



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS DE TENSIÓN,
COMPRESIÓN Y DUREZA SEGÚN NORMA ASTM APLICADOS AL HIERRO
FUNDIDO A48**

Marlon Otoniel Ramírez Cardona

Asesorado por el Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández

Guatemala, febrero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS DE TENSIÓN,
COMPRESIÓN Y DUREZA SEGÚN NORMA ASTM APLICADOS AL HIERRO
FUNDIDO A48**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARLON OTONIEL RAMÍREZ CARDONA
ASESORADO POR EL ING. VÍCTOR MANUEL RUIZ HERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL I | Ing. Angel Roberto Sic García |
| VOCAL II | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III | Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa |
| VOCAL IV | Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez |
| VOCAL V | Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| EXAMINADOR | Ing. José Ismael Véliz Padilla |
| EXAMINADOR | Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández |
| EXAMINADOR | Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza |
| SECRETARIO | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez (a. i.) |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS DE TENSIÓN, COMPRESIÓN Y DUREZA SEGÚN NORMA ASTM APLICADOS AL HIERRO FUNDIDO A48

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 21 de agosto de 2015.

Marlon Otoniel Ramírez Cardona

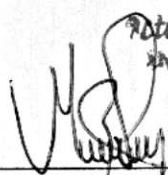
Guatemala, 18 de Agosto de 2016

Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director Escuela Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Por este medio le doy a conocer que la revisión que he realizado del trabajo de graduación del estudiante Marlon Otoniel Ramírez Cardona, con el número de carné universitario 201213302, titulado "TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS DE TENSIÓN, COMPRESIÓN Y DUREZA SEGÚN NORMA ASTM APLICADOS AL HIERRO FUNDIDO A48", se ha concluido satisfactoriamente.

Agradeciendo la atención prestada, atentamente


Doctor Manuel Ruiz Hernández
INGENIERO MECANICO
COLEGIADO 4620

Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández
Asesor
Número de colegiado 4620



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.265.2016

El Coordinador del Área de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS DE TENSIÓN, COMPRESIÓN Y DUREZA SEGÚN NORMA ASTM APLICADOS AL HIERRO FUNDIDO A48** desarrollado por el estudiante **Marlon Otoniel Ramírez Cardona**, carné **2012-13302** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador Área de Materiales
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, septiembre 2016



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.044.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área de Materiales del trabajo de graduación titulado: **TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS DE TENSIÓN, COMPRESIÓN Y DUREZA SEGÚN NORMA ASTM APLICADOS AL HIERRO FUNDIDO A48** del estudiante **Marlon Otoniel Ramírez Cardona, CUI 1800-47930-0101, Registro Académico No. 201213302** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz

Director

Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, febrero de 2017

/aej

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.072.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS DE TENSIÓN, COMPRESIÓN Y DUREZA SEGÚN NORMA ASTM APLICADOS AL HIERRO FUNDIDO A48**, presentado por el estudiante universitario: **Marlon Otoniel Ramírez Cardona**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, febrero de 2017

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|--------------------------|---|
| Dios | Por darme sabiduría, fortaleza y bendecirme siempre en la vida. |
| Mis padres | Gladys Cardona y Hotoniel Ramírez, gracias por su amor, apoyo incondicional y ser pilar fundamental en mi vida. |
| Mis hermanos | Meybelin, Misael y Naomy Ramírez Cardona, por sus consejos y apoyo moral. |
| Mi abuela | Eufemia Pérez, por ser un ángel en mi vida. |
| Mis sobrinos | José Guillermo y Sebastián Enrique Gómez Ramírez, personas importantes en mi vida. |
| José Gómez | Por ser un ejemplo a seguir. |
| Adriana de Santis | Gracias, por el cariño brindado por muchos años. |

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|--|---|
| Facultad de Ingeniería | Por brindarme los conocimientos para formarme profesionalmente. |
| Mis amigos | Por la amistad durante tantos años William Morales, Héctor Godoy, Flor Aldana, y Claudia Teque. |
| Erick Gallina | Por ser un amigo incondicional. |
| Mis amigos de la Facultad | Selvin Ballesteros, Renato Reyes, Lester Jeronimo, William Surque, Víctor Donis, Ricardo Aguilar, Javier Ramírez y Byron Pérez, por los consejos, apoyo siempre y alegrías compartidas. |
| Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández | Por los conocimientos y asesoría brindada. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | IX |
| GLOSARIO | XI |
| RESUMEN..... | XIII |
| OBJETIVOS..... | XV |
| INTRODUCCIÓN | XVII |
| | |
| 1. HIERRO FUNDIDO | 1 |
| 1.1. Hierro fundido | 1 |
| 1.2. Tipos de hierro fundido | 3 |
| 1.2.1. Fundición gris | 3 |
| 1.2.1.1. Ferrítica | 6 |
| 1.2.1.2. Perlítica..... | 7 |
| 1.2.1.3. Perlítica/ferrítica | 8 |
| 1.2.2. Fundición nodular | 8 |
| 1.2.2.1. Ferrítica | 9 |
| 1.2.2.2. Perlítica..... | 10 |
| 1.2.2.3. Austemplado..... | 11 |
| 1.2.3. Fundición blanca..... | 13 |
| 1.2.4. Fundición maleable..... | 14 |
| 1.2.5. Fundición aleada | 16 |
| 1.2.5.1. De baja y media aleación | 17 |
| 1.2.5.2. De alta resistencia a la tensión | 18 |
| 1.2.5.3. Martensíticas resistentes al desgaste.. | 18 |
| 1.2.5.4. Resistentes al calor | 19 |

| | | | |
|------|----------|--|----|
| | 1.2.5.5. | Aleadas con aluminio | 20 |
| 1.3. | | Microconstituyentes de las fundiciones | 20 |
| 1.4. | | Propiedades y característica de las fundiciones grises | 23 |
| | 1.4.1. | Influencia del grafito en las propiedades de la fundición gris | 23 |
| | 1.4.2. | Propiedades generales de las fundiciones grises ... | 24 |
| 1.5. | | Formas de grafito en las fundiciones..... | 27 |
| | 1.5.1. | Grafito laminar..... | 27 |
| | 1.5.2. | Grafito esferoidal | 27 |
| | 1.5.3. | Grafito nodular..... | 28 |
| | 1.5.4. | Grafito vermicular | 29 |
| 2. | | TRATAMIENTOS TÉRMICOS A LAS FUNDICIONES | 31 |
| 2.1. | | Diagrama T.T.T. para las fundiciones grises..... | 31 |
| 2.2. | | Tratamientos térmicos a las fundiciones grises..... | 33 |
| | 2.2.1. | Recocido | 33 |
| | | 2.2.1.1. Recocido de eliminación de tensiones | 33 |
| | | 2.2.1.2. Recocido de ablandamiento | 34 |
| | 2.2.2. | Normalizado | 37 |
| | 2.2.3. | Temple y revenido..... | 38 |
| | | 2.2.3.1. Temple | 39 |
| | | 2.2.3.2. Revenido | 40 |
| | 2.2.4. | Temple en caliente | 41 |
| | 2.2.5. | Endurecimiento superficial | 41 |
| | | 2.2.5.1. Temple a la llama | 42 |
| | | 2.2.5.2. Temple por inducción | 43 |
| 3. | | ENSAYOS DE MATERIALES..... | 45 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3.1. | Ensayos destructivos..... | 45 |
| 3.1.1. | Ensayos estáticos..... | 46 |
| 3.1.1.1. | Dureza | 46 |
| 3.1.1.2. | Tensión..... | 60 |
| 3.1.1.3. | Compresión | 63 |
| 3.1.1.4. | Flexión | 66 |
| 3.1.2. | Ensayos dinámicos..... | 67 |
| 3.1.2.1. | Desgaste..... | 68 |
| 3.1.2.2. | Fatiga..... | 70 |
| 3.1.2.3. | Impacto (<i>Charpy</i>) | 72 |
| 3.1.3. | Ensayos tecnológicos | 75 |
| 3.1.3.1. | Soldabilidad | 76 |
| 3.1.3.2. | Templabilidad | 77 |
| 3.1.3.3. | Maquinabilidad..... | 80 |
| 3.2. | Ensayos no destructivos..... | 81 |
| 3.2.1. | Superficiales | 82 |
| 3.2.1.1. | Inspección visual | 82 |
| 3.2.1.2. | Líquidos penetrantes | 83 |
| 3.2.1.3. | Partículas magnéticas | 85 |
| 3.2.2. | Volumétricos..... | 87 |
| 3.2.2.1. | Ultrasonido..... | 88 |
| 3.2.2.2. | Radiografía industrial..... | 90 |
| 3.3. | Equipos para realizar ensayos de materiales | 91 |
| 3.3.1. | Máquina universal de ensayos de materiales | 92 |
| 3.3.2. | Durómetro..... | 94 |
| 3.3.3. | Máquina de impacto | 96 |
| 4. | ENSAYO EXPERIMENTAL..... | 99 |
| 4.1. | Maquinado de probetas según norma ASTM | 99 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.1.1. | Maquinado de probeta para ensayo de tensión | 99 |
| 4.1.2. | Maquinado de probeta para ensayo de compresión..... | 100 |
| 4.1.3. | Maquinado de probeta para ensayo de dureza | 102 |
| 4.2. | Tratamiento térmico a las probetas..... | 103 |
| 4.2.1. | Temple | 103 |
| 4.2.2. | Revenido | 106 |
| 4.3. | Ensayos destructivos | 108 |
| 4.3.1. | Ensayo de tensión..... | 108 |
| 4.3.2. | Ensayo de compresión..... | 109 |
| 4.3.3. | Ensayo de dureza | 110 |
| 4.4. | Preparación de las probetas para estudio metalográfico | 112 |
| 5. | RESULTADOS DE LOS ENSAYOS | 115 |
| 5.1. | Resultados del ensayo de tensión | 115 |
| 5.2. | Resultado del ensayo de compresión | 117 |
| 5.3. | Resultado del ensayo de dureza..... | 118 |
| 5.4. | Resultado del estudio metalográfico | 119 |
| | CONCLUSIONES..... | 121 |
| | RECOMENDACIONES | 123 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 125 |
| | APÉNDICES..... | 127 |
| | ANEXOS..... | 133 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Diagrama hierro- carburo de hierro | 2 |
| 2. | Microestructura fundición gris | 4 |
| 3. | Tipos de hojuelas según ASTM A247 100X..... | 5 |
| 4. | Microestructura fundición gris ferrítica..... | 6 |
| 5. | Microestructura fundición gris perlítica | 7 |
| 6. | Microestructura fundición gris perlítica/ferrítica | 8 |
| 7. | Microestructura fundición nodular ferrítica | 10 |
| 8. | Microestructura fundición nodular perlítica 500X | 11 |
| 9. | Microestructura fundición (ADI), clase 4 según clasificación ASTM..... | 13 |
| 10. | Microestructura fundición blanca..... | 14 |
| 11. | Microestructura fundición maleable I..... | 16 |
| 12. | Grafito laminar..... | 27 |
| 13. | Grafito esferoidal..... | 28 |
| 14. | Grafito nodular | 29 |
| 15. | Grafito vermicular..... | 30 |
| 16. | Diagrama T.T.T para una fundición gris..... | 32 |
| 17. | Influencia por el temple y revenido en las propiedades mecánicas de una fundición gris | 40 |
| 18. | Probeta para la dureza Martens..... | 47 |
| 19. | Huella en ensayo Brinell..... | 50 |
| 20. | Huella en ensayo Vickers..... | 53 |
| 21. | Ensayo Rockwell con cono | 56 |
| 22. | Escalas de dureza Rockwell | 57 |
| 23. | Diagrama del ensayo de Poldi | 58 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 24. | Huella de ensayo Knoop..... | 60 |
| 25. | Diagrama esfuerzo-deformación..... | 61 |
| 26. | Ensayo de tensión | 63 |
| 27. | Ensayo de compresión | 64 |
| 28. | Probetas ensayo de compresión..... | 65 |
| 29. | Ensayo de flexión..... | 66 |
| 30. | Máquina de ensayo de desgaste | 68 |
| 31. | Ensayo de fatiga | 71 |
| 32. | Ensayo de impacto | 73 |
| 33. | Diferencias entre Izod y Charpy..... | 73 |
| 34. | Probetas normalizadas | 74 |
| 35. | Ensayo de Jominy..... | 78 |
| 36. | Mecanización de pieza de hierro fundido..... | 80 |
| 37. | Ensayo por líquidos penetrantes..... | 84 |
| 38. | Ensayo por partículas magnéticas | 86 |
| 39. | Ensayo por ultrasonido | 89 |
| 40. | Ensayo por radiografía industrial | 90 |
| 41. | Máquina universal de ensayos..... | 92 |
| 42. | Penetrador de diamante | 95 |
| 43. | Durómetro digital..... | 96 |
| 44. | Máquina de impacto..... | 98 |
| 45. | Probeta para ensayo de tensión ASTM E8..... | 99 |
| 46. | Mecanización probeta ensayo de tensión..... | 100 |
| 47. | Tipos de probetas para ensayo de compresión | 101 |
| 48. | Mecanización probeta ensayo de compresión | 101 |
| 49. | Probeta para el ensayo de dureza | 102 |
| 50. | Horno eléctrico para temple | 103 |
| 51. | Enfriamiento brusco en aceite | 105 |
| 52. | Gráfica de permanencia del temple | 106 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 53. | Horno para revenido..... | 107 |
| 54. | Gráfica de permanencia del revenido..... | 108 |
| 55. | Ensayo de tensión..... | 109 |
| 56. | Ensayo de compresión..... | 110 |
| 57. | Ensayo de dureza | 111 |
| 58. | Probeta atacada con nital..... | 113 |
| 59. | Gráfica esfuerzo-deformación | 116 |
| 60. | Microestructura de un hierro fundido gris templado y revenido | 119 |

TABLAS

| | | |
|------|---|-----|
| I. | Propiedades mecánicas fundición nodular ADI | 12 |
| II. | Contracción durante la solidificación | 25 |
| III. | Práctica recomendada para los recocidos de fundiciones grises | 37 |
| IV. | Resultados del ensayo de tensión | 115 |
| V. | Tenacidad y deformación unitaria | 116 |
| VI. | Resultados del ensayo de compresión..... | 117 |
| VII. | Resultados del ensayo de dureza | 118 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|------------------------|-------------------------------|
| C | Carbono |
| Fe₃C | Carburo de hierro |
| cm³ | Centímetros cúbicos |
| Cr | Cromo |
| HB | Dureza Brinell |
| HRC | Dureza Rockwell C |
| GPa | Giga Pascal |
| Fe | Hierro |
| J | Joule |
| kg | Kilogramo |
| kgf | Kilogramo-fuerza |
| kHz | Kilo-hertz |
| MPa | Mega Pascal |
| mm | Milímetros |
| mm² | Milímetros cuadrados |
| N | Newton |
| Ni | Níquel |
| % | Porcentaje |
| " | Pulgadas |
| °C | Temperatura en grados Celsius |

GLOSARIO

| | |
|--------------------|--|
| Acritud | Propiedad de un metal de aumentar su dureza por deformaciones en frío. |
| ASTM | Sociedad Americana de Ensayos y Materiales |
| Carbono | Elemento químico de número atómico 6 y símbolo C, elemento de aleación con el hierro para formar el acero. |
| Corrosión | Deterioro de un material a consecuencia de un ataque químico y electroquímico por su entorno. |
| Elasticidad | propiedad mecánica de ciertos materiales de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original, si estas fuerzas exteriores se eliminan. |
| Fatiga | Es un proceso de degeneración de un material sometido a cargas cíclicas localizadas. |
| Grafito | Mineral de carbono casi puro, de textura compacta, color negro y brillo metálico, graso al tacto y buen conductor de la electricidad. |

| | |
|--------------------------|--|
| Hipereutectoide | Aceros que en su composición y de acuerdo al diagrama hierro- carburo de hierro, tienen entre 0,8 y 2 % de C. |
| Kilogramo-fuerza | También llamado kilopondio, es la fuerza ejercida sobre una masa de 1 kg masa por la gravedad en la superficie terrestre. |
| Metalografía | Ciencia que estudia las características micro-estructurales o constitutivas de un metal o aleación relacionándolas con las propiedades físicas, químicas y mecánicas. |
| Nital | El nital es una solución de alcohol etílico y ácido nítrico usada para ataque químico de metales. |
| Piezoelectricidad | Es un fenómeno que ocurre en determinados cristales, al ser sometidos a tensiones mecánicas, en su masa adquiere una polarización eléctrica y aparece una diferencia de potencia y cargas eléctricas en su superficie. |
| Resiliencia | Capacidad de un material de absorber energía hasta su límite elástico. |

RESUMEN

El hierro fundido es una aleación de hierro y carbono, similar al de los aceros, con la diferencia de que, en el hierro fundido, la cantidad de Carbono es mayor comúnmente entre 2 y 4 %; esta aleación cuenta con propiedades muy interesantes que se pueden determinar mediante ensayos de materiales.

Los ensayos de materiales son procedimientos necesarios para determinar ciertas propiedades mecánicas, principalmente en los aceros y aleaciones, además sirven para conocer el estado de ciertos elementos mecánicos, como el caso de los ensayos no destructivos. Existe una clasificación de los ensayos de materiales que se determina de acuerdo a la propiedad mecánica que se desea conocer.

Dichas propiedades en los aceros y aleaciones, se pueden mejorar con la ayuda de tratamientos térmicos, siendo los más conocidos en la industria: el temple, revenido, recocido y el normalizado; estos permiten tener un incremento principalmente en la dureza, pero también un incremento a la tenacidad, resistencia a la tensión, resistencia al desgaste y algunas otras propiedades.

OBJETIVOS

General

Realizar un análisis por ensayos de tensión, compresión y dureza según norma ASTM del hierro fundido A48 al someterlo a tratamientos térmicos.

Específicos

1. Aplicar tratamientos térmicos al hierro fundido A48 bajo condiciones controladas.
2. Comparar la resistencia a la tensión del hierro fundido A48 en estado de suministro, con la resistencia a la tensión, luego de los tratamientos térmicos.
3. Comparar la resistencia a la compresión del hierro fundido A48 en estado de suministro, con la resistencia a la compresión luego de los tratamientos térmicos.
4. Comparar la dureza del hierro fundido A48 en estado de suministro, con la dureza, luego de los tratamientos térmicos.
5. Realizar un estudio metalográfico de las probetas tratadas térmicamente.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación se desarrolló con la finalidad de estudiar las propiedades mecánicas del hierro fundido A48 clase 40 considerado así por su matriz perlítica y de uso muy común en la industria guatemalteca, después de ser sometido a tratamientos térmicos de temple y revenido, esto para dar una alternativa al momento de diseñar piezas mecánicas.

Para estudiar las propiedades se realizaron ensayos de tensión, compresión y dureza, ya que los mismos permiten conocer datos importantes como: la resistencia mecánica, alargamiento, dureza, elasticidad y algunas otras propiedades. Para lograr resultados con mayor certeza, se mecanizaron diez probetas para cada ensayo; esto con la finalidad de obtener diez mediciones por ensayo.

Además, se realizó adecuadamente el estudio teórico sobre el hierro fundido, así como su clasificación. En el capítulo dos, se puede encontrar la definición, tipos de tratamientos térmicos y los que son aplicables al hierro fundido.

Posteriormente, se puede encontrar el ensayo experimental, así como las gráficas de permanencia del temple y revenido de las probetas. Por último, se muestran los resultados de los ensayos y la gráfica esfuerzo-deformación del ensayo de tensión, la cual muestra el comportamiento de un material frágil.

1. HIERRO FUNDIDO

1.1. Hierro fundido

Las fundiciones de hierro al igual que los aceros son aleaciones de hierro y carbono. Respecto al diagrama Fe-Fe₃C de la figura 1, son aleaciones hierro-carbono con un contenido de carbono entre 2 y 6,67 %, aunque mayormente en la industria solo se comercializa con hierros fundidos con un máximo de 4 % de carbono por la fragilidad que este elemento le pueda dar a la aleación, también debe tenerse en cuenta que la presencia de elementos de aleación modifica la máxima solubilidad de carbono en la austenita, por lo que algunas fundiciones aleadas podrían tener menos de 2 % de carbono. Las fundiciones de hierro además, contienen silicio del 2 al 4 %, manganeso hasta 1 %, bajo azufre y bajo fósforo.

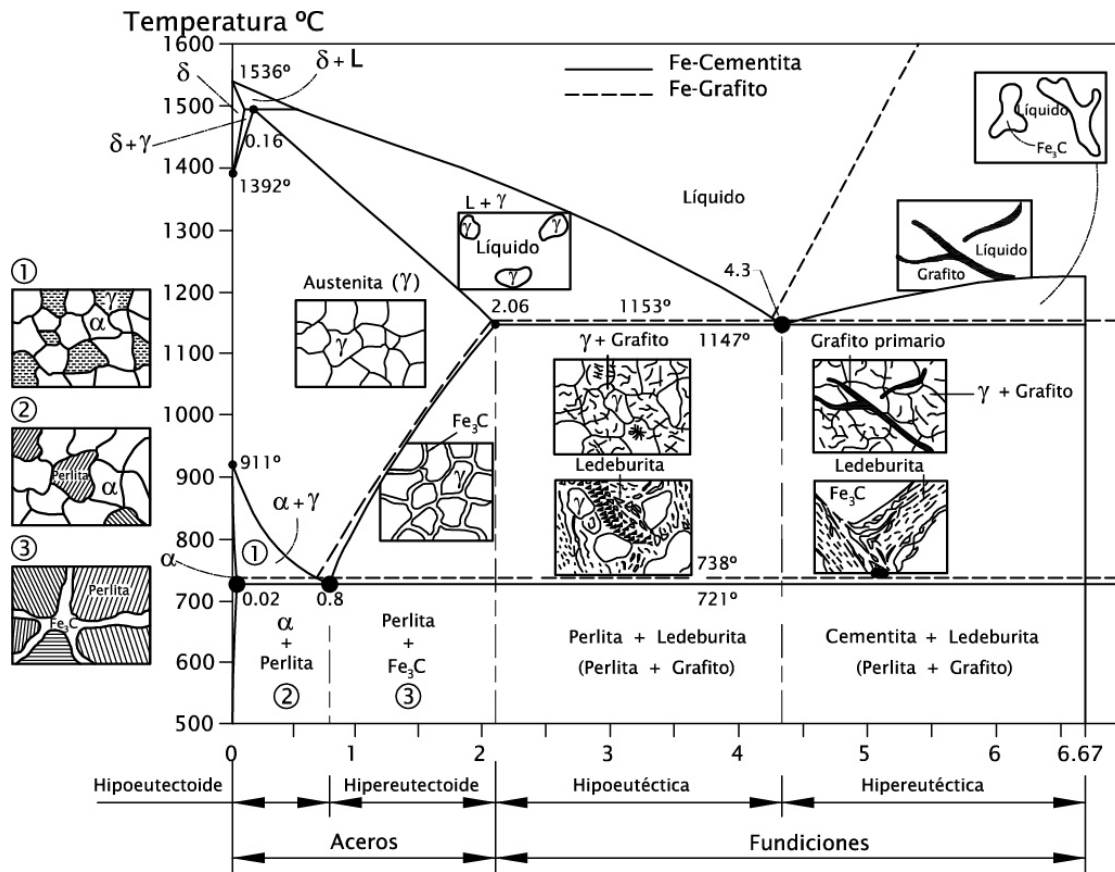
Se caracterizan por que se pueden vaciar del horno cubilote para obtener piezas de diferente tamaño y complejidad pero no pueden ser sometidas a deformación plástica, no son dúctiles ni maleables y poco soldables pero sí maquinables, relativamente duras y resistentes a la corrosión y al desgaste.

El carbono, en las fundiciones, puede aparecer en carbono libre en forma de grafito o carbono combinado formando la matriz, siguiendo la relación: % carbono total = % carbono grafitico + % carbono combinado

Cuando la fundición en su proceso de solidificación sigue el camino metaestable, la fase rica en carbono del constituyente eutéctico es cementita (Fe₃C), mientras que cuando sigue el camino estable el eutéctico es austenita +

grafito. Se distinguen, de este modo, las fundiciones blancas (diagrama metaestable), fundiciones grises (diagrama estable).

