



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

“DUREZA Y ESTRUCTURA EN UN ACERO PARA
HERRAMIENTAS SINTERIZADO FAX55 (AISI T15)
TEMPLADO Y REVENIDO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A:
JOSÉ MANUEL ALVARO REYES

ASESOR:
M.I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 esta 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES



ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

DEPARTAMENTO DE
EXÁMENES PROFESIONALES
Jefa del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos **La Tesis**:

**"DUREZA Y ESTRUCTURA EN UN ACERO PARA HERRAMIENTAS SINTERIZADO FAX55 (AISI T15)
TEMPLADO Y REVENIDO"**

Que presenta el pasante: **JOSÉ MANUEL ALVARO REYES**

Con número de cuenta: **41200544-0** para obtener el Título de: **Ingeniero Mecánico Electricista**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 17 de noviembre de 2016.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	M. en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez	
VOCAL	M. en I. Jesús García Lira	
SECRETARIO	M. en I. Sergio Martín Durán Guerrero	
1er SUPLENTE	Ing. Eusebio Reyes Carranza	
2do SUPLENTE	Ing. Armando González Urbina	

NOTA: Los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

En caso de que algún miembro del jurado no pueda asistir al examen profesional deberá dar aviso por anticipado al departamento.

(Art 127 REP)

LMCF/ntm*

"El desarrollo del hombre depende fundamentalmente de la invención. Es el producto más importante de su cerebro creativo. Su objetivo final es el dominio completo de la mente sobre el mundo material y el aprovechamiento de las fuerzas de la naturaleza a favor de las necesidades humanas".

Nikola Tesla...

A G R A D E C I M I E N T O S

- **A mis padres** por su apoyo incondicional que me han brindado, por esforzarse día a día para darme lo mejor, por creer en mí y darme la confianza y la oportunidad de continuar mis estudios estoy sumamente agradecido, gracias Mamá y Papá los quiero.
- **A mi familia** por sus consejos y motivación a seguir preparándome día a día.
- **A la mujer** que ha estado conmigo la mayor parte de mi carrera, agradezco su comprensión durante todo este tiempo.
- **A los profesores** que me instruyeron una buena formación durante toda mi carrera profesional, en especial a mi asesor, M.I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez, M.I. Ramón Osorio Galicia, Ing. Roberto Reyes Arce y al Ing. Cesar Rueda Ángeles por la atención brindada.
- **A mi apreciada Universidad Nacional Autónoma de México** y a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán por haber sido mi segunda casa y lugar de grandes vivencias.
- **A mis compañeros y amigos** por los momentos vividos.
- **A los Programas de Apoyo Institucionales** que sin duda fueron de gran ayuda para mi formación, al programa Becas ExxonMobil para la Investigación (BEI), administrado por el Instituto Internacional de Educación (IIE), por el apoyo y la atención dedicada durante el programa, que sin duda fue una experiencia muy agradable.

ÍNDICE

	Pág.
OBJETIVOS	1
INTRODUCCIÓN.....	2

CAPÍTULO 1

METALURGIA DE POLVOS

1.1 Producción de polvos	6
1.1.1 Polvos producidos por reducción	7
1.1.2 Polvos producidos por atomización	8
1.1.3 Producción de polvo de hierro reducido con hidrogeno.....	10
1.2. Acondicionamiento o preparación de polvos para la conformación y estabilización	11
1.2.1 Clasificación de polvos metálicos	11
1.2.2 Mezclado de polvos metálicos	12
1.3 Consolidación o conformación.....	14
1.3.1 El ciclo de compactación.....	15
1.3.1.1 Llenado de la matriz	15
1.3.1.2 Densificación o compactación del polvo.....	17
1.3.1.2.1 Métodos de compactación	17
1.3.1.3 Extracción del compacto de la matriz	21
1.3.3 Dimensionamiento y acuñado	22
1.4 Sinterizado.....	23
1.4.1 Sinterización en estado sólido	23
1.4.2 Sinterización en estado líquido	24
1.5 Operaciones de acabado	25
1.5.1 Tratamientos postsinterización.....	26
1.6 Ventajas y desventajas de la metalurgia de polvos	27

CAPÍTULO 2

ACEROS PARA HERRAMIENTA

2.1 Clasificación de los aceros	28
2.2 Clasificación de los aceros para herramientas según AISI-SAE.....	30

2.2.1 Aceros para trabajo en frío	30
2.2.1.1 Grupo W (temple en agua)	30
2.2.1.2 Grupo O (temple en aceite)	33
2.2.1.3 Grupo A (aleación media de temple en aire).....	35
2.2.1.4 Grupo D (Alto carbono/Alto cromo).....	36
2.2.2 Aceros resistentes al impacto	38
2.2.2.1 Grupo S (medio carbono al silicio)	38
2.2.3 Aceros de alta velocidad	40
2.2.3.1 Grupo T (al wolframio)	41
2.2.3.2 Grupo M (al molibdeno)	42
2.2.4 Aceros para trabajos en caliente.....	44
2.2.4.1 Grupo H (Base cromo, wolframio, molibdeno).....	44
2.2.5 Aceros para moldes para plásticos	46
2.2.5.1 Grupo P (baja aleación, bajo contenido de carbono).....	46
2.2.6 Aceros para aplicaciones especiales.....	47
2.2.6.1 Grupo L (baja aleación, medio-alto contenido de carbono).....	47
2.2.5.2 Grupo F (Carbono-molibdeno).....	47
2.3 Propiedades intrínsecas de aceros para herramientas.....	48

CAPÍTULO 3

ACEROS PARA HERRAMIENTA SINTERIZADOS, PROPIEDADES MECÁNICAS Y APLICACIONES

3.1 Aceros para herramienta sinterizados.....	49
3.2 Propiedades de los aceros para herramientas sinterizados	52
3.3 Aplicaciones de los aceros para herramienta sinterizados	61
3.3.1 Para aceros de alta velocidad (HSS).....	61
3.3.2 Para aceros para trabajo en frío	62
3.3.3 Otras aplicaciones	63

CAPÍTULO 4

TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS

4.1 Constituyentes microscópicos de los aceros	65
--	----

4.1.1 Diagrama Hierro – Carbono (Fe-C)	66
4.1.2 Ferrita	68
4.1.3 Cementita	68
4.1.4 Perlita	69
4.1.5 Austenita	69
4.1.6 Martensita	70
4.1.7 Troostita	70
4.1.8 Sorbita	71
4.1.9 Bainita	71
4.1.10 Carburos	71
4.2 Tratamientos térmicos de los aceros	72
4.2.1 Austenitización	72
4.2.1.1 Variaciones dimensionales del acero durante el proceso de austenitización	73
4.2.1.2 Enfriamiento del acero	73
4.2.2 Recocido	74
4.2.2.1 Recocidos de austenización completa	74
4.2.2.2 Recocidos subcríticos	75
4.2.2.3 Recocido de austenización incompleta	75
4.2.3 Normalizado	76
4.2.4 Temple	76
4.2.4.1 Temple en agua	76
4.2.4.2 Temple en lejías y soluciones salinas	77
4.2.4.3 Temple en aceite	77
4.2.4.4 Temple al aire	78
4.2.4.5 Tensiones de temple	78
4.2.4.6 Templabilidad	78
4.2.4.7 Curvas Jominy	79
4.2.4.8 Temple superficial	80
4.2.5 Revenido	80
4.2.5.1 Revenidos múltiples	81
4.3 Tratamientos isotérmicos de los aceros	81
4.4 Tratamientos termoquímicos superficiales de los aceros	83
4.5 Tratamientos térmicos de temple y revenido a aceros rápidos	83
4.5.1 Temple	84

4.5.2 Revenido	84
4.5.3 Temple y revenido al acero FAX55 equivalente al acero AISI T15	85

CAPÍTULO 5

TEMPLE Y REVENIDO APLICABLES AL ACERO FAX55

(EQUIVALENTE AL AISI T15)

5.1 PROCEDIMIENTO	88
Obtención de las muestras	88
Estudio metalográfico de probetas sin tratamiento térmico	90
Prueba de dureza en dos probetas sin tratamiento térmico.....	91
Aplicación del tratamiento térmico de temple	95
Estudio metalográfico de las probetas templadas en aire y aceite.....	97
Prueba de dureza en dos probetas templadas al aire y dos templadas en aceite.....	98
Aplicación del primer revenido.....	99
Aplicación del segundo revenido	100
Estudio metalográfico de las probetas con un segundo revenido templado en aire y aceite previamente	101
Prueba de dureza después de un segundo revenido en dos probetas templadas al aire y dos templadas en aceite previamente.....	102

CAPÍTULO 6

RESULTADOS.....	104
------------------------	------------

CONCLUSIONES.....	119
--------------------------	------------

REFERENCIAS.....	120
-------------------------	------------

OBJETIVOS

- Mostrar un panorama general del proceso de sinterizado de los aceros para herramienta.
- Dar a conocer las propiedades mecánicas de los aceros sinterizados para herramientas, así como sus principales aplicaciones.
- Describir los principales tratamientos térmicos aplicables a este tipo de aceros.
- Realizar una comparación de propiedades mecánicas con los aceros empleados comúnmente en la fabricación de herramientas y los aceros sinterizados.

INTRODUCCIÓN

La metalurgia de polvos (PM, Powder Metallurgy) es una tecnología de procesamiento de metales en la que se producen piezas a partir de polvos metálicos. El proceso tradicional que se lleva a cabo para la metalurgia de polvos es: se comprime el polvo para darle la forma deseada, posteriormente se lleva cabo un tratamiento térmico, llamado **sinterizado**, para provocar la unión más compacta de las partículas ocasionando mejores propiedades, principalmente mecánicas, a la pieza.

Según ISO (International Organization for Standardization), define **sinterizado** como un *“tratamiento térmico de un polvo o compactado a temperatura inferior a la de fusión del principal constituyente, con el propósito de aumentar su resistencia a través de la unión de las partículas”*.

En definición de F. Thümmeler and R. Oberacker, *“El **sinterizado** es un proceso de transporte de masa térmicamente activado que conduce al reforzamiento entre las partículas o el cambio de la porosidad y su geometría, acompañada de una reducción de la energía libre. En el proceso, puede tener lugar una fase líquida”*.

Para Groover Mikell P. *“El **sinterizado** es una operación de tratamiento térmico que se ejecuta sobre el compactado para unir sus partículas metálicas, incrementando de esta manera su fuerza y resistencia”*.

Materiales sinterizados

Los materiales generados en la sinterización vienen en una amplia gama de variedades, dependiendo del uso que sean destinados, se fabrican desde filtros cerámicos hasta herramientas de corte.

Estos son algunos materiales sinterizados.

- Carburo de niobio sinterizado
- Carburo de rutenio sinterizado
- Titanio y aleaciones de titanio sinterizados
- Carburo de titanio sinterizado
- Carburo de tungsteno sinterizado

- Tungsteno (wolframio) sinterizado
- Acero rápido para herramientas, sinterizado
- Productos de polvos metálicos sinterizados activados
- Productos de polvos metálicos sinterizados con hidrógeno
- Productos de polvos metálicos sinterizados en vacío
- Chapas y bandas de metales sinterizados
- Alambre de metales sinterizados
- Barras de metales sinterizados
- Herramientas de metales sinterizados para rectificar
- Empaquetaduras de metales sinterizados
- Productos de carburo cementado
- Productos de acero inoxidable sinterizado
- Filtros y elementos filtrantes de metales sinterizados
- Materiales de superficie dura sinterizados para equipo de perforación

Antecedentes

La sinterización es un proceso que se ha llevado a cabo desde la antigüedad para la fabricación de utensilios, la primera aplicación del proceso quizás fue la fabricación de piezas mediante materiales cerámicos, tal vez porque era material de fácil acceso y además se tenía un conocimiento más amplio en comparación con materiales de otro tipo, por ejemplo el hierro.

Posteriormente, por necesidad se estudió otro tipo de materiales, por ejemplo materiales metálicos, que tuvieran mejores propiedades mecánicas, esto resultó muy favorable pues se tenía una amplia variedad de materiales para diferentes aplicaciones.

En la actualidad las industrias que se dedican a fabricar piezas con metalurgia de polvos tienen más conocimiento sobre cierto proceso. Es importante mencionar que en muchas ocasiones son compañías totalmente distintas las que se encargan de fabricar los polvos y las encargadas de fabricar piezas con este tipo de polvo.

Los tratamientos térmicos en metales es un tema que tiene orígenes remotos, como es conocido el acero es un material que se puede modificar sus propiedades, principalmente mecánicas, mediante este tipo de tratamientos térmicos se tiene como principal ventaja no recurrir a otros materiales evitando así altos costos.

Existen investigaciones relacionadas con el tema de metalurgia de polvos, la investigación que se realizara es para dar a conocer un panorama general del proceso de sinterización en los aceros para herramientas, sus propiedades mecánicas y tratamientos térmicos aplicables a estos tipos de aceros, para así poder tener una investigación sobre el tema enfocado a aceros para herramientas. Además de realizar los tratamientos térmicos de temple y revenido que ayudará a obtener datos, a partir de un estudio metalográfico, sobre algunas propiedades mecánicas que se tienen antes y después de aplicarles dicho proceso a un acero FAX55 (equivalente al AISI T15) proporcionado por un compañero que trabaja en la empresa Nachi Mexicana, los datos obtenidos podrán ser de utilidad para la formación académica y la industria dedicada a la fabricación de herramientas.

Se dejara como trabajos futuros profundizar sobre el tema y llevar a cabo prácticas experimentales que puedan fortalecer aún más la investigación.

CAPÍTULO 1

METALURGIA DE POLVOS

*La pulvimetalurgia (metalurgia de polvos) es el nombre que recibe un proceso en el que se mezclan dosis concretas de polvos metálicos finos, se comprimen para darles una forma definida (compactado) y luego se calientan (sinterizan), en una atmosfera controlada, a una temperatura inferior al punto de fusión del ingrediente principal, durante un tiempo suficiente para que se traben las superficies de las partículas en contacto y se establezcan las propiedades buscadas. (Degarmo E. P., Black J.T., & Kohser R. A. (1994). *Materiales y Procesos de Fabricación, segunda edición volumen 1*. Barcelona: Editorial Reverté S. A. p.371).*

Los polvos de hierro y acero, así como otros polvos metálicos, empleados en la fabricación de componentes sinterizados se pueden caracterizar por tres categorías de propiedades, que son:

- 1.- Propiedades metalúrgicas
 - Composición química y las impurezas
 - Microestructura
 - Microdureza
- 2.- Propiedades geométricas
 - Distribución del tamaño de partícula
 - Forma de la partícula externa
 - Estructura de las partículas interna (porosidad de las partículas)
- 3.- Propiedades mecánicas y físicas
 - Caudal
 - Densidad aparente
 - Compresibilidad, resistencia en verde y después del sinterizado

Todas estas propiedades del polvo son heredadas a las futuras piezas, garantizando la buena calidad del producto terminado desde su materia prima y mediante el proceso de producción.

La obtención de piezas mediante la metalurgia de polvos generalmente lleva el siguiente procedimiento:

- Producción de polvos
- Acondicionamiento o preparación de polvos para la conformación y estabilización
- Consolidación o conformación
- Sinterizado
- Operaciones de acabado

1.1 Producción de polvos

Para producir polvos metálicos existen diferentes técnicas que se han ido desarrollando e incluso perfeccionando en el transcurso del tiempo, cada una de estas técnicas de producción difieren desde sus procedimientos para la producción de polvos metálicos, morfología, aplicación, costo de producción, entre otras. Algunas técnicas empleadas para la producción de materiales granulares son:

- Polvos producidos por reducción
- Polvos producidos por descomposición térmica
- Polvos producidos por electrolisis
- Polvos producidos por precipitación
- Por deposición
- Polvos producidos por atomización:
 - Atomización por agua
 - Atomización con gas
 - Atomización centrifuga
- Producción de fibra
- Producción mecánica de polvos

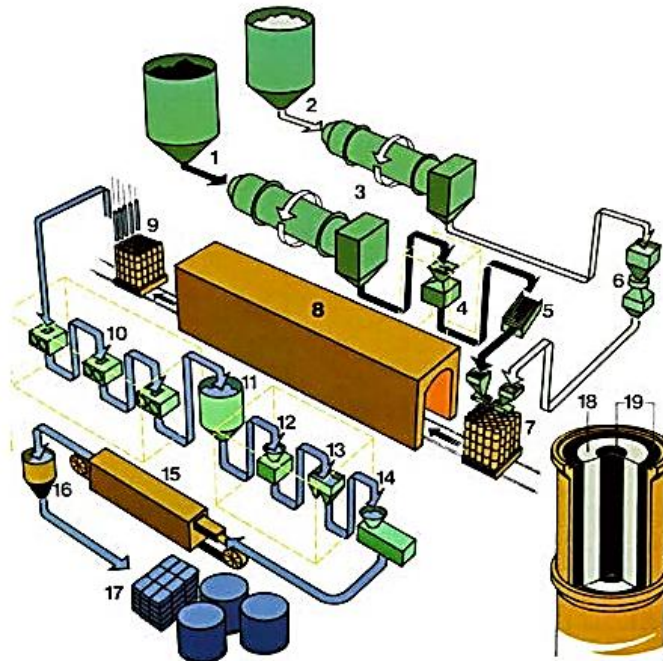
A continuación se describen algunos procesos para la producción de polvos metálicos más usuales.

1.1.1 Polvos producidos por reducción

Este proceso se utiliza principalmente para obtener polvos de hierro. Consiste en la reducción directa de un óxido mediante carbono (cisco) o hidrógeno (Fe, Cu, Co, Mo, W) donde se obtiene una masa porosa (por ejemplo hierro esponja). Para la extracción del oxígeno en el hierro, se ingresa en un horno rotatorio el mineral de hierro junto con el carbón y la caliza en proporciones dosificadas, posteriormente se llega a una temperatura de aproximadamente 1200°C donde se genera la combustión generando monóxido de carbono el cual permite la reducción del mineral de hierro, el tiempo que permanece en el horno es regulada con la velocidad de rotación del horno.

Posteriormente se enfría rotatoriamente a unos 130°C y se clasifica por tamaños después se separa de los residuos por medio del magnetismo. Una vez obtenido el mineral se procede a una molienda del mismo para obtener polvo, esta molienda puede realizarse en molino de rodillos, molino de bolas, molino vibratorio de bolas, molienda por frotamiento, molienda con varilla, molino de martillos, molino de impacto, molino de energía de fluido. El tipo de molino que se desee utilizar dependerá de qué tamaño de partículas desea obtener.

En la siguiente Figura 1.1 se puede mostrar esquemáticamente el proceso de Höganäs para la producción de hierro esponja mediante reducción.



- | | |
|--|--|
| 1. Reducción de la mezcla de polvo de coque y piedra caliza | 11. Almacenamiento en silos |
| 2. Mineral de hierro | 12. Chrusing |
| 3. Secado | 13. Separación magnética |
| 4. Trituración | 14. Molienda y cribado |
| 5. Proyección | 15. Recocido en el horno de la línea, aproximadamente 800-900 °C |
| 6. Separación magnética | 16. Igualación |
| 7. Carga en tubos de cerámica | 17. Embalaje automático |
| 8. Reducción de los hornos de túnel, aproximadamente 1200 °C | 18. Mineral de hierro |
| 9. Descarga | 19. Mezcla reducción |
| 10. Trituración gruesa | |

Figura 1.1 Diagrama de flujo para el proceso de Höganas para hierro esponja [11].

1.1.2 Polvos producidos por atomización

Es un proceso muy utilizado para materiales prealeados, el proceso es muy similar para los polvos producidos por atomización de agua o gas y atomización centrífuga. La materia prima para este proceso es cuidadosamente seleccionada de la chatarra de hierro y hierro esponja.

La siguiente Figura 1.2 ilustra el proceso de la obtención de polvos mediante atomización, la materia prima (1) es fundida en un horno de arco eléctrico con una capacidad aproximada de 50 toneladas (2) donde, si se desean elementos de aleación se pueden añadir en este punto del

proceso. La masa fundida se vierte libre de escoria a través de un orificio en la parte inferior del horno en un recipiente (3) donde es refinado mediante una lanza de oxígeno (4).

El recipiente es transferido a un horno con boquilla estrecha para la estación de atomización (5) donde el hierro (acero) se calienta hasta alcanzar la fase líquida y es liberado por la boquilla inferior del recipiente a una artesa especialmente diseñada (A), desde ahí se controla el flujo mediante un ducto estrecho (B) y posteriormente a través del centro de una boquilla en forma de anillo (D) es interceptado por un chorro de agua a una presión elevada (C) donde el acero líquido es desprendido en finas gotitas (E). Algunas de estas gotitas se solidifican mientras otras se unen formando aglomerados irregulares que posteriormente son tratados para tener la forma de partícula deseada.

El aire y el vapor de agua que surgen de atomizar el acero líquido son la principal causa de la oxidación superficial de las partículas (polvo metálico).

Las gotitas solidificadas y el agua de pulverización son recogidas en un recipiente como lodo, este lodo de polvo se desagua (6) y se secan (7). El polvo seco se separa magnéticamente de partículas de escoria contenidas en el polvo (8), se proyecta (9) y homogeneiza (10), y finalmente es transportado en contenedores especiales (11) para su posterior procesamiento.

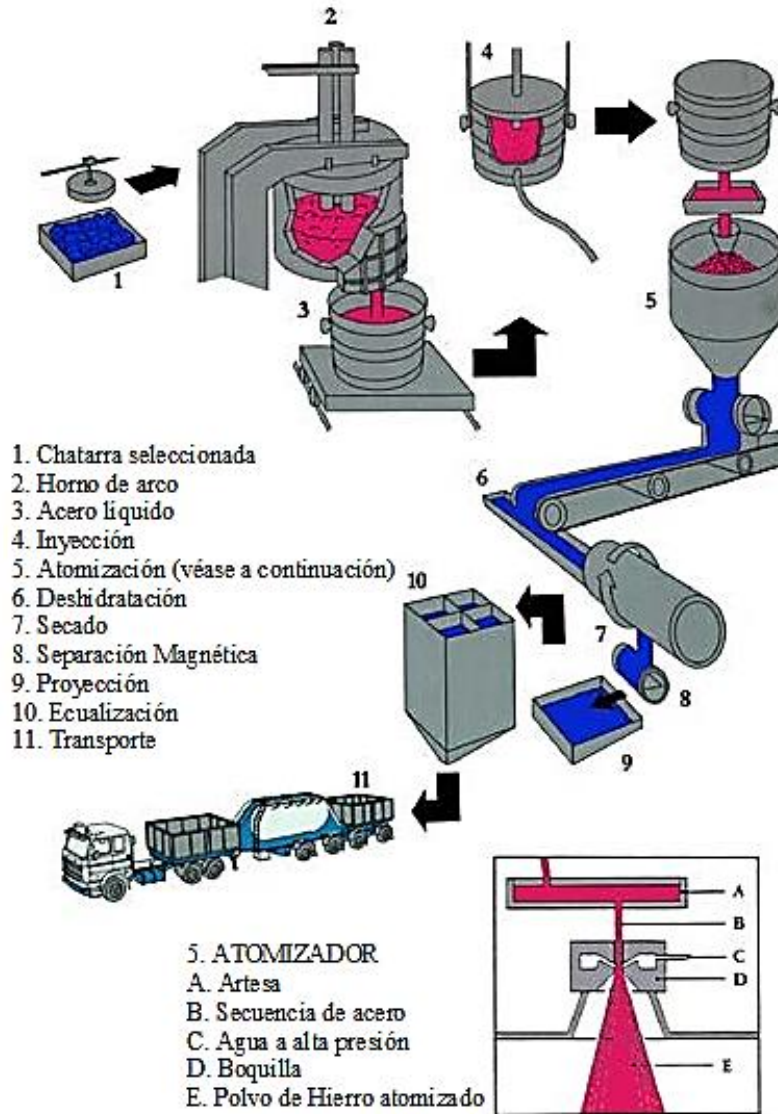


Figura 1.2 Diagrama de flujo para el proceso de atomización con agua por Höganäs [11].

1.1.3 Producción de polvo de hierro reducido con hidrogeno

Este polvo se fabrica a partir de óxidos de hierro seleccionados, las partículas de polvo tienen una forma irregular con una microestructura similar a la de una esponja, esto permite tener una buena propiedad de asentamiento mecánico que contribuye a una alta resistencia en verde y proporciona una gran superficie para promover la sinterización. Su utilización es principalmente para soportes estructurales de baja densidad así como componentes

sinterizados que trabajan bajo un coeficiente de fricción elevado. En la siguiente Figura 1.3 se muestra de forma general el procedimiento para la obtención de este polvo de hierro.

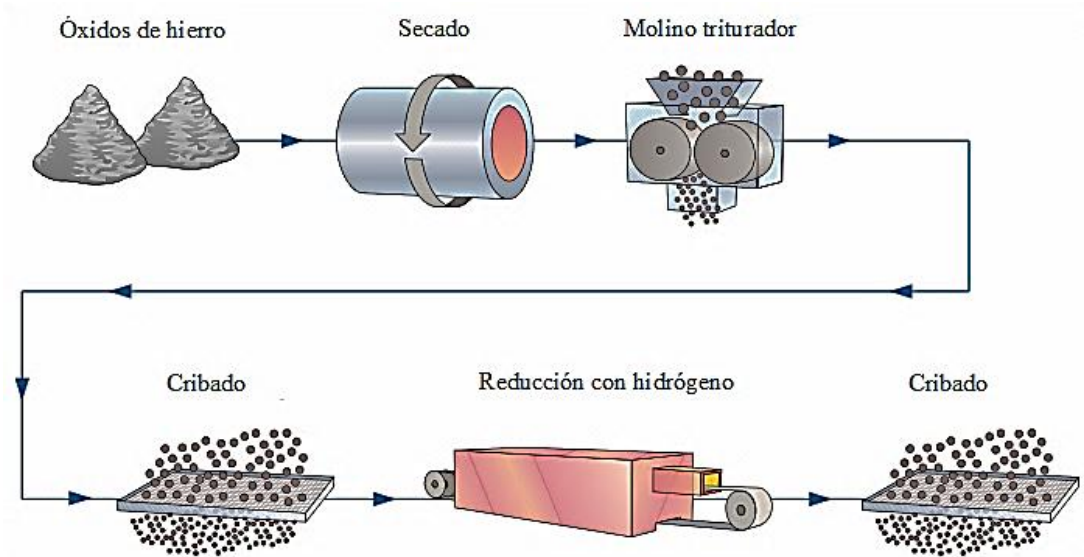


Figura 1.3 Diagrama de flujo para el polvo de hierro mediante la reducción de hidrógeno [11].

1.2. Acondicionamiento o preparación de polvos para la conformación y estabilización

1.2.1 Clasificación de polvos metálicos

Es importante la clasificación o caracterización de polvos antes del siguiente paso, esto con el fin de obtener un producto terminado con las características deseadas, por lo que un polvo puede clasificarse mediante:

- Composición química.
- Distribución por tamaño de partículas.
- Forma de la partícula (esférica, nodular, angulares, laminares, aciculares, irregular, dendríticas), sujeta a la norma ISO 3252.
- Características de su superficie, consiste principalmente en el área superficial específica (área/masa, para metales comúnmente cm^2/g), indica la superficie disponible para el aglutinamiento y también el área sobre el cual pueden estar presentes películas o contaminantes absorbidos.

- Estructura interna (poros, etc.).
- Fluencia, medida que indica el tiempo necesario para que una determinada cantidad de polvo fluya a través de un embudo estándar, generalmente se rige sobre la norma ASTM 213.48/212.48.
- Compresibilidad, es la cantidad que describe el cambio de densidad del polvo en crudo antes y después de su compactación.
- Resistencia inicial o resistencia en verde, resistencia que tiene el componente después de la compactación.
- Propiedades de sinterización “sinterizabilidad”, cambio de dimensiones, resistencias, etc., entre el proceso de sinterizado y después del mismo.

1.2.2 Mezclado de polvos metálicos

Antes del mezclado de polvos metálicos es conveniente realizar algunas técnicas con el fin de reducir el contenido de oxígeno en el material y evitar reacción que pueden ser perjudiciales, algunos metales tales como el hierro reducen el óxido fácilmente en una atmosfera controlada durante el sinterizado, otros como el titanio disuelven su propio oxido, lo cual los hace adecuados para la metalurgia de polvos.

Sin embargo otros polvos metálicos como el óxido de aluminio es muy persistente lo cual requiere técnicas para reducir el oxígeno, en algunos casos se debe tener precaución con polvos finamente distribuidos como por ejemplo, el berilio y el plomo que son tóxicos, el zirconio, magnesio, aluminio que presentan peligro de explosión, otros son pirofóricos, en algunos casos puede existir una reacción térmica que puede afectar directamente a nuestro producto.

El procedimiento de mezclado debe ser realizado cuidadosamente pues un exceso de mezclado puede llevar a un deterioro de partículas o bien un mezclado deficiente puede ocasionar una mezcla no del todo homogénea teniendo entonces diferencia de densidades que afectara de inmediato en el proceso de compactación, por eso se recomienda seguir algunas fichas técnicas del fabricante.

Los principales objetivos que se persiguen al mezclar son:

- Uniformidad en distribución de tamaños.
- Aumentar la comprensibilidad mediante la mezcla de lubricantes.
- Hacer aleaciones para cumplir con las propiedades, principalmente mecánicas, de producción.
- Tener una resistencia adecuada en crudo al agregar aglutinantes (cera o polímeros termoplásticos).
- Acelerar la densificación en el calentamiento al incluir promotores de sinterizado.

Para aumentar la comprensibilidad es recomendable la lubricación que puede ser interna o externa, en la primera es más recomendable porque proporciona mejoras en la compactación y fluencia, sin embargo la lubricación interna debe pasar por un tratamiento térmico previo a la sinterización en una atmosfera controlada (en aire 375-425°C) para extraer el lubricante que se mezcló que puede ser estearato de cinc o ácido esteárico (0.25-1% por peso), por otra parte la lubricación externa solo se hace en las paredes del molde que se va a emplear, es un método más económico pero no garantiza una mejora en el proceso de compactación.

Las aleaciones realizadas mezclando cantidades cuantificadas de polvos de cada elemento requieren un tiempo de sinterización muy largo, lo cual genera un costo elevado, para poder aliviar este inconveniente se desarrollaron polvos parcialmente aleados (obtenidos por el método de reducción) y polvos prealeados (obtenidos principalmente por volatilización) teniendo excelentes propiedades mecánicas, por ejemplo resistencia a la tracción en un intervalo de 400-1000N/mm² y con polvos especiales se puede alcanzar valores más altos del orden de 1500N/mm².

