceros D2 y D4 son templables al aire.

*Serie S Aceros para herramientas de resistencia al choque (Shock resisting tool steels)* Esos aceros contienen menos carbono, y presentan mayor tenacidad que los anteriores. Son aplicados donde se realizan cortes pesados durante el conformado del material, y donde la fractura es un serio problema. Los aceros S1, S4 y S5 son de fácil adquisición y los aceros S4 y S5 son más económicos que los S1.

*Serie H Aceros para herramientas de trabajo en caliente (Hot Work Die Steels)* Esos aceros deben combinar la dureza al rojo con una buena resistencia al desgaste y al impacto. Ellos son templables al aire y en ocasiones son usados para aplicaciones de trabajo en frío. Tienen relativamente bajo contenido de carbono y medio o alto contenido de elementos aleantes.

*Series T y M Aceros rápidos al tungsteno y molibdeno respectivamente (Tungsten and Molybdenum High speed steels)* Los aceros T1 y M2 son equivalentes en funcionamiento y tienen buena dureza al rojo y resistencia a la abrasión. Tienen mayor

tenacidad que muchos de los otros aceros para dados. Se pueden endurecer por métodos convencionales o carburizados por aplicaciones de trabajo en frío. Los aceros M3, M4 y T15 tienen mayor sensibilidad al corte y resistencia al desgaste. Son los más difíciles para maquinar y afilar debido a su alto contenido de carbono y elementos aleantes.

*Serie L Aceros para herramientas de baja aleación (Low-alloy tool steels)* Los aceros L3 y L6 son usados para dados en aplicaciones especiales. Otros aceros L encuentran su aplicación en donde la fatiga y la tenacidad se consideran importantes tal como los dados para impresión.

*Serie F Aceros para acabados (finishing steels)* El acero F2 es de uso limitado pero ocasionalmente se aplica cuando se desea extremadamente alta resistencia al desgaste y donde se desea poca templabilidad (2).

Después de haber dado un resumen de todos los materiales para herramientas existentes, toca ahora el turno de estudiar los aceros para dados de forja de trabajo en caliente, los que son el objeto de este estudio.

Los aceros para dados de forja de trabajo en caliente se seleccionan en base a los requerimientos de servicio a los cuales estén destinados. Generalmente se utilizan aceros de las series H, O, D, A ó F.

Los aceros para dados de forja se seleccionan de acuerdo a los siguientes criterios:

a) Según su capacidad para resistir a la fractura que pudiera causarse durante el calentamiento.

b) Según su capacidad para soportar altas presiones y choques de cargas pesadas.



- c) Según su uniformidad de endurecimiento.
- d) Dependiendo de la forma, tamaño y peso de la pieza a forjar.
- e) De la temperatura a la cual se forjará el metal.
- f) Del número de procesos de forja a realizar.
- g) Del tipo de equipo a utilizar.
- h) De las tolerancias dimensionales de forjado.
- i) De los equipos auxiliares a utilizar.

Con frecuencia no es posible encontrar un acero que cumpla con la totalidad de una serie de propiedades necesarias para ciertas condiciones de forjado y por tanto, se deberá seleccionar el acero de acuerdo a su composición y de acuerdo a la dureza del dado manteniendo una estrecha relación entre ambas propiedades. Una mayor dureza prolonga la resistencia al desgaste del dado pero en exceso puede causar fractura.

#### 3.4.1 PROPIEDADES DE LOS ACEROS SERIE AISI H

Los aceros para herramientas de trabajo en caliente de la serie H están compuestos principalmente por aleaciones de cromo, tungsteno y molibdeno, tal como lo podemos ver a continuación:

serie H	C	Mn	Si	W	Mo	Cr	V	Co
10	0.40	0.55	1.00		2.50	3.25	0.40	
11	0.40	0.30	1.00		1.35	5.00	0.40	
12	0.35	0.30	1.00	1.30	1.50	5.00	0.40	
13	0.35	0.30	1.00		1.35	5.00	1.00	
14	0.40			5.00		5.00		
15	0.40				5.00	5.00		
18	0.55			7.00		7.00		
19	0.40			4.25		4.25	2.00	2.25
20	0.35			9.00		2.00		
21	0.35			9.00		3.50		
22	0.35			11.00		2.00		
23	0.30			12.00		12.00		
24	0.45			15.00		3.00		
25	0.25			15.00		4.00		
26	0.50			18.00		4.00	1.00	
41	0.65			1.50	8.00	4.00	1.00	
42	0.60			8.00	5.00	4.00	2.00	
43	0.55				8.00	4.00	2.00	

Tabla 2. II Composición química de los aceros para herramientas de la serie H

Los aceros de la serie H para trabajo en caliente, se utilizan principalmente en dados para fundición, dados para forja, brocas, cortadores y mandriles para trabajo en caliente, herramientas para extrusión en caliente, y en dados para trabajo en caliente con resistencia al impacto us.

Los aceros aleados con 5% de cromo son los tipos más característicos de esta serie. El acero H11 fué el primero en desarrollarse para aplicaciones en moldes donde se fundieran aleaciones de aluminio. En él se buscaron propiedades físicas que cumplieran con las demandas de condiciones de trabajo para esas fundiciones, para ello, los moldes requerían tratamientos de endurecimiento al aire a temperaturas relativamente bajas, que su templabilidad fuera profunda, que tuvieran una tendencia mínima a la escamación durante el enfriamiento al aire, buena resistencia al choque térmico que pudiera ser causada por los cambios bruscos de temperatura, que tuvieran resistencia a la acción corrosiva del aluminio y que no tuvieran un alto

contenido de elementos aleante que causara un costo elevado. Posteriormente, se tuvo la necesidad de destacar algunas de estas características por lo que se pensó en modificar su composición química obteniendo las variantes descritas en la Tabla 3.II.

Entre las propiedades mecánicas más sobresalientes del acero es destacada su tenacidad, (capacidad para resistir a la ruptura  $\sigma_{20}$ ), que es la propiedad que los hace distintos de la mayoría de los otros aceros para herramientas. Tienen mayor resistencia al impacto que los de la serie S. y mayor resistencia al rojo. Aunque su dureza no es tan grande como la de los aceros altamente aleados, su extraordinaria resistencia al impacto los hace preferibles en la mayoría de las aplicaciones de trabajo en caliente, especialmente cuando es necesario enfriarlos con agua durante el servicio. Además, el tratamiento térmico es uno de los factores que determinan las condiciones óptimas de servicio para su comportamiento.

#### 4. TRATAMIENTOS TERMICOS EN ACEROS PARA DADOS DE FORJA

Los tratamientos térmicos que se pueden emplear en aceros para herramientas son el recocido convencional, isotérmico y de relevamiento de esfuerzos, el temple convencional, isotérmico e interrumpido, el revenido y algún tratamiento térmico superficial como la carburación y nitruración que sólo se realiza en casos especiales. El tratamiento térmico de normalizado no es recomendable debido a que estos aceros se templean parcial o totalmente al aire.

##### 4.1 PRECALENTAMIENTO ANTES DEL TRATAMIENTO TERMICO DE AUSTENITIZACION

El precalentamiento de los aceros para herramientas antes del tratamiento térmico de austenitización es común, pero no siempre se requiere. Para piezas pequeñas, de formas sencillas, el precalentamiento se puede eliminar. El precalentamiento normalmente se emplea como una medida de seguridad para minimizar los riesgos de fractura y extrema distorsión que resultan de choques térmicos que sufren los aceros, los cuales se generan por calentamientos bruscos de la pieza de trabajo cuando se expone a altas temperaturas en el horno de austenitización (9).

El precalentamiento es de gran beneficio para aceros altamente aleados como los de trabajo en caliente y los aceros rápidos, ya que les proporciona un mayor tiempo para alcanzar el equilibrio térmico y elimina la mayoría de los riesgos de una exposición excesiva a la temperatura de austenitización. Las herramientas a ser austenitizadas en sales, normalmente se precalientan en sales neutras, aunque se pueden calentar en el

medio ambiente del horno si es que esto es más conveniente, económicamente. Cuando se realiza el tratamiento térmico de austenitización en el medio ambiente del horno, se tendrá que hacer un precalentamiento de las piezas en atmósferas gaseosas como son la atmósfera de base endotérmica y la atmósfera de base amoníaca para protección de la superficie (4).

El precalentamiento se realiza en un horno auxiliar que se coloca junto al horno donde se vaya a hacer la austenitización, aunque es posible precalentar y austenitizar en el mismo horno. Para ello, luego que la pieza de trabajo alcanza la temperatura de precalentamiento, se continúa calentando el horno hasta la temperatura de austenitización dejándose el tiempo necesario para que se homogenice la estructura de la pieza. Para elegir si se utilizan uno o dos hornos, se toma en consideración la diferencia entre la temperatura de precalentamiento y la de austenitización del tipo de acero a tratar térmicamente, además de los requerimientos de producción. Por ejemplo, esto no es recomendable para aceros que trabajen a altas velocidades ya que la diferencia entre la temperatura de precalentamiento y la de austenitización puede ser mucho más alta que 470°C y aunado a esto, si la operación implica altos volúmenes de producción, y el precalentamiento debe hacerse lo más rápido posible, es necesario utilizar hornos separados para precalentar y austenitizar.

La temperatura de precalentamiento recomendable de los aceros para trabajo en caliente se encuentra alrededor de 815°C, y en especial, para los aceros de la serie H ésta se encuentra entre 700 y 870°C (4).

El procedimiento a seguir durante el precalentamiento de estos aceros lo podemos dividir en dos categorías, una en la que los dados incluyan materiales en forma de bloques u otras herramientas pesadas y la otra en la que intervengan piezas

pequeñas. En el primer caso, el precalentamiento se realiza en tres etapas, en la primera etapa los dados se colocan en hornos abiertos a una temperatura que no exceda los 280°C. Una vez que las piezas alcanzan la temperatura del horno, se calentarán lenta y uniformemente, empleando velocidades de calentamiento entre 60 y 100°C/hr, hasta la temperatura de precalentamiento; dicho calentamiento se alcanza en segunda instancia entre 650 y 680°C; la tercera etapa se realiza hasta 880°C. Para el segundo caso, sólo se requiere llegar a las temperaturas entre 700 y 870°C (11).

