

**ATLAS METALOGRAFICO E INFLUENCIA DE LOS
TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS
DE LOS ACEROS**

**JOSÉ JOAQUIN MIRANDA BARRIOS
DANIEL EDUARDO PACHECO PADRÓN
LEÓN AUGUSTO ALFONSO SPATH ESQUIVEL**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA
CARTAGENA**

1997

**ATLAS METALOGRAFICO E INFLUENCIA DE LOS
TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS
DE LOS ACEROS**

**JOSÉ JOAQUIN MIRANDA BARRIOS
DANIEL EDUARDO PACHECO PADRÓN
LEÓN AUGUSTO ALFONSO SPATH ESQUIVEL**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial
para optar el título de Ingeniero Mecánico**

**Director
JORGE REYES M
Ingeniero Metalúrgico**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA
CARTAGENA**

1997

Cartagena, 9 de Enero de 1.997

Señores

COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO

Facultad de Ingeniería Mecánica

Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar

Ciudad

Estimados señores :

Atentamente nos permitimos presentar nuestro proyecto de grado titulado
**“ATLAS METALOGRAFICO E INFLUENCIA DE LOS
TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS
DE LOS ACEROS”**, como requisito parcial para optar el título de
Ingeniero Mecánico.

Cordialmente,

JOSÉ MIRANDA B

DANIEL PACHECO P

LEÓN SPATH E

Cartagena, 9 de Enero de 1.997

Señores

COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO

Facultad de Ingeniería Mecánica

Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar

Ciudad

Estimados señores :

Mediante la presente, les comunico que he dirigido a los estudiantes José Joaquin Miranda Barrios, Daniel Eduardo Pacheco Padrón y León Augusto Alfonso Spath Esquivel en su proyecto de grado titulado “**ATLAS METALOGRAFICO E INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS**”, presentado como requisito parcial para optar el título de Ingeniero Mecánico.

Cordialmente,

JORGE ALBERTO REYES MÉNDEZ
Ingeniero Metalúrgico

**La Corporación Universitaria
Tecnológica de Bolívar se reserva el
derecho de propiedad intelectual de
todos los trabajos de grado
aprobados y no pueden ser
explotados comercialmente sin su
autorización.**

DEDICATORIA

belleza de una familia cariñosa,

padres, José e Inés.

esposa Liliana.

hermanas.

A la

A mis

A mi

A mis

JOSÉ

JOAQUIN MIRANDA BARRIOS

DEDICATORIA

de mis padres, Eduardo y Leticia

de mis tías.

hermanas Patricia y Virginia.

confiar en mí.

Al esfuerzo

Al estímulo

A mis

Gracias por

DANIEL

EDUARDO PACHECO PADRÓN

DEDICATORIA

memoria de mi padre Alfonso

Blanca, quien me ha

en todo momento.

hermanas Diana y Rosaura.

su dedicación.

.

A la

A mi madre

acompañado

A mis

A Mayo, por

LEÓN

AUGUSTO ALFONSO SPATH E.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos a :

JAIME BATISTA, Ingeniero Metalúrgico.

RAUL PADRÓN CARVAJAL, Ingeniero Industrial.

PEDRO SALGADO PADRÓN, Ingeniero Químico.

MIGUEL GHISAYS GANEM, Médico.

JUSTO RAMOS, Decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la
Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar.

LISTA DE ANEXOS

- Anexo A. Características generales del AISI 1010
- Anexo B. Características generales del AISI 1016
- Anexo C. Características generales del AISI 1040
- Anexo D. Características generales del AISI 8615
- Anexo E. Características generales del AISI 12L14
- Anexo F. Características generales del AISI 4140
- Anexo G. Características generales del AISI 304
- Anexo H. Características generales del AISI 420 MOD.
- Anexo I. Características generales del AISI DF-2

RESUMEN

Este proyecto de grado, titulado “ATLAS METALOGRAFICO E INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS” se refiere al estudio de las variaciones microestructurales y mecánicas que sufren ciertos aceros al haber estado sometidos a diferentes tratamientos térmicos.

En el Capítulo “Introducción” se relata el desarrollo que ha tenido la metalografía a través del tiempo.

El Capítulo Uno titulado “ACEROS” se refiere a los diferentes procesos que se emplean para producir acero, como también a las formas que están distribuidos los átomos en los aceros.

El Capítulo Dos “TRATAMIENTOS TÉRMICOS”, es un estudio breve sobre los diferentes tipos de tratatamientos térmicos sin resaltar el proceso en sí. Estos se detallarán en el Capítulo Ocho.

El Capítulo Tres “EQUIPOS PARA LA REALIZACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS”, describe los diferentes tipos de hornos que se emplean para la realización de tratamientos térmicos.

El Capítulo Cuatro “ELEMENTOS PARA LA PRÁCTICA METALOGRAFICA” detalla todo el complejo proceso de la metalografía. En él se encontrará los pasos que se necesitan hacer para la preparación de

las probetas como son : Corte, desbaste, pulido y ataque, para la posterior observación al microscopio.

El Capítulo Cinco “ENSAYOS MECÁNICOS” describe los ensayos mecánicos más importantes para el análisis de las propiedades mecánicas como son : Ensayo de dureza y microdureza, el ensayo de tensión y el ensayo de fatiga.

El Capítulo Seis, “MEDIOS DE ENFRIAMIENTO”, trata sobre los diferentes medios que se utilizan para enfriar o templar las probetas al haber estado sometidas a un calentamiento.

El Capítulo Siete llamado “TAMAÑO DE GRANO” establece las pautas que se deben seguir para poder medir el tamaño de grano.

El Capítulo Ocho “PROCESOS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS” describe con más profundidad los diferentes procesos de tratamientos térmicos. En este Capítulo se explica el proceso a seguir, es decir, se detallan las variables temperatura-tiempo que influyen en la operación del tratamiento térmico.

El Capítulo Nueve “ACEROS ENSAYADOS” se nombran los aceros que se emplearon para la realización de dicho proyecto.

El Capítulo Diez “RESULTADOS”, se detallan las diferentes propiedades mecánicas y microestructurales que se obtuvieron en los diferentes aceros después de haber sido sometidos a diferentes tratamientos térmicos.

En el Capítulo Once, “CONCLUSIONES”, se analizan los resultados obtenidos y descritos en el Capítulo anterior.

En el Capítulo Doce “RECOMENDACIONES”, se dan unas sugerencias para continuar y ampliar nuestra investigación.

Se incluye en este trabajo los anexos, a los que se hace referencia en el cuerpo del trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. ACEROS	5
1.1 GENERALIDADES	5
1.1.1 Producción del acero	5
1.1.1.1 Proceso Bessemer	6
1.1.1.2 Proceso Thomas con aire enriquecido	6
1.1.1.3 Proceso Thomas con oxígeno-vapor y oxígeno-CO ₂	7
1.1.1.4 Proceso de oxiconvertidores	7
1.1.1.5 Proceso Kaldo	8
1.1.1.6 Siemens Martin	8
1.1.1.7 Hornos eléctricos de arco	9
1.2 ESTRUCTURAS CRISTALINAS	9
1.2.1 Generalidades	9
1.2.2 Disposición de los átomos	10
1.2.2.1 Disposición cúbica centrada (CC)	10
1.2.2.2 Disposición cúbica centrada en las caras (CCC)	12
1.2.2.3 Disposición hexagonal	15
1.2.3 Estructura de las aleaciones metálicas	17
1.2.3.1 Cristales simples	17
1.2.3.2 Cristales de compuestos químicos	19
1.2.3.3 Cristales de solución sólida	21

1.2.4	Características de las aleaciones	23
1.2.5	Aleación hierro-carbono	23
1.2.5.1	El diagrama hierro-carburo de hierro	23
2.	TRATAMIENTOS TÉRMICOS	36
2.1	GENERALIDADES	36
2.2	CLASES	37
2.2.1	Normalizado del acero	37
2.2.2	Temple del acero	39
2.2.3	Revenido	39
2.2.4	Recocido del acero	40
2.2.5	Cementación	42
2.2.6	Carbonitruración	44
2.2.7	Nitruración	44
3.	EQUIPOS PARA LA REALIZACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS	46
3.1	GENERALIDADES	46
3.2	HORNOS PARA CALENTAMIENTO	47
3.2.1	Hornos de carga única o no continuos	47
3.2.2	Hornos de operación continua	48
3.2.3	Hornos de atmósfera controlada	51
3.2.4	Hornos de lecho fluidizado	55
3.2.5	Hornos de vacío	56
3.3	HORNOS PARA TRATAMIENTOS ISOTÉRMICOS	60
3.3.1	Hornos de baños de sales	60

3.4 EQUIPO PARA TRATAMIENTOS TÉRMICO	
POR INDUCCIÓN	64
3.4.1 Inductores de temple	65
4. ELEMENTOS PARA LA PRÁCTICA	
METALGRÁFICA	77
4.1 GENERALIDADES	77
4.2 EQUIPOS PARA LA PREPARACIÓN DE LAS	
PROBETAS	79
4.2.1 Toma de muestras	79
4.2.2 Desbaste a mano	81
4.2.2.1 Desbaste grosero	81
4.2.2.2 Desbaste intermedio	82
4.2.2.3 Desbaste final	83
4.2.3 Pulido	83
4.2.3.1 Pulido metalográfico	84
4.2.3.2 Abrasivos para el pulido metalográfico	84
4.2.3.3 Paños para pulir	86
4.2.4 Pulido preliminar	87
4.2.5 Pulido final	88
4.2.6 Pulido electrolítico	89
4.2.6.1 Fundamentos y aparatos	90
4.3 REACTIVOS QUÍMICOS	91
4.3.1 Ataque de las probetas para su examen	
microscópico	91

4.3.2	Reactivos de ataque	91
4.3.3	Mecanismo del ataque	95
4.3.4	Métodos de ataque	95
4.3.4.1	Tiempo de ataque	97
4.3.5	Ataque electrolítico	98
4.4	MICROSCOPIOS Y MICROFOTOGRAFÍA	99
4.4.1	Análisis microscópico	99
4.4.2	Microscopio metalográfico	100
4.4.2.1	Aparato de iluminación	102
4.4.2.2	Objetivos	102
4.4.2.3	Oculares	107
4.4.3	Microfotografía	109
4.4.3.1	Métodos de enfoque	109
4.4.3.2	Determinación de la exposición correcta	110
4.4.4	Reproducciones fotográficas	111
5.	ENSAYOS MECÁNICOS	112
5.1	GENERALIDADES	112
5.2	ENSAYO DE DUREZA	113
5.2.1	El ensayo Brinell	114
5.2.1.1	Maquina para el ensayo	114
5.2.1.2	Penetradores y carga	114
5.2.1.3	Métodos para medir la huella producida por la bola	115
5.2.1.4	Estado de la superficie de la probeta	116

5.2.1.5	Espesor mínimo de la sección ensayada	116
5.2.2	El ensayo Armstrong-Vickers	117
5.2.2.1	Penetradores y carga	118
5.2.2.2	Medida de la huella	118
5.2.2.3	Estado de la superficie a ensayar	119
5.2.2.4	Espesores mínimos de las piezas ensayadas	119
5.2.3	El ensayo Rockwell	119
5.2.3.1	Maquina de ensayo	119
5.2.3.2	Penetradores	119
5.2.3.3	Escalas de dureza Rockwell	120
5.2.3.4	Estado de la superficie de la probeta	121
5.2.4	El ensayo Rockwell de dureza superficial	121
5.2.4.1	Introducción	121
5.2.5	El microdurómetro Eberbach	122
5.2.5.1	Generalidades	122
5.2.5.2	Penetradores y carga	122
5.2.5.3	Medida de la huella	123
5.2.5.4	Estado de la superficie ensayada	123
5.3	ENSAYO DE TRACCIÓN	123
5.3.1	Generalidades	123
5.3.1.1	Condiciones de los materiales sometidos a carga de tracción	124
5.3.1.2	Límite proporcional	124
5.3.1.3	Límite elástico	126

5.3.1.4 Punto de cedencia o fluencia	126
5.3.1.5 Resistencia última	126
5.3.1.6 Resistencia a la tracción	127
5.3.1.7 Resistencia a la compresión	127
5.3.1.8 Esfuerzo a la ruptura	127
5.4 ENSAYO DE FATIGA	128
5.4.1 Generalidades	128
5.4.2 Diseño de la probeta	129
5.4.3 Preparación de la probeta	132
6. MEDIOS DE ENFRIAMIENTO	133
6.1 AGUA	133
6.2 SALMUERA	135
6.3 SOLUCIONES DE ALCOHOL POLIVÍNILICO	140
6.4 ACEITES COMO MEDIOS TEMPLANTES	143
6.4.1 Características de enfriamiento	144
6.4.2 Operación y control	147
6.4.3 Selección del aceite para temprar	150
7. TAMAÑO DE GRANO	152
7.1 GENERALIDADES	152
7.2 MÉTODOS PARA REVELAR EL TAMAÑO DE GRANO	152
7.2.1 En aceros al carbono hipoeutectoides	152
7.2.2 Aceros al carbono eutectoides	153
7.2.3 Aceros hipereutectoides	154

7.3 MEDIDA DEL TAMAÑO DE GRANO	154
8. PROCESOS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS	156
8.1 GENERALIDADES	156
8.2 NORMALIZADO DEL ACERO	156
8.2.1 Empleo del normalizado	157
8.2.2 Normalización de aceros al carbono	158
8.2.3 Normalizado de aceros aleados	159
8.2.4 Normalización de barras y productos tubulares	161
8.3 TEMPLE DEL ACERO	162
8.3.1 Generalidades	162
8.3.2 Variables principales	162
8.3.3 Curvas de enfriamiento	165
8.3.3.1 Agitación	169
8.3.3.2 Temperatura del medio templante	169
8.3.4 Aspectos metalográficos	170
8.3.4.1 Contenido de carbono y la templabilidad	172
8.3.5 Velocidades de enfriamiento	174
8.3.6 Templabilidad de los aceros	175
8.3.6.1 Ensayo de Jominy	175
8.4 REVENIDO DE LOS ACEROS	183
8.4.1 Generalidades	183
8.4.2 Baños de sales fundidas	184
8.4.3 Baños de aceites	185
8.4.4 Baños de metales fundidos	185

8.4.5	Revenido apropiado	186
8.4.6	Revenidos múltiples	187
8.5	RECOCIDO DE LOS ACEROS	189
8.5.1	Generalidades	189
8.5.2	Temperaturas de recocido	195
8.5.3	El proceso de recocido	198
8.5.4	Esferoidización	199
8.5.5	Recocido isotérmico	201
8.5.6	Recocido de aceros forjados	203
8.6	CEMENTACION LIQUIDA DE LOS ACEROS	204
8.6.1	Generalidades	204
8.6.2	Tipos de baños	204
8.6.3	Gradientes de carbono	210
8.6.4	Medios de temple	211
9.	ACEROS ENSAYADOS	214
10.	RESULTADOS	215
10.1	GENERALIDADES	215
10.2	RESULTADOS DEL ENSAYO JOMINY	216
10.3	RESULTADOS DEL ENSAYO DE TENSIÓN	226
10.4	CONDICIONES DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS	236
10.5	RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA	242
11.	CONCLUSIONES	246
11.1	GENERALIDADES	246
11.2	ASPECTOS ECONÓMICOS	247

11.3 NORMALIZADO	248
11.4 RECOCIDO	249
11.5 TEMPLE	249
11.6 CEMENTACIÓN	249
11.7 ENSAYO JOMINY	250
11.8 FUNDICIÓN	250
11.9 MICRODUREZA	251
11.10 ATAQUE QUÍMICO	251
11.11 ENSAYO DE TENSIÓN	251
12. RECOMENDACIONES	253
BIBLIOGRAFÍA	255
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Disposición cúbica centrada (CC)	11
Figura 2. Disposición cúbica centrada en las caras (CCC)	13
Figura 3. Disposición hexagonal	16
Figura 4. Cristales simples	18
Figura 5. Cristales de compuestos químicos	20
Figura 6. Cristales de solución sólida	22
Figura 7. Diagrama hierro-carburo de hierro	26
Figura 8. Disposiciones típicas inductor-pieza de temple	66
Figura 9. Inductor con ducha (temple estático)	68
Figura 10. Distribución de corriente inducida y temperatura	70
Figura 11. Inductores de formas especiales	72
Figura 12. Sistema de temple progresivo	74
Figura 13. Principio de inductor lineal	76
Figura 14. Microscopio metalográfico	101
Figura 15. Diagramas esfuerzo- deformación en tracción	125
Figura 16. Diseño de la probeta para el ensayo de fatiga	131
Figura 17. Curvas de enfriamiento en agua y salmuera (10% de cloruro de sodio) a 25°C (curvas A y C) y a 50°C (curvas B y D)	138

Figura 18. Curvas de enfriamiento en soluciones de alcohol polivinílico de distintas concentraciones y temperaturas	142
Figura 19. Curvas de enfriamiento para un acero rápido, uno convencional y un aceite rápido contaminado con 0,25% de agua	146
Figura 20. Efecto de diferentes porcentajes de agua sobre el comportamiento de un aceite rápido	149
Figura 21. Curvas de enfriamiento para el centro y la superficie de una probeta templada en agua	167
Figura 22. Diagrama TTT para un acero SAE 3140	171
Figura 23. Efecto del contenido de carbono sobre la dureza de temple cuando la estructura resultante contiene 99,9%; 90% y 50% de martensita	173
Figura 24. Dispositivo de temple para probetas en el ensayo de Jominy	177
Figura 25. Esquema de probeta preferente para el ensayo Jominy	179

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Espesores mínimos para secciones a ensayar	117
Cuadro 2. Correlación de la concentración de cloruro de sodio con otras medidas	140
Cuadro 3. Propiedades típicas para aceites de temple convencionales y rápidos	144
Cuadro 4. Número (n) de tamaños de grano	155
Cuadro 5. Temperaturas típicas de normalizado para aceros simples al carbono	159
Cuadro 6. Temperaturas típicas de normalizado para aceros aleados	161
Cuadro 7. Composición y temperaturas de operación de baños de sales usadas en el revenido	184
Cuadro 8. Temperaturas recomendadas y ciclos de enfriamiento para un recocido total de pequeños aceros al carbono forjados (a)	196
Cuadro 9. Temperaturas de recocido recomendadas para aceros aleados (para enfriamiento al horno)	197
Cuadro 10. Temperaturas recomendadas y ciclos de tiempo para recocido de aceros aleados (c)	198
Cuadro 11. Composiciones para la operación de baños de cementación líquida	205
Cuadro 12. Relación temperatura de operación a contenido de cianuro de sodio en los baños de cementación líquida	208
Cuadro 13. Templabilidad del AISI/SAE 1010	217
Cuadro 14. Templabilidad del AISI/SAE 1016	218
Cuadro 15. Templabilidad del AISI/SAE 1040	219

Cuadro 16. Templabilidad del AISI/SAE 8615	200
Cuadro 17. Templabilidad del AISI/SAE 12L14	221
Cuadro 18. Templabilidad del AISI/SAE 4140	222
Cuadro 19. Templabilidad del AISI/SAE 304	223
Cuadro 20. Templabilidad del AISI/SAE 420 MOD.	224
Cuadro 21. Templabilidad del AISI/SAE DF-2	225
Cuadro 22. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 1010	227
Cuadro 23. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 1016	228
Cuadro 24. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 1040	229
Cuadro 25. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 8615	230
Cuadro 26. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 12L14	231
Cuadro 27. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 4140	232
Cuadro 28. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 304	233
Cuadro 29. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 420 MOD.	234
Cuadro 30. Propiedades mecánicas del AISI/SAE DF-2	235
Cuadro 31. Condiciones de tratamientos térmicos del AISI/SAE 1010	237
Cuadro 32. Condiciones de tratamientos térmicos del AISI/SAE 1016	237
Cuadro 33. Condiciones de tratamientos térmicos del AISI/SAE 1040	238
Cuadro 34. Condiciones de tratamientos térmicos del AISI/SAE 8615	238
Cuadro 35. Condiciones de tratamientos térmicos del AISI/SAE 12L14	239
Cuadro 36. Condiciones de tratamientos térmicos del AISI/SAE 4140	239

Cuadro 37. Condiciones de tratamientos térmicos del AISI/SAE DF-2	240
Cuadro 38. Condiciones de tratamientos térmicos del AISI/SAE 304	240
Cuadro 39. Condiciones de tratamientos térmicos del AISI/SAE 420 MOD.	241
Cuadro 40. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 1010	243
Cuadro 41. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 1016	243
Cuadro 42. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 1040	243
Cuadro 43. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 12L14	243
Cuadro 44. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 8615	244
Cuadro 45. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 4140	244
Cuadro 46. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE DF-2	244
Cuadro 47. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 304	244
Cuadro 48. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 420 MOD.	245

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Metals handbook : heat-treating, cleaning and finishing. 8 ed. United States of America : ASM, 1964. V. 1.

ASKELAND, Donald R. La ciencia e ingeniería de los materiales. México D.F. : Grupo Editorial Iberoamérica, 1987. 543 p.

ASTIGARRAGA, Julio y AGUIRRE, José Luis. Hornos industriales de inducción : teoría, cálculo y aplicaciones. Madrid, España : McGraw-Hill, 1995. P. 121, 130-132 (Electrotecnologías ; no.8).

DE GRINBERG, María K. Tratamientos térmicos y sus prácticas de laboratorio. México D.F. : Limusa, 1989. 217 p.

DOYLE, Lawrence et al. Procesos y materiales de manufactura para ingenieros. 3 ed. Naucalpan de Juárez, México : Prentice Hall Hispanoamericana, 1988. P. 76-105.

KEHL, George L. Fundamentos de la práctica METALOGRAFICA. 3 ed. Madrid, España : Aguilar, 1949. 503 p.

LUCCHESI, Doménico. Metalotecnica. Barcelona, España : Labor, 1973. 131 p. (Nuevos manuales técnicos labor ; no. 12).

REED-HILL, Robert E. Principios de metalurgia física. 2 ed. México D.F. Compañía Editorial Continental, 1971. 757 p.

VALENCIA, Asdrúbal. Tecnología del tratamiento térmico de los metales. 2 ed. Medellín, Colombia : Universidad de Antioquia, 1992. 629 p.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería y la industria utilizan grandes cantidades de metales y aleaciones debido a sus propiedades mecánicas; es decir, a su capacidad de soportar las cargas a que están sometidos en servicio. Esas características dependen de la estructura íntima de los materiales - cristalina o granular - y están relacionados directamente con la composición química y las condiciones de servicio. Por estas razón, el control de la estructura interna, o microestructura, permite producir metales y aleaciones con propiedades adecuadas para las distintas aplicaciones. El medio más común, seguro y eficiente para controlar esa estructura es el tratamiento térmico.

El objeto fundamental de los tratamientos térmicos es el de mejorar las propiedades y características de los aceros, consistiendo éste en calentar y mantener las piezas y herramientas de acero a temperaturas adecuadas, durante cierto tiempo y enfriarlas luego en condiciones convenientes.

Los factores principales para un tratamiento térmico son el tiempo y la temperatura, y hay que fijarlos siempre, de acuerdo con la composición del acero, la forma y el tamaño de las piezas y las características que se desean obtener.

El estudio de los procesos de tratamiento térmico del acero comenzó con el descubrimiento efectuado por D. K. CHERNOV de los puntos críticos del acero en 1.868.

El postulado de Chernov acerca de que las propiedades de los aceros se determinaban por la estructura y que ésta última depende de la temperatura de calentamiento y de la rapidez del enfriamiento, fue realmente reconocido y durante los decenios siguientes los investigadores establecieron la relación entre la estructura y las condiciones de su formación (principalmente la temperatura de calentamiento y la velocidad de enfriamiento).

Los éxitos fundamentales en la teoría del tratamiento térmico fueron alcanzados a finales de los años 20 y principio de los 30 de nuestro siglo. Poco a poco los investigadores llegaron al convencimiento de que el carácter de las estructuras está determinado por la temperatura de su formación.

Para comprender los procesos que ocurren durante el tratamiento térmico hay que estudiar la cinética de las transformaciones a diferentes temperaturas y los factores que influyen en dicha cinética.

Estas ideas sirvieron de base a los experimentos multilaterales realizados por S. S. SHTEINBERG.

Como resultado de las experiencias sistemáticas orientadas a un solo fin, la investigación de la cinética de las transformaciones que tiene lugar el acero, de S. S. SHTEINBERG y de sus discípulos y seguidores se consiguieron unir abundante material experimental, que una vez generalizado, constituyó la base de las ideas modernas sobre las transformaciones que tiene lugar en el acero y de la teoría moderna del tratamiento térmico del acero.

Al mismo tiempo o quizás un poco más tarde pero en la misma dirección en que trabajaba la escuela de Shteinberg comenzaron otros científicos como son los norteamericanos MELL y BAIN y los alemanes WEBER, HANNEMAN y ESSER, los cuales en numerosas y profundas investigaciones estudiaron la cinética de las transformaciones en aceros diversos por su composición.

Existen muchos tipos de tratamientos térmicos pero los más usados son el temple, revenido, recocido, normalizado, cementación, nitruración, temple en baños de sales, temple en baños de plomo, etc.

1. ACEROS

1.1 GENERALIDADES

1.1.1 Producción del acero. Los variados procesos para producir acero serán expuestos a fin de presentar su importancia.

La comisión económica para Europa publicó en 1.963 el informe ST/ECE/STEEL sobre los procedimientos de fabricación de acero actualmente en uso:

- Bessemer.
- Thomas normal, con aire enriquecido, con oxígeno-vapor y con oxígeno-CO₂.
- LD, LD-AC y LD-Pompey.
- Kaldo.
- Siemens Martin.
- Hornos eléctricos de arco básico.

Se han excluido el rotor, los hornos de arco ácido, los de inducción y los de vacío, por el poco tonelaje de acero que se produce en ellos.

1.1.1.1 Proceso Bessemer. En estos equipos se obtiene acero por conversión. Es un proceso para descarburar el arrabio quemando el carbono con el oxígeno del aire que atraviesa la masa fundida, realizando la operación en unos hornos llamados convertidores.

Son recipientes de chapas de acero, con forma de pera, revestidos interiormente por refractario y con un fondo perforado para permitir la entrada de aire.

Si el revestimiento es ácido, el convertidor es Bessemer y la principal fuente de calor es de la oxidación del silicio. Si el revestimiento es básico el convertidor se llamará Thomas y el calor provendrá de la oxidación del fósforo.

A estos equipos se les carga con arrabio líquido.

La diferencia más notable entre el procedimiento Bessemer y el Thomas es la adición de cal en el curso de la operación de éste último procedimiento.

1.1.1.2 Proceso Thomas con aire enriquecido. Al enriquecer el aire soplado con oxígeno se consigue un aumento de la productividad, pues como disminuye el tiempo del soplado, se produce acero en menos tiempo. Esta disminución varía de 20 a 30%.

Aumentar el porcentaje de chatarra que se puede cargar, mejora la calidad del acero porque se disminuye el contenido de nitrógeno.

1.1.1.3 Procesos Thomas con oxígeno-vapor y oxígeno-CO₂. Para reducir la elevación de temperatura producida por el exceso de oxígeno en el proceso de soplado en los convertidores Thomas con aire enriquecido, se pensó en sustituir el aire por un fluido artificial, formado por oxígeno puro y un gas inerte, como vapor de agua o CO₂ en la proporción uno a uno. Con estas mezclas totalmente exentas de nitrógeno se consigue una mayor temperatura y, por tanto, mayor rapidez en la conversión y la posibilidad de

fundir más chatarra y, sobre todo, el acero obtenido está prácticamente sin nitrógeno.

1.1.1.4 Proceso de oxiconvertidores. Son equipos en los cuales se sopla oxígeno puro, y presentan distintas variantes:

. **Oxiconvertidores LD.** Se transforma la carga de arrabio líquido en acero, insuflando oxígeno sobre su masa por medio de una lanza refrigerada por agua

Se utiliza para éste proceso convertidores similares a los Thomas.

La carga esta formada por arrabio líquido y chatarra, efectuándose durante el soplado adiciones de cal y mineral de hierro. Se obtienen aceros en menos tiempo y permite mayor adición de chatarra, el único inconveniente es que no se puede trabajar arrabio con contenido de fósforo superior al 0,5%.

- **Oxiconvertidor LD-AC.** Se emplean para trabajar arrabio con fósforo mayor a 0,5%. El procedimiento consiste en inyectar junto con el oxígeno, cal pulverizada.
- **Oxiconvertidor LD-Pompey.** En este proceso se emplea la escoria que se ha retirado en el proceso descrito anteriormente y se completa la carga de cal con adición directamente al baño.

1.1.1.5 Proceso Kaldo. Se emplea una sola lanza para soplar oxígeno sobre el baño, además, el convertidor gira sobre un eje durante el proceso.

El proceso Kaldo es de mayor rendimiento térmico, debido a que la mayor parte del CO formado se transforma al CO₂ antes de salir del horno. El incremento de calorías que esto supone, permite la fusión de un gran porcentaje de chatarra hasta un 40%.

El único inconveniente es el elevado consumo de refractario.

1.1.1.6 Siemens Martin. Son hornos de solera revestido de material refractario ácido o básico. Estos hornos se pueden cargar de arrabio fundido, chatarra y mineral de hierro.

Estos equipos producen un gran volumen de acero.

Para calentarse lo hacen mediante quemadores que emplean combustible sólido y líquido.

1.1.1.7 Hornos eléctricos de arco. Están formados por un cuba de chapa de acero revestida de material refractario, provista de electrodos de grafito.

Este equipo carga chatarra y en él se obtienen aceros con composiciones bastante precisas.

1.2 ESTRUCTURAS CRISTALINAS

1.2.1 Generalidades. Los metales se obtienen generalmente por vía de fusión y, por lo tanto, su estructura está constituida por cristales que se forman durante la solidificación del metal líquido.

Los cristales no se forman instantáneamente: Se inician en varios puntos del líquido denominados centros de cristalización y luego se extienden por toda la masa, más o menos rápidamente según sea la velocidad de enfriamiento.

Cristales elementales. Un cristal elemental está formado por una red de forma poliédrica sencilla, resultante de las posiciones que toman los átomos durante la solidificación.

La forma de los cristales, su posición y el tamaño de los átomos dependen de la naturaleza del metal de que se trate, y para un mismo metal, de los tratamientos térmicos a que se haya estado sometido y forma de haberlos realizado.

1.2.2 Disposición de los átomos. Por no ser posible la observación directa de los átomos, éstos se consideran convencionalmente como sólidos y esféricos. En los cristales elementales, los átomos pueden estar situados en tres disposiciones características: cúbica centrada (CC), cúbica centrada en las caras (CCC) y hexagonal.

1.2.2.1 Disposición cúbica centrada (CC). Esta formada por 9 átomos dispuestos como se indica en la Figura 1.

Figura 1. Disposición cúbica centrada (CC)

Los tres átomos alineados, según la diagonal, están en contacto entre sí y, por lo tanto, si d es su diámetro, tendremos:

$$d = \frac{a\sqrt{3}}{2}$$

de donde se deduce la arista del cubo:

$$a = \frac{2d}{\sqrt{3}} = \frac{2d\sqrt{3}}{3}$$

Para el hierro, siendo $d = 2,48 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-7} \text{ mm}$), resulta:

$$a = 2,86 \text{ \AA}$$

Esta disposición es característica del hierro α , del molibdeno, del cromo, del tantalio, del tungsteno, del vanadio y, en general de los metales más duros.

1.2.2.2 Disposición cúbica centrada en las caras (CCC). Está formada por 14 átomos, dispuestos como se indica en la Figura 2.

Figura 2. Disposición cúbica centrada en las caras (CCC)

Los átomos están en contacto entre sí sobre las diagonales de las caras y por lo tanto:

$$2d = a\sqrt{2}, \text{ de donde } a = \frac{2d}{\sqrt{2}} = d\sqrt{2}$$

que para el hierro resulta:

$$a=3,507 \text{ \AA}$$

Para un elemento dado, los cristales centrados en las caras son más grandes que los centrados en el cuerpo.

Los cristales centrados en las caras pueden, algunas veces, acoger en su interior algunos átomos de otro elemento, fenómeno que se da en los cristales de Fe γ que pueden contener átomos de carbono.

Esta disposición es característica del hierro γ , del aluminio, de la plata, del platino, del níquel, del plomo, del cobre, del oro y, en general, de los metales más dúctiles.