Mientras el carbono se mezcla habitualmente en forma de grafito con el hierro, para otras aleaciones con el hierro generalmente se realizan mediante los siguientes métodos:

Método 1: por atomización con chorros de agua del hierro líquido aleado, que resulta un polvo aleado muy homogéneo.

Método 2: mecánicamente con polvos de cada elemento de aleación, el procedimiento de aleación real se lleva a cabo mediante la sinterización del compacto.

1.3 Consolidación o conformación

Sabemos que la propiedad de compresibilidad en metalurgia de polvos es de vital importancia, porque de esta propiedad depende gran parte el proceso de compactación, entonces se puede relacionar la densidad y la relación de compresibilidad en función de la compactación, teniendo una relación de compactación para fines prácticos de 2.5 a 2.8 correspondiente a las densidades de 6 a 7 g/cm^3 , como se muestra en la Figura 1.4 con compresión por doble acción para el polvo de hierro.

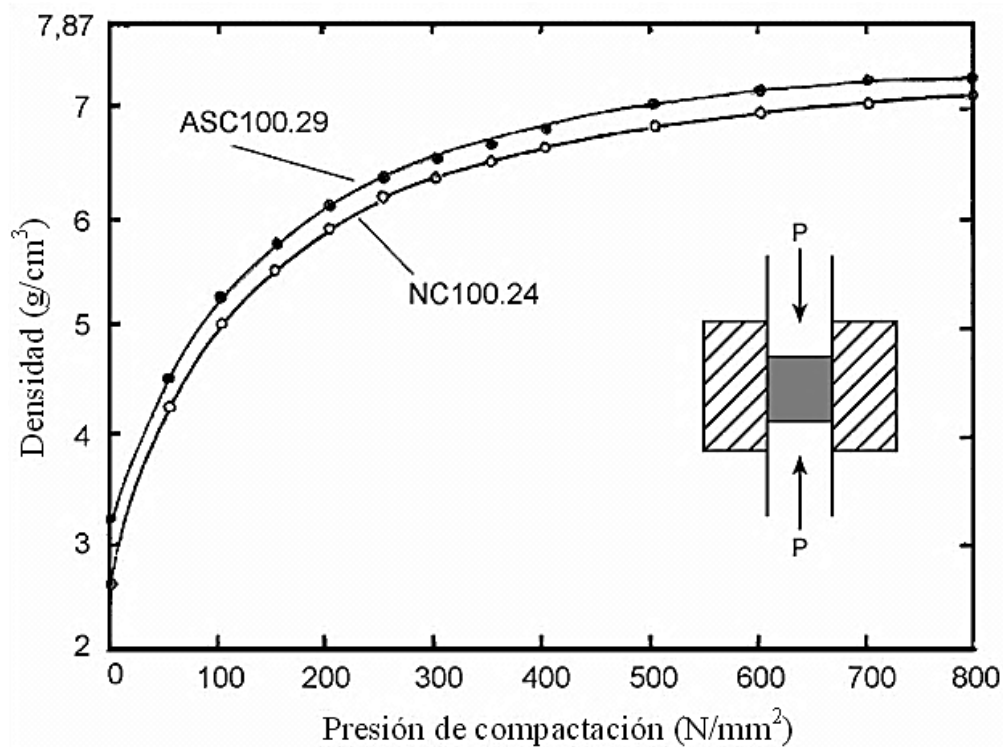


Figura 1.4 Relación de densidad-presión de compactación, para dos polvos de hierro comerciales en un troquel de 25mm de diámetro. Lubricantes adicionales: 0.75% de estearato de Zinc [12].

En la actualidad se ha logrado superar densidades de 7 g/cm^3 , esto se debe al avance tecnológico principalmente de matrices que tienen alta resistencia al desgaste además de polvos con alta compresibilidad lo que resulta económico sobrepasar estos límites.

1.3.1 El ciclo de compactación

El ciclo de compactación se puede dividir en tres etapas, cada una de estas etapas es caracterizada por las posiciones o movimientos de los elementos específicos de herramienta individuales, así como en cada etapa se producen problemas técnicos específicos, estas tres etapas de compactación se pueden describir más fácilmente en una compactación axial, que son:

- 1.- Llenado de la matriz.
- 2.- densificación o compactación del polvo.
- 3.- Extracción del compacto de la matriz.

En la Figura 1.5 se muestra un esquema general de las tres etapas del ciclo de compactación.

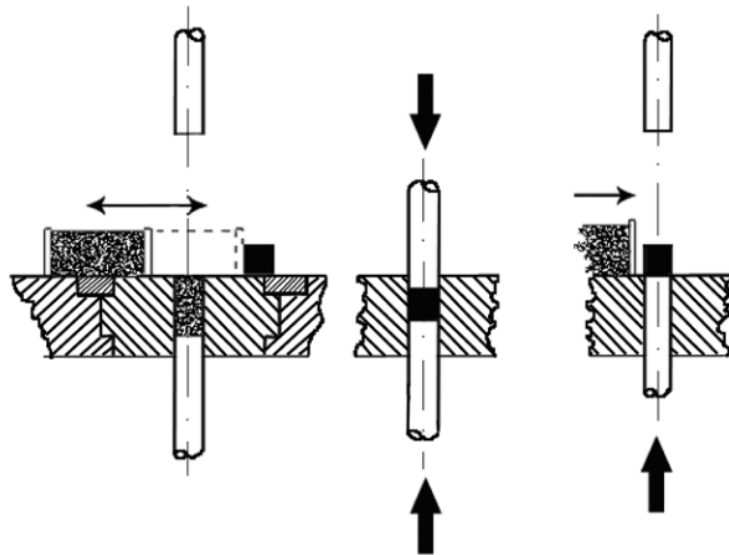


Figura 1.5 Tres etapas en un ciclo de compactación: 1) Llenado de la matriz, 2) densificación del polvo, 3) Extracción del compacto de la matriz [12].

1.3.1.1 Llenado de la matriz

El polvo cae por efecto de la gravedad en la cavidad de la matriz, entre más estrecha este está más dificultades tendrá el polvo de fluir, pero esto también depende del tamaño del polvo que se utiliza, es redundante decir que para cavidades estrechas es necesario polvos más finos que para cavidades más amplias, por tal motivo se ha tenido en cuenta el tamaño de la partícula como ya se mencionó en el apartado de clasificación de polvos metálicos, por lo general el tamaño de las partículas de polvos comerciales oscilan entre 0.15 a 0.20 mm.

Un tamaño inadecuado de partícula de polvo puede producir un flujo con obstáculos en el momento de llenado y por lo tanto un llenado de matiz insatisfecho, además la dimensión lateral más pequeña de una cavidad de la matriz tiene que ser considerablemente de un tamaño mayor a la de las partículas de polvo más grandes (por práctica se recomienda 5 veces más grande que el tamaño de la partícula más grande del polvo). De lo contrario, los fenómenos de puenteo se producen en el en polvo, como se muestra en la Figura 1.6, lo que implica un relleno no homogéneo en la cavidad de la matriz.

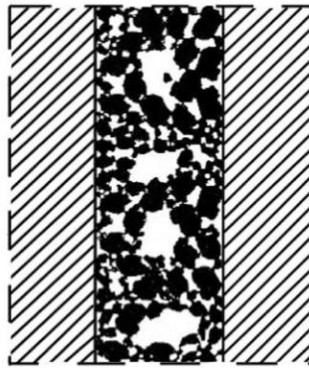


Figura 1.6 Formación de puentes cuando se llenan estrechas secciones transversales [12].

*En los casos en que la cavidad de la matriz se compone de varias partes que tienen diferentes perfiles y profundidades, la densidad de llenado del polvo en estas porciones puede variar debido a las variaciones del caudal, y el comportamiento del polvo de relleno. (Copyright Höganäs AB. (2013, Diciembre). *Production of Sintered Components*. Höganäs Handbook for Sintered Components, 2, pp. 37).*

El diseño de la matriz, como ya se mencionó en el llenado de la matriz, es un tema muy importante en la fabricación de piezas producidas por pulvimetalurgia, existen limitaciones técnicas donde se debe prestar atención, una de ellas es la producción de piezas que tienen un perfil esquinado (Figura 1.7) no es posible en este proceso de metalurgia fabricar piezas meramente terminadas con esquinas, esto causaría algunas irregularidades en la pieza que sin duda afectaría a su desempeño, a continuación en la siguiente figura se muestra la limitante de forma general.

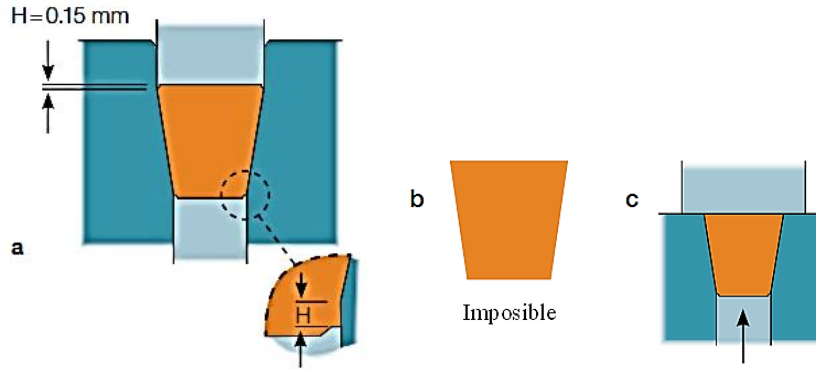


Figura 1.7 Lados cónicos formados por la matriz [13].

1.3.1.2 Densificación o compactación del polvo

La compactación de un polvo es un tema muy extenso y con un grado de complejidad, depende de la inventiva técnica de cada fabricante de componentes compactos, continuamente se desarrollan o mejoran matrices y métodos de compactación para elaborar piezas de un alto grado de complejidad y de igual forma un alto nivel de calidad.

La densidad de llenado es aproximadamente 2.4 g/cm^3 y debe llevarse hasta una densidad aproximada de 7 g/cm^3 , para esto el 85% de la compactación se lleva a cabo a una presión de 200 N/mm^2 y el 15% se eleva dicha presión hasta 800 a $1,000 \text{ N/mm}^2$ (Figura 1.4), esto quiere decir que el troquel trabaja a su máxima potencia solo en el 15% de la carrera.

1.3.1.2.1 Métodos de compactación

Existen diferentes métodos de compactación, los más usuales son:

- *Compactación axial.* Este método, que a continuación se describe más a detalle, consiste en comprimir la pieza en una sola dirección mediante troquel, en ocasiones se utilizan dos troqueles, esto con el fin de tener una densidad más homogénea en toda la pieza, el limitante de este método es la baja relación entre longitud y diámetro.

Los esfuerzos que actúan en este método de compactación se describen en la Figura 1.8 donde el esfuerzo axial que actúa en la cara superior del disco es $\sigma_a(x)$. Debido a la fricción entre la cara lateral del disco y la pared de la matriz, la tensión axial $\sigma_a(x+dx)$, que actúa sobre la cara inferior del disco, es menor que $\sigma_a(x)$. Entonces suponemos que la fuerza de fricción es aproximadamente proporcional a la tensión axial $\sigma_a(x)$ y a la

cara lateral f del disco. Después de estos preliminares, calculamos el equilibrio entre todas las fuerzas que actúan sobre el disco seleccionado.

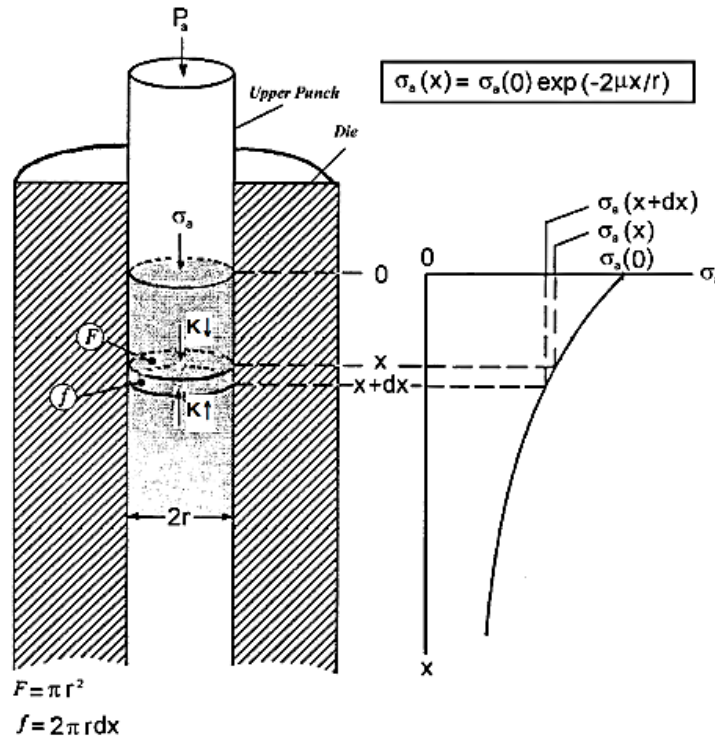


Figura 1.8 Tensión axial (σ_a) en una masa de polvo como una función de distancia x de la cara del punzón superior de compactación [12].

- *Compactación isostática.* Consiste en depositar el polvo en un recipiente deformable que puede ser caucho, plástico, acero suave, etc. cerrado herméticamente en una cámara de presión, donde a continuación se eleva la presión en la cámara mediante un fluido que puede ser agua o aceite, teniendo como resultado altas densidades con dispersión más uniforme, en este procedimiento no es necesario utilizar algún lubricante. Este método se utiliza para la fabricación de aceros rápidos y especializados. A continuación en la siguiente Figura 1.9 se muestra una gráfica donde se observa la caída de porosidad y el aumento de la densidad mediante este procedimiento.

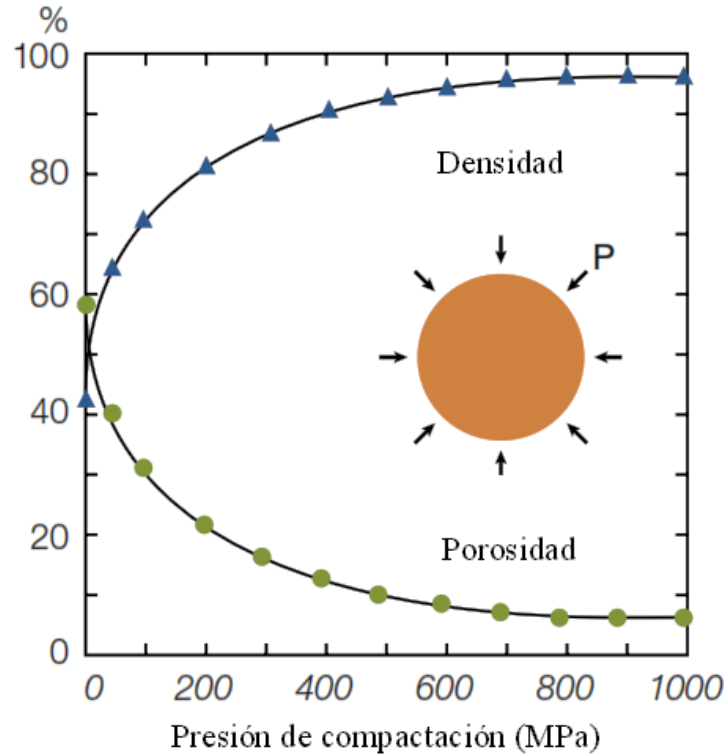


Figura 1.9 Densidad relativa y porosidad en función de la presión de compactación isostática. Polvo electrolítico de hierro herméticamente encerrado en chaquetas delgadas de caucho sometidos a presión hidráulica [12].

Todos persiguiendo un mismo objetivo que es tener un producto compacto con una excelente distribución uniforme de densidad, para obtener una mejor uniformidad es recomendable mantener una relación de altura/anchura inferior a 2-2 ½, para componentes con niveles diferentes de altura es necesario seccionar el troquel y mantener la misma relación ($\Delta h_1/\Delta h_{1,p}=\Delta h_2/\Delta h_{2,p}$).

Por tal motivo el diseño de matrices es de suma importancia para obtener un producto de alta calidad, a continuación se describen cuatro principios más importantes del diseño de matrices para la compactación de polvos:

- a) *Compactación simple.* El troquel superior ejerce un movimiento activo para la compactación, después de retirarse se efectúa la eyección por parte del troquel inferior, este tipo de compactación tiene la limitante que solo se puede garantizar la producción de componentes planos y delgados.

- b) *Compactación por doble acción.* Tiene el mismo funcionamiento que la compactación de simple efecto, con la diferencia que en el momento de la compactación el troquel inferior se encuentra activo en las mismas condiciones que el superior, teniendo presión en el elemento tanto en la parte superior como inferior logrando una mejor compactación uniforme, siendo este método el más comercial.
- c) *Compactación con matriz flotante.* Se produce un efecto similar al proceso de compactación por doble acción, el troquel inferior queda inactivo en el proceso de compactación mientras el troquel superior está activo y en el transcurso de la carrera del mismo, la matriz flotante desciende una distancia que equivale a la mitad de la longitud que recorre el troquel en el proceso de compactación, este efecto se produce debido a la fricción que se genera en las paredes de la matriz. Para poder retirar el producto una vez compactado, se puede bajar más la matriz hasta que quede libre la pieza y mantener el troquel inferior estático o bien elevar el troquel inferior.
- d) *Compactación con un movimiento controlado de retiro de la matriz.* La eyección se efectúa deslizando la matriz hasta dejar libre por completo la pieza compactada para extraerla.

En la Figura 1.10 se puede observar algunos mecanismos de compactación ya descritos.

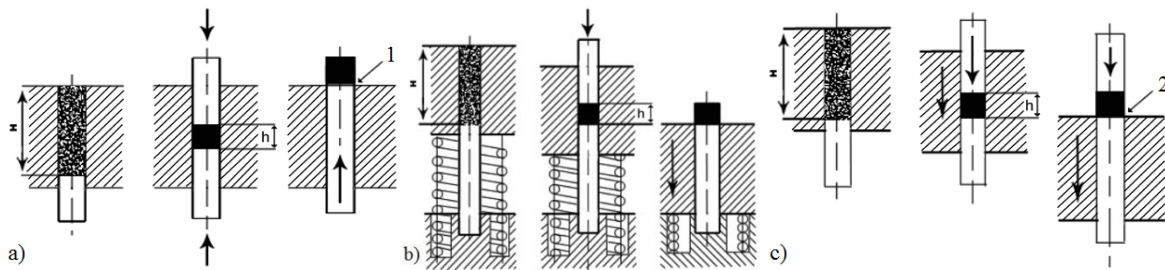


Figura 1.10 a) troquel estacionario y dos punzones moviéndose uno contra el otro, b) pistón inferior estacionario y matriz flotante, c) punzón inferior estacionario y matriz que desciende una distancia equivalente a la mitad de la longitud que recorre el troquel superior en el proceso de compactación [12].

1.3.1.3 Extracción del compacto de la matriz

Antes de extraer el compacto, se libera la presión de compactación, esto debe de hacerse cuidadosamente pues un cambio severo de presiones y de deformaciones elásticas puede causar grietas sin salir de la matriz, esto debido que en toda las herramientas se generan diferenciales de tamaños debido a la presión ejercida. Por ejemplo en una compactación por simple efecto el pistón inferior recibe la mayor presión existente en el proceso por lo que se deforma elásticamente y al eliminar la presión regresa a su estado original lo que ocasiona un movimiento ligero en el compacto lo que causa las grietas, como se muestra en la siguiente Figura 1.11:

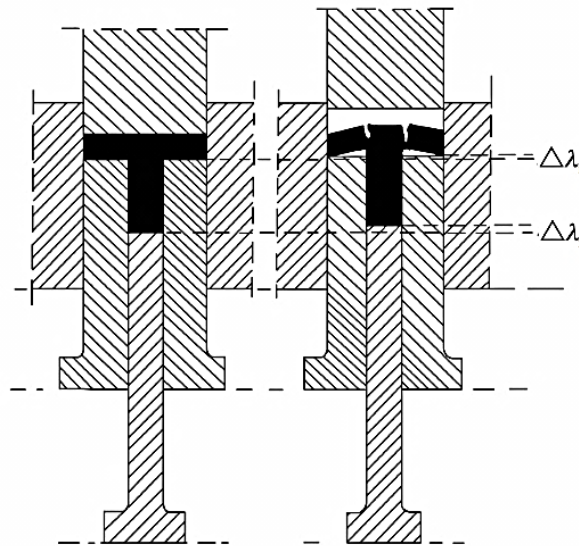


Figura 1.11 La formación de grietas debido a las diferentes expansiones elástica de dos punzones inferiores cuando se expulsa el punzón superior [12].

En la compactación axial, la más utilizada para la producción de piezas mediante polvos metálicos, debe prestarse atención en los coeficientes de fricción, como ya se sabe existe fricción entre la pieza y la superficie de la matriz. A continuación en la Figura 1.12 se muestra el proceso de expulsión, el coeficiente de expulsión (μ) y en consecuencia la presión de inyección, que adopta un valor de pico (adhesive friction) esencialmente por encima del nivel “normal” (sliding friction). Este pico puede superar en algunos casos, por ejemplo, con casquillos largos con paredes delgadas, superar la presión de compactación, teniendo dos consecuencias:

- a) Un efecto de re-densificación puede producirse en el extremo inferior del compacto.
- b) Un punzón inferior largo y delgado, lo suficiente fuerte para soportar la carga de compresión puede ceder o romperse en el proceso de expulsión.

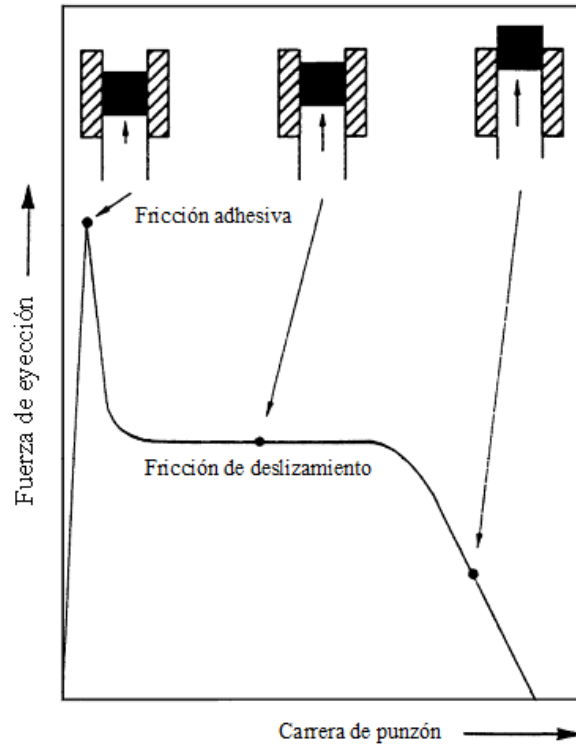


Figura 1.12 Fuerza de expulsión como una función del movimiento del punzón de expulsión inferior; esquemática [12].

1.3.3 Dimensionamiento y acñado

La operación de acñado y dimensionamiento es realizado para cumplir dos objetivo: mejorar las propiedades mecánicas y satisfacer las tolerancias dimensionales.

El dimensionamiento tiene lugar por lo general después de la sinterización donde el producto es llevado a una matriz para llevar un proceso de compactación adicional para poder satisfacer las dimensiones deseadas, dicha matriz puede ser la matriz primaria para lotes muy pequeños o bien una matriz especial cuando se tiene lotes grandes o cuando el proceso requiere de una acñación cuando el proceso es incompleto.

En la acuñación temprana (antes de la sinterización) se somete el compacto crudo a una pre-sinterización (para polvos de hierro de 650-850°C) en un corto tiempo y a una temperatura relativamente baja pero lo suficiente para recocer el material, así al realizar el acuñado, antes de la sinterización, se aumenta la densidad y por consiguiente las propiedades mecánicas mejoran.

1.4 Sinterizado

Según ISO (International Organization for Standardization), define **sinterizado** como un *“tratamiento térmico de un polvo o compactado a temperatura inferior a la de fusión del principal constituyente, con el propósito de aumentar su resistencia a través de la unión de las partículas”*.

La sinterización tiene por objetivos principalmente aumentar la resistencia del compacto crudo y disminuir su porosidad.

Los factores más importantes que deben ser tomados al realizar la sinterización son:

- La temperatura y el tiempo
- La composición de la atmósfera de protección en el horno de sinterización
- La composición de la mezcla del polvo
- La estructura geométrica de las partículas de polvo
- La densidad del polvo compacto

El proceso de sinterizado se lleva a cabo en una atmósfera que prevenga la oxidación, que reduzca los óxidos, controle la carburación y descarburación de compactos donde su principal componente es el hierro.

Existen dos tipos de sinterización que son realizados por la mayoría de las industrias dedicadas a la transformación de polvos metálicos, que son: sinterización en estado sólido y líquido.

1.4.1 Sinterización en estado sólido

Se lleva a cabo a una temperatura inferior a la de fusión de los constituyentes. Los productos que son sometidos a este proceso son principalmente componentes estructurales.

Se tienen diferentes fases en el proceso de sinterización en estado sólido, en una primera fase (Figura 1.13 a) las superficies de contacto entre cada partícula aumentan formando cuellos

redondos por lo que la porosidad se encuentra presente en canales de interconexión, en una segunda fase (Figura 1.13 b) se puede tener un aumento en los cuellos teniendo con el tiempo la transformación de los poros en forma esférica donde los más significantes aumentan de tamaño y los pequeños se desvanecen aumentando el tamaño promedio de los poros.

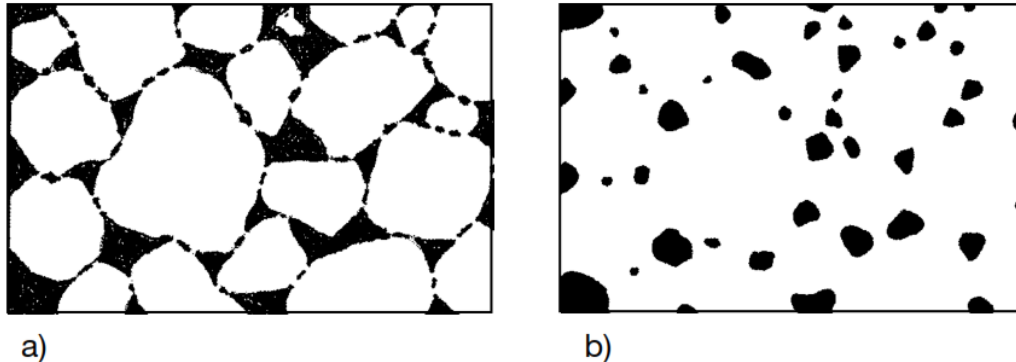


Figura 1.13 Fase temprana a) y tardía b), del proceso de sinterización de forma esquemática [12].

Como en este proceso no existe una fase líquida como tal, pueden existir cinco mecanismos diferentes de trasportes [12], que son:

- Difusión de volumen (migración de vacantes)
- Difusión de límite de grano
- Difusión superficial
- Viscoso o flujo plástico (causada por la tensión superficial o tensiones internas)
- Evaporación / condensación de los átomos en superficies

1.4.2 Sinterización en estado líquido

El proceso es llevado a una temperatura entre los puntos de fusión de dos constituyentes de la mezcla, esto con el fin de formar cuellos de botella que serán de gran utilidad para la aleación de estos dos principales constituyentes metálicos del producto, donde la anchura del cuello controla la velocidad de aleación. El resultado de esta interacción varía con la identidad química de los dos metales: que puede tener una aceleración, un retraso o ningún efecto en absoluto sobre la tasa de crecimiento del cuello.

Este tipo de sinterización se lleva a cabo cuando se utiliza polvo con partículas de diferente composición y no un polvo pre-aleado, por lo que las diferentes partículas del polvo necesitan mezclarse de forma homogénea en el sinterizado, la velocidad de homogenización depende del respectivo coeficiente de difusión que, a su vez, depende de la temperatura. Para mayores informes consultar la referencia [12].

Este tipo de sinterización es utilizado principalmente para productos especiales como carburos y cerámicas.

1.5 Operaciones de acabado

Las operaciones de acabado que se realizan para obtener mejores propiedades de forma general en el producto compacto dependen de la exigencia en la aplicación del mismo, a continuación en la Figura 1.14 se muestra cómo afecta el proceso en las tolerancias y propiedades físicas en el producto sinterizado.

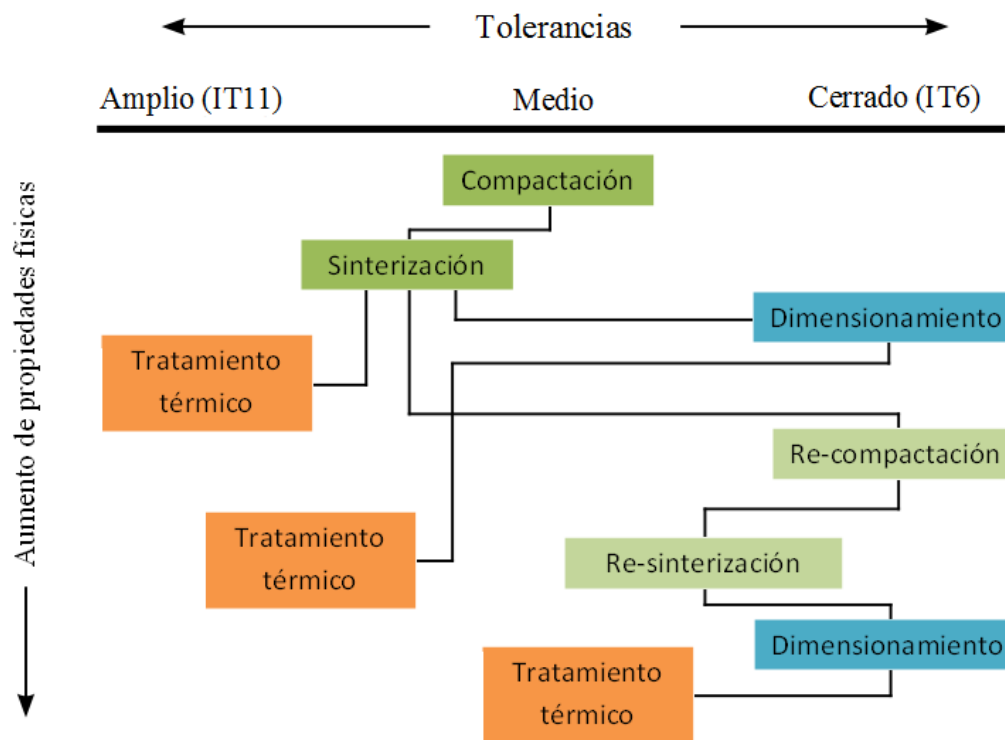


Figura 1.14 Influencia de los procesos en las tolerancias y propiedades físicas en las partes P/M. También en función del material, geometría y procesamiento [13].