Posteriormente se mantienen ahí por media hr/cm de espesor, Co por cm de espesor del contenedor, si se empaqueta (12). Los termopares deberán estar junto a las piezas que se encuentran en los recipientes a manera de tener una medida más real de la temperatura, para lograr esto, se realizan perforaciones dentro de las cajas de empaquetamiento por la parte posterior, donde se introduce la punta del termopar lo suficiente como para detectar la temperatura del material a tratar.

Para partes especiales, como dados de fundición complejos, el precalentamiento puede omitirse. A veces la distorsión de dichas partes se puede disminuir empaquetándolas y calentándolas lenta y uniformemente hasta la temperatura de transformación (13).

#### 4.2 AUSTENITIZACION

El tratamiento térmico de austenitización consiste en elevar la temperatura de un material (en este caso la del acero para herramientas) hasta obtener la solución sólida intersticial de carbono disuelto en hierro gama; conociéndose esta solución con el nombre de austenita ( $\gamma$ ). En los aceros para herramientas esto se logra en el intervalo promedio de 990 a 1260°C.

## TRATAMIENTOS TERMICOS EN ACEROS PARA DADOS DE FORJA 43

---

En los aceros para herramientas, la austenitización es la operación más crítica de todas las operaciones de calentamiento que se hacen en los aceros para herramientas, ya que si se sobrepasa la temperatura de austenitización o se emplean tiempos muy largos, dará como resultado una distorsión excesiva del material, crecimiento de grano irregular, pérdida de ductilidad, y baja resistencia tensil. Es por ello que se tiene que tomar en cuenta el equipo necesario donde se vaya a austenitizar el material. Dicho equipo se escoge en base a la composición del acero, tamaño y forma de las piezas de trabajo, de acuerdo a estándares para endurecimiento y según los requerimientos de producción (8).

En general, tanto los baños de sales, como los hornos con atmósferas tienen un servicio satisfactorio alrededor de la temperatura de austenitización dando un intervalo de servicio de 760 a 1300°C. También se pueden utilizar empaquetaduras de grafito en el intervalo de 760 a 930°C. La atmósfera endotérmica producida por un generador de gas es el medio de protección que con mayor frecuencia se utiliza, no sólo en aceros para herramientas sino en general para todo tipo de acero. Esta se produce haciendo pasar mezclas relativamente ricas de aire con hidrocarburos gaseosos por una cámara de acero, la que es calentada externamente con un catalizador, generalmente de níquel. El gas que más se emplea para generar una atmósfera endotérmica es el natural (hasta 95% de metano).

En la generación de estas atmósferas, el hidrocarburo gaseoso y el aire se miden en una proporción tal que haya oxígeno suficiente para formar monóxido de carbono e hidrógeno pero sin exceso para dar lugar al dióxido de carbono y vapor de agua, es por ello que debe controlarse la relación aire/gas para no alterar el punto de rocío de la atmósfera. En los aceros para herramientas, que se encuentran dentro del horno, el punto de rocío se mantiene de 35 a 45°F dependiendo del contenido de

carbono del acero y la temperatura de operación. El punto de rocío entre 38 y 40°F es ideal para los aceros H11 y H13 que se austenitizan a 1010°C. Los hornos al vacío también se utilizan con éxito para propósitos especiales (2)(e).

También se suelen utilizar empaquetaduras de coque para la protección de piezas de acero para herramientas pequeñas, y así, evitar la oxidación, ya que remueve cualquier exceso de humedad. Este método es el más empleado cuando se carece de equipos especiales como los antes mencionados. consiste en colocar las piezas en una caja de metal resistente al calor, posteriormente cubriéndolas con coque previamente tamizado en polvo fino hasta una altura de aproximadamente 2 a 4 pulg, dejando un espacio suficiente para que exista aire al cerrar la caja, posteriormente, se sella con una pasta de asbesto. De esta manera la caja está lista para ser colocada en el horno.

Durante la austenitización, se debe tener un control continuo del medio de calentamiento sea éste baños de sales o atmósferas a fin de que las piezas de trabajo no empiecen a carburizarse ó descarburizarse. Por lo anterior, los baños a utilizar deberán estar libres de cualquier elemento contaminante, las sales deberán renovarse y las atmósferas deberán controlarse en base a la proporción de los gases y puntos de rocío (e).

A continuación se enlistan las temperaturas de austenitización, de precalentamiento y los medios de temple para los aceros de la serie H que es el objeto de estudio de este trabajo:



TRATAMIENTOS TERMICOS EN ACEROS PARA DADOS DE FORJA 45

ACERO SERIE	TEMPERATURA DE AUSTENITIZACION	TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO	MEDIO DE TEMPLE
H	°C	°C	
10	1010-1036	816	aire
11	995-1025	816	aire
12	995-1025	816	aire
13	995-1036	816	aire
14	1010-1065	816	aire
16	1122-1176	816	aire,aceite
19	1094-1204	816	aire,aceite
20	1094-1204	816	aire,aceite
21	1094-1204	816	aire,aceite
22	1094-1204	816	aire,aceite
23	1204-1260	816	aceite
24	1094-1232	816	aire,aceite
25	1149-1260	816	aire,aceite
26	1176-1260	870	aire,aceite,sales
41	1094-1190	733-843	aire,aceite,sales
42	1121-1218	733-843	aire,aceite,sales
43	1094-1190	733-843	aire,aceite,sales

Tabla 4.1 Temperaturas de Austenitización y Precalentamiento para aceros de la serie H.

El equipo y los métodos utilizados para austenitizar están determinados por el tamaño de la pieza de trabajo. Por ejemplo, para piezas menores de 220 Kg, se puede aplicar cualquier método; sin embargo, para herramientas grandes o difíciles de manejar es frecuente usar baños de sales o algún empaquetamiento.

Debido a que el carbono es el elemento más importante en el control de las propiedades mecánicas de todos los aceros para herramientas, cuando se austenitizan las herramientas o dados fabricados con aceros para trabajo en caliente deberán protegerse contra la carburización o descarburización (u). Un cambio del contenido de carbono, cualquiera que sea, tendrá una gran influencia en sus propiedades después de habérselo aplicado el tratamiento térmico, igual o mayor que si se cambiara

cualquier otro elemento presente.

Por ejemplo, muchos aceros están fabricados con alto contenido de carbono para incrementar la resistencia al desgaste. Otro factor, es mantener la superficie del acero en condiciones tales que el acabado superficial de las herramientas no altere el trabajo real de ésta debido al endurecimiento que se pudiera dar durante el tratamiento termico. Si en éste caso se carburiza el acero, es decir, cuando el contenido de carbono en la capa superficial se incrementa (esto sucede generalmente cuando se calienta en gases, líquidos o medios carbonosos) el acero se endurece incrementándose la resistencia al desgaste, pero haciendo más frágil la superficie, y a su vez produciendo menor resistencia a la fractura del material. En cambio, la descarburización sucede por la presencia de oxígeno o humedad que reaccione con el carbono contenido en el material durante la austenitización. Estos aceros tienden a descarburizarse, si se utilizan hornos abiertos. Para minimizar dicha descarburización, el precalentamiento debe hacerse alrededor de 790°C, aunque si se empaquetara la pieza, no sería necesario.

En general, la descarburización disminuye la resistencia a la fractura del material, la cual provoca fallas por fatiga en los dados, un ejemplo claro se denota en los dados para fundición. Esto hace que el metal fundido se solde a las superficies descarburizadas, produciendo además un cambio en la forma del dado, debido a que las superficies descarburizadas tienen poca resistencia al desgaste y se erosionan fácilmente. También, el principal resultado de la descarburización es la pérdida del efecto del tratamiento térmico sobre la dureza real del dado. Para obtener una dureza específica de la superficie descarburizada, el dado deberá estar revenido a bajas temperaturas.

#### 4.3 RECOCIDO COMPLETO

Se entiende por recocido completo el someter a los aceros a un tratamiento térmico de austenitización, seguido de un enfriamiento lento a través del rango de transformación, por ejemplo, el enfriamiento se puede efectuar dentro del horno desde la temperatura que se desee.

Para cualquier acero, el recocido es el tratamiento térmico con que el material sale de la fábrica, es decir, es en ese estado como llega al usuario. Sin embargo, cuando los aceros para herramientas son sometidos a trabajos de formado sea en calentamiento o enfriamiento, la herramienta debe ser recocida constantemente a fin de regular el crecimiento del tamaño de grano ya que éste se desarrolla irregularmente ocasionando mezclas de diferentes tamaños. Este procedimiento es importante especialmente con los aceros de alto contenido de aleantes.

Como ya se mencionó, el recocido consiste en calentar al acero lento y uniformemente a una temperatura inferior a la del intervalo de transformación, manteniendo la pieza a esa temperatura durante un tiempo de 1 a 4 hrs dependiendo de la forma y tamaño de la pieza. Este tiempo debe ser suficientemente prolongado para que se uniformise el calor. El enfriamiento posterior debe ser lento, con una velocidad de enfriamiento controlada. Las pérdidas de calor del horno determinan la variación de enfriamiento; los hornos con grandes cargas tendrán una variación de enfriamiento más pequeña que los de cargas ligeras. Cuando se empaquetan las piezas durante el recocido, el tiempo de permanencia a la temperatura de recocido será de 0.5 hr/cm de la sección transversal del empaque. El empaque deberá ser enfriado posteriormente desde esta temperatura a velocidades que no excedan los 40°C/hr hasta 500°C aproximadamente. Abajo de esta temperatura la pieza puede tolerar enfriamientos más

rápidos.

Durante el recocido, es conveniente usar hornos con atmósferas, baños de sales, empaquetamientos de grafito o baños de plomo. Para este tipo de tratamiento se requiere entonces, un equipo de calentamiento con un controlador de temperatura lo más exacto posible y buena protección a la descarburación. Si se requiriera aún mejor protección a la descarburización se tendrán que empacar las piezas con cualquier material que no sea descarburizante tal como carbón y mica, o virutas de hierro fundido. En el recocido de aceros para herramientas, frecuentemente se utilizan los hornos con atmósferas protectoras, entre las cuales destacan las atmósferas de base amoníaco, que reducen y previenen la oxidación de los aceros de alto cromo y las atmósferas de base endotérmica que minimizan la pérdida o el exceso de carbono en la superficie durante los tratamientos térmicos relativamente largos.