1.2.2.3 Disposición hexagonal. Consta de 17 átomos: 14 de ellos delimitando un prisma hexagonal, y los otros 3 en los centros de cada uno de los prismas romboidales en que se puede descomponer el prisma hexagonal. Como se indica en la figura 3.

Los átomos están en contacto sobre los lados de los rombos de base y, por lo tanto, $a=d$.

La altura del prisma es mayor que los lados de la base; por término medio $h=1,663a$.

La disposición hexagonal es característica del cadmio, del cobalto, del magnesio, del titanio, del zinc, y en general de los metales frágiles.

En el cadmio y el zinc, $h=1,756a$; son menos frágiles que el magnesio.

Figura 3. Disposición hexagonal

1.2.3 Estructura de las aleaciones metálicas. Se entiende por aleación metálica un agregado cristalino íntimo de dos o más metales o de metales y metaloides.

Se obtienen las aleaciones fundiendo los varios componentes en un único crisol, y dejando enfriar la solución líquida, que al solidificar toma una estructura cristalina casi siempre apreciable a simple vista.

En el paso del estado líquido al sólido, los componentes pueden unirse entre sí de tres formas distintas:

- Por mezcla simple
- Por combinación química
- Por solución sólida

Por consiguiente, en la aleación pueden encontrarse: cristales simples; cristales de compuestos químicos y cristales de soluciones sólidas.

1.2.3.1 Cristales simples. Están formados por los componentes A y B cristalizados separada y simultáneamente, como se muestra en la figura 4

Figura 4. Cristales simples

La aleación, llamada eutéctica, esta formada por una mezcla íntima de cristales cada uno de los cuales consta de un sólo componente; metal puro, compuesto químico, solución sólida.

El nombre de eutéctico, que significa funde bien, es debido a que su punto de fusión es el más bajo; la aleación eutéctica funde a temperatura inferior

a la del componente más fusible. En la práctica, las aleaciones eutécticas tienen pocas aplicaciones por ser de características mecánicas pobres.

1.2.3.2 Cristales de compuestos químicos. Están formados por un compuesto químico, bien definido, de los componentes. Cada cristal está formado del compuesto químico (AB), no siendo posible distinguir en él los componentes originales, como se muestra en la figura 5.

En algunos casos pueden figurar cristales de compuesto químico, en lugar de metal puro, en las aleaciones eutécticas.

Figura 5. Cristales de compuestos químicos

1.2.3.3 Cristales de solución sólida. Estos cristales están formados por una solución sólida de componentes puros, o de un componente puro y un compuesto químico de los componentes, como se muestra en la figura 6.

Según las proporciones existentes podemos tener: A disuelto en B; B disuelto en A; A o B disuelto en el compuesto químico AB.

Se formará una solución sólida, llamada así por su analogía con la solución líquida, cuando los componentes son miscibles entre sí incluso en estado sólido; en este caso, teniendo los componentes distintos puntos de fusión,

uno de ellos, o un compuesto químico propio, permanece disuelto en el otro estado sólido, como lo era en estado líquido.

Por su propio origen, las soluciones sólidas, son de estructura mas homogénea y de características mejores que las aleaciones eutécticas o los metales puros.

Figura 6. Cristales de solución sólida

1.2.4 Características de las aleaciones. Las características de una aleación dependen de la concentración de sus componentes y de la velocidad de enfriamiento.

Las concentraciones se eligen de modo que se evite la formación, de estructuras eutécticas y se obtengan soluciones sólidas homogéneas, por tener esta última unas propiedades mecánicas decisivamente superiores.

No hay que olvidar que las características de una aleación no son nunca la media de las características de sus componentes. La adición de un componente aún en pequeñas dosis, a veces inferiores a 1% pueden modificar substancialmente las propiedades de la aleación.

La velocidad de enfriamiento tiene gran influencia sobre las características finales, porque variándola se pueden conseguir estructuras de propiedades diversas.

1.2.5 Aleación hierro-carbono.

1.2.5.1 El diagrama hierro-carburo de hierro. El hierro y el carbono constituyen el sistema de aleación más ampliamente conocido. Cuando están en proporciones adecuadas, forman un compuesto intermetálico: El carburo de hierro, Fe_3C , denominado, cementita o carburo θ , el cual contiene 6,666% y se funde a 1227°C . Desde el punto de vista termodinámico, la cementita no es una fase de equilibrio, el grafito es más estable y bajo condiciones apropiadas la cementita se descompone en grafito y hierro. Sin embargo, en los aceros ordinarios esta descomposición no se observa prácticamente, porque la nucleación de la cementita en el hierro sobresaturado con carbono, ocurre mucho más fácilmente que la nucleación de grafito. Así, cuando el carbono se precipita desde soluciones sólidas, el precipitado resultante es cementita o algún otro carburo y no grafito. Una vez que se ha formado la cementita, es muy estable y puede ser tratada para propósitos prácticos como una fase de equilibrio. Por ésta razón, para predecir los cambios de fase en aleaciones hierro-carbono sometidas a ciclos de temperatura de variación lenta, se usa el diagrama hierro-cementita. Los cambios de fase en los aceros no se gobiernan con el

equilibrio hierro-carbono sino con el diagrama Fe-Fe₃C. En un acero rara vez existe carbono como fase, generalmente está combinado químicamente y una de las combinaciones es la cementita.

El primer intento de trazar el diagrama hierro-carbono fue hecho por Alberto Sauveur en 1896. Aunque sólo trato de representar las regiones de transformación gamma-alfa, se dice que a Reinhard Mannesmann debe atribuírsele el primer diagrama. La primera aproximación al diagrama actual fue publicado por Roberts-Austin en 1897 y una segunda versión en 1899 seguida del diagrama de Roozebrom en 1900. Después de éstos, se presentaron otros diagramas rápidamente: Carpenter y Keeling, Benedicks, Charpy y Grenet, Heyn, Rosenhain, Upton, Ruff y muchísimos otros. El diagrama mostrado en la figura 7, elaborado por Chipman, es el estandarizado por la American Society for Metals -ASM-.

Figura 7. Diagrama hierro-carburo de hierro

Puntos críticos del diagrama. El acero es básicamente una aleación hierro-carbono modificada por otras cosas, o sea, que la base de todo es el hierro; éste es un elemento metálico, con número atómico 26, peso atómico 55,71 perteneciente al grupo de transición en el primer período largo de la tabla periódica; solidifica a 1538°C en la estructura cúbica de cuerpo centrado (CC), delta (Fe- δ). A medida que el hierro δ puro se enfría, se transforma en una forma cúbica de cara centrada (CCC), gamma (Fe- γ) a 1394°C, la cual a su vez se vuelve a transformar en una estructura cúbica de cuerpo centrado, alfa (Fe- α) a 912°C. Esta forma no magnética de hierro se hace ferromagnética a 770°C, la temperatura Curie.

El principal elemento que transforma el hierro en acero es el carbono, el cual también presenta varias formas alotrópicas, pero el que se combina con hierro en las aleaciones comunes es siempre el grafito.

El hierro α sólo disuelve 0,002% en peso de carbono a temperatura ambiente, a temperatura más alta llega a disolver un poco y se forma la

solución sólida alfa denominada ferrita. La máxima cantidad de carbono disuelta por el hierro alfa es 0,0218% a 727°C.

El hierro gamma, cuya estructura CCC tiene intersticios mayores, puede disolver el carbono en mayor proporción, la máxima cantidad es 2,11% a 1148°C. La solución sólida intersticial que se forma se llama austenita. El hierro delta disuelve hasta 0,09% C a 1495°C. La gran diferencia en la solubilidad del carbono entre las formas gamma y alfa es la base de las propiedades del acero.

En resumen, las principales fases en el sistema Fe-Fe₃C son:

Fase θ: Cementita, compuesto Fe₃C.

Fase α: Ferrita, solución sólida de carbono en hierro alfa.

Fase γ: Austenita, solución sólida de carbono en hierro gamma.

Fase δ: Ferrita delta, solución sólida de carbono en hierro delta.

A veces en el diagrama se emplea hasta 8,5%C y se tiene en cuenta el carburo épsilon (ε) de estructura hexagonal y fórmula Fe_{2,3}C. Este carburo aparece, a veces, como fase de no equilibrio.

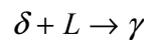
En el diagrama aparecen tres reacciones invariables:

Peritética: A 1495°C y 0,17%C

Eutética: A 1148°C y 4,30%C

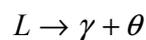
Eutectoide: A 727°C y 0,77%C

La reacción peritética tiene una importancia secundaria en el tratamiento térmico del acero. La reacción es:



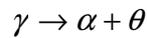
La transformación eutética no tiene importancia en el tratamiento térmico del acero, en ella la aleación líquida, al enfriarse, forma una mezcla de fases ($\gamma + \theta$) denominada LEDEBURITA. La ledeburita es un eutéctico regular constituido por capas alternas de austenita y cementita.

La reacción es:



La reacción eutectoide es de importancia fundamental en el tratamiento térmico del acero. Al enfriarse, en condiciones de equilibrio, la austenita se transforma en una mezcla de fases ($\alpha + \theta$). Esta mezcla laminar se denomina PERLITA.

La reacción es:



La perlita esta constituida, entonces por láminas alternas de ferrita (88%) y cementita (12%). Las propiedades tecnológicas de la perlita dependen del espaciamento interlaminar, el cual es función de la velocidad de enfriamiento o de la temperatura de transformación.

El origen de muchos tratamientos térmicos radica en la posibilidad de manipular la morfología de la perlita, la cual puede llegar a cambiarse tanto como para esferoidizar la cementita y obtener una dispersión de carburos en una matriz ferrítica. Otros tratamientos térmicos del acero se logran porque la reacción eutectoide se puede inhibir por enfriamiento rápido, dando origen a constituyentes y aún fases completamente nuevas como la BAINITA y la MARTENSITA.

Puntos críticos.

Punto A (1538°C) es la temperatura de fusión del hierro puro.

Punto H (1495°C, 0,09%C) indica la máxima solubilidad del carbono en el hierro δ

Punto J (1495°C, 0,17%C) es el punto de reacción peritectica total.

Punto B(1495°C, 0,53%C) es el máximo porcentaje de carbono hasta el cual sucede la reacción peritética.

Punto N(1394°C, 0,0%C) señala la transformación alotrópica de hierro δ en hierro γ durante el enfriamiento.

Punto E(1148°C, 2,11%C) marca la máxima solubilidad del carbono en el hierro CCC, 2,11%C.

Punto C (1148°C, 4,3%C) es el punto de reacción eutéctica total.

Punto F (1148°C, 6,67%C) indica el porcentaje máximo de carbono hasta el cual sucede la reacción eutéctica.

Punto D (1227°C, 6,67%) es el punto de fusión de la cementita pura.

Punto G (912°C, 0,0%C) marca la temperatura de la transformación alotrópica del hierro γ al hierro α en el enfriamiento.

Punto P (727°C, 0,0218%C) indica el máximo porcentaje de carbono que se disuelve en el hierro α .

Punto S (727°C , $0,77\%C$) es el punto de la reacción eutectoide total y también el punto más bajo de existencia de la Austenita.

Líneas críticas.

$A_0 = 230^{\circ}\text{C}$, temperatura Curie de la cementita (pierde su magnetismo).

$A_1 = 727^{\circ}\text{C}$, temperatura eutectoide.

$A_2 = 760^{\circ}\text{C}$, temperatura Curie de la ferrita (pierde su magnetismo)

$A_3 =$ Límite de existencia de la ferrita en el calentamiento

$A_4 =$ Límite superior de la austenita.

$A_{cm} =$ Límite de la cementita.

Las fases del sistema Fe-Fe₃C. Los aceros de las diferentes composiciones y sometidos a distintos tratamientos, exhiben propiedades diversas; estas propiedades se deben, más que a las fases, a los constituyentes microscópicos que conforman el acero en unas determinadas condiciones, y por eso se hace necesario una breve descripción de los diferentes microconstituyentes del acero.

La ferrita. Es una solución sólida de carbono en hierro alfa, pero disuelve tan poco (0,008%C) a temperatura ambiente, que se le considera hierro puro.

Cristaliza con estructura CC y disuelve un máximo de 0,0218%C de carbono a 727°C. Es el constituyente más blando y dúctil, tiene una dureza de 90 HB pero se puede endurecer por adición de aleantes o por deformación en frío. Es magnético hasta 760°C. No coloreada por los reactivos ácidos y se ve blanca en el microscopio.

La cementita, fase θ o carburo de hierro. Es un compuesto intermetálico intersticial de fórmula Fe_3C , o sea, que contiene 6,67%C. Cristaliza con estructura ortorrómbica con parámetros 4,5 x 6,7 Å. Es el constituyente más duro y frágil de los aceros al carbono, su dureza es superior a 700 HB (68 HRC). Es magnética hasta 230°C. En combinación con elementos de aleación forma carburos complejos aún más duros.

La austenita. Es una solución sólida intersticial de carbono en hierro gamma, puede tener hasta 2,11%C a 1148°C. Es dúctil y tiene una dureza de unos 300HB, la cual puede aumentar por adición de aleantes o por deformación. Sin embargo, sólo existe por encima de 727°C, es muy importante en la deformación en caliente del acero. Algunos elementos

hacen que sea estable a la temperatura ambiente, originando los aceros austeníticos. No es magnética.

La perlita. Es el producto de la reacción eutectoide y según la velocidad de enfriamiento o la temperatura de transformación isotérmica, exhibe diferentes espaciamentos entre las láminas de cementita y ferrita, lo que da origen a diferentes propiedades.

Si el enfriamiento es muy lento, el espaciamiento interlaminar es de unos 4000 Å y la dureza es de 200 HB. Un enfriamiento normal, al horno, da un espaciamiento de 3500 Å y 200 HB; enfriando al aire se obtienen espaciamientos de unos 2500 Å y durezas de 300 HB, si la velocidad es mayor, se obtiene una perlita muy fina, que en Europa se llama SORBITA, de espaciamiento interlaminar de unos 200 Å y durezas de 300 a 400 HB. Si la velocidad de enfriamiento se aproxima a la crítica de temple, la austenita se transforma en una perlita fina dispuesta en nódulos oscuros, llamados TROOSTITA en Europa, con dureza de 400 a 500 HB.

Constituyentes del acero. Además de las fases del diagrama Fe-Fe₃C, hay otros constituyentes del acero que aparecen allí, bien porque son fases de no equilibrio o porque en realidad el acero es hierro-carbono y otras cosas. A continuación consideraremos algunas de ellas.

La martensita. Esta fase de no equilibrio, se obtiene cuando la austenita se enfría a una velocidad mayor que la crítica de temple. Es una solución sobresaturada de carbono, su estructura varía de CC a tetragonal de cuerpo centrado. Después de los carburos es el constituyente más duro; entre 450 y 750 HB (40-86 HRC). Es magnética.

La bainita. Es un constituyente de los aceros que se forma por descomposición de la austenita en un rango de temperatura localizado entre M_s y el campo de formación de perlita y ferrita. Consiste en un agregado de ferrita acicular y carburos. La morfología de la bainita cambia progresivamente con la temperatura de transformación en el sentido de que el tamaño de las partículas y la acicularidad de la estructura aumenta al disminuir la temperatura. El campo de transformación bainítica se divide en dos partes, según el efecto estructural del constituyente. En muchos aceros, la transformación entre los dos tipos de estructura ocurre a unos 350°C .

En la bainita inferior, es decir, la que se forma a temperaturas menores de 350°C , los carburos se encuentran orientados a 60° del eje de las placas de ferrita. Las puntas de las placas de ferrita son piramidales y libres de carburos. Los bordes laterales de las placas son planas y los carburos están en contacto con ellos. La ferrita está saturada.

La bainita superior, formada por encima de 350°C , contiene placas mayores de ferrita limitadas por precipitados de Fe_3C formado directamente desde la

austenita. Los carburos yacen paralelos a la dirección de crecimiento de las placas de ferrita, que están libres de carbono. La bainita es menos dura y frágil que la martensita. Su dureza varía entre 200 y 500 HB según sea inferior o superior.

2. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

2.1 GENERALIDADES

El tratamiento térmico es un modo importante de cambiar la resistencia, dureza, ductilidad y otras propiedades de los metales. Es efectivo solo con ciertas aleaciones, ya que depende de que un elemento sea soluble en otro en el estado sólido en diferentes proporciones bajo distintas circunstancias.

El endurecimiento (o aumento de la resistencia) se hace calentando una aleación a una temperatura suficientemente alta (temperatura de austenización), dependiendo del material y enfriándolo con rapidez. La cantidad de endurecimiento que tiene lugar en una aleación depende del tamaño, forma, distribución de las partículas y la cantidad de coherencia entre las partículas y la matriz. El tamaño, forma y distribución de las partículas resulta en forma principal por la dispersión del soluto en el material, la cual depende a su vez de la temperatura y del tiempo de calentamiento.

El grado de coherencia entre las partículas en la fase primaria tiene la mayor influencia en el endurecimiento.

Lo inverso del endurecimiento, es el suavizado de los metales y se hace aplicando solo calor o por calentamiento y enfriamiento lento. Los efectos son juntar y hacer más gruesas las partículas dispersas, controlar el tamaño del grano y mejorar la ductilidad y la resistencia al impacto. Los procesos comunes de esta clase son el recocido, normalizado y el revenido. Otros propósitos del tratamiento térmico son aliviar esfuerzos, modificar las propiedades eléctricas y magnéticas, aumentar la resistencia al calor y a la corrosión y cambiar la composición química de los metales (como por el cementado del acero).

2.2. CLASES

Los tratamientos térmicos podemos clasificarlos en: (1) Tratamientos que alteran la superficie del acero, entre los cuales están temple, recocido, normalizado y revenido; y (2) Tratamientos térmicos que alteran la composición química de la superficie, en los que se puede mencionar la cementación, nitruración, carbonitruración, etc.

A continuación se explicarán en detalle.

2.2.1 Normalizado del acero. El normalizado es definido como el calentamiento de una aleación ferrosa a una temperatura adecuada por encima del rango de transformación y después enfriarla en aire a una temperatura substancialmente por debajo del rango de transformación. La práctica de un buen normalizado requiere (a) que la pieza que esta siendo tratada sea uniformemente calentada a una temperatura lo suficientemente alta para producir la transformación completa de la ferrita en austenita, (b) que se permanezca a esta temperatura el suficientemente tiempo para que se lleve a cabo una uniformidad en la temperatura en todas partes de su masa, y c) que sea permitido enfriarla en aire de una manera uniforme.

Un enfriamiento uniforme requiere de una libre circulación de aire alrededor de cada pieza tanto que no exista algún área en el cual el enfriamiento haya estado restringido o acelerado. La restricción de la rata de enfriamiento alterará la operación de un normalizado a un tratamiento de recocido. En un sentido estricto, incrementar la rata de enfriamiento por encima de las llevadas a cabo por una circulación libre cambiará la operación de normalizado a una de tratamiento de temple.

En general, el endurecimiento al aire no es propiamente llamado normalizado, porque no se coloca al acero en la “normal” condición perlítica que caracteriza al acero normalizado. Algunas veces, sin embargo, cuando es intencionalmente acelerada la rata de enfriamiento con aire para producir la formación de alguna martensita, el proceso es referenciado

como normalizado despreciando el enfriamiento acelerado y el endurecimiento parcial.

El propósito de normalizar un acero es obtener una estructura homogénea. Por lo común se imparte también dureza moderada y resistencia. El normalizado por lo general se hace para restablecer el acero dulce a su estado cercano al equilibrio después del trabajo en caliente, en frío o sobrecalentamiento. Las fundiciones de acero se normalizan para modificar la estructura del grano y aliviar esfuerzos. Las secciones delgadas pueden enfriarse con rapidez en esta forma y endurecerse en forma considerable.

2.2.2 Temple del acero. El temple de un acero es el enfriamiento rápido a partir de la temperatura de austenización. Usualmente esto se realiza por inmersión de la pieza en agua o aceite y, a veces, se usa aire forzado.

Como resultado del temple se desarrollan estructuras martensíticas aceptables y propiedades mecánicas que deben cumplir especificaciones mínimas luego del revenido.

La del temple depende de las características de enfriamiento del medio de temple, así como de la posibilidad del acero de ser endurecido. Los resultados se pueden cambiar variando la composición del acero, el tipo de medio de temple, la agitación o la temperatura del medio templante.

2.2.3 Revenido. En este tratamiento se eleva la temperatura del acero hasta un valor por debajo de la temperatura eutectoide, se mantiene a tal temperatura por un tiempo fijado, después del cual se enfría de nuevo el acero a la temperatura ambiente.

Es práctica común subdividir las reacciones que ocurren durante el revenido en tres categorías, llamadas las tres etapas del revenido.

En la primera etapa, un carburo que no es cementita se precipita en la martensita. Esta reacción ocurre a velocidades que se pueden medir en los intervalos de temperatura entre la temperatura ambiente y 200°C aproximadamente. La segunda etapa corresponde a la descomposición de la austenita retenida a bainita. La reacción bainítica puede medirse a unos 100°C, y se extiende a unos 300°C, mientras que por debajo de 100°C puede suponerse que la austenita reacciona a martensita y no a bainita. La formación de ferrita y cementita partiendo de los productos de la reacción de las etapas uno y dos, constituye lo que se conoce como la tercera etapa del revenido. Esta reacción ocurre en un lapso de tiempo razonable a temperaturas sobre 200°C.

2.2.4 Recocido del acero. El recocido en su sentido más amplio significa calentar un metal hasta donde ocurre un cambio de transformación de constituyentes y entonces se enfría lentamente. Una razón principal para el recocido es suavizar el acero, pero también sirve para aliviar esfuerzos,

eliminar gases, alterar la ductilidad, la tenacidad o las propiedades magnéticas o eléctricas, o para refinar los granos. El propósito final puede ser preparar el acero para otro tratamiento térmico, trabajo mecánico o para cumplir las especificaciones del producto terminado.

Hay tres etapas en el proceso de recocido: Recuperación, recristalización y crecimiento de grano.

La recuperación, es un tratamiento térmico de baja temperatura diseñado para reducir los esfuerzos residuales.

Cuando calentamos el metal a temperaturas levemente elevadas las dislocaciones son capaces de moverse; la fuerza impulsora para este movimiento se encuentra en la energía de deformación de las dislocaciones, que decrece como resultado de la poligonización. Estas dislocaciones forman una estructura poligonizada, que aparece como una estructura de subgrano dentro de los granos deformados normales.

Cuando el metal es calentado aproximadamente 0,4 veces por encima de la temperatura de fusión del metal se presenta la recristalización. Esta ocurre por la nucleación y el crecimiento de nuevos granos que contienen pocas dislocaciones. Debido a la gran reducción de dislocaciones, el metal cristalizado presenta escasa resistencia pero elevada ductilidad.

A temperaturas de recocido aun mayores, tanto la recuperación como la recrystalización ocurren rápidamente, produciendo la estructura recrystalizada de grano fino. La acumulación de la energía en los bordes de grano y en las dislocaciones atrapadas en los bordes, hace a la estructura fina inestable a temperaturas altas. Al reducir esta energía los granos empiezan a crecer y ciertos granos eliminan a los más pequeños.

Este fenómeno es llamado crecimiento de grano.

2.2.5 Cementación. Para obtener un núcleo dúctil resistente al choque y una superficie dura que resista el desgaste y la abrasión, puede maquinarse una parte con ligero sobretamaño en acero simple de bajo carbono o acero de aleación. Se carburiza entonces para aumentar el contenido de carbono de la cáscara y tratarla con calor para obtener las mejores propiedades de la cáscara y el núcleo.

Los aceros para carburizar deben tener de 0,10 a 0,20% de carbono.

Cuando un acero se calienta a su temperatura de austenizado absorbe carbono en la presencia de gas CO. La cantidad de carbono absorbida y la profundidad de la cáscara dependen de la temperatura, tiempo de exposición, potencial de carbono del medio carburizante y la composición del acero original.

Mientras más alta sea la temperatura, más rápida será la absorción de carbono pero también será mayor el deterioro del horno y el crecimiento indeseable de grano. La profundidad de cáscara aumenta con la raíz cuadrada del tiempo a cualquier temperatura dada.

Hay varios métodos de carburizar el acero. El carburizado con gas se prefiere para la producción eficiente y consiste en calentar la pieza de trabajo en un horno con una atmósfera altamente carburizante que contiene en gran parte gases o vapores de hidrocarburo. El carburizado en paquete se hace rodeando por completo la pieza de trabajo con un material carbonáceo en un contenedor cerrado. El gas CO para carburizado se obtiene por el calentamiento del material empacado. Deberá calentarse mucha masa a parte de la del trabajo y esto hace más lenta la tarea, más difícil de controlar e ineficiencia térmica. Por otra parte, el carburizado en paquete es ventajoso para lotes pequeños y para piezas grandes, en particular porque puede hacerse casi en cualquier horno.

El carburizado líquido se hace por inmersión de la pieza de trabajo en baño de cianuro.

La mayoría de las partes carburizadas se endurecen por enfriamiento brusco directamente a partir de la temperatura de carburizado, o después de un ligero enfriamiento precisamente arriba de la temperatura crítica.

2.2.6 Carbonitruración. El carbonitrurado líquido o cianurado imparte una cáscara resistente al desgaste y dura contra lima al acero por inmersión en un baño de sales de cianuro fundido durante un tiempo y después enfriado brusco. Una cáscara cianurada rara vez tiene un espesor de más de 0,25 mm (0,01 pulg) y las cáscaras carburizadas por lo común son más gruesas.

El carbonitrurado, también conocido como cianurado seco o cianurado con gas, nicarburado y nicarburizado, agrega tanto carbono como nitrógeno a una cáscara poco profunda en la superficie del acero. Se hace en forma muy parecida y con el mismo equipo en el carburizado con gas en una atmósfera rica en carbono y nitrógeno. La ventaja es que la cáscara enriquecida con nitrógeno puede enfriarse en aceite en lugar de agua, como se requiere para aceros sin aleación después del carburizado simple. El enfriado en acero causa menos distorsión y agrietamiento.

2.2.7 Nitruración. El acero se nitrura con gas en un horno (510 a 565°C) con una atmósfera, comúnmente de amoníaco, que permea la superficie con nitrógeno.

Se practican diferentes modificaciones del nitrurado para acelerar el proceso.

El chapmanizado o nitrurado líquido a presión implica pasar amoníaco anhidro a través del baño de sales de nitrurado bajo presión mientras se está tratando la pieza de trabajo. El nitrurado a presión se hace con la pieza de

trabajo en una retorta sellada que mantiene bajo presión una atmósfera de amoníaco.

El nitrurado por descarga luminosa o ionitrurado se hace con la pieza de trabajo como el cátodo en una retorta anódica. Una corriente eléctrica calienta la pieza de trabajo y produce una descarga luminosa que ioniza la atmósfera de nitrógeno.

El nitrurado es más caro que cualesquiera otros procesos de cáscara endurecida, pero ofrece varias ventajas. Se hace por debajo de la temperatura crítica sin detrimento de la resistencia y otras propiedades del núcleo de acero. La cáscara es bastante dura (70 HRC y más) y es notablemente resistente al desgaste, la fatiga y la corrosión.

El nitrurado se aplica, por ejemplo, a engranes de alta confiabilidad, bujes para rodillos de transportadores que manipulan materiales alcalinos abrasivos, cojinetes antifricción y partes de cañones.

3. EQUIPOS PARA LA REALIZACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS

3.1 GENERALIDADES

Un horno de tratamiento térmico consta de una estructura parecida a una caja con envolvente de acero y una puerta de acceso, un revestimiento refractario y controles e indicadores de temperatura.

Los hornos pueden clasificarse por las formas en que se manipula la pieza de trabajo o por los medios de calefacción. Para la manipulación del trabajo, los tipos básicos son hornos de lotes y hornos continuos. Conforme a los combustibles, en un tipo predominaron el aceite y el gas, pero la electricidad ha ganado en uso. El control estrecho del proceso se facilita más con la electricidad. Con la calefacción por combustión el trabajo debe mantenerse en una caja separada si va a evitarse que esté en contacto con los gases.

En años recientes las mejoras en el diseño de hornos se han dirigido hacia el proceso más eficiente, aislamiento mejorado, control más efectivo de la combustión y recuperación de los gases del combustible que en otras formas se desperdiciarían.

Las formas principales se describirán en los siguientes ítems.

3.2 HORNOS PARA CALENTAMIENTO

3.2.1 Hornos de carga única o no continuos. Los más pequeños de estos hornos pueden ser horizontales o verticales, calentados con gas o electricidad. Los de mayor tamaño pueden tener atmósfera controlada.

El horno básico está constituido por una cámara recubierta de refractario aislada y por una carcasa externa de acero, un sistema de calefacción para la cámara con su control y una o más puertas de acero a la cámara caliente.

En general, estos hornos se utilizan con piezas pequeñas y en cantidades relativamente reducidas. De estos hornos el más común es el de mufla o cámara abierta, donde el oxígeno del aire caliente actúa como agente oxidante y descarburante si no se toman precauciones para proteger las piezas. En estos hornos, generalmente las piezas se calientan desde la temperatura ambiente hasta una temperatura máxima, a una tasa controlada de calentamiento, se mantiene a esa temperatura y se enfría con velocidades controladas.

Como estos hornos de mufla, especialmente los calentados con energía eléctrica, pueden alcanzar hasta 1300°C, son muy versátiles y son los aconsejables en todos los talleres; ellos permiten cementar, templar, revenir, recocer, normalizar, destensionar e incluso, tratar aceros rápidos y de trabajo en caliente.

3.2.2 Hornos de operación continua. Existen variados diseños para suplir las necesidades de producción en muchos procesos. Normalmente, estos hornos manejan grandes cantidades de piezas similares y casi siempre con algún grado de automatización. En teoría, hay pocas operaciones de tratamiento térmico que no se pueden realizar de modo continuo, pero en la práctica la escogencia de un horno obedece más a razones económicas que técnicas. Los costos de capital y de instalación de los hornos continuos son muy elevados comparados con los hornos de carga discontinua, aunque los costos de operación son considerablemente menores debido a la eficiencia del flujo de trabajo y la cantidad reducida requerida de operarios.

Además, existe la ventaja técnica de la consistencia que puede lograrse en la calidad del producto. Obviamente, los hornos continuos dan el mejor rendimiento cuando se usan las 24 horas del día.

Por definición, un horno continuo consta de una cámara aislada, un sistema de calentamiento, puertas de acceso y un método de mover la carga desde el punto de carga hasta el de descarga de una manera controlada. El tipo de mecanismo empleado indica el diseño básico y da al horno su nombre genérico, tal como solera vibratoria, de banda transportadora, de empuje, viga móvil, de carros, etc. Tienen un ducto de entrada y una sección de temple de enfriamiento en el extremo de descarga. Los hornos modernos incluyen otras características que permiten automatizar la producción.

Hornos de solera vibratoria. Se usan para el temple directo del acero con rendimiento de 25 a 500 kg/hr o más, usando atmósfera controlada.

También se usan para carbonitruración de capa delgada (hasta 0,3 mm).

Las piezas adecuadas para moverse por vibración son los componentes pequeños como pernos, tornillos, palancas, ejes, resortes, tuercas, etc.

El medio templante puede ser: Agua, aceite o solución polimérica. En austempering se usan sales.

Hornos de empuje. Los hornos empujadores se usan para tratar piezas más pesadas que se someten a normalizado, temple, revenido y cementación. En este método la pieza se coloca en una bandeja reforzada y resistente al calor, acero o fundición aleada, la cual es empujada a través del horno en un intervalo de tiempo predeterminado. Las bandejas pueden moverse sobre rieles, rodillos o ruedas.

Las bandejas se descargan una por una y en el extremo de salida puede hacerse temple o enfriamiento lento. El sistema de calefacción más común es el gas.

Hornos de viga móvil. En un horno de éstos, la solera esta constituida básicamente por dos conjuntos de rieles, uno estacionario y otro móvil. Los rieles móviles levantan la pieza, la mueven hacia adelante y la vuelven a

descargar sobre los rieles fijos, luego regresan a su posición inicial.

Normalmente no necesitan bandejas y sólo hay que calentar la pieza; sin embargo, éste mecanismo es más costoso que otros.