1.5.1 Tratamientos postsinterización

Después del sinterizado en muchas ocasiones es necesario procesos que complementen al sinterizado y de esta forma ayuden a mejorar el producto obtenido, algunos de estos procesos son:

- *Impregnación.* Es aplicable a productos que tienen una porosidad que van en un rango de 25 a 35% por ejemplo los cojinetes, el compacto es sumergido en aceite a presión o se trata al vacío, entonces los poros se llenan de aceite y así se tiene una lubricación que su duración depende de la carga y la temperatura a la que se someta el producto.
- *Infiltración.* Se introduce material fundido, cuyo punto de fusión es más bajo que el constituyente principal del compacto, el proceso tiene lugar ya sea en el proceso de sinterización o posterior al mismo por acción capilar. El objetivo es llenar los poros para obtener una resistencia del componente que va desde el 70 al 100%
- *Tratamiento térmico.* Se realiza para mejorar las propiedades mecánicas principalmente y puede llevarse a cabo mediante métodos convencionales.
- *Recubrimiento y tratamientos superficiales.* Se usan métodos convencionales para productos con un grado de densidad alto, para los compactos con una densidad relativamente baja es recomendable llevarlo a un proceso de impregnación antes de un recubrimiento o tratamiento superficial.
- *Maquinado.* Los compactos pueden llevarse a procesos de maquinado pero debe tenerse en cuenta de no usar refrigerantes que contengan agua pues esto ayudara a la corrosión. A si mismo pueden soldarse con métodos tradicionales.

El procedimiento descrito depende de los requerimientos que se desean en el compacto, por lo que se puede realizar una combinación en la elaboración de componentes pulvimetalurgicos, es notable que entre más combinaciones se realicen el producto tendrá mejor calidad pero igual incrementa su costo, algunas de estas combinaciones son:

- Compresión + sinterización
- Compresión + sinterización + dimensionamiento
- Compresión + presinterización + acuñación + sinterización
- Compresión + presinterización + acuñación + sinterización + dimensionamiento

1.6 Ventajas y desventajas de la metalurgia de polvos

En resumen, a continuación se citan algunas ventajas y desventajas de forma general en la metalurgia de polvos.

Ventajas pulvimetalurgia

- Desperdicio de material casi nulo
- Elevada producción en serie
- Productos con geometrías complicadas
- Eliminación del proceso de maquinado parcial o total
- Aleaciones que con otros procesos es imposible obtener
- Producción de compactos con materiales especiales
- Alta densidad en los productos lo que implica mejora en propiedades mecánicas
- Porosidad controlada

Desventajas

- Matrices relativamente costosas
- Elevados costos en el proceso, pero es compensable con una producción en serie
- Limitaciones geométricas
- Materias primas costosas, pero compensable en la buena calidad del producto

CAPÍTULO 2

ACEROS PARA HERRAMIENTA

El término acero para herramienta se refiere a un grupo de aceros que se usan para fabricar herramientas de corte, punzones, matrices, hojas cortantes, cinceles y otros usos parecidos. Mientras que la mayor parte de los usos de los aceros para herramienta se relacionan con el campo de la ingeniería de manufactura, también pertenecen al diseño de máquinas, donde se requiere la capacidad de mantener un borde agudo bajo condiciones abrasivas, también algunos aceros para herramienta tienen una resistencia bastante alta al choque, lo que puede ser ventajoso en componentes de máquina tales como piezas para embragues mecánicos, trinquetes, cuchillas, guías para partes en movimiento y pinzas [6].

2.1 Clasificación de los aceros

Existe una amplia gama de cómo identificar y clasificar los aceros, dada la gran variedad de los aceros y fabricantes del mismo se han originado una gran cantidad de normas y reglamentos que varían de un país a otro como se verá a continuación.

Para clasificar los aceros generalmente se realiza tomando algunos aspectos, los más usuales son los siguientes:

- Clasificación por su composición química:
 - Aceros al carbono o aceros no aleados:
 - I) Aceros de bajo carbono ($\%C < 0.25$)
 - II) Aceros de medio carbono ($0.25 < \%C < 0.55$)
 - III) Aceros de alto carbono ($0.55 < \%C < 2$)
 - Aceros aleados:
 - I) Aceros de baja aleación (elementos aleantes $< 5\%$)
 - II) Aceros de alta aleación (elementos aleantes $> 5\%$)
 - III) Aceros inoxidables (cromo mayor a 12%)

- Clasificación por su aplicación:
 - I) Aceros de construcción.
 - II) Aceros de uso general.

- III) Aceros para temple y revenido.
- IV) Aceros inoxidable o para usos especiales.
- V) Aceros para herramienta y corte mecanizado.
- VI) Aceros rápidos.

– Clasificación por su calidad:

Aceros no aleados:

- I) Aceros no aleados de calidad.
- II) Aceros no aleados especiales.

Aceros aleados:

- I) Aceros aleados de calidad.
- II) Aceros aleados especiales.

Aceros inoxidables:

Según su contenido de níquel:

- I) Aceros inoxidables con contenidos de Ni < 2.5%.
- II) Aceros inoxidables con contenido de Ni \geq 2.5%.

Según sus características físicas:

- I) Aceros inoxidables resistentes a la corrosión.
- II) Aceros inoxidables con buena resistencia a la oxidación en caliente.
- III) Aceros inoxidables con buenas presentaciones frente a la fluencia.

Para la nomenclatura de los aceros generalmente se toma en cuenta la clasificación anterior, que varía de una norma a otra, a continuación se enumeran algunas normas particulares de cada país y otras reconocidas a nivel mundial.

- AISI (American Iron and Steel Institute)
- ISO (International Standards Organization)
- ASTM (American Society for Testing and Materials)
- DIN (Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemán de Normalización)

- NADI (Normen-Ausschuss der Deutschen Industrie - Comité de Normalización de la Industria Alemana)
- SAE (Society of Automotive Engineers)
- CENIM (Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas)
- JIS (Japanese Industrial Standard)
- UNE (Una Norma Española)

2.2 Clasificación de los aceros para herramientas según AISI-SAE

Para la nomenclatura de aceros para herramientas habitualmente siguen un patrón un poco diferente a la nomenclatura de otros aceros dentro de la misma norma, en la Tabla 2.1 se muestra la clasificación o grado propuesta por AISI-SAE.

Tabla 2.1 Clasificación propuesta por AISI-SAE [1].

TIPO	GRADO AISI-SAE	DESCRIPCIÓN
1 Temple en agua	W	Alto carbono
2 Trabajo en frío	O	Temple en aceite
	A	Aleación media de temple al aire
	D	Alto carbono/Alto cromo
3 Resistentes al impacto	S	Medio carbono al silicio
4 Alta velocidad (corte rápido)	T	Al Wolframio
	M	Al molibdeno
5 Trabajo en caliente	H	Base Cromo, Wolframio, Molibdeno
6 Moldes para plásticos	P	Baja aleación, bajo carbono
7 Aplicaciones especiales	L	Baja aleación, medio-alto carbono
	F	Carbono – Wolframio

2.2.1 Aceros para trabajo en frío

2.2.1.1 Grupo W (temple en agua)

Son aceros al carbono utilizados para la fabricación de herramientas que pueden clasificarse de acuerdo a su contenido de carbono de la siguiente forma:

- Aceros Hipoeutectoides ($C < 0.8\%$).
- Aceros Eutectoides ($C \approx 0.83\%$)

– Aceros Hipereutectoides ($C > 0.83\%$)

Estos tipos de aceros que pueden templarse en agua alcanzan una dureza superficial del orden de 60 y 67 HRc, son diseñados para trabajar en frío, de lo contrario si se eleva su temperatura disminuye notablemente la dureza del temple, por lo que no deben de ser trabajados a temperaturas superiores a las de revenido bajo.

El motivo de temprar estos aceros en agua o en salmuera es por su baja templabilidad al ser aceros no aleados alcanzando por lo regular alrededor de los 3mm de profundidad de temple, aunque debe mencionarse que la templabilidad de estos aceros aumenta al incrementar el contenido de carbono en los aceros hipoeutectoides y disminuye en los aceros hipereutectoides, por tanto el acero con mejor templabilidad es el acero eutectoide.

La temperatura conveniente de austenización para el temple de aceros hipoeutectoides es que supere unos 40°C la temperatura correspondiente a A_3 , con el propósito de evitar la presencia de ferrita proeutectoide en el tratamiento térmico. Para los aceros hipereutectoides es recomendable superar el punto de temperatura eutectoide unos 50°C pero siempre conservando dicha temperatura por debajo de A_m .

El revenido tiene lugar normalmente a los 250°C , y si el objetivo es solo eliminar tensiones provocados por el temple se lleva entonces a 150°C , en hornos de circulación forzada de aire o en baño de sales, se recomienda efectuar el revenido inmediatamente después del temple para evitar fisuras por tensiones internas que se presentan más comúnmente en piezas con perfiles de diferente masividad. Es más conveniente un revenido largo a baja temperatura que uno rápido a altas temperaturas.

La dureza de servicio de esos aceros es de 58-65HRc por tal motivo no se recomienda someterlos a un revenido que supere los 400°C porque disminuiría su dureza dejándolos inservibles para su fin práctico.

Teniendo en cuenta el alto contenido de carbono, la conformación de estos aceros se hace mediante forja o laminación en caliente, no puede hacerse en frío, para realizar el conformado se recomiendan temperaturas que oscilan entre $1,050^{\circ}\text{C}$ y 850°C , evitando mantener por largo tiempo a esas temperaturas el material. En los acero hipereutectoides la forja se lleva a una temperatura inferior a A_{cm} , de lo contrario se necesitaría un recocido previo al temple. Como

se trata de aceros de baja templabilidad, después de la forja el enfriamiento no es de total cuidado.

Para el rectificado final de la pieza debe hacerse con una buena refrigeración abundante de agua o algún otro refrigerante evitando que alcance una temperatura mayor al del revenido que traería como consecuencia el ablandamiento.

Su campo de aplicación de estos aceros es básicamente para piezas pequeñas, aunque pueden utilizarse para piezas de mayor tamaño pero se tiene que añadir una pequeña cantidad de vanadio (0.35%) y de magnesio (hasta 0.65%), teniendo como limitante solo la templabilidad en la capa periférica en tanto al núcleo no.

Los aceros hipoeutectoides con 0.55% C tiene aplicación en la fabricación de destornilladores, alicates, tenazas y martillos, con 0.65% C suelen ser utilizados para cinceles, cortafríos, tijeras, hachas, martillos de forja y herramientas para madera, con 0.75% C para navajas, cuchillos, picabarrenas y martillos neumáticos económicos.

Los aceros hipereutectoides son utilizados donde se requiere mayor resistencia al desgaste, con 0.85% C para tijeras de podar, formones, cuchillas, troqueles económicos, con 0.95% C en machos de roscar, mandriles, punzones, escoplos, martillos para piedra, cilindros para pulir, etc., con un contenido de C de 1.10% para mordazas, terrajas, escariadores, formones, trépanos, cuchillas de cepilladora, brocas de baja velocidad, con 1.30% C en limas, hileras, sierras metálicas, cizallas para papel, herramientas de cincelar, entre otras.

Las propiedades mecánicas de un mismo acero se pueden modificar dependiendo la temperatura y tiempo de temple y revenido, por tal motivo los fabricantes utilizan por lo regular aceros con un contenido de Carbono de 1% que les ofrece una gran variedad de aplicaciones por su buena resistencia al desgaste y tenacidad.

Ventajas

- Son económicos.
- Su dureza puede superar a aceros de media y alta aleación.
- Tienen buena maquinabilidad
- Se pueden forjar mejor que los aceros de media y alta aleación.
- En general no requieren de gran cuidado en sus tratamientos térmicos.

Desventajas

- Poca profundidad de temple.
- En su mayoría no deben ser rectificadas por mantenimiento.
- Gran parte de este acero solo es utilizado para fabricación de piezas pequeñas y/o formas geométricas simples.
- No pueden trabajar a una temperatura mayor al revenido.

En la Tabla 2.2 se muestran algunos aceros y su composición química estimada propuesto por AISI en su mayoría son aceros hipereutectoides.

Tabla 2.2 Aceros al carbono, temple en agua (AISI grupo “W”).

Tipo	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% W	% V
W1	0.70-1.50	0.10-0.40	0.10-0.40	0.15 máx.	0.20 máx.	0.10 máx.	0.15 máx.	0.10 máx.
W2	0.85-1.50	0.10-0.40	0.10-0.40	0.15 máx.	0.20 máx.	0.10 máx.	0.15 máx.	0.15-0.35
W5	1.05-1.15	0.10-0.40	0.10-0.40	0.15 máx.	0.20 máx.	0.10 máx.	0.15 máx.	0.10 máx.

2.2.1.2 Grupo O (temple en aceite)

Son aceros de baja aleación, la gran mayoría de estos aceros son hipereutectoides para lograr una dureza requerida en servicio de 60-64 HRC mediante la formación y transformación de la martensita. Los elementos aleantes tienen la tarea de facilitar el temple, para mejorar la tenacidad en la herramienta es necesario afinar el grano por lo que se le añade W y V al acero, para tener una buena resistencia al desgaste es necesario la aleación de Cr, W y V, aunque disminuye un poco la maquinabilidad.

El temple es similar a los aceros al carbono antes mencionados, en hornos convencionales a una temperatura entre 790°C y 850°C, su principal objetivo en estos aceros es la dureza y en segundo término la tenacidad.

Para el revenido, se hace un revenido bajo, teniendo en cuenta que a partir de los 250°C pierde notablemente la dureza por este tratamiento térmico.

La forja se lleva a cabo en un rango de temperatura de 1050-900°C, posteriormente se enfrían en cenizas, a continuación llevan un recocido a 825-850°C y después son enfriados en horno.

Su aplicación es similar a los aceros al carbono o tipo “W” donde su servicio es a temperaturas bajas, entre los productos hechos por estos tipos de acero se encuentran punzones, machos de rosca, escariadores, brocas para madera, limas, entre otros. Para el tipo O2 tiene aplicación en limas grandes y de grabado profundo, el O7 se emplea principalmente para la fabricación de peines y machos de roscar, también tiene importancia en herramientas de pequeña sección destinadas a corte con arranque de viruta a baja velocidad en trabajos menos exigentes como una alternativa a los aceros rápidos.

Ventajas

- Son un poco económicos.
- Baja deformación en el temple.
- Alta dureza en el temple.
- Alta templeabilidad a bajas temperaturas de austenización.
- Libre de fisuras en zonas intrínsecas después del temple.
- No requieren de elevados costes de instalación y proceso para su forja y tratamientos térmicos.
- Mantiene un filo por un tiempo prolongado.

Desventajas

- Son diseñados solo para trabajo en frío.
- Disminuye notablemente su dureza a elevadas temperaturas de trabajo.

Los aceros destinados a este grupo por AISI se enuncian en la tabla 2.3 con sus principales elementos aleantes y su composición química en porcentaje.

Tabla 2.3 *Aceros de baja aleación, temple en aceite (AISI, grupo “O”).*

Tipo	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% W	% V
O1	0.85-1.00	1.00-1.40	0.50 máx.	0.40-0.60	0.30 máx.	-----	0.40-0.60	0.30 máx.
O2	0.85-1.95	1.40-1.80	0.50 máx.	0.50 máx.	0.30 máx.	0.30 máx.	-----	0.30 máx.
O6	1.25-1.55	0.30-1.10	0.55-1.50	0.30 máx.	0.30 máx.	0.20-0.30	-----	-----
O7	1.10-1.30	1.00 máx.	0.60 máx.	0.15 máx.	0.30 máx.	0.30 máx.	1.00-2.00	0.40 máx.

2.2.1.3 Grupo A (aleación media de temple en aire)

Este tipo de aceros con temple al aire suelen llamarse aceros “indeformables” por su buena conducta en el temple al aire, pues no presenta deformaciones lo cual los hace aptos para reproducir formas y dimensiones con medidas iguales antes y después de ser templadas, además al templarse al aire y alcanzar la temperatura ambiente, los aceros aleados presentan una mayor cantidad de austenita residual que si el temple se hubiera realizado en un medio refrigerante más austero.

El temple tiene lugar a una temperatura de 930°-980°C, si el temple es realizado a una temperatura igual o menor a los aceros al carbono, resultan menos duros por su grado de aleación que aleja las curvas de templabilidad respecto al origen. El “temple interrumpido” se recomienda sea realizado en piezas con diseño complicado, puesto que se tiene un espacio, muy alejado del origen de los tiempos en el diagrama TTT, entre la curva perlítica y la bainítica que permite la interrupción del temple en sales fundidas alrededor de 500°-550°C, además de poder realizar también, gracias a este espacio, un tratamiento termomecánico (ausforming) o para el acero A9 un “marforming”.

No se puede realizar el normalizado a estos tipos de aceros pues como se sabe el enfriamiento al aire no proporciona una estructura ferrito-cementítica sino martensítica.

Gran parte de los aceros de este tipo pueden tener el tratamiento térmico de revenido entre 450° y 600°C para lograr una “dureza secundaria” que confiere el Cr, Mo, V, W, por el endurecimiento estructural, con revenido a los 200°C se tiene como resultados una buena combinación entre resistencia al desgaste y tenacidad, teniendo valores de dureza de 60 a 62 HRC, cuando se requiere resistencia al impacto el revenido es realizado a 350°C obteniendo una resistencia de 57 a 59HRC.

Después del forjado a una temperatura de 1100°-900°C y dado el grado elevado de templabilidad al aire de estos aceros, se debe enfriar lentamente en cenizas, dentro de un horno con sales fundidas, entre otros para lograr la estructura perlítica de recocido isotérmico.

Por su aplicación suelen llamarse *aceros para matrices de acuñar y cortantes o aceros para matrices de estampar en frío*, por ejemplo el A2 es utilizado principalmente en matriceria, el acero A6 por su contenido bajo contenido de carbono y cromo es utilizado para matrices y cortantes que trabajan con esfuerzos de flexión.

Ventajas

- Alta templabilidad.
- Poca deformabilidad.
- Resistentes a la abrasión.
- Buena tenacidad.

Desventajas

- Son susceptibles a la descarburación.

Tabla 2.4 Aceros para matrices de acuñar y cortantes para trabajo en frío (AISI, grupo “A”).

Tipo	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% W	% V
A2	0.95-1.05	1.00 máx.	0.50 máx.	4.75-5.50	0.30 máx.	0.90-1.40	-----	0.15-0.50
A3	1.20-1.30	0.40-0.60	0.50 máx.	4.75-5.50	0.30 máx.	0.90-1.40	-----	0.80-1.40
A4	0.95-1.05	1.80-2.20	0.50 máx.	0.90-2.20	0.30 máx.	0.90-1.40	-----	-----
A6	0.65-0.75	1.80-2.50	0.50 máx.	0.90-1.20	0.30 máx.	0.90-1.40	-----	-----
A7	2.00-2.85	0.80 máx.	0.50 máx.	5.00-5.75	0.30 máx.	0.90-1.40	0.50-1.50	3.90-5.15
A8	0.50-0.60	0.50 máx.	0.75-1.10	4.75-5.50	0.30 máx.	1.15-1.65	1.00-1.50	-----
A9	0.45-0.55	0.50 máx.	0.95-1.15	4.75-5.50	1.25-1.75	1.30-1.80	-----	0.80-1.40
A10	1.25-1.50	1.60-2.10	1.00-1.50	-----	1.55-2.05	1.25-1.75	-----	-----

2.2.1.4 Grupo D (Alto carbono/Alto cromo)

Al igual que el grupo A de aceros, estos aceros son autotemplantes, por el contenido de Cromo se encuentran entre los *aceros inoxidables martensíticos*, además por su porcentaje de Carbono y Cromo se consideran *aceros ledeburíticos*. De igual forma que el grupo A el recocido posterior a la forja y previo al temple debe de ser incompleto a una temperatura de 870°-900°C con enfriamiento en horno de 15 a 20°C/hora o de lo contrario con un enfriamiento isotérmico que consiste en pasar las piezas a otro horno con una temperatura ligeramente inferior a la del recocido manteniendo esta para la adecuada transformación de austenita a “perlita”.

Su templabilidad supera a los aceros del grupo “A”, se realiza a una temperatura de 980°-1025°C, por su alto contenido de Cromo tiene menor conductividad térmica por lo que deben de precalentarse a 800°C antes de la austenización, para piezas de geometría compleja se recomienda realizar el temple escalonado en un baño de sales, al templar al aire la mayoría de estos aceros llegan a tener una profundidad efectiva de 250mm, su valor de dureza es muy amplio, va desde 50-65HRC.

Por su alto contenido de Cromo y su temple al aire suele tener austenita residual después del temple alrededor de 20 a 30%.

Se recomienda siempre realizar dos revenidos a la herramienta para la eliminación de la austenita residual antes mencionada, la temperatura de revenido suele ser de 150°-300°C.

La forja se lleva a una temperatura entre 1000° y 950°C, es una *forja de desbaste* que es realizado a estos tipos de aceros para herramienta después de solidificarse los tochos, para dispersar los carburos ledeburíticos, se comienza con pequeños golpes para trocear la matriz ledeburítica después se incrementaran la fuerza de los golpes para aumentar las deformaciones, posteriormente el enfriamiento es realizado lentamente en cenizas.

La aplicación de este grupo de aceros va desde plantillas, calibres, guías, con dureza de 61-63HRc, para matrices de estampar, punzones y herramientas sometidas a impacto, con 56-58HRc. El acero D4, por ejemplo, tiene buena resistencia al desgaste y a la abrasión, lo que lo hace un acero utilizado para herramientas tales como matrices de estampado y conformado, cortantes de chapa fina, peines de roscar, escariadores, y de forma general para herramientas que trabajan en grandes series con un rendimiento elevado, si en este acero se requiere de una mayor tenacidad puede revenirse para tener una dureza de 50-60HRc.

Ventajas

- Buena resistencia a la abrasión.
- Resistencia al desgaste.

Desventajas

- Baja maquinabilidad.

En la Tabla 2.5 se muestra algunos aceros de tipo D.

Tabla 2.5 Acero autotemplantes para matrices de estampado en frío (AISI, grupo “D”).

Tipo	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% W	% V
D2	1.40-1.60	0.60 máx.	0.60 máx.	11.00-13.00	0.30 máx.	0.70-1.20	-----	1.10 máx.
D3	2.00-2.35	0.60 máx.	0.60 máx.	11.00-13.00	0.30 máx.	0.70-1.20	1.00 máx.	1.10 máx.
D4	2.05-2.40	0.60 máx.	0.60 máx.	11.00-13.00	0.30 máx.	0.70-1.20	-----	1.00
D5	1.40-1.60	0.60 máx.	0.60 máx.	11.00-13.00	0.30 máx.	0.70-1.20	-----	1 máx;2.5-3.5%Co
D7	2.15-2.50	0.60 máx.	0.60 máx.	11.50-13.50	0.30 máx.	0.70-1.20	-----	3.80-4.40

2.2.2 Aceros resistentes al impacto

2.2.2.1 Grupo S (medio carbono al silicio)

Son aceros hipoeutectoides, su tenacidad es primordial sin olvidar la dureza requerida que los compromete en el trabajo que oscila de 50-58 HRC.

La templabilidad es concedida por elementos carburígenos con inclinación hacia los gammágenos que amplía el dominio de la austenita, y como resultado una mejor resistencia al desgaste. El calentamiento para los tratamientos térmicos de esta familia debe de ser lento y uniforme, en los aceros S1 y S7 dado su baja conductividad térmica por la presencia de W y Cr, suele tener tratamientos térmicos escalonados. En su mayoría el temple tiene lugar en temperaturas de 790°C y 850°C, aunque estos aceros se templan en aceite, no los excluye que puedan ser templados en agua, este último proceso dependerá que la geometría de la herramienta, su forma y dimensiones no resulten relevantes los riesgos de deformación o agrietamiento.

El revenido se lleva a cabo por debajo de 210°C, por lo que se considera un revenido bajo teniendo como resultados buena tenacidad, por tal motivo tienen un contenido de silicio alto, favorable para eliminar la fragilidad en los revenidos de este tipo además de tener valores altos del límite elástico puesto que en este tipo de aceros es primordial respecto a la deformación plástica.

No es recomendable someter a estos aceros a un tratamiento térmico de normalizado porque suelen templarse parcialmente al aire, es recomendable entonces un recocido supercrítico que genera una dureza de 185-215 HB, un tratamiento subcrítico que se lleva a una temperatura inferior a A_c (650-680°C) es recomendado para aliviar tensiones, lógicamente estos tratamientos deben llevarse siempre por debajo de la temperatura a la que se llevó a cabo el temple.

La temperatura para la forja por lo general es de 850 y 1050°C, posteriormente para su utilización es conveniente dejar un margen de tolerancia en las medidas para después de los tratamientos térmicos se lleve a cabo un rectificado, además de un buen diseño en la herramienta que es de vital importancia porque en ocasiones de esto depende que nuestra herramienta tenga un tiempo de vida más prolongada.

La aplicación de un acero es múltiple, como se ha venido mencionando, por lo que las aplicaciones señaladas son de forma muy general, por ejemplo para esta familia de aceros, el acero S5 se puede utilizar para cuchillas propuestas al corte de materiales con elevados esfuerzos de flexión como pueden ser para cizallar chapas de espesores superiores a 12mm, para aceros con una dureza mayor son utilizados para cinceles, punzones, martillos, cortafríos, etc.

Ventajas

- Tienen buen comportamiento a esfuerzos alternativos.
- Tienen un buen límite elástico.
- En algunos casos pueden ser templados en agua disminuyendo entonces los costos.

Desventajas

- Son propensos a la descarburación en estado austenítico por el alto contenido de silicio.
- Solo para trabajos en frío.
- Suele templarse parcialmente en aire cuando se trabajan a una temperatura superior a su diseño.

La Tabla 2.6 muestra la familia de aceros resistentes al choque mecánico en frío según AISI, así como la cantidad de sus principales aleantes.

Tabla 2.6 Aceros resistentes al choque (AISI grupo “S”).

Tipo	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% W	% V
S1	0.40-0.55	0.10-0.40	0.15-1.20	1.00-1.80	0.30 máx.	0.50 máx.	1.50-3.00	0.15-0.30
S2	0.40-0.55	0.30-0.50	0.90-1.20	-----	0.30 máx.	0.30-0.60	-----	0.50 máx.
S5	0.50-0.65	0.60-1.00	1.75-2.25	0.50 máx.	-----	0.20-1.35	-----	0.35 máx.
S6	0.40-0.50	1.20-1.50	2.00-2.50	1.20-1.50	-----	0.30-0.50	-----	0.20-0.40
S7	0.45-0.55	0.20-0.90	0.20-1.00	3.00-3.50	-----	1.30-1.80	-----	0.20-0.30

2.2.3 Aceros de alta velocidad

Su nombre se deriva por su principal aplicación en el mecanizado de aceros arrancando viruta a una velocidad superior a 30m/min, lo que se traduce en elevada temperatura de la herramienta durante la tarea. Por lo que la dureza requerida en la herramienta es de 63-68HRC en un ambiente de 600°C, lo que significa que el revenido debe de ser alto, además el contenido de carbono y sus elementos aleados son elevados por eso son considerados aceros ledeburíticos.

Suelen templarse la mayoría a 1200°C sin necesidad de un normalizado, en algunos casos se realiza un tratamiento térmico antes del temple que es el recocido. Puede templarse al aire, lo recomendable es en aceite o en sales. A veces se efectúa una nitruración posterior al temple y revenido con la finalidad de mejorar la capacidad de corte, después nuevamente se recomienda un revenido a 500°C aproximadamente para aumentar la tenacidad de la capa nitrada.

Por su baja conductividad térmica implica bajas velocidades de enfriamiento que traen consigo segregaciones químicas y/o agrietamientos que son aminorados con la limitación de los tamaños de lingote, por ejemplo, para los del grupo T 300mm², para los del grupo M 330mm² además es necesaria la forja de desbaste a muy altas temperaturas para disipar los carburos ledeburíticos y mejorar la tenacidad de estos aceros aunque no sea de vital importancia para este grupo esta propiedad.

Actualmente se está utilizando una técnica emergente llamada thixoforja (conformado semisólido), esta técnica mejora la colabilidad mejorando la solidificación, un tema de gran interés para estos aceros aleados, se obtiene una tenacidad admisible y un buen acabado superficial (piezas “near net shape”) que disminuye los altos costos del mecanizado. Presenta desventajas para algunos aceros, por ejemplo el M2, por el gran desgaste de los agitadores del barro metálico y otros problemas causados por los cambios de fases.

2.2.3.1 Grupo T (al tungsteno)

Algunos se templean a mayor temperatura (1300°C), es importante mencionar que para llegar a esta temperatura se debe de elevar la temperatura muy lentamente, por lo que necesita precalentamientos, en ocasiones hasta dos precalentamientos, tiene que estar en atmosferas controladas durante el tratamiento térmico.

El revenido se lleva a cabo a altas temperaturas para lograr una dureza estructural, en la gran mayoría se repite este tratamiento térmico con el objetivo de eliminar la austenita residual.

El mecanizado es muy complicado antes de los tratamientos térmicos, después de estos se vuelve aún más difícil, cuando es mecanizado herramientas de este grupo conviene siempre después de este procedimiento llevarlo a un recocido para controlar las tensiones, que se presentan más en piezas con geometría complicada o piezas con mecanizado profundo.

Existe una forma de hacer que estos aceros se puedan maquinar mejor, es agregándoles azufre, pero debe ser estrictamente controlado este elemento, una medida general que se debe tener es que sea la misma proporción de Azufre y Magnesio para formar SMn, además que al realizar tratamientos térmicos debe controlarse el procedimiento de lo contrario la herramienta o pieza quedaría inservible, es un riesgo muy grande que se corre al añadir este elemento al acero.

El recocido se hace con calentamiento lento hasta alcanzar una temperatura de 650°C aproximadamente manteniendo la pieza por unas 3 horas, después enfriar lentamente en horno a una temperatura de 250°C, al llegar a esta temperatura la herramienta ya puede enfriarse al aire.

Ventajas

- Más resistentes a la descarburación que los del grupo M.
- Más económicos que los del grupo M.

Desventajas

- Menor tenacidad.
- Baja maquinabilidad.

La siguiente Tabla 2.7 muestra la configuración química correspondiente a los aceros del grupo T.

Tabla 2.7 Aceros rápidos al Wolframio (AISI, grupo “T”).