Figura 1. Diagrama hierro- carburo de hierro



Fuente: <http://www.thyssenkrupp.cisoportetecnico>. Consulta: noviembre de 2015.

Nótese en la figura 1, que la temperatura de fusión de las fundiciones es inferior a la temperatura de fusión de los aceros hasta el punto eutéctico de 4,8 % de carbono, donde la temperatura de fusión empieza a elevarse.

1.2. Tipos de hierro fundido

La clasificación de los hierros fundidos puede darse según su estructura metalográfica, la microestructura de la fase matriz, que puede ser ferrita, perlita, bainita, martensita o austenita. La forma del grafito es otro parámetro de importancia, existiendo las fundiciones laminares, esferoidales o nodulares, esta dependerá de varios factores tales como, la cantidad de carbono, la rapidez de enfriamiento, elementos de aleación y tratamientos térmicos después de fundirse.

1.2.1. Fundición gris

Se llama así por el aspecto de su fractura, que es de color gris. Es aquella en la cual el carbono se encuentra, en alto grado o en su totalidad, en estado libre, en forma de grafito laminar. Al solidificar como se había indicado anteriormente, la fundición gris sigue el diagrama estable; para esto debe poseer un alto potencial grafitizante, normalmente alto contenido en silicio; por esta razón todas las fundiciones grises tienen contenidos en silicio entre el 2 y el 3%.

Hay tres factores principales que gobiernan las propiedades de las fundiciones grises:

- La ausencia de carburos
- Distribución del grafito
- La microestructura de la fase matriz

Gracias a la buena colabilidad de las fundiciones grises es posible moldear piezas de paredes delgadas, tales como tubos para aletas con

radiadores, rodetes para bombas, anillos para compresores. Las fundiciones grises ordinarias presentan buena resistencia a la corrosión, superior a los aceros. Los productos de corrosión quedan apresados por el esqueleto de grafito y dificultan el deterioro de zonas más profundas.

Figura 2. **Microestructura fundición gris**



Fuente: DIAZ DEL CASTILLO, Felipe. *Hierros fundidos*. p 8.

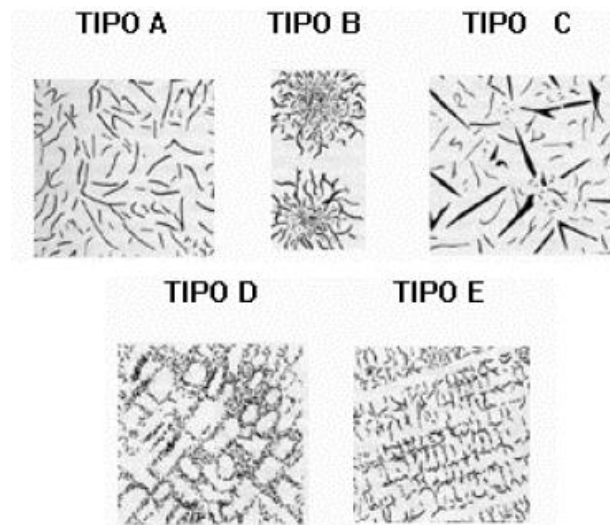
El comportamiento mecánico de una fundición gris resulta parecido al de un acero con numerosas microfisuras taponadas por grafito, la resistencia a los esfuerzos de tensión depende de la matriz y están clasificadas bajo las norma ASTM A48, la resistencia a la compresión suele ser de tres a cuatro veces mayor que la resistencia a la tensión, siendo su ductilidad bastante pequeña.

La capacidad de amortiguación del hierro gris es una propiedad que no se mide muy a menudo, pero que vale la pena considerar, ya que estas aleaciones tienen la habilidad de absorber la energía y, por lo tanto, de detener la

vibración. Esta característica explica las muchas armazones y bases de máquinas que se fabrican de hierro fundido gris.

El grafito de las fundiciones grises aparece habitualmente en forma de láminas, en este caso grafito tipo A. Cuando la solidificación tiene lugar de una manera más rápida se forma el grafito tipo B o en forma de rosetas. El grafito tipo C, caracterizado por unas láminas muy grandes y desordenadas, es el que aparece en las fundiciones hipereutéticas. La morfología del grafito tipo D ocurre en fundiciones hipoeutéticas o eutéticas enfriadas a gran velocidad. Por último, el grafito tipo E, caracterizado por tener unas láminas muy finas y orientadas, es la morfología que aparece en las fundiciones muy hipoeutéticas. No solamente la forma del grafito es importante, sino también su tamaño y proporción, ya que ambos factores influyen directamente en la resistencia mecánica de las fundiciones.

Figura 3. **Tipos de hojuelas según ASTM A247 100X**



Fuente: Norma ASTM A247. Consulta: noviembre de 2015.

En general para la mayoría de las aplicaciones se prefieren las hojuelas del tipo A de tamaño “pequeño”, los tamaños grandes reducen la resistencia y ductilidad del hierro, como resultado de interrumpir seriamente la continuidad del material.

1.2.1.1. Ferrítica

En esta fundición la matriz es ferrita y todo el carbono que hay en la aleación está en forma de grafito, este tipo de fundición se caracteriza por tener una resistencia a la tensión relativamente baja respecto a las otras fundiciones grises, además de tener una dureza entre 130-170 HB.

Figura 4. **Microestructura fundición gris ferrítica**



Fuente: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/5-diagrama-hierro-carbono/>. Consulta: noviembre de 2015.

1.2.1.2. Perlítica

Su estructura está formada de perlita con inclusiones de grafito. Como se sabe, la perlita contiene un 0,8 % de C, por consiguiente, esta cantidad de carbono se encuentra en la fundición perlítica gris en forma combinada y la cantidad restante se encuentra en estado libre, o sea, en forma de grafito.

Esta estructura le brinda propiedades mecánicas superiores, buen acabado superficial y buena capacidad de endurecimiento. Otra característica importante que conviene señalar es su buena estanqueidad, esto da buenos resultados en aplicaciones que trabajan a presión tales como componentes hidráulicos. La gran parte de hierros fundidos que se comercializan en Guatemala son de este tipo, donde la ASTM A48 la designa como clase 40.

Figura 5. **Microestructura fundición gris perlítica**



Fuente: <http://html.rincondelvago.com/metalografia-de-las-aleaciones-ferreas.html>. Consulta: noviembre de 2015.

1.2.1.3. Perlítica/ferrítica

La estructura de esta fundición está formada por láminas de ferrita y una matriz principalmente perlita e inclusiones de grafito en forma laminar. En esta fundición la cantidad de carbono ligado es menor que el 0,8 % de C. Es un hierro gris cuya característica principal es su excelente maquinabilidad y está clasificada según la norma ASTM A48 como hierro gris clase 30.

Figura 6. **Microestructura fundición gris perlítica/ferrítica**



Fuente: <http://www.utp.edu.co/~publio17/gris.htm>. Consulta: noviembre de 2015.

1.2.2. Fundición nodular

La fundición nodular, dúctil o esferoidal se produce en hornos cubilotes, con la fusión de arrabio y chatarra mezclados con coque y piedra caliza. La mayor parte del contenido de carbono en el hierro nodular, tiene forma de esferoides por el agregado de magnesio, calcio y cerio, todos agentes altamente

nodulizantes; estos elementos se agregan antes de ser colado ya que el efecto de los inoculantes dura poco tiempo.

Este tipo de fundición se caracteriza porque en ella el grafito aparece en forma de esferas minúsculas y así la continuidad de la matriz se interrumpe mucho menos que cuando se encuentra en forma laminar, esto da lugar a una resistencia a la tracción y tenacidad mayores que en la fundición gris ordinaria. La fundición nodular se diferencia de la fundición maleable en que normalmente se obtiene directamente en bruto, de colada sin necesidad de tratamiento térmico posterior.

Esta microestructura produce propiedades deseables como alta ductilidad, resistencia, buen maquinado, buena fluidez para la colada, buena capacidad de endurecimiento y tenacidad. No puede ser tan dura como la fundición blanca, salvo que la sometan a un tratamiento térmico, superficial especial.

El contenido total de carbono de la fundición nodular es igual al de la fundición gris y se debe controlar especialmente el contenido de azufre en la aleación ya que éste neutraliza enérgicamente el efecto de los inoculantes.

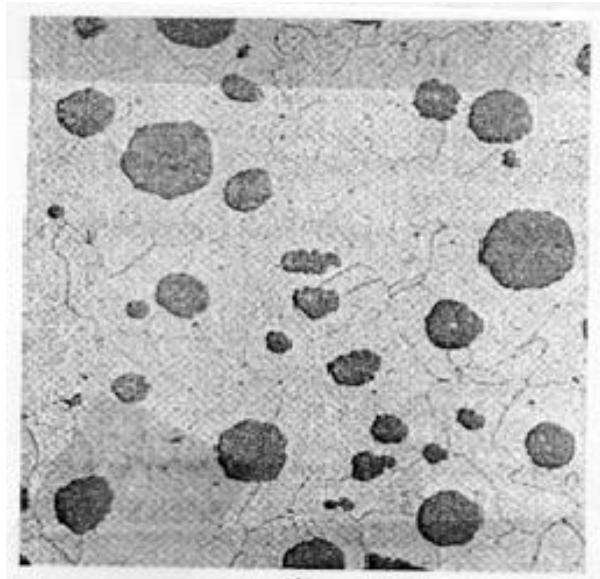
1.2.2.1. Ferrítica

La matriz ferrítica se consigue controlando la composición química y la velocidad de enfriamiento para que sea lo más lenta posible a fin de permitir la difusión y la total grafitización. Esta estructura proporciona máxima ductilidad, maquinabilidad, elongación y buena tenacidad.

Las propiedades mecánicas de esta fundición son similares a las del acero SAE 1020, la dureza está entre 130 y 210 HB y la resistencia a la tensión entre

380 y 630 MPa y está bajo especificación clase 60-40-18 según norma ASTM A536.

Figura 7. **Microestructura fundición nodular ferrítica**



Fuente: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/5-diagrama-hierro-carbono/>. Consulta: diciembre de 2015.

1.2.2.2. Perlítica

La matriz perlítica se consigue mediante un tratamiento térmico de normalizado desde 870 °C o directamente de colada por la adición de aleantes especiales. Esta estructura proporciona mucha más resistencia y tenacidad, pero es menos dúctil.

Las características mecánicas de una nodular perlítica son similares a las de un acero SAE 1045 con una dureza HB entre 200 y 275, resistencia a la

tensión entre 550 y 900 MPa, está especificada bajo la norma ASTM A536 clase 100-70-03

Figura 8. **Microestructura fundición nodular perlítica 500X**



Fuente: AGUILAR SCHAFER, Julio. *Hierros fundidos*. p. 28.

1.2.2.3. **Austemplado**

Recientemente ha habido un gran interés en el desarrollo de las fundiciones nodulares tratadas térmicamente, esta clase de fundición nodular también es conocida como ADI (*austempered ductile iron*), y es un hierro nodular aleado y tratado térmicamente. Se le añaden Cu, Ni y Mo para mejorar su capacidad de someterse a tratamiento térmico y obtener propiedades mecánicas superiores que las obtenidas en el estado bruto de fundición.

El tratamiento térmico consiste en una austenitización completa seguida de temple a una temperatura de 200-350 °C. El enfriamiento normalmente se realiza en sales fundidas hasta obtener una estructura austenoferrítica o bainítica. Las propiedades de la fundición ADI están especificadas bajo la norma ASTM A897.

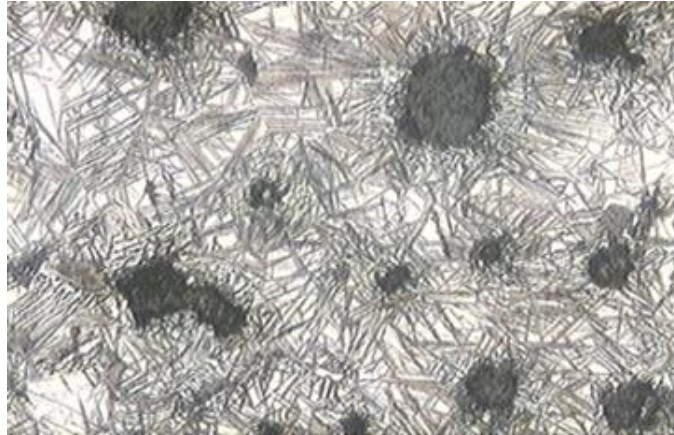
Tabla I. **Propiedades mecánicas fundición nodular ADI**

| Clase | UTS (psi) | YS (psi) | Alargamiento (%) | Dureza (HB) |
|--------------|------------------|-----------------|-------------------------|--------------------|
| 1 | 125 000 | 80 000 | 10 | 269-321 |
| 2 | 150 000 | 100 000 | 7 | 302-363 |
| 3 | 175 000 | 125 000 | 4 | 341-444 |
| 4 | 200 000 | 155 000 | 1 | 388-477 |

Fuente: Norma ASTM A897. Consulta: diciembre de 2015.

La estructura ofrece una buena combinación de dureza, límite de resistencia a la tensión y resistencia al desgaste. Otro punto importante a tener en cuenta es que las propiedades finales de las fundiciones ADI están muy influenciadas por la temperatura a la que se realiza el tratamiento isotérmico de austemperizado. Cuando esta temperatura es baja 200-260 °C se obtiene una microestructura muy fina de gran dureza y resistencia al desgaste, mientras que para las temperaturas más altas 300-350 °C, se obtienen productos de alta tenacidad y resistencia a la fatiga.

Figura 9. **Microestructura fundición (ADI), clase 4 según clasificación ASTM**



Fuente: <http://foundrynews.web593.kinghost.net/artigos/ver/28/el-hierro-nodular-austemperizado-adi-como-una-alternativa-en-reduccion-de-peso-estructural>. Consulta: diciembre de 2015.

1.2.3. Fundición blanca

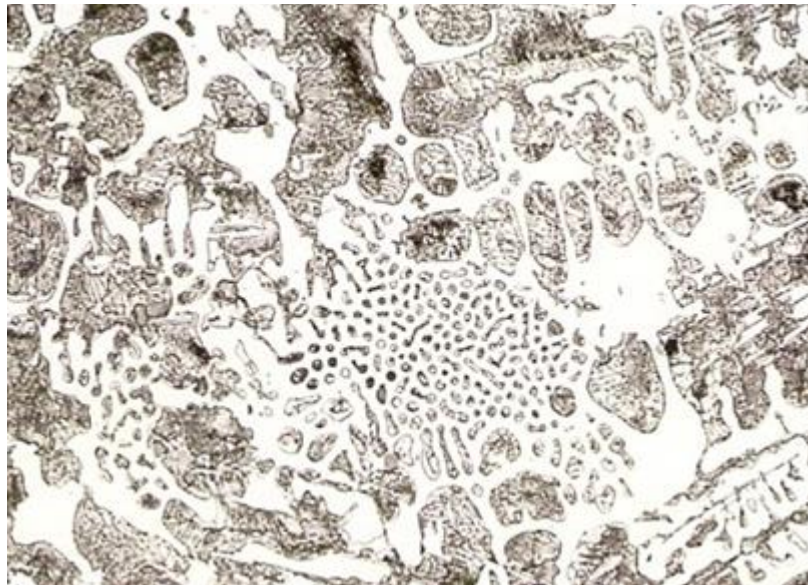
Se conocen como fundición blanca por la apariencia que presenta al fracturarse. Esta no contiene grafito libre y todo el carbono se presenta combinado en forma de Fe_3C . Se forma al enfriar rápidamente la fundición de hierro desde el estado líquido, siguiendo el diagrama hierro-carburo de hierro metaestable. Durante el enfriamiento, la austenita solidifica a partir de la aleación fundida en forma de dendritas. A los 1 130 °C el líquido alcanza la composición eutéctica (4,3 % C) y se solidifica como un eutéctico de austenita y cementita llamado ledeburita.

La fundición blanca se produce en el horno de cubilote, su composición y rapidez de solidificación separa coladas que se transformarán con tratamiento térmico en hierro maleable. La fundición blanca también se utiliza en

aplicaciones donde se necesita buena resistencia al desgaste, tal como en las trituradoras y en los molinos de rodillos.

Está clasificada bajo la norma ASTM A532 y cuenta con una dureza HB de 375 a 600, resistencia a la tensión entre 130 y 500 MPa, además de una resistencia a la compresión entre 1,4 y 1,7 GPa

Figura 10. **Microestructura fundición blanca**



Fuente: SUAREZ, Luis, *Fundiciones de Hierro*.

1.2.4. Fundición maleable

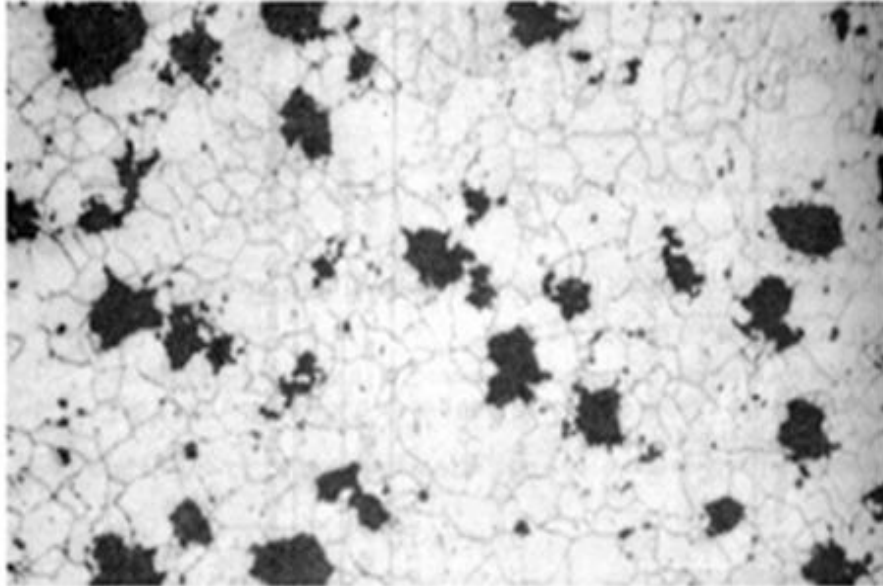
Las fundiciones maleables son tipos especiales de hierros producidos por el tratamiento térmico de la fundición blanca. Estas fundiciones se someten a rígidos controles y dan por resultado una microestructura más favorable en cuanto a maquinabilidad.

La materia prima para poder producir este tipo de hierro fundido, es el hierro fundido blanco, en donde el carbono se encuentra en forma de carburo (Fe_3C). Aprovechando que el carburo de hierro es una fase metaestable y que su descomposición en $\text{Fe} + \text{C}$ se ve favorecida por las altas temperaturas se lleva a cabo lo que se conoce como proceso de maleabilización y consta de dos etapas principales:

- En la primera fase del recocido, la fundición blanca se calienta lentamente a una temperatura comprendida entre 840 y 980 °C. Durante el calentamiento, la perlita se transforma en austenita al alcanzar la línea crítica inferior y, a medida que aumenta la temperatura, la austenita formada disuelve algo más de cementita.
- La segunda fase del recocido consiste en un enfriamiento muy lento al atravesar la zona crítica en que tiene lugar la reacción eutectoide. Esto permite a la austenita descomponerse en las fases estables de ferrita y grafito. Una vez realizada la grafitización, la estructura no sufre ninguna nueva modificación durante el enfriamiento a temperatura ambiente, quedando constituida por nódulos de carbono de revenido en forma de rosetas en una matriz ferrítica.

Al igual que las fundiciones grises y nodulares, las fundiciones maleables pueden tener una matriz ferrítica o perlítica. Las características de estos hierros fundidos se pueden considerar intermedias entre los hierros grises y los hierros fundidos nodulares, siendo los hierros maleables con matriz perlítica los más resistentes, pero un poco menos dúctil. Poseen buena resistencia al desgaste, al impacto térmico, excelente maquinabilidad y poca capacidad de ser soldados especialmente los de matriz perlítica.

Figura 11. **Microestructura fundición maleable I**



Fuente: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/5-diagrama-hierro-carbono/>. Consulta: Marzo de 2016

Sus principales aplicaciones para la clase ferrítica son en equipo automotriz, agrícola y ferroviario; juntas de expansión y piezas fundidas para barandales de puentes y para la clase perlítica, cajas para ejes y diferenciales, ejes de levas y cigüeñales para automóviles, engranes, catarinas, pernos de unión para cadenas y ménsulas elevadoras en equipo transportador.

1.2.5. Fundición aleada

Las fundiciones aleadas son aquellas que contienen Ni, Cr, Mo, Cu, en porcentajes suficientes para mejorar las propiedades mecánicas de las fundiciones ordinarias o para comunicarles alguna otra propiedad especial, como alta resistencia al desgaste, alta resistencia a la corrosión y al calor.

Los elementos de aleación modifican la microestructura de las fundiciones y con ello su dureza y resistencia, estando en ocasiones estos cambios influenciados, además, por una variación de la templabilidad.

Los elementos de aleación modifican también, como en los aceros, la situación de los puntos críticos y, además, ejercen una acción muy importante y compleja de la grafitización. Ciertos elementos como el silicio, aluminio, níquel y cobre, que se disuelven en la ferrita, la endurecen y la hacen aumentar su resistencia, Son elementos que favorecen la grafitización.

Otros elementos como el cromo, manganeso, y molibdeno son formadores de carburos, son elementos que tienden a formar fundición blanca en vez de gris y dificultan la grafitización.

1.2.5.1. De baja y media aleación

Estas fundiciones suelen contener cantidades de níquel, cromo, molibdeno y cobre en porcentajes generalmente inferiores al 1,5 %. En estas fundiciones de gran resistencia, es frecuente que los elementos aleados estén en la proporción de una parte de cromo y dos o tres partes de níquel. El cobre y el molibdeno, en general, suelen encontrarse en cantidades relativamente pequeñas, empleándose estos elementos unas veces solos y otras con níquel o cromo, o con ambos a la vez. En ocasiones mucho menos frecuentes, estas fundiciones contienen también pequeñas cantidades de titanio y vanadio, que son añadidos principalmente para conseguir disminuir el tamaño de las láminas de grafito o para afinar la matriz, y para mejorar también la resistencia al desgaste.

1.2.5.2. De alta resistencia a la tensión

En este grupo se incluyen una gran variedad de fundiciones de composiciones muy diversas y resistencia a la tracción, variables de 25 a 50 kg/mm². A este grupo pertenecen ciertas fundiciones al níquel, fundiciones al cromo, al cromo-níquel, al cobre etc. En estas fundiciones, una de las ventajas más importantes del empleo de los elementos de aleación, es que con ellos se evita la formación de grandes láminas de grafito y se aumenta la resistencia de la matriz.

También es importante señalar que la presencia de esos elementos reduce la susceptibilidad de las fundiciones a las variaciones de sección. Es decir, se consiguen que las propiedades sean más constantes en piezas de diferentes espesores. Además, la matriz de las fundiciones aleadas tiene más resistencia y dureza que la matriz de las fundiciones ordinarias.

En algunos aspectos puede decirse que en ellas la influencia de los elementos de aleación es la misma que en la de los aceros.

1.2.5.3. Martensíticas resistentes al desgaste

Para la fabricación de piezas que deban tener gran resistencia al desgaste, o que exijan muy altas durezas o deban sufrir grandes presiones, se emplean fundiciones martensíticas al níquel y al manganeso. Las fundiciones martensíticas más utilizadas son las blancas. Sin embargo, también se fabricaban fundiciones martensíticas que son de usos más restringidos.

- Fundiciones martensíticas blancas al níquel: Estas fundiciones suelen contener 4,5 % de níquel, 2 % de cromo, y bajo silicio 0,5 %,

alcanzándose con ellas durezas variables de 500 a 700 HB. En América estas fundiciones martensíticas al níquel que son fundiciones blancas son conocidas con la denominación Ni-hard.

- Fundiciones martensíticas grises: Estas fundiciones un bruto de colada estructura martensítica por simple enfriamiento en arena. Suelen conocerse a veces con la denominación de fundiciones autotemplables por la elevada dureza 400 a 450 HB que adquieren directamente de la colada sin ningún tratamiento. No pueden ser mecanizadas con herramientas ordinarias.