Hornos de carros. Un horno de este tipo es, en realidad, un horno de carga única muy grande. El piso del horno se construye como un carro aislado y móvil que puede retirarse del horno para cargar y descargar. Cuando el carro se coloca dentro del horno, se sella la estructura del mismo, por eso es difícil usar atmósferas controladas debido a la necesidad de un sello hermético que no permita el escape de los gases.

Hornos de banda transportadora. La banda esta hecha de malla o eslabones colados. Su estructura comprende de un vestíbulo de entrada, una cámara de calentamiento y un medio de enfriamiento que puede ser un tanque sellado para el temple o un túnel enfriado con agua.

3.2.3 Hornos de atmósfera controlada. Aunque muchas operaciones de tratamiento térmico todavía se llevan a cabo en aire, la tendencia moderna es usar atmósferas controladas por una o más de las siguientes razones:

1. Para evitar el cambio de la condición superficial del metal, es decir, para evitar la oxidación, la descarburación y el descascaramiento.
2. Para lograr el cambio en la condición superficial del metal como en tratamientos termoquímicos.

Tipos de atmósferas. En general, se dividen en exotérmicas y endotérmicas.

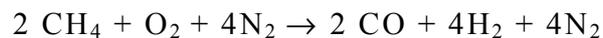
Las **atmósferas exotérmicas** se dividen en dos clases básicas: Ricas y pobres. El gas se produce en un generador mediante la combustión de un hidrocarburo - gas natural o propano- con aire, donde la relación aire-gas se controla estrechamente. La mezcla se quema a unos 900°C, y se deja permanecer suficiente tiempo para alcanzar el equilibrio; el calor se obtiene de la combustión directamente. El gas se enfría para remover parte del agua con lo que se logran composiciones con contenidos de 25% de $H_2 + CO$, 5-10% de CO_2 y el resto nitrógeno y vapor de agua.

En muchas aplicaciones, el gas exotérmico se insufla directamente al horno, usando una relación gas-aire adecuada para el tratamiento que se vaya a efectuar.

Los gases ricos se usan en el tratamiento térmico limpio de materiales férreos y no férreos, en aplicaciones como el recocido y el revenido del acero, soldadura de cobre y plata y la sinterización de polvos metálicos.

Los pobres tienen un uso mas limitado y se utilizan como oxidantes o en tratamientos a baja temperatura.

Las **atmósferas endotérmicas** se preparan en generadores que usan aire y un hidrocarburo gaseoso como combustible; el oxígeno disponible sólo debe ser el suficiente para oxidar el hidrocarburo a monóxido de carbono más hidrógeno, por ejemplo, con gas natural.



Estas atmósferas se usan en casi todos los procesos que operan a más de 750°C bajo condiciones fuertemente reductoras.

Son las atmósferas básicas usadas en la cementación cuando el potencial de carbono se eleva adicionando cantidades adecuadas de un hidrocarburo.

El amoníaco se consigue como líquido anhidro, se usa para nitruración gaseosa y en carbonitruración, también es la fuente para la preparación del amoníaco disociado, una atmósfera fuertemente reductora, con bajo punto de rocío que contiene 75% de hidrógeno y 25% de nitrógeno.

También se usan gases embotellados como el hidrógeno gaseoso, pero el nitrógeno y el argón también son líquidos.

Ciertas atmósferas se producen goteando líquido orgánico como hidrocarburos, alcoholes o acetonas directamente en la cámara del horno. La tendencia actual es usar alcoholes de bajo peso molecular.

Control de las atmósferas. La mayoría de las atmósferas usadas en tratamiento térmicos son mezclas gaseosas que contienen monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, nitrógeno, hidrógeno y vapor de agua.

La composición exacta depende del generador usado, la temperatura del proceso y el gas que se añade para lograr un determinado potencial de carbono. El potencial de carbono es función de la temperatura y de la composición de la atmósfera; por lo tanto, los sistemas iniciales de control regulan automáticamente la temperatura conjuntamente con muestreos manuales del contenido de vapor o punto de rocío y la adición constante de hidrocarburos gaseosos.

Recordando, el punto de rocío es la temperatura exacta, a una presión dada, a la cual una mezcla de gases empieza a precipitar su contenido de humedad. Los analizadores del punto de rocío miden la presión parcial del vapor de agua en la atmósfera del horno. Hay varios métodos para hacer esto como el instrumento de copa de rocío, la cámara de niebla, el espejo frío y el cloruro de litio.

La introducción del analizador infrarrojo facilitó aún más el uso del control automático. Este analizador se basa en el principio de que cualquier compuesto presente en la mezcla absorberá energía infrarroja en proporción a su concentración.

Las longitudes de onda absorbidas son diferentes para cada compuesto, los gases elementales no absorben radiación infrarroja.

La mayoría de los problemas referentes al control de las atmósferas se solucionaron con el desarrollo de la sonda de oxígeno de Walkeman y Smith. La sonda está constituida por dos elementos de platino separados por un electrolito sólido en forma de un tubo sellado de circonio. La sonda se coloca en el horno lo mismo que un termopar, el electrodo dentro del tubo está en contacto con aire y sirve de referencia; el otro electrodo está en contacto con la atmósfera del horno. La diferencia en presiones parciales de oxígeno produce un voltaje de 1 a 1,2 voltios que alimenta el circuito de control electrónico. Por la posibilidad del análisis in situ y su precisión, este instrumento se está imponiendo rápidamente.

3.2.4 Hornos de lecho fluidizado. En este caso la fluidización consiste en hacer que un lecho de partículas secas finamente divididas (de Al_2O_3) se comporte como un líquido. Las partículas se separan unas de otras por la acción de un gas que se mueve hacia arriba a través del lecho.

La característica importante de los lechos fluidizados es la elevada eficiencia térmica de la transferencia de calor, el coeficiente de transferencia de calor en un lecho de este tipo es del orden de 120 a 120 $\text{W/m}^2\text{C}$, comparable con el de un baño de sales; para esto, las partículas deben ser lo más pequeñas posibles. La uniformidad en la temperatura en

un lecho fluidizado es de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en la parte activa de un lecho de 3 m^3 de volumen.

Se pueden usar muchos tipos de atmósferas según el proceso que se quiera efectuar, pero uno de los métodos más usados es la utilización de una mezcla de gas-aire que hace ignición en el lecho generando calor por combustión interna.

Las aplicaciones de los lechos fluidizados a los tratamientos térmicos son muchas, las principales ventajas son:

1. Se puede tratar todo tipo de materiales ferrosos y no ferrosos.
2. Se logran tasas elevadas de transferencia de calor.
3. La atmósfera en la zona de calentamiento se puede ajustar a los requerimientos del proceso deseado.
4. No hay problemas de humos.
5. Los hornos tienen elevada eficiencia térmica y bajo consumo de combustible.
6. Como el calentamiento es tan rápido, el horno se puede apagar sin problemas para encenderlo de nuevo.
7. Los sólidos fluidizados no son abrasivos ni corrosivos y no humedecen las piezas.

Por estas razones, la tecnología del lecho fluidizado para el tratamiento térmico está en una fase de desarrollo acelerado.

3.2.5 Hornos de vacío. Hasta finales del decenio del cincuenta, los tratamientos térmicos y termoquímicos a baja presión (subatmosférica) eran procesos de laboratorio o reservados a productos muy especiales y en pequeña escala. Pero la industria aeronáutica, aeroespacial y nuclear, además de nuevos materiales, demanda procesos de tratamiento térmico más cuidadosos, como respuesta a ello y debido a que es técnica y económicamente más conveniente, la utilización de los hornos de vacío se ha extendido en el tratamiento térmico aún de materiales convencionales. Desde el punto de vista práctico, vacío se usa para definir un estado en que la cantidad de gases es menor que la existente a presión atmosférica. Como a presión normal (760 Torr) la densidad de las partículas es de aproximadamente: 10^{19} part/cm³ y a una presión de 10^{-3} Torr es de 10^3 part/cm³, resulta que en un vacío las reacciones gas-sólido en la superficie de los metales son más lentas, lo cual permite obtener superficies inalteradas. El equipo de bombeo convencional permite obtener presiones de 10^{-6} Torr, lo cual indica que en el ambiente quedan de 1 a 0,01 ppm del gas original, esta concentración es mucho menor que la de los gases puros de uso industrial. Por ello, el tratamiento térmico en el vacío no sólo evita la oxidación, la descarburación y la carburación, sino también la fragilización por gases otros cambios superficiales. Sin embargo, durante el tratamiento térmico en el vacío, ocurre evaporación selectiva de los metales; a menor presión, mayor posibilidad de que un elemento dado de la aleación se evapore. Si bien resulta difícil conocer la presión de vapor de

equilibrio de un elemento dado cuando está formando aleación, es posible estimarla a priori a través de los datos obtenidos para el elemento en estado puro, y la reactividad se puede determinar con ayuda de los diagramas de Ellingham.

Para evitar la evaporación, el horno se trabaja a un nivel de presión mayor que la presión de vapor del metal en cuestión, por ejemplo, para el temple del acero se usa un vacío del orden de 10^{-2} atm.

Otra diferencia importante entre el vacío y otros medios es el método de transferencia de calor. Debido a la naturaleza del vacío, ésta sólo puede efectuarse por radiación, o por conducción dentro de la carga.

En la mayoría de los hornos al vacío se usa grafito como elemento calefactor sobre todo ahora que se han solucionado muchos problemas de erosionabilidad. También se usan cubiertas radiantes, pero es más común actualmente el recubrimiento interno metálico, generalmente molibdeno, soportado por aislantes adecuados.

En general, los hornos al vacío se dividen en: de pared caliente -retorta de pared simple y de pared doble- y los de pared fría. Estos hornos también se pueden agrupar según el modo de carga: Carga por encima o de foso, por el fondo o de campana y carga horizontal o de caja.

Además, en los últimos cinco años se han desarrollado los hornos de vacío de operación continua.

Los hornos de pared caliente con retorta de pared simple están constituidos por una retorta dentro de la cual se realiza el tratamiento; los elementos calefactores y sistemas de aislamiento térmico van en el extremo de la retorta. Se logra una temperatura uniforme porque los gradientes térmicos son reducidos por las paredes de la retorta. Sin embargo, ésta debe soportar la temperatura de trabajo, la carga proveniente de la presión atmosférica, por ello se requieren materiales resistentes mecánica y químicamente, tales como el acero AISI 310 o similares.

Los hornos de pared caliente con retorta de pared doble, se han diseñado para reducir las exigencias de trabajo de la retorta haciendo un vacío de 10^{-2} Torr en el espacio comprendido entre las dos paredes. En este espacio se sitúan los elementos calefactores que al estar en condiciones menos oxidantes, incrementan su vida útil.

En general, en los hornos de pared caliente se puede usar cualquier sistema calefactor, ya sea eléctrico, gas, tubos radiantes, etc.

Los hornos de pared fría están constituidos por un recipiente con pared refrigerada con agua, usándose en general una doble pared que sirve de camisa refrigerante. Dentro del recipiente se ubican la carga y el sistema

de aislamiento térmico que está formado por pantallas de radiación térmica. Actualmente hay unos hornos de pared fría que permiten hacer recocido, temple y revenido, usando como medio refrigerante gas o aceite. Lo mismo que en el caso del horno de pared caliente, para lograr enfriamientos rápidos es necesario transferir la carga a una cámara fría separada de la zona de calentamiento. Un horno de vacío de carga única tiene unas dimensiones típicas de 45x60x90 cm y una carga bruta de unos 200 kg. El horno se puede evacuar en diez minutos y calentar hasta 850°C en 35 min, esta temperatura se mantiene 45 min para asegurar una distribución uniforme. Las piezas se enfrían en aceite y el horno se deja enfriar hasta la temperatura de descarga en otros 35 min, esto da un tiempo total de proceso de dos horas y cinco minutos, con una producción de 96 kg/hr. En condiciones de alta producción, este rendimiento se mejora usando hornos continuos de hasta 1000 kg/hr de capacidad.

3.3 HORNOS PARA TRATAMIENTOS ISOTÉRMICOS

3.3.1 Hornos de baños de sales. Una de las más viejas formas de calentamiento son los baños de sales, que se sabe son los más eficientes en la transferencia de calor, uniformidad de la temperatura y control de las condiciones atmosféricas. Los baños de sales se usan en una amplia variedad de operaciones comerciales de tratamiento térmico, tales como cianuración, cementación líquida, austempering, martempering y revenidos; además, pueden utilizarse en el tratamiento de materiales que van desde

aceros de herramientas hasta aleaciones no ferrosas. La protección es total, puesto que las sales fundidas en sus crisoles, actúan como medios de calentamiento, de protección o de acción química sobre el metal como en la cementación, nitruración, etc.

En general, cuando se requieren temperaturas hasta de 1000°C se puede usar crisol de acero refractario y calefacción exterior, ya sea por medio de gas, aceite o resistencias eléctricas. Para temperaturas superiores y hasta unos 1300°C, se usan crisoles de ladrillo refractario y el calentamiento se hace con electrodos sumergidos de acero y grafito. Estos electrodos hacen circular la corriente alterna a través de las sales y el calentamiento se produce por la resistencia del propio a la corriente suministrada.

Por su versatilidad, los hornos de sales son el corazón de un taller de tratamientos térmicos. En la actualidad, existen baterías de hornos operados de una manera totalmente automática.

Según su finalidad, se formulan diferentes tipos de sales para los baños.

Baños para calentamiento. Para el calentamiento hasta las temperaturas de austenización se usan baños que evitan la oxidación y la descarburación; los más usados son los inertes, los neutros y los que contienen cianuro.

Los **baños de cianuro** contienen entre 5 a 10% de cianuro, son baños no activados para calentar piezas, especialmente para austenizar hasta 950°C. Además del cianuro de sodio, estos baños contienen cloruro de bario y potasio.

Los **baños inertes** contienen cloruro puro y mezclas de cloruros alcalinos y alcalinotérreos; se hacen inertes por la adición de ciertas sustancias como las sales de silicio. Estas sustancias inhibidoras no pueden utilizarse para los baños que contengan oxígeno combinado. La sal rectificadora genera lodos cuando forman silicatos y reduce el óxido de hierro y los carbonatos.

Estos baños se usan hasta unos 1100°C para precalentar aceros rápidos o para tratar aceros de trabajo en caliente; también para calentar otros aceros especiales y aleaciones no ferrosas.

Los **baños neutros** se usan hasta 1350°C y sirven para calentar los aceros rápidos, sin que se presente descarburación; su característica es que además del cloruro bórico, contienen combinaciones químicas inhibidoras que evitan la descarburación y protegen los electrodos de los hornos; las sustancias usadas son: Bórax, ácido bórico, óxido de magnesio y fluoruro de magnesio.

Baños isotérmicos. En el austempering del acero, el medio de sostenimiento más comúnmente usado son las sales fundidas porque ofrecen diversas ventajas, entre ellas porque permanecen estables a las temperaturas de trabajo y son solubles en agua, facilitando las operaciones de limpieza posteriores al tratamiento.

Una sal muy universal, pues trabaja entre 175 y 540°C, es la siguiente:

Nitrato de sodio	15-25%
Nitrato de potasio	45-55%
Nitrato de sodio	25-35%
Punto de fusión	150-165°C

Estas sales también se usan para el martempering y el enfriamiento de aceros de herramientas.

Sales para revenir. En general, el revenido del acero templado se efectúa entre 160 y 650°C según la composición de la estructura que se desee.

Normalmente los aceros de cementación se revienen entre 160 y 200°C; los de construcción hasta 250°C; los de temple y revenido entre 300 y 550°C; los aceros para trabajo en frío entre 100 y 400°C y los aceros para trabajo en caliente y los rápidos se revienen a temperaturas entre 480 y 650°C.

Toda la humedad debe removerse de las piezas antes de llevarlas al baño de sales porque la sal caliente reacciona violentamente con ella.

Después del revenido, las piezas deben limpiarse muy bien, pues la sal remanente es higroscópica y puede originar corrosión fuerte. Una sal muy usada para revenir entre 165 y 595°C es la siguiente:

Nitrato de sodio	37-50%
Nitrato de sodio	0,10%
Nitrato de sodio	50-60%

3.4 EQUIPOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO POR INDUCCIÓN

Los equipos de tratamientos térmicos por inducción han tenido desde 1.950 un gran desarrollo que todavía continúa, desplazando a otros procesos de tratamientos de aceros, tales como el temple a la llama, nitruración, carbonitruración y cementación gaseosas, recocidos con y sin atmósfera controlada.

Los dos tratamientos térmicos más frecuentemente realizados por inducción son el temple y el revenido de aceros, aunque se aplica también en normalizado, recocido y soldadura brillante. Las ventajas principales de los equipos de tratamiento térmico por inducción, respecto a hornos convencionales de llamas o de resistencias eléctricas, son:

- Rapidez de calentamiento, lo que permite, en caso necesario, el temple en una capa superficial de las piezas en toda su extensión o localizado en una zona.
- Precisión del tratamiento en cuanto a temperatura, capa y zona de aplicación.
- Economía de tratamiento y posibilidad de automatización completa del proceso.
- Sencillez de funcionamiento, exigiendo muy poco adiestramiento por parte de los operarios.
- Calidad uniforme de las piezas por la repetitividad exacta del proceso.
- Espacio reducido de los equipos, pudiendo situarlos dentro de la línea de máquinas-herramientas con eliminación casi total de almacenes intermedios.
- Flexibilidad de trabajo pudiendo variarse fácilmente tiempos, temperaturas, caudales, etc.

3.4.1 Inductores de temple. El inductor debe adaptarse a la geometría de las piezas que deben templarse por lo que la variedad de tipos de inductores de temple es muy elevada. De todos modos, en línea con el método de temple, pueden clasificarse en:

- **Inductor y pieza fijos.** El inductor es un anillo que rodea la pieza de temple o una espira plana. Véase Figura 8. Variando adecuadamente la

separación y/o el diámetro de las espiras, se pueden conseguir diferentes perfiles de temple. Es una disposición muy adecuada para piezas pequeñas y herramientas.

Figura 8. Disposiciones típicas inductor-pieza de temple

Al final del calentamiento se introduce la pieza en el tanque de temple o se ducha mediante chorros que salen del propio inductor como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Inductor con ducha (temple estático)

- **Inductor fijo y pieza giratoria.** Cuando la pieza es cilíndrica el inductor adopta las formas de la Figura 10.

Figura 10. Distribución de corriente inducida y temperatura

Es un método muy adecuado para ruedas, engranajes, mangones, extremos o bridas de palieres, etc. En algunos pueden emplearse bobinas especiales como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Inductores de formas especiales

- **Temple progresivo.** El inductor está fijo y la pieza se desplaza longitudinalmente o viceversa. La ducha de temple sigue al inductor (véase Figura 12). Es muy adecuado para ejes, palieres, etc.

Figura 12. Sistema de temple progresivo

- **Inductor y piezas planos.** En el caso de piezas planas no es posible utilizar inductores envolventes. Se utilizan normalmente para estos casos inductores planos provistos de culatas magnéticas construidas con chapas o ferritas (véase Figura 13).

FIGURA 13. Principio de inductor lineal

4. ELEMENTOS PARA LA PRÁCTICA METALGRÁFICA

4.1 GENERALIDADES

La metalografía es esencialmente el estudio de las características estructurales o de constitución de un metal o una aleación para relacionar ésta con las propiedades físicas y mecánicas. Sin duda alguna, la parte más importante de la metalografía es el examen microscópico de una probeta adecuadamente preparada, empleando aumentos que, con el microscopio óptico, oscilan entre 100 y 2000, aproximadamente.

Mediante ellos se pueden definir características estructurales, como el tamaño de grano, con toda claridad; se puede conocer el tamaño, forma y distribución de las fases que componen la aleación y de las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras heterogeneidades que tan profundamente pueden modificar las propiedades mecánicas y el comportamiento general del metal.

La experiencia demuestra que poco o nada se puede obtener del examen microscópico si antes no se prepara la probeta, para obtener una superficie satisfactoria, con arreglo a normas más o menos rígidas y precisas.

La preparación de la probeta consiste, en general, en obtener primero una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de papeles de esmeril de finura de grano creciente o realizando este desbaste con discos adecuados sobre los que se deposita un abrasivo, terminando con un pulido fino y final sobre discos provistos de paño. El final de la operación es la obtención de una superficie especular que es la requerida para, después, efectuar el ataque y observar adecuadamente la estructura.

El examen microscópico de una probeta no atacada revela pocos o ningún detalle estructural, a pesar de lo cual es de gran interés porque permite observar detalles que son ya visibles antes del ataque, como ocurre con los defectos superficiales, las inclusiones no metálicas, etc.

Puesto que el objeto de la mayoría de las investigaciones metalográficas es la de determinar las características estructurales verdaderas de la probeta,

es necesario que los diferentes constituyentes estructurales queden delineados con precisión y claridad. Esto se logra sometiendo la probeta a la acción química de un reactivo apropiado en unas condiciones cuidadosamente controladas.

Después de haberse hecho una buena preparación y un ataque apropiado a las probetas metalográficas se consigue o se logra los mejores resultados en el examen microscópico. El microscopio metalúrgico se compone de dos partes distintas y separadas - objetivo y ocular - y su finalidad es hacer posible la observación de detalles de un objeto que son demasiado pequeños para poder ser visibles a simple vista. La magnitud de los detalles que pueden observarse y la claridad con que pueden verse depende, en gran manera, de la corrección óptica de objetivos y oculares, pero es también de gran importancia que el metalógrafo esté suficientemente familiarizado con el conocimiento de los sistemas ópticos y tenga práctica en el manejo de su microscopio.

Solamente si se reúnen estas circunstancias se puede obtener del instrumento todo el rendimiento que es capaz de dar.

Manejando los equipos microscópicos y los principios de funcionamiento de muchas de sus partes con los ajustes necesarios se logran imágenes finales de la máxima calidad; es así como antes de impresionar una microfotografía es de importancia primordial lograr un enfoque perfecto.

4.2 EQUIPOS PARA LA PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

4.2.1 Toma de muestras. Las probetas seleccionadas deben ser características del metal estudiado y servir para el fin a que se dirige tal estudio. Cuando se examinan formas laminadas es conveniente tomar probetas transversales y longitudinales con relación a la dirección de laminación. Los metales moldeados, brutos de colada o recocidos deben observarse en toda su sección para poder apreciar posibles diferencias en su estructura entre los bordes y el interior. De especial interés es el examen de los bordes en materiales forjados y laminados, porque puede revelar zonas descarburadas u otras condiciones superficiales adversas.

Si la sección que ha de ser observada es relativamente blanda, la separación puede hacerse mediante una sierra mecánica o manual.

Las probetas de materiales duros que no se pueden serrar con facilidad, tales como los aceros templados y las aleaciones no férreas endurecidas por envejecimiento, se pueden cortar con seguridad empleando discos abrasivos. Tales discos son generalmente delgados (1,5 mm) y son un conglomerado de un abrasivo adecuado, tal como esmeril, carborundo o polvo de diamante. El disco gira a velocidades relativamente elevadas, y el aparato generalmente tiene un dispositivo que asegura la refrigeración durante el corte.

Si no se elige cuidadosamente el disco cortante y no se enfría suficientemente la probeta durante el corte, se altera radicalmente la estructura original, por lo menos en la superficie obtenida por el corte, como consecuencia del calor desarrollado por el frotamiento.

Siempre que sea posible las probetas deben tener un tamaño conveniente y cómodo de manejar. Las probetas de manejo más cómodo son aquellas cuya altura es de unos 12 mm y su dimensión en una de las direcciones de la superficie a pulir, de 20 a 25 mm.

4.2.2 Desbaste a mano.

4.2.2.1 Desbaste grosero. La superficie que haya de observarse se debe primero hacer plana mediante un desbaste grosero, que se lleva a cabo ventajosamente mediante una desbastadora de cinta.

Para no alterar la estructura superficial del metal, especialmente si se está templado, se sumerge frecuentemente la probeta en agua, a fin de que se mantenga fría.

Biselando los bordes de la probeta durante el desbaste grosero se evitan las roturas y desgarrones de papeles y paños en las operaciones posteriores; tal biselado no puede realizarse cuando se va a examinar el material inmediato

a esos bordes en cuyo caso se monta adecuadamente la probeta y se protegen sus bordes.

Cuando la superficie de la probeta es completamente plana y se han eliminado sus irregularidades se da por terminado el desbaste grosero. La probeta y las manos del operador se lavarán cuidadosamente con jabón y agua corriente para evitar el transporte al papel de esmeril de las partículas del abrasivo que ha servido para el desbaste grosero.

4.2.2.2 Desbaste intermedio. Los papeles de esmeril empleados en la preparación de las probetas metalográficas deben ser de alta calidad en cuanto a la uniformidad en el tamaño de las partículas; conviene siempre emplear un papel nuevo para cada probeta.

El primer papel empleado en el desbaste intermedio, después de la operación grosera es el número 1 o el número 0. El papel de esmeril se coloca sobre una placa o sobre cualquier superficie bien plana y limpia, como por ejemplo, una luna de vidrio. Se sujeta la probeta y se mueve longitudinalmente de un lado a otro del papel comprimiéndola con una presión suave; la dirección del movimiento se mantiene constante, para que todas las rayas producidas sean paralelas. El final de la operación sobre un papel esta determinado por la desaparición de las rayas producidas por el desbaste grosero o el papel anterior, y para poder reconocerlo fácilmente se opera en forma que las nuevas rayas sean perpendiculares a las anteriores;

así es fácil ver cuándo estas nuevas rayas, más finas, sustituyen totalmente a las anteriores más gruesas.

Para desbastar muchas probetas de aleaciones tratadas térmicamente, y en particular muchos de los metales blandos, es conveniente impregnar los papeles de esmeril con un lubricante adecuado, tales como aceites, gasolina, soluciones de parafina en queroseno, jabones líquidos, glicerina y mezcla de glicerina y agua.

4.2.2.3 Desbaste final. El desbaste final o fino se realiza en la misma forma como se realiza el intermedio, pasando del papel de esmeril empleado en este último al número 00; en general, se emplean sucesivamente dos papeles que son el número 00 indicado y el número 000.

Cada vez que se cambia de papel se opera en forma que las nuevas rayas sean perpendiculares a las anteriores, lavándose siempre la probeta con agua corriente, operación esta última que se repite también antes de pasar del último de papel al disco de la pulidora. Cuando la observación visual demuestra que sólo existen las rayas producidas por el último papel empleado y se han eliminado completamente las anteriores, la probeta está en condiciones de ser pulida.

4.2.3 Pulido. El pulido de una probeta metalográfica tiene por objeto eliminar de su superficie las rayas finas producidas en la última operación de desbaste y conseguir una superficie sin rayas y con alto pulimento. Mientras sea posible hay que tomar precauciones para que la operación se realiza en un ambiente limpio de polvo, evitando la contaminación de los discos

4.2.3.1 Pulido metalográfico. El pulido preliminar y el final de una probeta metalográfica desbastada se realizan en uno o más discos. Tales discos son platos de bronce de 20 a 25 cm de diámetro, cubiertos con un paño de calidad apropiada. Los discos giran en un plano horizontal, y es conveniente que cada disco posea su motor individual para facilitar el control y ajuste de la velocidad de rotación.

En los equipos automáticos para preparar de dos a seis probetas estas se mantienen en contacto con el disco que gira, por medio de un soporte.

Los equipos de desbaste y pulido automático, ahorran mucho tiempo y trabajo, pero es difícil observar el progreso de la preparación de la probeta y conseguir el control del grado final de pulido que es necesario en un trabajo preparatorio. Lo adecuado es utilizar técnicas manuales.

4.2.3.2 Abrasivos para el pulido metalográfico.

Polvo de diamante. El abrasivo que más se aproxima al ideal es éste, no adulterado y bien clasificado. Se emplea para preparar probetas de aleaciones muy duras, tales como carburos sinterizados de wolframio o boro y para las aleaciones y metales más comunes.

El polvo de diamante comercial, adecuado al empleo en metalografía, los tamaños de partículas están entre 120,0 a 120,5 μ . Con el polvo de diamante se recomienda el empleo de diferentes lubricantes, como el aceite de oliva o de cacahuete, aceite de lavanda, aceites minerales de distintas viscosidades y tetracloruro de carbono.

Alúmdum. Para el pulido intermedio o preliminar de las probetas metalográficas, se emplea este abrasivo que es óxido de aluminio fundido y, a veces, carborundo (carburo de silicio) o carburo de boro, todos en un grado de finura de 500 a 600 mallas. Se emplean en forma de una suspensión acuosa adecuada, que se añade al paño que recubre el disco de la pulidora.

Alúmina. La alúmina (óxido de aluminio) es, probablemente, el abrasivo más satisfactorio y universal desde el punto de vista metalográfico. El comercio lo proporciona en forma de polvo seco (alúmina levigada), y en forma de pastas o suspensiones acuosas. A la primera forma pertenecen los polvos para pulir Linde en sus tipos A y B, la alúmina Norton, etc., y a la

segunda, productos como el Gamal, productos para pulir AB, alúmina para pulir Fisher y otros.

Otros abrasivos. Además de los abrasivos citados anteriormente, también el óxido de cromo y el óxido de hierro (rojo de joyeros) se emplean con éxito en el pulido. El rojo de joyeros, tiene propensión a hacer fluir el metal superficial, y aunque proporciona una superficie extraordinariamente pulimentada, tal superficie no es la necesaria y característica del pulido metalográfico.

4.2.3.3 Paños para pulir. La elección de un paño para pulir depende esencialmente de la naturaleza específica de la probeta que ha de prepararse y de la finalidad del examen metalográfico posterior. En el comercio se encuentran paños, tales como, Selvyt, Kitten's Ear, Vel-Chamee, Gamal, Miracloth, Microcloth y otros. La textura superficial de los paños varía desde la correspondiente a los que no tienen pelos, como la seda natural y el tejido empleado para cubrir las alas de aeroplanos que se utiliza para casos especiales, hasta aquellos otros con pelos relativamente largos como el terciopelo y la pana, que son de aplicación muy general. En el caso intermedio se encuentran los paños de mesa de billar, los paños de lana de distintas finuras y las lonas de diferentes pesos.

También se han introducido tejidos que contienen fibras sintéticas que son el Gamal y el Microcloth. Estos paños dan muy buen pulido y resisten muy bien al frotamiento, a los desgarres y a otras formas de maltrato.

Para utilizar por primera vez un paño, se le sumerge completamente en agua clara, y después, y aún húmedo se le coloca sobre el disco de la pulidora y se le sujeta con el dispositivo correspondiente, haciéndole quedar bien tenso. Seguidamente se le carga con el abrasivo adecuado.

La carga suele hacerse mejor espolvoreando sobre el paño el polvo abrasivo seco y añadiendo agua hasta tener una pasta clara que se trabaja con la yema de los dedos, extendiéndola e impregnando bien las fibras del paño.

4.2.4 Pulido preliminar. El disco de la pulidora empleado en esta operación se cubre, generalmente, con paño de lana, paño de billar o una lona de poco peso y se le hace girar a unas 400 o 500 rpm. Como abrasivo se emplea alúmdum o carborundo de 600 mallas o productos equivalentes.

Para realizar el pulido preliminar se mantiene la probeta desbastada, firmemente, sobre el disco que gira, y durante la operación se mueve continuamente desde el centro al borde del disco, y a la inversa. Si es necesario se añade de cuando en cuando suspensión del abrasivo que contenga unos 15 gr por cada 100 cm³ de agua. Si la cantidad de abrasivo que hay sobre el disco es suficiente, pero se seca el paño, se añade agua clara en la cantidad necesaria.

El pulido preliminar dura de unos 2 a 5 seg, y al terminarse, se lava bien la probeta con agua corriente, se la enjuga con un poco de algodón en rama,

para quitar todos los detritos y el abrasivo adherido, y se le humedece con alcohol etílico o alcohol isopropílico, secándola después en aire caliente; para esta operación son muy adecuados los secadores empleados para el cabello. A continuación se examina la probeta con detalle para ver si aún contiene rayas más gruesas que las debidas al abrasivo empleado. Tales rayas pueden haber sido introducidas por la presencia de detritos sobre el paño de pulido o ser rayas demasiado profundas producidas en el desbaste. El único recurso que queda es volver a repetir el desbaste poniendo más cuidado en dicha operación.