De igual manera, se pueden manejar partes pequeñas en baños de sales o de plomo, mientras que para piezas grandes y pesadas es común recocerlas en atmósferas controladas. El recocido isotérmico se realiza en tiempos más cortos comparado con el enfriamiento lento convencional dentro del horno. Ambos se pueden adaptar convenientemente para ciclos de recocidos continuos pero requiriéndose un equipo adecuado.

Cuando se emplean aceros para trabajo en caliente, deberán empaquetarse en material neutro ya que éstos son extremadamente susceptibles tanto a la carburación como a la descarburización. Las limaduras, arenas o micas se usan raras veces, pero tales materiales, si se los mezcla con un poco de carbón u otro material carburizante, pueden evitar que el acero se descarburice. El material de empaquetamiento deberá estar seco y libre de todo material oxidante, además de envolver todas las superficies del material, y llenar el contenedor o crisol. El

## TRATAMIENTOS TERMICOS EN ACEROS PARA DADOS DE FORJA 42

---

recipiente deberá sellarse después del empaquetamiento, y el tiempo de permanencia del acero a la temperatura de recocido deberá ser, también, 0.5 hr/cm de espesor en el contenedor.

En hornos de atmósferas controladas, se trabaja con soportes para que las piezas no toquen el fondo del horno y para asegurar un calentamiento uniforme sobre los aceros, especialmente los de la serie H, así como permitir una circulación libre de la atmósfera durante el proceso. Las piezas deberán sujetarse de tal manera que no se distorsionen por efecto de su propio peso.

### 4.3.1 RECOCIDO PARA RELEVAMIENTO DE ESFUERZOS

Los tratamientos térmicos para relevar esfuerzos remueven o reducen los esfuerzos residuales inducidos en las piezas herramientas hechas de acero para trabajo en caliente, que se produjeron por maquinado u otro tipo de trabajo en frío. Estos tratamientos disminuyen la probabilidad de distorsión o fractura durante el endurecimiento de las herramientas.

Por ejemplo, cuando se presentan altos esfuerzos residuales en las herramientas que han sido afiladas, éstos se pueden eliminar con tratamientos térmicos de relevación de esfuerzos, inmediatamente después del esmerilado y se hacen por debajo de la temperatura de revenido, a manera de mantener una dureza conveniente en la herramienta.

Las herramientas también pueden presentar altos esfuerzos residuales cuando se les usa. En estas ocasiones se pueden relevar dichos esfuerzos luego de cada intervalo de servicio de la herramienta, por medio de un revenido a la temperatura apropiada. Esta temperatura no deberá exceder esa temperatura ya que puede ocurrir un ablandamiento indeseable llamado sobrerevenido (8).

Los tratamientos térmicos para relevar esfuerzos se realizan comunmente en hornos al aire o en baños de sales usados para revenido. Ni el calentamiento, ni la velocidad de enfriamiento son criticos, aunque el enfriamiento deberá ser bastante lento para prevenir la introducción de nuevos esfuerzos. Cuando se realiza este tipo de recocidos, raras veces se requiere el empleo de protección contra la formación de escamas o descarbonización a menos que la temperatura de relevamiento de esfuerzos sea superior a 650°C (6), aunque temperaturas muy elevadas son poco frecuentes.

Algunas veces se emplean tratamientos para relevar esfuerzos en las herramientas de aceros para trabajo en caliente después de un maquinado burdo, o mejor, después de un maquinado final, esto se hace a temperatura de 650 a 730°C. Este tratamiento minimiza la distorsión durante el endurecimiento posterior particularmente en dados o herramientas que tienen cambios bruscos en su forma o que tienen cavidades profundas. Además, se puede obtener un buen control dimensional si después del temple y revenido de una pieza específica se hace un maquinado final, siempre y cuando la pieza de trabajo tenga una dureza tal, que no se encuentre fuera de su intervalo de maquinabilidad (6).

En los aceros para trabajo en caliente, se puede realizar el recocido isotérmico con la finalidad de ahorrar tiempo durante el enfriamiento. éste consiste en enfriar las piezas desde la temperatura de austenitización hasta justo debajo del rango de transformación manteniendo las piezas a esa temperatura el tiempo suficiente como para tener una transformación completa de austenita en agregados blandos de ferrita y carburos. La velocidad de enfriamiento posterior a esa temperatura, no tendrá efecto en la microestructura ni en las propiedades del acero (6)(13).

#### 4.4 T E M P L E

El tratamiento térmico de temple se puede hacer enfriando la pieza de trabajo en agua, salmuera, aceites o aire, desde la temperatura de austenitización, dependiendo de la composición y el espesor del material. Los medios de temple deberán enfriar la pieza de trabajo lo suficientemente rápido como para obtener la dureza máxima; aunque, en la práctica se debe usar un medio de temple con una capacidad de enfriamiento que no haya posibilidad de fractura.

En el caso de los aceros para trabajo en caliente, éstos son altamente templables alcanzando durezas completas por enfriamiento al aire; sin embargo, aunque con esos tipos de aceros se tenga la más alta templabilidad, si existen secciones de bloques de dados muy gruesas puede resultar que su endurecimiento sea insuficiente. En tales casos, se requiere de un temple en aceite o en aire forzado para alcanzar una dureza completa.

Los aceros para herramientas que son endurecidos por enfriamiento al aire, con frecuencia se enfrían hasta el intervalo entre 540 y 650°C después de la austenitización. Esto se debe a que son susceptibles a cambios bruscos de temperatura. De esta manera se minimiza la distorsión sin afectar adversamente la dureza, previniendo la formación de escamas. Después de esto, el acero se enfría al aire hasta la temperatura ambiente. El tiempo de temple deberá ser lo suficientemente largo como para homogeneizar la temperatura pero no tan largo como para que empiece la descomposición de la austenita. Por las razones antes mencionadas, un acero para herramientas de trabajo en caliente nunca deberá enfriarse en agua. El intervalo de templabilidad de un acero para herramientas de trabajo en caliente, va desde alta templabilidad hasta extremadamente alta templabilidad.

Si se utiliza un enfriamiento con aire forzado, éste deberá ser agitado uniformemente dentro del horno para el endurecimiento del material, a su vez, el aire deberá estar libre de humedad. Cuando se está templando en aire, sean dados u otras herramientas, éstas no deberán colocarse en pisos de concreto o en sitios donde el vapor de agua pueda estar en contacto con ellas.

Los aceros para trabajo en caliente (especialmente los de tungsteno o molibdeno), presentan una escamación considerable durante el enfriamiento al aire a temperatura ambiente. El temple interrumpido reduce esta escamación eliminando los periodos largos de contacto con el aire a elevadas temperaturas, pero esto también incrementa la distorsión. El mejor procedimiento de temple que se pueda llevar a cabo, partiendo de la temperatura de austenitización, es mantener las piezas de trabajo en baños de sales de 595 a 650°C, hasta que alcancen la temperatura del baño, entonces, se retira la pieza y se pone a enfriar al aire.

Un procedimiento alternativo, pero poco preciso, es temprar en aceite a temperatura ambiente o ligeramente arriba y visualizar por el color (rojo tenue) cuando la pieza haya alcanzado 595 a 650°C; entonces la pieza se saca rápidamente y se enfría en aire a temperatura ambiente. Mientras se enfría la pieza, ésta se deberá colocar en un gancho o alambre de tal manera que el aire haga contacto con todas las superficies de la pieza. El horno de atmósferas controladas provee resultados satisfactorios de calentamiento sin peligro de cambios químicos en la superficie; el empaquetamiento también es satisfactorio pero la pieza tarda más en endurecer (1).

En la Fig. 4.1 se muestra el diagrama Tiempo-Transformación-Temperatura para un acero de trabajo en caliente AISI H13, en el diagrama se puede determinar el tiempo necesario para la



formación de martensita, como se puede observar, el tiempo es el suficientemente grande como para que el enfriamiento del acero sea al aire.

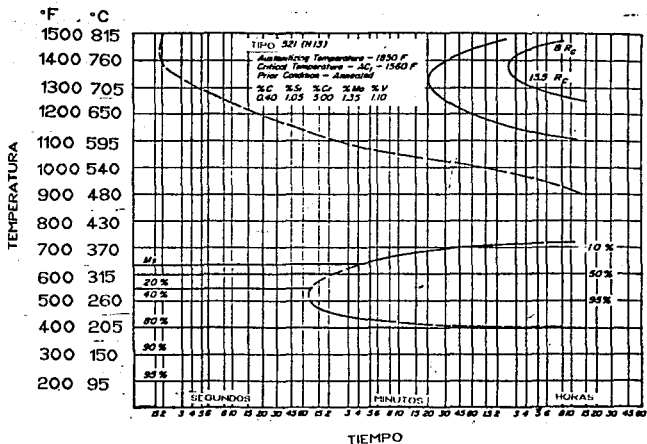


Fig. 4.1 Diagrama Tiempo-Temperatura-Transformación de un acero para herramientas de trabajo en caliente (H13)

#### 4.4.1 TEMPLE INTERRUPTIDO (MARTEMPERING)

Si sabemos que el temple interrumpido es realizar un enfriamiento de la pieza de trabajo, después de ser austenitizada por arriba de la transformación martensítica y enfriar a una velocidad moderada en aire; podemos decir que los aceros aleados

Entre ellos los usados para herramientas) son los más aptos para aplicar el temple interrumpido si se los compara con los aceros al carbono (18X14), ya que este tratamiento sirve para minimizar la distorsión sin sacrificar la dureza de los aceros.

Las piezas de trabajo se templean desde la temperatura de austenitización, en baños agitados de aceite o de sal. La temperatura de los baños deberá estar cerca de la temperatura  $M_s$  (temperatura crítica), generalmente alrededor de 25°C por encima de ella. El tiempo de permanencia en el baño deberá ser suficiente para que la temperatura sea homogénea en toda la pieza, la cual es enfriada entonces al aire hasta la temperatura ambiente.