1.2.5.4. Resistentes al calor

Una de las dificultades del empleo de las fundiciones ordinarias para ciertos usos es la dilatación que experimentan cuando sufren calentamiento a temperaturas muy superiores. Para muy elevadas temperaturas de servicio y en ocasiones en que no importa mucho el precio, se emplean fundiciones austeníticas con 15 o 20 % de níquel. Pero cuando el calentamiento del material no pasa de los 700 °C y no se pueden emplear materiales caros, se pueden usar las fundiciones aleadas con pequeños porcentajes de cromo y bajo contenido en silicio, con las que se obtienen muy buenos resultados. Se pueden usar de 0,6 a 1,25 % de cromo que actúa como elemento estabilizador de carburos y contenidos bajos en silicio de 1,5 a 2 % para limitar la grafitización, que es una de las causas de la dilatación.

1.2.5.5. Aleadas con aluminio

Recientemente se han comenzado a fabricar y emplear ciertas fundiciones con aluminio. Sin embargo, en la actualidad todavía su empleo es muy limitado, porque su fabricación es muy difícil.

La adición de cantidades de aluminio superiores al 6,5 % hace desaparecer el grafito en las fundiciones y hace que aparezca la matriz formada por ferrita y carburos complejos. Esta estructura ferrítica como la de las fundiciones al silicio es muy inoxidable y refractaria al calor.

Las dos clases más importantes son:

- Las fundiciones con 7 % de aluminio que tienen buena resistencia al fuego y pueden utilizarse hasta 950 °C. Se mecanizan bastante bien. Su resistencia a la tracción es de unos 18 kg/mm² y su dureza de 300 HB.
- Las fundiciones con más de 8 % de aluminio que tienen muy buena resistencia a la oxidación y pueden ser utilizadas a más altas temperaturas, hasta unos 1 000 °C. Son difíciles de mecanizar, salvo en la rectificadora. Su resistencia a la tracción es de unos 13 kg/mm² y su dureza suele variar de 250 a 500 HB.

1.3. Microconstituyentes de las fundiciones

Las fundiciones de hierro pueden presentar los mismos constituyentes de los aceros, más el eutéctico ledeburita, compuesto de austenita y cementita, el eutéctico ternario de cementita, ferrita y fosforo de hierro (esteadita).

- Ferrita

Presenta una dureza del orden de 90 HB, posee una resistencia a la tracción de aproximadamente 300 MPa y tiene un alargamiento del 40 %. Es una fase blanda de bajo contenido en carbono que presenta baja resistencia a la tracción pero alta ductilidad. Su formación se puede promover por medio de grafitizantes tales como el silicio y por una lenta velocidad de enfriamiento tal como aquella que predomina en piezas grandes. La ferrita se encuentra frecuentemente en unión con el grafito subenfriado.

- Cementita

Llamada también carburo eutéctico, es un compuesto intermetálico duro y frágil. Su formación es favorecida en áreas del fundido donde tiene lugar una rápida velocidad de enfriamiento, tales como: esquinas, en toda la superficie de la pieza y en secciones delgadas. Los hierros con bajo carbono equivalente, particularmente aquellos con bajo contenido de silicio, son propensos a contener cementita.

Este compuesto posee una dureza del orden de los 68 HRC, siendo el componente más duro del diagrama metaestable, lo cual implica que es muy frágil. Cristalográficamente se presenta en celdas ortorrómbicas, es un material magnético por debajo de los 210 °C y tiene un punto de fusión indeterminable ya que cuando se llega a 1 227 °C, este se descompone y no funde.

- Perlita

Es el producto de una transformación eutectoide y, en el hierro gris, consiste en láminas intercaladas de ferrita y cementita. Esta posee mayor dureza y resistencia a la tracción que la ferrita pero su ductilidad es más

baja. La dureza y la resistencia a la tracción asociada a la perlita dependen principalmente del espaciado interlaminar entre la ferrita y la cementita. Los valores más altos corresponden a la perlita con espaciado interlaminar fino.

- Ledeburita

Este constituyente no existe a temperatura ambiente en las fundiciones ordinarias debido a que en el enfriamiento se transforma en cementita y perlita; sin embargo en las fundiciones se pueden conocer las zonas donde existió la ledeburita por el aspecto eutéctico con que quedan las agrupaciones de perlita y cementita.

La ledeburita contiene el 52 % de cementita, el 48 % de austenita. Su vista al microscopio es similar al de la perlita. Se emplea para designar una mezcla de componentes que pasan sin descomposición ni segregación del estado sólido al líquido. Se presenta en el área de las fundiciones en el rango de porcentajes de carbono de 2 a 6,67 % de C.

- Esteadita

La esteadita es un constituyente de naturaleza eutéctica, que aparece en las fundiciones de más de 0,15% de fósforo. Como la esteadita se compone de un 10 % de fósforo aproximadamente, y casi todo el fósforo de la fundición se concentra en este constituyente, se puede calcular el porcentaje de esteadita que contiene la fundición por su contenido en fósforo (una fundición que contenga 0,15 % de fósforo, tendrá el 15 % de esteadita).

1.4. Propiedades y característica de las fundiciones grises

A continuación se describen las propiedades y características de la fundición grises.

1.4.1. Influencia del grafito en las propiedades de la fundición gris

La estructura de hierro gris consiste de una matriz metálica y grafito, las propiedades serán determinadas por las propiedades de la matriz y de la cantidad y tipo de inclusiones de grafito. El hierro gris tiene propiedades inferiores a las del acero, las inclusiones de grafito se consideran, en primera aproximación, como grietas. Por consiguiente, el hierro gris puede ser considerado como un acero infectado, con numerosas grietas o huecos. Las propiedades del hierro son más bajas a mayor volumen de grafito, por contribuir a un mayor número de grietas o huecos.

Para un volumen igual de grafito, las propiedades del hierro son determinadas por la forma, distribución y tamaño de las partículas. Consecuentemente las propiedades del hierro serán menores, a contenidos más altos de grafito y a mayor grosor de estas inclusiones, más desintegran la matriz metálica. Propiedades mecánicas deficientes se derivan de hierros en las cuales las partículas de grafito forman una red o cadena cerrada básicamente en las fundiciones grises con grafito tipo E, D.

Las partículas de grafito laminar se consideran como grietas o cortes pronunciados en la matriz. Por ello, ante un esfuerzo de tracción, las partes extremas de la lámina de grafito actuarán como concentradores de esfuerzos que fomentan la falla o quiebre. Ante esta consideración, las propiedades

mecánicas del hierro se caracterizan por una baja resistencia debido a la propagación de la grieta.

En el caso del esfuerzo de compresión, las propiedades de la fundición gris resultan ser elevadas y muy próximas a las propiedades de un acero de la misma composición y estructura de la matriz del hierro fundido. Mientras que la resistencia a la compresión es tres a cuatro veces superior a la tracción. Esto es porque la resistencia a la compresión última y dureza del hierro dependen significativamente de la estructura de la matriz y sus diferencias son mínimas respecto a las del acero.

Las propiedades de resistencia a la rotura, la resistencia a la flexión y a la torsión, están determinadas significativamente por el contenido forma y tamaño de las partículas de grafito y difieren apreciablemente de las propiedades del acero.

1.4.2. Propiedades generales de las fundiciones grises

Las fundiciones grises son un material compuesto de grafito, y de otro material matriz. Este material a su vez, frecuentemente está compuesto por un intermetálico cerámico (cementita), y otro material (la ferrita) que es metálico.

- Las fundiciones son aleaciones férreas que requieren para su elaboración menos energía que los aceros, porque con similar capacidad calorífica su temperatura de fusión es menor. Presentan, además, excelentes características de colabilidad y dan poco rechupe.
- Su colabilidad es mejor cuanto mayor es su contenido de carbono, por ser pequeño el intervalo de temperaturas entre la línea *líquidus* y *sólidus*.

Algunas de ellas, las de composición eutéctica, solidifican a temperatura constante.

- Las fundiciones grises dan poco rechupe, 1 % de contracción lineal aproximadamente, inferior al de los aceros y fundiciones blancas, La pequeña contracción al solidificar se debe a que su densidad entre 6,95 y 7,35 g/cm³, es menor que la densidad de los aceros que es de 7,97 g/cm³.

Tabla II. **Contracción durante la solidificación**

| Tipo de fundición | % de contracción |
|--------------------------|-------------------------|
| Fundición dúctil | 0 - 0,7 |
| Fundición gris | 1,0 |
| Fundición maleable | 1,0 |
| Fundición blanca | 2,0 |
| Acero al carbono | 2,0 |
| Acero aleado | 2,5 |

Fuente: ELORZ PERO-SANZ, José. *Materiales para ingeniería Fundiciones Férrreas*. p. 50

- El comportamiento mecánico de una fundición gris resulta parecido al de un acero con numerosas microfisuras taponada por grafito. La cohesión entre el grafito y la matriz metálica es casi nula. Debido a la gran diferencia entre los coeficientes de dilatación del hierro y del grafito, este se despegará fácilmente de la matriz.

- La conductividad térmica de las fundiciones grises es superior a la de los aceros. En ello influye el grafito, buen conductor. La capacidad para disipar calor es, por tanto, mayor en las fundiciones grises.
- La resistencia de las fundiciones grises al choque térmico resulta, también, mejor para contenidos altos en carbono.
- La tenacidad de las fundiciones grises, es mayor que las de las fundiciones blancas, pero, por el efecto de entalla debido al grafito laminar, resulta insuficiente. Por ello, cuando se requiere un material tenaz, no debe utilizarse fundición blanca, ni tampoco fundición gris laminar.
- Las medidas de dureza son interesantes para predeterminar la resistencia al desgaste de una fundición gris. Además, proporcionan un primer criterio sobre su comportamiento al mecanizado o maquinabilidad. A diferencia de los aceros, las fundiciones no tienen una proporcionalidad directa entre dureza y resistencia a la tracción.
- La resistencia a compresión de las fundiciones grises es alta, aproximadamente 3 o 4 veces superior a la resistencia a la tracción. Ello se debe a que, en compresión, apenas influye el efecto de entalla del grafito y, por tanto, la contribución negativa de este se reduce simplemente a disminuir la sección eficaz del constituyente matriz.
- Las fundiciones grises ordinarias presentan buena resistencia a la corrosión, superior a la de los aceros. Los productos de corrosión quedan apresados por el esqueleto de grafito y dificultan el deterioro de zonas más profundas.

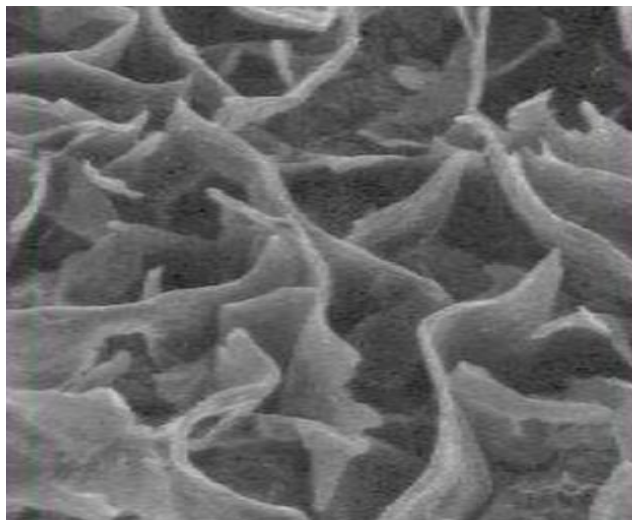
1.5. Formas de grafito en las fundiciones

El grafito de las fundiciones puede tener cuatro formas principales: grafito laminar, grafito vermicular, grafito esferoidal y grafito nodular.

1.5.1. Grafito laminar

En la fundición gris ordinaria el grafito toma la forma de vetas pequeñas, este grafito se llama laminar. En la figura 12, se muestra la vista espacial de las inclusiones de grafito.

Figura 12. **Grafito laminar**



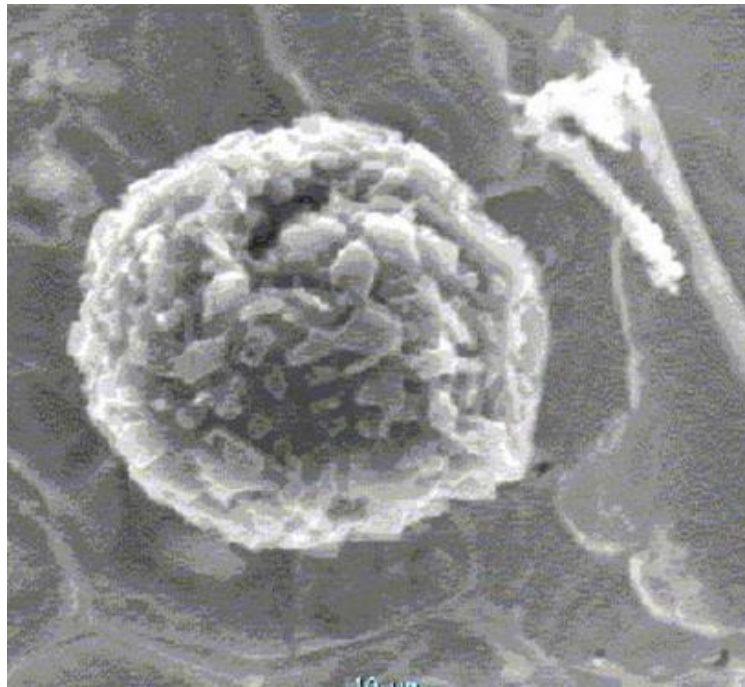
Fuente: AGUILAR SCHAFFER, Julio. *Hierros fundidos*. p. 16.

1.5.2. Grafito esferoidal

En las fundiciones modernas de alta resistencia, que se fabrican adicionando una pequeña cantidad de magnesio o de cerio, el grafito toma la

forma de esfera. En la figura 13, se puede observar la microestructura de una fundición gris con grafito esferoidal.

Figura 13. **Grafito esferoidal**

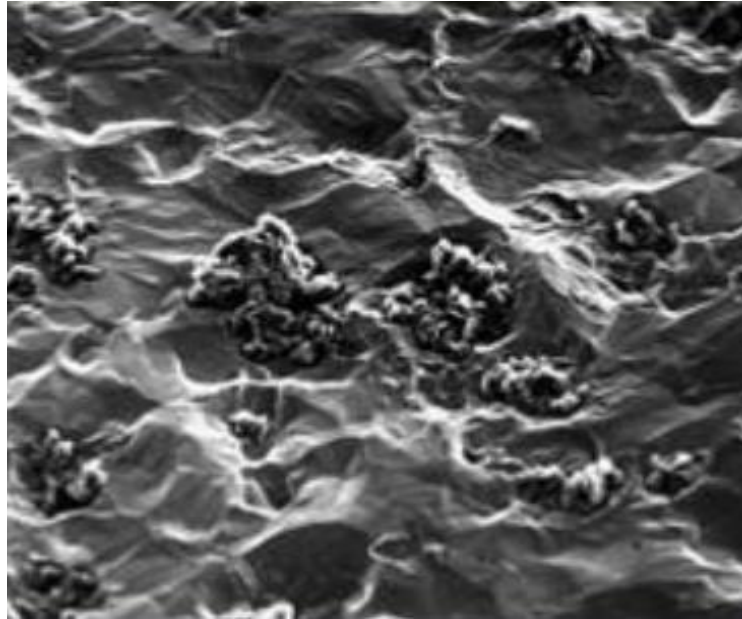


Fuente: AGUILAR SCHAFFER, Julio. *Hierros fundidos*. p. 26.

1.5.3. **Grafito nodular**

Si en la colada se obtiene fundición blanca y después, aprovechando la inestabilidad de la cementita, se somete a recocido para descomponerla. El grafito que se obtiene toma una forma compacta, casi equiaxial, pero no redonda. Este grafito se llama nodular o de recocido.

Figura 14. **Grafito nodular**

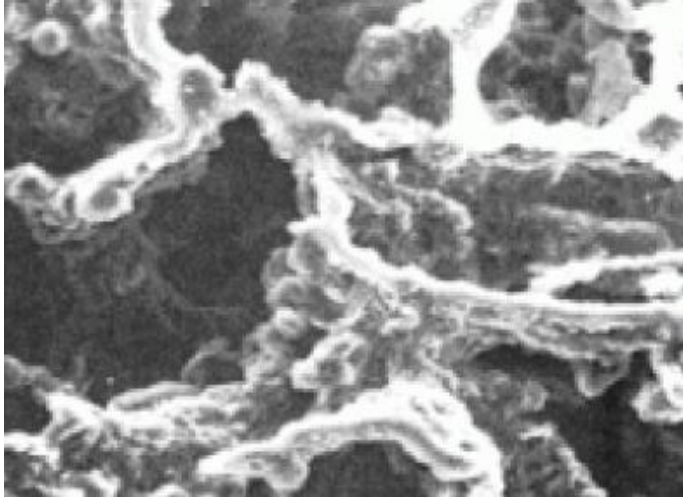


Fuente: AGUILAR SCHAFFER, Julio. *Hierros fundidos*. p. 37.

1.5.4. Grafito vermicular

Forma de grafito degenerado que consiste en láminas gruesas con apariencia de gusanillo redondeado, usualmente como resultado de bajo magnesio residual.

Figura 15. **Grafito vermicular**



Fuente: AGUILAR SCHAFER, Julio. *Hierros fundidos*. p. 36.

2. TRATAMIENTOS TÉRMICOS A LAS FUNDICIONES

El tratamiento térmico de las fundiciones se realiza fundamentalmente para eliminar las tensiones internas que surgen durante el fundido. Estas tensiones conducen con el tiempo, a la variación de las dimensiones y forma de la fundición, disminución de la dureza y mejoramiento de la maquinabilidad por corte y una elevación de las propiedades mecánicas.

Además se suelen utilizar tratamientos térmicos como temple y revenido, esto con la finalidad de mejorar ciertas propiedades mecánicas, en especial la dureza y tenacidad. En el proceso de tratamiento térmico de la fundición ocurren las mismas transformaciones que en el acero. Sin embargo, estas se complican por el hecho de que durante el calentamiento de la fundición se puede desarrollar el proceso de grafitización que cambia completamente la estructura y, por lo tanto, las propiedades de la fundición.

2.1. Diagrama T.T.T. para las fundiciones grises

Las curvas T.T.T. son gráficos Tiempo-Temperatura-Transformación que indican a qué temperatura y en qué instante se inicia y concluye una transformación según la velocidad de enfriamiento que se emplee.

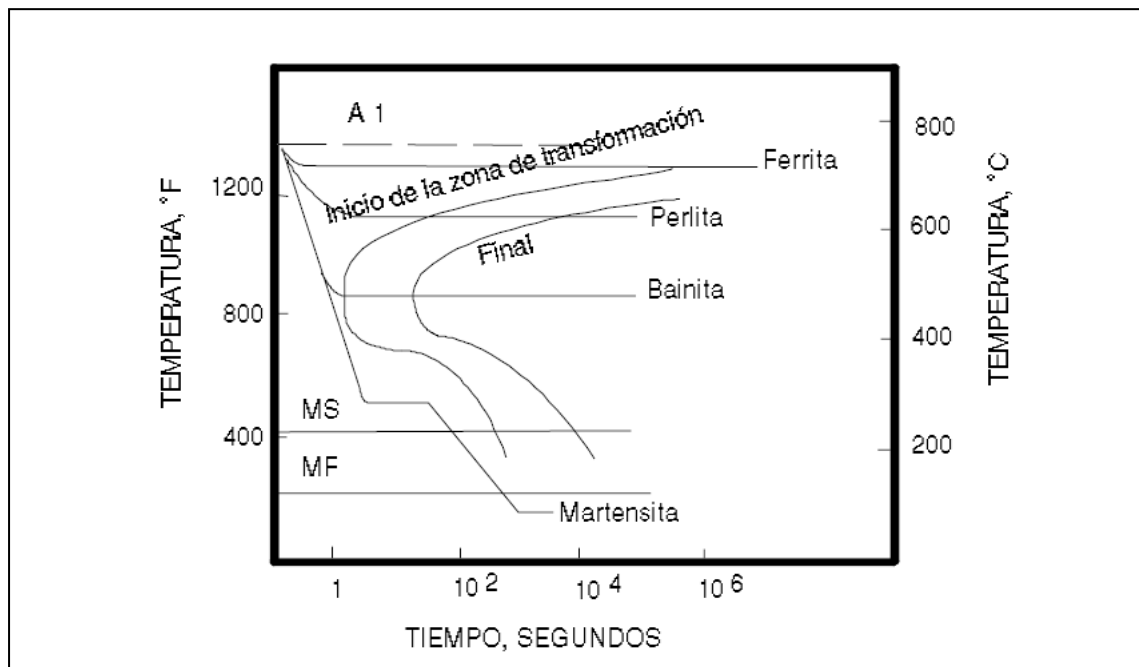
En principio, la forma de las curvas depende de la composición química, en este sentido podría decirse que es una característica de la fundición. En general todos los elementos de aleación retrasan las transformaciones o las modifican, los diagramas T.T.T también son usados en la selección de tratamientos térmicos para fundiciones.

La figura 16 muestra un típico diagrama T.T.T para fundiciones grises de bajo contenido de silicio. Cada ruta de enfriamiento define la relación tiempo y temperatura para producir una microestructura en especial o requerida.

La localización de la zona de transformación en el diagrama T.T.T, definido por el inicio y final de la curva, determina la velocidad y extensión del enfriamiento requerido para evitar ciertas transformaciones y promover otras.

Para asegurar que un componente templado sea enteramente martensítico, la velocidad de enfriamiento más lenta debe ser suficientemente rápida para evitar la “nariz” de la zona de transformación.

Figura 16. **Diagrama T.T.T para una fundición gris**



Fuente: www.ductile.org.com. Consulta: enero de 2016.

2.2. Tratamientos térmicos a las fundiciones grises

Los tratamientos en las fundiciones grises se realizan con la finalidad de mejorar ciertas propiedades, entre los tratamientos más utilizados están el recocido y el normalizado, pero también se puede aplicar temple y revenido como si se tratara de un acero al carbono.

2.2.1. Recocido

Existen dos procesos de recocido que suelen ser aplicados a las fundiciones grises:

- De eliminación de tensiones
- De ablandamiento

2.2.1.1. Recocido de eliminación de tensiones

Los recocidos a bajas temperaturas se realizan a unos 550 °C durante un periodo que depende de la masa y constitución de la fundición. Este periodo generalmente se considera igual a 1 hora por cada 25 mm de espesor y luego se le da un enfriamiento en horno a puerta cerrada. Este proceso no tiene un efecto en las propiedades mecánicas, pero elimina las tensiones que siempre suelen tener las piezas de fundición después de la solidificación y enfriamiento.

Es conveniente dar esta clase de recocido a piezas de formas complicadas, o que deban tener tolerancias dimensionales muy precisas, como cilindros de motores de combustión interna, bancadas de máquinas herramientas, etc. Si no se eliminan estas tensiones, las piezas pueden sufrir luego deformaciones durante la mecanización o durante el funcionamiento que,

en ocasiones, crean importantes problemas y dificultades. Debe emplearse velocidades lentas de calentamiento y en especial de enfriamiento, para evitar nuevas tensiones o roturas, sobre todo cuando las piezas son de formas complicadas.

2.2.1.2. Recocido de ablandamiento

También conocidos como recocido de ferritización, los recocidos de ablandamiento de las fundiciones grises se dan a unos 740 °C, y sirven para mejorar la maquinabilidad y ablandar el material. Fundiciones grises en las que, por causa de los elementos de aleación o por la presencia de zonas pequeñas con enfriamiento rápido, no se consigue la matriz ferrita, se recuecen a 850 °C.

Los recocidos de ablandamiento se suelen dividir según la temperatura a la que se realizan:

- De baja temperatura o subcrítico a 700 - 760 °C

Para disminuir la dureza de las fundiciones grises se les somete a recocidos a 740 °C aproximadamente con enfriamiento en horno a puertas cerradas. Este recocido es interesante porque en ocasiones las fundiciones grises en bruto de colada quedan relativamente duras y su mecanización es difícil. En muchos casos las microestructuras de estas fundiciones en bruto están constituidas por grafito y ferrita y cantidades variables de perlita y sorbita.