4.2.5 Pulido final. Esta operación, salvo que sea fundamental la preservación de las inclusiones no metálicas, se realiza cubriendo el disco de la pulidora con un paño de pelo largo, como el terciopelo, el Gamal o el Miracloth. Según el metal o aleación que se pule, se emplea uno de los abrasivos citados anteriormente, por lo regular, la alúmina levigada es el abrasivo de empleo más universal en el pulido final.

Durante el pulido se aplica a la probeta una presión moderada y se le mueve continuamente del centro a la periferia del disco. La suspensión del abrasivo se añade de cuando en cuando mediante un frasco adecuado; si hay suficiente abrasivo, pero si se seca el paño, se añade agua clara.

Eventualmente, y en particular al final de la operación, se gira la probeta en sentido contrario al de la rotación del disco. Esta operación modifica

continuamente la dirección del pulido y evita la formación de colas de cometa.

Hay que tener en cuenta que la superficie pulida no debe tocarse con objetos extraños que puedan rayarla, ni se debe tocar con los dedos, que pueden mancharla o ser causa de que el ataque posterior sea desigual.

La probeta puede atacarse inmediatamente después, que suele ser lo más corriente, o se puede guardar para usarla más tarde y examinarla sin ataque.

4.2.6 Pulido electrolítico. El pulido electrolítico introducido por Jacquet y Rocquet disminuyen muchas de las dificultades encontradas en el pulido mecánico. Puesto que este método de pulido evita la formación de capas distorsionadas de metal en la superficie desbastada de la probeta, es ideal para la preparación de muchos metales blandos, aleaciones monofásicas y aleaciones que endurecen fácilmente por deformación, tales como los aceros inoxidable austeníticos.

Se pueden preparar simultáneamente varias probetas, con tales que todas se hayan preparado anteriormente en la forma adecuada. La calidad es igual a la conseguida con un pulido mecánico bien hecho.

La principal desventaja del pulido electrolítico es la destrucción parcial o total de las inclusiones no metálicas por reacciones químicas con el electrólito.

4.2.6.1 Fundamentos y aparatos. El mecanismo general, parece asociado a la disolución anódica. Las aristas salientes y las protuberancias de la probeta desbastada se eliminan por disolución selectiva, mientras que los valles existentes entre los salientes quedan protegidos de la disolución por los productos de reacción formados o, más probablemente, porque en ellos la velocidad de disolución es mucho menor.

La superficie de la probeta a pulir se rectifica desbantándola en una de las formas descritas anteriormente sobre papeles de esmeril. En la mayoría de los metales se llega hasta el papel 000. Después de lavar bien la superficie de la probeta, para limpiarla de detritos y abrasivo, se hace una limpieza final con éter u otro disolvente adecuado, con el fin de desengrasarla totalmente.

La probeta desbastada y limpia se coloca como ánodo en la celda electrolítica.

El material del cátodo debe elegirse según el metal a pulir y el electrólito.

La elección del electrólito depende de la composición y características estructurales (número y clases de fases presentes) de la probeta.

Aunque el pulido electrolítico no produce distorsión del metal superficial, a veces se observa esta distorsión en las probetas pulidas electrolíticamente.

Debe achacarse a la operaciones de desbaste, y se elimina completamente por pulido electrolítico y ataques repetidos.

4.3 REACTIVOS QUÍMICOS

4.3.1 Ataque de las probetas para su examen microscópico. Después de haber cumplido con los métodos mediante los cuales se preparan las probetas metalográficas, nos referiremos ahora al ataque de las mismas; teniendo en cuenta que la finalidad de la mayoría de las investigaciones metalográficas es determinar las características estructurales verdaderas de la probeta, es necesario que los diferentes constituyentes estructurales queden delineados con precisión y claridad. Esto se logra sometiendo la probeta a la acción química de un reactivo adecuado en unas condiciones cuidadosamente controladas.

4.3.2 Reactivos de ataque. En general, los reactivos adecuados para el ataque metalográfico se componen de ácidos orgánicos o inorgánicos, álcalis de varias clases, y otras sustancias más complejas disueltas en disolventes apropiados como agua, alcohol, glicerina, glicol o mezclas de varios disolventes.

Las normas han generalizado el uso de los siguientes reactivos para el ataque químico de probetas.

- Ácido pícrico (picral)

4 gr de ácido pícrico cristalizado

100 cm³ de alcohol etílico a 95%.

Utilizable con todos los aceros aleados y no aleados, aceros especiales con bajo contenido de materiales aleados, y fundición gris, así como para estructuras particularmente finas. Oscurece la martensita.

El ataque se prolonga desde 10 segundos hasta unos cuantos minutos; si se desea un ataque más lento, se sustituye el alcohol etílico por el amílico.

- Ácido nítrico (nital)

4 cm³ de ácido nítrico concentrado (d=1,4)

100 cm³ de alcohol etílico a 95 %.

Resalta los diversos constituyentes estructurales y el contorno de los granos de los aceros no aleados. Pone de manifiesto las uniones de los granos de ferrita; la perlita se ennegrece y la cementita se mantiene blanca.

- Agua regia glicerinada (Vilella)

10 cm³ de ácido nítrico concentrado (d=1.4)

30 cm³ de ácido clorhídrico (d=1.19)

30 cm³ de glicerina bidestilada

Pone de manifiesto las estructuras de los aceros comerciales resistente al calor y a la corrosión, y de las aleaciones Ni-Cr. Puede calentarse la probeta en agua hirviendo y también puede utilizarse el agua regia en caliente.

- Picrato sódico

2 gr de ácido pícrico cristalizado

100 cm³ de solución acuosa de hidrato sódico a 25%.

Descubre la cementita y los carburos complejos en los aceros especiales.

Debe usarse la solución recién preparada e hirviendo. La duración del ataque es de unos 5 a 10 minutos.

- Ferricianuro potásico alcalino (Murakani)

10 gr de ferricianuro potásico

10 gr de hidrato sódico

100 cm³ de agua destilada

Destaca los carburos en los aceros rápidos y en los especiales resistentes al calor y a la corrosión. Se utiliza recién preparada y normalmente hirviendo.

Duración del ataque: de 5 a 10 minutos.

- Ferricianuro potásico alcalino (Murakani atenuado)

6 gr de ferricianuro potásico

10 gr de hidrato potásico

100 cm³ de agua destilada

Evidencia la estelita en la fundición. Debe utilizarse la solución recién preparada, a unos 50°C, durante 30 segundos a 3 minutos.

- Cloruro cúprico (Kalling)

100 cm³ de ácido clorhídrico (d=1.19)

5 gr de cloruro cúprico cristalizado

100 gr de alcohol etílico a 95%

100 cm³ de agua destilada

4.3.3 Mecanismo del ataque. El mecanismo de ataque de las aleaciones polifásicas es, de naturaleza electroquímica, consecuencia de las diferencias de potencial que se producen en los diferentes constituyentes, cuando se pone la probeta en contacto con el reactivo.

Las fases de potencial más elevado se comportan anódicamente, y tienden a disolverse más fácilmente en un ataque normal. Las fases electronegativas, catódicas, con un potencial más bajo, no se alteran apreciablemente durante un ataque normal o que dure un tiempo más corto que el que se necesitaría para producir un cambio en el orden relativo del potencial de las fases

4.3.4 Métodos de ataque. La consideración preliminar más importante es la elección acertada del reactivo adecuado, de entre los recomendados para una aleación o metal dados.

Los reactivos de ataque se aplican, en general, por inmersión de la probeta en el reactivo o poniendo en contacto con la superficie de la misma un algodón impregnado. Sea cualquiera el método de ataque que se haya de emplear, es preciso que la superficie de la probeta esté limpia, para asegurarse que el reactivo la mojará regular y uniformemente. Para ello se lava primero a fondo con agua corriente caliente, se frota luego, con cuidado, utilizando un algodón húmedo, se vuelve a lavar con alcohol etílico o isopropílico (petrohol) y por fin se seca en un chorro de aire caliente.

Cuando se realiza el ataque por inmersión, se suspende la probeta, con su superficie pulida hacia abajo dentro del reactivo, sujetándola con los dedos o con unas pinzas.

Para desalojar burbujas de aire retenidas en la superficie y asegurar que bajo esa superficie siempre existe reactivo no gastado, se agita moderadamente la probeta teniendo cuidado de que la superficie pulida no se raye por tocar el fondo del recipiente que contiene el reactivo.

Inmediatamente después de la inmersión, se puede observar que la superficie pulida se pone más o menos mate; con alguna práctica, la observación del aspecto que va tomando dicha superficie indica cuándo debe suspenderse la operación. Cuando el tiempo transcurrido se considera suficiente, se retira la probeta del reactivo y, rápidamente, se le introduce en un chorro de agua caliente. De esta manera se detiene inmediatamente la acción del reactivo y se elimina toda traza del mismo de la superficie de la probeta. Seguidamente se lava con alcohol etílico o isopropílico, para quitar las gotitas de agua y, después, se seca en un chorro de aire caliente.

Si el reactivo ha de aplicarse mediante un algodón impregnado, se emplea una técnica que, en parte es semejante la descrita. Sobre la superficie pulida, después de lavada en la forma indicada anteriormente, se aplica un algodón blando empapado en el reactivo. Si el tiempo necesario para el

ataque es largo se vuelve a impregnar el algodón de cuando en cuando, sumergiéndolo en el reactivo. Para evitar que se manchen las yemas de los dedos se puede sostener el algodón con unas pinzas o sujetarlo en el extremo de una varilla.

4.3.4.1 Tiempo de ataque. El tiempo de ataque depende parcialmente de los aumentos a que haya de examinarse la estructura y del hecho de que sólo haya de realizarse el examen visual o haya de obtenerse una fotografía.

Cuando la estructura ha de fotografiarse, especialmente si ha de hacerse con gran aumento, el tiempo de ataque debe ser ligeramente menor que el requerido para obtener un contraste máximo y óptimo en la observación visual.

El sobreataque es tan inadecuado como el ataque escaso; el ataque excesivo oculta detalles finos, los límites de grano se ensanchan considerablemente, estructura observada no es la exactamente característica de la probeta.

Cuando la probeta está sobreatacada siempre es necesario volver a pulirla sobre el disco final y, luego, volver a repetir el ataque durante un tiempo más corto. En algunos casos, cuando el ataque se prolongó excesivamente, puede ser necesario desbastar sobre papeles de esmeril números 00 y 000, y repetir el pulido en uno o dos discos.

En el caso del ataque escaso, si la probeta después de un primer ataque aparece poco atacada para el examen a los aumentos deseados, se puede repetir el ataque sin que suela ser necesario volver a preparar primero la superficie. Algunos reactivos, sin embargo, tienden a manchar la probeta si se repite el ataque. Sólo en estos casos es necesario volver a pulir para eliminar los efectos del primer ataque, antes de repetirlo.

4.3.5 Ataque electrolítico. El ataque por métodos electrolíticos es de particular utilidad para poner de manifiesto la estructura en materiales tales como las aleaciones para termopares, metales fuertemente deformados en frío, aleaciones resistentes a la corrosión y al calor y aleaciones que presentan pasividad superficial durante los ataques usuales. El ataque electrolítico consiste en hacer pasar una corriente continua, que varía desde una fracción de amperio a varios amperios de intensidad, a través de una celda electrolítica, que contiene un electrólito apropiado y en la que la probeta es el ánodo, siendo el cátodo de algún material insoluble como platino o grafito.

La elección del electrólito depende del metal o aleación que ha de atacarse y de los constituyentes de estructura que el ataque haya de poner de manifiesto.

4.4 MICROSCOPIOS Y MICROFOTOGRAFÍA

4.4.1 Análisis microscópico. El análisis microscópico consiste en examinar la superficie de una probeta, pulida a espejo y luego atacada con reactivos apropiados. Este examen permite reconocer la existencia y distribución de los varios constituyentes, ya que éstos se comportan diferentemente frente al reactivo: algunos se ennegrecen, otros se colorean, y otros permanecen brillantes al no ser atacados.

Los cristales de una determinada estructura no están todos orientados en el mismo sentido, y sus secciones obtenidas con el plano de pulido tienen diversas orientaciones respecto a los ejes cristalográficos. Por esta razón, las caras de los distintos granos ofrecen diferente resistencia al ataque reactivo, por lo tanto, más o menos en relieve respecto al plano de pulido; en consecuencia, cuando incide sobre ellos la luz se producen sombras que hacen visible su contorno.

Por la misma razón puede darse el caso de que los cristales tomen coloraciones ligeramente distintas por no haber sido atacados por el reactivo en igual medida.

4.4.2 Microscopio metalográfico. El microscopio metalográfico está formado de las siguientes partes: Banco óptico, aparato para iluminación de la probeta, objetivo, ocular para observación directa y cámara fotográfica. Su principio de funcionamiento es análogo al del microscopio metalográfico de Le Chatelier, como se muestra en la figura 14.

Figura 14. Microscopio metalográfico

4.4.2.1 Aparato de iluminación. Comprende una fuente lumínica y un sistema óptico que dirige la luz hacia la superficie preparada de la probeta. Dicha fuente lumínica puede ser una lámpara de arco, de incandescencia o de vapor de mercurio. Los rayos luminosos reflejados por la superficie de la probeta y, por lo tanto, la imagen de ésta, recogida por el objetivo se transmite mediante prismas y espejos al ocular para la observación directa, o la cámara fotográfica.

Este sistema de iluminación por reflexión es el más empleado en el examen metalográfico por ser la probeta opaca. Insertando filtros de vidrio coloreado en el trayecto de los rayos se mejora el contraste y la reproducción en colores. Puede iluminarse la superficie perpendicularmente o con una cierta oblicuidad. La iluminación

perpendicular permite una mejor utilización de la apertura del objetivo, pero da poco contraste: Se utiliza con grandes aplicaciones. La iluminación oblicua da imágenes con mucho contraste, y se utiliza normalmente con pequeñas o medias ampliaciones.

4.4.2.2 Objetivos. Están formados por un manguito metálico intercambiable, que aloja un conjunto de lentes dispuestas de modo que forman un sistema óptico de distancia focal pequeña, y gran ampliación.

Para obtener imágenes de contorno nítido, la aberración esférica ha de ser mínima, por lo que las lentes han de tallarse con gran precisión.

Para reducir la aberración cromática, es decir la formación de irisaciones en los bordes, debidos al distinto índice de refracción de los colores monocromáticos que forman la luz blanca, se emplean objetivos acromáticos y apocromáticos: Los primeros constan de una lente convergente y otra divergente, de distinto vidrio, que hacen coincidir las imágenes de dos colores, y los segundos hacen coincidir las de tres colores con muy poco error de esfericidad.

Características de un objetivo. Las características de un objetivo son:

- Aumentos
- Luminosidad

- Poder separador lateral
- Poder separador axial, o penetrante, o profundidad de foco.

Aumentos. El aumento total del microscopio se obtiene multiplicando los aumentos del objetivo por los lados del ocular.

Luminosidad. La luminosidad es la aptitud de un objetivo a dejarse atravesar por los rayos luminosos, o dicho de otra forma, es la cantidad de luz que atraviesa un objetivo. Se expresa por la apertura numérica:

$$AN = n \operatorname{sen} \alpha$$

en donde,

$n = \frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r}$ = índice de refracción del medio interpuesto entre el objeto y la

lente frontal del objetivo, y α es el ángulo formado por el eje óptico del objetivo y el rayo más inclinado del cono luminoso que lo puede atravesar: en otras palabras, es la semiapertura del máximo cono de luz recogido por el objetivo.

Para una lente dada y, por consiguiente, a igualdad del ángulo α , la luminosidad es tanto mayor cuanto más grande es el índice de refracción del medio interpuesto. En efecto, al aumentar dicho índice, el haz e luz se

refracta más y la lente recoge los rayos más extremos; en consecuencia, es mayor la cantidad de luz que la atraviesa. En el examen metalográfico se emplean objetivos en seco y objetivos en inmersión.

En los objetivos en seco, el medio interpuesto entre probeta y lente es el aire ambiental, $n=1$.

En los objetivos de inmersión homogénea, el medio dispuesto es una gota de líquido, de índice de refracción igual o muy próximo al de la lente frontal del objetivo. El líquido más empleado es el aceite de cedro de índice de refracción

$n= 1,515$.

Con una misma lente, si $\alpha=60^\circ$, tendremos las siguientes luminosidades:

1. Con aire: $AN= 1 \text{ sen } 60^\circ = 0,866$
2. Con aceite de cedro: $AN= 1,515 \text{ sen } 60^\circ = 1,312$

Aumentos normalizados

1. Para objetivos en seco 50-75-100-200-500-750
2. Para objetivos de inmersión 1000-1500-2000

En los oculares se emplean los siguientes aumentos: 5-6-8-10-12-16.

El poder separador lateral. El poder separador lateral de un objetivo es su capacidad para separar distintamente dos puntos próximos situados sobre un mismo plano, normal al eje óptico.

El poder separador lateral, expresado por la mínima distancia δ_L a que se pueden encontrar dos puntos netamente distinguibles el uno del otro, es directamente proporcional a la longitud de onda λ de la luz empleada, e inversamente proporcional a la apertura numérica AN del objetivo: tendremos pues

$$\delta_L = k \frac{\lambda}{AN} \text{ en } \mu\text{m}$$

en donde k es la constante numérica de proporcionalidad.

En consecuencia, al aumentar la luminosidad del objetivo disminuye su poder de separar netamente dos puntos situados sobre un mismo plano, normal al eje óptico.

El poder separador axial. Es la capacidad de un objetivo para separar distintamente dos puntos próximos, situados sobre dos planos distintos, normales al eje óptico.

El poder penetrante, medido por el espesor δ_F de la zona en la que sus puntos quedan enfocados viene dado por la formula

$$\delta_F = \frac{A_0}{G_0 n \sin \alpha} , \text{ en } \mu\text{m}$$

en donde:

A_0 = poder separador del ojo humano ($A_0 \cong 0,1 \text{ mm}$)

G_0 = aumentos del objetivo

$n \sin \alpha$ = AN = luminosidad del objetivo

Como se ve, el poder separador axial es inversamente proporcional a los aumentos y a la luminosidad del objetivo.

4.4.2.3. Oculares. El ocular es un sistema de lentes cuya finalidad es aumentar la imagen primaria producida por el objetivo y hacerla visible como imagen virtual o proyectarla como real, como sucede en la microfotografía.

Los oculares se pueden dividir en:

- Tipos negativos
- Tipos positivos
- Tipos fotográficos o ampliadores

Tipos negativos. Los oculares negativos, de los cuales son los más representativos los Huygens, se componen, en su forma más sencilla, de dos

lentes no acromáticos y plano convexas, montadas en un tubo y presentando ambas su lado convexo en la dirección del objetivo. El término negativo que se aplica a estos oculares no es correcto, sólo indica un comportamiento diferente al de los positivos y las circunstancias de que el punto focal equivalente de la combinación formada por la lente ocular y la lente de campo queda entre las dos lentes citadas.

Tipos positivos. Un ocular positivo consta de varias lentes sencillas, calculadas y combinadas para que el sistema se comporte como una lente positiva única. El primer foco principal del sistema se encuentra delante de la lente de campo y, por ello, el sistema puede funcionar como una lupa. Esto diferencia a un ocular positivo de uno negativo.

El ocular de Ramsden, es el ocular positivo más sencillo y el más usado.

Tipos compensadores. Los oculares compensadores forman un grupo de oculares corregidos cromáticamente por exceso, a fin de que puedan compensar los errores cromáticos residuales de los objetivos apocromáticos y semiapocromáticos. Los oculares compensadores se construyen en los tipos positivos o negativos y, por estar mejores corregidos de errores ópticos pueden tener mayores aumentos propios que los de Ramsden o Huygnes. Generalmente, los de mayores aumentos son positivos y los de menores negativos.

Tipos fotográficos amplificadores. Los amplificadores, de los que son ejemplo los Amipla y Homal, son un grupo de oculares proyectados para

su empleo en microfotografía o para la proyección a distancias relativamente cortas. Un ocular de este tipo es un sistema de lentes que funciona como un verdadero sistema negativo (no confundir con los oculares de Huygens). La pupila de salida de estos sistemas queda entre sus lentes y el objetivo y, por ello, no se les puede emplear para el examen visual ni tampoco se pueden usar como lupa.

Oculares de medida. Es muy frecuente la necesidad de efectuar medidas precisa sobre la superficie de la probeta metalográfica, como la de determinados defectos o la de huellas de microdureza, y también la de superponer una escala de medida micrométrica u otro tipo de retículo a la imagen proyectada, en forma de que quede incorporada a la microfotografía incorporada. Esto se logra mediante un ocular de medida que es un ocular positivo o negativo proyectado de forma que se le pueda colocar un retículo apropiado en el plano focal de la imagen real primaria y se incorpore con ella a la imagen final.

4.4.3. Microfotografía.

4.4.3.1. Métodos de enfoque. Antes de impresionar una microfotografía, es importancia primordial lograr un enfoque perfecto. A pocos aumentos suele ser suficiente con la observación de la imagen proyectada sobre el vidrio deslustrado. Con los objetivos de elevada apertura numérica siempre se presenta un campo imagen muy curvado; debe enfocarse siempre el

centro de la imagen y esta región es la que debe impresionarse en la microfotografía.

Cuando se enfocan microestructuras muy finas, es muy difícil el enfoque perfecto sobre el vidrio deslustrado, porque éste siempre es demasiado basto. En estos casos se emplea una lupa de enfoque retirando el vidrio deslustrado.

4.4.3.2. Determinación de la exposición correcta. Para conseguir una buena microfotografía es imprescindible emplear el tiempo de exposición justamente necesaria. El tiempo de exposición varía inversamente con la brillantez de la imagen observada sobre la pantalla deslustrada y con la sensibilidad de la placa o película utilizada.

Cuando el operador tiene mucha práctica, le basta observar la brillantez de la imagen proyectada en el vidrio deslustrado para estimar la exposición correcta.

4.4.4 Reproducciones fotográficas. Para conseguir una buena reproducción fotográfica hay que escoger con el máximo cuidado la iluminación y los aumentos.

Como norma general los aumentos deben ser los mínimos necesarios para que la estructura que interesa sea claramente visible.

Esta condición se cumple tomando un aumento comprendido entre 400 y 1000 veces la luminosidad del objetivo. Así, por ejemplo, si la luminosidad es 0,88 tendremos $0,88 \times 600 = 520$, y podrá tomarse un aumento de X500.

La placa o película debe ser de tipo de emulsión lenta obteniendo así el máximo contraste.

5. ENSAYOS MECÁNICOS

5.1 GENERALIDADES

El comportamiento mecánico de los materiales se describe mediante sus propiedades mecánicas, que son simplemente los resultados idealizados de

ensayos. Estas pruebas están diseñadas para representar diferentes tipos de condiciones de carga. El ensayo de tensión describe la resistencia del material un esfuerzo de tensión aplicado lentamente; los resultados definen el esfuerzo de fluencia, la ductilidad y la rigidez del material. El ensayo de fatiga permite entender cómo se comporta un material cuando se aplica un esfuerzo repetido cíclico y el ensayo de dureza, además de medir la resistencia al desgaste y a la abrasión del material puede correlacionarse con otras propiedades mecánicas.

Aunque se usan muchas otras pruebas, incluyendo algunas muy especializadas, para describir el comportamiento mecánico, las propiedades obtenidas con estos tres ensayos son las más comúnmente presentadas en los manuales. Sin embargo, cabe hacer notar siempre que las propiedades que señalan los manuales son valores promedio de ensayos idealizados, y deben emplearse con precaución.

A continuación se detallarán éstos ensayos que se utilizan para medir cómo se comporta un material al aplicarle una fuerza.

5.2 ENSAYOS DE DUREZA

Los ensayos de dureza desempeñan un papel importante en la determinación de las características de un metal o aleación, y es frecuente que los resultados de tales ensayos se tomen como base para la aceptación de piezas terminadas o semiacabadas. Esto suele aplicarse principalmente en los

procesos de tratamiento térmico o endurecimiento. Estas razones justifican la importancia de la clara comprensión de los fundamentos de los diferentes ensayos de dureza, empleados como rutina de taller o laboratorio de inspección o como instrumento de investigación, afin de que sean bien interpretados los datos correspondientes.

5.2.1 El ensayo Brinell.

5.2.1.1 Máquina para el ensayo. Es esencialmente un aparato en que una presión hidráulica fuerza a una bola de acero, de tamaño tipificado, a comprimirse contra el metal bajo una carga estática determinada. La carga a emplear depende del tamaño de la bola y de la dureza relativa del material ensayado. Un manómetro Bourdon, indica al operador la carga aplicada en cada momento. Terminando el ensayo, se relaja la presión accionando una válvula apropiada del dispositivo hidráulico.

5.2.1.2 Penetradores y carga. Los penetradores empleados en el ensayo Brinell normal son bolas esféricas con cinco ó diez milímetros de diámetro. Para casos específicos pueden utilizarse bolas de otros diámetros, tales como 1,25; 2,5 y 7 mm, pero el ensayo realizado con tales bolas no puede considerarse como ensayo tipo. Los penetradores normales pueden ser de tres calidades diferentes: bolas fabricadas de un acero ordinario alto en carbono, bolas fabricadas con un acero al carbono endurecido por tratamiento térmico (bolas Hultgren), bolas de carburo de wolframio. El empleo de unas u otras depende del material ensayado.

Cuando, al realizar el ensayo, se comprime la bola contra la superficie de la probeta, es inevitable que se deforme. La magnitud de esta deformación de la bola depende de la dureza del material ensayado, de la dureza de la bola y de la carga aplicada. Cuando la dureza del material excede de unas 525 unidades Brinell, las bolas de acero ordinarias sufren deformaciones lo suficientemente grandes para que las cifras de dureza halladas sean inutilizables. Este límite se extiende hasta unas 600 unidades Brinell usando las bolas Hultgren y hasta las 725 con las de carburo de wolframio. A pesar de todo, las medidas superiores a las 600 unidades Brinell son de poca garantía.

En los Estados Unidos el ensayo Brinell se realiza con las especificaciones de la American Society for Testing Materials (ASTM), que indican una carga de 3.000 Kg, aplicada durante al menos 10 seg, y bola de 10 mm para hierro y acero; en las aleaciones no férricas se prescriben 500 Kg de carga, bola de 10 mm y tiempo de aplicación no inferior a 30 seg.

5.2.1.3 Métodos para medir la huella producida por la bola. Para calcular la cifra de dureza Brinell es necesario medir el diámetro de la huella (método más frecuente) o la profundidad de la misma, una vez que se ha terminado el ensayo de penetración.

El tubo del ocular lleva una escala micrométrica graduada en décimas de milímetro en una extensión de unos siete milímetros, pudiéndose estimar hasta 0,05 mm. Cuando es necesario una medida más exacta, como suele ser el caso cuando las huellas son pequeñas, se emplean microscopios que permiten apreciar 0,001 mm.

La profundidad se puede determinar mediante dispositivos aplicados a la máquina de ensayo y ello representa una ventaja, ya se puede realizar en una operación continuada el ensayo de penetración y la medida de la huella producida.

Los resultados suelen ser más fácilmente reproducibles si se parte del diámetro que si se utiliza la profundidad.

5.2.1.4 Estado de la superficie de la probeta. La superficie de la probeta en que ha de realizarse el ensayo de penetración debe ser suficientemente lisa y exenta de defectos. Para obtener una superficie adecuada es suficiente, en general, con desbastar mediante una lima o una muela fina. No es necesario pulir tal superficie, pero sí eliminar cualquier cascarilla de óxido del punto en que se va aplicarse la bola.

5.2.1.5 Espesor mínimo de la sección ensayada. Como norma general, se indica que el espesor de la pieza debe ser unas diez veces la profundidad de la impresión y, además, el centro de la huella debe distar, por lo menos, 2,5

veces el diámetro de la misma del borde más próximo de la superficie ensayada. Los espesores mínimos recomendados para el ensayo con distintas cargas y sus correspondientes bolas se dan en la Tabla siguiente:

Cuadro 1. Espesores mínimos para secciones a ensayar

Espesor mínimo de la sección en (mm)	Diámetro de la bola en (mm)	CARGA DE ENSAYO	
		$P = 30 D^2$ (Kg)	$P = 5 D^2$ (Kg)
6	10	3000	500
3	5	750	125
1.2	2,5	187,5	31,25
0.6	1,25	46,88	7,81
0.4	0,625	11,72	1,95

5.2.2 El ensayo Armstrong-Vickers. Se puede emplear para la medida de dureza de chapas delgadas y aun la superficial de capas endurecidas con tanta adecuación como para la determinación de dicha característica en materiales masivos, de la máxima o mínima dureza. Los principios operativos básicos son los mismos que en el ensayo Brinell y la escala de dureza es idéntica con la Brinell, es decir, se expresan los resultados en carga por unidad de área de la huella.

La carga prevista se aplica por un tiempo definido, siendo después automáticamente retirada la carga. Esta última se aplica sobre el penetrador mediante una palanca (relación 1:20) y pesos colgados de ella.

Después que se ha realizado el ensayo de penetración sobre la superficie estudiada se puede medir la impresión con un microscopio especial.

5.2.2.1 Penetradores y carga. El penetrador Vickers tipo es un diamante tallado en forma de pirámide cuadrangular cuyas caras opuestas forman un ángulo de 136°. Los números de dureza Vickers se expresan en la misma escala Brinell. Al hablar de este ensayo indicamos que se obtiene cuando la huella producida y la bola tienen sus diámetros en una relación comprendida entre 0,25 y 0,50.

Además de la pirámide de diamante normal se pueden emplear con la máquina Vickers bolas de aceros de 1 y 2 mm, pudiéndose realizar de esta forma un ensayo Brinell con carga reducida y gran precisión.

La carga a emplear debe ser la mayor compatible con el espesor de la pieza, dureza del material y finalidad del ensayo. En los ensayos de rutina suelen emplearse cargas de 30 ó 50 Kg.

5.2.2.2 Medida de la huella. Para determinar la cifra de dureza Vickers es preciso medir exactamente las dos diagonales de la huella, calcular su media aritmética y emplear ésta en la fórmula que se indicará más adelante. Para con exactitud las diagonales se emplea un microscopio metalográfico.

5.2.2.3 Estado de la superficie a ensayar. Puesto que las huellas producidas son muy pequeñas es imprescindible que la superficie sea bien

lisa y esté libre de defectos, cascarilla, etc. Es recomendable próximo al necesario para la observación microscópica. Las superficies curvas se pueden ensayar fácilmente; pero, a no ser que interesen sólo resultados comparativos, se deben planas con la lima o esmeril.

5.2.2.4 Espesores mínimos de las pieza ensayadas. El espesor mínimo necesario varía con la dureza del material y la carga empleada. Es recomendable que tal espesor sea al menos 1,5 veces la magnitud de la diagonal de la impresión.

5.2.3 El ensayo Rockwell.

5.2.3.1 Maquina de ensayo. Estos son aparatos de precisión que miden automáticamente el incremento en la profundidad lineal de penetración de varios tipos de penetradores, a los que se aplica una carga menor inicial de 10 Kg y una carga máxima final de 60, 100 ó 150 Kg, según el tipo.

5.2.3.2 Penetradores. En el ensayo Rockwell se utilizan varios tipos de penetradores, pero los normales son solamente dos, que con cargas finales máximas adecuadas bastan para la medida de la dureza de los metales y aleaciones más corrientes, sea cualquiera la dureza alcanzada en ello por el tratamiento térmico. Estos penetradores son una bola de acero duro de 1/16 pulg, denominado penetrador para la escala B, un penetrador esfero-cónico

de diamante, conocido como penetrador para la escala C o penetrador Brale (nombre comercial).

El penetrador de bola de 1/16 pulg es empleable para materiales cuya dureza oscile entre 0 y 100 de la escala Rockwell B y el penetrador Brale entre durezas 20 y poco mayores de 70 de la escala C. Con la bola no se puede ensayar materiales de dureza superior a 100 Rockwell B, por la deformación del penetrador y consiguiente error en la dureza.

El límite inferior de dureza para el que se pueden emplear las bolas - el cero de la escala Rockwell B - tampoco debe sobrepasarse.

El penetrador Brale es una punta esfero-cónica de diamante, el ángulo del cono es de 120° y la punta del penetrador es una esfera tangente al cono y con un radio de 0,20 mm.

5.2.3.3 Escalas de dureza Rockwell. En la actualidad existen hasta 15 escalas Rockwell normales. Todas estas escalas son arbitrarias y están definidas por el penetrador y la carga máxima empleada. La carga menor es de 10 Kg en todas ellas.