#### 4.5 REVENIDO

El revenido modifica las propiedades de los aceros para herramientas que fueron templados, produciendo una combinación de resistencia, dureza y tenacidad superiores a las se obtienen en un acero templado. La estructura de un acero para herramientas templado es una mezcla heterogénea de austenita retenida, martensita sin revenir y carburos. Para producir una estructura óptima, es necesario emplear más de un ciclo de revenido, ya que normalmente se desea que se transforme toda la austenita retenida. Esto puede resultar mejor si se hacen dos o más ciclos de revenido cortos en lugar de un solo ciclo largo.

En los aceros para herramientas de alta aleación, se forma una pequeña cantidad de martensita no revenida a partir de la austenita retenida, durante el enfriamiento del primer ciclo de revenido. Es por ello que es bueno practicar un doble revenido para asegurar una transformación completa de la austenita retenida y un revenido de la martensita formada durante el primer revenido. En los aceros para herramientas altamente aleados se recomienda un revenido triple o cuádruple. Estos aceros (que

pueden ser los utilizados para herramientas de trabajo en caliente) deberán ser revenidos inmediatamente después del temple, aunque la sensibilidad a la fractura en esta etapa varía con los tipos de aceros a ser tratados.

El revenido múltiple minimiza la fractura disminuyendo las tensiones originadas por el endurecimiento. Para dados grandes o de formas caprichosas, el revenido múltiple tiene la ventaja de que no permite alcanzar la temperatura ambiente antes de la primera operación de revenido.

Los aceros de trabajo en caliente normalmente se revienen en hornos al aire del tipo convección forzada. Los baños de sales se usan satisfactoriamente para piezas pequeñas pero, para partes largas y complejas, el revenido con baños de sales puede provocar choques térmicos severos y causar fractura.

Los cambios que tienen lugar en la microestructura durante el revenido de los aceros para herramientas endurecidos, dependen del tiempo y la temperatura. El tiempo de permanencia a la temperatura de revenido no deberá ser menor a una hora para cualquier ciclo dado. Se deberá dar un tiempo suficiente para que la temperatura se distribuya uniformemente a través de la herramienta, especialmente a temperaturas de revenido bajas y en herramientas de dimensiones grandes. Si no se emplea un tiempo suficiente como para que la herramienta alcance la temperatura de revenido, resultará un revenido no uniforme y es posible que se dañe la herramienta. También se producen revenidos inadecuados cuando se esmerila una herramienta, y esto debe tenerse en mente siempre. Un revenido adecuado depende de la determinación precisa de la temperatura, de la carga y de un espacio apropiado de las piezas que conjuntan la carga para asegurar un calentamiento uniforme.

Para piezas grandes, o con geometrías complicadas, es

esencial que el revenido se realice después del temple tan pronto como sea posible para evitar fisuras. El calentamiento a la temperatura de revenido deberá ser lento para obtener una distribución de temperaturas uniforme y prevenir la generación de esfuerzos de endurecimiento que puedan causar fractura o torcedura de la herramienta.

Los medios más comunes para revenir herramientas son los aceites, baños de plomo o de sales y hornos con recirculación de aire. La transferencia de calor de los baños de plomo fundido es la más rápida, los baños de sales y los de aceite son menos rápidos y el más lento es el aire quieto. Si el revenido se realiza en un medio con sales o plomo, las herramientas deberán colocarse en canastillas sin permitir que éstas hagan contacto con las paredes calientes o con el fondo del crisol.

Los hornos con recirculación de aire tienen varias ventajas sobre la mayoría de los otros equipos usados para revenido, una de las principales es que pueden ser enfriados rápidamente desde la temperatura de revenido tal que las cargas subsiguientes puedan entrar en el horno a una baja temperatura sin peligro. Otra ventaja de hornos con recirculación de aire es su relativamente baja variación de transferencia de calor la cual permite que la carga pueda ser llevada más lentamente a la temperatura de revenido, de lo contrario, un calentamiento rápido puede desarrollar fracturas en las herramientas que no son revenidas.

El enfriamiento después del revenido deberá ser relativamente lento para prevenir la creación de nuevos esfuerzos residuales en el acero. El aire quieto es un medio generalmente satisfactorio.

### 4.5.1 FRAGILIZACION POR REVENIDO

Algunos aceros aleados, principalmente con cromo, presentan

el fenómeno de fragilización por revenido durante su enfriamiento a partir de este proceso, a lo cual se presenta una disminución en la resistencia al impacto (a). Este fenómeno se manifiesta después de un enfriamiento lento a partir de la temperatura de revenido de 500°C o superiores, o luego de un revenido en el rango de temperaturas entre 450 y 800°C. Un acero que presente este tipo de fragilización, puede perder la mayor parte de su plasticidad o tenacidad, la cual se puede detectar mediante un ensayo de impacto (a).

El mecanismo preciso que da lugar a la fragilidad de revenido no se ha establecido, aunque el comportamiento sugiere alguna fase que precipita a lo largo de las fronteras de grano durante el enfriamiento lento. Un alto contenido de manganeso, el fósforo (presente en menor cantidad que el anterior) y el cromo parecen promover la susceptibilidad, en tanto que el molibdeno parece tener un efecto definido de retardo (a).

Se cree que las microtensiones asociadas con la transformación de austenita retenida causan un decremento en esa resistencia al impacto. Se ha observado que si se reviene a 500°C y se tiene austenita altamente aleada se tendrá  $Mo_2C$  + austenita con baja aleación. Y si por el contrario, tenemos una martensita altamente aleada y la revenimos a 500°C tendremos solamente  $Mo_2C$  que provocarán el segundo endurecimiento ya que se incrementan los carburos que anteriormente teníamos (a).

Podemos decir que el molibdeno cuando se encuentra en grandes cantidades, se asocia con el carbono formando carburos duros ( $Mo_2C$ ), los cuales cuando se hace la operación de revenido, la austenita retenida que fué templada, precipita como partículas finas en la martensita, lo cual ocasiona el segundo endurecimiento o la llamada dureza al rojo. Sin embargo, el efecto del cromo es darle resistencia al desgaste a la vez que se incrementa su templabilidad, ya que cuando se asocia con el

carbono forma carburos ricos en cromo  $Cr_{23}C_6$ . Por otro lado, el contenido de vanadio también forma carburos duros del tipo  $V_4C_3$ , los cuales se quedan en la microestructura sin cambiar a través del tratamiento térmico aumentando la resistencia al desgaste de los aceros para herramientas (2).

Como ya se dijo en la sección anterior, la mayoría de los aceros de trabajo en caliente al cromo presentan un segundo endurecimiento después de que se les reviene a alrededor de  $500^{\circ}C$ . el segundo endurecimiento de estos aceros deberá ser revenido a temperaturas más altas a manera de que se obtenga una dureza deseada usi.

#### 4.6 BAÑOS DE SALES EMPLEADOS DURANTE LOS TRATAMIENTOS TERMICOS DE ACEROS PARA HERRAMIENTAS

Las sales fundidas de composición variada se adaptan a todas las operaciones de tratamientos térmicos en aceros para herramientas. Para herramientas que no pueden afilarse o esmerilarse después del endurecimiento, o para herramientas que requieren la mejor condición posible en la superficie y que deban mantener la forma del filo, el tratamiento en baños de sales dará los mejores resultados, ya que la función de estos baños es igualar la temperatura lo suficiente como para asegurar una superficie limpia después del tratamiento térmico.

El método de baños de sales para endurecer las herramientas, tales como los aceros para herramientas ultra-rápidos, es ampliamente empleado para aceros al molibdeno. En condiciones de operación correcta del baño de sales, las herramientas resultan libres de carburización, de descarburización y escamas. La superficie resultante estará completamente dura con una mínima distorsión. Generalmente se usan tres baños de sales, 1) los que

son para precalentamiento, 2) los de alta temperatura, y 3) los baños de temple.

#### 4.6.1 ENRIQUECIMIENTO DE LOS BAÑOS DE SALES

Las tres posibles reacciones químicas en un baño de sales a alta temperatura son: oxidación, carburación y descarburización. Todas las sales usadas comercialmente, excepto aquellas que se hacen para carburar, oxidan ligeramente al acero cuando se austenitizan a las temperaturas recomendadas y se enfrían al aire.

Los óxidos producidos por calentamiento del acero en sales fundidas son muy solubles; de aquí que las herramientas estén libres de escamas después del tratamiento. Sin embargo, la acumulación de óxido en las sales fundidas hace que las sales se vuelvan más descarburizantes con el uso y es por ello que los baños deberán ser enriquecidos periódicamente.

Los baños de sales se pueden enriquecer con electrodos sumergidos introduciendo barras de grafito en el baño fundido. El grafito reduce cualquier óxido del metal, el cual se adhiere a la barra. Posteriormente, el óxido se quita raspando la barra fuera del baño, y se puede volver a utilizar.

Es conveniente hacer una verificación de los baños a altas temperaturas que pudieran tender a descarburizar. Para ello se emplean probetas de prueba templadas en aceite. Un ablandamiento en la superficie indicaría que se necesita mayor rectificación. Esta prueba se podría omitir si se realizara un análisis del baño.

La siguiente tabla muestra las composiciones y las temperaturas de trabajo de las sales que pueden ser utilizadas en aceros para herramientas, en la primera parte de la tabla se

TRATAMIENTOS TERMICOS EN ACEROS PARA DADOS DE FORJA 80

muestran las sales que se utilizan para austenitizar, en la segunda parte se muestran las sales para revenir:

COMPOSICION %			PUNTO DE FUSION	TEMPERATURA DE TRABAJO
cloruro de bario	cloruro de sodio	cloruro de calcio	°C	°C
92-96	4-8		870	955-1260
80-90	10-20		760	815-1095
70.3	29.7		650	705-925
25-35	15-25	45-55	480	510-760
sales para revenido				
nitrate de sodio		nitrate de potasio		
40-50		50-60	145	163-850

Tabla 4.II Temperaturas de fusión y de servicio de los baños de sales utilizados empleados durante los tratamientos térmicos.



## 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Como hemos visto, existen diversos tipos de aceros a emplear en la fabricación de dados para el proceso de forjado; entre tales aceros, el más ampliamente usado en nuestro país es el acero para herramientas AISI H13, el cual responde a una composición nominal de: C=0.46%; Si=1.00%; Mn=0.33%; Cr=5.23%; Mo=1.41%; V=1.01%; P=0.027% y S=0.002%.