Estos constituyentes, perlita y sorbita, son los que dan alta dureza y, cuando interesa mucho facilitar la mecanización, conviene transformarlos por recocido, en ferrita y grafito. Para conseguir después del recocido

una estructura de ferrita y grafito, que es la mejor para el mecanizado, debe alcanzarse en el recocido una temperatura de unos 740 °C aproximadamente. De manera que si después de sobrepasar la temperatura crítica y llegar a los 740 °C, se mantiene esta temperatura durante un cierto tiempo, se consigue que la perlita y la sorbita se transformen en austenita. En esas condiciones, temperatura ligeramente superior a la eutectoide y mantenimiento prolongado, la austenita va cediendo carbono que se deposita en forma de grafito, obteniéndose al final, ferrita y grafito. Si se emplean temperaturas más altas del orden de 800 a 900 °C, y el enfriamiento se hace al aire, se deposita muy poco grafito y es muy difícil obtener baja dureza. Con este recocido a 740 °C se baja la dureza de las fundiciones entre 120 y 130 Brinell.

- De media temperatura o completo a 800 - 900 °C

Es usado en situaciones donde, por causa de los elementos de aleación o por la presencia de zonas pequeñas con enfriamiento rápido, obtenidas en el recocido subcrítico, no se consigue la matriz ferrita.

En este proceso la fundición es calentada a temperatura de 800 y 900 °C, llegándose de esta manera por encima de la temperatura de transformación eutectoide. Después de mantenerla por 1 hora por cada 25 mm de espesor, la fundición es enfriada lentamente por la región de transformación eutectoide, promoviendo la formación de ferrita.

Al calentar de 800 a 900 °C, no hay formación de grafito o esta formación tiene poca importancia, ya que la temperatura de mantenimiento no es apropiada para el depósito de gran cantidad de grafito. Durante la permanencia a esta temperatura habrá formación de una pequeña cantidad de grafito y

luego, en un enfriamiento sin precauciones muy especiales, al pasar la zona eutectoide, se formará perlita.

Si se calienta a 850 °C se puede obtener la microestructura de grafito y ferrita, con enfriamiento muy lento. Este tratamiento de 800 a 900 °C también es recomendable para fundiciones grises de gran dureza y para fundiciones atruchadas que contienen cementita hipereutectoide. En esos casos la dureza inicial que será francamente alta, 250 a 300 Brinell, se podrá disminuir con este recocido. En este tratamiento se calentará a unos 850 °C aproximadamente y luego se cuidará que la velocidad de enfriamiento sea muy lenta, sobre todo en la zona crítica de 700 y 720 °C, para facilitar el depósito del grafito eutectoide y luego se puede enfriar al aire.

- De alta temperatura o grafitización 900 – 925 °C
Es usado en fundiciones grises sólo cuando se quiere el retiro de carburos. Este tratamiento consiste en calentar la pieza a temperaturas aproximadamente de 900 – 925 °C. El tiempo de permanencia debería ser el mínimo para evitar procesos de oxidación y formación de óxidos en las fronteras de grano, basado en la evaluación microestructural y, para evitar formación de cascarilla innecesaria se puede usar horno de atmósfera controlada.

Después de la descomposición de carburos, la forma de enfriar dependerá de la microestructura que se desee. Si se desea una estructura ferrítica, se recomienda un enfriamiento en horno a puerta cerrada. Pero si se desea una fundición de matriz perlítica, se recomienda un enfriamiento al aire.

Tabla III. **Práctica recomendada para los recocidos de fundiciones grises**

| Tipo de Recocido | Propósito | Temperatura | Tiempo | Velocidad de enfriamiento |
|------------------------------------|--|--------------|-----------------------------------|---|
| Baja temperatura (ferritizado) | Convertir la perlita a ferrita en fundiciones no aleadas (máx. maquinabilidad) | 700 a 760 °C | 45 minutos por 25 mm. De sección | Enfriamiento en el horno hasta 300 °C (50° C por hora aprox.) |
| Media temperatura (recocido total) | Convertir la perlita a ferrita en fundiciones que no responden al ferritizado. Para eliminar pequeña cantidad de carburos dispersos. | 815 a 900 °C | 1 hora por 25 mm. De espesor | Enfriamiento en el horno hasta 300° C aprox. |
| Alta temperatura (grafitizado) | Eliminación de carburos masivos y conversión de perlita en ferrita | 900 a 925 °C | 1 a 3 horas por 25 mm. De sección | Enfriamiento dentro del horno hasta 300 °C |

Fuente: elaboración propia.

2.2.2. Normalizado

También llamado perlítización, la normalización es el calentamiento de la fundición hasta 850 – 950 °C con un enfriamiento posterior al aire sereno. Se emplea normalización para aumentar la dureza, tenacidad y resistencia al desgaste de la fundición. Esto se logra gracias a la total transformación de la base estructural ferrítica o ferrito-perlítica, en la de perlita de la fundición gris o perlítización. La fundición ferrítica maleable después de la normalización a 800 - 850 °C se transforma en la fundición perlítica maleable.

2.2.3. Temple y revenido

La posibilidad de mejorar por temple ciertas propiedades en las fundiciones es debida, como en los aceros, a que estas aleaciones, al ser calentadas a elevadas temperaturas, 750 a 900 °C se transforman, una parte en austenita. Este constituyente al ser enfriado luego, más o menos rápidamente, se convierte en martensita o en otros constituyentes intermedios.

En ocasiones se puede endurecer y aumentar la resistencia a la tensión de las fundiciones grises por tratamiento térmico. De esta forma se consigue un gran aumento de dureza y también un aumento, aunque mucho menos sensible, de la resistencia a la tensión y de la resistencia al desgaste.

En forma general se somete a las fundiciones primero a un temple y luego a un revenido. Los resultados que se obtienen dependen siempre, como es natural, de la clase de tratamiento, de la microestructura y de la composición química de la fundición. Las fundiciones con gran cantidad de ferrita y grafito, no son las más recomendables para ser endurecidas por tratamiento térmico. En cambio, con las fundiciones de matriz perlítica se puede conseguir mejoras muy importantes de dureza y de resistencia al desgaste por temple y revenido.

Para poder realizar un tratamiento adecuado se debe tener una temperatura crítica apropiada, esta se puede obtener por referencia con el diagrama de equilibrio de fases, conociendo la composición química de la fundición, o bien calcularse usando la siguiente fórmula:

$$\text{Temperatura crítica (°C)} = 730 + 28(\% \text{ Si}) - 25(\% \text{ Mn})$$

2.2.3.1. Temple

El temple se realiza con el propósito de suprimir la transformación de equilibrio y alcanzar la dureza deseada con estructura martensítica. En esta operación la velocidad de enfriamiento es muy importante, ya que existe, para cada composición o grado de la fundición, una velocidad crítica especial. Si la fundición se enfría demasiado lentamente no ocurrirá la transformación martensítica, sino que se formarán productos de transformación isotérmica.

Enfriamientos rápidos, tales como temple en agua que exceden la velocidad crítica, pueden causar distorsión o fisuras como consecuencia de que la transformación en martensita resulta con una apreciable expansión de volumen. Esta expansión puede ocurrir en el mismo momento en que porciones no transformadas adyacentes se encuentran en una normal contracción térmica.

Las fuerzas opuestas de la expansión de volumen de la martensita y la contracción térmica debida al enfriamiento, tienden a crear tensiones internas que resultarán en distorsiones y fisuras. En general un temple en aceite produce resultados correctos.

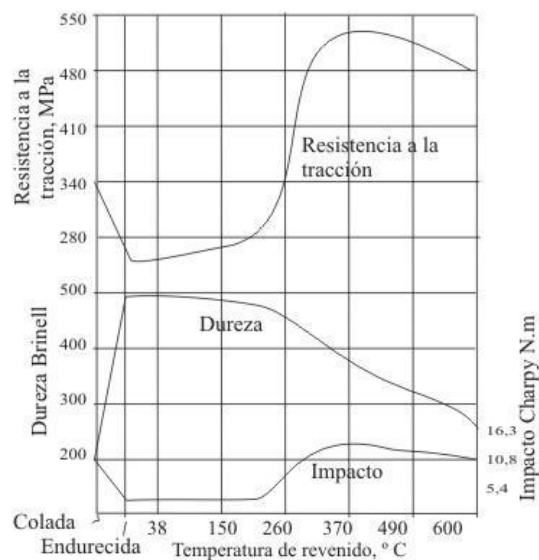
La dureza de una martensita adecuadamente templada en diferentes fundiciones puede no ser equivalente, cuando se mide con los ensayos convencionales de Rockwell o Brinell. Los ensayos de microdureza indican valores equivalentes dentro de los 60 HRC, pero con el método convencional los valores serán menores a causa del grafito en la microestructura. Las fundiciones grises totalmente endurecidas, pueden estar en el rango de HRC 48 a 55 dependiendo de la cantidad y tamaño de las láminas de grafito.

2.2.3.2. Revenido

La etapa final del temple es el revenido, en este paso, el calentamiento a temperatura subcrítica alivia la extrema fragilidad de la estructura tal cual templada. La base fundamental del revenido es la precipitación o separación de microscópicas o submicroscópicas partículas de carburos de la estructura metaestable de la martensita, para establecer una microestructura más blanda y tenaz.

Usualmente es deseable un enfriamiento lento desde la temperatura de revenido, especialmente cuando es alta; esto minimiza las tensiones residuales en fundiciones de formas complejas.

Figura 17. **Influencia por el temple y revenido en las propiedades mecánicas de una fundición gris**



Fuente: *Metalografía y Tratamientos Térmicos*. Consulta: enero 2016.

2.2.4. Temple en caliente

Como se indicó anteriormente, la aplicación de un temple convencional y revenido en fundiciones grises, está sujeto a ciertas dificultades, especialmente cuando las fundiciones son complejas o tienen grandes diferencias de secciones. Para minimizar estas dificultades se puede utilizar un temple menos severo, como puede ser el uso de aceite caliente que reduciría el shock térmico del temple convencional.

Por enfriamiento rápido desde la temperatura de austenización a 870 °C dentro de un baño caliente a 320 °C y mantenido aproximadamente 1 minuto, la pieza entera puede enfriarse a esa temperatura sin que se produzca ninguna transformación. Si la pieza entonces se enfría al aire, la austenita se transformará en martensita, este procedimiento producirá el máximo de dureza, con muy poca distorsión por la disminución del gradiente térmico.

Si en lugar de enfriar después del minuto de permanencia en el baño caliente, se mantiene en éste por un período largo, se produce una estructura principalmente bainítica, que no tendrá una dureza mayor comparada con una estructura martensítica pero si la comparamos con una estructura perlítica si tendrá una dureza mayor.

2.2.5. Endurecimiento superficial

Cuando se necesita incrementar la resistencia al desgaste o abrasión sin aumentar la resistencia total de una pieza, se puede realizar un tratamiento térmico superficial que disminuye las posibilidades de deformación o fisuras que puedan producirse en operaciones de temple total.

Los tratamientos de endurecimiento superficial pueden clasificarse según el método de aplicación del calor, como temple a la llama y temple por inducción.

2.2.5.1. Temple a la llama

Es uno de los métodos más ampliamente usados en fundiciones grises y nodulares. En este proceso una capa exterior de la fundición se calienta a una temperatura por encima del rango crítico por medio de un quemador oxiacetilénico localmente aplicado. La capa superficial calentada es templada para promover la formación de martensita.

Después del tratamiento, la fundición queda formada por una capa superficial endurecida, resistente al desgaste sobre material que no ha sido calentado por encima del rango crítico, con propiedades similares a las originales. Dado que la superficie de alta resistencia a menudo posee tensiones residuales de compresión, se obtiene un incremento en la resistencia total y especialmente en el comportamiento en fatiga además de la resistencia al desgaste. El área a ser endurecida, la profundidad de endurecimiento y la dureza obtenida se controlan por la velocidad y duración del calentamiento a la llama.

La profundidad de penetración de endurecimiento puede controlarse, dentro de los límites de templabilidad del material, regulando la energía suministrada y la duración del calentamiento. La dureza real obtenida está afectada por la composición de la fundición, particularmente en el % de C y Si.

Las fundiciones no aleadas son deseables para el temple superficial, porque responden correctamente, y sin necesidad del agregado de elementos

que aumenten la templabilidad; incluso éstos pueden ser indeseables porque la transformación en austenita puede demorarse cuando el calentamiento es rápido. Sin embargo un pequeño contenido de aleantes puede ser útil para asegurar una matriz perlítica.

Como medio de enfriamiento se puede utilizar agua, pero con un alto riesgo de fisuras. Con aceite se corre el peligro de inflamación, de allí que es muy conveniente utilizar soluciones acuosas de aceite soluble o de resinas sintéticas que logran menor severidad de temple que en agua, siempre es recomendable realizar un revenido posterior.

2.2.5.2. Temple por inducción

Este calentamiento localizado puede realizarse colocando en el área a ser endurecida una bobina inductora de cobre, adecuadamente diseñada, por donde circula una corriente alterna normalmente de alta frecuencia. La fundición se calienta por las corrientes inducidas por el campo magnético creado alrededor de la bobina inductora. Tales corrientes inducidas tienden a concentrarse en la superficie de la fundición con un nivel de profundidad que depende principalmente de la frecuencia de la corriente; este efecto se denomina “pelicular”.

Cuanto mayor es la frecuencia, menor es la profundidad de calentamiento. La densidad de potencia y el tiempo de aplicación determinan la temperatura obtenida y la profundidad de calentamiento. Esto permite un grado de control que no se tiene en el calentamiento por llama, ni por temple convencional.

En equipos comerciales de temple por inducción, para bajas profundidades se utilizan usualmente frecuencias del orden de 500 KHz o

mayores, y para profundidades medias o altas son útiles frecuencias del orden de 10 KHz o menores hasta 1 KHz, además de ajustar la profundidad de temple, el proceso por inducción posee las ventajas de un calentamiento más rápido, con el correspondiente incremento en la eficiencia del proceso.

Los requerimientos metalúrgicos para fundiciones grises a ser templadas por inducción, son esencialmente los mismos que para temple por llama. Se recomienda fundamentalmente que tengan un carbono combinado mayor a 0,50 %, un contenido bajo de silicio, y una microestructura de la matriz de perlita o martensita revenida. Lo más recomendable es efectuar un normalizado previo, para reducir al mínimo la presencia de ferrita.

3. ENSAYOS DE MATERIALES

Las pruebas cuya finalidad es determinar las propiedades mecánicas de los materiales se denominan ensayos de materiales. Es importante al momento de trabajar un material, conocer sus propiedades mecánicas, y saber que estas propiedades mecánicas variarán en función de la velocidad de deformación y de la temperatura a la que se encuentre el cuerpo a ensayar.

Las propiedades mecánicas se definen como la forma en que un material soporta fuerzas aplicadas, incluyendo fuerzas de tensión, compresión, impacto, cíclicas o de fatiga, o fuerzas a altas temperaturas. Las principales propiedades son: dureza, tenacidad, fragilidad, cohesión, elasticidad, plasticidad, resiliencia y fatiga.

Para determinar estas propiedades existen varios métodos o procedimientos los cuales se clasifican principalmente en ensayos destructivos y ensayos no destructivos.

3.1. Ensayos destructivos

Un ensayo destructivo es aquel que deteriora la pieza que inspecciona, pero dependiendo del tipo de ensayo, la pieza experimentara desde una leve marca, a una deformación permanente o incluso su rotura parcial o total.

Dentro de los ensayos destructivos de propiedades mecánicas podemos diferenciar: los ensayos destructivos estáticos, ensayos destructivos dinámicos y los ensayos tecnológicos.

3.1.1. Ensayos estáticos

Se les denomina ensayos destructivos estáticos por la carga que se le aplica; esta puede ser estática o progresiva y se utiliza para conocer propiedades muy importantes en relación a los aceros o aleaciones.

Las propiedades que se pueden determinar utilizando estos ensayos son dureza y la resistencia a la compresión o tensión.

3.1.1.1. Dureza

La dureza se define como la resistencia que opone un material a ser penetrado por un cuerpo más duro, y esta micropenetración se realiza mediante una punta. El ensayo de dureza es simple, de alto rendimiento ya que no destruye la muestra y particularmente útil para evaluar propiedades de los diferentes componentes microestructurales del material.

Los métodos existentes para la medición de la dureza se distinguen por la forma de la herramienta empleada, en este caso un penetrador, por las condiciones de aplicación de la carga y por la propia forma de calcular la dureza. La elección del método para determinar la dureza depende de factores tales como tipo, dimensiones de la muestra y espesor de la misma, hay diferentes formas que varían en función de los resultados que queramos conseguir.

Los ensayos de dureza más utilizados son:

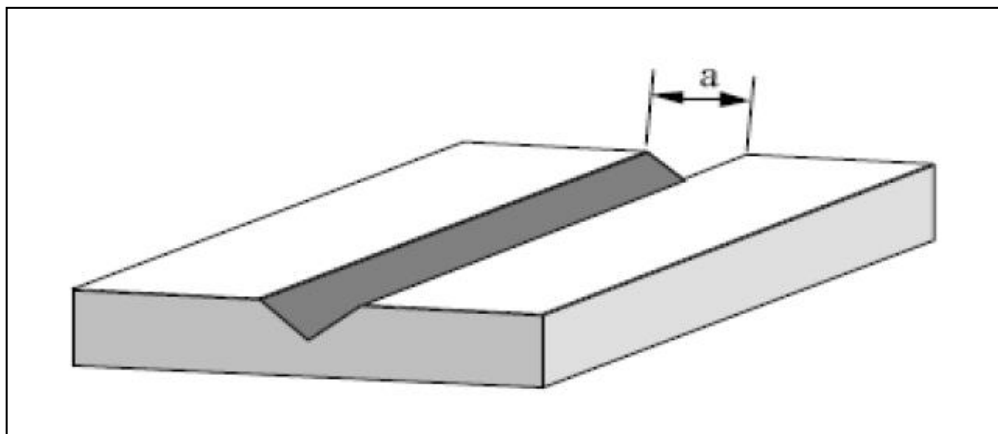
- Ensayo Martens
- Ensayo Shore

- Ensayo Mohs
 - Ensayo Brinell
 - Ensayo Vickers
 - Ensayo Rockwell
 - Ensayo Poldi
 - Ensayo Knoop
- Ensayo Martens

El ensayo Martens se basa en la medida de la anchura de la raya que produce en el material una punta de diamante de forma piramidal y de ángulo en el vértice de 90°, con una carga constante y determinada. Se aplica sobre superficies nitruradas, Se mide en micras y la dureza Martens viene dada por:

$$\Delta m = 10^4 / a^2$$

Figura 18. **Probeta para la dureza Martens**



Fuente: Federación de Enseñanza de CC. OO. De Andalucía. *Ensayos Destructivos Metalúrgicos*. Primera parte. P 5.

- Ensayo Shore

Este ensayo se basa en la reacción elástica del material cuando dejamos caer sobre él un material más duro. Si el material es blando absorbe la energía del choque, si el material es duro produce un rebote cuya altura se mide. La práctica se realiza en un esclerómetro o escleroscopio, el aparato se gradúa dividiendo en 100 partes la altura media del rebote en una pieza de 7 gramos de acero duro templado y prolongando la escala en 40 divisiones más, iguales a las anteriores, para poder realizar medidas en materiales extraduros.

La ventaja del esclerómetro o escleroscopio de Shore es que no produce prácticamente ninguna huella en el material ensayado, por lo que se utiliza para medir la dureza superficial de piezas terminadas, como cilindros de laminación, para mapas de dureza de una misma pieza, piezas de pequeño tamaño pero siempre del mismo material, etc. La superficie a ensayar ha de estar totalmente plana, perpendicular, limpia y pulida, siendo recomendado hacer tres ensayos y cada vez en sitios diferentes, debido al endurecimiento superficial producido por el choque.

- Ensayo de Mohs

El ensayo de Mohs se basa en la capacidad que tiene una sustancia sólida para resistir una deformación o la abrasión de su superficie. En mineralogía, la dureza se define como la resistencia al rayado de la superficie lisa de un mineral. Una superficie blanda se raya con más facilidad que una dura, de esta forma un mineral duro, como el diamante, rayará uno blando, como el acero, mientras que la situación inversa nunca se producirá. La dureza de un mineral determina en gran medida su durabilidad.

La dureza relativa de los minerales se determina gracias a la escala de dureza de Mohs, nombre del mineralogista alemán Friedrich Mohs que la ideó. Está formada por diez minerales comunes y están clasificados en orden decreciente de dureza recibiendo un índice: talco 1, yeso 2, calcita 3, fluorita 4, apatito 5, ortosa o feldespatos 6, cuarzo 7, topacio 8, corindón 9 y diamante 10. Industrialmente se ha conseguido alcanzar el nivel 11 de dureza, con el diamante negro y el borazón.

La dureza de una muestra se obtiene determinando qué mineral de la escala de Mohs lo raya, cada número puede rayar todos los que tienen uno menor. Los escalones no tienen el mismo valor, por ejemplo la diferencia entre durezas 9 y 10 es mucho mayor que entre las durezas 1 y 2, el diamante es 140 veces más fuerte que el corindón.

- Ensayo Brinell

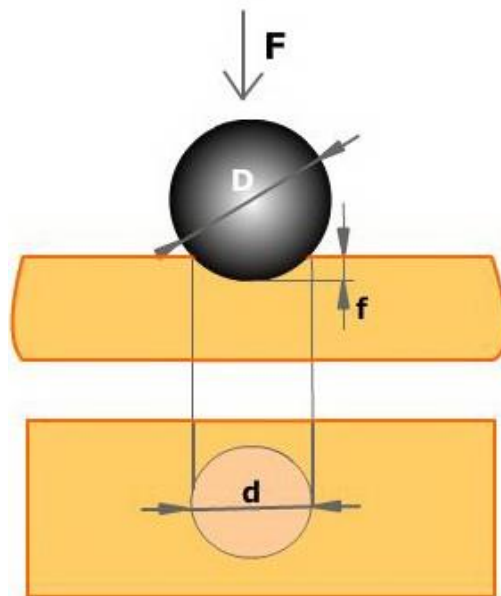
El ensayo Brinell HB consiste en una prensa mediante la cual aplica una presión correspondiente para comprimir una bola de acero templado, de un diámetro determinado, sobre un material a ensayar, por medio de una carga y durante un tiempo también conocido. Después, por medio de una regla graduada o un microscopio provisto también de un retículo graduado, se mide el diámetro de la huella que la bola ha dejado en el material y mediante la fórmula o la tabla, se halla el número Brinell.

Si la huella resulta ovalada, se toma la medida de los diámetros extremos, teniendo mucho cuidado al realizar el ensayo:

- Que la superficie de la pieza esté limpia, sea perfectamente plana, normal al eje de aplicación de la carga y lo más homogénea posible.

- Que el espesor de la pieza sea, por lo menos, doble del diámetro de la huella.
- Que la distancia del centro de la huella al borde de la pieza sea, por lo menos, cuatro veces el diámetro de la huella.

Figura 19. **Huella en ensayo Brinell**



Fuente: www.e-ducativa.catedu.es. Consulta: agosto de 2016.

La bola que se utiliza es de aproximadamente 10 mm de diámetro. La bola es forzada a penetrar el material que está siendo probado durante un tiempo determinado de 15 S, y después se retira la presión de la bola para medir la huella. Si el material es muy duro, la bola podrá ser de carburo de tungsteno, mientras que una bola de acero de fricción es suficiente para las sustancias más suaves.

La cantidad de presión también varía en función del material, pero una cantidad estándar de presión para las sustancias más duras es 3 000 kilogramos. No se utilizan los ensayos Brinell para durezas superiores a 500 en aceros templados, porque se deformaría la bola.

La fórmula divide la fuerza utilizada por la superficie de la huella:

$$HBS = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Donde

P = Carga en Kg

D = Diámetro de la bola (10mm)

d= Diámetro de la huella en mm

El valor de la carga viene dado por $P = KD^2$, donde K es la constante de ensayo, el tiempo de ensayo es de 10 a 15 segundos según norma ASTM E10-78.

Los valores K para algunos materiales son:

- Aceros y elementos siderúrgicos: K=30
- Cobres, bronces y latones: K=10
- Aluminio y aleaciones: K=5
- Materiales blandos estaño y plomo: K=2,5.