Cada escala se especifica con una letra, que debe incluirse en la penetración del resultado del ensayo. Al indicar una dureza de 60 Rockwell C queda exactamente fijada la escala, y por tanto, las condiciones del ensayo; en este ejemplo sabemos que hemos empleado el penetrador Brale, una carga

máxima de 150 Kg y que el material es relativamente duro, con próximamente 622 Brinell.

5.2.3.4 Estado de la superficie de la probeta. La superficie a ensayar debe estar tan exenta como sea posible de defectos superficiales. Las superficies mecanizadas suelen ser suficientes, pero, en casos en que se exija mucha precisión, es preciso pulirlas. Las irregularidades superficiales de cualquier clase ofrecerán apoyos irregulares al penetrador y, por ello, errores en las cifras de dureza obtenidas en tales condiciones.

5.2.4 El ensayo Rockwell de dureza superficial.

5.2.4.1 Introducción. La máquina Rockwell para la determinación de la dureza superficial está proyectada para el ensayo de secciones que solo permite una huella muy ligera, para los casos en que el interés se centra en la dureza de la superficie y para cuando por cualquier causa sea deseable el empleo de cargas muy pequeñas. La profundidad de las impresiones es siempre menor de 0,13 mm. La máquina Rockwell superficial es adecuado para el ensayo de chapas muy delgadas, como las hojas de afeitar, y para determinar la dureza de las superficies de acero descaburadas, cementadas, nitruradas, etc.

5.2.5 El microdurómetro Eberbach.

5.2.5.1 Generalidades. El aparato de Eberbach es esencialmente portátil y adecuado a la medida de dureza en áreas microscópicas. Se compone esencialmente del sistema penetrador, adaptable directamente a un microscopio metalográfico, y una caja de control, que contiene una lámpara piloto gobernada electrónicamente y un dispositivo para calibrar las cargas.

5.2.5.2 Penetrador y cargas. En el aparato Eberbach se emplea como penetrador el Vickers normal, es decir, una pirámide de diamante de base cuadrada y caras a 136° . El diamante va montado en el extremo de un vástago que puede deslizarse verticalmente dentro del sistema; este último contiene en su interior uno de los muelles helicoidales encargados de proporcionar la carga. Transcurrido el tiempo de aplicación previsto, que suele ser de 5 a 10 seg se quita la carga.

Para aplicar las cargas, el aparato lleva normalmente seis muelles, capaces de producir, aproximadamente cargas de 7,5; 22,5; 64,5; 110,5; 185,5; y 550,0 gr. Cada vez que ha de emplearse un muelle se le calibra, una vez que se le ha colocado en el sistema penetrador.

5.2.5.3 Medida de la huella. La huella producida es de la misma forma que las obtenidas en el ensayo Vickers normal y como en este caso, se miden las dos diagonales y se emplea la media aritmética para el cálculo de la dureza. Para realizar la medida se retira del microscopio el sistema penetrador, se pone en su lugar un objetivo adecuado y se opera en la forma usual con un ocular de medida tipo Filar.

5.2.5.4 Estado de la superficie ensayada. Como la huella producida por el aparato Eberbach es de tamaño microscópico, se requiere una superficie exenta de defectos. Se le prepara por los métodos indicados, para las probetas metalográficas. En general, es preciso atacar la superficie para distinguir los diferentes constituyentes. La rugosidad producida por el ataque no afecta a las medidas de dureza ni al aspecto de la huella.

5.3 ENSAYO DE TRACCIÓN

5.3.1 Generalidades. Es el experimento básico de la teoría de resistencia de los materiales.

Efectivamente, sus resultados ofrecen el máximo de los valores específicos que representan las propiedades del material sometido al ensayo.

Para una mejor interpretación de cómo trabaja el material, los resultados del experimento se traducen en una gráfica de esfuerzos unitarios “ σ ” contra las deformaciones unitarias “ ϵ ”.

Figura 15. Curva básica del ensayo de tracción de un material dúctil

5.3.1.1 Condiciones de los materiales sometidos a carga de tracción

Donde,

LP = límite de proporcionalidad

CR = punto de falla

PE = punto de endurecimiento

F = punto de falla

La Figura tiene dos zonas principales: “zona elástica” y “zona plástica”, ésta última tiene una subdivisión que se llama “zona de fluencia” o simplemente “fluencia”.

5.3.1.1. Zona elástica. Esta zona se llama “elástica” por la propiedad fundamental del material de recuperar su estado inicial cuando se quita la carga en esta zona.

Este fenómeno se comprueba haciendo descargar lentamente la probeta, cuando ésta se encuentra todavía en la zona elástica.

Si la aguja del registrador regresa a su origen “0”, siguiendo la recta

0-LP, esto indica que la probeta recobró su estado inicial, siempre y cuando la aguja del cuadrante de cargas regresa también a su división “0”.

Estas condiciones imponen la siguiente conclusión: En la zona elástica no hay deformación permanente.

En la Figura 15, la zona elástica está representada por la recta 0-LP, la cual demuestra que en esta zona las deformaciones “ ϵ ” son proporcionales linealmente a los esfuerzos unitarios “ σ ”.

Esta proporcionalidad constante es una propiedad del material que se denomina “Modulo de elasticidad (E) de la tracción”.

Su valor se calcula como el valor de la tangente del ángulo que forma la recta 0-LP con el eje de las deformaciones unitarias “ ϵ ”:

$$\sigma_{LP} / \epsilon_{LP} = E \quad (\text{Kg/mm}^2)$$

5.3.1.2. Zona plástica. Es aquella zona donde existe una deformación permanente, cuando se quita la carga a la probeta.

Efectivamente, en la Figura anterior se ve que cuando se descarga la probeta, pasando el punto “LP”, la aguja del registrador no sigue más la

recta 0-LP y baja más o menos paralelamente a ella, terminando sobre el eje de las deformaciones unitarias en un punto diferente del origen “0”.

La distancia entre éste punto y el origen “0” se llama: “La deformación permanente”, lo cual indica que la probeta no se recuperó a su estado inicial.

Este efecto se debe a que la fuerza elástica interna del material tiene la capacidad solamente para recuperar la deformación correspondiente al límite proporcional “ ϵ_{LP} ” y todo alargamiento superior a esta cantidad da un residuo:

$$\epsilon_N - \epsilon_{LP} = \epsilon_{dp}$$

el cual toma el nombre inicial de la “deformación permanente” pues el material no regresa a su estado inicial, cuando se quita la carga a la probeta en cualquier punto “N” de la curva más allá del punto “LP”.

5.3.1.3. Zona de fluencia. Esta zona hace parte de la zona plástica, pero solamente entre los puntos “LP” y “PE”, y se representa como una línea horizontal, a veces ligeramente ondulada, con la amplitud variable de las ondulaciones, según la máquina de los ensayos y según el material sometido al experimento.

Interpretando la Figura, parece que en esta zona el material, después de haber resistido muy fuertemente a la carga, tiene un relajamiento de sus esfuerzos internos, lo cual se traduce por el aumento grande y brusco de sus deformaciones, dando la impresión de “fluir” bajo la acción de la carga.

Por otra parte, la línea ondulada, casi horizontal, sugiere la idea de que la carga y por consiguiente el esfuerzo unitario son más o menos estacionarios o fluctuantes, pero esto es solamente una apariencia, pues la probeta sigue recibiendo continuamente el aumento progresivo de la carga.

5.3.1.4. Punto de endurecimiento “PE”. Es aquel punto donde se termina bruscamente la fluencia.

En éste punto, el material parece recobrar de nuevo su resistencia a la carga, lo cual se manifiesta en la Figura 15 por el aumento brusco de la carga mientras que las deformaciones disminuyen mucho sus valores de incremento, pero durante un muy corto tiempo.

5.3.1.5. Punto crítico “CR”. Desde el punto “PE”, donde la curva empieza a subir bruscamente durante un corto tiempo, el incremento de la carga produce deformaciones cada vez más grandes, mientras que el valor de incrementos de las cargas va disminuyendo, lo cual aparece en la Figura como una curva alargada de un radio de curvatura grande.

El punto donde la horizontal es tangente a la curva se llama el punto crítico “CR”, desde el cual la curva empieza a bajar más y más rápidamente.

Esta bajada de la curva proviene de que la resistencia interna del material empieza a perder su potencia.

5.3.1.6. Punto de falla “F”. Es aquel punto donde se produce la ruptura de la probeta, es decir que en éste punto “F” la carga sobrepasó toda la capacidad de resistencia del material sometido al ensayo.

Es el único punto de la zona plástica donde se puede determinar el verdadero valor del esfuerzo unitario, el de “falla”, pues tenemos la posibilidad de medir el diámetro de la probeta en su punto de ruptura.

5.3.1.7. Curva “real” del ensayo. En la Figura 15 está representada por líneas de trazos.

Por estar una curva “continua”, ésta no es cómoda para determinar los puntos característicos del material en el estudio y por esta razón se usa la curva con elementos “aparentes” los cuales facilitan de inmediato la localización los puntos antes citados.

5.3.1.8. Cargas y esfuerzos “reales” y “aparentes”. En la primera parte de la curva, sea en la zona elástica, las cargas y sus esfuerzos unitarios son reales, pues la velocidad de incremento de la carga es igual a la velocidad de incremento de las deformaciones.

Esto es cierto hasta el punto “LP”, incluyéndolo.

Pasando el punto “LP”, donde empieza siempre la fluencia, la velocidad de incremento de las deformaciones es muy superior a la velocidad con la cual la máquina es capaz incrementar la carga.

La aguja del registrador, dependiente del incremento de las cargas, no llega a compensar la diferencia entre las dos velocidades y escribe una horizontal, más o menos ondulada, como si hubiera sido una carga constante o fluctuante.

Es decir, desde el punto “LP”, por el atraso de la velocidad de incremento de las cargas, la gráfica, para las cargas y esfuerzos unitarios, indica los valores aparentes.

Este defecto de la máquina de no poder compensar la diferencia entre las dos velocidades permite obtener una gráfica que representa muy claramente de cómo trabaja el material sometido al ensayo e indica fácilmente las

posiciones y sus valores “aparentes” (desde “LP”) de los puntos característicos de las propiedades del material.

5.4. ENSAYO DE FATIGA

5.4.1. Generalidades. Se ha reconocido que un metal sujeto a tensiones repetidas o fluctuantes fallará a una tensión mucho más baja que la necesaria para producir la fractura en una sola aplicación de carga. Las fallas ocurridas en condiciones de carga dinámica se llaman fallas de fatiga. Durante mucho tiempo se tuvo la idea de que la fatiga era debido a la cristalización del metal, pero este concepto no pudo sostenerse al comprobarse que un metal es cristalino desde el mismo momento que solidifica del caldo. De hecho, no hay ningún cambio insoluble en la estructura del metal que ha fallado por fatiga que pueda servir de guía en nuestro razonamiento para comprender la fractura por fatiga.

La fatiga tiene cada vez más interés por el desarrollo creciente de equipos en los que el material está sometido a cargas repetidas y vibraciones como ocurre en los automóviles, los aviones, las bombas, las turbinas, etc.

Se ha confirmado que por lo menos el 90% de las roturas en el servicio se producen por fatiga. La falla por fatiga se produce sin ningún indicio

previo que permita precaverse contra ella. La superficie de fractura suele ser microscópicamente normal al eje de la tensión principal.

La rotura por fatiga se puede reconocer usualmente por el aspecto de la superficie de fractura que muestra una región lisa debida al frotamiento que ocurre cuando se propaga la grieta a través de la sección y una región rugosa, originada cuando el miembro ha roto dúctilmente por haber disminuido la sección sana al no poder soportar la carga.

Son necesarias tres condiciones básicas para que se produzca una falla por fatiga:

- Una tensión máxima de tracción de valor elevado.
- Una variación intensa de la tensión aplicada.
- Un número suficiente de ciclos.

Hay otras variables tales como la concentración de tensiones, la corrosión, la temperatura, la sobrecarga, la estructura metalúrgica, las tensiones residuales y las tensiones combinadas, que tienden a modificar las condiciones necesarias para la fatiga. Se desconoce la causa fundamental de la fatiga de los metales por lo que es necesario discutir el efecto de cada uno de estos factores desde un punto de vista empírico.

5.4.2. Diseño de la probeta. La probeta debe estar diseñada para que la falla ocurra en el área crítica, o sea en la sección reducida.

Las dimensiones de la probeta deben ser tales que la frecuencia natural de la probeta montada sea por lo menos el doble de la frecuencia de operación de la maquina.

En la Figura 16 puede observarse el diseño de la probeta para el ensayo de fatiga.

FIGURA 16. Diseño de la probeta para realizar el ensayo de fatiga

5.4.3. Preparación de la probeta. Las operaciones de maquinado y acabado deben hacerse en dirección longitudinal al eje de las probetas.

Debe evitarse al máximo los efectos de filetes agudos y los esfuerzos residuales debidos al maquinado, para lo cual debe ejercerse un estricto control en las técnicas de fabricación.

Cualquier marca visible que sea perpendicular al eje longitudinal de la probeta hará que ésta sea descartada.

6. MEDIOS DE ENFRIAMIENTO

6.1. AGUA

El agua y las soluciones acuosas son los medios templantes menos costosos y se usan en todos los temple en los cuales las piezas no se distorsionan excesivamente y no se fisuran al ser templadas.

Como un medio de enfriamiento, el agua simple proporciona la máxima tasa de enfriamiento accesible en un líquido. Sus otras ventajas son que es barata y se obtiene fácilmente, se puede eliminar sin problemas de contaminación y es un medio efectivo para quebrar las cáscaras de óxido de la superficie de las piezas que son templadas a partir de hornos que no poseen atmósferas protectoras.

Una desventaja del agua simple como refrigerante es su rápida tasa de enfriamiento a través del rango de temperatura mas bajo, en la cual la distorsión o agrietamiento son aptas de ocurrir. En consecuencia, el agua se usa sólo en el temple de piezas simétricamente sencillas y de aceros de baja templabilidad, como los aceros al carbono y de baja aleación.

Otra desventaja de usar agua simple es la formación del colchón de vapor, y esta etapa puede prolongarse mucho. Esta prolongación, las cuales varían con el grado de complejidad de la parte que esta siendo templada estimula que se atrape vapor y con la temperatura del agua templante, da por

resultado una dureza no uniforme y una desfavorable distribución de tensión, la cual puede producir distorsión o agrietamiento.

Para obtener resultados reproducibles al templar con agua, deben ser controlados la temperatura, la agitación y la contaminación.

El agua a una temperatura entre 13 a 24°C, proporcionará una velocidad de enfriamiento uniforme y resultados reproducibles. Sin embargo, la potencia enfriante del agua disminuye rápidamente cuando la temperatura aumenta.

La agitación es importante en el temple con agua porque dispersa las burbujas de vapor adheridas sobre las piezas y las porciones más frías del agua alcanzan las piezas a tratar.

La contaminación de los baños de agua templantes con sales disueltas incrementan la rata de enfriamiento debido a que la sal reduce la duración de la etapa del colchón de vapor. Sin embargo, contaminantes tales como jabones, alga, lodos o emolientes reducen la rata de enfriamiento atrapando el vapor o la película de vapor e impidiendo así, un enfriamiento lo suficientemente rápido de las piezas en contacto.

6.2. SALMUERA

El término “salmuera”, tan aplicado al temple, se refiere a aquellas soluciones acuosas que contiene variados porcentajes de sal (cloruro de sodio o cloruro de calcio) junto con aditivos especiales e inhibidores de corrosión.

La salmuera ofrece la siguientes ventajas por encima del agua simple y del aceite, para templar:

- La rata de enfriamiento es más rápida que para el agua simple con el mismo grado de agitación, una mejor agitación es requerida para una determinada rata de enfriamiento.
- La temperatura es menos crítica que para el agua, requiriendo así un menor control.
- Una menor posibilidad de puntos blandos en las zonas de formación de bolsas de vapor que en el temple con agua.
- La distorsión es menos severa que en el temple con agua.
- Son casi nunca necesitados intercambiadores de calor para el enfriamiento de los baños de salmuera que para los baños en agua o en aceite.

Algunas de sus desventajas son:

- La naturaleza corrosiva de la salmuera requiere que, el tanque para templar, bombas, intercambiadores y otros equipos que están en contacto

directo con la solución de salmuera sean protegidos de la corrosión con recubrimientos o ser hechos de metales resistentes a la corrosión (tal como acero inoxidable)

- Es necesario un sombrero de humos para proteger convenientemente la maquinaria y equipo delicado de los vapores corrosivos.
- Su costo es más alto que para el agua, debido a que deben ser usados aditivos o inhibidores de la corrosión que son costosos también.
- El costo de la labor es aumentado a causa de los ensayos para el control de las soluciones.
- Los riesgos de quemarse o intoxicarse se incrementan cuando se usan soluciones que contienen hidróxido de sodio o ciertos aditivos.

Ha sido probado que una solución de cloruro de sodio al 9% (en peso) es la solución de salmuera más eficiente para templar. Sin embargo, soluciones de salmuera que contienen al menos 4% de NaCl (en peso) están siendo usadas en algunas plantas. Si bien agua a 20°C que tiene una saturación de cloruro de sodio de un 26%, casi nunca son usadas concentraciones más altas que el 10%, debido a que altas concentraciones de cloruro de sodio retardan la rata de enfriamiento, causando puntos blandos y el agrietamiento.

El poder de enfriamiento de la soluciones de salmuera no es afectado críticamente por pequeñas variaciones en la temperatura de operación. Si

bien tales soluciones pueden ser usadas a una temperatura cercana al punto de ebullición del agua, ellas suministran la máxima rata de enfriamiento a los 21°C.

La Figura 17 muestra el efecto de la temperatura sobre el poder enfriante del agua y de una solución al 10% de cloruro de sodio.

FIGURA 17. Curvas de enfriamiento en agua y salmuera (10% de cloruro de sodio) a 25°C (curvas A y C) y a 50°C (curvas B y D).

La habilidad de las soluciones de salmuera para templar no puede ser totalmente realizada si no son mantenidas la concentración y la pureza de la solución. Los baños de salmuera son afectados por los mismos contaminantes que afectan otros baños de temple, tales como lodo,

incrustaciones y cianuros u otras sales que pueden ser transportadas desde la austenización. El agua reduce la concentración de solución y el poder templante de los baños de salmuera.

Análisis frecuentes han determinado las concentraciones de la solución que son requeridas para el mantenimiento adecuado de la concentración.

La Tabla 2 indica la cantidad de cloruro de sodio requerida para soluciones de cloruro de sodio en diversas concentraciones, y también lista las gravedades y las lecturas en la escala hidrométrica para las diversas concentraciones. Esta información será útil para mantener las concentraciones exactas de las soluciones.

TABLA 2. Correlación de la concentración de cloruro de sodio con otras medidas

CONCENTRACION DE NaCl, %	GRAVEDAD ESPECIFICA	LECTURA HIDROMETRICA, Be	NaCl REQUERIDA POR GALON DE SOLUCION, Lb
1	1.0053	0.8	0.0839
2	1.0125	1.8	0.169
4	1.0268	3.8	0.3428
6	1.0413	5.8	0.5214
8	1.0559	7.7	0.9049
10	1.0707	9.6	0.8935
12	1.0857	11.5	1.087
14	1.1009	13.3	1.286
16	1.1162	15.1	1.49
18	1.1319	16.9	1.7
20	1.1478	18.7	1.916
22	1.164	20.4	2.137
24	1.1804	22.2	2.364
26	1.1972	23.9	2.598

6.3. SOLUCIONES DE ALCOHOL POLIVINILICO

Las soluciones de alcohol polivinílico disueltas en agua son usadas para aplicaciones en las cuales es deseado un mayor poder de enfriamiento que el de los aceites rápidos pero un poder de enfriamiento menor que el agua o la salmuera.

Como lo indican las curvas de enfriamiento de la Figura 18, solamente son necesarias ligeras variaciones en la concentración de la solución para producir marcados cambios en las características del enfriamiento en las soluciones con alcohol polivinílico. A concentraciones de menos de 0,01%, las características de las soluciones de alcohol polivinílico a temperatura ambiente superan las del agua. Con tales pequeñas concentraciones, es necesario un control más cercano. El control es complicado por el hecho de

que las partes templadas están siendo cubiertas con alcohol polivinílico, reduciéndose así la concentración del baño.

El efecto de la temperatura en las características de enfriamiento de las soluciones de alcohol polivinílico están mostradas en la misma Figura 18.

El efecto de temperatura se reducirá agitando la solución.

FIGURA 18. Curvas de enfriamiento en soluciones de alcohol polivinílico de distintas concentraciones y temperaturas

6.4. ACEITES COMO MEDIOS TEMPLANTES

Los aceites para temple tratados aquí son de dos tipos generales, “convencional” y “rápido”.

Un aceite de temple convencional es un aceite que no contiene aditivos que alteran sus características refrigerantes. Los aceites convencionales son producto de la destilación de petróleo crudo y mezclados con viscosidades de 100 SUS a 38°C.

Los aceites rápidos son mezclas, usualmente de baja viscosidad, que contiene aditivos especialmente desarrollados los cuales afectan las características de los aceites y suministran una rata de enfriamiento más rápida.

Las propiedades típicas de cuatro aceites para temple comercialmente disponibles (dos convencionales y dos rápidos) son listadas en la Tabla 3. Ciertas variaciones resultan en los aceites rápidos de diferentes productores, debidas al uso de diferentes aditivos para mejorar la humedad, la viscosidad, los puntos de combustión, la saponificación y otras propiedades. La Tabla 3 también indica los ensayos ASTM apropiados para determinar las propiedades listadas.

TABLA 3. Propiedades típicas para aceites de temple convencionales y rápidos

Propiedad	Ensayo ASTM	Convencional		Rapido	
		1	2	1	2
Gravedad API		33	27	33,5	35
Pto. Inflamacion *		315	365	370	320
Pto. Combustion *		425	415	425	345
Viscosidad a 38C SUS		107	111	95	60
Indice de Viscosidad		96	53	95	
Saponificacion		Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Residuos de carbon, %		0,006	0,025	0,05	0,2
Cenizas, %		0,002	0,008	0,01	0,001
Agua, %		Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna

* Las temperaturas están dadas en °C.

6.4.1. Características de enfriamiento. El medio de temple ideal deberá exhibir una alta velocidad inicial de temple a través de la etapa de cubierta

de vapor y en la etapa de enfriamiento por transporte de vapor, y bajas velocidades a través del rango de temperaturas finales (etapa de enfriamiento líquida).

El agua y las soluciones acuosas tienen las más altas velocidades de temple inicial. Sin embargo, debido a que estas velocidades de temple persisten a bajas temperaturas, el uso de agua de temple se restringe a piezas de forma sencilla y aceros de baja templabilidad.

Con los aceites de temple convencionales, la duración de la etapa de la cubierta de vapor es más larga que en el agua. La velocidad de enfriamiento de la etapa de transporte de vapor es considerablemente menor y la duración de la etapa de transporte líquida es más breve. Por tanto, el poder de temple de tales aceites es menor que el agua y es, a menudo, inadecuado. Sin embargo, la transición de la etapa B a la C es más gradual y, por esta razón, los aceites minerales convencionales producen menos distorsión.

Los aceites de enfriamiento rápido se aproximan más a una alta velocidad de temple inicial, próxima a la del agua, sin sacrificar la ventaja del temple en aceite convencional. Con estos aceites, la duración de la etapa de colchón de vapor es considerablemente menor y el enfriamiento en la etapa de transporte de vapor comienza más pronto y dura más tiempo, por lo que la velocidad de enfriamiento en la etapa de enfriamiento por líquido es, aproximadamente de los aceites convencionales. En la Figura 19 se

muestran las curvas de enfriamiento de un aceite rápido, un aceite convencional y un aceite rápido contaminado con 0,25% de agua.

FIGURA 19. Curvas de enfriamiento para un aceite rápido, uno convencional y un aceite rápido contaminado con 0,25% de agua

6.4.2. Operación y control. La característica más importante de cualquier aceite para templear es su habilidad para sustraer el calor de las piezas que están siendo templadas. Esta propiedad está relacionada con la formulación del aceite. Haciendo caso omiso de que si el aceite es convencional (sin aditivos) o rápido (con aditivos), debe tener una estabilidad térmica para resistir el agrietamiento, la oxidación y la formación de lodos.

La temperatura óptima que se debe mantener en un baño de temple de aceite puede ser influenciada por varios factores:

- El punto de inflamación del aceite.
- Requerimientos de limpieza.
- Control de la distorsión.
- Requerimientos de dureza.

El punto de inflamación indica el límite máximo de temperatura de operación (éste no es el límite superior de seguridad), para un aceite de temple. Por razones de seguridad, se estipula que el aceite debe estar a una temperatura de 65°C por debajo de su punto de inflamación, previa al temple.

Los endurecimientos con temples limpios requieren que el aceite de temple mantenga la característica de no manchar la superficie. Esto se logra manteniendo la temperatura del aceite baja, a fin de minimizar la oxidación y la degradación del aceite o ambas. Por otro lado, las temperaturas altas minimizarán la distorsión.

Las cargas templadas determinarán el ascenso de temperatura del aceite de temple. Las curvas de enfriamiento muestran que el endurecimiento por temple uniforme puede, habitualmente, mantenerse, a pesar de que el aceite aumente mucho la temperatura. Sin embargo, se debe considerar el peligro de incendio cuando la temperatura del baño se aproxima al punto de inflamación. Las piezas con una relación grande superficie a volumen aumentan los riesgos de incendio y requieren menores temperaturas de temple.

El efecto del agua sobre las curvas de enfriamiento de los aceites de temple está mostrado en la Figura 20.

Cuando la cantidad de agua es menor que el 0,15% aumenta la velocidad de enfriamiento de la etapa de colchón de vapor. Cuando el contenido de agua está por encima de este valor la etapa de colchón de vapor se hace más pronunciada. A todas las concentraciones de agua, la etapa de enfriamiento por líquido aparece a menor temperatura, donde la distorsión y las fisuras

son más probables. Por tanto, la contaminación con agua destruye el objetivo de emplear aceites de temple.

FIGURA 20. Efecto de diferentes porcentajes de agua sobre el comportamiento de un aceite rápido

La formación de espumas en los aceites está estrechamente ligada a la contaminación por agua.

El atrapamiento de agua en regiones localizadas de un baño de aceite puede producir una explosión por la rápida formación de grandes volúmenes de vapor. Sin embargo, excepto cuando el aceite y el agua están distribuidos en capas estratificadas bajo condiciones quietas, hay poco peligro de explosión. La agitación del baño, por lo tanto, disminuye dicho peligro.

6.4.3. Selección del aceite para templar. El temple del acero involucra flujo de calor inestable y transformaciones cinéticas en estado sólido; ambas son difíciles de manejar cuantitativamente. Por lo tanto, la selección de aceites para aplicaciones específicas deben estar basados en ensayos.

El criterio más importante en la selección de un aceite para templar, es que proporcione una tasa de enfriamiento que endurecerá la parte sin agrietarla. Otras consideraciones son la magnitud de la distorsión, el costo para el acabado de la parte, y (particularmente en los aceros cementados) la microestructura producida.

Si un acero tiene suficiente templabilidad para ser totalmente endurecido en un aceite convencional, probablemente no será ninguna ventaja usar los aceites rápidos que son más costosos.

En otras aplicaciones, el acero puede tener una templabilidad tan baja que es difícil obtener un endurecimiento total aun templando en agua. Bajo estas condiciones, no es apto que un aceite rápido ofrecerá una suficiente ventaja para resolver el problema.

Sin embargo, entre estos extremos existen muchas aplicaciones en las cuales sus ventajas permiten una discriminación, y los aceites rápidos casi siempre suministran ventajas.

7. TAMAÑO DE GRANO

7.1. GENERALIDADES

El grano austenítico, al transformarse a bajas temperaturas, condiciona la microestructura resultante y, por tanto, las propiedades del material luego del tratamiento térmico. Dado que las fases nuevas se nuclean en los

límites de grano, el tamaño de grano austenítico determinará, junto con otros factores, la distribución de las fases y la templabilidad de los aceros.

Por otro lado, un grano austenítico grande producirá un deterioro de las propiedades mecánicas finales. Dicho tamaño dependerá primordialmente de la temperatura de austenización.

7.2. MÉTODOS PARA REVELAR EL TAMAÑO DE GRANO

7.2.1. En aceros al carbono hipoeutectoides.

- **Aceros con menos de 0,1 % de carbono.** Calentar una probeta delgada a la temperatura de austenización y templar en mercurio o salmuera. Revenir de 5 a 10 minutos a 200°C, pulir y atacar con cloruro férrico al 5%. Las agujas de martensita, con diferentes orientaciones, permitirán reconocer los primitivos granos austeníticos.
- **Aceros que contengan entre 0,25 y 0,55% de carbono.** Calentar una probeta hasta la temperatura deseada y enfriar al aire. Pulir y atacar con nital al 2%. La ferrita proeutectoide precipita a los límites de grano

austenítico y enmarca el interior de los granos que ahora estarán formados por perlita.

- **Aceros que contengan entre 0,55 y 0,75 de carbono.** Austenizar la probeta durante 10 a 15 minutos y enfriar el aire hasta la temperatura ambiente. Pulir y atacar. Una red de ferrita demarcará los primitivos granos de austenita.

7.2.2. Aceros al carbono eutectoides.

- **Aceros con baja templabilidad.** Luego del temple se corta la probeta por la mitad y se pule y ataca la superficie de corte. Cerca de la superficie la estructura es totalmente martensítica pero hacia el interior se encontrará una zona de transición en la que la perlita ha precipitado a los límites de grano austenítico enmarcando el centro, que se habrá transformado en martensita.
- **Aceros de alta templabilidad.** En este caso conviene revenir ligeramente la probeta, por ejemplo, 10 minutos a 200°C, para que la estructura martensítica sea más fácil de atacar. Se pule y ataca. El grano austenítico se detecta como en el caso de los aceros con menos de 0,1% de carbono.

7.2.3. Aceros hipereutectoides.

- **Aceros con más de 1,1% de carbono.** La muestra se normaliza o recuece, se corta, pule y ataca. El grano austenítico lo revelará una red de carburos precipitados a los límites de grano.
- **Aceros con menos de 1,1% de carbono.** Austenizar a la temperatura deseada y enfriar justo por encima de A_{r1} . Mantener a esa temperatura por unos minutos y templar en agua. Revenir durante 10 minutos a 400°C y dejar enfriar al aire. Durante la permanencia a $T > A_{r1}$ habrá una precipitación de carburos a los límites de grano austenítico. Pulir y atacar con nital. La red de carburos revelará el grano austenítico.

7.3. MEDIDA DE TAMAÑO DE GRANO

La muestra, preparada por alguna de las técnicas anteriores, se observa al microscopio bajo 100 aumentos y su aspecto se compara con los patrones ASTM para tamaño de grano, donde cada patrón está indicado por un número n desde 0 hasta 10, n está relacionado al tamaño real del grano por la expresión.

2^{n-1} = Número de granos por pulgada cuadrada a 100 aumentos.

Los valores absolutos de n son:

TABLA 4. Número (n) de tamaños de grano

n	Granos/pulg ² a 100X	Granos/mm ²	Granos/mm ³	Diam. promedio en mm
1	1	16	45	0,25
2	2	32	128	0,18
3	4	64	360	0,125
4	8	128	1020	0,091
5	16	256	2900	0,062
6	32	512	8200	0,044
7	64	1025	23000	0,032
8	128	2048	65000	0,022
9	156	4096	185000	0,016
10	512	8200	520000	0,011
11	1024	16400	1500000	0,008
12	2048	32800	4200000	0,006

8. PROCESOS DE TRATAMIENTOS TERMICOS

8.1. GENERALIDADES

8.2. NORMALIZADO DEL ACERO

El normalizado es definido como el calentamiento de una aleación ferrosa a una temperatura adecuada por encima del rango de transformación y después enfriarla en aire a una temperatura substancialmente por debajo del rango de transformación. La práctica de un buen normalizado requiere (a) que la pieza que esta siendo tratada sea uniformemente calentada a una temperatura lo suficientemente alta para producir la transformación completa de la ferrita en austenita, (b) que se permanezca a esta temperatura el suficientemente tiempo para que se lleve a cabo una uniformidad en la temperatura en todas partes de su masa, y c) que sea permitido enfriarla en aire de una manera uniforme.