La firma que emplea este acero en la fabricación de sus dados de forja, reportó que los aceros presentan corta vida de servicio cuando trabajan entre 500 y 550°C por lo que prefieren importar el material, en vez de utilizar los existentes en el mercado nacional. Sin embargo, los aceros nacionales pueden tener mejores propiedades mecánicas cuando se encuentran en servicio si se les aplica un tratamiento térmico adecuado para prolongar su vida.

Aquí se estudia el efecto del tratamiento térmico de temple con un único revenido sobre la dureza y la resistencia al impacto en el acero AISI H13 con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas. El efecto del revenido sobre la dureza y la resistencia al impacto, se observa cuando se calientan las muestras a distintas temperaturas.

Los resultados obtenidos durante los tratamientos térmicos mostraron una marcada fragilización alrededor de los 500°C, esto dió lugar a determinar una temperatura óptima de tratamiento térmico que sensibilizara a los aceros durante el servicio.

### 5.1 DETALLE DE LOS PROCEDIMIENTOS REALIZADOS DURANTE EL ESTUDIO DEL ACERO AISI H13

Como hemos mencionado en capítulos anteriores, el proceso de forja consiste en ejercer una serie de choques repentinos sobre una masa a manera de que ésta tome la forma que se desee obtener; sin embargo, los dados con que se golpea a la masa, a su vez, reciben la reacción de la fuerza aplicada por lo que también se necesita considerar la aplicación de choques repentinos sobre los dados. Es decir, cuando se aplican fuerzas repentinas por periodos cortos de tiempo, el efecto que ejercen tales fuerzas son llamadas ondas de tensión; las cuales producen esfuerzos y deformaciones modificando las propiedades de resistencia en el material del dado  $\omega$ .

Una manera de simular el proceso de forja es aplicar la prueba o ensayo de impacto sobre probetas del mismo material de que estan hechos los dados, esta prueba determinará la resistencia a la ruptura que presentan las probetas bajo choques repentinos la que se manifiesta por su capacidad para absorber energía del medio que los golpea.

Los esfuerzos y deformaciones de impacto que modifican las propiedades del material pueden analizarse mediante métodos aproximados o exáctos, donde, para el primer caso, se analiza la energía que absorbe una pieza en forma de barra con un plato perpendicular y que se sostiene en posición vertical del extremo opuesto al plato, tal como se muestra en la Fig. 5.1, si se deja caer un peso desde una altura  $h$  llevando una velocidad  $v = (2gh)^{1/2}$ , la aproximación del esfuerzo máximo queda determinada si se considera que a) el peso del plato y de la barra son pequeños comparados con el peso que lo golpea b) si se supone que el

esfuerzo se genera en el rango elástico, y c) que las pérdidas de energía son despreciables. Así, después de que el plato se golpea, la barra continúa deformándose hasta una elongación máxima  $e$ , en esta etapa de carga, la velocidad del peso se reduce a cero y se acelera en dirección contraria con una velocidad igual en magnitud a  $v$ . En esta pequeña etapa los esfuerzos se reducen a cero. Cuando el plato alcanza la posición más baja, el esfuerzo tensil de la pieza es máximo. De aquí se puede considerar que el esfuerzo y la deformación máximos están dados por:

$$S = \frac{W}{A} \left[ 1 + \left( 1 + 2h \frac{AE}{WL} \right) \right] \dots (s. a)$$

$$y \quad e = \frac{WL}{AE} \left[ 1 + \left( 1 + 2h \frac{AE}{WL} \right) \right] \dots (s. b)$$

respectivamente; donde  $A$  = área del plato;  $W$  = peso de caída;  $L$  = longitud de la barra;  $E$  = Módulo de elasticidad del material.

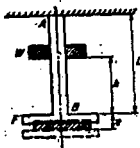


Fig. 5.1 Barra sujeta a tensión para la aplicación de cargas de impacto

En el segundo caso, en el método exacto, se realiza un análisis de tensiones longitudinales de impacto en una viga en cantiliver como se muestra en la Fig. 5.2.

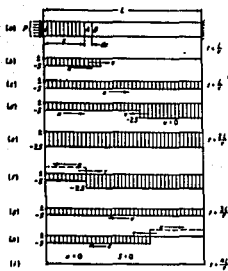


Fig. 3.2 Barra en cantiliver para la aplicación del método exacto, la fuerza  $P$  se aplica perpendicular al área de la barra.

Las tensiones de impacto surgen por la aplicación de una fuerza compresiva  $P$  sobre el extremo libre de la barra. Donde se considera que el extremo libre de la barra está sujeto a un esfuerzo  $S = P/A$  donde  $A =$  área de la sección transversal de la barra. además se supone que existe un retardo en la transferencia del esfuerzo a lo largo de la longitud del miembro. Si se considera que la velocidad de la onda de tensión es  $v$ , entonces ésta viajará un tiempo  $t$  a una distancia de la longitud  $x = vt$  desde el extremo libre de la barra. De esta manera, la longitud de onda se propaga a lo largo de la pieza hasta que en toda la sección transversal se presenta un esfuerzo.

Este método considera la pérdida de energía despreciable producida en la superficie por el golpe de la masa, además de considerar las pérdidas de amortiguamiento en el material y en el soporte; lo cual significa que el análisis exacto nos da esfuerzos de cedencia más grandes que los valores reales que se obtienen experimentalmente, además considera el viaje del esfuerzo compresivo en dirección contraria hacia la masa  $M$

reflejándose la onda de esfuerzo hasta que se reduce a cero; así, la suma de los dos esfuerzos será el esfuerzo total realizado por la barra us.

Para nuestro estudio, se fabricaron probetas de acero AISI H13 para que fueran sometidas a pruebas de impacto, tal como se muestra en la Fig. 5.3 (b). Dicha prueba, ha sido utilizada por mucho años para la evaluación de la relación esfuerzo-deformación en probetas de algún material dado, la máquina empleada está provista de un péndulo con un peso  $W$ , el cual se deja caer desde una altura  $h$  chocando sobre la cara posterior de las probetas de trabajo, Fig. 5.3 (a). Después de que la probeta se fractura, el peso  $W$  alcanza una altura  $h''$ , de esta manera, la energía que se usa para fracturar la probeta está dada por:

$$U_t = Wh - Wh'' \dots (5.6)$$

donde:  $h$  = caída vertical del péndulo desde el centro de gravedad del peso  $W$

$h''$  = vertical alcanzada por el centro de gravedad del peso  $W$

$U_t$  = energía de trabajo que se realiza para fracturar la probeta, a veces llamada tenacidad al impacto.

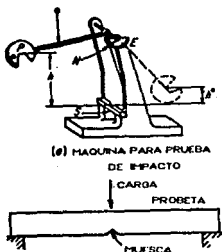


Fig. 5.3 (a) Máquina de impacto.  
(b) Probeta Charpy utilizada en pruebas de impacto.  
De acuerdo a estándares ASTM E23-50T

Observando la Fig. 5.3 (b), cada pieza de impacto Charpy, se soportó por ambos extremos, donde el filo del péndulo golpeó la parte media de la probeta para su fractura; las probetas a utilizar en esta prueba se fabricaron bajo las normas ASTM E23-56T, las cuales tienen las dimensiones de 55 mm de longitud por 10 mm de altura y 10 mm de ancho con una ranura (o muesca) en su parte central tal como se muestra en la Figura. Una de las razones de que las probetas se fabriquen con una muesca, es tener una concentración de esfuerzos para que los materiales se fracturen fácilmente.

La tenacidad de impacto descrita en la ecuación (5.c), no se relaciona con el valor de la tenacidad obtenido en los métodos aproximados y exactos, ya que en estas probetas el esfuerzo es tensil y uniformemente distribuido, mientras que en las probetas Charpy, el estado del esfuerzo alrededor de la muesca es triaxial y con una distribución no uniforme a través de la probeta. Por ello, existe una variación del esfuerzo que depende del tamaño de la probeta. Sin embargo, los valores de la tenacidad de impacto en probetas Charpy muestran grandes diferencias cuando se aplican diversos procesos metalúrgicos, ya que se puede evaluar la influencia de tratamientos térmicos, rodados en frío, adición de elementos aleantes, etc.; que afectan mucho los valores de la tenacidad de impacto (4).

Como complemento de la evaluación de los tratamientos térmicos sobre el material en estudio, en este trabajo se determina también la resistencia que presenta el material a ser indentado o penetrado llamada dureza, ya que el tipo de dureza considerada depende de los requerimientos de servicio a los que se someta el material. Algunas veces, la dureza de un material determina la habilidad de absorción de energía bajo cargas de impacto, otras veces, la dureza es una medida de la resistencia a

la abrasión o una medida de la calidad del material. Esto es, la dureza, no es una propiedad fundamental del material, sino es una relación de las propiedades elásticas y plásticas del mismo. Para realizar las mediciones de dureza en los materiales, se debe escoger algún tipo de durómetro que se ajuste a las necesidades físicas de la pieza a medir, como son dimensión, utilización, futura, acabado superficial, etc. o por otro lado, la facilidad de interpretación del aparato como es la obtención de lecturas, versatilidad del durómetro, precisión en la lectura, etc. Para tales efectos, existen básicamente tres tipos de durómetros que se emplean comúnmente en la industria. El durómetro Brinell emplea una bola de acero para la determinación de la dureza por indentación; la cual se pone en contacto con la superficie de la muestra a ser estudiada por medio de una selección de cargas compresivas como se denota en la Fig. 5.4. Después de que la carga se retira, se mide el diámetro de la huella mediante un comparador óptico y el número de dureza correspondiente estará determinado por la ecuación:

$$B_h = \frac{2W}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \dots (5.4)$$

donde:  $W$  = carga aplicada (Kg)  
 $D$  = diámetro de la bola de acero (mm)  
 $d$  = diámetro de la indentación (mm)

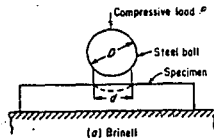


Fig. 5.4 Representación de la huella producida por un indentador de bola durante la prueba BRINELL.