Al medir la dureza Brinell de un material, es proporcional a la lista de las condiciones de la prueba, y se utilizan medidas métricas. La lista comienza con el número de dureza Brinell, sigue con el tipo de ensayo, seguida en el diámetro de la bola, la cantidad de fuerza aplicada, y la cantidad de tiempo.

El resultado del ensayo se escribe de la siguiente manera:

XXXHB D/P/t

XXX= Resultado del ensayo

HB = Dureza Brinell

D = Diámetro de la bola (10mm)

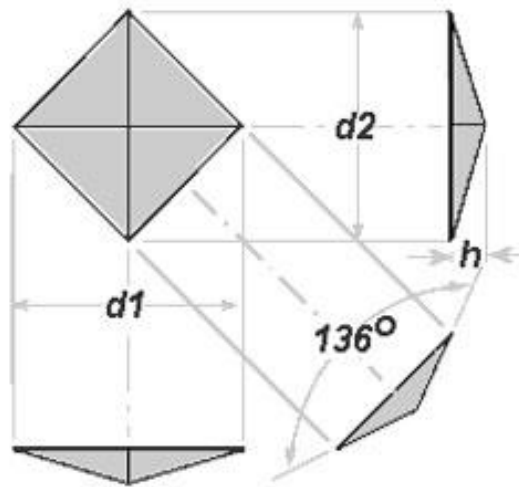
P = Cantidad de fuerza aplicada

t = Tiempo de aplicación de la carga

- Ensayo Vickers

El ensayo Vickers HV es como el ensayo Brinell, con la diferencia que en el ensayo Vickers el cuerpo del penetrador tiene forma de pirámide cuadrangular de diamante, cuyo ángulo en el vértice es de 136° . Es un método muy difundido, ya que permite medir dureza en prácticamente todos los materiales metálicos independientemente del estado en que se encuentren y de su espesor. Se basa en el principio de calcular el valor de dureza relacionando la fuerza de aplicación sobre la superficie de la impresión en el material y su campo de aplicación es de muestras medianas.

Figura 20. **Huella en ensayo Vickers**



Fuente: www.struers.com. Consulta: febrero de 2016.

El equipo consiste en una máquina que soporta la probeta y permite un contacto gradual y suave entre esta y el penetrador, bajo una carga predeterminada que es más ligera que la utilizada en el ensayo Brinell y que se aplica durante un periodo de tiempo dado. Sus cargas van de 50 a 1 250 N.

El diseño de la máquina debe ser tal que no tenga balanceos o movimientos laterales de la probeta o del penetrador, mientras se aplica o retira la carga, se utiliza un microscopio de medición que generalmente va montado en la máquina. El penetrador es aplicado perpendicularmente a la superficie cuya dureza se desea medir, bajo la acción de una carga P . Esta carga es mantenida durante un cierto tiempo, después del cual es retirada y medida la diagonal d de la impresión que quedó sobre la superficie de la muestra. Con este valor y utilizando tablas apropiadas se puede obtener la dureza Vickers, que es caracterizada por HV y definida como la relación entre la carga aplicada

expresada en kgf y el área de la superficie lateral de la impresión. Puede medir dureza superficial por la poca profundidad de la huella.

La huella vista desde arriba es un cuadrado y se calcula partiendo de la fuerza en N y de la diagonal en mm² de la huella de la pirámide según la fórmula: $HV = 1,854 \frac{P}{d^2}$

Donde

P= Carga aplicada en N

d= Diagonal media de la huella en mm, promedio de las huella d₁ y d₂

Este tipo de ensayo es recomendado para durezas superiores a 500 HB. Este procedimiento es apropiado para aceros nitrurados y cementados en su capa externa, piezas de paredes delgadas de acero, metales no férreos, materiales templados o muy endurecidos, piezas delgadas con espesores mínimos hasta de 0,2 mm. Y puede usarse en superficies no planas.

El resultado del ensayo Vickers se escribe de la siguiente manera: XXX HV YY.

Donde:

XXX = Número de dureza

HV = Dureza Vickers

YY = Carga en kg

- Ensayo Rockwell

El ensayo Rockwell HR se basa en la resistencia que oponen los materiales a ser penetrados, pero en lugar de determinar la dureza del material

en función de la superficie de la huella que deja el cuerpo penetrante, se determina en función de la profundidad de esta huella. El número de dureza encontrado es una función del grado de penetración de la pieza de ensayo por la acción de un penetrador bajo una carga elástica dada. La diferencia de este ensayo es que los penetradores y las cargas son menores, de ahí que la huella resultante sea menor y menos profunda.

Consiste en una máquina especialmente diseñada que aplica la carga a través de un sistema de pesas y palancas. El ensayo se realiza con un penetrador de diamante en forma de cono de 120° con la punta redondeada, con radio de $0,2 \pm 0,01$ mm, y bolas de acero templado de diferentes diámetros como $1/8''$ y $1/16''$, y las menos empleadas $1/2''$ y $1/4''$.

El valor de la dureza se lee directamente sin necesidad de cálculos, en un indicador de carátula con dos graduaciones, una escala con números negros que cuenta con 100 divisiones, para las mediciones con punta de diamante o también llamado penetrador Brale y otra escala con números rojos que tiene 130 divisiones, para las mediciones realizadas con bolas.

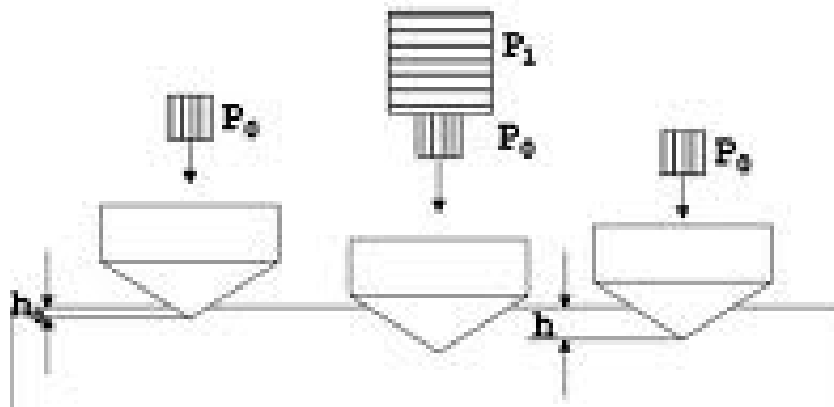
En total existen 21 escalas para 21 combinaciones de penetradores y cargas. Se utilizan cargas de 60, 100 y 150 kg, para materiales gruesos, y de 15, 30 y 45 kg, para materiales delgados.

El espesor mínimo que deben tener las piezas o probetas para que no resulte incorrecta la lectura por deformación, es diez veces la penetración del cono o de la bola. Las cargas se aplican en dos tiempos. Primero se aplica una carga de 10 Kg, poniendo a continuación el indicador que mide la penetración a cero. Después se completa la carga, hasta llegar a la carga total del ensayo y se mide la dureza. Se determina reduciendo del número 100, si se ensaya con

punta de diamante, y del 130 si se ensaya con bola, las unidades de penetración permanente medidas en 0,002 mm. Esto se hace para que a los materiales más duros correspondan más unidades de dureza que a los blandos. La carga total P es aplicada sobre el penetrador en dos etapas: una previa P_0 y una posterior P_1 tal que: $P = P_0 + P_1$

Inicialmente el cono penetra en la superficie una cantidad h_0 sobre la acción de la carga P_0 que se mantendrá hasta el fin del ensayo. Esta penetración inicial permite eliminar la influencia de las condiciones superficiales.

Figura 21. **Ensayo Rockwell con cono**



Fuente: Federación de Enseñanza de CC. OO. De Andalucía. *Ensayos Destructivos Metalúrgicos*. Primera parte. P 11.

El resultado del ensayo Rockwell se escribe de la siguiente manera: nHRx

Dónde:

n = Resultado del ensayo

HR = Dureza Rockwell

x = Escala

Figura 22. Escalas de dureza Rockwell

| Escala | Indentador | Carga Total | Color de escala | Aplicaciones |
|--------|----------------------|-------------|-----------------|--|
| A | Cono diamante | 60 | Negro | Metales duros, superficies templadas, chapa fina (<0,4 mm) |
| D | Cono diamante | 100 | Negro | Piezas con superficies templada de dureza media, chapas |
| C | Cono diamante | 150 | Negro | Aceros templados |
| F | Bola de ϕ 1/16" | 60 | Rojo | Aleaciones cobre recocido. Chapa fina metálica (>0,6 mm) |
| B | Bola de ϕ 1/16" | 100 | Rojo | Aceros blandos, de construcción, metales no ferrosos |
| G | Bola de ϕ 1/16" | 150 | Rojo | Bronce, cobre-berilio, cobre-níquel, fundición maleable |
| H | Bola de ϕ 1/8" | 60 | Rojo | Aluminio, zinc, plomo |
| E | Bola de ϕ 1/8" | 100 | Rojo | Fundición, aleaciones Al-Mg, metales antifricción o sintéticos |
| K | Bola de ϕ 1/8" | 150 | Rojo | Metales antifricción o de dureza muy baja, Ebonita (ASTM D530-59T), Madera laminada (ASTM D 805-52), Materiales sintéticos (ASTM D-785-60T), Otros materiales muy blandos o muy finos. |
| L | Bola de ϕ 1/4" | 60 | Rojo | |
| M | Bola de ϕ 1/4" | 100 | Rojo | |
| P | Bola de ϕ 1/4" | 150 | Rojo | |
| R | Bola de ϕ 1/2" | 60 | Rojo | |
| S | Bola de ϕ 1/2" | 100 | Rojo | |
| V | Bola de ϕ 1/2" | 150 | Rojo | |

Fuente: Norma ASTM E18. Consulta: marzo de 2016.

○ Ensayo Poldi

El ensayo Poldi es una variante de la dureza Brinell, que consiste en un equipo portátil, donde el impulso se comunica directamente a un dardo de acero, golpeado con un martillo aplicado directamente con la mano. Debemos colocar el material a ensayar entre el dardo de acero y la bola.

Se mide el diámetro de la huella marcada por una bola. Se diferencia del Brinell en que la presión no se efectúa progresivamente, sino instantáneamente por choque y que la carga que actúa es variable. Al dar un golpe con el martillo, se marca una huella en cada una de las superficies, si ambos materiales tienen la misma dureza las huellas serán del mismo diámetro, si la pieza a ensayar es más dura su huella será menor, midiendo ambos diámetros podemos por medio

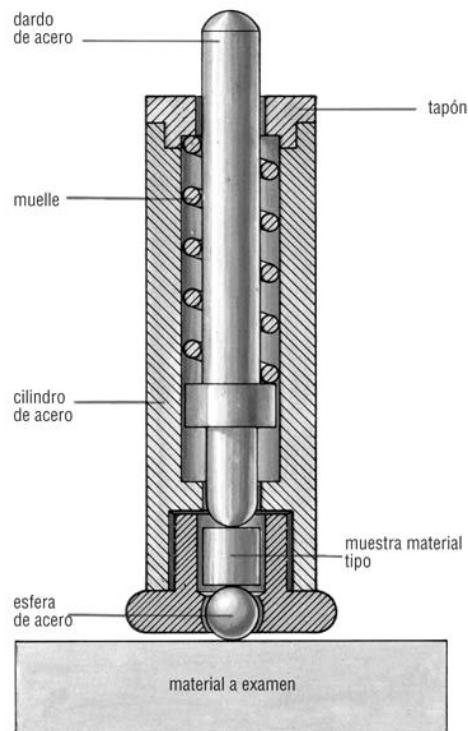
de una tabla conocer la dureza Brinell del material que se ensaya, es independiente del tiempo de carga.

Si H_p es la dureza del patrón y H de la pieza, y S_p es la superficie de la huella patrón y S la de la pieza a ensayar, se obtiene:

$$H_p/H = S_p/S \rightarrow H = (S_p/S) \cdot H_p$$

El resultado se escribe de la siguiente manera: XXXHBS D POLDI, donde XXX es la es la carga aplicada en Kg y S la dureza en la escala de Poldi.

Figura 23. **Diagrama del ensayo de Poldi**



Fuente: Federación de Enseñanza de CC. OO. De Andalucía. *Ensayos Destructivos Metalúrgicos*. Primera parte. p. 9.

- Ensayo Knoop

El ensayo Knoop es similar al ensayo Brinell o Vickers, lo que varía es el penetrador, y se utiliza para medir la dureza en valores de escala absolutas y se valoran con la profundidad de señales grabadas sobre un material mediante un indentador con una punta de diamante al que se le ejerce una fuerza estándar.

El penetrador Knoop produce una huella relativamente poco profunda, aproximadamente 1/30 de la longitud de la diagonal mayor, cuando se compara con una carga realizada por penetrador Vickers.

Consiste en presionar en un punto con un diamante piramidal sobre la superficie pulida del material a probar con una fuerza conocida, durante un tiempo de empuje determinado, y la hendidura resultante se mide usando un microscopio. Se emplea un penetrador de diamante piramidal de base rómbica de geometría con relación entre diagonales de 1:7, sus ángulos entre aristas son $a = 130^\circ$ y $b = 172,5^\circ$, de donde obtenemos:
$$HK = \frac{\text{Carga}}{\text{Área de impresión}} = \frac{P}{C_p L^2}$$

Donde:

L= Longitud de la hendidura en su eje largo

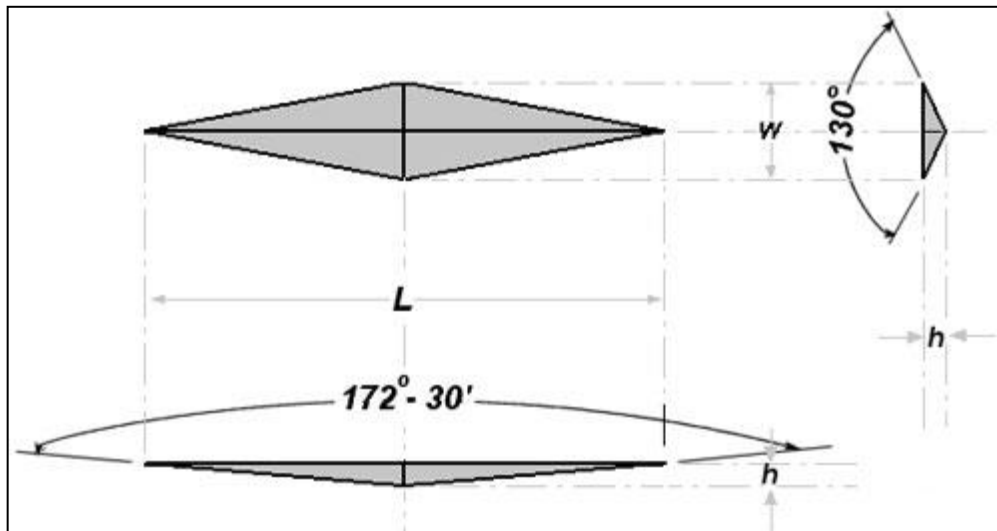
Cp. = Factor de corrección relativo, idealmente 0,070279

P = Carga en kgf

Entre las ventajas de esta prueba está que se necesita sólo una cantidad de muestra muy pequeña y que es válida para un rango muy amplio de fuerzas.

La principal desventaja es la dificultad de tener que usar un microscopio para medir la incisión con una precisión de 0,5 micrómetros, y el tiempo necesario para preparar la muestra y aplicar el penetrador o hendidor.

Figura 24. **Huella de ensayo Knoop**



Fuente: Federación de Enseñanza de CC. OO. De Andalucía. *Ensayos Destructivos Metalúrgicos*. Primera parte. p. 13.

El resultado del ensayo se escribe de la siguiente manera: XXX HK P/t.

Donde:

XXX= Resultado del ensayo

HK= Dureza Knoop

P= Carga en kgf

t= Tiempo en segundos

3.1.1.2. **Tensión**

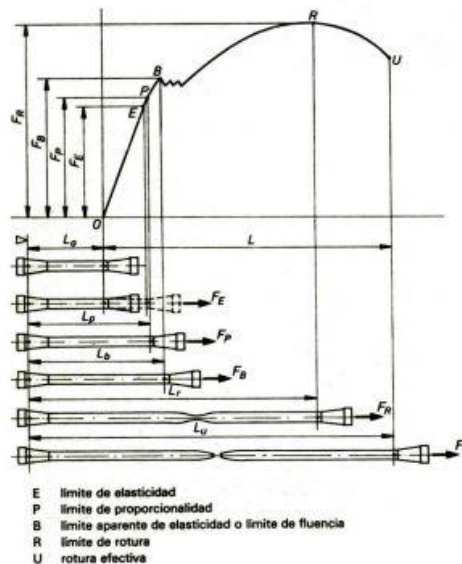
El ensayo de tensión o de tracción se realiza en una máquina universal, formada principalmente de una bancada robusta para darle mejor apoyo y más estabilidad a la máquina cuando aplicamos las cargas durante el ensayo. Dicha

bancada forma un conjunto con dos ejes verticales (+Y, -Y), que sirven para subir o bajar.

Las probetas para ensayos de tensión se fabrican con forma y dimensiones normalizadas por la ASTM. La sección transversal de la probeta puede ser redonda, cuadrada o rectangular. Se utiliza en la mayoría de los casos una probeta de sección redonda para ensayos de metales. Para placas y láminas normalmente se utiliza una probeta metálica plana.

El ensayo de tensión consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tensión creciente hasta que se produce la rotura de la probeta, con el objetivo de determinar las siguientes propiedades mecánicas: la resistencia mecánica, el límite de elasticidad, el alargamiento y la rotura.

Figura 25. **Diagrama esfuerzo-deformación**



Fuente: Federación de Enseñanza de CC. OO. De Andalucía. *Ensayos Destructivos Metalúrgicos*. Segunda parte. p. 2.

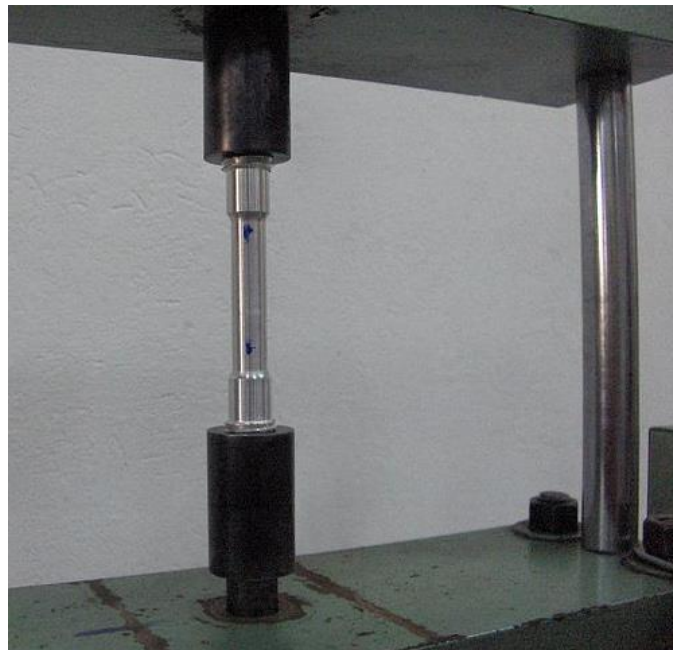
Existen dos tipos de rotura, para materiales dúctiles, la rotura produce un cono de 45° y para los materiales frágiles, la rotura es de 90° respecto al eje.

Observando el diagrama del ensayo de tensión de un metal dúctil, podemos destacar los siguientes conceptos:

- Límite de proporcionalidad, corresponde al valor de la tensión por debajo de la cual el alargamiento es proporcional a la carga aplicada.
- Límite de elasticidad, es la tensión máxima que un material elástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes, cualquier carga superior al límite elástico producen deformaciones permanentes.
- Límite aparente de elasticidad o límite de fluencia, es el esfuerzo unitario al cual la curva esfuerzo-deformación unitaria exhibe un aumento bien definido en deformación sin aumento en el esfuerzo
- Carga unitaria de rotura, es la carga máxima aplicada durante el ensayo viene expresada en N.
- Alargamiento, es la longitud que aumenta la probeta hasta que se rompe. Donde δ es el alargamiento, L_0 es la longitud inicial de la probeta y L_f es la longitud de la probeta estirada, ambas expresadas en milímetros.
- Módulo de elasticidad o módulo de Young, es un tipo de constante elástica, que relaciona una medida relacionada con la tensión, y una medida relacionada con la deformación.

Esta se basa en la ley de Hooke que expresa la relación constante que existe entre los esfuerzos y los alargamientos unitarios y se representa por la letra E.

Figura 26. **Ensayo de tensión**



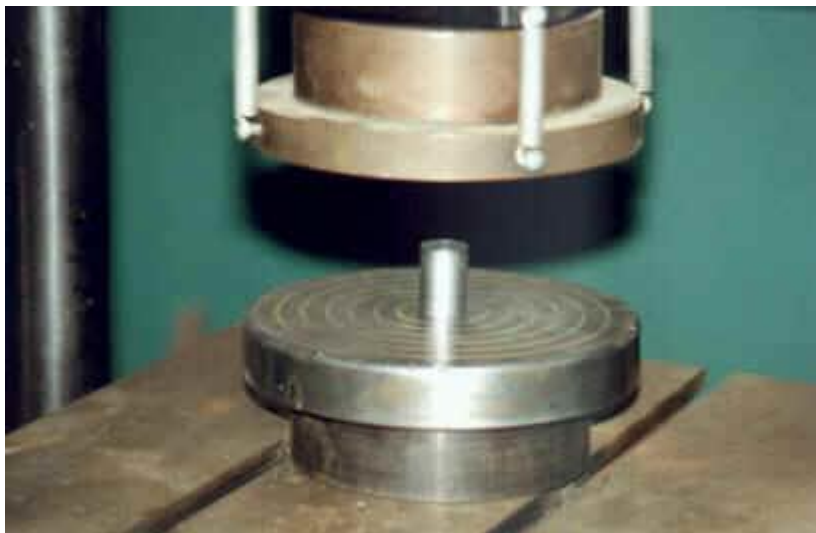
Fuente: <https://www.flickr.com/photos/36588929@N07/>. Consulta: agosto de 2016.

3.1.1.3. Compresión

El ensayo de compresión se realiza en la máquina universal, la misma que la del ensayo de tensión. Es un ensayo menos empleado que el ensayo de tensión, aplicándose sobre todo en probetas de materiales que van a trabajar a compresión, como aceros, fundiciones, piezas acabadas y hormigones.

El ensayo de compresión consiste en aplicar una carga estática a una probeta en dirección longitudinal de su eje, que tiende a provocar un acortamiento de la misma y cuyo valor se irá incrementando hasta la rotura, aplastamiento o suspensión del ensayo. Este ensayo estudia el comportamiento de un material sometido ante fuerzas o cargas de compresión progresivamente crecientes. En los materiales elásticos no existe una carga de rotura por compresión, ya que se aplastan sin romperse.

Figura 27. **Ensayo de compresión**



Fuente: www.oni.escuelas.edu.ar. Consulta: agosto de 2016.

En los ensayos de compresión la forma de la probeta tiene gran influencia, por lo que todos ellos son de dimensiones normalizadas por las normas ASTM. La probeta normal para materiales metálicos es un cilindro cuya altura es igual al diámetro, pero también existe otro tipo de probetas que se denominan probetas medianas donde la altura es 3 veces el diámetro y la probeta grande la

cual tiene una altura de 8 a 10 veces el diámetro, aunque esta última es poco empleada debido a los problemas de pandeo.

Todas las consideraciones tenidas en cuenta en el ensayo de tensión son válidas con sólo tener en cuenta que cambia de sentido las cargas y deformaciones. La resistencia a compresión de todos los materiales siempre es mayor que a tensión. Se suele usar en materiales frágiles. Hay que tener mucho cuidado en la colocación correcta de la probeta, de no ser así se obtendría un resultado incorrecto.