El enfriamiento uniforme requiere de una libre circulación de aire alrededor de cada pieza, tanto que no exista algún área en el cual el enfriamiento haya estado restringido o acelerado. La restricción de la rata de enfriamiento alterará la operación de un normalizado a un tratamiento de recocido. En un sentido estricto, incrementar la rata de enfriamiento por encima de las

llevarlas a cabo por una circulación libre cambiará la operación de normalizado a una de tratamiento de temple.

En general, el endurecimiento al aire no es propiamente llamado normalizado, porque no se coloca al acero en la “normal” condición perlítica que caracteriza al acero normalizado. Algunas veces, sin embargo, cuando es intencionalmente acelerada la rata de enfriamiento con aire para producir la formación de alguna martensita, el proceso es llamado como normalizado despreciando el enfriamiento acelerado y el endurecimiento parcial.

El normalizado puede ablandar, endurecer o relevar las tensiones en el acero, dependiendo de la condición del material antes de normalizar.

Así, las funciones del normalizado pueden traslaparse o ser confundidas con las del recocido, el endurecimiento, y el alivio de tensiones.

8.2.1. Empleo del normalizado. El normalizado puede ser empleado en cualquiera de las siguientes funciones:

- Para refinar el grano y homogeneizar la microestructura, mejora la respuesta en operaciones de endurecimiento.
- Mejorar las características del maquinado.
- Modificar y refinar las estructuras dendríticas de la fundición.

- Alcanzar, en general, las propiedades mecánicas deseadas.

El normalizado puede ser aplicado a los aceros al carbono y aleados fundidos y forjados. Si bien el proceso es generalmente empleado para mejorar las propiedades mecánicas, el normalizado de los aceros hipereutectoides puede dar como resultado la formación de cementita (Fe_3C) en los límites de grano, causando una deterioración de las propiedades mecánicas.

Debido a las diferencias entre las velocidades de enfriamiento y de solidificación, las piezas tanto fundidas como forjadas, tienen una microestructura no uniforme. Esta no uniformidad casi nunca puede ser reducida con el normalizado.

8.2.2. Normalización de aceros al carbono. La Tabla 5 lista las temperaturas típicas de normalizado para algunas de las calidades estandarizadas de aceros al carbono. Estos valores pueden ser interpolados para suministrar temperaturas de rangos intermedios de contenido de carbono.

TABLA 5. Temperaturas típicas de normalizado para aceros simples al carbono

ACERO	TEMP. DE NORMALIZADO,C(a)	ACERO	TEMP. DE NORMALIZADO,C(a)
1015	900 a 925	1045	845 a 870
1020	900 a 925	1050	845 a 870
1035	900 a 925	1060	815 a 845
1040	870 a 890	1095	815 a 845

(a) Las temperaturas de normalización pueden variar como mucho entre 10°C por debajo y 38°C por encima de las temperaturas indicadas. El acero debe ser enfriado en aire quieto desde la temperatura indicada.

Los aceros que contienen 0,20%C o menos usualmente no reciben tratamientos subsecuentes al normalizado. Sin embargo, los aceros de medio y alto contenido de carbono a menudo son templados después de normalizados, para obtener propiedades específicas, tales como una baja dureza, o para ser sometidos a un estiramiento, laminación o maquinado. Un acero de bajo y medio contenido de carbono puede ser mas duro después de normalizado, que un acero de alto contenido de carbono de gran tamaño sujeto al mismo tratamiento.

8.2.3. Normalizado de aceros aleados. Para aceros aleados forjados, laminados y fundidos, el normalizado es comúnmente utilizado con un tratamiento acondicionador posterior al tratamiento térmico final. La temperatura de normalización es generalmente de 50°C por encima de la temperatura de transformación (A_3 o A_{cm}) del acero particular. El normalizado también sirve para refinar la estructura de los forjados, laminados y fundidos que no han sido enfriados uniformemente desde altas temperaturas.

Aceros para cementación, son usualmente normalizados a temperaturas superiores que la temperatura de cementación , para minimizar la distorsión durante la cementación y mejorar las características del maquinado. Aceros para cementación de la serie 3300 son algunas veces normalizados dos veces con el fin de reducir la distorsión; estos aceros se revienen a temperaturas de 650°C por intervalos de hasta 15 horas a fin de reducir la dureza por debajo de 223 Brinell, si han de ser maquinados. Los aceros para cementación de la serie 4300 y 4600 pueden ser maquinados hasta que la dureza no exceda los 207 Brinell, y por lo tanto no necesitan de un revenido para mejorar su maquinabilidad.

Los aceros aleados hipereutectoides, tal como el 52100, son normalizados para eliminar parcial o completamente la red de carburos, produciendo así una estructura que es susceptible de esferoidizar en un 100% en un tratamiento subsecuente de esferoidización.

La Tabla 6 resume las temperaturas de normalización típicas para aceros aleados

TABLA 6. Temperaturas típicas de normalizado para aceros aleados

ACERO	TEMP, C	ACERO	TEMP,C	ACERO	TEMP,C	ACERO	TEMP,C
1330	900	4320	925	6118	925	8822	925
1340	870	4340	870	6150	925	9260	900
3135	870	4520	925	8617	925	9310	925
3310	870	4720	925	8620	925	9840	870
4027	900	4815	925	8625	900	9850	870
4032	900	5046	870	8630	900	50B40	870
4047	870	5130	900	8640	870	50B50	870
4130	870	5135	870	8645	870	60B60	870
4140	870	5140	870	8660	870	81B45	870
4145	870	5150	870	8740	925	86B45	870

8.2.4. Normalización de barras y productos tubulares. Frecuentemente, los estados finales de los productos de un tren de laminación en caliente, dedicado a producir barras y productos tubulares en acero tienen propiedades que cercanamente se aproximan a las obtenidas en el normalizado. Cuando esto ocurre, el normalizado es innecesario e inadmisibles. No obstante, las razones para normalizar barras y productos tubulares son generalmente las mismas que las aplicables a otras formas de acero.

Existe una razón adicional, sin embargo, para normalizar barras y productos tubulares. Cuando los productos se terminan en frío, en una secuencia de reducciones en frío con recocidos subcríticos altos entre pasos, se produce alguna esferoidización. En tales instancias, el producto es algunas veces normalizado antes de la última reducción en frío. Al normalizar se elimina la esferoidización que pudieron haber generado los primeros pasos, y restaura la estructura perlítica beneficiando el maquinado de aceros al carbono o aleados de bajo y medio contenido de carbono.

Es más fácil normalizar productos tubulares que barras con diámetros equivalentes, debido a que secciones más delgadas permiten un calentamiento más rápido, tiempos de sostenimiento más cortos y enfriamientos más rápidos. Estas ventajas ayudan a minimizar la descarburización y promover estructuras más uniformes en los productos tubulares.

8.3. TEMPLE DEL ACERO

8.3.1. Generalidades. El temple del acero es el enfriamiento rápido del acero desde una adecuada temperatura elevada. Esto es realizado usualmente sumergiendo en agua o aceite, aunque algunas veces es usado aire forzado.

8.3.2. Variables principales. La efectividad del temple depende de las características refrigerantes del medio templante y está relacionado con la habilidad del acero a ser endurecido. Así, los resultados pueden ser variados dependiendo de la composición del acero o de la agitación, la temperatura y el tipo del medio templante. El diseño del sistema para templar y la minuciosidad con que es mantenido contribuye al éxito del proceso.

La rata de calor que es capaz de extraer un medio templante, en gran parte es modificada por la manera o la condición en la cual el medio templante es usado. Estas modificaciones han dado por resultado la asignación de nombres específicos a varios métodos de temple, tales como: temple directo, temple con el tiempo, temple selectivo, temple por gotas, niebla e interrumpido.

El temple directo es el método más usado. Cuando el producto cementado es templado desde la temperatura de cementación, o desde una temperatura ligeramente más baja, el término “temple directo” es usado para distinguir este método de la práctica más indirecta de cementación, enfriamiento lento, recalentamiento y temple. La práctica del temple directo es sencilla y económica, y es menos frecuente la distorsión de las partes cementadas con el temple directo que con el recalentamiento y el temple.

El temple con el tiempo es usado cuando la rata de enfriamiento de la parte que está siendo enfriada tiene que ser cambiada abruptamente en algún momento durante el ciclo de enfriamiento. El cambio en la rata de enfriamiento puede comprenderse como un aumento o una disminución, dependiendo lo que se necesite para obtener los resultados deseados. La práctica usual es la de bajar la temperatura de la pieza templándola en un medio (por ejemplo, agua) por un corto tiempo hasta que la pieza se ha enfriado por debajo de la nariz de la curva de transformación tiempo-temperatura, y luego trasladar la pieza y templarla en un segundo medio (por ejemplo, aceite) para que se enfríe más lentamente a través del rango

de transformación de la martensita. En muchas aplicaciones, el segundo medio es aire quieto.

El temple selectivo es usado cuando se desea que las áreas preseleccionadas no sean afectadas relativamente por el medio templante. Esto puede ser realizado aislando el área que será protegida o permitiendo que el medio templante solamente haga contacto con las áreas de la pieza que esta siendo templada.

En el temple de spray, los vapores del liquido templante son dirigidos a una alta presión (hasta 120 psi) a las áreas locales de la pieza de trabajo. La rata de enfriamiento es rápida y uniforme por encima del rango de temperatura del ciclo de enfriamiento a causa del gran volumen de refrigerante usado y por el contacto directo que tiene el refrigerante con la pieza templada. La velocidad del vapor remueve las burbujas de vapor y proporciona gotitas de líquido, las cuales están disponibles para transferir calor.

El temple por niebla. Este método de temple, si bien es similar al temple de spray, es menos efectivo, debido a que el vapor o la niebla templante no está muy adaptada para ser reemplazada por la niebla refrigerante una vez que ha sido calentada por el contacto con la pieza que está siendo templada.

El temple interrumpido consiste en temprar en un baño fundido mantenido a una temperatura constante.

8.3.3. Curvas de enfriamiento. La manera más usual de describir correctamente el complejo mecanismo del temple es desarrollando una curva de enfriamiento para el líquido templante bajo condiciones controladas.

Las curvas de enfriamiento son desarrolladas templando en una muestra del fluido templante, desde una temperatura elevada, una pieza de ensayo del mismo acero del que están hechas las partes. Algunas veces es usado un espécimen de acero inoxidable austenítico, para evitar la oxidación o la necesidad de usar una atmósfera protectora. Es usado un indicador de alta velocidad para graficar los cambios de temperatura medidos por una o varias termocuplas encajadas en la pieza de ensayo.

La curva tiempo-temperatura que resulta indica las características de transferencia de calor del fluido templante.

Las curvas de enfriamiento típicas para un líquido de temple, de la superficie y el centro de la pieza de ensayo, mostradas en la Figura 21, describen gráficamente las cuatro etapas de la transferencia de calor desde un sólido caliente a un líquido frío.

Etapa A' ilustra los primeros efectos de la inmersión. Algunas veces llamado “Etapa inicial de contacto del líquido”, esta etapa está caracterizada por la formación de burbujas de vapor que antecede el establecimiento de un colchón cubridor de vapor.

La etapa A' dura solamente 0,1 seg , y no tiene importancia en la evaluación de las características de transferencia de calor. Es detectable solamente cuando es usado un equipo extremadamente sensitivo, y no puede ser detectado cuando el líquido es viscoso o contiene gases no disueltos, o cuando el baño es operado a una temperatura cerca al punto de ebullición del líquido.

FIGURA 21. Curvas de enfriamiento para el centro y la superficie de una probeta templada en agua

La etapa A, llamada la “Etapa de enfriamiento por colchón de vapor” , se caracteriza por la formación de un colchón continuo de vapor que rodea la pieza de ensayo. Esto ocurre cuando el suministro de calor desde la superficie de la pieza de ensayo excede la cantidad de calor necesitado para formar el máximo vapor por unidad de área de la pieza.

Esta etapa es una del enfriamiento lento, debido a que la cubierta de vapor actúa como un aislador y el enfriamiento ocurre principalmente por radiación a través de la película de vapor.

Esta etapa no es detectable en aquellas soluciones de solutos no volátiles (a una concentración del 5%) tales como cloruro de potasio, cloruro de litio, hidróxido de sodio o ácido sulfúrico. Las curvas de enfriamiento para estas soluciones empieza inmediatamente en la etapa B.

La etapa B, se llama “etapa de enfriamiento por transporte de vapor”, donde se produce la rata más alta de transferencia de calor, empieza cuando la temperatura de la superficie del metal ha sido reducida en algo y se rompe la película continua de vapor; después ocurre una ebullición violenta del líquido templante y el calor es removido del metal a una rata muy rápida, tan grande como el calor de vaporización. El punto de ebullición del medio templante determina la conclusión de esta etapa.

La etapa C es llamada la “etapa de enfriamiento por líquido”; la rata de enfriamiento en esta etapa es tan baja que la desarrollada en la etapa B. La etapa C empieza cuando la temperatura de la superficie del metal es reducida al punto de ebullición del líquido templante. Por debajo de esta temperatura, la ebullición se detiene y un enfriamiento lento por conducción y convección tiene lugar después.

8.3.3.1. Agitación. El movimiento producido externamente sobre el líquido templante tiene una influencia extremadamente importante en las características de la transferencia de calor del líquido templante. Puede causar un rompimiento mecánico temprano del colchón de vapor en la etapa A y desprendimiento de burbujas de vapor durante la etapa de enfriamiento con transporte de vapor (etapa B). Además de los efectos anteriores, se debe considerar que una agitación hace que el líquido frío reemplace a la capa del líquido caliente próxima a la pieza.

8.3.3.2. Temperatura del medio templante. La temperatura del líquido afecta marcadamente su habilidad de extraer calor. Altas temperaturas del líquido disminuyen la temperatura característica, alargando así el tiempo de la etapa A. Además, el aumento de la temperatura produce una disminución en la viscosidad, lo que afecta el tamaño de las burbujas o influye sobre la ruptura del colchón de vapor.

8.3.4. Aspectos metalográficos. El acero es templado para controlar la transformación de la austenita a microconstituyentes deseados.

Microestructuras que pueden ser obtenidas son indicadas en la Figura 22.

La martensita es la microestructura usualmente deseada. Como lo indica la curva A en la Figura 22, para obtener la cantidad máxima de martensita, la tasa de enfriamiento debe ser lo suficientemente rápida para evitar la nariz de la curva de transformación tiempo-temperatura (TTT) del acero que está siendo templado. Si la tasa de enfriamiento no es lo suficientemente rápida

para evitar la nariz de la curva TTT (curvas B, C y D en la Figura 22), tendrá lugar alguna transformación a bainita, perlita, o ferrita, con el correspondiente descenso en la cantidad de martensita formada y en la dureza desarrollada.

FIGURA 22. Diagrama TTT para un acero SAE 3140

8.3.4.1. Contenido de carbono y la templabilidad. La máxima dureza alcanzable en un acero templado a una tasa suficiente que evite la nariz de la curva TTT depende del contenido de carbono. La tasa de enfriamiento (eficiencia del temple) necesaria para obtener una estructura totalmente martensítica depende de la templabilidad del acero templado. La relación del contenido de carbono al porcentaje de martensita y su dureza es mostrado en la Figura 23.

FIGURA 23. Efecto del contenido de carbono sobre la dureza de temple cuando la estructura resultante contiene 99,9%;90% y 50% de martensita

Dependiendo del contenido de carbono y de la templabilidad del acero, la rata de enfriamiento debe ser lo suficientemente rápida para que al menos 90% de martensita se deba producir en áreas críticamente tensionadas. En

áreas sometidas a bajas tensiones en servicio, a menudo se aceptan porcentajes bajos de martensita.

8.3.5. Velocidades de enfriamiento. Cuando el acero al carbono es templado desde la temperatura de austenización, una rata de enfriamiento igual o mayor a los 55°C por seg (medidos a 700°C) es necesaria para evitar la nariz de la curva TTT. Toda la sección transversal de la pieza debe ser enfriada a esta velocidad para obtener la máxima cantidad de martensita. Bajo condiciones ideales, el agua suministra una velocidad de enfriamiento de 1800°C por seg a la superficie de cilindros de acero de $\frac{1}{2}$ " de diámetro por 4" de largo.

Esta velocidad decrece rápidamente por debajo de la superficie. Así, para aceros al carbono, solo secciones delgadas con una gran relación área superficial a volumen pueden ser endurecidas a través de toda su sección transversal.

Cuando se emplea agua o salmuera, se desarrollan gradientes grandes de temperatura entre la superficie y el centro. Estos gradientes de temperatura produce una gran distorsión e incrementa el riesgo de agrietamiento en piezas con formas sencillas y simétricas. Bajo condiciones favorables, temple quieto en un aceite rápido proporciona una velocidad de enfriamiento en la superficie de un cilindro de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ " de diámetro por 4" de longitud de 1800°C por seg entre 830 y 550°C , lo que es

comparable a la obtenida para una pieza similar en agua. Al templar en aceite resulta un gradiente de temperatura mucho más bajo desde la superficie al centro, disminuyendo la distorsión, y la probabilidad de agrietamiento.

Con secciones gruesas, la velocidad de enfriamiento esta limitada por la rata de conducción de calor desde el interior a la superficie. Es imposible un enfriamiento rápido del centro de una sección extremadamente grande, por causa del “efecto de masa”. Por lo tanto, cuando es mandatorio un endurecimiento profundo de una sección pesada, es necesario utilizar un acero aleado con una alta templabilidad.

8.3.6. Templabilidad de los aceros.

8.3.6.1. Ensayo de Jominy. La prueba consiste en templar en agua el extremo de una probeta cilíndrica de 25 mm de diámetro y en medir la distancia y el número de dureza que ha adquirido el acero a partir del extremo templado.

Aparatos y equipo

Soporte de la probeta. Este es un dispositivo para suspender la probeta verticalmente, de manera que su extremo inferior esté a una altura de $12,5 \pm 0,5$ mm sobre el extremo del tubo del dispositivo de temple. Véase Figura 24.

FIGURA 24. Dispositivo de temple para probetas en el ensayo de Jominy

Dispositivo de temple. Es un dispositivo de capacidad suficiente para suministrar una corriente vertical de agua que alcance una altura de 65 ± 10 mm cuando pasa por un tubo de $12,5 \pm 0,5$ mm de diámetro interior. Es satisfactorio un tanque de capacidad suficiente con una bomba pequeña y válvulas de control. La línea de abastecimiento de agua debe tener una válvula de apertura rápida.

Probetas forjadas. La probeta debe ser de 25 mm de diámetro por 76 mm ó 100 mm de largo (como se muestra en la Figura 25) diseñada de tal manera que pueda suspenderse en posición vertical, a fin de templearla en su extremo inferior. La probeta debe maquinarse a partir de una barra, con tratamiento térmico de normalización, la cual debe ser de un tamaño suficiente, para que permita la eliminación de la superficie descarburada cuando se maquine al diámetro final. El extremo de la probeta que se va a

templar en agua debe someterse a un proceso mecánico de rectificado y tener un acabado razonablemente terso.

FIGURA 25. Esquema de probeta preferente para el ensayo Jominy

Probetas vaciadas. Las probetas también pueden obtenerse durante el vaciado del acero. Se puede usar un molde de grafito o de metal a fin de obtener una probeta con dimensiones ligeramente mayores para que al maquinarse se obtengan las dimensiones estándar. Estas probetas no necesitan someterse al tratamiento térmico de normalización.

Procedimiento.

- **Calentamiento.** Se coloca la probeta en un horno, el cual debe estar a la temperatura específica de austenización según el acero que se esté probando, y se mantiene a esta temperatura durante un tiempo de 30 a 35 minutos, sin que exista un efecto apreciable en los resultados. Es importante calentar la probeta en una atmósfera en la que prácticamente no se formen escamas de óxido y la descarburación sea mínima. Esto puede lograrse calentado la probeta en posición vertical, dentro de un recipiente que contenga una capa de material carbonáceo que evite la descarburación, sobre la cual descansa la cara inferior de la probeta; el recipiente debe tener una tapa fácil de quitar.

Para dispositivos y hornos particulares, se determina el tiempo necesario para calentar la probeta a la temperatura de austenización para temple, insertando un termopar en un orificio taladrado axialmente en la parte superior de la probeta.

- **Temple.** Se ajusta el dispositivo de temple de modo que el flujo de agua se eleve a una altura libre de 65 mm por arriba del extremo del tubo de 12,5 mm de diámetro interior; este paso se hace cuando la probeta no está en posición. El soporte para la probeta, al principio de cada prueba, debe estar seco. Se coloca la probeta caliente en el soporte de manera que su cara inferior quede a 12,5 mm arriba del orificio y se permite el flujo del agua, mediante una válvula de apertura rápida. El tiempo transcurrido entre la remoción de la probeta del horno y el comienzo del temple debe ser como máximo cinco segundos. Se dirige el chorro de agua, a una temperatura entre 5 y 30°C, contra la cara inferior de la probeta, durante diez minutos como mínimo. En la medida de lo posible, deben evitarse corrientes de aire alrededor de la probeta durante su enfriamiento.

Si la probeta no está fría cuando se le quita del dispositivo, debe enfriarse inmediatamente en agua.

- **Mediciones de dureza.** Las mediciones de dureza se efectúan en la escala Rockwell C; la primera indentación se realiza a 1,5 mm del

extremo templado y las distancias sucesivas entre los ocho primeros puntos de medición serán las siguientes:

1,5 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 mm

Los demás puntos se deben espaciar, en general, 5 mm. Sin embargo, la secuencia de los puntos de medida a partir del primero no es absoluta, ya que depende de las características del acero que se pruebe y de la precisión que se requiera en el trazado de la curva de templabilidad.

Las determinaciones de dureza se deben efectuar en superficies planas y paralelas, rectificadas a lo largo de la probeta. Se deben esmerilar las superficies a una profundidad mínima de 0,4 mm.

- **Cálculos y resultados.** Los resultados de la probeta se grafican en forma que las ordenadas representen valores de dureza Rockwell en escala C y las abscisas representan la distancia del extremo templado de la probeta a los puntos de las determinaciones de la dureza.
- **Índice de templabilidad.** La templabilidad de un acero se especifica mediante una clave que indica la distancia o distancias a partir del extremo templado de la probeta dentro de las cuales debe obtenerse la dureza especificada. Por ejemplo, un acero que contenga 0,44% de carbono podría especificarse con una templabilidad de J50-10, lo que significa que el requisito mínimo para este acero sería una dureza de 50RC a una distancia de 10 mm del extremo templado. Si se desean los

límites mínimos, el índice de templabilidad podría especificarse como J50-5 a 20.

8.4. REVENIDO DE LOS ACEROS

8.4.1. Generalidades. El revenido de los aceros incluye el calentamiento de un acero previamente endurecido o normalizado, hasta una temperatura por debajo del rango de transformación, la permanencia a esta temperatura y el enfriamiento posterior a una velocidad conveniente. Todo esto se realiza a fin de aumentar su ductilidad y su tenacidad.

La microestructura y las propiedades mecánicas de un acero revenido dependen de la temperatura y el tiempo de revenido. Estas son variables interdependientes y, dentro de ciertos límites, las temperaturas más bajas y los tiempos más largos pueden, habitualmente, producir el mismo resultado. La relación entre el tiempo y la temperatura se obtiene por medio de la fórmula empírica de Hollomon y Jaffe:

$$H = T (C + \log t)$$

T = temperatura absoluta

t = tiempo revenido.

Si t se expresa en horas, $C = 20$ y si t se expresa en segundos, $C = 16,5$.

Estos valores de la constante son para aceros con un contenido de carbono entre 0,15 y 0,50%.

Con muy pocas excepciones, el revenido se hace a temperaturas comprendidas entre 175 y 705°C, durante tiempos que van de 30 minutos a 4 horas.

8.4.2. Baños de sales fundidas. Los baños de sales fundidas se pueden emplear en los revenidos por encima de 165°C, pudiéndose obtener toda una variedad de mezclas de sales con diferente intervalo de temperaturas de operación.

La Tabla 7 presenta la composición y las temperaturas de operación de los baños de sales de uso común en el revenido.

TABLA 7. Composición y temperatura de operación de baños de sales usadas en el revenido

Clase	NaNO ₂	NaNO ₃	KNO ₃	Na ₂ CO ₃	NaCl	KCl	Temp. de trabajo, C	Temp. de humos, C
1	37-50	0-10	50-60				165-695	635
2		45-57	45-57				290-595	705
3				45-55		45-35	620-930	950
4					15-25	20-32	595-900	945
4A						25-30	550-760	790

Debe eliminarse toda humedad de las piezas antes de ser sumergidas

en el baño de sal, ya que las sales calientes reaccionan violentamente con el agua. Si las piezas están sucias o aceitosas cuando son sumergidas en el baño, la sal se contaminará. Por otro lado, las piezas revenidas en sal deben ser limpiadas tan pronto como son retiradas del baño ya que la sal que se deposite sobre ellas es higroscópica y puede causar corrosión severa. Las piezas con agujeros pequeños o ciegos, de donde es difícil limpiar la sal, no se deben reventar en estos baños.

8.4.3. Baños de aceite. Los equipos para baños de aceite son similares a los de los de sales, es decir, son tanques de acero con quemadores grandes del tipo de placa caliente, por debajo del tanque, y se ha demostrado que este tipo de calentamiento es absolutamente satisfactorio. También pueden emplearse calentadores eléctricos sumergidos.

La agitación es esencial para mantener la uniformidad en la temperatura y una larga vida del aceite. Deben emplearse controles de temperatura de tipo sencillo para evitar el sobrecalentamiento del aceite por el peligro de incendio.

Por lo general, para revenidos a bajas temperaturas se emplea aceite de 600W, que pueden resistir la oxidación ambiente. La temperatura máxima de operación de los baños de aceite no supera, usualmente, los 200°C.

8.4.4. Baños de metales fundidos. Los baños de metales fundidos han tenido mucho uso pero actualmente son reemplazados por baños de sales.

El metal que comúnmente se emplea es plomo puro, que funde a 326°C y es el más útil de los metales y aleaciones para estos usos.

El plomo no se adhiere a la superficie de las piezas pero, dado que se oxida rápidamente y su óxido si es adherente, pueden surgir problemas cuando se hacen revenidos a altas temperaturas.

A temperaturas medias de revenido, las piezas se recubren de una capa de óxido que se puede quitar fácilmente. Por encima de 480°C es necesario usar material carbonáceo granulado, para formar una cubierta protectora para evitar la formación de óxidos adherentes.

8.4.5. Revenido apropiado. Debido a su contenido de carbono, o de aleación, algunos aceros presentan una tendencia a fisurarse si se los deja enfriar hasta la temperatura ambiente luego o durante la operación de temple. Esta tendencia puede aumentar por cambios bruscos de la sección de las piezas.

Por esta razón, estos aceros se retirarán del medio de temple y se llevarán al medio de revenido mientras están a temperaturas entre 100 y 150°C .

Los aceros que presentan este problema son: SAE 1060, SAE 1090, SAE 1340, SAE 4073, SAE 6150, SAE 52100, SAE 4340, SAE 8650 y SAE 9850.

Otros aceros al carbono o aleados son menos sensibles a este tipo de fisuras en el temple, pero pueden fisurarse como resultado de defectos en la configuración de la pieza o defectos de la superficie. Estos incluyen al SAE 1040, SAE 1050, SAE 1137, SAE 1144, SAE 4047, SAE 4143, SAE 4640, SAE 8622, SAE 4740, SAE 9840.

Algunos aceros, tales como el SAE 1020, SAE 1038, SAE 4130, SAE 4047, SAE 5130 y SAE 8630, no son sensibles a este tipo de fisuras. En general, esto es cierto para los aceros al carbono que contengan menos de 0,40% C y para los aceros aleados que contiene menos de 0,35% C.

Por lo tanto, es una buena práctica comenzar el revenido inmediatamente luego del temple.

8.4.6. Revenidos múltiples. Cuando el contenido de carbono y de aleantes aumenta, es común que se obtenga austenita retenida. Se puede eliminar esta austenita retenida por revenidos y enfriamientos sucesivos en torno de la línea M_S .

Durante el primer ciclo de calentamiento parte de la austenita pasa a bainita y parte se convierte en martensita en el siguiente enfriamiento.

Los tratamientos de revenido múltiple aseguran una disminución en la distorsión, así como una mayor estabilidad dimensional de las piezas, si se los compara con el revenido convencional.

8.5 RECOCIDO DE LOS ACEROS

8.5.1 Generalidades. El acero es recocido para reducir la dureza, mejorar la maquinabilidad, facilitar el trabajo en frío, producir una microestructura particular o para obtener propiedades físicas y mecánicas deseadas.

En el caso de aleaciones ferrosas se entiende por recocido, cuando no se hacen otras aclaraciones, a un recocido total. Se define recocido total a una austenización seguida de un enfriamiento lento a través del rango de transformación.

El recocido depende casi totalmente de dos factores: (a) la formación de austenita, y (b) la subsecuente transformación de la austenita a temperaturas subcríticas elevadas. Un control cuidadoso a estos factores, asegurará un recocido satisfactorio.

La formación de austenita es relativamente simple. El acero en la condición tanto forjada como laminada, esta compuesto casi exclusivamente de ferrita y carburo en mezclas que varían mucho según la composición del acero, las temperaturas de acabado, y las condiciones de enfriamiento. Todas estas

estructuras pueden ser convertidas en austenita calentado el acero a una temperatura por encima de la crítica. Esta temperatura es llamada la temperatura de austenización.

Aunque la austenita se empieza a formar tan pronto la temperatura del acero excede la temperatura crítica, la estructura del acero no es totalmente austenítica tan pronto como es pasada la temperatura crítica. A temperaturas de austenización bajas, la estructura esta compuesta de austenita mas carburos o ferrita, o bien ambas, dependiendo de la composición del acero, del tiempo de austenización y de la temperatura.

En los aceros hipoeutectoides, los carburos se disuelven total y rápidamente en la austenita a temperaturas relativamente bajas de austenización. En los hipereutectoides los carburos no se disuelven a bajas temperaturas de austenización, sino que tienden a aglomerarse.

Al ser incrementada la temperatura de austenización, la estructura del acero se volverá mas homogénea: más ferrita es convertida en austenita en los aceros hipoeutectoides, y más carburos se disuelven en la austenita en los aceros hipereutectoides. Sin embargo, en muchos aceros hipereutectoides, tales como los aceros para herramientas para alta velocidad, la estructura nunca es completamente homogénea sino que está formada siempre por austenita y carburos.

Entre mas homogénea sea la estructura del acero austenizado, mucho más laminar será la estructura del acero recocido y, al contrario, entre más heterogénea sea la estructura del acero en el estado austenizado, mucho más esferoidal será la estructura del acero recocido.

La austenita formada de la ferrita y el carburo cuando el acero es calentado por encima de la temperatura crítica, vuelve a transformarse a ferrita y carburo cuando el acero es enfriado por debajo de la crítica.

Esta transformación es un proceso relativamente lento en algunas temperaturas, y puede ser muy rápido a otras temperaturas. El producto de transformación (que es, la mezcla de ferrita y carburo que resulta de la transformación de la austenita y que constituye la estructura final del acero recocido) depende mucho de la temperatura a la cual la austenita se transforma.

Si es permitida que la austenita se transforme a temperaturas justamente por debajo de la crítica (por ejemplo, 15°C por debajo), el producto puede ser relativamente carburos esferoidales gruesos, o perlita laminar gruesa, dependiendo de la composición del acero y de la temperatura a la cual fue calentado. Así, a temperaturas justamente por debajo de la crítica, una austenita heterogénea se transformará a una estructura esferoidal, y una austenita homogénea se transformará a una estructura laminar. El producto formado a temperaturas justamente por debajo de la crítica es muy blando.

El tiempo requerido para que la austenita se transforme completamente a temperaturas justamente por debajo de la crítica es usualmente muy largo - algunas veces días o semanas-.

Cuando la austenita se transforma a temperaturas entre 30 y 50°C por debajo de la crítica, el producto de transformación es más duro y menos grueso que el formado a una temperatura justamente por debajo de la crítica, y el tiempo requerido para la terminación de la transformación es más corto. También, a temperaturas más bajas, el producto de transformación en muchos aceros de baja aleación presentan tendencia a ser laminar que esferoidal, aún cuando la austenita fuera heterogénea antes de la iniciación de la transformación.