En la prueba *Rockwell*, se utiliza un indentador más pequeño que el utilizado en el ensayo *Brinell* el cual se basa en el principio de medición de profundidad diferencial, donde las lecturas se obtienen de una manera directa mediante una carátula o display. Otro tipo de indentador usado en esta prueba es el de diamante en forma de pirámide, que se utiliza para ensayar a los materiales más duros.

El medidor de dureza *Vickers* también usa un indentador tipo pirámide invertida semejante al mencionado para el durómetro *Rockwell*, su representación esquemática se muestra en la Fig. 5.5. En tal figura se observa que el ángulo incluido entre las caras opuestas del indentador es de  $136^\circ$ . En este tipo de huella, la dureza se determina como la carga (Kg) dividida entre la superficie del área A de indentación ( $\text{mm}^2$ ). De esta manera se tiene la ecuación:

$$V = \frac{1.854 W}{D} \quad \dots (5.6)$$

Donde: D= la longitud promedio entre las dos diagonales de la impresión en el plano de la superficie del material, medida en (mm). Dichas diagonales de la indentación se miden por medio de un microscopio metalográfico.

Los tres durómetros descritos, están sujetos a las normas internacionales ASTM, donde se establecen los parámetros y dimensiones que se deben seguir para el uso de cada indentador así como de cada máquina a utilizar. Durante el estudio de los aceros para herramientas, se utilizaron los durómetros *Rockwell* y *Vickers* cuyas normas ASTM son E18-79 y E92-72 respectivamente.



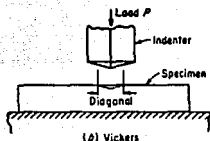


Fig. 5.5 Representación de la huella aplicada por un indente de diamante durante la prueba VICKERS.

Para hacer un análisis del comportamiento de los dados de forja de trabajo en caliente contruados de acero H13, se fabricaron probetas de ensayo Charpy, las que fueron sometidas a calentamientos hasta la temperatura a la cual el acero se transforma en fase austenítica (temperatura de austenitización), en esta etapa las probetas se mantuvieron el tiempo suficiente como para que el calor se distribuyera uniformemente en todas las piezas, dicho cálculo es de  $1/2$  hr/in de espesor para este material  $\phi$ , tiempo que depende de su contenido de carbono, de la distorsión de la pieza, del crecimiento de grano, de la pérdida de ductilidad y la pérdida de resistencia si existieran tiempos prolongados. Sometiendo las probetas al mismo tiempo a la temperatura de austenitización, el cálculo obtenido para el tiempo requerido fué de 20 min.

Posteriormente y durante el enfriamiento, las probetas fueron templadas al aire hasta temperaturas próximas al ambiente, en virtud de que estos aceros para herramientas tienen alta templabilidad, su dureza es completa por este medio de enfriamiento. Las probetas fueron revenidas inmediatamente, ya que este material es sensible al agrietamiento por las tensiones internas generadas durante el temple.

Los aceros para herramientas siempre deben precalentarse antes de llegar a la temperatura de transformación. Los fabricantes aconsejan que el acero se precaliente lentamente

hasta 730-760°C y luego se eleva la temperatura hasta 1010°C, sea en horno con atmósfera controlada o empaquetado con virutas limpias de hierro colado o material de empaque comercial neutro. En nuestro caso preferimos austenitizar en baño de sales como se sugiere en la literatura descrita en el capítulo anterior (6).

Basándonos en la tabla descrita en el capítulo 4, pensamos conveniente hacer nuestro propio baño de sales, ya que la compra de sales comerciales no nos fué económica debido a su volumen de venta. La composición del baño de sales fué escogida en base a la temperatura de trabajo con respecto a la temperatura de austenitización de nuestro acero, y se consideró la composición de 92% de cloruro de bario con 8% de cloruro de sodio, donde la temperatura de trabajo se encontraba entre 955 y 1260°C.

Aunque el fabricante que proporcionó el acero para herramientas H13 sugirió utilizar una temperatura de precalentamiento comprendida entre 730-760°C; la literatura especializada (6) sugiere se utilice una temperatura de precalentamiento de 815°C ó calentamiento de las piezas a la par que el horno alcanza la temperatura de austenitización; para efectos prácticos, optamos por calentar las probetas al mismo tiempo que el horno elevaba su temperatura hasta los 1010°C. Se observó, que la temperatura de calentamiento después de 870°C (temperatura de fusión de las sales) aumentaba entre 6 y 8°C por minuto hasta la temperatura de austenitización.

Se fabricaron 18 probetas Charpy-V con el objetivo de determinar la variación de la resistencia al impacto en función del tratamiento térmico de revenido. El ensayo Charpy se realizó por triplicado para cada temperatura de revenido a fin de obtener por promedio, un valor confiable. Las probetas fueron revenidas durante un tiempo de dos horas en un único paso a temperaturas de 200, 300, 425, 510 y 600°C (6). Un juego de probetas se dejó para ser ensayado por la prueba Charpy en el estado templado.

Una vez que las probetas Charpy-V fueron revenidas, se las sometió a pruebas de impacto en una máquina marca Frank, modelo Weinheim-Birkenau, con un péndulo de 780 mm de longitud y 300 Joules de energía. Además, sobre las probetas ensayadas se determinaron las durezas obtenidas después del tratamiento térmico de revenido. Las pruebas de dureza se realizaron en un semimicrodurómetro marca Leitz, modelo Durimet bajo cargas de 500 lbs y en un durómetro Rockwell marca Misawa Seiki Seisakusho, modelo 95064 bajo cargas de 100 Kg (escala B) y 150 Kg (escala C).

En un principio se pensó en tomar las mediciones de dureza en el durómetro Vickers debido a que éste tiene una versatilidad y exactitud mayores en las lecturas que si se tomaran en el durómetro Rockwell; además si hicieramos una graficación entre la deformación última tensil de los materiales y los números de dureza de ambos aparatos, veríamos que el durómetro Vickers conserva cierta linealidad entre los valores de dureza más bajos y los valores más altos; no obstante, para los valores de dureza Rockwell existe un cambio de escala que impide que se adquiera una relación real entre los aceros más blandos y los más duros, ver Fig. 5.6. Sin embargo, después de que las probetas fueron templadas y revenidas, algunas de ellas presentaron una dureza tal, que consumía demasiado tiempo en pulirlas para obtener un acabado superficial a espejo, como lo requiere la medición en Vickers, por lo que se recurrió también al durómetro Rockwell; además de que los valores dados por la literatura especializada fueron expresados en esos números. En la segunda parte de este trabajo se verá que las lecturas de dureza Vickers son más representativas para la explicación de las curvas dureza vs. temperaturas de revenido, dato que posteriormente se analizará con detalle.

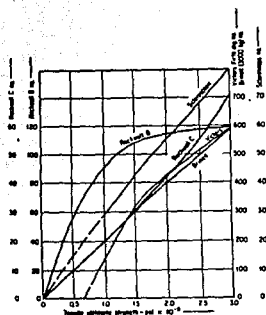


Fig. 5.6 Relación aproximada entre los números de dureza y esfuerzo último de tensión para aceros 10.

## 5.2. EFECTO DE UN UNICO REVENIDO

A continuación resumimos los resultados obtenidos sobre la dureza y el impacto del acero en estudio:

Temp. aust.	tiempo de aust.	medio de temple	Temp. de rev.	tiempo de rev.	dureza	resistencia al impacto
°C	min.		°C	min.	HRC	J
1010	20	aire			59	12
1010	20	aire	200	120	56.2	22
1010	20	aire	300	120	54.1	23
1010	20	aire	425	120	53.5	12.5
1010	20	aire	510	120	57.8	9.5
1010	20	aire	600	120	55	18

Tabla 5.1 Resultados obtenidos de dureza e impacto posteriores a los tratamientos térmicos indicados.

En la práctica industrial, se ajusta la dureza de trabajo de estos aceros entre 44 y 48 HRC para operaciones generales, las

que se alcanzan después de un doble o triple revenido. Si en las condiciones de trabajo, el dado está sometido a altas presiones o grandes choques, se deberá reducir la dureza en el intervalo de 40 a 44 HRC (u). En nuestro caso, preferimos estudiar primero la respuesta del acero a un único revenido de 2 hrs a fin de comparar nuestros resultados con los de la literatura (w) (Fig. 5.7).

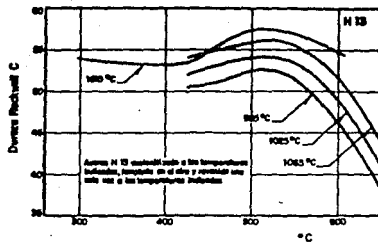


Fig. 5.7 Comparación del efecto de revenido sobre la dureza resultante. Líneas correspondientes a una austenitización de 985, 1025 y 1065. (w). Líneas correspondientes a una austenitización de 1010°C, nuestros resultados.

Tanto en nuestros revenidos como en los de los autores citados, se emplearon tiempos de 2 hrs. La diferencia fundamental es que ellos hicieron la austenitización previa a 985°C y 1065°C, mientras que nuestras probetas se austenitizaron a una temperatura intermedia a estos valores (1010°C). Cuando introducimos nuestros valores en su representación gráfica, observamos que los primeros caen en una posición intermedia. Esta posición intermedia parece mantenerse hasta alrededor de 425°C pero para temperaturas superiores, nuestro acero se comporta más duro que lo esperado.

En la Fig. 5.8 comparamos nuestros resultados con los de un acero H-13 endurecido desde  $1010^{\circ}\text{C}$  en un medio de temple al aire según datos proporcionados por Bethlehem Steel Co. (1).

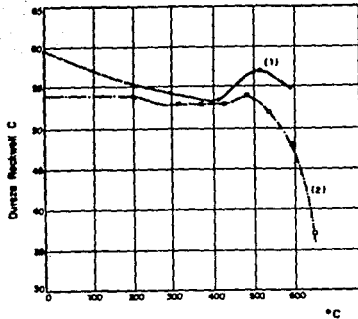


Fig. 5.8 Comparación del efecto de revenido sobre la dureza de aceros templados en aire desde  $1010^{\circ}\text{C}$  (1) Nuestros resultados con un revenido de 2 hrs., (2) ref. (1)

En la Fig. 5.9 se muestra el efecto del revenido sobre la resistencia al impacto. La curva (1) representa la variación de la resistencia al impacto de un acero H13 estudiado en un rango de temperaturas de revenido de 200 a  $650^{\circ}\text{C}$ , la curva (2), representa la resistencia al impacto de nuestro acero H13 con un único revenido, y la curva (3) fue obtenida para un acero H13 similar al nuestro, (17), pero para temperaturas de revenido comprendidas entre  $520$  y  $620^{\circ}\text{C}$ .