Figura 28. **Probetas ensayo de compresión**



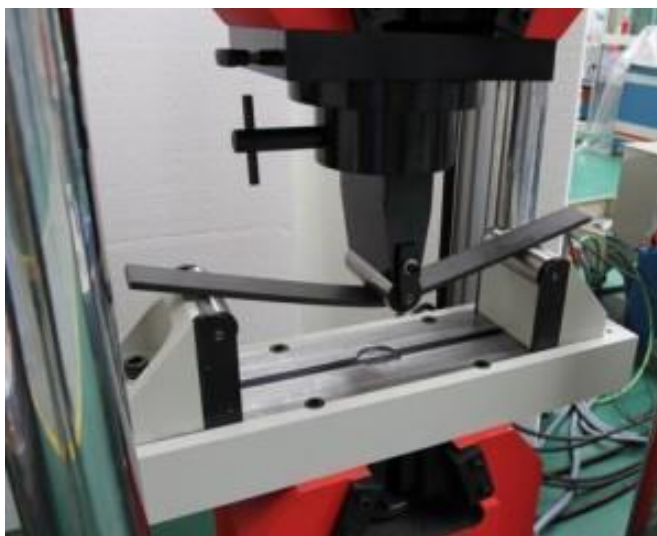
Fuente: Laboratorio de Proceso de Manufactura 1, T7. Facultad de Ingeniería.

3.1.1.4. Flexión

El ensayo de flexión se realiza en la máquina universal, la misma que la del ensayo de tensión y compresión, este ensayo se puede hacer de diferentes formas en función del ensayo, siendo estos de un solo apoyo, de dos apoyos y de cuatro apoyos.

Se utiliza para el estudio principalmente de fundiciones, de arcos y vigas, que son elementos estructurales pensados a trabajar predominantemente en flexión.

Figura 29. **Ensayo de flexión**



Fuente: www.ibertest.es. Consulta: agosto de 2016.

El ensayo de flexión consiste en someter a una deformación plástica una probeta recta de sección circular o poligonal, mediante el pliegue de ésta, sin inversión de su sentido de flexión, sobre un radio especificado al que se le

aplica una presión constante. Es importante que se cumplan dichas condiciones, ya que todos los materiales oponen una resistencia contraria a cada cambio de forma o deformación. Es una prueba casi estática que determina el módulo de flexión, el estrés de flexión y la deformación por flexión.

Este esfuerzo de flexión se obtiene cuando se aplican sobre un cuerpo, pares de fuerza perpendiculares a su eje longitudinal, de modo que provocan el giro de las secciones transversales con respecto a los inmediatos.

Si el efecto de fuerza es pequeño, no se somete la resistencia del material. Si este se encoje a su posición inicial nuevamente, la deformación fue elástica, llamándose elasticidad recuperadora, si el efecto de fuerza es mayor a la resistencia del material, se presenta una deformación plástica, donde el material finalmente se recoge en el tamaño de su dilación elástica. Por eso se debe tener siempre en cuenta la medida de la elasticidad recuperadora en el flexionamiento y en la torsión.

Los resultados de esta prueba describen el comportamiento de un material a través de un diagrama de esfuerzo-deformación, al igual que las pruebas de compresión y tensión.

3.1.2. Ensayos dinámicos

Se les denomina ensayos destructivos dinámicos porque la carga que se le aplica esta no es estática ni progresiva, los ensayos dinámicos más comunes son: ensayo de desgaste, ensayo de fatiga y el más conocido el ensayo de impacto o también llamado ensayo de Charpy.

3.1.2.1. Desgaste

El ensayo de desgaste por abrasión se realiza en una máquina especial, formada por una bancada robusta que irá en función de las dimensiones de las piezas a ensayar. Esta es movida gracias a un potente motor que transmite el movimiento a la pieza a ensayar o en su defecto al material abrasivo, pudiendo ser este movimiento de giro horizontal o vertical, en función del ensayo.

Las chispas producidas durante el ensayo son retenidas gracias a una carcasa que envuelve al conjunto y aspiradas para su retirada. También llevan un depósito para el abrasivo y un almacén de recogida de este, en la parte inferior.

Figura 30. **Máquina de ensayo de desgaste**



Fuente: <http://www.testerinchina.es>. Consulta: marzo de 2016.

Las probetas que se analizan en este ensayo pueden ser cilíndricas, chapas o incluso piezas ya terminadas para comprobar su resistencia al desgaste.

El ensayo de resistencia por abrasión nos permite conocer el nivel de desgaste de una pieza que estamos ensayando para predecir cómo se comportará cuando llegue al mundo real. Se utiliza para la evaluación de la resistencia a la abrasión de los tratamientos térmicos, los tratamientos termoquímicos, para la protección contra la oxidación y acabados

Su funcionamiento consiste en aplicar una acción de desgaste mediante una rueda cilíndrica sobrecargadas con un determinado peso, las cuales van recubiertas con papel de lija previamente acondicionado y específico según la norma considerada. En ocasiones, el abrasivo utilizado consiste en ruedas o muelas abrasivas con determinada acción de desgaste que requieren de una regeneración cada cierto número de ciclos. Cuando se utiliza papel de lija también debe sustituirse cada cierto número de ciclos, para mantener constante la acción de desgaste.

Además de valorar el deterioro de la zona sometida a abrasión, también es factible en otros casos, especialmente cuando se ensayan procesos con tratamientos térmicos, superficiales y tratamientos contra la oxidación, con el fin de determinar la pérdida de miligramos cada 100 ciclos o cada 1 000 ciclos de abrasión. Es entonces necesario ir pesando la probeta de ensayo al inicio y tras un número de ciclos dado, para ver la pérdida de masa producida y determinar así la resistencia a la abrasión sin exceder la capa de película aplicada.

3.1.2.2. Fatiga

El ensayo de fatiga se puede realizar en una máquina especial o en una universal, este ensayo es aquel en el que la pieza está sometida a esfuerzos variables en magnitud y sentido, que se repiten con cierta frecuencia y que pueden romper la probeta con cargas inferiores a las de rotura, si el número de ciclos de actuación es muy grande puede llegar la rotura dentro de la zona elástica. La rotura consiste en un inicio y posterior propagación de fisuras, que crecen desde un tamaño inicial microscópico hasta un tamaño macroscópico capaz de comprometer la integridad estructural del material.

Este ensayo es de suma importancia en el campo industrial, debido a que nos prevé de complicaciones como el fallo de un determinado componente funcional que forme parte esencial de alguna máquina. Esto es de suma importancia ya que cuando alguna pieza falla por fatiga no hay una señal previa visible, así que un adecuado análisis de la pieza nos va ayudar desde prevenir accidentes hasta lograr mantener el correcto funcionamiento de los equipos sin tener que hacer cortes repentinos en el ciclo de producción.

Figura 31. **Ensayo de fatiga**



Fuente: www.upv.es. Consulta: agosto de 2016.

Podemos realizar distintos ensayos de fatiga entre estos el ensayo de torsión, ensayo de flexión plana, ensayo de flexión rotativa y ensayo de tracción-compresión.

El ensayo consiste en hacer girar una probeta por medio de un motor, mientras se le aplica una carga conocida. La probeta queda sometida a una flexión alternada, que se traduce en que un punto cualquiera de la probeta queda sometido a un ciclo de cargas que va de tracción a compresión. Esto produce fisuras que se van propagando lentamente reduciendo el área hasta un punto tal en que la probeta no pueda resistir la carga aplicada y se rompe. Por lo general, el ensayo se repite con probetas idénticas y varias cargas fluctuantes.

Los ensayos de fatiga se clasifican por el espectro de carga-tiempo, pudiendo presentarse como:

- Ensayo de fatiga de amplitud constante.
- Ensayo de fatiga de amplitud variable.

El ensayo de fatiga de amplitud constante evalúa el comportamiento a la fatiga mediante ciclos predeterminados de carga o deformación, generalmente senoidales o triangulares, de amplitud y frecuencia constantes. Son de ampliación en ensayos de bajo como de alto número de ciclos, ponderan la capacidad de supervivencia o vida a la fatiga por el número de ciclos hasta la rotura.

El ensayo de fatiga de amplitud variable es cuando la amplitud del ciclo es variable, se evalúa el efecto del daño acumulado debido a la variación de la amplitud del esfuerzo en el tiempo. Son ensayos de alto número de ciclos con control de carga, que según el espectro de carga elegido serán más o menos representativos de las condiciones de servicio.

3.1.2.3. Impacto (*Charpy*)

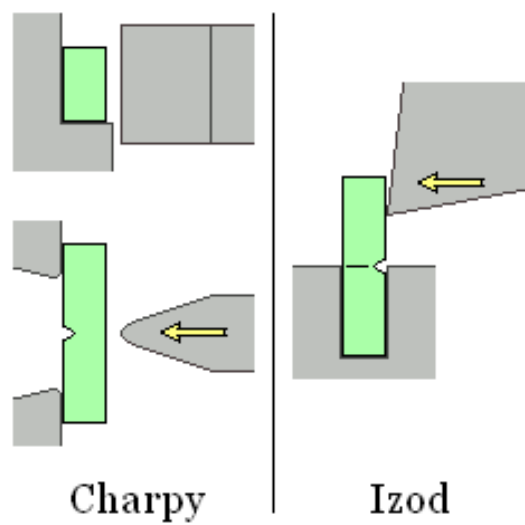
El ensayo de resiliencia o ensayo dinámico por choque se realiza normalmente en máquinas denominadas péndulos o martillos pendulares (denominados Izod en 1903 y Charpy en 1909), formados por una base rígida con dos soportes verticales, unidos en la parte superior por un eje horizontal donde va acoplado el brazo giratorio, donde en su extremo hay un martillo en forma de disco, con el que golpea a la probeta, en las que se verifica el comportamiento de los materiales al ser golpeados por una masa conocida a la que se deja caer desde una altura determinada.

Figura 32. **Ensayo de impacto**



Fuente: www.fundicionesgomez.com. Consulta: agosto de 2016.

Figura 33. **Diferencias entre Izod y Charpy**

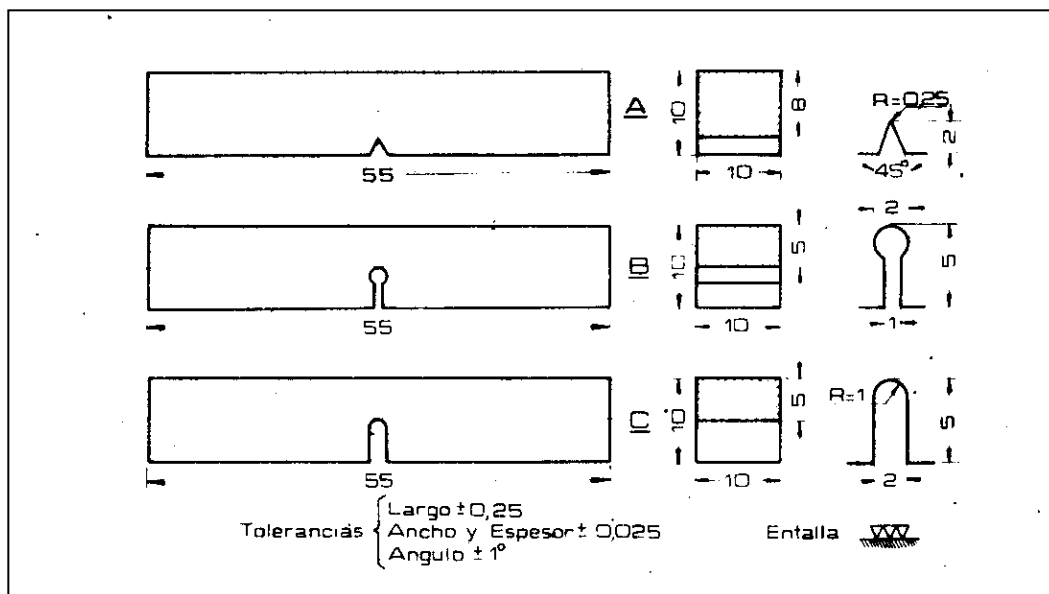


Fuente: http://enciclopedia.us.es/index.php/Ensayo_de_resiliencia. Consulta: marzo de 2016.

Los valores obtenidos en estos ensayos son únicamente comparables, en materiales con propiedades similares ya sean siempre dúctiles o frágiles, cuando se realizan sobre el mismo tipo de probeta y en idénticas condiciones de ensayo.

La elección del tipo de probeta depende del material a ensayar, adoptándose para cada caso los resultados más satisfactorios; normalmente se emplean las de entalladuras más profundas y de menor ancho para los materiales más dúctiles, el impacto sobre las probetas de sección trapezoidal debe darse en la cara más angosta, el filo o extremo de la masa pendular, la norma ASTM E-23 indica que debe presentarse un ancho de aproximadamente de 4 mm, redondeado con un radio de 8 mm

Figura 34. **Probetas normalizadas**



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos14/choque/choque.shtml>. Consulta: marzo de 2016.

Dicho ensayo determinará el trabajo absorbido por el material cuando este es roto de un solo golpe por la masa pendular y su valor en Joule, o relacionándolo con la sección o volumen de la probeta, según el método nos indicará la resistencia al choque o capacidad del material para absorber cargas dinámicas de impacto o resiliencia, proporcionándonos una medida de la tenacidad del material e indirectamente de su ductilidad ya que en general existe una relación entre ambas características.

El valor numérico en Joule del trabajo gastado durante la rotura de la probeta, queda indicado sobre una escala graduada que posee la máquina. El trabajo o energía registrada será considerada aceptable cuando las pérdidas por fricción entre las partes metálicas de la máquina, para la marcha en vacío, sea inferior al 0,4 % de la energía máxima.

Las fracturas por flexión y por choque se originan por la acción de las tensiones normales máximas en el plano de la entalla, variando desde la completamente frágil, cristalina brillante u opaca, hasta la completamente dúctil por deslizamiento o fibrosa. La resiliencia es la cantidad de energía que puede absorber un material, antes de que comience la deformación irreversible.

El resultado obtenido, es un valor indicativo de la fragilidad o la resistencia a los choques del material ensayado. Un elevado grado de resiliencia es característico de los aceros austeníticos, aceros con alto contenido de austenita.

3.1.3. Ensayos tecnológicos

En los ensayos tecnológicos se tiende a organizar las pruebas de manera que estas satisfagan las exigencias técnicas que se especifican en el material y

en toda la pieza, en este caso hay que dejar establecida una base de cálculo, no tan completa como en los ensayos científicos, sino más bien como la que necesita el diseñador o la que se requiere para las comprobaciones posteriores. Aquí se trata de ordinario, o de estipular las repercusiones de influencias nada o poco mensurables procedentes de las materias primas o del proceso de fabricación, o de investigar la aptitud de los materiales para una operación especial de elaboración.

Algunas veces será también posible el obtener valores expresables en cifras, aunque sin poder atribuir estas a magnitudes físicas. Además se utilizan pruebas que representan una transición entre el ensayo científico y el tecnológico, existen diferentes tipos de ensayos tecnológicos entre los cuales se pueden mencionar el de soldabilidad, templabilidad, chispa, embutición y forjabilidad.

3.1.3.1. Soldabilidad

Los ensayos de soldabilidad nos permiten estudiar el comportamiento de la pieza a soldar durante la operación de soldeo. Este ensayo nos ayudará a conocer las dilataciones y las contracciones producidas en la pieza durante la ejecución del cordón, que irán en función de la temperatura de trabajo, del tamaño, espesor y forma de la pieza a soldar y de la temperatura inicial de misma. También nos facilitará el punto de fusión de la pieza, la velocidad de soldeo que debemos llevar durante la operación y la penetración del cordón de soldadura, así como; la intensidad de corriente a utilizar, la polaridad de trabajo, la soldabilidad, el tipo de electrodo a utilizar.

Este ensayo nos revelará si hará falta la utilización de elementos auxiliares como apéndices, para la realización de una buena soldadura. Nos

ayuda a conocer la técnica de soldeo más apropiada a las condiciones de trabajo.

Para determinar un ensayo de soldabilidad como aceptable este debe cumplir con tres condiciones:

- Soldabilidad operativa: que se pueda hacer la soldadura.
- Soldabilidad metalúrgica: que sean aceptables modificaciones físico-químicas.
- Soldabilidad constructiva: soldadura sensible a la deformación y resistencia mecánica igual al del material base.

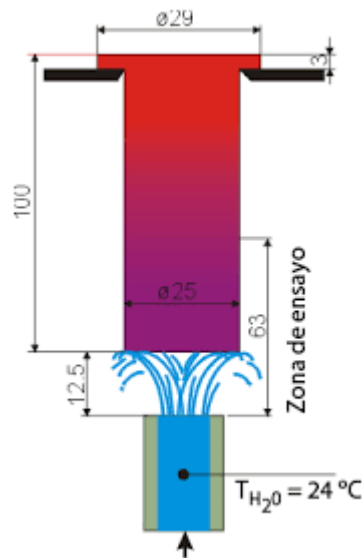
3.1.3.2. Templabilidad

El ensayo de templabilidad nos permite conocer de forma rápida algunas propiedades de los aceros como las durezas máximas y mínimas que se pueden obtener. La templabilidad es utilizada para describir la habilidad de una aleación para ser endurecida por la formación de martensita como resultado de un tratamiento térmico.

Está determinada por la profundidad y distribución de la dureza en el interior de las piezas templadas, es decir, la profundidad de temple que se alcanza en una pieza de acero. Cuando se disminuye la velocidad crítica de temple, aumenta la profundidad de la capa templada, si la velocidad crítica es menor que la velocidad de enfriamiento en el centro, esta sección se templará completamente, pero si la sección es grande y la velocidad de enfriamiento en la superficie es menor que la velocidad crítica, no se templará el acero ni siquiera en la superficie, por tanto cuanto menor sea la velocidad crítica de temple, tanto mayor será la templabilidad del acero. Un procedimiento estándar

que es ampliamente utilizado para determinar la templabilidad es el ensayo Jominy.

Figura 35. **Ensayo de Jominy**



Fuente: <http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos>. Consulta: marzo de 2016.

La templabilidad influye notablemente en los resultados cuando se ensayan piezas de bastante espesor y, en cambio, influyen muy poco cuando se templen piezas delgadas.

A mayor lentitud de transformación de la austenita en perlita, mayor templabilidad. La dureza máxima que se puede obtener en un acero después del temple, depende del contenido de carbono, la templabilidad depende en cambio de los elementos aleantes y del tamaño de grano del acero.

Los elementos que más favorecen la templabilidad son el manganeso, el molibdeno y el cromo. Con este ensayo se puede observar que la dureza

disminuye rápidamente del exterior al interior en el acero al carbono y se conserva más uniforme en el acero aleado.

Estas diferencias de penetración de la dureza se presentan por ser diferente la templabilidad de los aceros, vemos que la dureza y la templabilidad son cosas distintas. Para valorar prácticamente la templabilidad, se utiliza una magnitud que se llama diámetro crítico, que es el diámetro máximo de una barra cilíndrica en el que después del temple en ese medio de enfriamiento se consigue en su núcleo una estructura con 50 % de martensita.

Las probetas utilizadas para este ensayo normalmente son cilíndricas, de un diámetro de 25 mm y una longitud de 100 mm, aunque pueden ser de otras formas, depende del estudio en concreto que se realizara. Para temprar la probeta deber de ser calentada a la temperatura de austenización durante 30 minutos con un margen de aproximadamente 5 minutos, se debe procurar que la atmósfera dentro del horno este controlada y que no aparezca cascarilla.

Una vez terminado el calentamiento, se coloca la probeta en un dispositivo, donde se puede apreciar que el chorro de agua incide directamente en la parte inferior de la probeta, el tiempo mínimo de enfriamiento de la probeta debe ser de 10 minutos.

Una vez terminado el enfriamiento se mide la dureza a cada cierta distancia a lo largo de la longitud total de la probeta y luego se registran los resultados en una gráfica donde se relaciona la dureza y la distancia al extremo templado.

3.1.3.3. Maquinabilidad

El ensayo de maquinabilidad nos permite comparar entre metales diferentes, la facilidad con que pueden ser mecanizados por arranque de viruta que es un fragmento del material residual con forma de lámina curvada o espiral que se suele considerar residuo en algunas industrias pero que tienen alguna aplicación.

Un factor que indica una buena maquinabilidad de un material es la posibilidad de controlar fácilmente la longitud de la viruta resultante, esto se puede lograr con el ángulo de ataque de la herramienta de corte, en el caso del hierro fundido la viruta saldrá en forma de pequeñas láminas esto debido a las discontinuidades causadas por el grafito. Las virutas largas y delgadas pueden enredarse e interferir en las operaciones de corte. Los factores que suelen mejorar la resistencia de los materiales a menudo degradan su maquinabilidad, por lo tanto, para una mecanización económica, los ingenieros enfrentan el reto de mejorar la maquinabilidad sin perjudicar la resistencia del material.

Figura 36. **Mecanización de pieza de hierro fundido**



Fuente: Laboratorio de Procesos de Manufactura1, T7. Facultad de Ingeniería.

Los materiales con mejor maquinabilidad como el bronce y el hierro fundido gris requieren potencias y fuerzas de corte reducida, con un desgaste lento de los filos de las herramientas de corte y pueden mecanizarse obteniendo superficies menos rugosas y, en general, un mejor acabado.

Los materiales duros son generalmente más difíciles de mecanizar pues requieren una mayor fuerza para cortarlos, es difícil definir cuantitativamente la maquinabilidad de un material, pues las operaciones de mecanizado tienen una naturaleza compleja.

Existen tablas y gráficos que proporcionan una referencia para comparar la maquinabilidad de materiales diferentes, pero son necesariamente imprecisas debido a la multitud de variables de proceso y otros factores externos que pueden tener una influencia significativa. Estas tablas suelen medir la maquinabilidad en términos de velocidad de corte para una determinada vida útil de la herramienta.

3.2. Ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos (END) son técnicas que emplean métodos físicos indirectos para la inspección de productos, partes, piezas o componentes en servicio, para detectar las discontinuidades o defectos que afecten su calidad o utilidad

Generalizando este concepto, se puede decir entonces que, los métodos de ensayo no destructivos son una modalidad de inspección y análisis de una de las mencionadas piezas, que permite la aplicación o utilización de la misma sin la introducción a través del ensayo, de modificaciones en sus características

físicas, químicas o mecánicas que puedan perjudicar su uso posterior, sola o como parte de un equipo o estructura en particular.

Los métodos de ensayo no destructivos se diferencian de los ensayos destructivos porque en los segundos es necesario destruir, parcial o totalmente, la pieza sujeta a ensayo para llevar a cabo el examen.

3.2.1. Superficiales

Estos ensayos son utilizados para la detección de discontinuidades superficiales, es decir, las que están en la superficie de la pieza sujeta a examen. Solamente existe el caso del método por partículas magnéticas, el cual también tiene la capacidad de detección de discontinuidades subsuperficiales, sin embargo, está enmarcado dentro de este primer grupo.

Entre los ensayos no destructivos superficiales con más aplicación están: el ensayo de inspección visual, ensayo de líquidos penetrantes y el ensayo de partículas magnéticas.

3.2.1.1. Inspección visual

Es el método más simple y ampliamente utilizado, sin embargo, tiene su metodología y sigue un procedimiento ordenado. Acarrea resultados rápidos y normalmente tiene costos bajos. De acuerdo a todos los códigos y normas conocidas, este método de ensayo es obligatorio y debe aplicarse a la pieza sujeta a control de calidad, antes que cualquier otro método que se quiera o deba utilizarse.

Los resultados obtenidos en la inspección visual pueden auxiliar en mucho, la aplicación posterior de otros ensayos no destructivos. El principio básico del ensayo visual es iluminar bien la pieza, en la región a inspeccionar, esta será examinada entonces, directamente al ojo humano o por medio de una lupa. En este sentido, el equipo requerido para el ensayo visual es extremadamente simple, además de una buena limpieza de la pieza sujeta a inspección, antes de ser examinada. Dentro del equipo básico necesario para aplicar adecuadamente el ensayo visual está la lupa, el espejo de dentista, la regla metálica, el metro, el calibrador vernier, boroscopio, endoscopio, cámaras, el micrómetro, una lámpara común. Para el caso específico de la soldadura, es necesario contar con galgas para medir las soldaduras y las discontinuidades, tales como: el socavado, la concavidad, la convexidad.