A temperaturas de transformación aún más bajas, el producto es una mezcla mucho más densa de ferrita y carburo y tiene también una mayor dureza. En muchos aceros el tiempo requerido para culminar la transformación disminuye al disminuir la temperatura a un mínimo de 50 a 90°C por debajo de la temperatura crítica, y aumenta otra vez a temperaturas más bajas.

En otros, particularmente en aceros de alto contenido de manganeso o de alto níquel, la temperatura a la cual la transformación es más rápida es alrededor de 200 a 250°C por debajo de la temperatura crítica.

Debido a que el tiempo requerido para que se realice la transformación completa a temperaturas menores de 50°C por debajo de la crítica puede ser muy largo, es conveniente hacer la mayor parte de la transformación a temperaturas altas, en las que se forma un producto blando, y terminar a una temperatura más baja en donde el tiempo de transformación es más corto. Después que el acero ha sido austenizado a una temperatura de 50°C por encima de la crítica, y ha sido enfriado hasta una temperatura de transformación del orden de 50°C por debajo de la crítica, muy pocos cambios pueden presentarse en la estructura del acero. En los aceros hipoeutectoides, alguna ferrita puede separarse de la austenita durante el enfriamiento lento, antes de que ocurra la transformación ferrita-mas-carburo. Esta ferrita usualmente se presenta en bandas, pero también se puede presentar como una red en los límites de los granos de austenita. Desde el punto de vista de la maquinabilidad, la presencia de una gran cantidad de ferrita libre en el acero recocido es usualmente indeseable. En los aceros hipereutectoides, los carburos pueden separarse de la austenita durante el enfriamiento a la temperatura de transformación, pero comúnmente esto no ocurre.

En muchas ocasiones, el enfriamiento a partir de la temperatura de austenización y de transformación se puede hacer rápidamente, con un ahorro considerable en el tiempo total de recocido.

En otros casos, dicho enfriamiento no puede hacerse rápidamente ya sea porque la masa del acero a ser recocida es muy grande o por que el tamaño de las piezas es muy grande. Esto no se puede modificar debido, principalmente, a que el calor no puede ser disipado desde el interior de la carga.

Para la mayoría de las operaciones de maquinado en aceros recocidos de medio carbono, la estructura laminar es siempre preferible, aunque ocasionalmente se puede requerir de una estructura esferoidal. Ya se vio que, para la mayoría de los aceros, la producción de estas estructuras depende de la temperatura de austenización.

En algunos aceros de alta aleación, tales como los aceros para trabajo en caliente, aceros para dados o aceros para alta velocidad, en los cuales hay muchos carburos residuales aún a temperaturas de austenización altas, no puede obtenerse una estructura laminar. Por otro lado, en muchos aceros de baja aleación y contenido medio de carbono, la producción de una estructura esferoidal requiere de un cuidado especial.

En aquellos aceros para los cuales es difícil obtener una estructura esferoidal por un procedimiento regular, puede ser útil un precalentamiento. Este consiste en calentar el acero a una temperatura entre 15 y 50°C por debajo de la temperatura crítica, antes de que el acero sea austenizado.

El objetivo del precalentamiento es aglomerar los carburos de manera tal que puedan ser más resistentes a la disolución durante el subsecuente calentamiento.

Se ha encontrado que este tipo de tratamiento es útil para un cierto número de aceros al carbono y para aceros de baja aleación con un contenido de carbono entre 0,40 y 0,80 %.

8.5.2 Temperaturas de recocido. Las temperaturas asociadas con la dureza Brinell para aceros al carbono son dadas en el cuadro 8, y temperaturas similares son dadas para aceros aleados en el cuadro 9.

Cuadro 8. Temperaturas recomendadas y ciclos de enfriamiento para un recocido total de pequeños aceros al carbono forjados (a)

Acero	Temperatura de recocido C	Ciclo de Enfriamiento (b)		Rango de Dureza Brinell
		Desde C	A C	
1018	855 a 900	855	705	111 a 149
1020	855 a 900	855	700	111 a 149
1022	855 a 900	855	700	111 a 149
1025	855 a 900	855	700	111 a 187
1030	845 a 885	845	650	126 a 197
1035	845 a 870	845	650	137 a 207
1040	790 a 870	790	650	137 a 207
1045	790 a 870	790	650	156 a 217
1050	790 a 870	790	650	156 a 217
1060	790 a 845	790	650	156 a 217
1070	790 a 845	790	650	167 a 229
1080	790 a 845	790	650	167 a 229
1090	790 a 830	790	650	167 a 229

(a)

Para piezas forjadas de hasta 3 pulgadas de espesor. El tiempo a la temperatura es usualmente de un mínimo de 1 hora para secciones de hasta 1 pulgada de espesor; se adiciona ½ hora por cada pulgada adicional de espesor.

b) Enfriamiento en el horno a 10°C por hora.

Ciclos de calentamiento que emplean temperaturas de austenización superiores a los rangos dados en el cuadro 9 producen estructuras perlíticas. Estructuras esferoidizadas son obtenidas cuando son usadas temperaturas de austenización mas bajas.

Cuadro 9. Temperaturas de recocido recomendadas para aceros aleados (para enfriamiento al horno)

Acero	Temp. de recocido, C	Bhn, max.	Acero	Temp. de recocido, C	Bhn, max.
1330	845 a 900	179	5140	815 a 870	187
1340	845 a 900	192	5150	815 a 870	201
3140	815 a 870	187	5160	815 a 870	223
4042	815 a 855	192	51B60	815 a 870	223
4063	790 a 845	223	50100	730 a 845	197
4130	790 a 845	174	52100	730 a 845	207
4140	790 a 845	197	6150	845 a 900	201
4150	790 a 845	212	81B45	845 a 900	192
4161	790 a 845	-	8630	790 a 845	179
4337	790 a 845	-	8637	815 a 870	192
4340	790 a 845	223	8640	815 a 870	197
50B40	815 a 870	187	8650	815 a 870	212
5046	815 a 870	192	8660	815 a 870	229
50B50	815 a 870	201	8740	815 a 870	202
5132	790 a 845	170	9260	815 a 870	229

Cuando el acero aleado es recocido para obtener una estructura específica, se requiere una mayor precisión en la especificación de las temperaturas y de las condiciones de enfriamiento del recocido. El cuadro 10 presenta ciclos típicos para tales operaciones de muchos aceros aleados.

En el recocido isotérmico se produce una estructura perlítica, particularmente en los aceros forjados, la temperatura de austenización puede ser mayor en 52°C que la indicada en el cuadro 10, a fin de disminuir el tiempo de austenización.

Cuadro 10. Temperaturas recomendadas y ciclos de tiempo para recocido de aceros aleados (c)

Acero	Temp. de austenizacion C	Metodos de enfriamiento					BHN
		Convencional (a)			Isotermico (b)		
		Desde C	A C	Rata C/hr	Enfriar a C	Sostener por hr	
1340	830	730	610	11,1	620	4,5	
2345	800	655	650	8,3	595	6	201
3150	830	705	645	11,1	665	6	201
4062	830	695	630	8,3	665	6	223
4140	845	755	665	13,8	675	5	197
4340	830	705	565	8,3	700	8	223
4640	830	715	560	8,3	620	8	197
5132	845	755	670	11,1	675	6	183
5140	830	740	670	11,1	675	6	187
8620(d)	885				665	4	187
8650	830	710	650	8,3	650	8	212
8740	830	725	645	11,1	665	7	201

(a) El acero es enfriado en el horno a la rata indicada a través del rango de temperatura mostrado.

(b) El acero es enfriado rápidamente a la temperatura indicada y es sostenido a la temperatura por el tiempo indicado

(c) Para obtener una estructura predominantemente perlítica

(d) Casi nunca es recocido.

Como lo indica el cuadro 10, el recocido puede ser realizado a muchos aceros calentándolo a la temperatura de austenizacion y después (a) enfriar a una rata controlada dentro del horno, o (b) enfriando rápidamente y, sosteniendo, a una temperatura más baja para la transformación isotérmica. Ambos procedimientos producen virtualmente la misma dureza; como sea, considerablemente menor es el tiempo requerido para la transformación isotérmica.

8.5.3 El proceso de recocido. El proceso de recocido comprende el calentamiento a una temperatura por debajo de A_{c1} , dejar que permanezca un tiempo apropiado, y luego enfriar, usualmente en aire. En muchos ejemplos, calentar dentro 4 a $7^{\circ}C$ por debajo de A_{c1} , produce la mejor combinación de microestructura, dureza y propiedades mecánicas. Los

controles de temperatura son necesarios solamente para prevenir el calentamiento del material por encima de A_{c1} , afectándose así el proceso de recocido.

8.5.4 Esferoidización. El acero es esferoidizado- que es, calentar y enfriar para producir una estructura de carburos globulares en una matriz ferrítica- con los siguientes métodos:

- Sostenimiento prolongado a una temperatura justamente por debajo de A_{e1} .
- Calentando y enfriando alternativamente entre temperaturas que están justamente por encima y por debajo A_{e1} .
- Calentar a una temperatura por encima de A_{e1} o A_{e3} y luego bien sea enfriar muy lentamente en el horno o sostener a una temperatura justamente debajo de A_{e1} .
- Enfriar a una tasa adecuada desde la temperatura mínima a la cual todo el carburo es disuelto, para prevenir la reformación de una cadena de carburo, y después recalentar de acuerdo con los dos primeros métodos descritos arriba. (Aplicable a los aceros hipereutectoides que contienen una cadena de carburo).

Para una esferoidización total, la temperatura de austenización es ligeramente por encima de la temperatura A_{c1} o en la mitad entre A_{c1} y A_{c3} .

La estructura esferoidizada es deseable cuando es importante una dureza mínima, máxima ductilidad, o (en los aceros de alto contenido de carbono) una máxima maquinabilidad. Los aceros de bajo contenido de carbono son casi nunca esferoidizados para el maquinado, debido a que en la condición esferoidizada son excesivamente blandos. Cuando los aceros de bajo contenido de carbono son esferoidizados, generalmente permiten una deformación severa.

Basados en muchas observaciones, la microestructura óptima para el maquinado de aceros de diferentes contenido de carbono son las siguientes:

% de Carbono	Microestructura óptima
0,06 a 0,20	Laminado (mas económica)
0,20 a 0,30	Hasta 3 pulgadas de diámetro, normalizado; de 3 pulgadas y más, rolado.
0,30 a 0,40	Recocida, que se obtenga Perlita gruesa y mínima Ferrita.
0,40 a 0,60	Perlita laminar gruesa a carburos esferoidizados.

0,60 a 1,00

100% carburos esferoidizados,
gruesos y finos.

Típicos ciclos de esferoidización son:

- Austenizar sosteniendo a 788°C por lo menos 2 hr, enfríe en el horno a una rata de 10°C por hora hasta 593°C, y luego enfríe en aire.
- Austenizar a 793°C, enfriar a una rata práctica hasta 749°C, enfriar a una rata de 12°C por hora hasta 677°C, y luego enfriar en aire.
- Austenizar a 793°C, enfriar tan rápidamente como sea posible hasta 691°C, transformar isotérmicamente a esta temperatura por 16 hr, y luego enfríe en aire.

8.5.5 Recocido isotérmico. El recocido isotérmico es mas comúnmente aplicado a los aceros aleados de alto contenido de carbono, pues con estos aceros son obtenidos grandes beneficios de economía en el tiempo en el horno y habilidad para obtener la microestructura deseada. Las reglas ha ser seguidas para establecer un ciclo de recocido isotérmico pueden ser brevemente establecidas así:

- Temperaturas de austenización más altas promueven la formación de una microestructura laminar; temperaturas de austenización muy bajas promueven una estructura esferoidal.
- La estructura más blanda es obtenida usando temperaturas mínimas de austenización y temperaturas máximas de transformación.
- El tiempo en el horno es economizado enfriando rápidamente desde la temperatura de austenización hasta la de transformación, y enfriando rápidamente (como remover del horno) después que el acero ha sido transformado completamente.

Es usado un tratamiento isotérmico que consiste en austenizar a 727°C por 4 hr y a 704°C por 1 hr. Este tratamiento no puede producir una microestructura superior que la obtenida por el procedimiento convencional de enfriar a una tasa de 12°C por hora desde la temperatura de austenización a través del rango de transformación, pero se puede producir esta estructura en menos de la mitad del tiempo total requerido por el recocido convencional.

8.5.6 Recocido de aceros forjados. En muchos aceros forjados, es posible desarrollar una estructura adecuada para el maquinado trasladándolos directamente desde la operación de forja a un horno calentado a una temperatura de transformación adecuada, sosteniéndolos a esta temperatura por un tiempo suficiente para permitir la transformación total a austenita, y

después enfriarlos en aire. En este tipo de operación, la temperatura real de austenización es la “temperatura de finalización” de la forja y no la temperatura de calentamiento. Si la forma del acero es simple, puede ser esperada una estructura bastante uniforme en todas partes. Sin embargo, en piezas forjadas de forma irregular, donde algunas partes finalizarán mas frías que otras, la estructura no será uniforme, pues las características de los productos de transformación dependen de la temperatura de austenización.

Las piezas forjadas transformadas desde la temperatura de finalización - especialmente esos hechos de aceros de alto contenido de carbono- serán mas duras que las piezas forjadas recocidas por procedimientos usuales, por causa de la gran efectividad de las temperaturas de austenización. Por esta razón, el tratamiento de transformación directa del acero así como llega del proceso de forja en caliente es usado algunas veces como un paso preliminar al usual ciclo de recocido. Este es usado para aceros de alta templabilidad susceptibles de quebrarse cuando son enfriados en aire después de la forja o de la laminación.

8.6 CEMENTACIÓN LÍQUIDA DE LOS ACEROS

8.6.1 Generalidades. La cementación líquida es un método de endurecimiento superficial del acero o del hierro al sostenerlo por encima de A_{c1} en un baño de cianuro fundido de tal manera que el carbón se difundirá hacia el interior del metal produciendo una dureza superficial

comparable con una que resulta de una cementación gaseosa en una atmósfera que contenga algo de amoníaco. La cementación líquida se diferencia de la cianuración (la cual es desarrollada en un baño que contiene un alto porcentaje de cianuro) en el carácter y en la composición de la superficie producida. La superficie endurecida con cianuro es alta en nitrógeno y baja en carbono; lo contrario es cierto en los casos de la superficies endurecidas mediante la cementación líquida.

Las superficies endurecidas con cianuro son casi nunca aplicadas para obtener espesores mayores de 0,010 pul; los baños de cementación permiten superficies endurecidas tan profundas como 0,250 pul. Para muchas superficies endurecidas delgadas, la cementación líquida puede ser empleada en lugar de la cianuración.

8.6.2 Tipos de baños. Los baños de sales a bajas temperaturas (superficies endurecidas livianas) son usualmente operados en el rango de temperatura de 843 a 899°C, sin embargo para ciertos efectos específicos este rango de temperatura algunas veces es ampliado hasta cubrir una operación desde 788 a 927°C. Los baños de cementación líquida a baja temperatura son muy adecuados para la formación de superficies endurecidas de 0,003 a 0,030 pulg de profundidad. Son baños de cianógeno catalizado que contienen variadas combinaciones y cantidades de los constituyentes listados en el siguiente cuadro.

Cuadro 11. Composiciones para la operación de baños de cementación líquida

Constituyente	Composicion del bano, %	
	Superficie endurecida liviana	Superficie endurecida profunda
	Temperatura baja 843 a 899 C	Temperatura alta 899 a 954 C
Cianuro de sodio	10 a 23	6 a 16
Cloruro de bario	0 a 40	30 a 55
Sales de otros metales		
alcalinoterreos (a)	0 a 10	0 a 10
Cloruro de potasio	0 a 25	0 a 20
Carbonato de sodio	30 max.	30 max.
Cianato de sodio	1 max.	0,5 max.
Densidad de la sal fundida	110 lb/pie cubico a 899 C	125 lb/ pie cubico a 927

(a) Han sido empleados cloruros de calcio y estroncio. El cloruro de calcio es el más efectivo, pero su naturaleza higroscópica ha limitado su uso.

Son operadas con una cubierta de carbón protector, y difiere de los baños de cianuración debido al predominio de carbono producido en la superficie endurecida. Sin embargo, cuando la cubierta de carbón es delgada en un baño a baja temperatura, el contenido de nitrógeno se incrementará en la superficie endurecida por cementación. Los baños de cianuración producen superficies endurecidas de 0,005 a 0,010 pulg de profundidad con un contenido apreciable de nitrógeno.

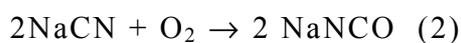
La química de los baños a bajas temperaturas es complejo. Según los productos finales y los intermedios formados, es evidente que muchas reacciones ocurren simultáneamente, dependiendo de la composición del

baño. Entre todos los productos finales e intermedios formados encontramos los siguientes: Carbono (C), carbonato de álcali (Na_2CO_3 o K_2CO_3), nitrógeno (N_2 o 2N), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), cianamida (Na_2CN_2 o BaCN_2), y cianato (NaNCO).

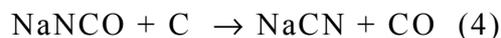
Algunas reacciones involucran solamente una pequeña fracción de la composición del baño. Entre estas están la cianamida y la formación de cianato:



ó



Las reacciones que influyen en el contenido de cianato son las siguientes:



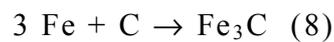
ó



Las reacciones (5) y (6) agotan la actividad del baño, conduciendo a una eventual pérdida de la efectividad de la cementación a menos que se haya seguido una adecuada práctica de relleno. Las reacciones (1) y (3) son, al menos parcialmente, reversibles. Las reacciones que producen ya sea CO o C son benéficas en la obtención de la superficie endurecida deseada, como por ejemplo:



y



Los baños a baja temperatura (Superficie endurecida liviana) son usualmente operados con mayores contenidos de cianuro que los baños a altas temperaturas (superficie endurecida profunda). Los contenidos de cianuro preferibles en la operación son mostrados en el siguiente cuadro una superficie endurecida con una densidad normal de carbono que es ampliamente eutectoide.

Cuadro 12. Relación temperatura de operación a contenido de cianuro de sodio en los baños de cementación líquida

Temperatura C	Cianuro de sodio (NaCN), %		
	Minimo	Preferido	Maximo (a)
816	14	18	23
843	12	16	20
871	11	14	18
899	10	12	16
927	8	10	14

(a) Los límites máximos están basados en la economía. Si es excedido el 30% de NaCN hay peligro que se descompondrá el NaCN, con la producción de espuma de carbono y acompañado de espuma. Para corregir tal condición, la temperatura del baño debe ser disminuida y el contenido de NaCN debe ser ajustado al valor preferido

Si es deseada una superficie endurecida hipoeutectoide, la operación en el extremo inferior del rango cianuro-temperatura realizará este propósito. Recíprocamente, la operación en el extremo superior del rango sugerido favorece la formación una zona hipereutectoide más amplia.

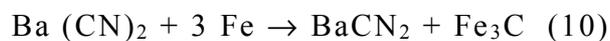
Los baños a altas temperaturas (superficies endurecidas profundas) son usualmente operados en el rango de temperatura de 899 a 954°C. Este rango puede ser ampliado en algo, pero a temperaturas inferiores la rata de penetración de carbono llega a ser inconvenientemente lenta, y a temperaturas superiores a los 954°C es acelerada la deterioración del baño y del equipo. Sin embargo, una rápida penetración de carbono puede ser obtenida operando a temperaturas entre 982 y 1038°C.

Los baños a altas temperaturas son usados para producir espesores de superficie endurecida de 0,020 a 0,120 pulg. En algunos casos, son superficies endurecidas más profundas (hasta 0,25 pulg), pero el uso más

importante de estos baños es para el desarrollo rápido de espesores de superficie endurecida de 0,040 a 0,080 pulg. Estos baños están formados de cianuro y cloruro de bario en gran proporción, con o sin una catalización suplementaria por parte de otras sales de metales alcalinoterreos. Sin embargo las reacciones nos muestran que para la cementación líquida con sales a baja temperatura se aplican en algunos grados, la principal reacción que es la tan llamada cianamida. Esta reacción es reversible:



Con la presencia de hierro, la reacción es:



Las superficies endurecidas con los baños de cementación líquida a alta temperatura están conformados esencialmente de carbono disuelto en hierro. Suficiente nitrógeno naciente (2N, preferible que N₂) está disponible para producir una capa superficial que contiene nitruro, la cual ayuda en la resistencia al desgaste y también para resistir la temperatura si la pieza de trabajo es recalentada.

Amos baños tanto de baja como de alta temperatura son suministrados con variaciones en el contenido de cianuro para satisfacer requerimientos

particulares de actividad cementante (potencial de carbono) dentro de las limitaciones de una prolongación normal y el relleno.

8.6.3 Gradientes de carbono. La penetración de carbono (y la profundidad de la superficie endurecida) en la cementación líquida esta determinada principalmente por la temperatura de cementación y la duración del ciclo de cementación. Los efectos de la composición del acero son relativamente menores. Una fórmula simple para estimar la profundidad de la superficie endurecida obtenible en la cementación líquida es:

$$C = k\sqrt{t}$$

En la formula de arriba, C es el espesor de la superficie endurecida en pulgadas, k es la constante la cual representa la penetración en la primera hora al calentarla, y t es el tiempo calentadola en horas. Los valores de k a tres temperaturas diferentes son: 0,012 pulg (816°C), 0,018 pulg (871°C), 0,025 pulg (927°C).

8.6.4 Medios de temple. Los medios convencionales de temple, incluyendo agua, salmuera, solución cáustica, aceite y sales fundidas, son adecuadas para templar piezas que han sido cementadas por medios líquidos. Sin embargo, la conveniencia de cada medio debe estar relacionado a las piezas especificas y dependerá principalmente de la templabilidad del acero, los requerimientos de dureza en la superficie y en el centro, y la cantidad permisible de la distorsión.

El agua y la salmuera son los medios de temple más utilizados. Un temple en agua es usualmente mantenido de 21 a 32°C y agitado. El agua ayuda a disolver la película de sal para cementar creando así una salmuera localizada que elimina la etapa de vapor. Con el uso continuo, se incrementa la concentración de la sal (cloruros, carbonatos y cianuros), y agua fresca debe ser adicionada periódicamente para controlar la concentración de contaminantes y mantener una temperatura deseada. Soluciones de salmuera (5 a 10%) y cáusticas (3 a 5%) son usadas para obtener una acción de temple más drástica. Sin embargo, la efectividad de estos medios puede ser seriamente reducida por una excesiva acumulación de contaminantes. Cuando es usada una solución cáustica para templar, debe ser tomado un especial cuidado para ver que los colgadores, canastas y accesorios sean lavadas para que sean liberadas de residuos cáusticos y secadas antes de ser regresadas al baño de cementación. Muchos aditivos usados para retardar la rata de temple del agua deben ser evitados. Estos aditivos usualmente están formados de polivinil alcohol y ciertas gomas sintéticas o naturales. Las gomas son precipitadas por las concentraciones de las sales y depositadas dentro del temple, afectando negativamente la rata de temple.

El temple en aceite es menos drástico que el temple en agua, y produce una menor distorsión. Debido a que las sales para cementar contienen álcalis que saponifican la materia grasosa contenida en muchos aceites para temple

(reduciendo así la efectividad de los aceites para temple), debe ser usado un aceite mineral puro, libre de grasas. Casi nunca es deseable fortificar el aceite mineral con aditivos que incrementan su efectividad para templar y alargan su vida de uso. Para minimizar la distorsión, los aceites especiales son eficaces porque pueden ser usados a temperaturas tan altas como 177°C. Normalmente, las piezas que han sido cementadas por un agente líquido son templadas directamente en aceite mantenido dentro del rango de 27 a 71°C.

El aceite para templar debe ser mantenido libre de mezclas y debe ser agitado mediante bombas del tipo con impeles. No debe ser usado aire comprimido obtener la agitación. Debido a que inevitablemente algo de sal se precipitará en el baño de aceite, es necesario un desenlodamiento periódico.

El temple en baños de sales en un baño nitrito-nitrato minimiza mucho más la distorsión. Sin embargo, las piezas nunca deben ser trasladadas directamente desde el baño de cementación que tiene un exceso de 5% de cianuro a un baño de temple del tipo nitrato-nitrito. Se generará una reacción violenta y puede causar una explosión. Para evitar esta posibilidad, una inmersión en un baño de sal neutra (45 a 55% NaCl, 45 a 55% KCl) sostenido a la temperatura deseada deberá preceder al enfriamiento en un baño nitrato-nitrito. El baño de sal neutra debe ser examinado periódicamente el contenido de cianuro; es una práctica general limitar el contenido a un nivel menor del 5%. Este nivel nunca es

alcanzado, como una regla, debido a la oxidación del cianuro por el oxígeno en el aire.

9. ACEROS ENSAYADOS

En nuestra investigación se ha empleado una gama de aceros nacionales producidos por Siderurgica del Pacífico S.A. (SIDELPA S.A.), para ser aplicados en diferentes tipos de operaciones.

Estos aceros son SAE/AISI 1010, SAE/AISI 1016, SAE/AISI 1040, SAE/AISI 8615, SAE/AISI 12L14, SAE/AISI 4140, SAE/AISI 304, SAE/AISI 420 Modificado y SAE/AISI DF-2..

Algunas de las características más importantes de dichos aceros pueden verse en los Anexos A hasta el Anexo I.

Anexo A. Características generales del AISI 1010

ANÁLISIS QUÍMICO %

C	Mn	P. max	S. max	Si. max
0,08/0,13	0,30/0,60	0,04	0,05	0,1

EQUIVALENCIAS APROXIMADAS

AFNOR	ATLAS	B.S.	BOEHLER	DIN	SAE/AISI	UNI
XC-10	Machinery10	EN2E	E900	C-10	1010	C-10

CARACTERÍSTICAS DE EMPLEO

Acero muy dúctil y maleable, de fácil conformidad en frío y muy buena soldabilidad. Puede ser utilizado como acero de cementación.

APLICACIONES

Elementos de maquinaria que requieran gran tenacidad. Piezas de fuerte embutición, piezas que deban sufrir deformaciones en frío.

Se usa para piezas de pequeño tamaño y forma sencilla en los cuales no sean necesarios altos valores de resistencia mecánica: bulones, ejes, cadenas, pasadores, bujes, tornillos, tuercas, acoples, racores, remaches, etc. Es muy utilizado en estado calibrado o torneado para la fabricación de ejes.

SOLDADURA

Este acero solda muy fácilmente con soplete al arco. Se recomienda para la soldadura AWS. clase E-6010, E-6011 ó E-6013 de la American Welding Society.

Anexo B Características generales del AISI 1016

ANÁLISIS QUÍMICO %

C	Mn	P. max	S. max	Si. max
0,13/0,18	0,60/0,90	0,04	0,05	0,20/0,35

EQUIVALENCIAS APROXIMADAS

AFNOR	DIN	SAE/AISI	THYSSEN	UNI
XC-18	RST44-2	1016	TEW CK10	C-16

CARACTERÍSTICAS DE EMPLEO

Debido a su mayor contenido de Mn, comparado con un 1010 ó 1020 se pueden obtener mayores profundidades de capa endurecida cuando es sometido al tratamiento de cementación.

Se utiliza principalmente en piezas de maquinaria donde la tenacidad es una propiedad importante, sin embargo la resistencia no es demasiado elevada, por lo que se utiliza en piezas que no tengan altos requerimientos mecánicos.

Es muy recomendado en piezas de fuerte embutición y piezas que deban sufrir deformaciones en frío.

APLICACIONES

Se utiliza principalmente para partes de vehículos y maquinarias, las cuales no estén sometidas a grandes esfuerzos mecánicos como ejes, eslabones para cadenas, pasadores, bujes cementados, tornillería corriente, bridas, clavos, para ferrocarril, grapas, etc.

SOLDADURA

Este acero solda muy fácilmente con soplete al arco. Se recomienda para la soldadura AWS clase E-6010, E-6012 ó E-6013 de la American Welding Society.

Anexo C. Características generales del AISI 1040

ANÁLISIS QUÍMICO %

C	Mn	P. max	S. max	Si
0,37/0,44	0,60/0,90	0,04	0,05	0,15/0,30

EQUIVALENCIAS APROXIMADAS

DIN	SAE/AISI
CK-40	1040

CARACTERÍSTICAS DE EMPLEO

Tiene mayor templabilidad y más alta resistencia que el acero 1030.

APLICACIONES

Se usa para piezas de máquina de pequeño y mediano espesor y sirve también para piezas que deban ser templadas a inducción o con soplete.

Entre sus usos figuran: arandelas de presión, árboles para bombas, árboles excéntricos, bujes para motores, cigüeñales para telares, cinceles de mano, cuñas, chavetas, destornilladores, etc.

Anexo D. Características generales del AISI 8615

ANÁLISIS QUÍMICO %

C	Mn	P. max	S. max	Si	Cr	Ni	Mo
0,13/0,18	0,70/0,90	0,035	0,04	0,20/0,35	0,40/0,60	0,40/0,70	0,15/0,25

EQUIVALENCIAS APROXIMADAS

AFNOR	ASSAB	ATLAS	BOEHLER	DIN	SAE/AISI	THYSSEN
20NCD2	7210	Impacto	E410	21NiCrMo2	8615	21NiCrMo2

CARACTERÍSTICAS DE EMPLEO

Ofrece muy buena dureza superficial y buenas propiedades en el núcleo.

Tiene aceptable profundidad de temple, ausencia de zonas blandas en la parte cementada y baja distorsión.

APLICACIONES

Se utiliza generalmente para ejes ranurados, pasadores de pistón, bujes, piñones para cajas y transmisión de automotores, cigüeñales, barras de torsión, cuerpos de válvulas, herramientas manuales, tornillería, tuercas, engranajes para reductores , tornillos sin fin, pasadores, collares de cojinetes, cojinetes para motores, discos excéntricos, etc.

Anexo E. Características generales del AISI 12L14

ANÁLISIS QUÍMICO %

C max	Mn	P	S	Pb
0,15	0,85/1,15	0,04/0,09	0,26/0,35	0,15/0,35

EQUIVALENCIAS APROXIMADAS

AFNOR	DIN	SAE/AISI	UNI
S300Pb	9SMnPb36	12L14	CF9SMnPb36

CARACTERÍSTICAS DE EMPLEO

La adición de plomo aumenta el efecto del azufre, permitiendo incrementar las velocidades de corte y mejorar el acabado. El plomo que es el soluble en el acero, se dispersa microscópicamente al laminar el acero.

Las partículas de plomo, actúan como un lubricante ayudando a prevenir el desgaste de la herramienta y sirviendo como fragilizador de la viruta de una manera similar a los sulfuros.

APLICACIONES

Por razones económicas el plomo es usualmente limitado a los aceros resulfurados para tornos de alta velocidad donde las características de maquinado deben ser superiores.

Se emplea para producir pasadores, bujes, tornillos, turcas, acoples, racores, remaches, etc.

Anexo F. Características generales del AISI 4140

ANÁLISIS QUÍMICO %

C	Mn	P max.	S max.	Si	Cr	Mo
0,38/0,43	0,75/1,00	0,035	0,040	0,20/0,35	0,8/1,10	0,15/0,25

EQUIVALENCIAS APROXIMADAS

AFNOR	ATLAS	B.S.	BOEHLER	DIN	SAE/AISI	UNI
42CD4	Alloy 41	EN-19	V320	42CrMo4	4140	40CD4

CARACTERÍSTICAS DE EMPLEO

Es un acero aleado al Cromo-Molibdeno de buena penetración de temple y con buenas características de estabilidad en caliente hasta 400°C sin fragilidad de revenido, muy versátil y apto para esfuerzos de fatiga y torsión. Puede ser endurecido superficialmente por temple directo (templado a la llama o por inducción), obteniendo durezas de 57 a 62 Rockwell C.

APLICACIONES

Se utiliza generalmente en estado bonificado a una resistencia a la tracción de 882 a 1078 Mpa: ejes, engranajes, cigüeñales, cilindros de motores, bielas, rotores, árboles de turbinas a vapor, ejes traseros, barras de conexión, engranajes de transmisión, partes de bombas, ejes de reductores. Se utiliza para espárragos, tuercas y tornillos de alta resistencia en plantas que trabajen a temperaturas de 150 a 300°C, como calderas, turbinas de vapor, plantas químicas.