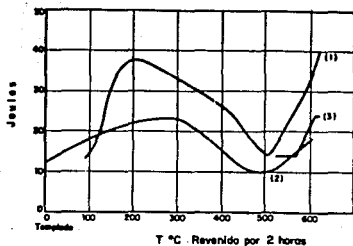


Fig. 5.9 Comparación del efecto de revenido sobre la resistencia al impacto. (1), ref. (17), (2), nuestros resultados, (3) ref. (15)

En la Fig. 5.10 presentamos de manera conjunta los resultados de dureza e impacto obtenidos en el desarrollo experimental. También graficamos el intervalo de dureza que habitualmente se emplea en la industria para dados fabricados con aceros H13.

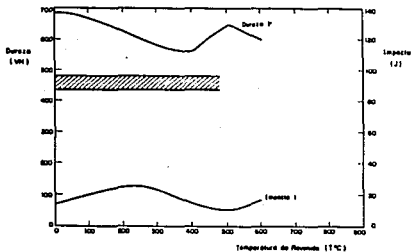


Fig. 5.10 Efecto del revenido a distintas temperaturas sobre la dureza e impacto de nuestro acero H13.

## 5.3 TRATAMIENTO TERMICO DE SENSIBILIZACION

Observando las gráficas mostradas, se detectó un segundo endurecimiento después del tratamiento de revenido sobre las probetas ensayadas, el que se conoce comúnmente como fragilización por revenido. En el capítulo siguiente se dará a conocer de alguna manera la velocidad de fragilización, pero por el momento podemos decir que se ve que está relacionada con el coeficiente de difusión del fósforo en hierro alfa:

$$D = 7.1 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{-20,000}{T}\right) \text{cm}^2/\text{seg.} \dots (5.8)$$

McLean (8) desarrolló una fórmula para calcular el tiempo necesario para alcanzar una concentración en el límite de grano del hierro alfa y que está dada por:

$$t_{1/2} = \frac{9 \alpha d^2}{64 D} \dots (5.9)$$

- donde
- $\alpha$  = relación entre la concentración de equilibrio en el límite de grano y la concentración en volumen a la temperatura de revenido.
  - $d$  = espesor del límite de grano, tomando como tres espaciados del enrejado cristalino.
  - $D$  = difusividad de los elementos fragilizantes.

Dando valores a  $\alpha$  entre 500 y 1160, se encuentra buen acuerdo entre el valor calculado  $t_{1/2}$  y el tiempo requerido para alcanzar la mitad del tiempo para la aparición de la fragilización a la temperatura estudiada.

Para obtener un tiempo confiable se decidió darle a  $\alpha$  un valor que fuera representativo de este intervalo tal como el



promedio entre ambos valores. de esta manera tenemos:

$$\alpha = (600 + 1180) / 2 = 880$$

El espesor del límite de grano tomado como tres espaciados de red cristalina es de  $(8.5992 \times 10^{-8} \text{ cm})$ , con  $\alpha = 2.8664 \text{ \AA}$ .

La difusividad de los elementos fragilizantes está dada por:

$$D = 7.1 \times 10^{-3} \exp(-20,000 / 5500) \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$D = 1.1448 \times 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Por lo que el tiempo requerido para alcanzar la mitad del tiempo a la aparición de la fragilización es de:

$$t_{1/2} = \frac{9(880)(8.5992 \times 10^{-8})^2}{64(1.1448 \times 10^{-18})}$$

$$t_{1/2} = 799,340 \text{ seg}$$

Lo que equivale a 222 horas.

Para comprobar las deducciones anteriores, se fabricaron 12 probetas Charpy-V con el objeto de determinar la variación de la resistencia al impacto en función de las temperaturas de sensibilización superiores a los  $500^\circ\text{C}$ . Como mencionamos anteriormente, el ensayo se realiza por triplicado en cada temperatura para obtener un valor de resistencia al impacto confiable.

Para iniciar el tratamiento térmico de sensibilización, las probetas se precalentaron a  $870^\circ\text{C}$ , aumentando la temperatura de los baños de sales de  $10^\circ\text{C}$  por minuto hasta austenitizarlas a la temperatura de  $1010^\circ\text{C}$  durante 20 min., de la misma manera que se hizo con las otras probetas, con el objeto de tener las mismas condiciones de trabajo que se tuvieron en la sección anterior.

Estas probetas, después de austenitizadas, se enfriaron al aire hasta casi alcanzar la temperatura ambiente. Posteriormente, fueron revenidas durante 200 hrs a una temperatura de  $510^\circ\text{C}$

inmediatamente después del temple para evitar fisuras.

El tratamiento térmico anterior tuvo por objetivo llevar a las probetas a la temperatura de máxima fragilización. Las probetas fueron separadas en grupos de tres y cada uno fué sometido a temperaturas superiores a la de fragilización, pero por debajo del comienzo de la austenitización, es decir, cada grupo se calentó durante dos horas a temperaturas de 600, 700 y 800°C.

Una vez que las probetas Charpy-V fueron sometidas a éste tratamiento, se las ensayó en pruebas de impacto y posteriormente se realizaron pruebas de dureza sobre ellas. Para poder comparar todas las lecturas de dureza obtenidas, se convirtieron los valores a escala Vickers (VH), obteniéndose resultados homogéneos.

#### 5.4 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO TERMICO DE SENSIBILIZACION

Los datos obtenidos después del tratamiento térmico de sensibilización se resumen en la siguiente tabla:

Austenización		Medio de Temple	Primer Revenido		Segundo Revenido		Dureza		Resistencia al impacto
T °C	t min.		T °C	t hrs	T °C	t hrs	HRC	HV	J
1010	20 *	aire	500	200			47.5	478	25
1010	20 *	aire	500	200	600	2	45	445	35
1010	20 *	aire	500	200	700	2	78 B	140	43
1010	20 *	aire	500	200	800	2	64 B	115	103

\* Ref. (D)

Tabla 5. II Resultados obtenidos después del tratamiento térmico de sensibilización.

En la Fig. 5.11 se muestran las curvas de dureza y de impacto después del tratamiento de sensibilización donde también se han agregado los valores de dureza que se emplean industrialmente para dados fabricados con aceros H13.

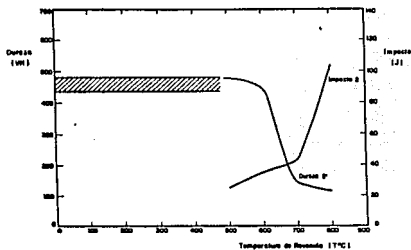


Fig. 5.11 Efecto de distintas temperaturas de revenido sobre la dureza e impacto de nuestro acero H13 después de haber sido sometido a tratamientos de sensibilización.

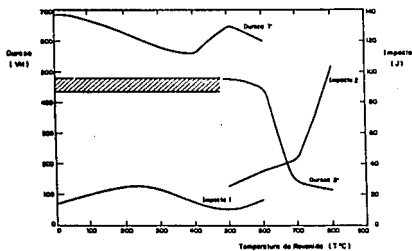


Fig. 5.12 Comparación del efecto del tratamiento térmico de sensibilización y el tratamiento térmico de revenido sobre la

dureza y la resistencia al impacto de un acero AISI H13 de fabricación nacional. Curvas (1) y (1') obtenidas con revenidos de 2 hrs. Curvas (2) y (2') obtenidas después de calentar las probetas por 102 hrs.

Si colocamos en una sola gráfica las figuras 5.10 y 5.11 (Fig. 5.12) observamos que las curvas de impacto y dureza (1) (1') no se cruzan en ningún punto en el intervalo desde el temple hasta los 600°C, además de que están lo suficientemente separadas como para que exista ese cruce. Sin embargo, con el aumento de absorción de energía y la disminución de dureza vemos que las curvas (2) y (2') a la temperatura de 675°C aproximadamente ambas curvas se cruzan y que en el intervalo entre 700 y 800°C la dureza no disminuye en la misma proporción en que aumenta la absorción de energía.

## 6. DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 6.1 DISCUSION DEL EFECTO DE UN UNICO REVENIDO SOBRE LA DUREZA E IMPACTO DE NUESTROS ACEROS H13

Como se aprecia en la Fig. 5.10, durante el revenido, la dureza disminuye lentamente de 59 a 53 HRC por un revenido de dos horas hasta 420°C a razón de 1.5 HRC/100°C. A partir de esta temperatura comienza el segundo endurecimiento, el que está asociado con la presencia de vanadio y de molibdeno. El endurecimiento en caliente por la presencia de vanadio se produce por debajo de 537°C, y como se puede apreciar en la Fig. 5.8, la dureza aumenta hasta 510°C y comienza a disminuir nuevamente después de esta temperatura. El molibdeno colabora con el vanadio para aumentar la dureza durante el segundo endurecimiento por formación de  $Mo_2C$  y  $V_4C_3$ . El molibdeno a su vez, aumenta la resistencia al revenido de este acero. El endurecimiento producido durante esta etapa se realiza a razón de 4 HRC/100°C.

La literatura indica que por encima de 500°C la resistencia al ablandamiento es proporcional al contenido de vanadio. Esto significa que para dados que deban trabajar por encima de esta temperatura, es conveniente emplear altos contenidos de este aleante. Sin embargo, el acero ensayado por nosotros se muestra, durante el segundo endurecimiento, más duro que lo esperado (ver Fig. 5.7) aunque podríamos pensar que luego del segundo revenido se produzca un ajuste de las dos curvas de la Fig. 5.8 en que estamos comparando nuestro acero H13 con un sólo revenido contra un acero H13 con dos revenidos. Ref. (17).