Tipo	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% W	% V	%Co
T1	0.65-0.80	0.10-0.40	0.20-0.40	3.75-4.50	0.30 máx.	-----	17.25-18.75	0.90-1.30	-----
T2	0.80-0.90	0.20-0.40	0.20-0.40	3.75-4.50	0.30 máx.	1.00 máx.	17.50-19.00	1.80-2.40	-----
T4	0.70-0.80	0.10-0.40	0.20-0.40	3.75-4.50	0.30 máx.	0.40-1.00	17.50-19.00	0.80-1.20	4.25-5.75
T5	0.75-0.85	0.20-0.40	0.20-0.40	4.00-4.75	0.30 máx.	0.50-1.25	17.50-19.00	1.80-2.40	7.00-9.50
T6	0.75-0.85	0.20-0.40	0.20-0.40	4.00-4.75	0.30 máx.	0.40-1.00	18.50-21.00	1.50-2.10	11.00-13.00
T8	0.75-0.85	0.20-0.40	0.20-0.40	3.75-4.50	0.30 máx.	0.40-1.00	13.25-14.75	1.80-2.40	4.25-5.75
T15	1.50-1.60	0.15-0.40	0.15-0.40	3.75-5.00	0.30 máx.	1.00 máx.	11.75-13.00	4.50-5.25	4.75-5.25

2.2.3.2 Grupo M (al molibdeno)

Son aceros donde se sustituye total o parcialmente el Wolframio por el Molibdeno puesto que estos dos elementos proporcionan las mismas propiedades, el primero, por tener un peso atómico aproximadamente lo doble que el Molibdeno, se utiliza en gran cantidad que el segundo elemento, teniendo entonces dos aceros similares, por ejemplo: un acero rápido de W es equivalente en el servicio a un acero que contiene 6%W y 6%Mo.

Los aceros ultrarrápidos son aquellos aceros que contienen Cobalto que eleva la temperatura de fusión lo que permite una temperatura elevada de austenización que permite la presencia de martensita teniendo una matriz de mayor dureza. Estos aceros presentan mayor resistencia a la abrasión pero son menos tenaces que los aceros sin Cobalto, son propensos a la descarburación, después del temple contiene austenita residual por lo que se debe aplicar revenidos múltiples.

El M2 se utiliza para la construcción de herramientas para trabajo en frío.

Ventajas

- Mejor tenacidad que el grupo T.

Desventajas

- Un elevado costo respecto a los del grupo T.

A continuación se muestran dos Tabla 2.8 y Tabla2.9 que contienen los aceros para herramientas del grupo M y su composición química expresada en porcentaje.

Tabla 2.8 Aceros rápidos al Molibdeno (AISI, grupo “M”).

Tipo	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% W	% V	%Co
M1	0.78-0.8	0.15-0.40	0.20-0.50	3.50-4.00	0.30 máx.	8.20-9.20	1.40-2.10	1.00-1.35	----
M2	0.78-1.05	0.15-0.40	0.20-0.45	3.75-4.50	0.30 máx.	4.50-5.50	5.50-6.75	1.75-2.20	----
1M3	1.00	0.15-0.40	0.20-0.45	3.75-4.50	0.30 máx.	4.75-6.50	5.00-6.75	2.25-2.75	----
2M3	1.15-1.25	0.15-0.40	0.20-0.45	3.75-4.50	0.30 máx.	4.75-6.50	5.00-6.75	2.75-3.75	----
M4	1.25-1.40	0.15-0.40	0.20-0.45	3.75-4.50	0.30 máx.	4.25-5.50	5.25-6.50	3.75-4.50	----
M7	0.97-1.05	0.15-0.40	0.20-0.45	3.50-4.00	0.30 máx.	8.20-9.20	1.40-2.10	1.75-2.25	----
M10	0.84-1.05	0.10-0.40	0.20-0.45	3.75-4.50	0.30 máx.	7.75-8.50	-----	1.80-2.20	----
M30	0.75-0.85	0.15-0.40	0.20-0.45	3.50-4.52	0.30 máx.	7.75-9.00	1.30-2.30	1.00-1.40	4.50-5.50
M33	0.85-0.92	0.15-0.40	0.15-0.50	3.50-4.00	0.30 máx.	9.00-10.00	1.30-2.10	1.00-1.35	7.75-8.75
M34	0.85-0.92	0.15-0.40	0.20-0.45	3.50-4.00	0.30 máx.	7.75-9.20	1.40-2.10	1.90-2.30	7.75-8.75
M35	0.82-0.88	0.15-0.40	0.20-0.45	3.75-4.50	0.30 máx.	4.50-5.50	5.50-6.75	1.75-2.20	4.50-5.50
M36	0.80-0.90	0.15-0.40	0.20-0.45	3.75-4.50	0.30 máx.	4.50-5.50	5.50-6.50	1.75-2.25	7.75-8.75
M41	1.05-1.15	0.20-0.60	0.15-0.50	3.75-4.50	0.30 máx.	3.25-4.25	6.25-7.00	1.75-2.25	4.75-5.75
M42	1.05-1.15	0.15-0.40	0.15-0.65	3.50-4.25	0.30 máx.	9.00-10.00	1.15-1.85	0.95-1.35	7.75-8.75
M43	1.15-1.25	0.20-0.40	0.15-0.65	3.50-4.25	0.30 máx.	7.50-8.50	2.25-3.00	1.50-1.75	7.75-8.75
M44	1.10-1.20	0.20-0.40	0.30-0.55	4.00-4.75	0.30 máx.	6.00-7.00	5.00-5.75	1.85-2.20	1.10-11.25
M46	1.22-1.30	0.20-0.40	0.40-0.65	3.70-4.20	0.30 máx.	8.00-8.50	1.90-2.20	3.00-3.30	7.80-8.80
M47	1.05-1.15	0.15-0.40	0.20-0.45	3.50-4.00	0.30 máx.	9.25-10.00	1.30-1.80	1.15-1.35	4.75-5.25
M48	1.42-1.52	0.15-0.40	0.15-0.40	3.50-4.00	0.30 máx.	4.75-5.50	9.50-10.50	2.75-3.25	8.00-10.00
M62	1.25-1.35	0.15-0.40	0.15-0.40	3.50-4.00	0.30 máx.	11.00	5.75-6.50	1.80-2.10	----

Además de los aceros mencionados en la tabla anterior, existen otros aceros dentro de esta familia que no contiene Cobalto, son llamados en ocasiones aceros “intermedios” o “semi-rápidos”

Tabla 2.9 Aceros semi rápidos (AISI, grupo “M”).

Tipo	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% W	% V	%Co
M50	0.78-0.88	0.15-0.45	0.20-0.60	3.75-4.50	0.30 máx.	3.90-4.75	-----	0.80-1.25	----
M52	0.85-0.95	0.15-0.45	0.20-0.60	3.50-4.30	0.30 máx.	4.00-4.90	0.75-1.50	1.65-2.25	----

2.2.4 Aceros para trabajos en caliente

2.2.4.1 Grupo H (Base cromo, wolframio, molibdeno)

Son aceros con bajo contenido de carbono lo cual favorece la tenacidad.

El temple se lleva a temperaturas elevadas en unos 1000°-1200°C para aumentar el porcentaje de elementos disueltos en la austenita, además el temple es de tipo interrumpido en baño de sales, Por su grado de aleación media-alta su temple es al aire, para piezas de gran tamaño puede aumentar la severidad del refrigerante mediante flujos de aire forzado o enfriarlos en aceite con el fin de tener más penetración de temple en la pieza.

La alta dureza a temperaturas elevadas es conseguida mediante elementos carburígenos como el Cromo, además de que este elemento proporciona resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas, otros elementos como Mo,W,V elevan la temperatura a Ae consiguiendo la posibilidad de revenir la martensita a elevadas temperaturas sin iniciar la transformación alotrópica obteniendo como resultado un endurecimiento estructural que se conserva si la herramienta llegara a trabajar a esa temperatura de revenido alto.

Debido a su alta templabilidad no se les aplica normalizado pues sería como realizarle un temple.

Cuando es necesario aumentar la dureza superficial de estos aceros en ocasiones se lleva a cabo un tratamiento termoquímico de *nitruración*, que a veces aumenta el riesgo de agrietamiento por fatiga térmica, este tratamiento termoquímico es utilizado cuando se requiere que el acero sea destinado para matrices de extrusión en caliente y tenga una mayor durabilidad.

Son utilizados para matrices de forja, estampado, de extrusión en caliente, herramientas para cizallado en caliente, punzonado, fundición de metales por inyección, entre otras aplicaciones para trabajar por lo regular a temperaturas comprendidas entre 330° y 500°C. Por ejemplo, los aceros correspondientes a este grupo con 5% de Cr aproximadamente, se utilizan para moldeo de fundición inyectada (Al, Zn, aleaciones ligeras), para extruir Al o Mg, para estampas, matrices y cizallas en caliente, entre otras más.

Los aceros con %W>10% por ser los que contienen mayor dureza en el grupo, son utilizados para extrusión de latón y aleaciones de Ni, para moldes y bombas de inyección en fundición de metales ligeros y pesados, para punzones y matrices, en herramientas robustas, etc.

Es importante mencionar que antes que se ponga en servicio la herramienta es recomendable precalentar a una temperatura de 300°C. Ya estando en servicio la herramienta puede refrigerarse con agua sin riesgo de temple, pero si se debe tener cuidado de no ocasionar un choque térmico que pueda afectar a nuestra herramienta con grietas principalmente que igual en ocasiones son originadas por la dilatación y contracción de la herramienta, esto último puede prevenirse con un buen revenido para tener un alto nivel elástico.

La temperatura de revenido se realiza superando la temperatura de trabajo a la que están destinados estos aceros a una temperatura aproximada de 400° y 600°C con el objetivo de lograr una dureza de 40 a 55HRC en la temperatura de trabajo, este tratamiento térmico puede realizarse las veces que sea necesario.

Ventajas:

- Alta dureza
- Resistencia al desgaste y a la abrasión
- Resistencia a compresión
- Buena tenacidad
- Resistencia al choque térmico
- Resistencia a la fatiga térmica
- Resistencia a la deformación intergranular

Desventajas:

- Propenso a choques térmicos.

En la siguiente Tabla 2.10 se muestran los aceros para trabajo en caliente (grupo H) según AISI, además de su clasificación dentro del mismo grupo.

Tabla 2.10 Aceros de herramienta para trabajos en caliente (AISI, grupo “H”).

Tipo	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% W	% V
<i>Aceros de medio contenido de Cromo</i>								
H10	0.35-0.45	0.25-0.70	0.80-1.20	3.00-3.75	0.30 máx.	2.00-3.00	-----	2.50-0.75
H11	0.33-0.43	0.20-0.50	0.80-1.20	4.75-5.50	0.30 máx.	1.10-1.60	-----	0.30-0.60
H12	0.30-0.40	0.20-0.50	0.80-1.20	4.75-5.50	0.30 máx.	1.25-1.75	1.00-1.70	0.50 máx.
H13	0.32-0.45	0.20-0.50	0.80-1.20	4.75-5.50	0.30 máx.	1.10-1.75	-----	0.80-1.20
H14	0.35-0.45	0.20-0.50	0.80-1.20	4.75-5.50	0.30 máx.	-----	4.00-5.25	-----
H19	0.35-0.45	0.20-0.50	0.20-0.50	4.00-4.75	0.30 máx.	0.30-0.55	3.75-4.50	1.75-2.20, 4.0-4.5 Co
<i>Aceros de alto contenido de Wolframio</i>								
H21	0.26-0.36	0.15-0.40	0.15-0.50	3.00-3.75	0.30 máx.	-----	8.50-10.00	0.30-0.60
H22	0.30-0.40	0.15-0.40	0.15-0.40	1.75-3.75	0.30 máx.	-----	10.00-11.75	0.25-0.50
H23	0.25-0.35	0.15-0.40	0.15-0.50	1.00-12.75	0.30 máx.	-----	11.00-12.75	0.75-1.25
H24	0.42-0.53	0.15-0.40	0.15-0.40	2.50-3.50	0.30 máx.	-----	14.00-16.00	0.40-0.60
H25	0.22-0.32	0.15-0.40	0.15-0.40	3.75-4.50	0.30 máx.	-----	14.00-16.00	0.40-0.60
H26	0.45-0.55	0.15-0.40	0.15-0.40	3.75-4.50	0.30 máx.	-----	17.25-19.00	0.75-1.25
<i>Aceros Cromo-Molibdeno-Wolframio</i>								
H42	0.55-0.70	0.15-0.40	0.15-0.40	3.75-4.50	0.30 máx.	4.50-5.50	5.50-6.75	1.75-2.20

2.2.5 Aceros para moldes para plásticos

2.2.5.1 Grupo P (baja aleación, bajo contenido de carbono)

La manufactura de estas herramientas es mediante el proceso hincado (“hubbing”) que consiste en introducir un punzón de metal duro de la misma forma y tamaño de la cavidad, por lo que se requiere un acero de baja dureza (acero dulce), para ser conformado en frío en estado recocido.

Después de configurar la herramienta se cementa, luego se temple y se reviene hasta alcanzar una dureza aproximadamente de 58 HRC.

Estos aceros son utilizados para matrices y moldes de conformar polímeros orgánicos, por moldeo, inyección o extrusión a temperaturas de trabajo inferiores a 300°C, en la Tabla 2.11 se enlistan algunos aceros de este tipo.

Tabla 2.11 Aceros para conformado de plásticos (AISI, grupo “P”).

Tipo	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% W
P2	0.10 máx.	0.10-0.40	0.10-0.40	0.75-1.25	0.10-0.50	0.15-0.40	-----
P3	0.10 máx.	0.20-0.60	0.40 máx.	0.40-0.75	1.00-1.50	-----	-----
P4	0.12 máx.	0.20-0.60	0.10-0.40	4.00-5.25	-----	0.40-1.00	-----
P5	0.10 máx.	0.20-0.60	0.40 máx.	2.00-2.50	0.35 máx.	-----	-----
P6	0.05-0.15	0.35-0.70	0.10-0.40	1.25-1.75	3.25-3.75	-----	-----
P20	0.28-0.40	0.60-1.00	0.20-0.80	1.40-2.00	-----	0.30-0.55	-----
P21	0.18-0.22	0.20-0.40	0.20-0.40	0.50 máx.	3.90-4.25	-----	0.15-0.25V 1.05-1.25Al

2.2.6 Aceros para aplicaciones especiales

2.2.6.1 Grupo L (baja aleación, medio-alto contenido de carbono)

La dureza alcanzada por este grupo, seguido del temple y revenido a una temperatura alrededor de 425°C, es de 47 HRC, con un límite elástico de 1400MPa.

Por su baja templabilidad se recomienda el temple en agua en especial para piezas con mayor tamaño, con piezas menores de media pulgada puede hacerse el temple en aceite.

Su utilización es principalmente en partes para maquinas herramientas como pueden ser mandriles, levas, platos, pinzas, entre otras que requieren de una buena tenacidad y resistencia.

Tabla 2.12 Aceros de baja aleación para usos especiales (AISI, grupo “L”).

Tipo	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% V
L2	0.45-1.00	0.10-0.90	0.50 máx.	0.70-1.20	-----	0.25 máx.	0.10-0.30
L6	0.65-0.75	0.25-0.80	0.50 máx.	0.60-1.20	1.25-2.00	0.50 máx.	0.20-0.30*

2.2.5.2 Grupo F (Carbono-molibdeno)

Este tipo de acero para herramientas tiene una amplia configuración química, Tabla 2.13, por tratarse de un acero para aplicaciones especiales, en la mayoría de estos tipos de aceros son fabricados donde se requiere mantener un borde agudo bajo condiciones abrasivas.

Tabla 2.13 Aceros de baja aleación para usos especiales (AISI, grupo “F”).

Tipo	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% W
F1	0.95-1.25	0.50 máx.	0.10-0.50				1.00-1.75
F2	1.20-1.40	0.10-0.50	0.10-0.50	0.20-0.40			3.00-4.50
F3	1.25-1.40	0.10-0.40	0.10-0.40	0.50-1.00			3.50-4.00

2.3 Propiedades intrínsecas de aceros para herramientas

Las propiedades mecánicas que deben cumplir los aceros para la fabricación de herramientas son diversas y depende de la aplicación a la que está destinada la herramienta, a continuación se presentan algunas propiedades de forma general que cumple el acero para la fabricación de herramientas [7,8].

Para aceros de alta velocidad (HSS):

- Dureza y resistencia a elevadas temperaturas de operación.
- Resistencia a la abrasión.
- Distorsión mínima durante tratamientos térmicos.

Para aceros para trabajo en caliente:

- Alta tenacidad arriba de 250°C
- Alta resistencia al desgaste en caliente.
- Resistencia al agrietamiento.

Para aceros para trabajo en frío:

- Resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo.
- Resistencia al agrietamiento.
- Alta resistencia por debajo de los 250°C.

Para aceros resistentes al impacto:

- Gran tenacidad al impacto.

CAPÍTULO 3

ACEROS PARA HERRAMIENTA SINTERIZADOS, PROPIEDADES MECÁNICAS Y APLICACIONES

3.1 Aceros para herramienta sinterizados

La meta por alcanzar mejoras e innovaciones en aceros para herramientas no se ha frenado, grandes avances en este campo se han realizado por la introducción de la pulvimetalurgia para la fabricación de herramientas, gracias a esto se han obtenido grandes propiedades mecánicas que superan a las herramientas fabricadas con métodos convencionales como la forja y/o colada, en consecuencia del uso de los polvos metálicos también se ha podido desarrollar aleaciones “superduras” que, incluso, pueden rayar el diamante, algunas de estas aleaciones no se han podido lograr con métodos tradicionales lo cual marca un punto a favor para la pulvimetalurgia.

Las piezas de acero producidas por pulvimetalurgia generalmente son empleados para herramientas de alta velocidad (aceros rápidos), aunque no excluye la aplicación en otro tipo de herramientas por ejemplo de conformación en frío que exigen muy buenas propiedades mecánicas.

Como se mencionó en el capítulo uno, en ocasiones los fabricantes de productos sinterizados no son los mismos que fabrican el polvo metálico para este fin, generalmente son diferentes industrias metálicas que llevan este complicado proceso hasta el producto final, por lo que el costo del producto se eleva notablemente y es relativamente caro en comparación con otros productos similares que cumplen la misma función. Por eso es importante realizar un estudio de costo beneficio para la buena elección de una herramienta a adquirir.

Es importante mencionar que las herramientas obtenidas mediante este proceso de pulvimetalurgia es un tema relativamente nuevo, pero con una inversión elevada en la investigación por desarrollar más variedad de productos con excelentes propiedades. Por tal motivo las industrias dedicadas a la fabricación de herramientas, mediante polvos metálicos, desarrollan nuevos productos únicos de cada fabricante, en consecuencia desarrollan su propia nomenclatura para estos aceros en el mercado.

En algunos casos las industrias dedicadas a la fabricación de productos sinterizados fabrican herramientas con composición química similares a las herramientas existentes fabricadas por otro método habitual con el objetivo de mejorar las propiedades ya existentes en estas últimas, esto permite realizar una equivalencia con un producto ya estandarizado mediante normas reconocidas mundialmente, lo que implica que el usuario final se formule una idea para su adecuada utilización y posibles tratamientos térmicos aplicables a este tipo de acero sin necesidad de una investigación excesiva.

Por otro lado el acero de fabricación propia de cada industria, que no tiene similitud a otro acero estandarizado, requiere de mayor estudio para su adecuada utilización, mecanizado, tratamientos térmicos aplicables, etc., este estudio debe realizarse directamente en las fichas técnicas del fabricante, al igual que otros aceros tienen diferentes aplicaciones pero en su mayoría estos aceros son diseñados para aplicaciones específicas.

En la Tabla 3.1 se muestran siete tipos de aceros diferentes fabricados por el Grupo Nachi-Fujikoshi Corp. (empresa fundada en Japón en 1928 con presencia en México desde 1982) uno de los fabricantes más grandes de herramientas de corte a nivel mundial, en esta tabla podemos observar la similitud de sus productos con otros aceros más reconocidos, así como su composición química y algunas propiedades mecánicas de mayor interés.

Tabla 3.1 Acero grado Alta velocidad, composición química [14].

Tipo de aleación		Designación				Composición química (%)					
Tipo de acero	Tipo V	Grado NACHI	Norma relacionada			C	W	Mo	Cr	V	Co
			AISI	DIN WINr	JIS						
Mo W		FAX18	M42	1.3247	SKH59	1.10	1.5	9.5	4.0	1.0	8.0
		FAX31	M3-2	1.3344	SKH53	1.30	6.0	5.0	4.0	3.0	
Mo W Co	Alto V	FAX38				1.30	6.0	5.0	4.0	3.0	8.0
		FAX55	T15		SKH10	1.55	13.0		4.0	5.0	5.0
		FAX40	(T42)		SKH57	1.30	10.0	3.5	4.0	3.0	10.0
		FAXG1									
		FAXG2									

Además de Grupo Nachi- Fujikoshi Corp. existe otra empresa que figura entre los líderes mundiales del mercado para la fabricación de aceros rápidos y aceros para herramienta, actualmente es una de las empresas más importantes para el desarrollo y la producción de aceros especiales, estamos hablando de la empresa BÖHLER que remota sus orígenes en el año 1446 y se construye como empresa en el año 1870 en Viena Austria.

Esta empresa caracteriza sus aceros como:

- *Primera generación:* son principalmente ejes laminados que se introducen en el horno y se producen los procesos de limpiado del acero dejando algunos contaminantes, esto último debido a la baja calidad alcanzada mediante el proceso, el acero al tener contaminantes baja notablemente su calidad.

- *Segunda generación:* son los mismos aceros de primera generación pero ahora se llevan a una segunda etapa antes de comercializarse, esta segunda etapa consiste en meterlos en un nuevo horno donde se les hace una limpieza que puede ser al vacío o con electro escoria, de esta forma se obtiene un acero más limpio que el de primera generación por lo que sus propiedades son mejoradas al tener menos contaminantes.

- *Tercera generación:* es acero de segunda generación con la particularidad que el acero sale en forma líquida y se atomiza con gas carbónico de tal forma que el acero líquido se vuelve polvo que es comprimido posteriormente a altas presiones y es sinterizado a 1200°C aproximadamente. Por lo tanto su precio de este acero es más elevado por los diversos procesos que lleva, pero el precio es compensado por las mejoras en las propiedades mecánicas.

A este tipo de acero BÖHLER los denomina MICROCLEAN, mediante este proceso de pulvimetalurgia de tercera generación se lograron producir polvos de tamaño de grano medio de 60 μm , lo cual garantiza una máxima homogeneidad que influye definitivamente en la calidad del acero.

En la Tabla 3.2 se muestran los aceros pulvimetalurgicos comercializados por BÖHLER, su composición química en porcentaje y el estándar aproximado o equivalente.

Tabla 3.2 Aceros MICROCLEAN comercializados por BÖHLER- UDDEHOLM [16]

GRADO BÖHLER	Composición química (%)						ESTANDAR	
	C	Cr	Mo	V	W	Co	DIN	AISI
Aceros de alta velocidad								
BÖHLER S290 MICROCLEAN	2.00	3.75	2.55	5.00	14.30	11.00	---	---
BÖHLER S390 MICROCLEAN	1.60	4.80	2.00	5.00	10.00	8.00	---	---
BÖHLER S590 MICROCLEAN	1.30	4.20	5.00	3.00	6.30	8.40	---	---
BÖHLER S690 MICROCLEAN	1.25	4.30	4.90	4.10	5.90	---	---	M4
BÖHLER S790 MICROCLEAN	1.30	4.20	5.00	3.00	6.30	---	1.3344 S6-5-3	M3 CLASE 2
Acero de herramienta para trabajo en frío								
BÖHLER K190 MICROCLEAN	2.30	12.50	1.10	4.00	---	---	1.2380 X220	D7
BÖHLER K390 MICROCLEAN	2.45	4.20	3.80	9.00	1.00	2.00	---	---
BÖHLER K490 MICROCLEAN	1.40	6.40	1.50	3.70	3.50	+Nb	---	---
BÖHLER K890 MICROCLEAN	0.85	4.35	2.80	2.10	2.55	4.50	---	---
Acero para moldes de plástico								
BÖHLER M390 MICROCLEAN	1.90	20.00	1.00	4.00	0.60	---	---	---

3.2 Propiedades de los aceros para herramientas sinterizados

En ingeniería, las propiedades mecánicas de los materiales son las características esenciales, que permiten diferenciar un material de otro, así como su aplicación, alguna de estas propiedades pueden ser modificadas muy fácilmente en los aceros desde su fabricación hasta el producto final mediante tratamientos térmicos principalmente.

Las propiedades mecánicas que deben cumplir los aceros para la fabricación de herramientas son diversas y depende de la aplicación a la que está destinada la herramienta, a continuación se presentan algunas propiedades de forma general que cumple el acero para la fabricación de herramientas.

Para aceros de alta velocidad (HSS):

- Resistencia a la compresión
- Resistencia al desgaste
- Dureza y resistencia a elevadas temperaturas de operación
- Buena maquinabilidad
- Resistencia a la abrasión
- Distorsión mínima durante tratamientos térmicos

Para aceros para trabajo en caliente:

- Alta tenacidad arriba de 250°C
- Alta resistencia al desgaste en caliente
- Resistencia al agrietamiento

Para aceros para trabajo en frío:

- Alta tenacidad
- Buena resistencia a la compresión
- Resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo
- Resistencia a la fatiga
- Estabilidad térmica
- Buena ductilidad
- Resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo
- Resistencia al agrietamiento
- Alta resistencia por debajo de los 250°C

Para aceros para procesado de plásticos:

- Resistencia a la corrosión
- Resistencia al desgaste
- Pulido de alto brillo
- Elevada tenacidad
- Resistencia contra movimiento oscilantes y golpes mecánicos

A continuación se describe un panorama general de algunas propiedades y aplicaciones de aceros para herramienta obtenidos mediante pulvimetalurgia, haciendo comparación con los aceros para herramientas convencionales, véase que en algunos casos los aceros a mencionar cumplen con una semejanza con otros aceros ya estandarizados.

- **Tamaño de grano Snyder-Graff pequeño y uniforme**

Para lograr mejoras en las propiedades mecánicas de los aceros es importante tener un tamaño de partícula adecuado y uniforme, con los productos obtenidos mediante polvos metálicos se logra el objetivo como se muestra en la Figura 3.1.

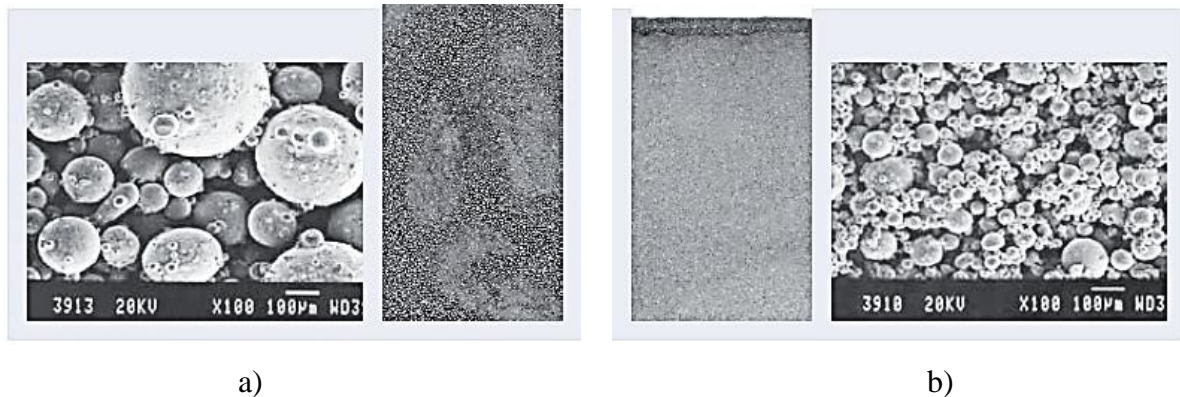


Figura 3.1 Comparación de tamaño de partícula de un acero de 1^a y 2^a generación (a) vs un acero pulvimetalurgico de 3^a generación (b) [25].

- **Microestructura más uniforme**

Los aceros P/M tienen una estructura uniforme de carburos por lo que se pueden obtener excelentes propiedades gracias a esta estructura, en la Figura 3.2 se puede observar la uniformidad de distribución de carburos más elevada que un acero convencional.

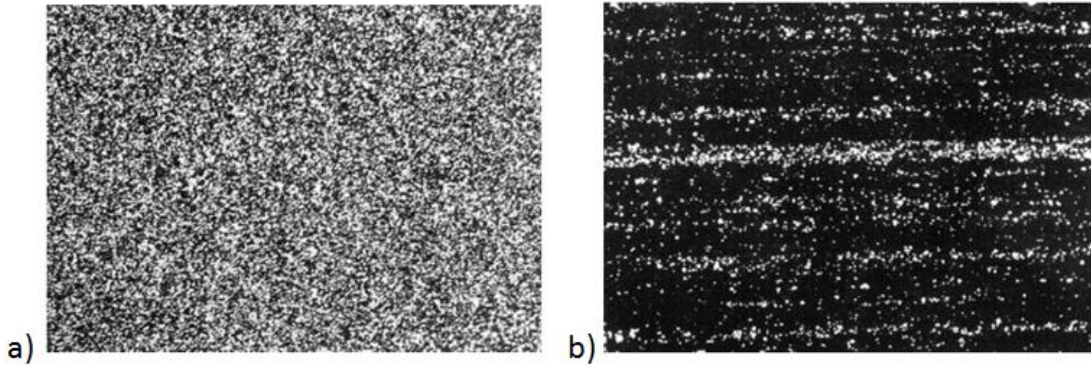


Figura 3.2 Comparación de la distribución de carburos (escala 100=1), a) acero BÖHLER S690 de alta velocidad, b) acero de alta velocidad convencional ~AISI-M4 [20].

- **Menor deformación después de un tratamiento térmico**

La deformación dimensional después del tratamiento térmico es común en todos los aceros, en algunos aceros esta deformación es significativa, por el contrario en la gran mayoría de los aceros pulvimetalurgicos esta deformación es estable, como se muestra en la Figura 3.3, esto se debe a la tensión mínima del tratamiento térmico.

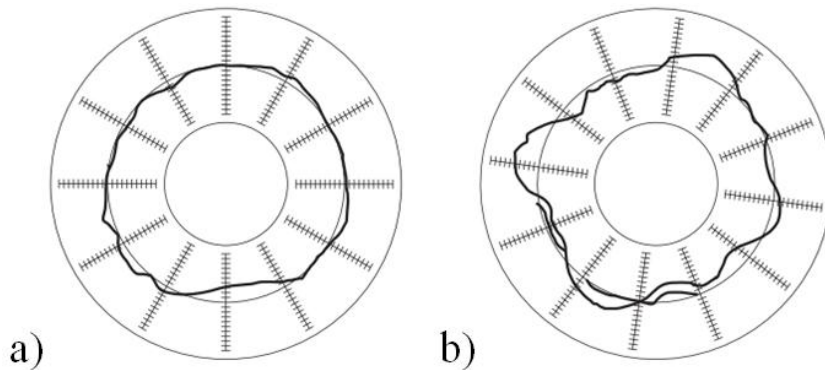


Figura 3.3 a) P/M acero de alta velocidad, b) acero regular convencional de alta velocidad [14].