3.2.1.2. Líquidos penetrantes

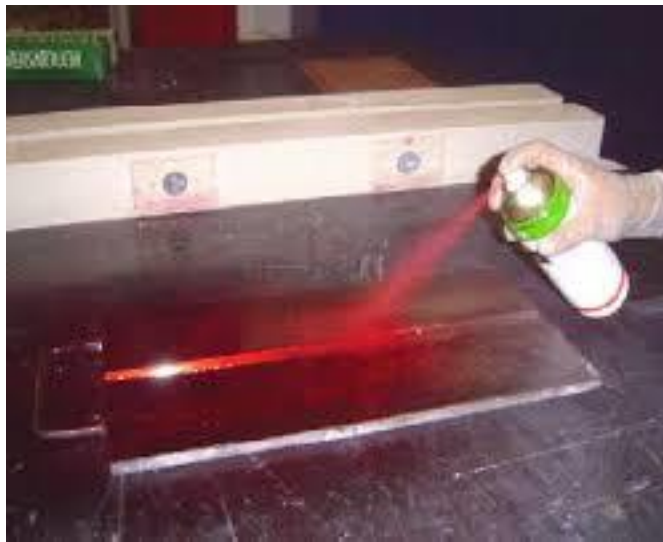
La inspección por líquidos penetrantes es un método de ensayo no destructivo para la detección de discontinuidades que haya en la superficie de la pieza sujeta a examen.

El método puede ser considerado como una extensión de la inspección por ensayo visual ya que muchas de las discontinuidades podrían no ser detectadas a través de este último, pero dicho ensayo debe ser llevado a cabo por un inspector experimentado.

Se dice que este método de ensayo se utilizó por primera vez en los orígenes de la industria del automovilismo, para detectar fisuras en los bloques de los motores y/o en las culatas de los mismos, en ese entonces, se aplicaba una capa generosa de aceite sobre la superficie a ser ensayada, este fluido se dejaba por un período aproximado de 24 horas, transcurrido ese tiempo, se

removía el exceso de aceite y finalmente se aplicaban talcos sobre dicha superficie, el talco extraía el aceite alojado sobre una posible fisura y la revelaba, dibujando la discontinuidad.

Figura 37. **Ensayo por líquidos penetrantes**



Fuente: www.essayosnoestructivos.com.mx. Consulta: agosto de 2016.

Actualmente se utiliza el mismo procedimiento, con la diferencia que ahora se emplean fluidos con alto grado de capilaridad, permitiendo estos que ahora se dejen sobre la superficie a inspeccionar por un tiempo no mayor de 30 minutos.

El efecto que se produce es el mismo, es decir, el líquido penetrante se aloja en la posible fisura luego se remueve el exceso de penetrante por medio de un líquido removedor o agua según sea el caso, finalmente, se aplica talco atomizado, llamado revelador, haciendo este el mismo efecto de “chupar” y

revelar el penetrante alojado en la discontinuidad, dibujando literalmente la fisura.

Para este método de ensayo se utilizan penetrantes generalmente de color fluorescente para aprovechar el contraste adecuado con el revelador que como debemos suponer, es de color blanco. Para esto se necesita, una lámpara de luz ultravioleta. Los líquidos penetrantes revelan una discontinuidad en una extensión tal que la inspección dependa menos del elemento humano para su visualización.

Esto hace que el método de ensayo se adapte más a un sistema de producción, aumentando la credibilidad en la rapidez de inspección. Puede ser utilizado tanto en materiales ferromagnéticos como en otro tipo de metales, teniendo la ventaja de ser un ensayo rápido, fácil de aplicar y relativamente barato. Sin embargo, tiene la desventaja de que solamente puede ser aplicado para revelar discontinuidades en la superficie de la pieza, que esta no tenga una geometría compleja y que su superficie sea lo más lisa posible. Además, todas las discontinuidades reveladas pueden tener una indicación de profundidad y tamaño aproximados, dependiendo de varios factores tales como el grado de dureza de material, combinado con el ancho de la indicación.

3.2.1.3. Partículas magnéticas

Este ensayo se utiliza para la detección y localización de discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales ferromagnéticos.

Su operación está basada en el hecho de que cuando la pieza a examinar, o un área de la misma, se magnetiza, las discontinuidades existentes causarán un campo de fuga en el campo magnético.

La presencia de este campo de fuga será detectada a través del uso de partículas ferromagnéticas finamente divididas, aplicadas sobre la superficie magnetizada, pues las mismas serán atraídas por el campo de fuga y se aglomerarán en el contorno del mismo, indicando su localización, forma y extensión.

El campo magnético se produce por medio de un simple imán o un electroimán, siendo este último el más comúnmente utilizado, teniendo el mismo forma de yugo o bien de una bobina, otra de las formas es utilizando la pieza como un conductor, creando el campo magnético alrededor de dicha pieza.

Las partículas aplicadas pueden ser secas o húmedas en suspensión en líquidos como agua o aceite, dichas partículas pueden ser de color rojo, anaranjado, gris, negras o de otros colores, para facilitar su visualización en la pieza sujeta a ensayo.

Figura 38. **Ensayo por partículas magnéticas**



Fuente: <http://ingenieriadelacero.com>. Consulta: abril 2016.

No obstante, hay ciertas limitaciones que tiene este método de ensayo y que deben ser plenamente conocidas por el inspector, tales como:

- Películas de pintura u otra capa no magnética sobre la pieza que pueden ocultar indicaciones, lo que hace que el resultado sea inexacto e inadecuado.
- El método solamente es aplicable a materiales ferromagnéticos.
- Para mejores resultados, el campo magnético debe tener una dirección que intercepte el plano principal de la discontinuidad, debido a esto, normalmente son requeridas dos o más secuencias de operaciones en una misma región de la pieza, en diferentes orientaciones del campo magnético.
- Es necesaria la desmagnetización de la pieza, después de haber concluido el ensayo.
- Para piezas de gran tamaño, son requeridas altas corrientes eléctricas.

3.2.2. Volumétricos

Estos ensayos son utilizados para la detección de discontinuidades tanto superficiales, como las que se localizan dentro del material sujeto a ensayo.

Los utilizados actualmente son:

- Ensayo por ultrasonido
- Ensayo por radiografía industrial

3.2.2.1. Ultrasonido

La inspección ultrasónica es un método de ensayo no destructivo para el cual grupos de ondas de alta frecuencia introducidas en el material inspeccionado, son utilizadas para detectar discontinuidades superficiales e internas.

Las ondas atraviesan el material con cierta atenuación y son reflejadas en las interfaces, este haz reflejado es detectado y analizado definiendo entonces, la presencia y localización de discontinuidades.

El ensayo ultrasónico se basa en el hecho de que la presencia de una discontinuidad o un cambio en la densidad del material actuará como si fuese un reflector de propagaciones de alta frecuencia impuesto allí mismo.

El equipo de ultrasonido posee un cabezal o palpador hecho de cuarzo o cualquier otro material piezoeléctrico, cuando una diferencia de potencial es aplicado, el cristal o palpador vibra a alta frecuencia y al ponerlo en contacto con la pieza sujeta a ensayo, esta vibración es transmitida a dicha pieza, viajando a través de la misma, hasta encontrar una discontinuidad o cambio de densidad.

Figura 39. **Ensayo por ultrasonido**



Fuente: <http://www.lortek.es>. Consulta: abril de 2016

En este punto, parte de esa vibración es reflejada de vuelta, llegando nuevamente al palpador y transmitiendo la misma al cristal del elemento piezoeléctrico, la cual se transformará en pulsos eléctricos que a la vez, podrán ser visualizados en la pantalla de un osciloscopio. La señal en el osciloscopio muestra la distancia a la que fue reflejada la misma la cual en realidad es la respuesta de la velocidad de propagación de la onda sónica de muy alta frecuencia que viajó a través del material inspeccionado.

El método de ensayo presenta muchas ventajas entre las cuales podemos mencionar:

- Alto poder de penetración, el cual permite la identificación de discontinuidades en grandes espesores.

- Alta sensibilidad del ensayo, permitiendo la detección de discontinuidades muy pequeñas.
- Mayor capacidad que otros métodos de ensayo no destructivo en la determinación de la posición de discontinuidades externas, estimando su forma, orientación, dimensión y naturaleza.
- Necesidad de acceso únicamente por una de las superficies de la pieza sujeta a ensayo.

3.2.2.2. Radiografía industrial

Es probablemente el método de ensayo más utilizado en la actualidad, sin embargo, es el más delicado en cuanto a su uso, debido a que para su ejecución aprovecha la energía de radiación a través de material radiactivo o bien, por medio de rayos “X”.

Figura 40. Ensayo por radiografía industrial



Fuente: www.gyninspecciones.com. Consulta: agosto de 2016.

El ensayo consiste en la obtención de una imagen del espécimen de prueba por medio de una película sensible a la radiación, la cual registra, tanto la parte interna, como la parte externa de dicha pieza, incluyendo todas las discontinuidades paralelas al haz de energía de la radiación que puedan estar dentro del área de incidencia.

La imagen que mencionamos se obtiene atravesando la pieza a examinar, con la energía de radiación "X" o Gamma, la cual es detectada por el otro lado de la pieza por medio de una película sensible, compuesta por aluros de Plata, esta está alojada dentro de una funda con pantallas de plomo de muy bajo espesor, aproximadamente 0,010 mm, las cuales producen electrones que ayudan a impresionar la imagen en la película radiográfica.

Para entender la imagen que se impresiona en la película radiográfica, hay que tener presente que la misma presenta una gama de tonos grises y claros, teniendo que identificar las que interesan para efectos de la interpretación, como una fotografía con imágenes peculiares y particularmente propias del objeto que se está examinando, la radiografía industrial es entonces, utilizada para detectar características de una región, de un determinado material o región de este, que presente una diferencia en el espesor o densidad, comparada con una región adyacente.

3.3. Equipos para realizar ensayos de materiales

En la actualidad existen distintos tipos de equipos diseñados para la realización de ensayos de materiales y poder determinar con mayor facilidad las propiedades mecánicas de dichos materiales.

Los equipos más conocidos y utilizados para la realización de ensayos de materiales:

- Máquina Universal de ensayos materiales
- Máquina de Impacto
- Durómetro

3.3.1. Máquina universal de ensayos de materiales

En ingeniería se denomina máquina universal a una máquina semejante a una prensa con la que es posible someter materiales a ensayos de tensión y compresión para medir sus propiedades. La presión se logra mediante placas o mandíbulas accionadas por tornillos o un sistema hidráulico. Esta máquina es ampliamente utilizada en la caracterización de nuevos materiales, incluso se ha utilizado en la medición de las propiedades de tensión de los polímeros.

Figura 41. **Máquina universal de ensayos**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, T5, Facultad de Ingeniería.

Las máquinas universales que trabajan con tornillos son accionadas por medio de un motoreductor, que hace girar los tornillos según sea la dirección en la que se necesite que actúe.

La carga aplicada es mostrada en un reloj, este posee dos agujas, una roja y otra negra de arrastre, las cuales son solidarias entre sí y deben encontrarse para que la aguja negra arrastre la roja, así, al momento de indicar la medición más alta soportada por el material en la prueba que se esté realizando la aguja roja se queda en ese valor para ser observado posteriormente para la realización de los cálculos necesarios.

Debe tenerse en cuenta que para cada tipo de ensayo debe utilizarse el aditamento y los accesorios necesarios requeridos para realizar la prueba. A continuación se sugieren recomendaciones para la correcta realización de ensayos de materiales en una máquina universal.

- La máquina no debe ser cargada por fuera de su centro o la fricción podrá afectar la precisión de los resultados y causar daño a la máquina.
- No debe excederse nunca la capacidad máxima de la máquina universal.
- Las mordazas deben ajustarse no muy herméticamente para que durante la prueba se permita un auto alineamiento.
- En el ensayo de compresión se debe localizar el centro de la probeta lo más cerca posible del centro de la máquina. Las dos placas tienen ranuras concéntricas para ayudar a centrar los accesorios y probetas.

3.3.2. Durómetro

El durómetro es un dispositivo de medición para determinar la dureza de un material. Existen distintos tipos de durómetros de acuerdo a las diversas clases de materiales, habiendo posibilidad de medir dureza tanto a un caucho como a un acero. Si bien la palabra durómetro en el mundo anglosajón sólo se emplea para denominar al equipo para medir dureza Shore, en Latinoamérica es ampliamente utilizada para identificar a todos los bancos de ensayo de dureza que existen.

El durómetro más conocido es el de profundidad diferencial Rockwell, que fue inventado por los hermanos Hugh y Stanley Rockwell, en el año 1914, en EEUU. La razón por la cual se desarrolló este dispositivo fue para medir los efectos del tratamiento térmico en los caminos de rodadura de rodamientos rígidos de bolas.

Figura 42. **Penetrador de diamante**



Fuente: Laboratorio de Ensayo de Materiales, Intecap, CG2.

Las escalas utilizadas con esta técnica son variadas, acorde a las distintas combinaciones de penetradores y cargas que se usen, pudiendo ensayar cualquier metal o aleación, tanto dura como blanda, por esta razón existen 9 escalas de dureza Rockwell, siendo la más conocida la escala de dureza Rockwell C, esta es utilizada para materiales templados o bajo tratamientos térmicos, luego está la escala de dureza Rockwell B, esta es la segunda más empleada en la industria ya que se utiliza para materiales tales como el acero sin tratamientos térmicos.

Hay dos clases de penetradores, los de bolas esféricas de acero endurecido con diámetros normalizados y los cónicos de diamante.

Figura 43. **Durómetro digital**



Fuente: Laboratorio de Ensayo de Materiales, Intecap, CG2.

Hoy en día es más común ver los durómetros digitales ya que estos nos presentan el resultado inmediatamente y su uso es mucho más fácil. Aunque siguen siendo muy funcionales y precisos los durómetros análogos.

3.3.3. Máquina de impacto

La máquina de impacto también conocida como péndulo de Charpy es utilizada en el ensayo de resiliencia o ensayo dinámico por choque, la máquina consta de dos paralelos paralelos, totalmente perpendiculares a su base fijada en el suelo, estos paralelos soportan un eje, el cual sostiene al péndulo, que en su

parte inferior tiene el martillo, el cual se puede cambiar según la prueba que se vaya a realizar (Charpy-Izod).

La estructura o todo el soporte de la máquina consisten en dos canales de acero que están paralelos entre sí, perpendiculares a la base.

Para anclar la estructura al piso se utilizan dos tornillos en cada una de las esquinas, uno de los tornillos es el de nivelación y el otro es el de anclaje, la estructura se nivela utilizando los tornillos de nivelación, y cuando se encuentra totalmente nivelada, se ajustan en el piso los tornillos de anclaje.

La máquina de impacto tiene un sistema de freno parecido al freno de disco de un vehículo, el cual permite en el momento de ser accionado, que el péndulo disminuya su velocidad poco a poco hasta detenerse definitivamente.

El martillo tiene un determinado peso y dimensiones que cumplen con la norma ASTM E23. En la base se encuentra una prensa o soporte de la probeta intercambiable para el ensayo que se vaya a realizar (Charpy-Izod), su fin es sujetar las probetas cuando el péndulo las golpea

El sistema de freno debe ser accionado por la manivela exclusivamente, para esto, es necesario que un segundo tenga las dos manos sobre la manivela de freno en el momento de liberar el péndulo.

Figura 44. **Máquina de impacto**



Fuente: <http://www.cyti.com.mx>. Consulta: abril de 2016.

El péndulo es la parte de la máquina más delicada, pesa aproximadamente 20 kg, y debe ser accionada solamente al liberar el sistema de freno, a través del mecanismo proporcionado para ello. El péndulo, al igual que el resto de la máquina, cumple con la norma ASTM E23; su diseño debe cumplir con características de:

- Velocidad
- Centro de percusión
- Punto de golpeo.

4. ENSAYO EXPERIMENTAL

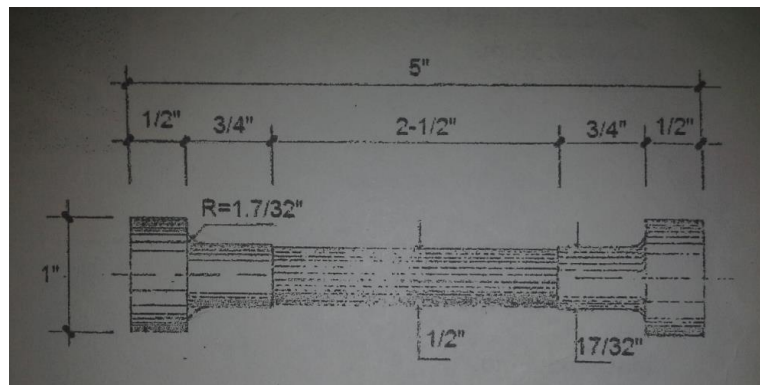
4.1. Maquinado de probetas según norma ASTM

Las probetas se maquinaron según las normas ASTM. Estas se realizaron en el laboratorio de procesos de manufactura 1, la maquinabilidad de este material es muy buena; esto debido a las láminas de grafito que contiene el hierro fundido gris, por lo que en cierta manera fue favorable la mecanización.

4.1.1. Maquinado de probeta para ensayo de tensión

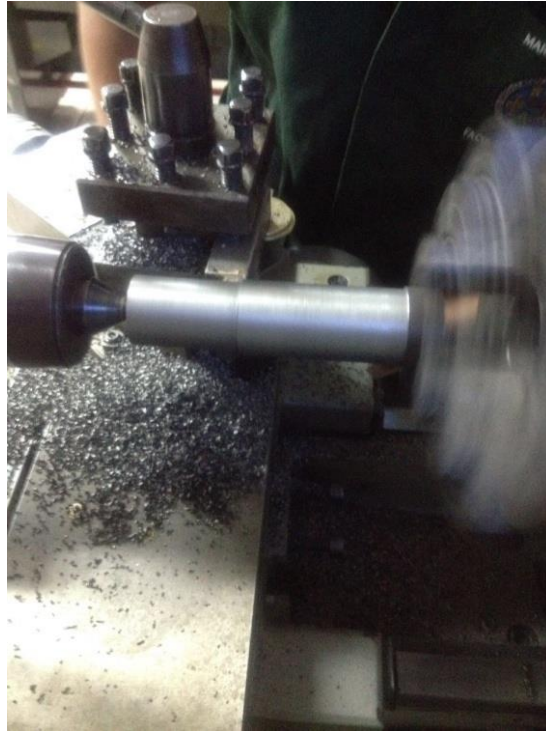
Para el ensayo de tensión es necesario contar con probetas estandarizadas bajo la norma ASTM E8, las probetas para el ensayo de tensión se realizaron en una máquina herramienta llamada torno.

Figura 45. **Probeta para ensayo de tensión ASTM E8**



Fuente: Norma ASTM E8. Consulta: abril de 2016.

Figura 46. **Mecanización probeta ensayo de tensión**

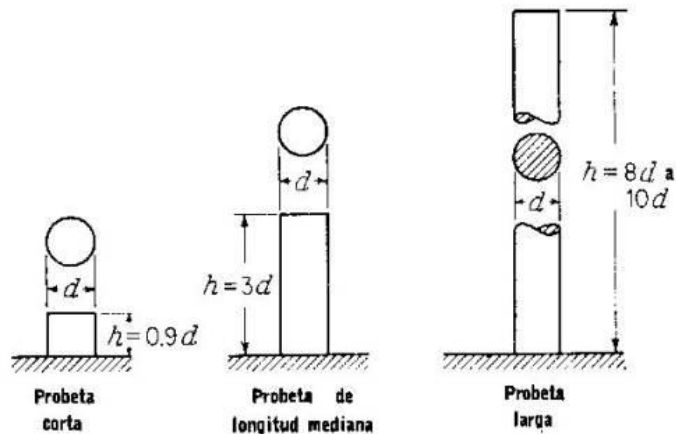


Fuente: Laboratorio de Procesos de Manufactura 1, T7, Facultad de Ingeniería.

4.1.2. Maquinado de probeta para ensayo de compresión

En el ensayo de compresión la norma ASTM E9, indica que existen 3 clases de probetas las cuales tienen sus ventajas y así mismo sus desventajas. Para la realización de este trabajo se utilizó la probeta denominada mediana que tiene una altura de aproximadamente 3 veces el diámetro de la misma.

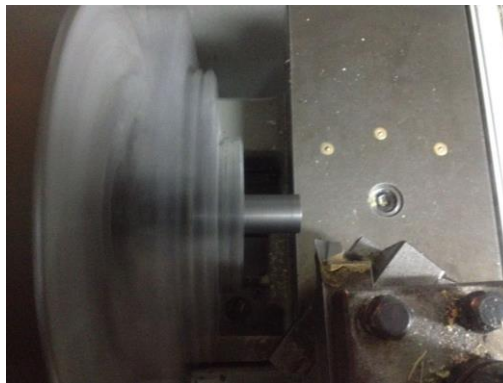
Figura 47. **Tipos de probetas para ensayo de compresión**



Fuente: <http://www.utp.edu.co>. Consulta: abril de 2016

La probeta mecanizada tiene un diámetro de 15 mm y una altura de 40 mm, usada también en el laboratorio de Resistencia de Materiales 1, al igual que para el ensayo de tensión, también se mecanizaron 10 probetas para el ensayo de compresión.

Figura 48. **Mecanización probeta ensayo de compresión**



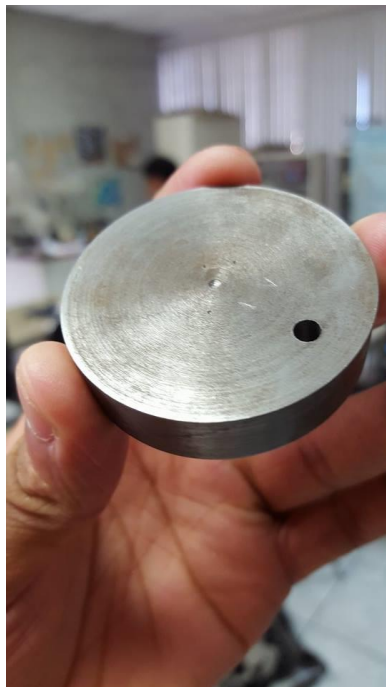
Fuente: Laboratorio de Procesos de Manufactura 1, T7, Facultad de Ingeniería.

4.1.3. Maquinado de probeta para ensayo de dureza

El tipo de dureza y escala que se utiliza para las materiales bajo tratamientos térmicos es la dureza HRC, y la norma es ASTM E18, esta norma no indica una probeta como tal pero si da algunas indicaciones que deberá tener como mínimo las probetas, como las distancia del borde la cual deberá ser 2,5 veces el diámetro de huella, el tiempo de aplicación de la carga el cual no debe ser mayor a 2 segundos y el espesor no menor de 5 mm.

Para el ensayo de dureza se mecanizaron 10 probetas con un diámetro de 50 mm y 12 mm de espesor, y se le perforó además de estas probetas también se utilizaron para el estudio metalográfico.

Figura 49. **Probeta para el ensayo de dureza**



Fuente: Laboratorio de Procesos de Manufactura 1, T7, Facultad de Ingeniería.

4.2. Tratamiento térmico a las probetas

Los tratamientos térmicos a las probetas se realizaron en el Instituto Técnico de Capacitación y Productividad.

4.2.1. Temple

Este tratamiento se realizó con la ayuda de un horno eléctrico proporcionado por Intecap, donde la temperatura ideal para un buen temple del hierro fundido A48 clase 40, es de 860 °C, indicada en la ficha técnica del material.

Figura 50. Horno eléctrico para temple



Fuente: Laboratorio de tratamientos térmicos, Intecap, CG2.

Para la realización del tratamiento térmico temple se requieren de varios pasos que se describen a continuación:

- Preparar las probetas a templar, que estén libres de polvo, aceite o combustible.
- Colocar un tipo de gancho para la fácil extracción del horno.
- Utilizar una caja con carbón natural y colocar las probetas entre el carbón para evitar la descarburización.
- Colocar la caja con las probetas dentro del horno de temple.
- Encender el horno y programar una temperatura de precalentamiento de 500° C, donde se mantuvo aproximadamente durante 40 minutos.
- Programar el horno a la temperatura de temple la cual fue de 860 °C, donde el tiempo de permanencia fue de 40 minutos, este tiempo lo indica la ficha técnica del material.
- Realizar el enfriamiento brusco, el cual se tiene que hacer en aceite según la ficha técnica del material, para esto se utilizó un aceite Tellus 68, este aceite se fue cambiando porque se iba calentando, esto para que no afectara el enfriamiento de las últimas probetas.