La respuesta al impacto durante el primer revenido muestra un comportamiento similar al de un H13 con dos revenidos, es

decir, existe un mínimo alrededor de 500°C. Esta fragilización ha sido denominada en repetidas ocasiones como fragilización a 500°C. Las características de esta fragilización son las:

- 1) No sucede en aceros al carbono ni en aceros aleados de alta pureza.
- 2) Es causada fundamentalmente por antimonio y fósforo y en menor grado por estaño y arsénico.
- 3) La presencia de níquel, manganeso, cromo y silicio aumenta la fragilización.
- 4) El molibdeno, titanio y circonio retardan la fragilización porque tienen tendencia a asociarse a los elementos no-metálicos nocivos, aunque no producen precipitación de dichos elementos.
- 5) La fragilización no puede eliminarse por sobre-envejecimientos prolongados de hasta 30,000 horas.
- 6) La fragilización es reversible y puede ser removida por calentamientos a temperaturas por encima de 600°C, seguido de un enfriamiento rápido y se restaura por permanencia en el intervalo de 350 a 550 C.

Es evidente de lo anterior y de nuestros resultados, que la fragilización se produce al precipitar los carburos de molibdeno que de esa manera dejan libre a las impurezas no-metálicas, en especial al fósforo, para que migre a los límites de grano y fragilice al acero.

Los datos para trabajo en caliente H13 son empleados frecuentemente a temperaturas alrededor de 500°C, esto hace que el proceso de fragilización a esta temperatura sea un problema industrial muy serio. Si como se enuncia en el punto 5) de las características de fragilización anteriores, la fragilización no disminuye en este intervalo de temperaturas por periodos de hasta 30,000 hrs. us, pero si es posible quitarlas por tratamiento térmico por encima de 600°C y seguidos de enfriamientos rápidos,

por ello fué que pensamos realizar tratamientos de fragilización de 200 hrs. a 500°C seguidos de tratamientos de sensibilización de 2 hrs. a 500, 700 y 800°C.

### 6.2 DISCUSION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE DUREZA E IMPACTO POSTERIORES AL TRATAMIENTO DE SENSIBILIZACION DE NUESTRO ACERO H13

Generalmente, en los aceros de la serie H se desea tener una dureza en el intervalo de 42 a 55 HRC (50) para tener una buena resistencia al desgaste; la que en teoría se logra con doble o triple revenido. Sin embargo, como el acero se comportó más duro que lo esperado, se sugirió realizar revenidos en un tiempo promedio de 200 hrs.

De la Fig. 5.12 se puede apreciar que un tratamiento de 200 hrs a 500°C produce una disminución en la dureza respecto a los valores industriales buscados y, al mismo tiempo, la resistencia al impacto aumenta en 15 Joules. Estos valores de resistencia al impacto, pondrían a nuestro acero en 10 Joules por encima de los valores registrados en la literatura. Lo anterior, contradice al punto 5) respecto a las características de fragilización, en donde 200 hrs. en las condiciones de máxima sensibilización producen un efecto benéfico sobre la fragilización.

Dado que la mayoría de los aceros para herramientas son relativamente duros, debido al efecto combinado de la presencia de martensita y carburos, se debe controlar la morfología de los carburos para tener formas esferoidales. Lo que hace que la dureza decrezca a medida de que aumenta la esferoidización. La cantidad y tipos de carburos presentes en estos aceros, dependen del contenido de carbono y la cantidad de elementos formadores de carburos tal como cromo, molibdeno, vanadio y tungsteno.

## DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES 84

Luego del tratamiento de 200 hrs. a 500°C, se observa que la dureza a disminuido en 26.2%, tratamientos adicionales de 2 hrs. a 600°C indican una disminución de 7.5% con una disminución de la resistencia al impacto del 28.5%. Cuando comparamos, dentro del mismo intervalo de temperaturas, las pendientes de las curvas (1) y (2), vemos que el proceso microscópico que se está produciendo es un proceso de sobrevejecimiento que se emplea para explicar la caída de la curva (1).

De 600 a 700°C, la caída de dureza se hace muy marcada y el material pierde el 88.5% de su dureza. Las durezas que resultan no son compatibles con las propias de los dados para forja. Sin embargo, el efecto sobre la resistencia al impacto sigue siendo similar al proceso del intervalo de la temperatura anterior. Pensamos que durante este intervalo de temperatura, se está produciendo la solubilización de carburos de cromo y el revenido completo de la martensita generada. De 700 a 800°C la dureza ya cambia muy poco, mientras que la tenacidad del material en el mismo intervalo, aumenta notablemente, cosa que se aprecia en las probetas de impacto, las que muestran una ruptura con deformación plástica. De aquí podemos concluir que lo que se afirma en el punto 6) es incorrecto, dado que por encima de 600°C estamos perdiendo las propiedades generadas durante el temple del acero.

### 6.3 CONCLUSIONES

De la discusión anterior, podemos decir que se requeriría varios pasos de tratamientos de revenido para ajustar la curva de nuestro acero a las curvas de los aceros de la literatura, por lo que solo se podría lograr si se calcula  $t_{1/2}$  en el acero H13 que se emplea en dados de forja para las condiciones de servicio, encontrando el tiempo para el cual se produce la fragilización. Por otro lado, y en base a esto, se sugeriría un tratamiento de desensibilización a la fragilización consistente en revenidos de



## DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES 55

---

restauración a temperaturas por encima de los 500°C, cada vez que el dado ha permanecido en servicio, en el intervalo de temperaturas de fragilización en lapsos iguales a  $t_{1/2}$ .

La dureza del temple con un único revenido, decae después de que se logran las 200 hrs de revenido en el intervalo de 500 a 600°C. Sin embargo, la dureza en este intervalo, ajusta perfectamente dentro de la banda permisible de endurecimiento de éstos aceros y podría interpretarse que la cresta más alta de la curva indica el inicio de utilización de los dados de forja a ésta temperatura. Además, el punto de deflexión donde comienza la pendiente pronunciada, delimita la dureza última que podría ser permisible de trabajo del dado a 600°C, antes de que exista el deterioro del material.

De la gráfica, también podemos decir que la fragilización sí puede eliminarse en calentamientos prolongados, ya que los datos mostrados por la literatura con doble revenido disminuyen la dureza del temple; y aún más se disminuye después de 200 hrs de revenido.

En resumen, de nuestros experimentos se demuestra que:

1) El proceso de fragilización a 500°C puede ser revertido por tratamientos prolongados a la temperatura de fragilización en contra de lo que afirma Mc Lean (6).

2) Tratamientos a temperaturas superiores a la de fragilización (intervalo 500-600°C) llevan un sobreenviejamiento de la aleación.

3) A temperaturas superiores a 600°C, el acero pierde su estructura martensítica y se produce una solubilización de los carburos del cromo que lo invalida en su uso como acero para dados de forja. Esto también está en contra de las afirmaciones

de Mc Lean (18).

4) El empleo de dados de forja a temperaturas en que se produce fragilización sería peligroso en los primeros momentos de uso del dado, pero el empleo prolongado del mismo lo llevaría a mejorar la condición de fragilización. Por lo tanto, podría ser conveniente que los dados nuevos sean tratados térmicamente con revenidos a las temperaturas de servicio durante tiempos que produzcan condiciones equivalentes por nosotros encontradas.

5) Temperaturas superiores a 800°C no son permisibles en la práctica industrial de este acero.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- (1) G. A. Roberts, J. C. Hamaker y A. R. Johnson  
"Tool Steels". Ed. American Society for Metals,  
3<sup>era</sup> edición, 1971, Pg. 530-561. 61.
- (2) Robert M. Brick, Alan W. Pense  
"Structure and properties of engineering  
materials", Ed. Mc Graw-Hill, 3<sup>a</sup>. Edición, 1965,  
Pg. 305-335.
- (3) Degarmo  
"Materiales y procesos de fabricación" Ed. Reverte  
Pg. 325-335
- (4) Englewood Cliffs, American Society of Tool and  
Manufacturing Engineers  
"Fundamentals of tools design", Ed. A.S.T.M.,  
New Jersey, 1962, Pg. 443-455.
- (5) W. C. Leslie  
"The Physical Metallurgy of Steels", Ed.  
McGraw-Hill, 1982, Pg. 238.
- (6) J. R. C. Guimarães, J. R. T. Branco, T. Kajita  
"Mater. Sci. Technol.", 2,(10),(1986), 1074-1076.
- (7) G. Songini, A. Scaccia.  
"Metall. Ital.", (7-8), 1986, Pg. 543-552.
- (8) H. C. Kazanas; G. E. Baker  
"Procesos básicos de manufactura", Ed. Mc Graw-  
Hill, 1<sup>a</sup> Edición, 1983, Pg. 184-170

- C9) American Society for metals  
"Metals Handbook, vol 5, Forging", Ed. A.S.M., 8ª edición, 1967, Pg. 41-68
- C10) Henri Desarces  
"Gran Enciclopedia Práctica de Mecánica", Tomo I Ed. Especial para The University Society Inc., New York, Pg. 757-797.
- C11) Geoffrey W. Rowe  
"Conformado de los metales", Ed. Urmo, Pg. 300
- C12) American Society of Tool and Manufacturing Engineers  
"Fundamentals of tools design", Ed. A.S.T.M., Englewood Cliffs, New Jersey, 1962, Pgs. 445-455.
- C13) S.H. Avner  
"Introducción a la metalurgia física", Ed. Mc Graw Hill, 2ª edición, 1979, pg. 308
- C14) D.M.K. de Grinberg  
"Tratamientos térmicos de aceros y sus prácticas de laboratorio", Ed. LIMUSA, 1ª Edición, 1966, pg. 129.
- C15) American Society for Metals  
"Metals Handbook, vol. 1 Properties and Selection Irons and Steels", Ed. ASM, 9ª edición, 1978, pg 438.
- C16) Joseph Marin

---

"Mechanical Behavior of Engineering Materials"  
Prentice-Hall, 1985, Pg. 448-453, 237-271

- C17) Klaus Pöhlndt  
"Materials Testing for the Metal Forming Industry"  
Ed. Springer-Verlag, 1989, Heidelberg, N.Y. Pg.  
174-191.
- C18) D. Mc Lean  
"Grain Boundaries in Metals", Oxford University  
Press, 1957, Pg. 133, 33.
- C19) American Society for Metals  
"Metals Handbook, vol 2, Heat Treating, Cleaning  
and Finishing", Ed. A.S.M., 8ª edición, 1987, Pg.  
221-242.