- **Excelente rectificabilidad**

Con contenidos de Vanadio altos se puede obtener buena rectificabilidad que con otros procesos de fabricación no es posible obtener, Figura 3.4.

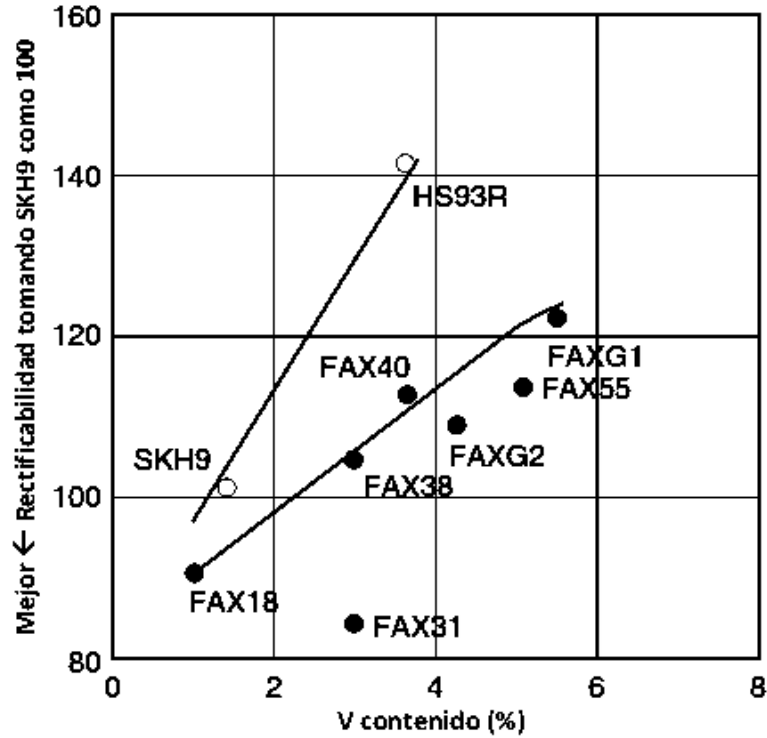


Figura 3.4 Comparación de aceros convencionales y pulvimetalúrgicos respecto a rectificabilidad vs contenido de Vanadio [14].

- **Menor costo de acabado**

Al ser un producto obtenido por metalurgia de polvos, la pieza total o parcialmente terminada no se requiere de operaciones de acabado excesivas, esto aminora el costo además de una producción en serie como se puede apreciar en la Figura 3.5.

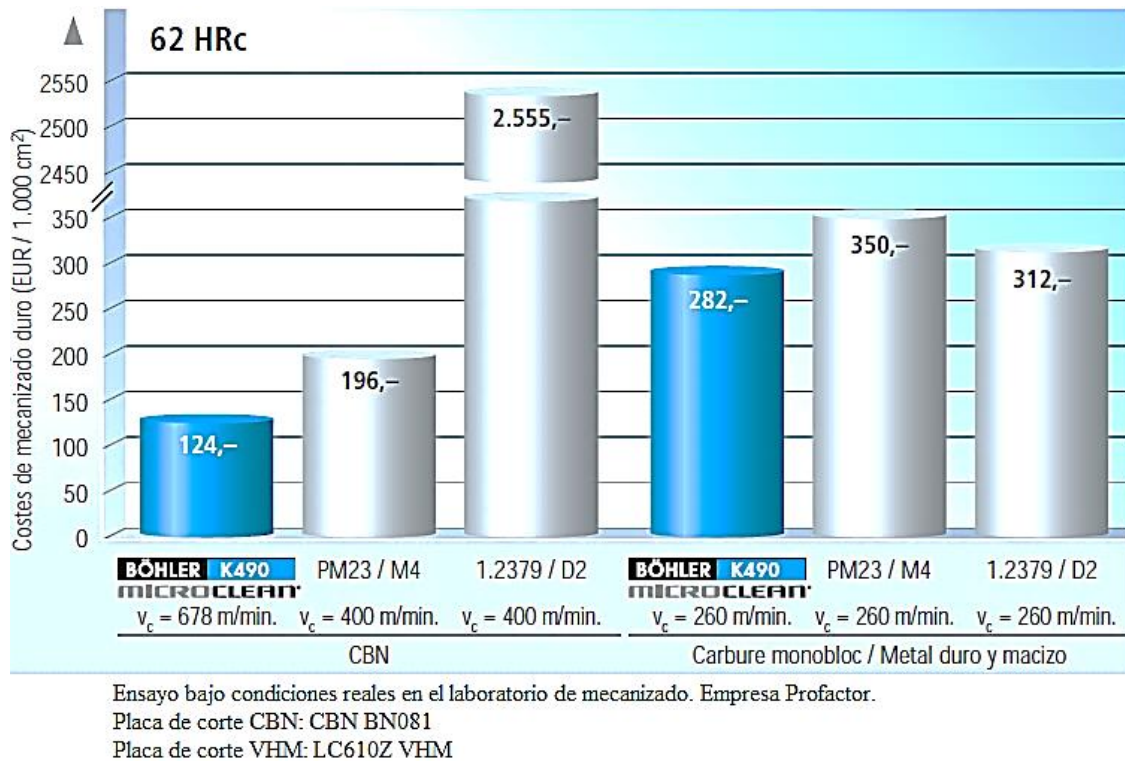


Figura 3.5 Comparación de costos M4 y D2 vs BÖHLER MICROCLEAN K490 [23].

- **Tenacidad y resistencia al desgaste**

Como es conocido, al elevar la dureza, disminuye la tenacidad en un acero, piezas producidas mediante polvos metalicos se puede obtener una tenacidad al mismo tiempo que una mayor resistencia al desgaste en comparacion con los procesos convencionales Figura 3.6.

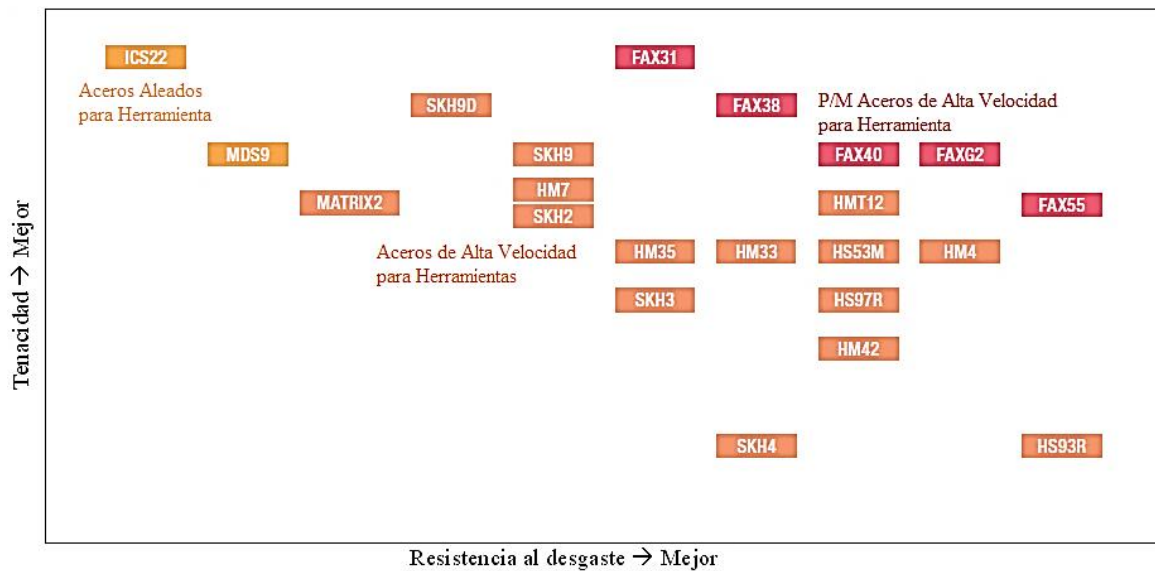


Figura 3.6 Resistencia al desgaste vs tenacidad [15].

- **Mayor coeficiente de tenacidad**

Se puede tener una mayor tenacidad con altos niveles de dureza.

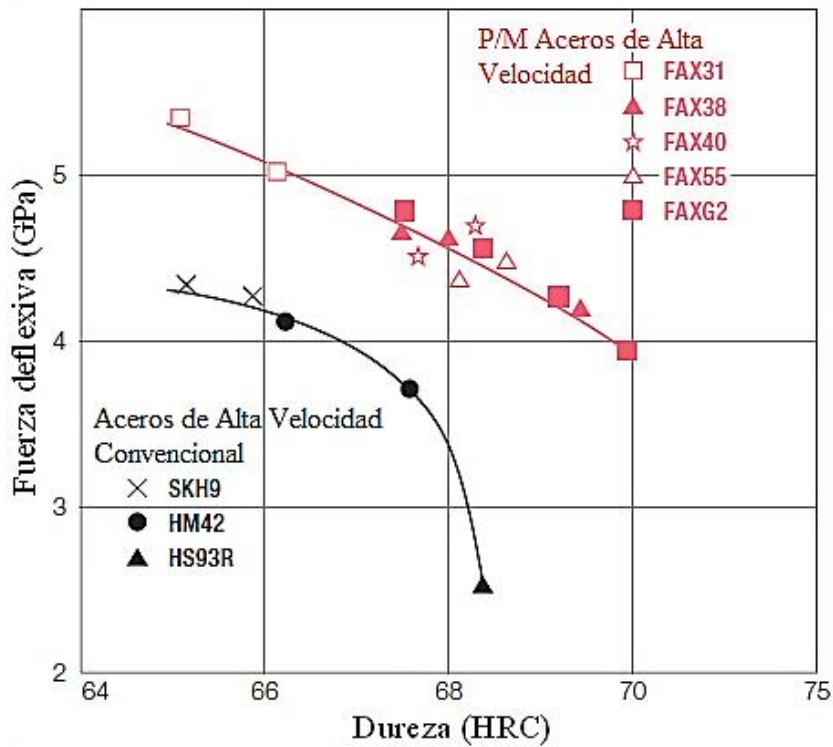
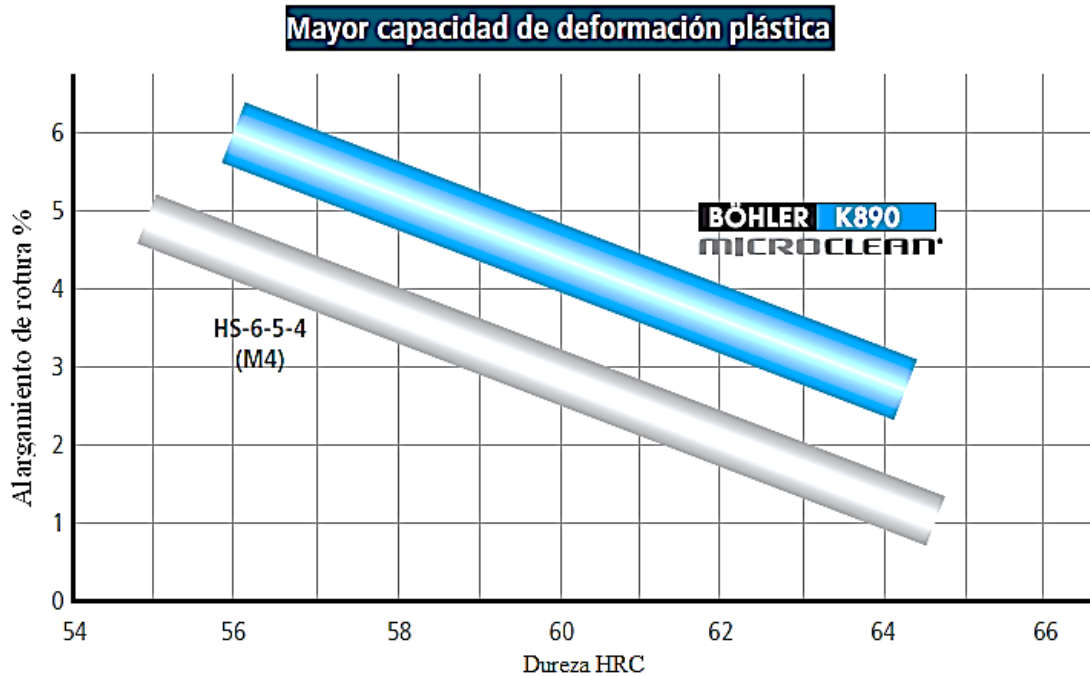


Figura 3.7 Dureza (HRC) vs Fuerza deflexiva [15].

- **Mayor resistencia a la tracción.**

La prueba más importante para caracterizar ductilidad y resistencia es la prueba de tracción uniaxial, como ninguna de las probetas normalizadas es apta para la caracterización de aceros para herramientas de alta dureza, BÖHLER y Material Center Leoben Forschung GmbH desarrollaron una probeta adecuada para tal prueba obteniendo los siguientes resultados que se muestran en la siguiente Figura 3.8.



Valores obtenidos de pruebas de tracción uniaxiales con probetas desarrolladas específicamente para aceros de herramientas de alta resistencia en Materials Center Leoben Forschung GmbH.

Figura 3.8 Capacidad de deformación plástica acero HS-6-5-4 (M4) y BÖHLER K890 MICROCLEAR [24].

- **Buena resistencia al impacto**

En los aceros para trabajo en frío se requiere de una buena resistencia al impacto, por lo que los aceros para trabajo en frío producidos mediante polvos cumplen perfectamente con esta propiedad mecánica, a continuación se muestran dos graficas Figura 3.9 y Figura 3.10 que comparan esta propiedad mecánica con otros aceros.

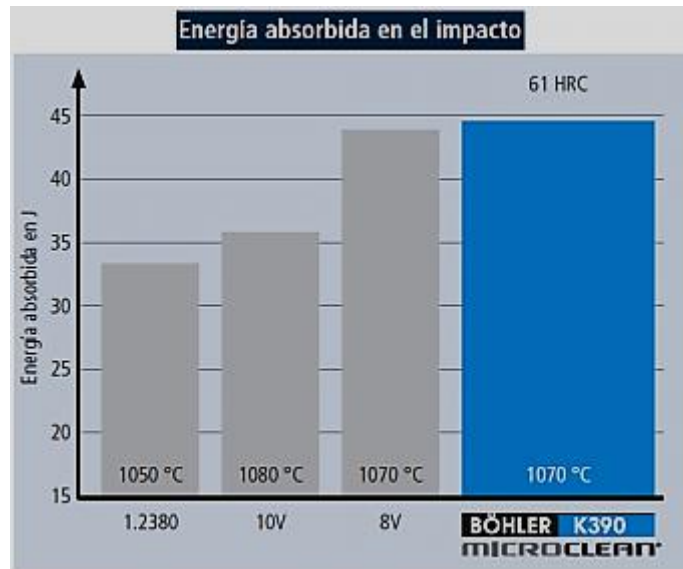


Figura 3.9 BÖHLER K390 destacando su excepcional tenacidad bajo cualquier condición de uso [22].

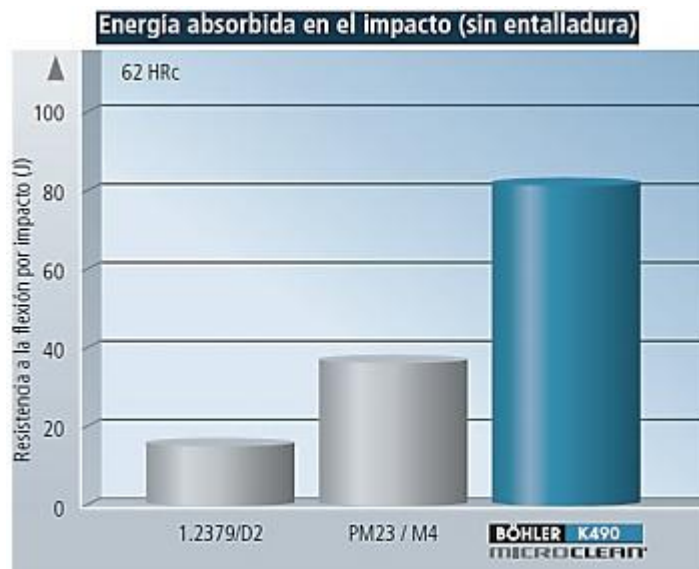


Figura 3.10 Probetas de acero en barra laminado en dirección longitudinal, tratadas térmicamente con enfriamiento a velocidad controlada: $\lambda \leq 0,5$. Dimensiones de barra: cerca de 35 mm, Tamaño de probeta: 10 x 7 x 55 mm, Parámetros de tratamiento térmico para: BÖHLER K490 MICROCLEAN: 1080 °C, 3 x 2 h, 560 °C, PM23: 1100 °C, 3 x 2 h, 570 °C 1.2379/D2: 1070 °C, 3 x 2 h, 520 °C [23].

- **Óptima resistencia a la compresión**

En una herramienta que trabaja en condiciones elevadas de temperatura y desgaste, esta propensa a sufrir compresión, esto se debe a diferentes factores principalmente atómicos, al tener una buena distribución de partículas en la pieza, esta eleva su resistencia a la compresión en el trabajo, Figura 3.11.

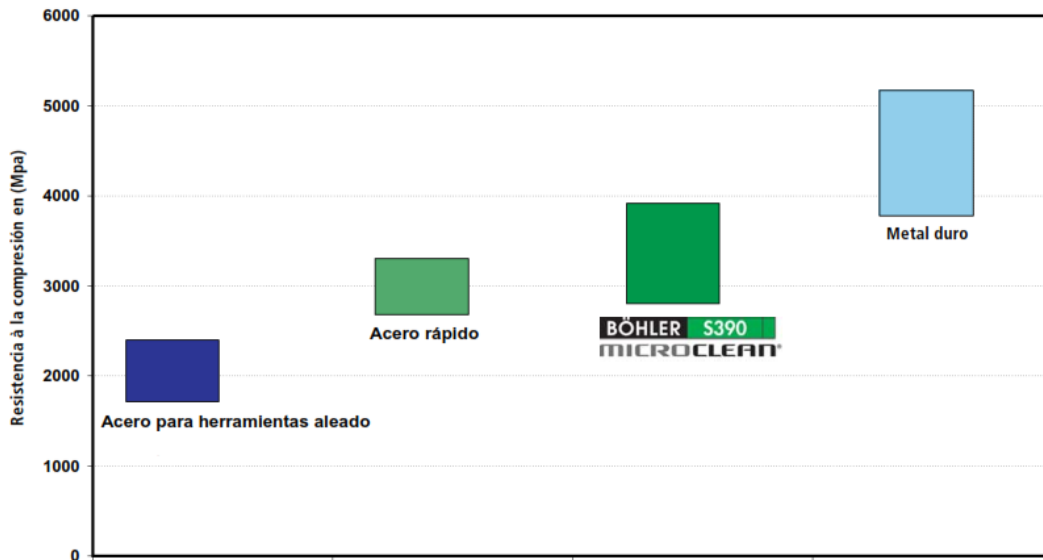


Figura 3.11 Resistencia a la compresión, acero BÖHLER S390 [18].

3.3 Aplicaciones de los aceros para herramienta sinterizados

3.3.1 Para aceros de alta velocidad (HSS)

Herramientas de arranque de viruta de alto rendimiento, como puede ser aleaciones de titanio y níquel.

- Fresas cilíndricas de una o varias piezas
- Fresas de disco, fresas perfiladoras, fresas helicoidales
- Herramientas de brochar de todo tipo
- Machos para roscar máquinas
- Brocas espirales
- Peines de roscar
- Escariadores

- Cintas de sierra bimetálica
- Brocas para taladro

Herramientas para esfuerzos compresivos extremos

- Punzón cortador, punzón de conformado
- Troqueles

3.3.2 Para aceros para trabajo en frío

Aplicaciones en troquelado

- Herramientas de corte (matrices, punzones) para el troquelado normal y de precisión
- Rodillos de corte

Aplicaciones en conformación en frío

- Herramientas de extrusión (conformación en frío y semicaliente)
- Herramientas de embutición normal y profunda
- Herramientas de estampado
- Herramientas de laminación de roscas
- Cilindros de laminación en frío para soportes de rodillos múltiples
- Mandriles de laminación en frío con paso peregrino
- Herramientas para prensado en la industria cerámica y farmacéutica
- Herramientas de prensar para piezas sinterizadas

Cuchillas

- Industria del papel y embalaje
- Cuchillas circulares para cortadoras de tiras
- Cuchillas circulares para cortadoras de tiras
- Cuchillas para el corte de chapa fina

En la transformación de plásticos

- Cilindros de extrusión y transportadores sin fin
- Insertos de moldes
- Toberas de inyección
- Válvulas antiretorno

3.3.3 Otras aplicaciones

- Sierras para metales de bricolaje
- Pasadores para impresoras de matriz de puntos
- Partes de máquinas como eyectores
- Cuchillas alisadoras motorizadas
- Paletas de compresores rotativos de aire acondicionado
- Broches de superficies para cuchillas de disco de la turbina de motores a reacción
- Paletas para bomba hidráulica de paletas

Como ya se conoce, un acero puede ser utilizado para diversas aplicaciones, en seguida se muestra una Tabla 3.3 donde revelan una perspectiva particular de las aplicaciones de cada tipo de acero desarrollado mediante polvos metálicos por el Grupo Nachi- Fujikoshi Corp.

Tabla 3.3 Aplicaciones de los aceros pulvimetalurgicos de Grupo Nachi- Fujikoshi Corp.
(Donde, ○ bueno, ● excelente) [14].

Grados NACHI	Herramientas de corte								Sierras para madera	Cuchillas industriales	Moldes/placas	Punzones	Rodillos para laminado	Elementos de máquinas resistentes al desgaste	Aletas	Mandriles	Pasadores	Herramientas para formado	Rodamientos para altas temperaturas
	Cortadores pequeños	Brocas	Rimas o escariadores	Fresas de vástago	Fresas simples	Cortadores de engranes	Brochas	Sierra cinta											
FAX18	○			○	○		○	●		○		○	○			○			
FAX31											●	●	○			○			
FAX38		●	○		○	●		○	●		○	○	○				○		
FAX55	○			○	○	●		●	○			○		○					
FAX40		●		○	○	○	○	○				○		○		○	○		
FAXG1	●			●			●					○		○					
FAXG2							●	●				○							

CAPÍTULO 4

TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS

La propiedad más importante y que diferencia el acero de otros metales es el poder modificar notablemente sus propiedades mecánicas mediante tratamientos térmicos, estos tratamientos térmicos consisten en elevar la temperatura del material y posteriormente enfriar bajo condiciones controladas tanto de temperatura como de tiempo, haciendo una mejora en sus propiedades mecánicas sin cambiar su composición química.

Los propósitos principales por lo cual se hace un tratamiento térmico al acero u otro material son:

- *Endurecer la pieza total o superficialmente*, aumentando así su resistencia al desgaste.
- *Aumentar la tenacidad*, con el propósito que se deforme la pieza antes de llegar a la rotura.
- *Eliminar tensiones*, sin modificar la estructura o propiedades mecánicas, después que la pieza ha sufrido tensiones por procesos de manufactura e incluso por un tratamiento térmico como el temple.
- *Ablandar el material*, con el objeto de poder maquinar aceros relativamente duros.
- *Homogenizar*, para corregir defectos de micro segregación.
- *Adicionar o remover elementos químicos*, esto bajo una atmosfera controlada.

4.1 Constituyentes microscópicos de los aceros

La metalografía, que es la encargada de estudiar la estructura de los metales, es muy útil en la actualidad para conocer la estructura de un metal y en base a esto poder definir algunas propiedades presentes en el material.

En los aceros existen diferentes constituyentes que varían dependiendo de los tratamientos térmicos que se tienen en el acero, por ejemplo, los constituyentes principales de los aceros recocidos son la ferrita, cementita y perlita, mientras que en los aceros templados los constituyentes típicos son la austenita, martensita, troostita y sorbita. A continuación narraremos una descripción general de estos constituyentes presentes en los aceros.

4.1.1 Diagrama Hierro – Carbono (Fe-C)

Para el estudio de las estructuras de los aceros se necesita conocer y manipular bien el diagrama hierro – carbono, mostrado en la Figura 4.1. Esta figura representa en realidad dos diagramas, el metaestable hierro-carbono y el diagrama estable hierro-grafito. La cementita no es una fase estable, aunque dada la lentitud de su transformación, el diagrama metaestable es el que tiene un mayor interés práctico para el estudio de los aceros. El diagrama estable hierro-grafito solo tiene interés en el estudio de las fundiciones al silicio.

Existen dos tipos de aleaciones técnicas de gran importancia: los aceros y las fundiciones. Ambas son aleaciones de hierro y carbono de distinta composición. Los aceros al carbono se presentan con un contenido de hasta 2,14%C y las fundiciones desde este valor hasta 6,67%C, aunque en la práctica hasta 5%, ya que con mayor concentración de carbono se obtienen productos tan duros que no se pueden mecanizar.

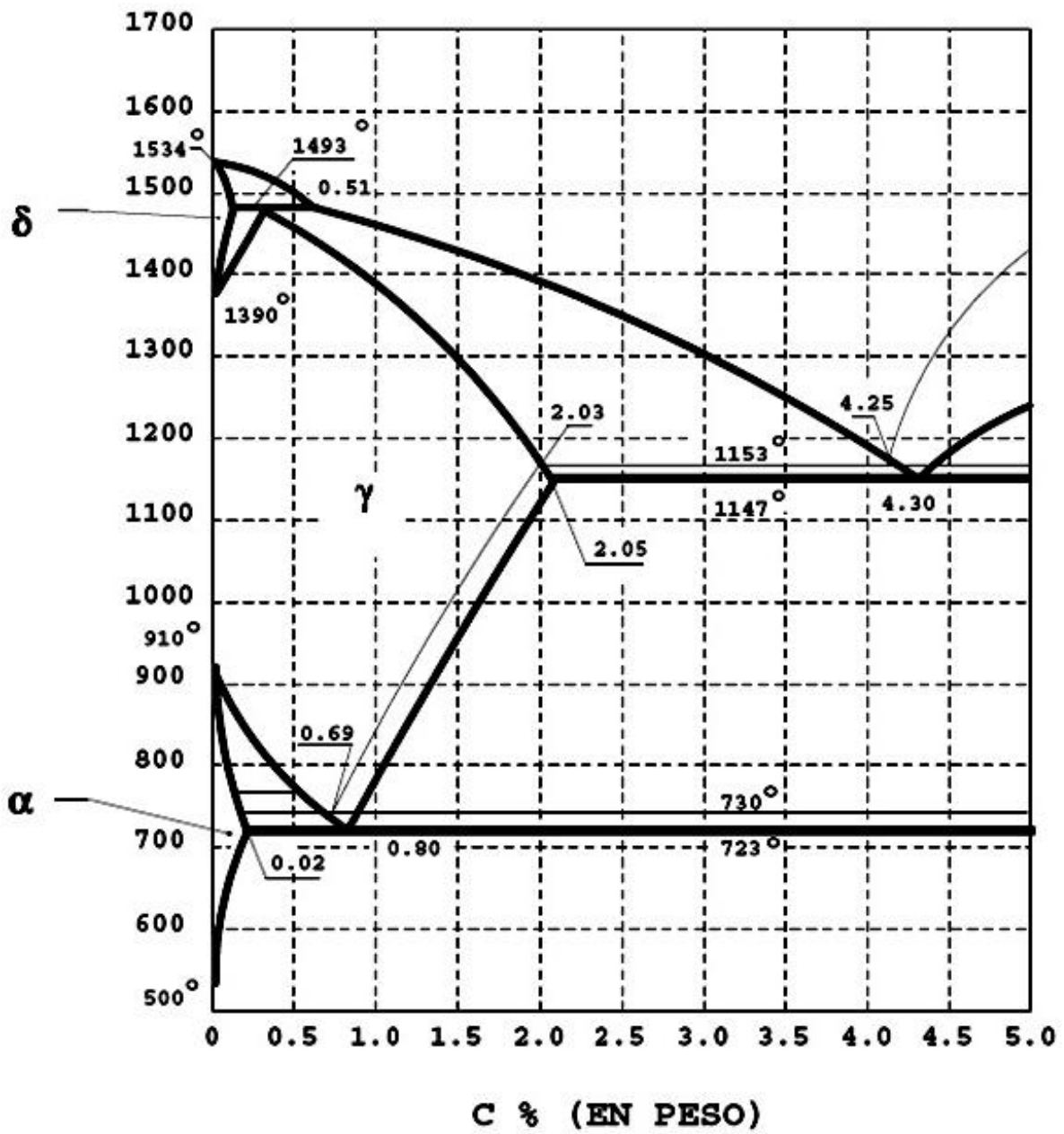


Figura 4.1 Diagrama hierro carbono [31].

4.1.2 Ferrita

La ferrita es hierro alfa, es decir, hierro casi puro, de estructura cubica de cuerpo centrado, es el constituyente más blando del acero, se puede presentar de las siguientes formas:

1. Como elemento proeutectoide que acompaña a la perlita (ferrita libre).
 - En forma de cristales.
 - Formando una red o malla limitando los granos de perlita en el acero.
 - En forma de agujas o bandas aciculares, esta estructura es muy peculiar en los aceros en bruto de colada, proporciona fragilidad y por consiguiente esta estructura es indeseable. Este tipo de cristalización es conocida también con el nombre de Widmanstätten.
2. Como elemento eutectoide dentro de la perlita, con forma de láminas paralelas separadas por láminas de cementita.
3. En la estructura globular, surge constituyendo la matriz que rodea a la cementita.
4. En aceros hipoeutectoides templados, apareciendo en algunos casos mezclada con la martensita generando zonas blancas irregulares o agujas finas.

4.1.3 Cementita

La cementita es carburo de hierro (CFe_3), es uno de los componentes más duro y por consiguiente frágil de los aceros al carbono, contiene un 6.67% de carbono y 93.33% de hierro, es magnética a temperatura ambiente hasta los 218°C.

Para su observación microscópica es necesaria una solución especial para poder colorearla como puede ser el picrato sódico en caliente o los ataques oxidantes al aire. En ocasiones es confundida la ferrita con la cementita, para poder diferenciar estas dos, se recomienda un baño maría con el picrato sódico en caliente, dejando con esto de color oscuro a la cementita, blanca la ferrita y la perlita ligeramente coloreada.