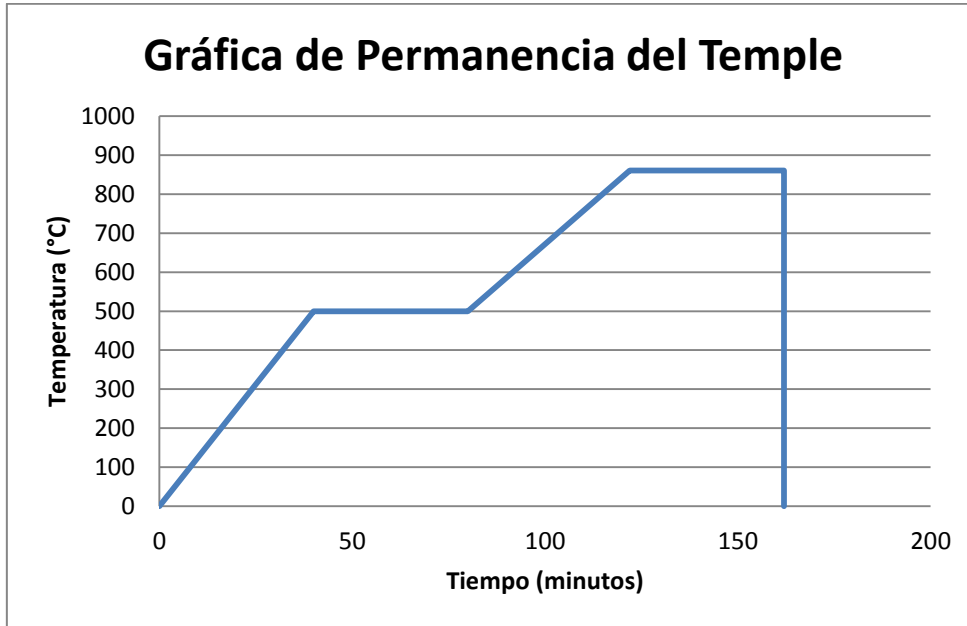
Figura 51. **Enfriamiento brusco en aceite**



Fuente: Laboratorio de Tratamientos Térmicos, Intecap, CG2.

Como podemos observar en la figura 52, la temperatura de temple fue de 910 °C, además se puede observar la línea vertical al final que indica el enfriamiento brusco, por el enfriamiento en aceite

Figura 52. **Gráfica de permanencia del temple**



Fuente: elaboración propia.

4.2.2. **Revenido**

El revenido como se sabe, es un proceso que acompaña al temple, para las probetas el revenido se realizó a una temperatura de 150 °C, ya que solo se necesitaba eliminar un poco las tensiones provocadas por el temple sin sacrificar demasiado la dureza.

Figura 53. Horno para revenido



Fuente: Laboratorio De Tratamientos Térmicos, Intecap, CG2

Este es un horno especial para realizar el revenido, ya que cuenta con un ventilador que hace circular el aire caliente por toda la superficie de la pieza a reventar, al igual que en el temple a las probetas se les colocó un gancho para hacer más fácil la extracción. El tiempo de permanencia del revenido fue de 60 minutos, luego de este tiempo se apagó el horno para que las probetas se terminaran de enfriar dentro del mismo.

Figura 54. **Gráfica de permanencia del revenido**



Fuente: elaboración propia.

4.3. Ensayos destructivos

El ensayo de dureza se realizó en el Instituto Técnico de Capacitación y Productividad y los ensayos de tensión y compresión en el Centro de Investigaciones de Ingeniería

4.3.1. Ensayo de tensión

El ensayo de tensión se realizó utilizando la máquina universal de ensayos, este consiste en sujetar la probeta en sus dos extremos, luego la parte móvil se desplaza hacia abajo, aplicando la carga hasta el punto de rotura o de falla.

Con este ensayo se pudo obtener la resistencia mecánica del hierro fundido A48 clase 40, así como el % de elongación en la misma.

Figura 55. **Ensayo de tensión**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, T5, Facultad de Ingeniería.

4.3.2. Ensayo de compresión

Para este ensayo también se utilizó la máquina universal de ensayos, con la diferencia que ahora la fuerza se aplica en sentido contrario, o sea una carga aplastante. En este ensayo la probeta no se rompe, simplemente se reduce la longitud hasta el punto de deformación casi total.

La carga utilizada en el ensayo fue de 25 000 kgf, y posteriormente se midió la reducción de la altura de la probeta.

El ensayo de compresión es junto al ensayo de tensión de los más utilizados, para la determinación de las propiedades de los materiales.

Figura 56. **Ensayo de compresión**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, T-5, Facultad de Ingeniería.

4.3.3. Ensayo de dureza

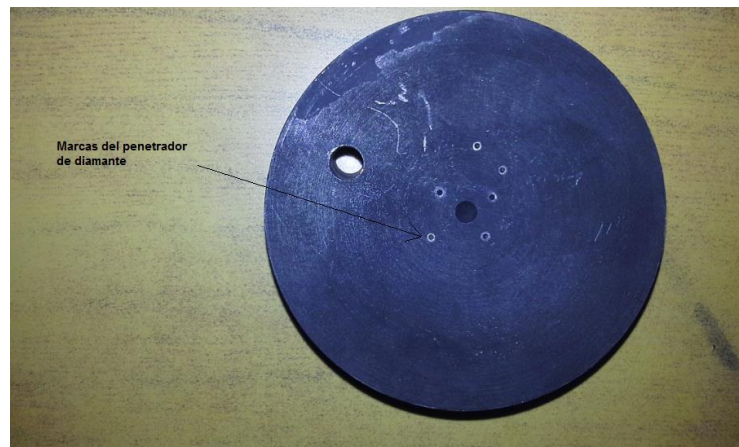
Este ensayo se realizó en el Instituto Técnico de Capacitación y Productividad, Centro Guatemala 2.

El ensayo se realizó en un durómetro digital ARK-601 como lo muestra la figura 43, este durómetro facilita las mediciones ya que automáticamente da el resultado en la pantalla, la medición de la dureza se realizó en tres etapas:

- Medición de la dureza de las probetas después del mecanizado
- Medición de la dureza después del temple
- Medición de la dureza después del revenido

Todo esto con la finalidad de tener una referencia después de cada proceso.

Figura 57. **Ensayo de dureza**



Fuente: Laboratorio de Ensayos de Materiales, Intecap, CG2.

En la figura 57, se ven claramente las marcas del penetrador de diamante después de haber ensayado la probeta, el agujero que se logra ver en las probetas es para colocar un gancho y facilitar su extracción del horno.

4.4. Preparación de las probetas para estudio metalográfico

Las probetas utilizadas para el estudio metalográfico fueron las mismas que se usaron para el ensayo de dureza.

Para realizar el estudio metalográfico es necesario tener una probeta con un pulido tipo espejo esto se realizó con papel abrasivo o lija de distintos números con la ayuda de agua que sirve para limpiar desechos de lija además funciona como lubricante, una secuencia lógica de las lijas a utilizar es la siguiente: 240, 320, 400 y lija de 600 cribas por pulgada cuadrada.

Se terminó la etapa de pulido con la ayuda de una pulidora metalográfica proporcionada por el Instituto Técnico de Capacitación y Productividad, esto para concluir con el procedimiento y obtener el resultado deseado.

Antes del ataque químico se limpió la pieza con algodón para quitar residuos de aceite o polvo, posteriormente se atacó la probeta con un reactivo en este caso fue nital al 5 % por un tiempo de 3 a 5 segundos, estos parámetros son dados en la norma ASTM E407, específicamente el nital oscurece la perlita y pone de manifiesto los bordes de la ferrita.

Figura 58. **Probeta atacada con nital**



Fuente: <https://www.lab466savio.webcindario.com>. Consulta: abril de 2016.

5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

A continuación se presentan los resultados de los ensayos destructivos como parte de la investigación.

5.1. Resultados del ensayo de tensión

Los resultados del ensayo de tensión se presentan a continuación:

Utilizando la ecuación No.1 de los anexos se determinó el esfuerzo de cada probeta.

Tabla IV. **Resultados del ensayo de tensión**

| Resultados del ensayo de tensión | | | | |
|----------------------------------|---------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| Núm. de Probeta | Diámetro (mm) | Carga Máxima (kgf) | % Elongación (5 cm) | Esfuerzo Máximo (MPa) |
| 1 | 12,745 | 4 550 | 1 % | 274,51 |
| 2 | 12,755 | 5000 | 2 % | 301,19 |
| 3 | 12,765 | 4 100 | 1 % | 246,59 |
| 4 | 12,600 | 5 300 | 3 % | 327,16 |
| 5 | 12,645 | 5 200 | 1 % | 318,71 |
| 6 | 12,815 | 5 400 | 4 % | 322,24 |
| 7 | 12,780 | 5 500 | 3 % | 330,01 |
| 8 | 12,795 | 5 000 | 4 % | 299,31 |
| 9 | 12,770 | 5 000 | 4 % | 300,48 |
| 10 | 12,755 | 5 650 | 3 % | 340,34 |
| Promedio | 12,743 | 5 070 | 3 % | 306,05 |

Fuente: elaboración propia.

Utilizando la ecuación No. 3 de anexos se determinó la tenacidad del hierro fundido A48 con temple y revenido y con la ecuación No. 2 la deformación unitaria.

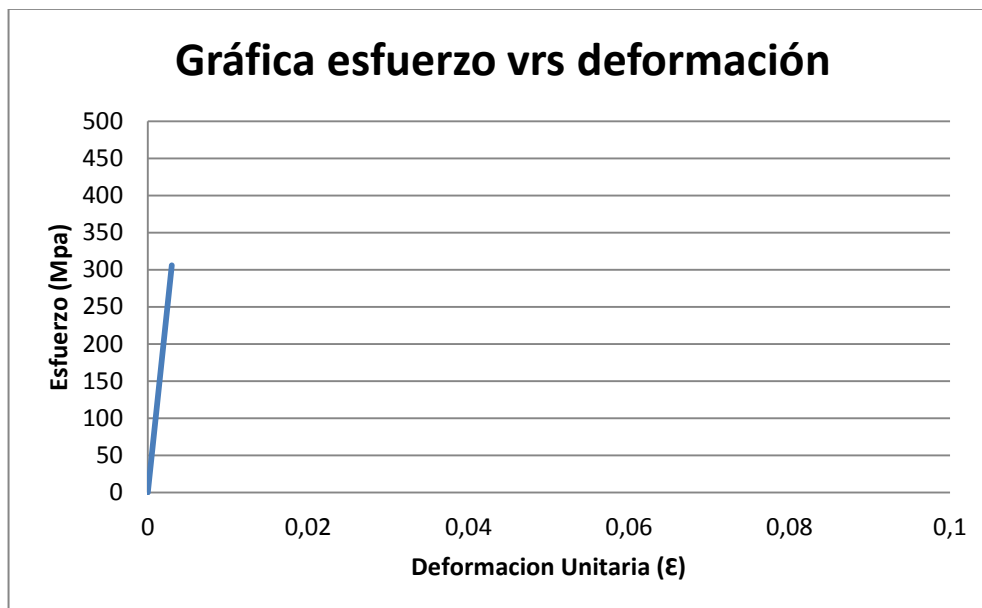
Tabla V. **Tenacidad y deformación unitaria**

| | |
|----------------------|--------------|
| Tenacidad (MPa) | 3,979 |
| Deformación unitaria | 0,003 |

Fuente; elaboración propia.

En los resultados de la tabla IV, podemos observar resultados muy cercanos entre sí, además muy poca elongación por ser un material frágil.

Figura 59. **Gráfica esfuerzo-deformación**



Fuente: elaboración propia.

Con la ayuda de los datos de la tabla IV, se realizó la gráfica esfuerzo-deformación, en la cual solo al observarla, podemos notar que el material es frágil, ya que no cuenta con un punto de cedencia, y solo presenta una recta, a diferencia de una gráfica de esfuerzo-deformación de un material dúctil.

5.2. Resultado del ensayo de compresión

Los resultados del ensayo de compresión realizados en Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), se muestran en la siguiente tabla.

Tabla VI. **Resultados del ensayo de compresión**

| Resultados del ensayo de compresión | | | | | | |
|-------------------------------------|---------------|---------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------------------|
| Núm. de Probeta | Diámetro (mm) | Altura Inicial (mm) | Altura Final (mm) | Carga máxima (kg) | Esfuerzo (MPa) | % de reducción de la altura |
| 1 | 15,045 | 40,25 | 39,90 | 25 000 | 1 082,38 | 0,87 % |
| 2 | 15,015 | 40,41 | 40,11 | 25 000 | 1 086,71 | 0,74 % |
| 3 | 15,100 | 40,22 | 39,50 | 25 000 | 1 074,51 | 1,79 % |
| 4 | 15,040 | 40,2 | 39,96 | 25 000 | 1 083,10 | 0,60 % |
| 5 | 15,160 | 40,07 | 39,84 | 25 000 | 1 066,03 | 0,57 % |
| 6 | 15,000 | 40,22 | 37,11 | 25 000 | 1 088,89 | 7,73 % |
| 7 | 14,985 | 40,12 | 37,57 | 25 000 | 1 091,07 | 6,36 % |
| 8 | 15,005 | 40,11 | 39,47 | 25 000 | 1 088,16 | 1,60 % |
| 9 | 15,115 | 40,25 | 33,79 | 25 000 | 1 072,38 | 16,05 % |
| 10 | 14,995 | 40,13 | 39,13 | 25 000 | 1 089,62 | 2,49 % |
| Promedio | 15,046 | 40,198 | 38,638 | 25 000 | 1 082,286 | 3,88 % |

Fuente: elaboración propia.

En los resultados mostrados del ensayo de compresión, en las probetas núm. 6,7 y 9 se puede observar que hay un aumento en la reducción de la longitud esto debido a que durante el ensayo fueron colocadas en la máquina universal de una manera incorrecta dando lugar a los resultados ya mostrados.

5.3. Resultado del ensayo de dureza

El ensayo de dureza se realizó en el Instituto Técnico de Capacitación y Productividad (Intecap), la medición de la dureza se realizó por etapas, esto como se mencionó anteriormente para tener una referencia de la variación de la dureza después de cada proceso.

Tabla VII. **Resultados del ensayo de dureza**

| Resultados ensayo de dureza | | | | |
|-----------------------------|--|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Núm. de Probeta | Dureza Estado de Suministro(Según ficha técnica HRC) | Dureza después de mecanizado (HRC) | Dureza después del temple (HRC) | Dureza después del revenido (HRC) |
| 1 | 23,5 | 26,7 | 52,,4 | 44,4 |
| 2 | 23,5 | 29,2 | 50,0 | 46,1 |
| 3 | 23,5 | 28,8 | 50,3 | 45,2 |
| 4 | 23,5 | 28,6 | 51,1 | 46,5 |
| 5 | 23,5 | 21,1 | 49,0 | 41,4 |
| 6 | 23,5 | 25,4 | 50,3 | 44,0 |
| 7 | 23,5 | 27,6 | 48,1 | 41,2 |
| 8 | 23,5 | 21,3 | 52,4 | 45,1 |
| 9 | 23,5 | 24,6 | 49,7 | 43,8 |
| 10 | 23,5 | 28,9 | 51,5 | 46,1 |
| Promedio | 23,5 | 26,22 | 50,48 | 44,38 |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla VI, claramente se observa el aumento en la dureza después del mecanizado de las probetas esto debido al fenómeno conocido como acritud

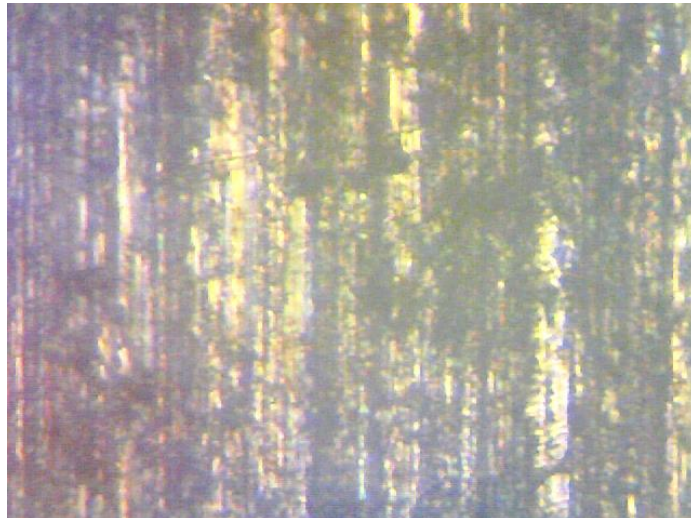
y también el aumento lógico dureza luego del temple, pero se nota la disminución de la dureza después del revenido por el alivio de tensiones.

5.4. Resultado del estudio metalográfico

En el análisis metalográfico los resultados fueron óptimos, se logró observar que la matriz del hierro fundido se comporta muy similar a la microestructura de los aceros.

El resultado que se esperaba era obtener un hierro fundido con láminas de grafito y combinado con una matriz martensítica revenida que fue el resultado obtenido.

Figura 60. **Microestructura de un hierro fundido gris templado y revenido**



Fuente: Laboratorio de Metalurgia, T7. Facultad de Ingeniería.

En la figura 60, se logra observar la micrografía tomada en el microscopio metalográfico del laboratorio de metalurgia, tomada con un aumento de 100x.

CONCLUSIONES

1. La realización de los ensayos destructivos, revelaron resultados importantes, como el incremento en la resistencia a la tensión y compresión, así como el comportamiento similar a los aceros al carbono comprobado mediante el estudio metalográfico.
2. El hierro fundido A48 con matriz perlítica, responde adecuadamente a los tratamientos térmicos, con mucha semejanza con los aceros al carbono, los cuales fueron aplicados de acuerdo a las indicaciones que la ficha técnica del material sugiere.
3. El incremento de la resistencia a la tensión fue notoria, aumentando 30,26 MPa, como se muestra en la tabla IV.
4. La resistencia a la compresión para el hierro fundido A48 con tratamientos térmicos resultó ser muy buena ya que, aplicando una carga de 25 000 kgf, en promedio tuvo una reducción de longitud del 3,88 %, esto tomando en cuenta que hubo fallas en tres probetas.
5. En la tabla VI se logra observar los cambios de dureza después de cada proceso, el aumento después de mecanizado, debido a la acritud y en el temple llegando hasta 50,48 HRC y la reducción después del revenido.
6. En el análisis metalográfico la microestructura obtenida, fue la que se esperaba, ya que cumplió con la teoría. El cambio solo fue notorio en la

matriz la cual pasó de una perlítica a una martensítica revenida, mientras que las láminas de grafito tuvieron poca o nada de variación.

RECOMENDACIONES

1. Tener el conocimiento adecuado en cuanto a la realización de los tratamientos térmicos y los ensayos de materiales.
2. Al momento de realizar los tratamientos térmicos, utilizar equipo de protección personal como: careta, guantes, mangas y gabacha de cuero, debido a que se trabaja a elevadas temperaturas que pueden ocasionar accidentes, en este caso quemaduras.
3. Cumplir con los requerimientos de la norma ASTM en cuanto a las dimensiones de las probetas, si no se cumplen las mismas se pueden obtener desviaciones en los resultados.
4. Tener el debido cuidado al momento de colocar correctamente las probetas en la máquina universal de ensayo, ya que si se colocan de una manera no adecuada pueden existir resultados incorrectos.
5. Cuando se realiza un ensayo de dureza se debe tener el cuidado necesario para no dañar el penetrador de diamante, debido a su fragilidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASKELAND, Donald. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. 3a ed. México: International Thompson, 1998. 824 p.
2. ASTM Metals Handbook. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken, U.S.A. 2008. 23 p.
3. AVNER, Sydney H. *Introducción a la metalurgia física*. 2ª ed. México: McGraw-Hill, 1998. 695 p.
4. BRAVO CRISOSTOMO, Fredy Edgard. *Tratamientos térmicos a fundiciones grises de la región Grau fabricadas en horno de cubilote*. Trabajo de graduación de Ing. Industrial y de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura, Perú. 2005. 129 p.
5. CASTRO, Guillermo. *Fundiciones*. Departamento de Ingeniería Mecánica. Lanuza. España 2009. 140 p.
6. CRUZ GARCÍA, Carlos Giovanni. *Análisis de ensayo destructivos de hierro fundido con aleaciones de cobre, zinc y estaño en los talleres de fundición J.A. Ramírez*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánico. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2011. 73 p.
7. Federación de enseñanza de CC.OO. de Andalucía. *Ensayos Metalúrgicos Destructivos*. España: 2011. 14 p.

8. ZECEÑA GIRÓN, Carlos E. *Manual de laboratorio de resistencia de materiales 1*. Guatemala: s.e. s.a.

APÉNDICES

Apéndice 1. Ecuaciones

Ecuación No.1

$$\sigma = f/A$$

Dónde:

σ = Esfuerzo (MPa)

F = Fuerza (N)

A = m²

Ecuación No. 2

$$\text{Tenacidad} = \frac{1}{2} * \sigma * \mathcal{E}$$

Dónde:

σ = Esfuerzo (MPa)

\mathcal{E} = Deformación Unitaria

Ecuación No. 3

$$\mathcal{E} = \frac{L_f - L_o}{L_o}$$

Dónde:

L_o = Longitud inicial

L_f = Longitud final

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Maquinado de probeta para ensayo de tensión



Fuente: elaboración propia, realizado en el Laboratorio de Procesos de Manufactura 1, T7, Facultad de Ingeniería.

Apéndice 3. Panel de horno de temple



Fuente: elaboración propia, realizado en el Laboratorio de Tratamientos Térmicos, Intecap, CG2.

Apéndice 4. **Probetas dentro del horno de revenido**



Fuente: elaboración propia, realizado en el Laboratorio de Tratamientos Térmicos, Intecap, CG2.

Apéndice 5. **Probeta después del ensayo de compresión**



Fuente: elaboración propia, realizado en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, T7. Facultad de Ingeniería.

Apéndice 6. **Fractura del ensayo de tensión**



Fuente: elaboración propia, realizado en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, T7.
Facultad de Ingeniería.

Apéndice 7. **Pulidora metalográfica**



Fuente: elaboración propia, realizado en el Laboratorio de Ensayos de materiales, Intecap,
CG2.

Apéndice 8. **Microscopio metalográfico**



Fuente: elaboración propia, realizado en el Laboratorio de Ensayos de materiales, Intecap, CG2.

ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica del hierro fundido A48

TECNIACEROS

PROPIEDADES DEL HIERRO EN GRADOS STANDARD V-2 Y V-4

| HIERRO GRIS VERSA-BAR® V-2 | |
|-------------------------------------|--|
| Resistencia a la tensión | 40,000 psi |
| Resistencia a la compresión | 15,000 psi |
| Resistencia a la carga lateral: | 40,000 psi |
| Deflección | 0,25" – 0,34" |
| Microestructura (en estado fundido) | Esencialmente Perlítica |
| Tratamiento térmico | En aceite desde 1575 ° F Para obtener HRc 50 mín. en la superficie |
| Maquinabilidad | Muy buena |
| Especificación ASTM | A 48 (Clase 40) |

Fuente: Manual del proveedor, Tecniaceros.

Anexo 2. Ficha técnica del Aceite Tellus 68

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

| | |
|---|--|
| Color | Ambar. |
| Estado físico | Líquido a temperatura ambiente. |
| Olor | Característico a aceite mineral. |
| Valor pH | Datos no disponibles. |
| Presión de vapor | Se supone que es menor que 0,5 Pa a 20° C. |
| Punto de ebullición inicial | Se supone que sea >280° C. |
| Solubilidad en Agua | Insignificante. |
| Densidad | 877 kg/m3 a 15°C. |
| Punto de inflamación | 225°C (COC). |
| Límite superior de explosión (LSE) | 10%(v/v) (típico). |
| Límite inferior de explosión (LIE) | 1% (v/v) (típico). |
| Temperatura de autoignición | Se supone que sea >320° C. |
| Viscosidad cinemática | 68 mm2/s a 40°C. |
| Relacion de Evaporacion | Datos no disponibles. |

Fuente: Manual del proveedor, Tecniaceros.