Muy utilizado en piezas forjadas como herramientas, llaves de mano, destornilladores. En la industria del petróleo para taladros, brocas, barrenos, tubulares, partes de bombas, vástagos de pistón.

SOLDADURA

Se puede soldar con soldadura al arco eléctrico clase AWS E9018 B3 realizando un pre y post calentamiento a la pieza (200-300°C) con el objeto de evitar el choque térmico brusco y aliviar las tensiones residuales después de soldada la pieza.

Anexo G. Características generales del AISI 304

ANÁLISIS QUÍMICO %

C max.	Mn max.	P max.	S max.	Si max.	Cr	Mo
0,08	2,00	0,045	0,030	1,0	18/20	8,4/10,5

EQUIVALENCIAS APROXIMADAS

ASSAB	ATLAS	BOEHLER	DIN	SAE-AISI
911	Remanit 4301	A500	X5CrNi18-9	304

CARACTERÍSTICAS DE EMPLEO

Acero austenítico de mediana resistencia con excelentes características de soldabilidad y formado, lo que lo hace apto para embutidos profundos. No es magnético siempre y cuando no haya sido deformado en frío. La única manera de endurecerlo es por trabajo en frío pues por temple no da ninguna dureza.

Apto para lograr acabado de brillo en espejo.

RESISTENCIA A LA CORROSIÓN

Tiene una buena resistencia a la corrosión. Algunas de las sustancias a las cuales resiste el ataque son:

Ácido acético	Ácido cítrico
Acetona	Ácido tartárico
Acetileno	Carbonato de sodio
Soda cáustica	Bicarbonato de sodio
Gasolina	Ácido nítrico
Ácido fosfórico	Derivados calientes del petróleo

APLICACIONES

En la industria de cubiertería, fábricas de azúcar, lecherías, cervecerías. Partes y piezas en general de la industria alimenticia; como peroles, cacerolas, barriles cerveceros, enfriadores en la industria lechera, tanque para almacenamiento de vinos, cocinas integrales.

También para partes de extinguidores, tuberías, recipientes para químicos, intercambiadores de calor, bombas de inyección, válvulas.

SOLDADURA

Para soldar estos aceros se deben usar electrodos clasificación AWS E308-15,16. Normalmente no se requiere tratamiento térmico pero si se especifica, puede hacerse de la siguiente manera:

- Recocer a 1066-1177°C con enfriamiento de 315°C por minuto mínimo, para propiedades máximas.
- Estabilizar a 871-899°C dos horas por pulgada de espesor enfriando al aire.
- Relevar esfuerzos a 871-899°C una hora por pulgada de espesor, enfriando al aire.

TRABAJO EN CALIENTE

Son accesibles para todas las operaciones de trabajo en caliente. El calentamiento debe ser hecho cuidadosamente y no demasiado rápido, debe evitarse el uso de combustibles sulfurosos y atmósferas fuertemente reductoras.

Se debe precalentar a 816-871°C y empezar el conformado a 1149-1260°C, terminando a 927°C.

El doblado de tubos en caliente se recomienda hacerlo a 954-1010°C.

Anexo H. Características generales del AISI 420 MOD.

ANÁLISIS QUÍMICO %

C max.	Mn max.	P max.	S max.	Si max.	Cr
0,15	1,00	0,04	0,03	1,00	11,5-13,5

EQUIVALENCIAS APROXIMADAS

AFNOR	BOEHLER	DIN	SAE-AISI	UNI
Z12C13	N100	X10Cr13	420 MOD.	X15C13

CARACTERÍSTICAS DE EMPLEO

Acero martensítico al Cr, lo que hace que pueda ser endurecido por temple convencional, en cuyo estado tiene las mejores propiedades de resistencia a la corrosión.

Este acero tiene una buena resistencia a la acción corrosiva de la humedad atmosférica, agua, vapor de agua, agentes medianamente corrosivos en la industria alimenticia, aceites minerales, grasas, petróleo, potasa, vinagre y de una gran variedad de ácidos.

Es magnético. Su resistencia a la corrosión con respecto a los de la serie 300 es inferior.

RESISTENCIA A LA CORROSIÓN

Resiste el ataque de:

Atmósferas secas

Agua dulce

Álcalis

Ácidos suaves (níttrico, cítrico, salicílico)

Gasolina

APLICACIONES

Se utiliza para aparatos de uso doméstico, elementos decorativos, cubiertos, etc., elementos industriales, como alabes de turbinas, ventiladores, grifería en general. Ejes para bombas de agua, válvulas y asientos de escape, herrajes, cadenas de transportadores, ejes de transportadores, vástagos para bombas de refinерías, paletas de agitadores, anclas, tornillería y tuercas, navajas, tijeras, remaches, elementos para hornos, etc.

SOLDADURA

En aplicaciones donde es necesario que el metal de soldar y el metal base, sean semejantes (condiciones de temperatura elevada y máxima corrosión), se deben utilizar electrodos especificación AWS-E-410-15.

Donde se requiere máxima ductilidad se recomienda electrodos inoxidable AWS-E309-15 o AWS-E310-15.

Se debe precalentar entre 149-315°C y relevar esfuerzos después de soldar a 734-787°C , sostener esta temperatura el tiempo necesario y enfriar con una velocidad de 10°C por hora hasta alcanzar 593°C. Enseguida, remover la pieza del horno y dejar enfriar al aire.

Como todos los aceros de la serie 400 presentan un crecimiento de grano que se produce rápidamente cuando alcanzan temperaturas de 899°C o mayores.

Este crecimiento del grano puede ser refinado en los aceros martensíticos, pasando en uno o varios pasos a través de una temperatura de transformación aproximada de 871°C.

Anexo I. Características generales del AISI DF-2

ANÁLISIS QUÍMICO %

C	Mn	W	V	Si	Cr
0,95	1,1	0,5	0,1	0,30	0,5

EQUIVALENCIAS APROXIMADAS

ASSAB	BOEHLER	DIN	SAE-AISI	THYSSEN
DF2	K460	100MnCrW4	0 1	Thyrodur2510

CARACTERÍSTICAS DE EMPLEO

Acero para trabajo en frío de temple en aceite, el cual presenta muy buena estabilidad dimensional después del templado al igual que una alta dureza y excelente maquinabilidad.

PROPIEDADES FÍSICAS

Módulo de elasticidad: $210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$

Conductividad térmica: $30 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

APLICACIONES

Se utiliza en troqueles para cortar y punzonar láminas hasta 6 mm de espesor, cizallas para corte en frío de metales, herramientas para doblar láminas y tuberías, dados para acuñar, boquillas para brocas, mandriles y mordazas, centros de torno, rodamientos, cuchillas para plástico, moldes para plásticos de tamaño mediano y mediana producciones.

ANEXOS

10. RESULTADOS

10.1 GENERALIDADES

Para cada uno de los aceros seleccionados tomamos cinco muestras por ensayo, tanto térmico como mecánico.

La preparación para ensayos mecánicos se realizó según las normas que exige el equipo.

Las probetas para observación metalográfica se prepararon pasando por las siguientes etapas:

- Desbaste, pulido con lijas 240, 320, 400 y 600. El acabado con paño rojo impregnado con alúmina de 3 micrones y posteriormente alúmina de 0,05 micrones.

- El ataque se realizó con nital al 2% en los siguientes aceros: 1010, 1016, 12L14, 4140 y 8615; ataque electrolítico con ácido oxálico al 10% en agua para los 304 y 420 modificado y Picral al 2% para atacar la fundición.
- Los resultados metalográficos se encuentran en el álbum adjunto con la descripción de la microestructura presente y demás características.

10.2. RESULTADOS DEL ENSAYO JOMINY

En los siguientes cuadros se detallará la templabilidad de cada probeta tomada como muestra de los aceros ensayados.

Cuadro 13. Templabilidad del AISI/SAE 1010

DISTANCIA AL EXTREMO TEMPLADO (1/16")	TEMPLE	
	DUREZA (ROCKWELL C)	
	LADO 1	LADO 2
1	22	22
2	22	22
3	21	22
4	21	21
5	21	21
6	21	20
7	20	20
8	20	20
9	20	20
10	20	18
11	20	20
12	18	20
13	20	20
14	20	18
15	18	20
16	20	20

Cuadro 14. Templabilidad del AISI/SAE 1016

DISTANCIA AL EXTREMO TEMPLADO (1/16")	TEMPLE	
	DUREZA (ROCKWELL C)	
	LADO 1	LADO 2
1	27	27
2	27	27
3	27	27
4	25	25
5	26	26
6	25	25
7	24	25
8	24	24
9	24	24
10	24	24
11	24	24
12	24	24
13	24	24
14	24	24
15	24	24
16	24	24

Cuadro 15. Templabilidad del AISI/SAE 1040

DISTANCIA AL EXTREMO TEMPLADO (1/16")	TEMPLE		BONIFICADO	
	DUREZA (ROCKWELL C)		DUREZA (ROCKWELL C)	
	LADO 1	LADO 2	LADO 1	LADO 2
1	60	61	56	54
2	57	56	45	47
3	53	53	30	31
4	36	36	28	26
5	34	33	26	26
6	32	31	24	23
7	30	29	23	23
8	28	28	23	22
9	28	27	22	22
10	26	27	21	21
11	26	26	20	20
12	25	25	19	20
13	24	25	19	19
14	24	24	18	18
15	23	23	17	17
16	22	22	16	16

Cuadro 16. Templabilidad del AISI/SAE 8615

DISTANCIA AL EXTREMO TEMPLADO (1/16")	TEMPLE	
	DUREZA (ROCKWELL C)	
	LADO 1	LADO 2
1	36	36
2	36	36
3	34	35
4	32	31
5	26	27
6	27	27
7	26	26
8	27	27
9	27	27
10	26	26
11	27	27
12	27	27
13	27	27
14	27	26
15	26	26
16	26	26

Cuadro 17. Templabilidad del AISI/SAE 12L14

DISTANCIA AL EXTREMO TEMPLADO (1/16")	TEMPLE	
	DUREZA (ROCKWELL C)	
	LADO 1	LADO 2
1	22	22
2	22	22
3	22	22
4	21	21
5	20	20
6	20	20
7	18	18
8	18	18
9	16	16
10	16	16
11	16	16
12	16	16
13	16	16
14	16	16
15	16	16
16	16	16

Cuadro 18. Templabilidad del AISI/SAE 4140

DISTANCIA AL EXTREMO TEMPLADO (1/16")	TEMPLE		BONIFICADO	
	DUREZA (ROCKWELL C)		DUREZA (ROCKWELL C)	
	LADO 1	LADO 2	LADO 1	LADO 2
1	60	60	53	54
2	60	60	53	53
3	60	60	52	52
4	59	60	52	52
5	59	59	51	52
6	58	59	50	51
7	58	58	48	49
8	58	57	47	47
9	56	56	46	45
10	56	56	43	44
11	56	55	41	41
12	55	55	39	40
13	54	54	38	38
14	54	54	36	37
15	53	54	35	36
16	53	53	35	35

Cuadro 19. Templabilidad del AISI/SAE 304

DISTANCIA AL EXTREMO TEMPLADO (1/16")	TEMPLE	
	DUREZA (ROCKWELL C)	
	LADO 1	LADO 2
1	25	25
2	25	25
3	25	25
4	24	23
5	23	23
6	23	22
7	23	23
8	23	23
9	23	23
10	23	22
11	23	23
12	22	23
13	23	23
14	22	23
15	23	22
16	23	23

Cuadro 20. Templabilidad del AISI/SAE 420 Modificado

DISTANCIA AL EXTREMO TEMPLADO (1/16")	TEMPLE		BONIFICADO	
	DUREZA (ROCKWELL C)		DUREZA (ROCKWELL C)	
	LADO 1	LADO 2	LADO 1	LADO 2
1	32	33	26	26
2	32	33	26	26
3	32	32	26	26
4	31	31	26	25
5	30	31	25	25
6	30	30	24	24
7	30	29	22	22
8	28	28	22	22
9	28	28	22	22
10	28	27	22	21
11	27	27	21	21
12	24	24	21	21
13	22	22	21	21
14	20	20	20	20
15	20	20	20	20
16	20	20	18	20

Cuadro 21. Templabilidad del AISI/SAE DF-2

DISTANCIA AL EXTREMO TEMPLADO (1/16")	TEMPLE		BONIFICADO	
	DUREZA (ROCKWELL C)		DUREZA (ROCKWELL C)	
	LADO 1	LADO 2	LADO 1	LADO 2
1	65	65	53	53
2	65	65	53	53
3	65	65	53	53
4	65	65	52	53
5	64	65	52	52
6	64	64	50	51
7	63	64	49	50
8	63	63	49	49
9	63	63	49	49
10	62	62	47	47
11	62	61	46	46
12	60	59	46	46
13	60	59	46	45
14	60	59	44	44
15	58	59	43	43
16	58	58	42	42

10.3 RESULTADOS DEL ENSAYO DE TENSIÓN

En los siguientes cuadros se detallarán ciertas características mecánicas de las probetas tomadas como muestras de los aceros ensayados.

Cuadro 22. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 1010

NORMALIZADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
42,2	28,1	25,8	40,8
40,9	27,3	26,7	41,7
41,6	27,9	26,2	41,1
43,9	28,8	25,1	40,2
PROMEDIO			
42,15	28,025	25,95	40,95

CEMENTADO Y TEMPLADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
58,6	40,8	21,7	40,6
57,2	40,3	22,3	41,1
59,9	41,6	21,2	40,1
61,3	42,1	20,8	39,8
PROMEDIO			
59,25	41,2	21,5	40,4

Cuadro 23. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 1016

NORMALIZADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
42,8	22,1	25,1	50,9
43,1	22,9	24,8	51,3
41,6	21,6	25,9	50,6
43,7	23,2	24,6	51,7
PROMEDIO			
42,8	22,45	25,1	51,125

CEMENTADO Y TEMPLADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
60,6	41,7	21,1	48,6
63,7	43,1	20,5	50,3
62,1	42,3	20,9	49,2
64,2	43,7	20,1	50,6
PROMEDIO			
62,65	42,7	20,65	49,675

Cuadro 24. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 1040

NORMALIZADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
76,5	36,3	16,8	46,4
70,2	34,9	17,5	45,7
69,8	34,2	17,9	45,1
74,7	35,4	17,1	46,1
PROMEDIO			
72,8	35,2	17,325	45,825

BONIFICADO (POST-CEMENTACION)			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
86,3	47,1	17,3	51,8
80,2	45,6	19,7	50,3
83,2	46,3	18,4	51,2
81,7	46	19,1	50,8
PROMEDIO			
82,85	46,25	18,625	51,025

Cuadro 25. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 8615

NORMALIZADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
66,2	35,6	22,6	40,2
68,7	37,3	20,6	42,3
67,2	36,3	21,9	41,1
68,1	36,9	21	41,7
PROMEDIO			
67,55	36,525	21,525	41,325

CEMENTADO Y TEMPLADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
99,7	62	11,6	36,8
96,5	60,2	13	35,1
98,3	61	12,3	35,8
99,1	61,4	11,8	36,4
PROMEDIO			
98,4	61,15	12,175	36,025

Cuadro 26. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 12L14

NORMALIZADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
40,2	26	24,3	47,6
42,6	27,2	25,6	48,7
41,7	26,7	24,8	48
42,1	27,6	25,1	48,3
PROMEDIO			
41,65	26,875	24,95	48,15

CEMENTADO Y TEMPLADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
55	42,3	12,2	35,3
55,9	43,8	10,8	36,3
55,2	42,9	11,7	35,9
56,1	44,6	10,2	31
PROMEDIO			
55,55	43,4	11,225	34,625

Cuadro 27. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 4140

NORMALIZADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
80,2	61,6	18,2	47
83,1	62,3	16,8	48
81,3	62	17,1	47,6
80,6	61,8	17,9	47,1
PROMEDIO			
81,3	61,925	17,5	47,425

RECOCIDO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
70	40,3	24,1	50,3
72,1	41,9	24,8	51,2
71,3	41,1	24,2	50,9
72	41,7	24,7	51,1
PROMEDIO			
71,35	41,25	24,45	50,875

BONIFICADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
99,7	75,2	15,3	45,2
100,6	76,1	14,2	46,3
100,3	75,9	14,4	46,1
100,1	76	14,7	45,9
PROMEDIO			
100,175	75,8	14,65	45,875

Cuadro 28. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 304

NORMALIZADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
70,8	35,7	27,3	52,3
72,3	36,8	26,1	53,4
73,1	37,1	25,2	53,8
71,6	36,2	26,8	52,9
PROMEDIO			
71,95	36,45	26,35	53,1

RECOCIDO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
61,3	27,2	61,8	71,7
58,2	25,4	60,2	70,3
59,2	26,1	60,8	70,8
60,1	26,8	61,3	71,1
PROMEDIO			
59,7	26,375	61,025	70,975

Cuadro 29. Propiedades mecánicas del AISI/SAE 420 Modificado

NORMALIZADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
65,2	45,8	25,9	60,8
64,8	45,3	26,2	60,1
66,7	46,4	25,7	61,3
67	46,8	25,4	61,9
PROMEDIO			
65,925	46,075	25,8	61,025

BONIFICADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
80,3	50,1	14,1	48,3
83,4	52,2	13,2	50,5
81,2	50,7	14,1	48,9
81,8	51,1	13,8	49,2
PROMEDIO			
81,675	51,025	13,8	49,225

Cuadro 30. Propiedades mecánicas del AISI/SAE DF-2

NORMALIZADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
158,1	135,1	0,1	0,1
156,4	133,6	0,1	0,1
157,6	134,2	0,1	0,1
157,3	133,9	0,1	0,1
PROMEDIO			
157,35	134,2	0,1	0,1

RECOCIDO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
85	72,8	3,8	8,2
86,3	73,6	3	9,1
87,1	74,1	2,8	9,3
85,7	73,2	3,6	8,7
PROMEDIO			
86,025	73,425	3,3	8,825

BONIFICADO			
RESISTENCIA A TENSION (Kg/mm ²)	LIMITE ELASTICO (Kg/mm ²)	ALARGAMIENTO %	REDUCC. AREA %
194,1	177,1	0,1	0,1
196,7	178,8	0,1	0,1
195,2	177,8	0,1	0,1
196,3	178,3	0,1	0,1
PROMEDIO			
195,575	178	0,1	0,1

10.4. CONDICIONES DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS

En las siguientes páginas se describirán las pautas que se siguieron para realizar los tratamientos térmicos.

Cuadro 31. Condiciones para tratamientos térmicos del AISI/SAE 1010

	RECOCIDO	NORMALIZADO	CEMENTACION + TEMPLE	REVENIDO
TEMPERATURA DE TRATAMIENTO (C)	950	950	900	180
TIEMPO DE SOSTENIMIENTO A TEMP. DE TRATAMIENTO (MIN)	10	10	120	60
MEDIO DE ENFRIAMIENTO	HORNO	AIRE QUIETO	AGUA	AIRE

Cuadro 32. Condiciones para tratamientos térmicos del AISI/SAE 1016

	RECOCIDO	NORMALIZADO	CEMENTACIÓN + TEMPLE	REVENIDO
TEMPERATURA DE TRATAMIENTO (C)	900	900	900	200
TIEMPO DE SOSTENIMIENTO A TEMP. DE TRATAMIENTO (MIN)	10	10	120	60
MEDIO DE ENFRIAMIENTO	HORNO	AIRE QUIETO	AGUA	AIRE

Cuadro 33. Condiciones para tratamientos térmicos del AISI/SAE 1040

	RECOCIDO	NORMALIZADO	CEMENTACION + TEMPLE	REVENIDO
TEMPERATURA DE TRATAMIENTO (C)	880	880	880	500
TIEMPO DE SOSTENIMIENTO A TEMP. DE TRATAMIENTO (MIN)	10	10	120	60
MEDIO DE ENFRIAMIENTO	HORNO	AIRE QUIETO	AGUA	AIRE

Cuadro 34. Condiciones para tratamientos térmicos del AISI/SAE 12L14

	RECOCIDO	NORMALIZADO	CEMENTACIÓN + TEMPLE	REVENIDO
TEMPERATURA DE TRATAMIENTO (C)	930	930	930	200
TIEMPO DE SOSTENIMIENTO A TEMP. DE TRATAMIENTO (MIN)	10	10	120	60
MEDIO DE ENFRIAMIENTO	HORNO	AIRE QUIETO	ACEITE	AIRE

Cuadro 35. Condiciones para tratamientos térmicos del AISI/SAE 8615

	RECOCIDO	NORMALIZADO	CEMENTACIÓN + TEMPLE	REVENIDO
TEMPERATURA DE TRATAMIENTO (C)	920	920	920 *	200
TIEMPO DE SOSTENIMIENTO A TEMP. DE TRATAMIENTO (MIN)	10	10	120	60
MEDIO DE ENFRIAMIENTO	HORNO	AIRE QUIETO	ACEITE	AIRE

* Después de durar 120 minutos a 920°C se deja enfriar en el horno. Luego se vuelve a calentar hasta 780°C durante 10 minutos y se enfría en aceite para evitar descascaramientos.

Cuadro 36. Condiciones para tratamientos térmicos del AISI/SAE 4140

	RECOCIDO	NORMALIZADO	TEMPLE	REVENIDO
TEMPERATURA DE TRATAMIENTO (C)	870	870	870	550
TIEMPO DE SOSTENIMIENTO A TEMP. DE TRATAMIENTO (MIN)	10	10	10	60
MEDIO DE ENFRIAMIENTO	HORNO	AIRE QUIETO	ACEITE	AIRE

Cuadro 37. Condiciones para tratamientos térmicos del AISI/SAE DF-2

	RECOCIDO	NORMALIZADO	TEMPLE	REVENIDO
TEMPERATURA DE TRATAMIENTO (C)	820	820	820	250
TIEMPO DE SOSTENIMIENTO A TEMP. DE TRATAMIENTO (MIN)	20	20	10	60
MEDIO DE ENFRIAMIENTO	HORNO	AIRE QUIETO	ACEITE (180 C)	AIRE

Cuadro 38. Condiciones para tratamientos térmicos del AISI/SAE 304

	RECOCIDO	NORMALIZADO	TEMPLE	REVENIDO
TEMPERATURA DE TRATAMIENTO (C)	1100	1150	1100	400
TIEMPO DE SOSTENIMIENTO A TEMP. DE TRATAMIENTO (MIN)	10	10	120	60
MEDIO DE ENFRIAMIENTO	HORNO	AIRE QUIETO	ACEITE	AIRE

Cuadro 39. Condiciones para tratamientos térmicos del AISI/SAE 420 Mod.

	RECOCIDO	NORMALIZADO	TEMPLE	REVENIDO
TEMPERATURA DE TRATAMIENTO (C)	1050	1050	1000	350
TIEMPO DE SOSTENIMIENTO A TEMP. DE TRATAMIENTO (MIN)	10	10	120	60
MEDIO DE ENFRIAMIENTO	HORNO	AIRE QUIETO	ACEITE A 500 C	AIRE

10.5. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA

En los siguientes cuadros se encuentran los resultados obtenidos para cada acero :

Cuadro 40. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 1010

	CARGA (Kg/mm ²)	CICLOS
NORMALIZADO	30	29725
CEMENTADO Y TEMPLADO	45	36310

Cuadro 41. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 1016

	CARGA (Kg/mm ²)	CICLOS
NORMALIZADO	30	42046
CEMENTADO + TEMPLADO + REVENIDO	46	69277

Cuadro 42. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 1040

	CARGA (Kg/mm ²)	CICLOS
NORMALIZADO	55	387890
CEMENTADO + TEMPLADO + REVENIDO	62	496211

Cuadro 43. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 12L14

	CARGA (Kg/mm ²)	CICLOS
NORMALIZADO	30	24129
CEMENTADO + TEMPLADO + REVENIDO	40	20977

Cuadro 44. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 8615

	CARGA (Kg/mm ²)	CICLOS
NORMALIZADO	50	498645
CEMENTADO + TEMPLADO + REVENIDO	70	619427

Cuadro 45. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 4140

	CARGA (Kg/mm ²)	CICLOS
NORMALIZADO	60	857428
RECOCIDO	50	743376
TEMPLADO Y REVENIDO	75	968107

Cuadro 46. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE DF-2

	CARGA (Kg/mm ²)	CICLOS
NORMALIZADO	120	2.488.751
RECOCIDO	65	1.238.642
TEMPLADO Y REVENIDO	145	2.892.141

Cuadro 47. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 304

	CARGA (Kg/mm ²)	CICLOS
NORMALIZADO	55	727046
RECOCIDO	45	672945

Cuadro 48. Resultados del ensayo de fatiga del AISI/SAE 420 Mod.

	CARGA (Kg/mm ²)	CICLOS
NORMALIZADO	50	842116
TEMPLADO Y REVENIDO	60	918143

11. CONCLUSIONES

11.1 GENERALIDADES

Analizando el conjunto de los resultados obtenidos podemos agrupar a los aceros de la siguiente forma :

- Los que no sufren modificación apreciable por efecto del tratamiento térmico. Tenemos el AISI/SAE 1010, 1016, 8615, 12L14 y el 304, además, el AISI/SAE 1040 (ligero incremento de la dureza).
- Los que se modifican por efecto del tratamiento térmico. En este grupo se encuentran el AISI/SAE 4140, 420 Mod., DF-2.

Dentro del primer grupo encontramos cinco que mediante la cementación se incrementa la dureza superficial hasta cierta profundidad cuyo espesor crece directamente proporcional al porcentaje de carbono y es ampliamente mejorado con el uso de elementos de aleación tal como ocurre en el AISI/SAE 8615.

El acero AISI/SAE 12L14 permite cementación pero se fragiliza.

Los del segundo grupo nos encontramos un acero de baja aleación - AISI/SAE 4140 - con un porcentaje de carbono semejante al AISI/SAE 1040 pero el hecho de estar aleado modifica substancialmente el incremento en su dureza y su resistencia. El anterior, comparado con el AISI/SAE DF-2 que es un acero de alto contenido de carbono aleado, queda por debajo de

los valores de dureza y resistencia obtenidos con el DF-2. El AISI/SAE 420 Modificado es un acero de la serie inoxidable que pasa a estado martensítico permitiendo así, en su estado recocido, una buena maquinabilidad.

11.2 ASPECTOS ECONÓMICOS

Si queremos elegir un acero con cierta dureza superficial que prime sobre las otras necesidades, el acero ideal sería el 1040 y no el 1010 ó el 1016, ya que estos presentan menor profundidad de la dureza superficial y tienen un mismo costo.

En el momento de elegir un acero de gran maquinabilidad el recomendado sería el 12L14 pero hay que comparar rendimiento y costo porque es el doble de costoso que el 1010, 1016 y 1040.

Cuando la exigencia es de una superficie exterior de gran dureza y un corazón blando recurriremos al 8615, pero si la exigencia es únicamente resistencia, es más económico el 4140.

Cuando las condiciones requeridas son de resistencia a la corrosión el más económico el 304 pero sacrificamos el poder modificar la estructura, lo cual si lo conseguiremos con el 420 Modificado.

Después de analizar las microestructuras obtenidas y los resultados de resistencia se justifica el auge en el uso del 4140, lo cual se puede volver peligroso cuando estamos fabricando piezas de grane diámetros, ya que la penetración del temple tiene un límite y de allí que se haya diseñado el 4340.

No es frecuente encontrar el 12L14 como materia prima para la fabricación de elementos mecanizados y esto en parte se debe al desconocimiento de su existencia y los que lo conocen se alejan por su alto costo sin hacer un análisis del valor maquina-herramienta / producción.

11.3 NORMALIZADO

En las microfotografías observadas están presentes las microestructuras definidas en la zona del diagrama para esas temperaturas y velocidades de enfriamiento, pero no tienen la misma homogeneidad en el centro y en la periferia. Las zonas periféricas tienen mayor concentración de la microestructura dura que la central.

11.4 RECOCIDO

Los resultados de las microfotografías nos muestran una distribución más homogénea de los constituyentes presentes. No hay diferencia notable entre periferia y centro.

11.5 TEMPLE

Observamos que las microestructuras de mayor dureza a menor dureza van de la periferia al centro, y si el acero es aleado (para favorecer el temple), los de mayor dureza se acercan más al centro que en los de baja aleación.

11.6 CEMENTACIÓN

A medida que el porcentaje de carbono se incrementó, se aumenta el espesor de la capa cementada para un mismo tiempo de permanencia.

Con la aplicación de un bonificado se mejora la resistencia de la interfase ya que el paso de microestructura dura a blanda se hace más gradual y no brusco. Un material cementado y templado únicamente puede presentar tendencia al descascaramiento al recibir un impacto.

11.7 ENSAYO JOMINY

Los datos obtenidos nos dan una aproximación para elegir según el espesor de la pieza a trabajar que clase de acero nos conviene más, dependiendo de la relación dureza y fragilidad. Al hacer el revenido a la probeta Jominy templada (bonificado) se disminuye la dureza pero se mejora la tenacidad.

En una de las microfotografías tomada a la probeta 1040 observamos como paulatinamente vamos pasando de material duro a blando a medida que nos vamos alejando del extremo enfriado de la probeta.

11.8 FUNDICIÓN

A manera de información y con el fin de mostrar la gran diferencia en las estructuras cristalinas de acero y fundición incluimos microfotografías típicas de las fundiciones (gris y blanca).

11.9 MICRODUREZA

Este ensayo nos permitió ver (profundidad de la huella) y determinar la dureza en cada una de las zonas (zona cementada, interfase y metal base). Por este método somos capaces de determinar con exactitud cuanta dureza posee la zona exterior y hasta que profundidad llega con esa dureza. En la microfotografía observamos que a medida que nos acercamos al centro la huella dejada (rombo oscuro) va aumentando.

11.10 ATAQUE QUÍMICO

Todas las probetas, a excepción de la 304 y 420 Modificado, se atacaron poniendo la muestra en contacto directo con la solución, ya que estos aceros son susceptibles a la corrosión. A los dos anteriores por sus características de inoxidables fue necesario aplicarles a la solución corriente (ataque electrolítico) para poder observar la microestructura presente.

11.11 ENSAYO DE TENSIÓN

El AISI/SAE 4140 Normalizado es adecuado para utilizar en ejes sometidos a torsión debido a su gran resistencia y gran ductilidad.

Si bien el AISI/SAE 1040 Normalizado y el 304 Normalizado tienen valores de resistencia a la tracción y porcentaje de reducción de área similares, sus precios en el mercado es la gran diferencia.

El DF-2 es ideal para herramientas de corte (troqueles, punzones y cuchillas debido a su alta resistencia y deformabilidad casi nula. Su mecanizado se facilita en estado recocido.

Al aumentar la resistencia se reduce la deformación (porcentaje de alargamiento y porcentaje de reducción de área) y solamente con la adición de elementos de aleación se disminuye la variación.

12. RECOMENDACIONES

Para los aceros AISI/SAE 8615, DF-2, 420 MODIFICADO y 12L14 es necesario compararlos con los equivalentes a cada uno de ellos según su fabricante.

En la cementación, variar con dos o tres tipos de productos cementantes, para un mismo acero y un mismo tiempo de tratamiento, y analizar la penetración y dureza obtenidas.

En el temple estudiar aceros de una misma familia (porcentaje de carbono parecido) y medir su templabilidad para un mismo espesor de probeta de tratamiento.

En el normalizado y el recocido mirar que tanto influye la temperatura exterior del sitio donde se realizan los tratamientos térmicos (clima frío, caliente, etc.).

El estudio de la resistencia y fatiga amerita un gran número de ensayos para así aplicar ciertos conceptos estadísticos (campana de Gauss) y poder decir con cierta certeza que el resultado obtenido es prenda de garantía.

Seguir incrementando el atlas metalográfico con otras clases de aceros.

Investigar aceros que permitan tratamientos isotérmicos, nitruración, temple por inducción, etc.

Al tener formas irregulares las piezas a temprar es necesario hacer un precalentamiento a las siguientes temperaturas :

- Temperaturas de temple inferiores a 925°C, precalentar entre 650 y 740°C.
- Temperaturas de temple entre 925 y 1100°C precalentar entre 675 y 740°C.
- Temperaturas de temple superiores a 1100°C precalentar entre 815 y 870°C.
- El estudio de tensión amerita otra investigación en lo que se refiere a materiales sometidos a una carga bajo una temperatura mayor a la temperatura ambiente. (ensayo creep).

•