La cementita puede aparecer frecuentemente en los aceros de las siguientes formas:

- Como cementita proeutectoide en aceros con contenidos de carbono mayores al 0.90%.
- Como cementita perlítica o también llamada eutectoide, que forma parte de la perlita.
- Como cementita globular dispersa en una matriz de ferrita.
- Como cementita rodeada de martensita o de otros constituyentes, en aceros hipereutectoides templados principalmente.
- Como cementita terciaria, donde posee una forma alargada vermicular (en forma de gusano).

4.1.4 Perlita

Es un constituyente formado por capas de ferrita y cementita, por lo general es encontrado en aceros eutectoides, tiene una composición química de 13.5% de CFe_3 y 86.5% de Fe, que corresponden al 0.9% de C y 99.1% de Fe, esta composición es constante y definida. Su apariencia es de láminas paralelas y alternadas, esto es por su composición de ferrita y perlita, dependiendo de la velocidad de enfriamiento es la distancia de separación de las láminas, por ejemplo, cuando el enfriamiento fue bastante rápido las láminas suelen estar más cercas tanto que el microscopio aun con elevados aumentos no puede distinguir.

Para su clasificación se tiene como base la distancia interlaminar, teniendo:

- Perlita gruesa, con una separación interlaminar de $400\mu\mu$ (milimicra) y con una dureza de 200 BHN.
- Perlita normal, con separación entre láminas de $350\mu\mu$ y dureza 220 Brinell.
- Perlita delgada, con separación interlaminar entre $250\mu\mu$ y 300 Brinell de dureza.

4.1.5 Austenita

Es un constituyente de los aceros que contiene una composición variable de carbono o carburo de hierro en hierro gamma, es una estructura característica del temple, en aceros de elevada aleación puede observarse a temperatura ambiente formando cristales poliédricos parecidos a los de ferrita, diferenciándose de esta última por tener sus contornos más rectilíneos y con ángulos muy visibles.

4.1.6 Martensita

Es un componente que se presenta en la gran mayoría de los aceros con alto contenido de carbono o elevada aleación, tiene un aspecto acicular, formando agujas en zigzag con un ángulo de 60° aproximadamente que pueden diferenciarse cuando la austenita no es trasformada completamente en martensita quedando un fondo blanco que permite visualizar la martensita fácilmente, cuando no existe gran porcentaje de austenita se tiene que recurrir a aumentos de hasta 1000 o más para la interpretación estructural.

Es la microestructura que se obtiene al enfriar el acero rápidamente a altas temperaturas, su composición es principalmente de carburo de hierro en hierro alfa teniendo una composición muy variable de carbono hasta un 1% aproximadamente que influye directamente en sus propiedades físicas aumentando dureza, resistencia y fragilidad conforme se aumenta el contenido de carbono. Es un constituyente magnético con una dureza que oscila entre 50 y 68 Rockwell-C.

Se pueden diferenciar dos tipos de martensita que dependen una de otra de la temperatura de calentamiento que se aplicó al acero, estas estructuras son:

- Martensita alfa, con retícula tetragonal que se obtiene en el temple.
- Martensita beta, con retícula cubica que se obtiene al hacer un calentamiento a baja temperatura entre 50-250°C.

4.1.7 Troostita

Constituyente obscuro, magnético, nodular y fino que está conformado por cementita y hierro alfa, es producido por velocidad de enfriamiento inferior a la temperatura crítica de temple o también por transformaciones isotérmicas de la austenita de 500 a 600° dependiendo la composición del acero. Su estructura es radial con una dureza de 500 Brinell, se oscurece fácilmente con ataques químicos alcohólicos habituales (ácido nítrico o pícrico), su distancia interlamina es de aproximadamente 100 μm .

4.1.8 Sorbita

Es la estructura del acero que posee una resistencia más elevada con una dureza de 250 a 400 Brinell, la componen la cementita y el hierro alfa su obtención es similar a la troostita, al igual que la troostita tiene una forma laminar con una distancia entre laminillas de 100 a 250 μm , está presente principalmente en aceros hipo e hipereutectoides forjados y laminados, normalizados o recocidos.

Hay una tendencia por agrupar una familia de constituyentes laminares dentro de la cual entraría la troostita, sorbita y la perlita, diferenciadas entre sí por la zona o temperatura de formación, teniendo la formación de la perlita a una temperatura próxima a la eutectoide, la sorbita un poco inferior y la troostita a más baja temperatura que oscila entre 500 y 600°C.

4.1.9 Bainita

Su descubrimiento es reciente respecto a los antes mencionados, puede tener presencia en los aceros templados con más frecuencia en los aceros con tratamientos isotérmicos como el austempering. Dependiendo la temperatura de formación de la bainita pueden existir dos tipos, que son:

- *Bainita superior*, formada por una matriz férrica que contiene carburos y en los aceros al carbono la cementita tiene un aspecto arborescente, se forma a 500 y 550°C.
- *Bainita inferior*, formada por agujas alargadas de ferrita que contienen placas de carburos, formando estas últimas un ángulo de 60° respecto al eje de las agujas de ferrita, se forma a los 250 y 400°C.

4.1.10 Carburos

Su presencia es principalmente en aceros con elevada aleación como suelen ser los aceros rápidos, aceros indeformables, entre otros, su presencia en los aceros hace que conserven su dureza a elevadas temperaturas lo que los hace ideales para herramientas de corte que trabajan a altas temperaturas.

Su clasificación de acuerdo a su constitución se puede tener tres clases de carburos diferentes:

- Carburos simples, formado por un elemento especial combinado con carbono.
- Carburos dobles, constituido por un elemento especial y hierro.
- Carburos constituidos por mezclas isomorfas entre un carburo simple y el carburo de hierro.

4.2 Tratamientos térmicos de los aceros

4.2.1 Austenitización

La gran mayoría de los tratamientos térmicos y termo mecánicos de los aceros se llevan a cabo primeramente logrando por calentamiento llegar a una temperatura donde la estructura del acero sea totalmente austenítica, para que a partir de esta temperaturas poder transformar la austenita en una estructura deseable mediante el enfriamiento en distintos medios y a diferentes velocidades según sea la estructura deseada.

Antes de llegar a una estructura de austenítica se recomienda mantener una temperatura constante justo antes a la transformación de la estructura austenítica en un tiempo de media hora por pulgada de espesor, esto con el fin de homogenizar la temperatura en toda la pieza para posteriormente se tenga una buena austenización.

Una temperatura elevada de austenización puede tener como consecuencia un sobrecalentamiento o bien un quemado del acero, en ambos casos se tiene la formación de óxidos intergranulares. Un sobrecalentamiento, genera tensiones que son perjudiciales al acero, pero esto tiene una posible solución, se puede revertir el proceso mediante el tratamiento térmico de normalizado. Cuando existe quemado del acero por lo general se produce fusiones intergranulares, en este caso de acero quemado, no es posible regenerar la estructura, es decir, es un proceso irreversible, dejando en muchos casos inútil a la pieza.

4.2.1.1 Variaciones dimensionales del acero durante el proceso de austenización

Como ya se conoce, al llevar un tratamiento térmico en los materiales, existen variaciones dimensionales durante el proceso de calentamiento, en los aceros estas variaciones se dan principalmente en la transformación alotrópica alfa \rightarrow gamma, donde el acero empieza a contraerse, es muy importante tener una temperatura homogénea en la pieza antes de llegar a esta transformación.

Los riesgos que se producen al no tener una temperatura homogénea en el acero antes de la transformación alotrópica alfa \rightarrow gamma son deformaciones en la pieza e incluso llegar a la rotura, esto se debe porque antes de llegar a la transformación alfa-gamma el acero se dilata y cuando se llega a la periferia de la temperatura de transformación alotrópica el acero se contrae, entonces en la parte superficial de la pieza ocurre una contracción mientras que en el núcleo de la misma se tiene una dilatación generando entonces tensiones que generan deformaciones inesperadas en la pieza e incluso rotura en la misma.

Por lo tanto siempre es recomendable en el proceso de austenización mantener una temperatura constante por un tiempo determinado justo antes de tener la transformación alfa-gamma para poder homogenizar la temperatura en toda nuestra pieza. De igual forma parece muy razonable la recomendación de Apraiz: *“No introducir piezas frías directamente en el horno –cuya temperatura sea superior a los 350 °C-, si aquellas superan los 200mm de diámetro”*, porque el acero frío, poco plástico, podría romper por las tensiones creadas entre periferia y núcleo de la pieza [3].

4.2.1.2 Enfriamiento del acero

Para bajar la temperatura desde el estado de austenítico se puede realizar de forma continua ya sea dentro del horno, en medios refrigerantes como en aire, aceite, agua, entre otros. En algunos casos el enfriamiento es isotérmico que puede ser por ejemplo en un baño de sales.

La estructura final de nuestro acero dependerá entonces principalmente de los siguientes factores:

- Proceso de calentamiento
- El medio refrigerante
- El tamaño de pieza a tratar
- La curva T.T.T. del acero a tratar

4.2.2 Recocido

El recocido tiene como finalidad ablandar el acero para ser mecanizado o para ser conformado en frío, regenerar su estructura o bien para eliminar tensiones internas. El proceso consiste en calentar a temperaturas adecuadas y posteriormente enfriar lentamente para formar estructuras ferritoperlíticas que son más blandas que las bainíticas o las martensíticas.

Entre los tratamientos térmicos de recocidos que generalmente se llevan a cabo en la industria pueden clasificarse en tres grupos; recocido con austenización completa, recocido con austenización incompleta y recocido subcrítico. En ocasiones se requiere llegar a una dureza mínima en el acero, esto se logra realizando dos recocidos el primero de regeneración y en segundo lugar un recocido subcrítico generalmente. A continuación mencionaremos brevemente los datos más relevantes de cada uno de estos recocidos.

4.2.2.1 Recocidos de austenización completa

La finalidad de este tipo de recocido es ablandar el acero y regenerar su estructura, por eso en algunos casos también es llamado recocido de regeneración. El calentamiento se hace a una temperatura ligeramente superior a la temperatura crítica del acero y posteriormente se enfría muy lentamente dependiendo del acero que se trate.

4.2.2.2 Recocidos subcríticos

El objetivo de este recocido es eliminar las tensiones en el material que se generaron al maquinarse o bien en un tratamiento térmico severo, al realizar este recocido también mejoramos su ductilidad en el acero. El calentamiento es por debajo de la temperatura crítica inferior, la velocidad de enfriamiento no es de gran importancia pudiéndose así enfriar al aire sin que se endurezca el acero. Dentro de este grupo podemos encontrar tres tipos de recocido:

- *Recocido de ablandamiento*, su objetivo es ablandar el acero, las durezas que se obtienen no son las más bajas pero si en la mayoría de los casos las suficientes para mecanizar el acero, su enfriamiento es al aire por lo cual lo hace un tratamiento económico y rápido.
- *Recocido contra acritud*, sirve para aumentar la ductilidad en los aceros con poco contenido de carbono ($\%C < 0.4\%$) rolados en frío, se lleva a cabo a temperaturas que oscilan entre 550 y 650°C que permite destruir la cristalización alargada de la ferrita permitiendo la cristalización de nuevos poliedros más dúctiles que la estructura primaria, posteriormente se enfría al aire el material.
- *Recocido subcrítico globular*, el proceso se lleva principalmente en los aceros de bajo contenido de carbono y de baja aleación para tener una estructura globular de muy baja dureza similar a la que se obtiene en el recocido de austenización incompleta, se trabaja a una temperatura inferior pero muy próxima a la temperatura crítica A_{C1} (ver figura 4.1) y posteriormente se enfría lentamente dentro del horno.

4.2.2.3 Recocido de austenización incompleta

Se emplean para aceros al carbono ($\%C > 0.5\%$) o aleados con la finalidad de ablandarlos obteniendo su menor dureza posible y así mejorar su maquinabilidad, se realiza a una temperatura media entre la temperatura crítica superior e inferior, pudiendo diferenciar dos procesos [4]:

- *Recocido globular oscilante*, la temperatura a la cual se somete el acero es oscilante respecto a la temperatura crítica inferior A_{C1} .
- *Recocido globular de austenización incompleta*, es cuando se realiza a una temperatura ligeramente superior a A_{C1} .

4.2.3 Normalizado

Tiene como finalidad dejar en un estado primario o normal al acero, este tratamiento generalmente se aplica a aceros que han tenido un trabajo en frío o en caliente, que han tenido enfriamientos irregulares o sobrecalentamientos, o también para eliminar los efectos de tratamientos defectuosos realizados anteriormente, normalmente este tratamiento de normalizado se lleva a cabo en aceros para construcción o de baja aleación.

Se realiza a una temperatura ligeramente elevada a la crítica superior, seguido de un enfriamiento al aire, quedando de esta forma el acero con una estructura normal y con propiedades normales respecto a su composición, además de eliminar las tensiones internas y uniformizar el tamaño de grano del acero.

4.2.4 Temple

El objetivo que persigue este tratamiento térmico es endurecer y aumentar la resistencia del acero.

El temple es el enfriamiento rápido del acero a partir de una estructura gamma, estructura que se encuentra por encima de la temperatura crítica superior, donde el objetivo es transformar esta estructura en martensita e impedir que la estructura gamma de acero se transforme en ferrita o perlita. El enfriamiento suele llevarse en agua, aceite o aire según la velocidad de enfriamiento recomendada que depende de la composición y tamaño de la pieza a temprar.

4.2.4.1 Temple en agua

En ocasiones asociamos una velocidad de enfriamiento rápido en el temple a una diferencial de temperatura grande, sin embargo no siempre es así, cuando el medio de enfriamiento en el temple es agua la velocidad máxima de enfriamiento suele tener lugar a los 350 y 400°C mientras que a los 500°C apenas se empieza a eliminar la capa de vapor que produce el agua alrededor de la pieza que está siendo templada, si bien es sabido el vapor es muy mal conductor de calor y como la transferencia de calor entre el agua y la pieza se efectúa en su mayoría por conducción la transferencia de calor es mínima cuando existe vapor.

Por eso en ocasiones no es muy recomendable tener como medio de temple agua pura, se recomienda siempre que el agua para templar sea acompañada de algún soluto que aumente la velocidad de enfriamiento a altas temperaturas.

4.2.4.2 Temple en lejías y soluciones salinas

Como ya se mencionó el agua por si sola tiene una velocidad de enfriamiento baja, por lo cual se varía su composición para lograr aumentar o disminuir dentro de ciertos límites su capacidad como refrigerante, los métodos más comunes para elevar la velocidad de enfriamiento son lejía de sosa y cloruro sódico.

La lejía de sosa suele emplearse a menudo en lugar de cloruro sódico, ya que este último puede dar lugar a la oxidación en el acero, en comparación con el agua tenemos mayor transferencia de calor con la lejía de sosa, es decir la capa de vapor se rompe a mayores temperaturas teniendo como resultado una velocidad de enfriamiento a temperaturas superiores a los 400°C teniendo mayor transformación de la austenita. Esta solución es utilizada cuando se requiere tener mayor profundidad de temple o bien un temple completo.

Las soluciones salinas suelen utilizarse cuando se requiere reducir el riesgo de agrietamiento pero afecta en la profundidad de temple, este medio refrigerante es perfecto para piezas pequeñas o aceros aleados porque se considera un término medio de refrigerante entre agua pura y aceite.

4.2.4.3 Temple en aceite

El aceite es un medio refrigerante mejor que el agua, aproximadamente 1/3 de la del agua, los aceites más utilizados son aceites vegetales (colza), aceites minerales y con menos frecuencia grasas líquidas animales.

Los aceites de colza tienen un efecto refrigerante alto, alrededor de los 550°C, aumenta cuando el baño se lleva a una temperatura de 40°C mejorando la penetración del temple, este medio refrigerante se emplea con menor frecuencia por su elevado costo y en ocasiones es sustituido por aceites preparados con sustancias activas y mezclas especiales para temple. Cuando se requieren templar piezas grandes generalmente se emplea como medio refrigerante aceites minerales en lugar de colza.

4.2.4.4 Temple al aire

El comportamiento de temple en aire u otros gases es muy diferente respecto a la del agua o aceite, es recomendable solo templar por este medio aceros con muy altas aleaciones, la velocidad de enfriamiento en aire calmado es muy baja pero aumenta cuando se incrementa la circulación del aire pudiendo incrementar aún más la transferencia de calor cuando el grado de humedad del aire es mayor. En ocasiones no es recomendable el temple de aceros de baja aleación en aire porque se puede presentar el riesgo de deformación o de agrietamiento al ser un enfriamiento muy irregular.

4.2.4.5 Tensiones de temple

En el proceso de temple suelen aparecer tensiones que se originan por efecto de tensiones térmicas o tensiones debidas a la transformación de estructuras que se realiza enfriando el acero a una velocidad elevada. Estas tensiones pueden eliminarse mediante otros tratamientos térmicos.

Las tensiones térmicas son producto de un enfriamiento irregular en la pieza que puede ser causado por secciones diferentes de la pieza, una mala colocación dentro del baño, la formación de capas irregulares de vapor, acumulaciones locales de calor en el líquido refrigerante, entre otras causas. Es imposible eliminar estas tensiones durante el temple pero se pueden minimizar hasta un valor casi despreciable mediante tácticas específicas.

Las tensiones debido a la transformación pueden evitarse mediante un calentamiento y enfriamiento homogéneo en la pieza, pues al tener la transformación austenita suelen llevarse dos procesos a una temperatura de 600 a 700°C como es la compresión y expansión de una estructura ocasionando estas tensiones de transformación.

4.2.4.6 Templabilidad

La templabilidad se refiere a la facilidad de un acero para ser templado y se define por las curvas TTT, se afirma que un acero es más “templable” cuando sus curvas TTT están más alejadas del origen de tiempos y esto se debe a su composición química del acero, en ocasiones es confundida con penetración de temple, si bien la penetración de temple es la distancia de la periferia de la pieza que tiene una estructura martensítica aumentándose la distancia cuando la pieza es enfriado en medios más severos.

4.2.4.7 Curvas Jominy

Para determinar la templabilidad de un acero en ocasiones se utiliza un ensayo llamado ensayo Jominy, donde se mantienen constantes todos los factores que influyen en el temple como la forma, tamaño de la pieza y el medio de temple, excepto la composición química. Teniendo como estándares una probeta cilíndrica de 25mm de diámetro y 100mm de longitud con una cabeza de apoyo o pestaña de 3mm.

El procedimiento consiste en calentar por encima de la temperatura superior crítica en un horno adecuado en ocasiones con carbono para evitar la descarburación durante unos 30min para austenizar por completo la probeta. Después de este tiempo transcurrido se coloca en un dispositivo de enfriamiento, sin exceder de 5 segundos de traslado entre el horno y el lugar de enfriamiento, en forma vertical y alineado en el orificio de salida de 12.5mm diámetro del líquido refrigerante que tiene una temperatura específica de 25°C, de tal manera que la velocidad de enfriamiento es máxima en un extremo de la probeta y disminuye a lo largo de esta.

Una vez enfriada la pieza se procede a realizar un rectificado a una profundidad no mayor a 4mm a lo largo de la probeta para eliminar la descarburación que se obtuvo en el temple, cabe mencionar que este rectificado no debe sobrepasar temperaturas que puedan provocar el revenido en la pieza, posteriormente se toman lecturas de dureza a lo largo de la probeta a distancias ya establecidas para obtener una lectura de dureza en diferentes puntos de la probeta y así poder generar una gráfica que muestre el comportamiento del temple.

En la Figura 4.2 se muestran 2 tipos de aceros donde el primero (superior derecha) tiene baja templabilidad y el segundo (inferior derecha) mayor templabilidad, por tanto entre más horizontal se muestre esta grafica obtenida mediante el ensayo Jominy mejor templabilidad tendrá el acero.

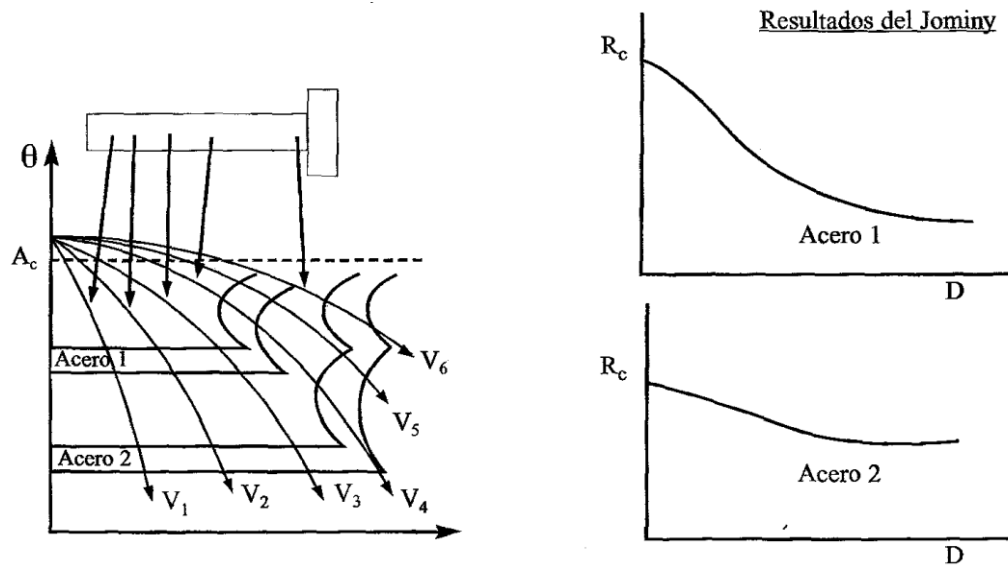


Figura 4.2 Comparación de resultados del ensayo Jominy en dos aceros [3].

4.2.4.8 Temple superficial

Es un temple relativamente nuevo que consiste en calentar el acero mediante una llama o una corriente inducida a alta frecuencia permitiendo con esto tener un mejor control para la profundidad de temple en la pieza, posteriormente se enfría generalmente en agua y se obtiene una dureza superficial muy buena que depende directamente de la profundidad de temple.

4.2.5 Revenido

Es el tratamiento térmico que sigue después de un tratamiento térmico de temple, tiene lugar justo por debajo de la temperatura inferior crítica A_{C1} , Figura 4.1, con este tratamiento térmico se disminuye la dureza y resistencia al desgaste, se eliminan las tensiones generadas por el temple y se mejora la ductilidad en el acero.

Mediante el proceso del temple existen transformaciones estructurales que hacen que en cada revenido aplicado a diferentes temperaturas, el acero pierda un poco de dureza además de liberarse de las tensiones, gracias al avance tecnológico y con ayuda de microscopios electrónicos y rayos X se han podido diferenciar tres etapas que ocurren durante el revenido, las cuales se enuncian a continuación de manera muy superficial.

1. Hay una transformación a la temperatura de 300°C aproximadamente apareciendo un carburo llamado épsilon en los límites de los subgranos heredados de la austenita, quedando con 0.25% aproximadamente de carbono generando así la transformación de red tetragonal en cubica.
2. Es cuando ocurre la transformación de austenita retenida en bainita, que al ser calentada esta última a temperaturas elevadas en el revenido sufre una precipitación de carburo de hierro teniendo como resultado final cementita y ferrita.
3. El carburo épsilon es transformado en cementita Fe_3C que al ir aumentando la temperatura de revenido se va disolviendo quedando como resultado final cementita y ferrita.

4.2.5.1 Revenidos múltiples

En algunos aceros al realizarse un revenido no se elimina toda la austenita residual o bien no se estabiliza la estructura formada durante el temple y es conveniente llevar a cabo un segundo revenido, para aceros para herramienta en ocasiones es posible tener hasta cuatro revenidos seguidos con el fin de estabilizar la estructura en el acero, en el primer revenido solo suele verificarse la transformación de martensita tetragonal en martensita revenida.

4.3 Tratamientos isotérmicos de los aceros

Es el nombre que se le atribuyen a los tratamientos térmicos donde el enfriamiento no se lleva de una forma regular y progresiva, sino que es interrumpido o varía la temperatura en ciertos intervalos de tiempo, al igual que los tratamientos térmicos antes mencionados la variación de la velocidad y temperatura están sujetos a la composición química de la pieza, tamaño y resultados deseados.

Estos tratamientos térmicos son utilizados actualmente en el temple de troqueles, herramientas, engranes, muelles, etc., donde se obtiene una gran tenacidad, deformaciones mínimas, se elimina el peligro de grietas y roturas. Existen diferentes tratamientos isotérmicos dentro de lo más usuales se mencionan a continuación.

- *Patenting*, es un tratamiento similar al austempering que se lleva a cabo desde hace mucho tiempo para la fabricación de alambres de alta resistencia también conocidos con el nombre de “cuerda de piano”, a diferencia del austempering el enfriamiento suele realizarse en baño de plomo obteniendo un acero con una alta tenacidad y muy buena ductilidad.
- *Austempering o transformación isotérmica de la austenita en la zona de 250 a 600°C*, el acero se calienta a una temperatura un poco más elevada a la temperatura crítica superior y luego es enfriado en plomo o sales fundidas a temperaturas que van desde los 250 a los 600°C permaneciendo a esa temperatura constante hasta la transformación completa de la austenita en otro constituyente.
- *Martempering*, es en realidad un temple escalonado donde el acero es enfriado a una temperatura entre 200 y 400°C en un baño de sales controlando cuidadosamente el tiempo de permanencia de la pieza para que se inicie la transformación de la austenita en toda la masa al mismo tiempo, evitándose desigualdades y peligrosas dilataciones que se presentan en un temple ordinario.
- *Recocidos isotérmicos*, el procedimiento es similar a un recocido normal con la diferencia que el enfriamiento se hace a una temperatura de 600 y 700°C permaneciendo la pieza por varias horas en esa condición de temperatura constante, con el objetivo de conseguir la transformación isotérmica de la austenita. Este proceso es muy rápido y se obtienen durezas muy bajas.
- *Tratamiento subcero*, consiste en disminuir la temperatura del acero lentamente, hasta alcanzar temperaturas subcero; es decir, unos 78°C, las piezas deben mantenerse a la temperatura de transformación mínimo 1 hora por cada pulgada de espesor, el tratamiento subcero logra aumentar la dureza del acero entre 2 y 3 puntos Rockwell C, también genera la precipitación de nano carburos en los límites de grano, los cuales aumentan la resistencia al desgaste, a la tensión y la fatiga, estabiliza dimensionalmente los materiales, mejora la tenacidad y reduce tensiones en el material [30].

4.4 Tratamientos termoquímicos superficiales de los aceros

En estos tipos de tratamientos hay un cambio de composición química en el acero, además de considerar el tiempo y la temperatura como principales factores, también se considera la atmosfera o medio en el que está rodeado el metal durante el calentamiento y enfriamiento. Los tratamientos termoquímicos son muy empleados para la obtención de piezas que deben poseer una dureza superficial y resistencia al desgaste al mismo tiempo que una buena tenacidad en el núcleo. Dentro de los más destacados tratamientos termoquímicos se encuentran los siguientes [4]:

- *Cementación*; Se aumenta el contenido de carbono en la superficie de la pieza obteniendo una gran dureza superficial después del temple y revenido.
- *Cianuración*; es similar a la cementación, la pieza absorbe carbono y nitrógeno en la zona superficial quedando esta misma muy dura después de un temple final.
- *Sulfinitización*; Se realiza a una temperatura aproximada de 565°C en un baño de sales con una composición especial, el acero absorbe azufre en la superficie teniendo como resultado una buena resistencia al desgaste sin elevar la dureza superficial.
- *Nitruración*; Es un tratamiento que tiene lugar después de un tratamiento térmico de temple y posteriormente de revenido, la pieza se calienta a una temperatura aproximada de 500°C en contacto constante de una corriente de amoníaco dentro de la caja de nitruración donde el acero absorbe el nitrógeno quedando en la periferia de la pieza con una dureza extremadamente alta sin necesidad de ningún otro tratamiento después de este.

4.5 Tratamientos térmicos de temple y revenido a aceros rápidos

Los elementos de aleación de los aceros para herramienta o aceros rápidos su principal objetivo es aumentar la dureza en el acero y la resistencia al desgaste principalmente, en aceros rápidos aumentan la resistencia al revenido y la dureza en caliente ya que estos aceros son trabajados a altas temperaturas por lo cual no se debe modificar su estructura ni propiedades mecánicas.

4.5.1 Temple

El temple tiene lugar en estos aceros justo por debajo de la línea de sólidos (entre 1240 y 1320°C) esto con el fin de disolver los carburos especiales y facilitar el proceso de precipitación durante el revenido. Al disolverse los carburos hay que tener en cuenta el crecimiento de grano brutal que existe en este proceso, por lo cual se recomienda monitorear el tiempo de permanencia de la pieza a esa temperatura además de considerar la temperatura respecto a la forma y tamaño de la pieza.

El enfriamiento suele realizarse en aceite o en aire fluyente para evitar choques térmicos o tensiones en medios refrigerantes más severos.

4.5.2 Revenido

Después de un temple en los aceros rápidos su estructura está formada principalmente por martensita y austenita residual además de carburos sin disolver, que constituyen una estructura muy dura y frágil que hace que la herramienta de acero quede inútil por lo cual es importante realizar por lo menos dos revenidos en los aceros para herramienta o aceros rápidos con el fin de ganar ductilidad y bajar un poco la dureza del acero para su aplicación, estos revenidos en los aceros rápidos suelen hacerse a altas temperaturas con el objeto de que en su funcionamiento a altas temperaturas tengan siempre las mismas propiedades mecánicas.

4.5.3 Temple y revenido al acero FAX55 equivalente al acero AISI T15

A continuación se presenta en la Tabla 4.1 las temperaturas que deben usarse para los tratamientos térmicos de temple, revenido y recocido y la dureza que se obtiene de los aceros grado NACHI.

Tabla 4.1 *Tratamientos térmicos y dureza de los aceros NACHI de alta velocidad obtenidos mediante el método de pulvimetalurgia [14].*

Grado NACHI	Tratamientos térmicos		Dureza	
	Temple	Revenido	Recocido (HB)	Dureza en trabajo (HRC)
FAX18	1130-1200	540-600		62-68
FAX31	1130-1210			62-66
FAX38	1160-1210	65-68		
FAX55	1200-1240	66-69		
FAX40	1130-1240	540-600	<285	63-69
FAXG1	1140-1210	540-580	<330	66-70
FAXG2	1140-1200		<285	66-69

En la Figura 4.3 se puede observar los resultados de dureza del acero NACHI FAX55 que se obtienen a diferentes temperaturas de temple y revenido, el fabricante recomienda realizar el temple con un precalentamiento entre 500 y 600°C y otro a 800 y 900°C antes de llegar a la temperatura de austenización y enfriar en aceite o atmosferas controladas, posteriormente del temple, hacer dos revenidos en este tipo de acero dejando enfriar al aire.

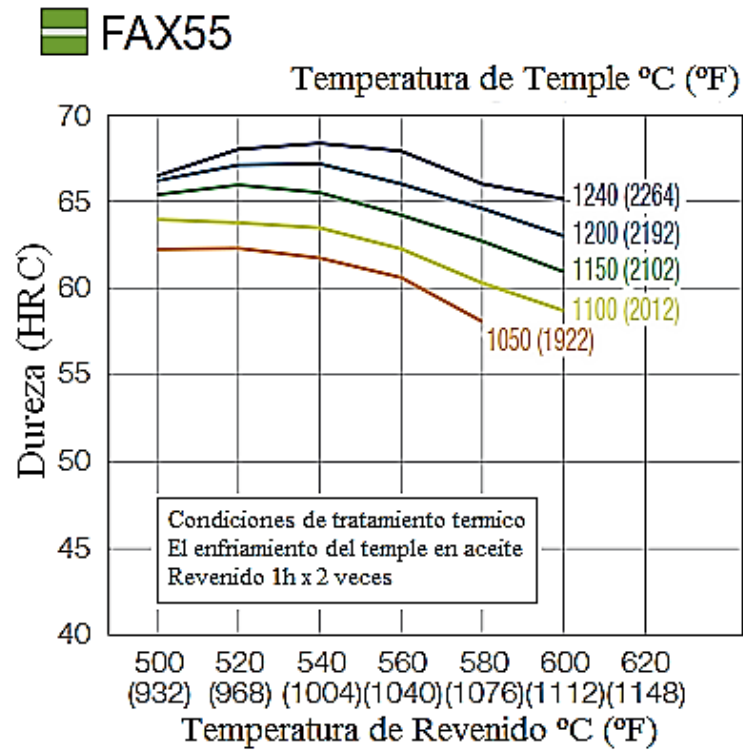


Figura 4.3 Grafico de dureza para el acero NACHI FAX55 [15].

CAPÍTULO 5.
TEMPLE Y REVENIDO APLICABLES AL ACERO FAX55
(EQUIVALENTE AL AISI T15)

Para el desarrollo de la parte experimental se utilizó el siguiente material y equipo:

- ✓ Barra de acero NACHI FAX55 equivalente al acero T15 (donación de un ex-alumno)
- ✓ Lijas para metal de números 220, 320, 400, 500,600, 1000.
- ✓ Alúmina gamma en polvo marca LECO.
- ✓ Solución para ataque químico (10 ml de HCl, 6ml ácido acético, 1g de ácido pícrico, 100ml de etanol).
- ✓ Cortadora eléctrica de disco para metal.
- ✓ Pulidora BUEHLER POLISHER ECOMET I GRINDER.
- ✓ Horno eléctrico Barnstead Thermolyne 1400 Furnace, Modelo FB1415M, 120 V, 12A 1450W.
- ✓ Microscopio metalográfico con resolución de 10,100 y 400 aumentos.
- ✓ Durómetro Wilson/Rockwell, modelo B504-R, serie 94119104. Escala C penetrador tipo diamante carga menor 10 kg y carga mayor 150 kg.
- ✓ Cronometro.
- ✓ Cámara VGA (1.3MP) para microscopio metalográfico.
- ✓ Celular Samsung Galaxy Ace 4 con cámara de 5MP.

5.1 PROCEDIMIENTO

Obtención de las muestras

1. Se cortaron 7 probetas de la barra de acero grado NACHI FAX55, con una longitud cada una de 2.5cm aproximadamente, con la cortadora de metal utilizando líquido refrigerante, como se muestra en la Figura 5.1.

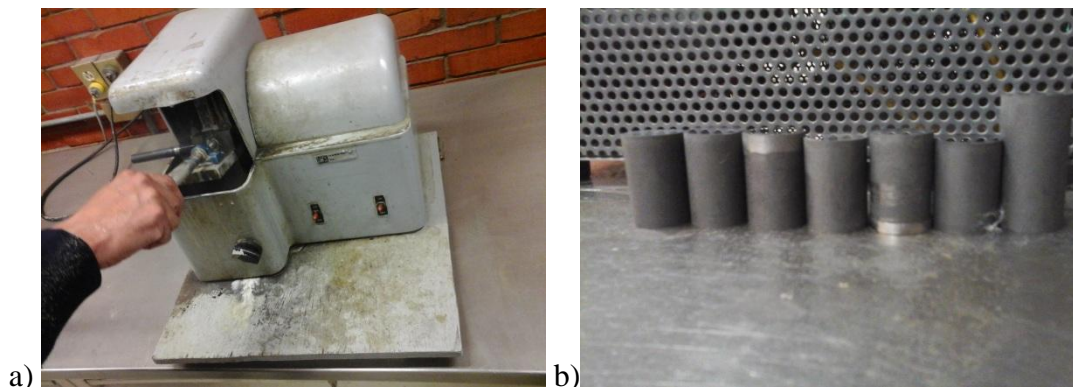


Figura 5.1. a) Corte de la barra de acero grado NACHI FAX55, b) Obtención de las 7 probetas.

2. Se desbastó en posición horizontal solo una cara plana de cada muestra empezando con lija del número 220 en una sola dirección y un solo sentido formando un ángulo de 90° respecto a las líneas formadas por el corte hasta desvanecer por completo estas líneas agregando agua constantemente para evitar calentamiento en la superficie.
3. Con la lija del número siguiente, se desbaste girando la pieza 90° respecto a las líneas marcadas por la lija anterior en posición horizontal, en un solo sentido y una sola dirección hasta desvanecer las líneas formadas por la lija anterior nuevamente agregando agua como refrigerante.
4. Se repitió el procedimiento 3 en cada lija utilizada hasta llegar al desbaste con la lija número 1000 y tener una superficie uniforme con un solo rayado por la lija 1 000 y en una sola dirección como de muestra en la Figura 5.2.



Figura 5.2 *Probetas grado NACHI FAX55 desbastadas hasta la lija número 1000.*

5. Al término total de desbaste de cada pieza se limpió la superficie con alcohol, con la finalidad de limpiar la superficie y al mismo tiempo retardar la corrosión.
6. Después de desbastar una cara de cada muestra hasta la lija número 1000, se pulió la cara desbastada de 3 probetas con la pulidora BUEHLER POLISHER ECOMET I GRINDER hasta dejar un acabado espejo para su estudio metalográfico, agregando una solución líquida de alúmina según se iba solicitando y teniendo como refrigerante agua por goteo, Figura 5.3, generando un movimiento radial constante en la superficie a pulir de cada muestra.

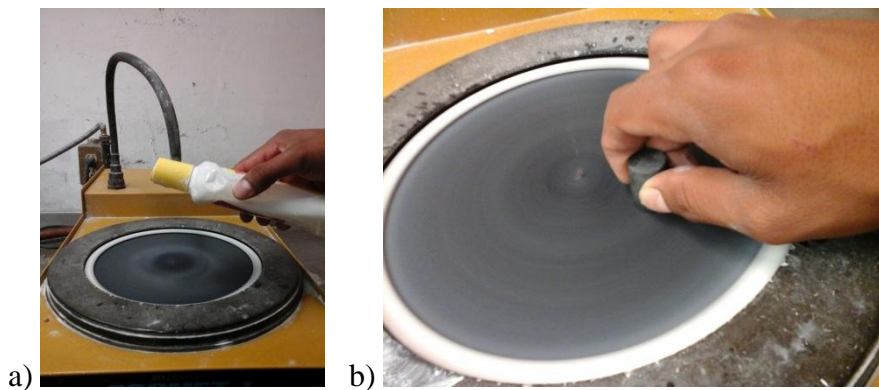


Figura 5.3 *a) Agregando solución líquida de alúmina a la superficie pulidora, b) pulido de muestra grado NACHI FAX55.*

7. Una vez pulido las 3 muestras, se rociaron nuevamente con alcohol para el mismo fin.

Estudio metalográfico de probetas sin tratamiento térmico

8. En un recipiente se preparó la solución química para atacar la muestra, mezclando 10 ml de HCl, 6ml ácido acético, 1g de ácido pícrico, 100 ml de etanol recomendada para aceros rápidos [10].
9. Para el ataque químico, se sumergió la superficie de la muestra pulida en la solución preparada durante 14 segundos aproximadamente.
10. Al término de este tiempo rápidamente se sacó la muestra de la solución química y se limpió con agua abundante para evitar daños a la superficie de estudio.
11. Posteriormente se limpió la superficie con alcohol.
12. Se repitieron los mismos pasos 9, 10 y 11 para las otras dos probetas pulidas.
13. Antes de colocar la pieza en el microscopio metalográfico, se limpió la superficie ya pulida con alcohol y algodón.
14. Se colocó la pieza en la base del microscopio metalográfico y se enfocó con una lente de 10 aumentos, bajando la lente girando la perilla ubicada en columna del microscopio metalográfico y posteriormente precisando con la perilla ubicada en el brazo del microscopio como se muestra en la Figura 5.4.



Figura 5.4 *Enfoque de la lente del microscopio en la superficie de una probeta de acero grado NACHI FAX55.*

15. Después de enfocar en un punto de la superficie de la probeta, se observó la estructura metalográfica cambiando la lente de 10 aumentos a una de 400 aumentos como se muestra en la Figura 5.5.

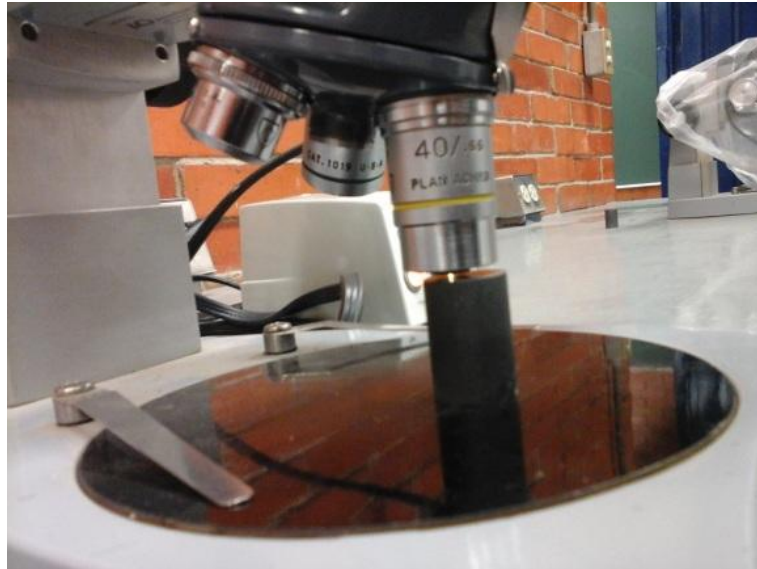


Figura 5.5 Enfoque con una lente de 400X.

16. Nuevamente se enfocó con la perilla de más precisión y se tomaron algunas fotografías.
17. Cambiamos la muestra a observar y seguimos los mismos pasos 13, 14, 15 y 16 en cada una de las siguientes dos probetas para observar su microestructura y elegir la que tiene mejor resolución.

Prueba de dureza en dos probetas sin tratamiento térmico

18. Se realizaron pruebas de dureza a dos muestras tomando 5 lecturas en cada probeta sin tratamiento térmico, utilizando el durómetro Wilson/Rockwell, modelo B504-R, serie 94119104, en una escala Rockwell C colocando un penetrador tipo diamante, con una carga mínima de 10 kg y una carga máxima de 150 kg.
19. Se colocó la probeta en la base del equipo para su estudio.

20. Ya colocada la muestra, se bajó el punzón girando el timón situado en la parte baja del equipo, justo antes de tocar la pieza a una distancia aproximadamente de 5mm se movió la pieza para ubicarla donde se requería tomar la medición como se muestra en la Figura 5.6.



Figura 5.6 Preparación de la muestra grado NACHI FAX55 para pruebas de dureza.

21. Se calibró el equipo a cero, Figura 5.7, girando la perilla que está debajo del timón hasta que la manecilla coincidiera con el cero.



Figura 5.7 *Calibrado a cero el durómetro Wilson/Rockwell.*

22. Se aplicó la carga mínima de 10 kg girando el timón hasta que la manecilla diera dos vueltas y en la tercera se buscó una lectura de 10 kg en la escala Rockwell C, Figura 5.8.



Figura 5.8 *Carga de 10 kg del durómetro Wilson/Rockwell en escala HRC.*

23. Nuevamente se calibró a cero girando la perilla en sentido contrario a las manecillas del reloj hasta que coincidiera la manecilla en el cero en la escala Rockwell C.
24. Ya posicionado y con la carga mínima de 10 kg se aplicó la carga de 150 kg para obtener la lectura de dureza de la probeta, esto se realizó presionando el pedal del equipo que se encuentra debajo de la perilla de ajuste como se muestra en la siguiente Figura 5.9.



Figura 5.9 *Aplicación de la carga máxima de 150 kg para obtener la dureza de la probeta de acero grado NACHI FAX55 en una escala HRC.*

25. Se tomó la lectura en la escala Rockwell C mostrado en el indicador, Figura 5.10.



Figura 5.10 Lectura en la caratula del durómetro después de aplicar la carga de 150 kg.

26. Una vez tomada la lectura se subió el penetrador a una altura donde se pudo manipular la pieza para aplicar nuevamente carga en otro punto de la probeta, para obtener otra lectura.
27. Ya localizado el punto donde se requirió tomar la lectura, se siguieron los pasos del 20 al 26 hasta obtener 5 lecturas en la probeta.
28. Se realizaron los mismos pasos del 19 al 27 para la siguiente probeta sin tratamientos térmicos para obtener su dureza, teniendo al final 5 lecturas en cada una de las dos probetas seleccionadas.

Aplicación del tratamiento térmico de temple

Se realizó el tratamiento térmico de temple a 6 de las muestras dejando solo una probeta como testigo.

29. Se colocaron 6 probetas distribuidas uniformemente dentro del horno eléctrico Barnstead Thermolyne 1400 Furnace, Modelo FB1415M.
30. Ya dentro las probetas, se cerró la portilla del horno eléctrico y se puso en marcha programándolo a una temperatura inicial de 700°C.

31. Cuando se alcanzó la temperatura programada (700°C), se estabilizó la temperatura durante unos 30 minutos aproximadamente con la finalidad de hacer homogénea la temperatura en todas las partes de cada pieza.
32. Concluido el tiempo de precalentamiento se elevó la temperatura del horno eléctrico a 1100°C, que es la máxima temperatura que se recomienda trabaje el horno eléctrico.
33. Una vez alcanzada la temperatura en el interior del horno eléctrico de 1100°C, se inició el cronometro hasta tener una lectura de una hora.
34. Pasando el tiempo de una hora a 1100°C, se sacaron las primeras 3 probetas que se templaron al aire dejándolas sobre la mesa del laboratorio a la intemperie como se muestra en la Figura 5.11.



Figura 5.11 *Probetas de acero grado NACHI FAX55 templadas al aire.*

35. Posteriormente se sacaron las 3 probetas que se templaron en aceite, sacando una por una del horno eléctrico y sumergiéndolas en su totalidad rápidamente en el recipiente que contenía aceite dando un movimiento en forma de 8's dentro del mismo para tener un enfriamiento lineal y homogéneo en cada pieza durante 2 minutos aproximadamente.
36. Se secaron las tres piezas, previamente templadas en aceite, y se dejaron enfriando al aire hasta alcanzar la temperatura ambiente.

Estudio metalográfico de las probetas templadas en aire y aceite

37. Se seleccionaron dos probetas templadas en aire y dos probetas templadas en aceite para observar su microestructura en el microscopio metalográfico.
38. Se desbaste en posición horizontal la cara plana de cada muestra teniendo en cuenta que esta superficie fuera la desbastada anteriormente, empezando con lija del número 400 agregando agua constantemente para evitar calentamiento en la superficie hasta tener un rayado homogéneo en una sola dirección en la superficie.
39. Con la lija del número siguiente, se desbaste girando la pieza 90° respecto a las líneas marcadas por la lija anterior en posición horizontal, en un solo sentido y una sola dirección hasta desvanecer las líneas formadas por la lija anterior nuevamente agregando agua como refrigerante.
40. Se repitió el procedimiento 39 en cada lija utilizada hasta llegar al desbaste con la lija número 1000 y tener una superficie uniforme con un solo rayado por la lija 1000 y en una sola dirección.
41. Al término total de desbaste de cada pieza se limpió la superficie con alcohol.
42. Después de desbastar una cara de cada muestra hasta la lija número 1000, se pulió la cara desbastada de cada una de las 4 probetas hasta dejar un acabado tipo espejo para su estudio metalográfico, agregando una solución líquida de alúmina según se iba solicitando y teniendo como refrigerante agua por goteo, Figura 5.3, generando un movimiento radial constante en la superficie a pulir de cada muestra.
43. Una vez pulido las 4 muestras, se rociaron nuevamente con alcohol para retardar la corrosión en cada una de las muestras.
44. En la solución química preparada con anterioridad en el procedimiento 8 para el ataque químico, se sumergió la superficie de la muestra pulida en la solución preparada durante 14 segundos aproximadamente.
45. Al término de este tiempo rápidamente se sacó la muestra de la solución química y se limpió con agua abundante para evitar daños a la superficie de estudio.
46. Posteriormente se limpió la superficie con alcohol.
47. Se repitieron los mismos pasos 44, 45 y 46 para las tres probetas pulidas.
48. Antes de colocar la pieza en el microscopio metalográfico, se limpió la superficie ya pulida con alcohol y algodón suavemente.

49. Se colocó la pieza en la base del microscopio metalográfico y se enfocó con una lente de 10 aumentos, bajando la lente girando la perilla ubicada en la columna del microscopio metalográfico y posteriormente precisando con la perilla ubicada en el brazo del microscopio como se muestra en la Figura 5.4.
50. Después de enfocar en un punto de la superficie de la probeta, se observó la estructura metalográfica cambiando la lente de 10 aumentos a una de 400 aumentos como se muestra en la Figura 5.5.
51. Nuevamente se enfocó con la perilla de más precisión y se tomaron algunas fotografías.
52. Cambiamos la muestra a observar y seguimos los mismos pasos 48, 49, 50 y 51 en cada una de las siguientes tres probetas para observar su microestructura y elegir la que tiene mejor resolución.

Prueba de dureza en dos probetas templadas al aire y dos templadas en aceite

53. Se realizaron pruebas de dureza a dos muestras templadas en aire y dos templadas en aceite, tomando 3 lecturas en cada probeta, utilizando el durómetro Wilson/Rockwell.
54. Se colocó la primera probeta en la base del equipo para su estudio.
55. Ya colocada la muestra, se bajó el punzón girando el timón situado en la parte baja del equipo, justo antes de tocar la pieza a una distancia aproximadamente de 5mm se movió la pieza para ubicarla donde se requería tomar la medición como se muestra en la Figura 5.6.
56. Se calibro el equipo a cero, Figura 5.7, girando la perilla que está debajo del timón hasta que la manecilla coincidiera con el cero.
57. Se aplicó la carga mínima de 10 kg girando el timón hasta que la manecilla diera dos vueltas y en la tercera se buscó una lectura de 10 kg en la escala Rockwell C, Figura 5.8.
58. Nuevamente se calibró a cero girando la perilla en sentido contrario a las manecillas del reloj hasta que coincidiera la manecilla en el cero en la escala Rockwell C.

59. Ya posicionado y con la carga mínima de 10 kg se aplicó la carga de 150 kg para obtener la lectura de dureza de la probeta, esto se realizó presionando el pedal del equipo que se encuentra debajo de la perilla de ajuste como se muestra en la siguiente Figura 5.9.
60. Se tomó la lectura en la escala Rockwell C mostrado en el indicador.
61. Una vez tomada la lectura se subió el penetrador a una altura donde se pudo manipular la pieza para aplicar nuevamente carga en otro punto de la probeta, para obtener otra lectura.
62. Ya localizado el punto donde se requirió tomar la lectura, se siguieron los pasos del 55 al 61 hasta obtener 3 lecturas en la probeta.
63. Se realizaron los mismos pasos del 54 al 62 para la siguiente tres probetas para obtener su dureza, teniendo al final 3 lecturas en cada una de las cuatro probetas seleccionadas.

Aplicación del primer revenido

Dejando una muestra de cada medio de temple (aire y aceite), se realizó el primer revenido a dos muestras de cada medio de temple.

64. Se introdujo en el horno las 4 muestras para realizarles el primer revenido.
65. Ya dentro las piezas se cerró el horno y se programó para que alcanzara una temperatura de 600°C.
66. Una vez alcanzada la temperatura de 600°C se puso en marcha el cronometro hasta que marcara un tiempo de una hora.



Figura 5.12 *Revenido de las probetas grado NACHI FAX55 en el horno eléctrico a 600°C.*

67. Posteriormente de que las piezas permanecieran una hora aproximadamente a una temperatura constante de 600°C se sacaron y enfriaron al aire.
68. Se realizaron nuevamente tres pruebas de dureza cada una de las cuatro probetas, siguiendo el mismo procedimiento ya descrito para realizar pruebas de dureza, previamente las muestras fueron desbastadas comenzando con una lija de número 600 hasta terminar con una del número 1000.

Aplicación del segundo revenido

69. Una vez realizado las pruebas de dureza obtenidas en el primer revenido, nuevamente se realizó el revenido en las 4 muestras a una temperatura de 600°C en las mismas condiciones que en el primer revenido.
70. Al término del tiempo establecido del segundo revenido, se retiraron las piezas del horno eléctrico y se enfriaron las piezas al aire.

Estudio metalográfico de las probetas con un segundo revenido templado en aire y aceite previamente

Posteriormente del segundo revenido en las dos probetas templadas en aire y dos probetas templadas en aceite, se prepararon para observar su microestructura en el microscopio metalográfico.

71. Se desbastó en posición horizontal la cara plana de cada muestra teniendo en cuenta que esta superficie fuera la desbastada anteriormente, comenzando esta vez con lija del número 600 agregando agua constantemente para evitar calentamiento en la superficie hasta tener un rayado homogéneo en una sola dirección en la superficie.
72. Con la lija del número siguiente, se desbaste girando la pieza 90° respecto a las líneas marcadas por la lija anterior en posición horizontal, en un solo sentido y una sola dirección hasta desvanecer las líneas formadas por la lija anterior nuevamente agregando agua como refrigerante.
73. Se repitió el paso anterior en cada lija utilizada hasta llegar al desbaste con la lija número 1000 y tener una superficie uniforme con un solo rayado por la lija 1000 y en una sola dirección.
74. Al término total de desbaste de cada pieza se limpió la superficie con alcohol, con la finalidad retardar la corrosión.
75. Después de desbastar una cara de cada muestra hasta la lija número 1000, se pulió la cara desbastada de cada una de las 4 probetas hasta dejar un acabado tipo espejo para su estudio metalográfico, agregando una solución líquida de alúmina según se iba solicitando y teniendo como refrigerante agua por goteo, Figura 5.3, generando un movimiento radial constante en la superficie a pulir de cada muestra.
76. Una vez pulido las 4 muestras, se rociaron nuevamente con alcohol para retardar la corrosión en cada una de las muestras.
77. En la solución química preparada con anterioridad en el procedimiento 8 para el ataque químico, se sumergió la superficie de la muestra pulida en la solución preparada durante 14 segundos aproximadamente.
78. Al término de este tiempo rápidamente se sacó la muestra de la solución química y se limpió con agua abundante para evitar daños a la superficie de estudio.
79. Posteriormente se limpió la superficie con alcohol.

80. Se repitieron los mismos pasos 77, 78 y 79 para las tres probetas pulidas.
81. Antes de colocar la pieza en el microscopio metalográfico, se limpió la superficie ya pulida con alcohol y algodón.
82. Se colocó la pieza en la base del microscopio metalográfico y se enfocó con una lente de 10 aumentos, bajando la lente girando la perilla ubicada en la columna del microscopio metalográfico y posteriormente precisando con la perilla ubicada en el brazo del microscopio como se muestra en la Figura 5.4.
83. Después de enfocar en un punto de la superficie de la probeta, se observó la estructura metalográfica cambiando la lente de 10 aumentos a una de 400 aumentos como se muestra en la Figura 5.5.
84. Nuevamente se enfocó con la perilla de más precisión y se tomaron algunas fotografías.
85. Cambiamos la muestra a observar y seguimos los mismos pasos 81, 82, 83 y 84 en cada una de las siguientes tres probetas para observar su microestructura y elegir la que tiene mejor resolución.

Prueba de dureza después de un segundo revenido en dos probetas templadas al aire y dos templadas en aceite previamente

Se realizaron pruebas de dureza a dos muestras templadas en aire y dos templadas en aceite, tomando 3 lecturas en cada probeta, utilizando el durómetro Wilson/Rockwell.

86. Se colocó la primera probeta en la base del equipo para su estudio.
87. Ya colocada la muestra, se bajó el punzón girando el timón situado en la parte baja del equipo, justo antes de tocar la pieza a una distancia aproximadamente de 5mm se movió la pieza para ubicarla donde se requería tomar la medición como se muestra en la Figura 5.6.
88. Se calibro el equipo a cero, Figura 5.7, girando la perilla que está debajo del timón hasta que la manecilla coincidiera con el cero.
89. Se aplicó la carga mínima de 10 kg girando el timón hasta que la manecilla diera dos vueltas y en la tercera se buscó una lectura de 10 kg en la escala Rockwell C, Figura 5.8.

90. Nuevamente se calibró a cero girando la perilla en sentido contrario a las manecillas del reloj hasta que coincidiera la manecilla en el cero en la escala Rockwell C.
91. Ya posicionado y con la carga mínima de 10 kg se aplicó la carga de 150 kg para obtener la lectura de dureza de la probeta, esto se realizó presionando el pedal del equipo que se encuentra debajo de la perilla de ajuste como se muestra en la siguiente Figura 5.9.
92. Se tomó la lectura en la escala Rockwell C mostrado en el indicador.
93. Una vez tomada la lectura se subió el penetrador a una altura donde se pudo manipular la pieza para aplicar nuevamente carga en otro punto de la probeta, para obtener otra lectura.
94. Ya localizado el punto donde se requirió tomar la lectura, se siguieron los pasos del 87 al 93 hasta obtener 3 lecturas en la probeta.
95. Se realizaron los mismos pasos del 86 al 94 para la siguiente tres probetas para obtener su dureza, teniendo al final 3 lecturas en cada una de las cuatro probetas con segundo revenido.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

En la micrografía mostrada en la Figura 6.1 se puede observar la microestructura del acero grado NACHI FAX55 sin tratamiento térmico en donde se puede apreciar la existencia de una estructura extremadamente fina para los aumentos que proporciona el microscopio disponible en el laboratorio, aun así, se pueden ver claramente la presencia de carburos distribuidos casi de manera uniforme en toda la matriz, la cual es una mezcla de ferrita más perlita.



Figura 6.1 *Micrografía de un acero grado NACHI FAX-55 sin tratamiento térmico a 400X.*

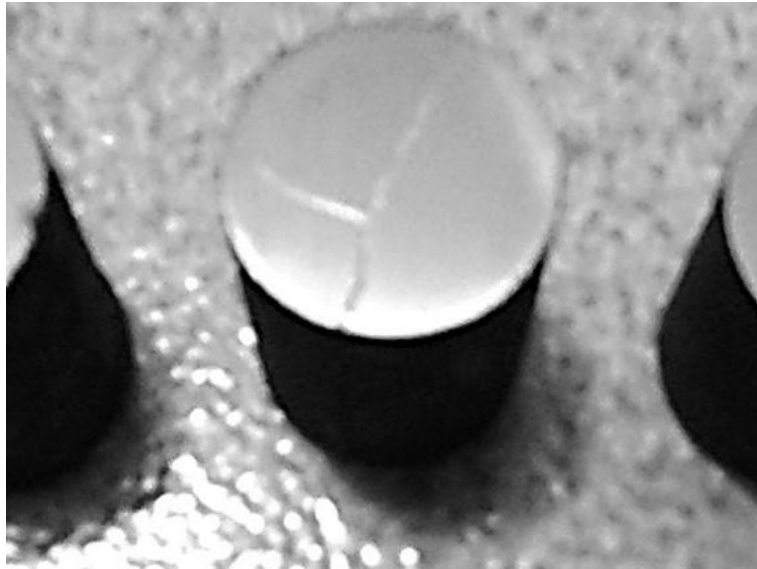
Las pruebas de dureza que se aplicaron a dos de las probetas de acero grado NACHI FAX55 proporcionaron los resultados que se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Dureza HRC de dos probetas grado NACHI FAX-55 sin tratamiento térmico.

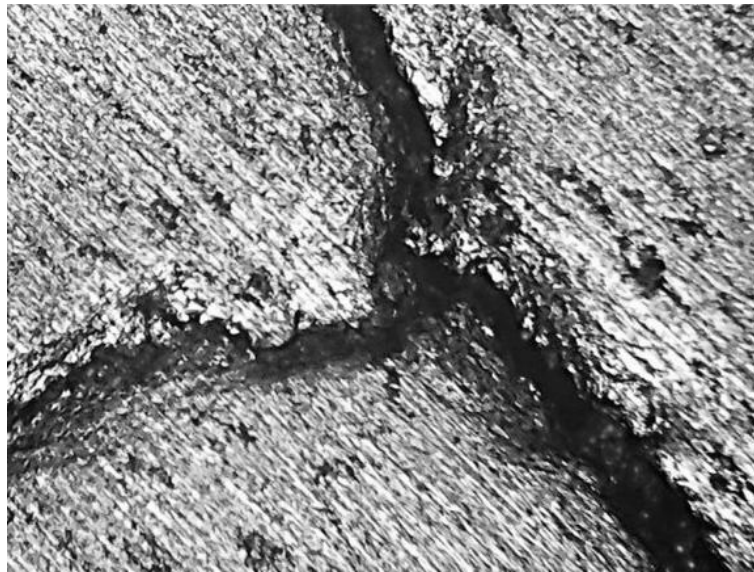
Probetas sin tratamiento térmico		
Lectura	Dureza HRC	
	Probeta 1	Probeta 2
1	17.50	19.00
2	19.00	18.50
3	20.00	19.50
4	20.00	18.00
5	20.00	18.00
Promedio	19.30	18.60

Dichos valores corresponden a la información que da el fabricante para el acero en cuestión antes de aplicarle cualquier tratamiento térmico.

Debe mencionarse que cuando se preparaban las muestras después del temple para su estudio metalográfico, un día después del desbaste y antes de su estudio metalográfico se observó una probeta templada en aceite fisurada como se muestra en la Figura 6.2, está recorría toda la longitud de la probeta quedando a muy poca distancia para romperse por completo, lo cual se puede explicar que, al ser templado en aceite, el acero estuvo sometido a un choque térmico muy severo produciendo esfuerzos internos muy grandes que condujeron a dicho agrietamiento, resumiendo, el temple se realizó en forma demasiado intensa y brusca en un medio no apto para la marca del acero.



a)



b)

Figura 6.2 a) *Probeta grado NACHI FAX55 templada a 1100°C en aceite con una fractura, b) Micrografía de un acero grado NACHI FAX-55 con una fractura en la probeta templada a 1100°C en aceite a 400X.*

Las probetas templadas en aire y aceite al ser observadas al microscopio dieron como resultado las micrografías que se muestran en las Figuras 6.3 y 6.4, dejando ver la presencia de carburos en una matriz martensítica y quizá algo de austenita sin transformar.

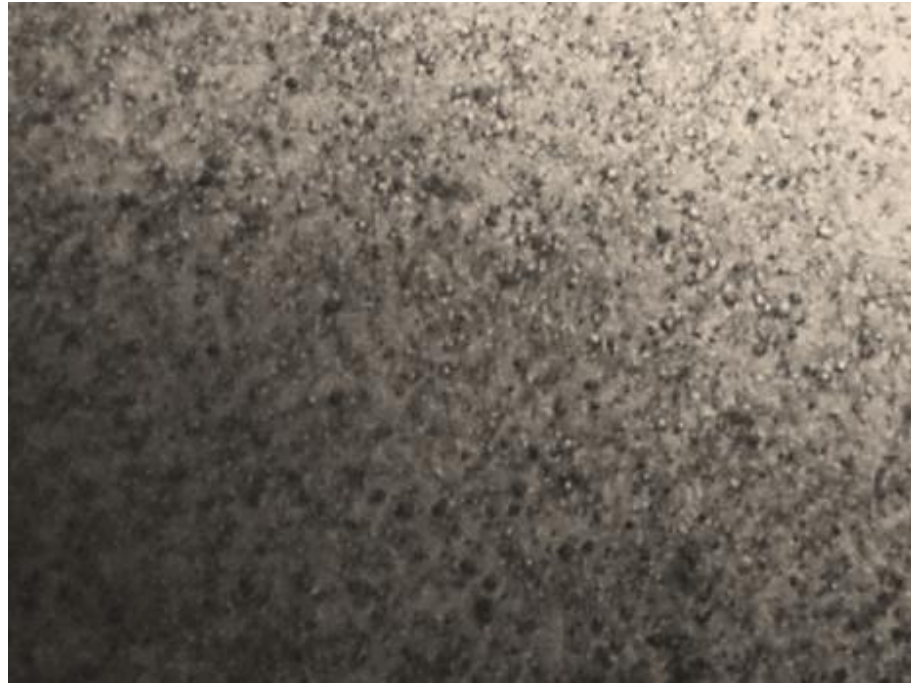


Figura 6.2 *Micrografía de un acero grado NACHI FAX-55 templado al aire a partir de 1100°C a 400X.*

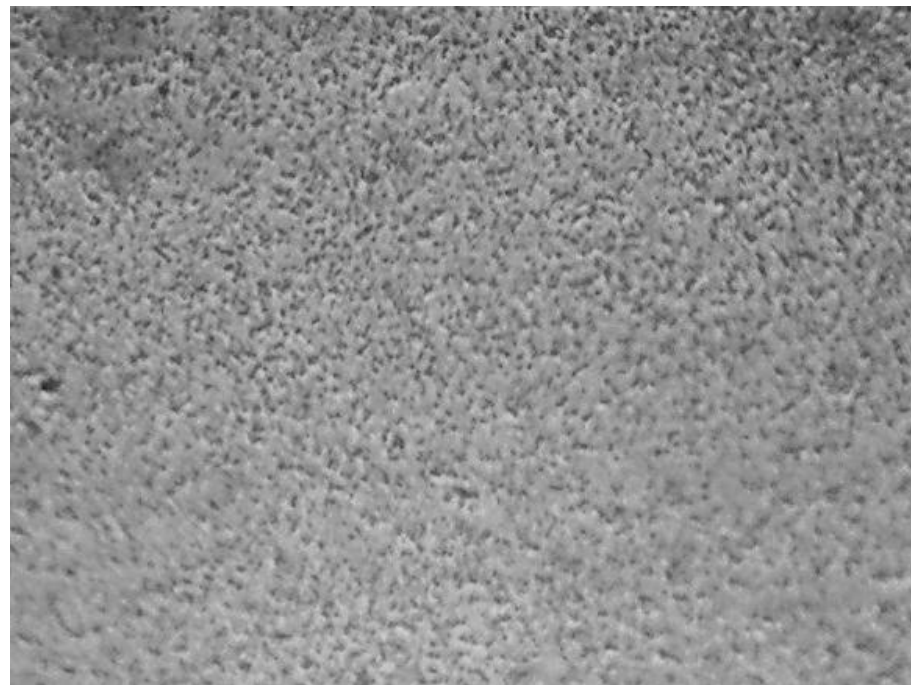


Figura 6.3 *Micrografía de un acero grado NACHI FAX-55 templado en aceite a partir de 1100°C a 400X.*

En la Tabla 6.2 se muestran los resultados de las 3 lecturas de dureza realizadas a las dos probetas templadas al aire, así como su promedio, mientras en la Tabla 6.3 se muestran las lecturas de dureza obtenidas en las dos probetas templadas en aceite.

Tabla 6.2 Dureza HRC de dos probetas grado NACHI FAX-55 templadas al aire a partir de 1100°C.

Probetas templadas al aire		
Lectura	Dureza HRC	
	Probeta 1	Probeta 2
1	53.50	54.00
2	53.00	54.00
3	53.80	53.00
Promedio	53.43	53.67

Tabla 6.3 Dureza HRC de dos probetas grado NACHI FAX-55 templadas en aceite durante 2min a partir de 1100°C.

Probetas templadas en aceite		
Lectura	Dureza HRC	
	Probeta 1	Probeta 2
1	54.00	54.00
2	55.00	54.50
3	54.50	54.00
Promedio	54.50	54.17

Los valores de dureza obtenidos muestran efectivamente un aumento sustancial de dureza, siendo muy semejantes en ambos medios de temple, sin embargo, quedaron por debajo de lo que establece el fabricante, esto es, no se alcanzaron durezas de más de 60 HRC, lo cual se podría atribuir a una cantidad excesiva de austenita retenida, esperando que con la descomposición de la misma mediante el tratamiento de revenido se pudieran alcanzar mayores valores de dureza.

Una vez aplicado el primer revenido a 600°C se obtuvieron las estructuras que se muestran en las micrografías de las Figuras 6.4 y 6.5, pudiéndose apreciar que son extremadamente fina y muy semejantes entre sí, haciendo énfasis en la necesidad de un microscopio con mayor capacidad de amplificación.

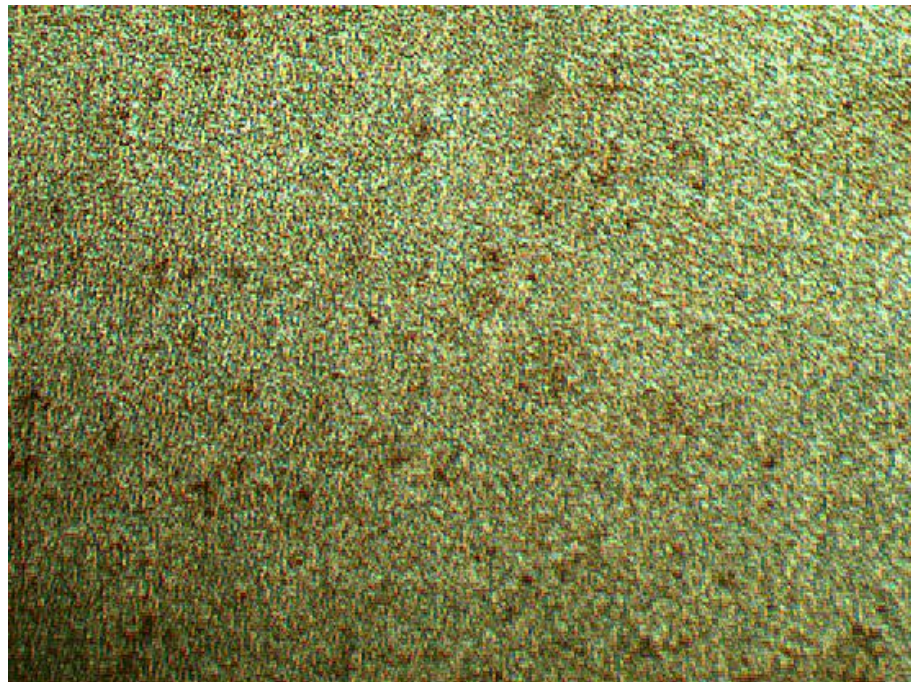


Figura 6.4 *Micrografía de un acero grado NACHI FAX-55 con temple al aire, después de aplicarle un revenido a 600°C, 400X.*

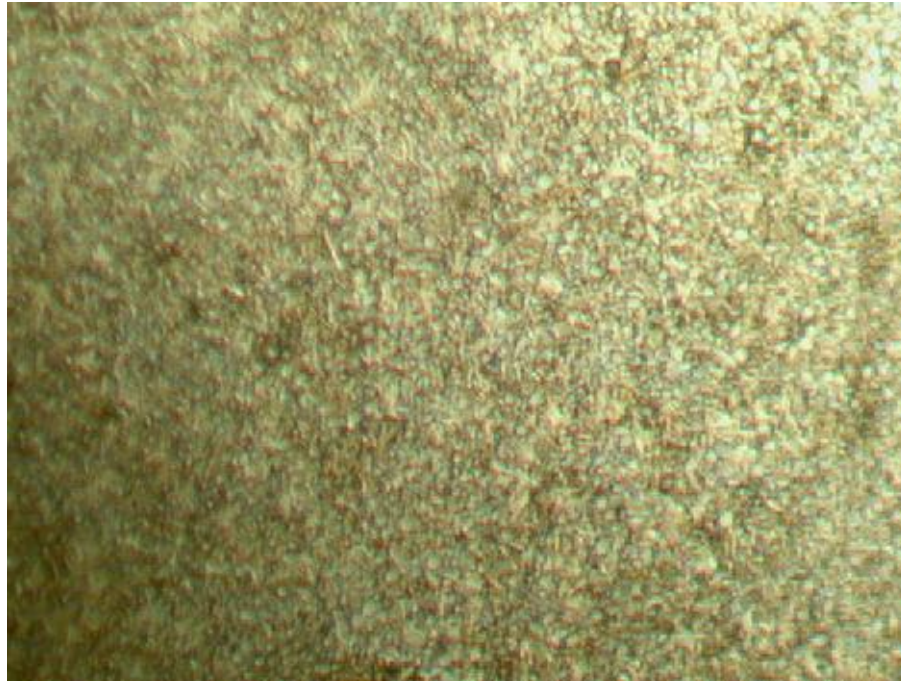


Figura 6.5. *Micrografía de un acero grado NACHI FAX-55 templado en aceite después de aplicarle un revenido a 600°C a 400X.*

En las Tablas 6.4 y 6.5 se muestran las durezas HRC obtenidas de las probetas grado NACHI FAX55 después de un primer revenido a 600°C.

Tabla 6.4 Dureza HRC de dos probetas grado NACHI FAX-55 templadas al aire después de un primer revenido a 600°C.

Probetas con primer revenido (Temple al aire)		
Lectura	Dureza HRC	
	Probeta 1	Probeta 2
1	53.00	55.00
2	53.00	55.00
3	53.00	55.50
Promedio	53.00	55.17

Tabla 6.5 Dureza HRC de dos probetas grado NACHI FAX-55 templadas en aceite después de un primer revenido a 600°C.

Probetas con primer revenido (Temple en aceite)		
Lectura	Dureza HRC	
	Probeta 1	Probeta 2
1	53.00	55.00
2	54.50	54.00
3	54.50	54.00
Promedio	54.00	54.33

Se puede establecer que la dureza después del primer revenido prácticamente se mantuvo constante con respecto a las probetas únicamente templadas, lo cual conduce a que si estaba presente la austenita retenida no se ha descompuesto y por consiguiente proporcione una mayor dureza.

Continuando con las observaciones de microestructura en el acero grado NACHI FAX55 en las Figuras 6.6 y 6.7 se muestran las estructuras obtenidas en el acero después de un segundo revenido.

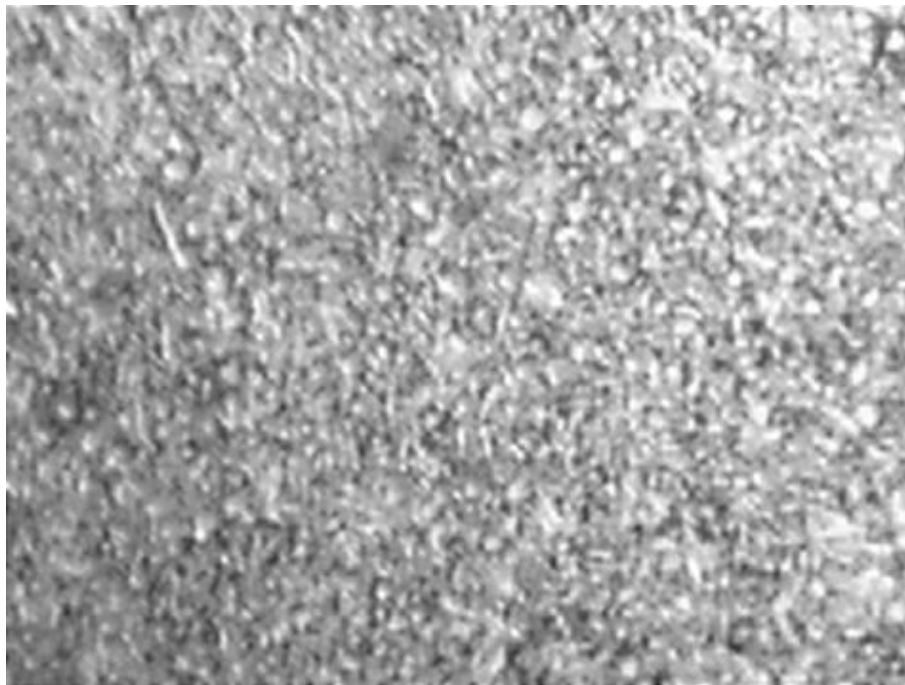


Figura 6.6 *Micrografía de un acero grado NACHI FAX-55 con temple al aire, después de aplicarle un segundo revenido a 600°C 400X, con cámara VGA especial para microscopio.*

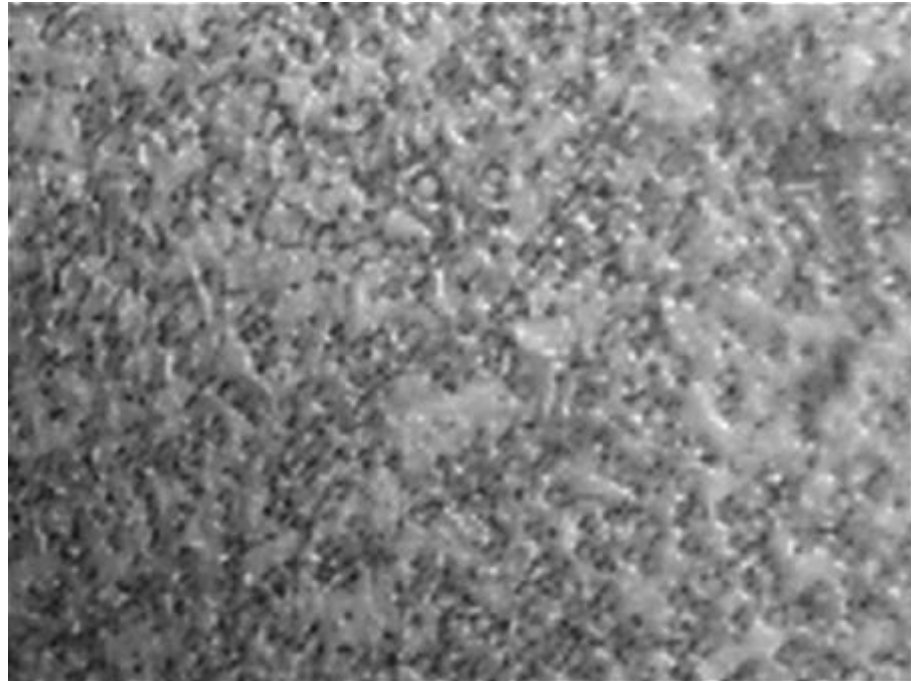


Figura 6.7 *Micrografía de un acero grado NACHI FAX-55 templado en aceite después de aplicarle un segundo revenido a 600°C previamente a 400X.*

Finalmente, se midió la dureza después de aplicarle el segundo revenido al acero grado NACHI FAX55 resumiendo los resultados en las Tablas 6.6 y 6.7 de las 4 probetas con este último tratamiento térmico las cuales las primeras dos corresponden a las muestras templadas en aire previamente, Tabla 6.6, mientras que las lecturas de la Tabla 6.7 corresponden a las probetas que se templaron en aceite.

Tabla 6.6 Dureza HRC de dos probetas grado NACHI FAX-55 con un segundo revenido a 600°C, donde su medio de temple fue al aire durante 1min a partir de 1100°C.

Probetas con segundo revenido (Temple en aire)		
Lectura	Dureza HRC	
	Probeta 1	Probeta 2
1	53.00	53.00
2	52.50	54.00
3	55.00	55.00
Promedio	53.50	54.00

Tabla 6.7 Dureza HRC de dos probetas grado NACHI FAX-55 con un segundo revenido a 600°C, donde su medio de temple fue en aceite durante 1min a partir de 1100°C.

Probetas con segundo revenido (Temple en aceite)		
Lectura	Dureza HRC	
	Probeta 1	Probeta 2
1	54.00	54.00
2	54.50	53.50
3	54.00	54.00
Promedio	54.17	53.83

Y nuevamente se puede ver que la dureza prácticamente permaneció constante, por lo que se asume que no hubo cambios apreciables en la microestructura del acero, luego, al no obtener lo que establece el fabricante se analizaron las distintas causas que pudieron haber causado tal discrepancia, concluyendo que pueden ser dos las posibles razones, a saber:

- Que el acero utilizado no tuviera la composición química especificada por el fabricante (recuérdese que fue una donación)
- La temperatura de temple que fue 100°C menor con respecto a la recomendada.

Para verificar la primera, se acudió con el estudiante de I.M.E., Vicente Flores Camacho quién trabaja en la empresa Gerdau Corsa quién hizo el favor de realizar un análisis de la composición química del acero objeto de esta tesis, para ello se utilizó un equipo marca Spectro, Figura 6.8.



Figura 6.8 *Espectrómetro de la marca Spectro perteneciente a la empresa Gerdau utilizado para obtener la composición química del acero.*

Después de preparar de manera adecuada la probeta, Figura 6.9, el técnico especializado realizó la prueba correspondiente y los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 6.10 a) y 6.10 b).



Figura 6.9. *Preparación de la muestra.*

Archivo Análisis y Datos Configuración de Operación Herramientas Vistas Ayuda

1023723900 - ZM2 - oswaldo 1023723900 - MOCF - oswaldo 1023724000 - ZM1 - oswaldo 1023724000 - ZM2 - oswaldo 1023724000 - MOCF - oswaldo 1023724100

Tarea: ACERO SIDERTUL
 Grado: QTB NACIONAL
 Estándar Tipo:
 Método: SIDERTUL

Parámetro	Valor
Fecha de Análisis	12/08/2016 02:53:55 a.m.
No. DE COLADA	1023724100
No. MUESTRA	ZM1
OPERADOR	oswaldo
Modo Promedio	Promediación Manual
Tabla de Tolerancia	Ninguno

Formato de GRADES Formato de SIDERTUL Status Verificación Grado : QTB NACIONAL

Elemento	Unidades		MED	
C	%	0.34 >)	1.68	0.39
Mn	%	0.55 <	0.32	0.65
Si	%	0.18	0.33	0.35
S	%	0.000 >	0.061	0.050
P	%	0.000	0.025	0.050
Cr	%	0.00 >	4.05	0.30
Ni	%	0.00	0.16	0.35
Cu	%	0.00	0.11	0.60
Sn	%	0.000	0.012	0.150
Al	%		0.015	
Mo	%		0.58	
V	%)	4.051	
Ti	%		0.002	
Nb	%		0.010	
Fe%	%		72.59	
CE	%		1.73	
B	%		0.0011	
Fe4	kcount		66.75	
Pb	%		0.00	
N	%)	0.1831	
			0.0038	

a)

Formato de GRADES Formato de SIDERTUL

Elemento	Unidades		MED	
C	%	0.34 >)	1.69	0.39
Mn	%	0.55 <	0.32	0.65
Si	%	0.18	0.33	0.35
S	%	0.000 >	0.054	0.050
P	%	0.000	0.023	0.050
Cr	%	0.00 >	4.10	0.30
Ni	%	0.00	0.16	0.35
Cu	%	0.00	0.11	0.60
Sn	%	0.000	0.011	0.150
Al	%		0.009	
Mo	%		0.57	
V	%)	3.917	
Ti	%		0.002	
Nb	%		0.009	
Fe%	%		72.93	
CE	%		1.76	
B	%		0.0011	
Fe4	kcount		68.74	
Pb	%		0.00	
N	%)	0.1540	
Zn	%		0.0034	
Rel Mn/S	%		5.98	

SID Ok Continuar Eliminar Muestra Incorr.

b)

Figura 6.10. a) Composición proporcionada por la computadora del espectrómetro
 b) Acercamiento a los resultados obtenidos.

En consecuencia y a pesar de que el análisis no incluyó al tungsteno, por el porcentaje presente de Fe (72.93%) y el 1.76% de carbono equivalente (CE) puede apreciarse que, el acero cumple con la composición química que proporciona la empresa NACHI. Luego, al encontrarse el C en cantidad suficiente, así como los demás elementos de aleación, principalmente, Cr y V definitivamente tiene que ser la temperatura utilizada para el temple que por cuestiones del equipo disponible en el laboratorio fue un poco menor a la recomendada, y en consecuencia no fue suficiente para que los carburos se dissociaran y difundieran sus elementos en la matriz. Luego, al enfriarse aproximadamente a 800°C los carburos precipitan en forma de partículas, más pequeñas y mejor distribuidas que ocasionan un aumento en la dureza del acero.

CONCLUSIONES

Después del trabajo realizado se pueden establecer las conclusiones siguientes:

- La estructura es muy uniforme en todas las microestructuras observadas, a pesar de la resolución del microscopio metalográfico utilizado, esto se traduce a que existen el mismo tamaño de partícula en toda la muestra favoreciendo a tener propiedades mecánicas mejores que con otros aceros, dado el grado de uniformidad de partícula.
- Como se tiene tamaño de partícula uniforme en la pieza, los valores de dureza obtenidos en el acero son homogéneos ya no difieren demasiado entre un punto y otro tal y como se pudo observar con los valores obtenidos.
- Las lecturas de dureza después del temple no son las esperadas, siendo relativamente bajas respecto al acero que se trabajó, se piensa que esto es debido a que la temperatura de temple no fue suficiente para que los carburos se dissociaran y difundieran sus elementos en la matriz ya que al enfriarse aproximadamente a 800°C los carburos precipitan en forma de partículas, más pequeñas y mejor distribuidas que ocasionan un aumento en la dureza del acero.
- No se obtuvo ni aumento ni disminuyó la dureza con los revenidos aplicados, posiblemente como consecuencia de lo explicado en el punto anterior.
- El aceite como medio de temple no fue el adecuado, tal como se pudo observar con la fractura de una de las probetas considerando que dicho medio es muy severo para dicho acero.
- Con el análisis químico se verificó la composición química del acero FAX55

REFERENCIAS

1. Degarmo E. P., Black J.T., & Kohser R. A. (1994). *Materiales y Procesos de Fabricación, Segunda Edición Volumen I*. Barcelona: Editorial Reverté S. A.
2. Altıng L.. (1990). *Manufacturing Engineering Processes, 3a edición*. New York: Marcel Dekker.
3. Pero-Sanz J.A.. (2004). *Aceros Metalúrgia Física, Selección y Diseño*. España: CIE DOSSAT 2000.
4. Apraiz J.. (2000). *Tratamientos Térmicos de los Aceros*. España: CIE DOSSAT 2000.
5. Schey J.A.. (2002). Metalurgia de polvos. En *Procesos de manufactura, tercera edición* (pp. 454-483). México: McGraw-Hill.
6. Mott R.L.. (2006). *Aceros para Herramientas*. En *Diseño de Elementos de Máquinas, Cuarta Edición* (p. 54). México: Pearson Educación.
7. Kalpakjian, S., & Schmid S. (2002). Aceros para herramienta y dados. En *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (pp.150-151). México: PEARSON EDUCACIÓN.
8. Appold, H., Feiler, K., Reinhard, A., & Schimidt, P. (2005). Aceros para herramientas. En *Tecnología de los Metales para Profesionales Técnico-Mecánicas* (p.75). Barcelona-España: EDITORIAL REVERTÉ.
9. Südeman H.. (1982). *Manual del Ingeniero, Vol. XII Tratamientos Térmicos de los Aceros*. España: URMO, S.A. de Ediciones.
10. Vander G.F.. (1984). *METALLOGRAPHY Principles and Practice*. New York: McGraw-Hill, Inc.
11. Copyright Höganäs AB. (2013, Diciembre). *Material and Powder Properties*. Höganäs Handbook for Sintered Components, 1.
12. Copyright Höganäs AB. (2013, Diciembre). *Production of Sintered Components*. Höganäs Handbook for Sintered Components, 2.
13. Copyright Höganäs AB. (2015, Abril). *Design and Mechanical Properties*. Höganäs Handbook for Sintered Components, 3, pp. 15.
14. Nachi-Fujikoshi corp. (2007). *Specialt Steels*. Marzo 02, 2016, de NACHI Sitio web: <http://www.nachi.de/files/s2001e-5.pdf>

15. Nachi-Fujikoshi Corp. (2014). *Specialty Steels FM Alloy*. Marzo 02, 2016, de NACHI Sitio web: <http://www.nachi.de/files/s2001e-5.pdf>
16. BÖHLER Edelstahl GmbH & Co KG. (2010). 3rd Generation MICROCLEAR, HIGH PERFORMANCE STEELS PRODUCED BY POWDER METALLURGY METHODS. abril 25, 2016, de BÖHLER Sitio web: http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/ST035DE_Microclean.pdf
17. BÖHLER EDELSTAHL GMBH & CO KG. (2003). BÖHLER-S290 MICROCLEAR, ACERO RAPIDO. abril 25, 2016, de BÖHLER Sitio web: [http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/S290FSp\(5\).pdf](http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/S290FSp(5).pdf)
18. BÖHLER EDELSTAHL GMBH & CO KG. (2005). BÖHLER-S390 MICROCLEAR, ACERO RAPIDO. abril 25, 2016, de BÖHLER Sitio web: [http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/S390FSp\(4\).pdf](http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/S390FSp(4).pdf)
19. BÖHLER EDELSTAHL GMBH. (2005). BÖHLER-S590 MICROCLEAR, ACERO RAPIDO. abril 25, 2016, de BÖHLER Sitio web: [http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/S590FSp\(6\).pdf](http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/S590FSp(6).pdf)
20. BÖHLER EDELSTAHL GMBH. (2005). BÖHLER-S690 MICROCLEAR, ACERO RAPIDO. abril 25, 2016, de BÖHLER Sitio web: [http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/S690FSp\(6\).pdf](http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/S690FSp(6).pdf)
21. BÖHLER EDELSTAHL GMBH. (2005). BÖHLER-S790 MICROCLEAR, ACERO RAPIDO. abril 25, 2016, de BÖHLER Sitio web: [http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/S790FSp\(5\).pdf](http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/S790FSp(5).pdf)
22. BÖHLER EDELSTAHL GMBH & CO KG. (2009). BÖHLER-K390 MICROCLEAR, ACERO PARA TRABAJO EN FRÍO. abril 25, 2016, de BÖHLER Sitio web: [http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/K390FSp\(4\).pdf](http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/K390FSp(4).pdf)
23. BÖHLER EDELSTAHL GMBH & CO KG. (2011). BÖHLER-K490 MICROCLEAR, ACERO PARA TRABAJO EN FRÍO. abril 25, 2016, de BÖHLER Sitio web: [http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/K490FSp\(1\).pdf](http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/K490FSp(1).pdf)
24. BÖHLER EDELSTAHL GMBH & CO KG. (2011). BÖHLER-K890 MICROCLEAR, ACERO PARA TRABAJO EN FRÍO. abril 25, 2016, de BÖHLER Sitio web: [http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/K890FSp\(5\).pdf](http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/K890FSp(5).pdf)

25. BÖHLER EDELSTAHL GMBH. (2006). BÖHLER-M390 MICROCLEAN, ACERO PARA TRABAJO EN FRÍO. abril 25, 2016, de BÖHLER Sitio web:
[http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/M390FSp\(5\).pdf](http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/M390FSp(5).pdf)
26. [Aceros Grado Herramienta]. (edición año 2014). Manual Técnico de Productos. abril 20, 2016, de CARPENTER, Aceros Fortuna Sitio web:
<http://www.acerosfortuna.com.mx/manualMTP/aceros-grado-herramienta/>
27. [Metalografía y Tratamientos Térmicos]. (Sin fecha). Aceros de Herramienta para Trabajo en Frío. abril 2016, de UTN Sitio web:
[http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_año/metalografia/17_Aceros_de_herramientas_\(frio\)_v2.pdf](http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_año/metalografia/17_Aceros_de_herramientas_(frio)_v2.pdf)
28. [Aceros Grado Herramienta]. (edición año 2014). *Manual Técnico de Productos*. abril 20, 2016, de CARPENTER, Aceros Fortuna Sitio web:
<http://www.acerosfortuna.com.mx/manualMTP/aceros-grado-herramienta/>
29. Erick Peralta - Aceros BOHLER. (2013). Aceros para Herramientas. febrero 12, 2016, de SENATI CANAL PERU Sitio web:
<https://www.youtube.com/watch?v=aAkSzyN0-Xc>
30. I. Q. Msc. Johnny F. Obando. (0000). *Subcero y Criogénico: El Frío, Secreto de los Fórmula Uno*. agosto 05, 2016, de METAL ACTUAL Sitio web:
http://metalactual.com/revista/21/procesos_cryo.pdf
31. S.D. (S.D.). DIAGRAMA HIERRO-CARBONO. agosto 10, 2016, de Tecnología de Materiales Sitio web:
http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m8/Apuntes_Tecnologia_Materiales.pdf