

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJERCITO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**PROPUESTA DE NORMALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN  
DE HIERRO NODULAR**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**ANTONIO CHAMORRO SANMIGUEL**

**CHRISTIAN FERNANDO VASCONEZ VEGA**

**DIRECTOR: ING. GONZALO MORA**

**COORDIRECTOR: ING. VICTOR ANDRADE**

**Sangolquí 2006/05/12**

## **CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO**

**EI PROYECTO “PROPUESTA DE NORMALIZACIÓN Y  
CARACTERIZACIÓN DE HIERRO NODULAR” fue realizado  
en su totalidad por Antonio Chamorro Sanmiguel y  
Christian Fernando Vásquez Vega como requerimiento  
parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.**

---

**Ing. Gonzalo Mora**

---

**Ing. Victor Andrade**

**Sangolquí, 2006/05/12**

# **LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO**

**“PROPUESTA DE NORMALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN  
DE HIERRO NODULAR”**

**ELABORADO POR:**

**ANTONIO CHAMORRO SANMIGUEL**

**CHRSTIAN FERNANDO VASCONEZ VEGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

---

**MAYO. ING. EDGAR PAZMIÑO  
DECANO**

**Sangolquí 2006/05/12**

# **DEDICATORIA**

**A Dios que siempre estuvo amparándome y guiándome por el camino del bien, ayudándome a superar todos los obstáculos que se presentaban.**

**A mi familia por completo, gracias por su apoyo y por creer que todo esto era posible.**

**Antonio**

**Este proyecto esta dedicado a todo aquel cuya curiosidad por el conocimiento lo lleve a investigar los diferentes campo de la Ingeniería Mecánica.**

**A través de este documento esperamos aportar a la comunidad y al desarrollo e incremento del conocimiento de los Alumnos de la Facultad De Ingeniería Mecánica de ESPE y a todo aquel se interese por el contenido del mismo.**

**Christian**

# **AGRADECIMIENTOS**

**A mi familia que estuvo conmigo en las buenas y las malas, a mis padres que me enseñaron el valor de la constancia y determinación de cumplir los objetivos planteados**

**A mis abuelos, que sin ellos nada de esto pudiera haber sido posible, gracias por creer en mi.**

**A mis hermanas y amigos, que se que contare con ellos en cualquier momento.**

**A la FIME y a todas las personas que integran a esta maravillosa Facultad.**

**A los Ing. Gonzalo Mora y Víctor Andrade quienes nos guiaron y ayudaron a solucionar todas las dudas para poder concluir con este proyecto.**

**A mi compañero del proyecto, gracias por la comprensión y constancia, LO LOGRAMOS!.**

**A todos los antes mencionados muchas gracias, y a los que me faltó por mencionar perdón.**

**Antonio**

# **AGRADECIMIENTO**

**A mi familia que siempre me ha apoyado y que gracias a ellos he llegado a ser quien soy hoy en día, quienes con sus dedicación y consejos me dieron los elementos necesarios para tener una formación integral.**

**A la ESPE por darme la oportunidad de formarme en esta institución tan prestigiosa de nuestro país, y a la cual pondré en alto mediante mi trabajo esfuerzo y dedicación.**

**A los profesores de la Facultad de Ingeniería mecánica quienes compartieron sus conocimientos y experiencias con el único fin de dotarnos de las herramientas necesarias para un optimo desempeño en el mundo laboral y personal.**

**Agradezco a mi compañero de proyecto Antonio Chamorro quien siempre estuvo presto y realizo su mejor esfuerzo para que ambos logremos alcanzar nuestro sueño de obtener el Título de Ingeniero Mecánico.**

**Al Ing. Jaime Chavez, de Fundireciclar, por habernos apoyado y guiado con sus conocimientos.**

**Y por ultimo agradezco al Ing. Gonzalo Mora director del proyecto y al Ing. Víctor Andrade quienes nos guiaron de la mejor manera para poder lograr este objetivo.**

**Christian**

INDICE	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	20
1.1 ANTECEDENTES .....	20
1.2 DEFINICION DEL PROBLEMA.....	21
1.3 OBJETIVOS.....	22
1.3.1 ESTUDIAR Y REALIZAR LAS PRUEBAS VIABLES CON EL FIN DE OBTENER RESULTADOS CONFIABLES.....	22
1.3.2 DISEÑAR UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN PARA EL HIERRO NODULAR .....	22
1.3.3 EFECTUAR PRUEBAS EN LOS LABORATORIOS DE LA ESPE Y ASÍ DAR A CONOCER EL POTENCIAL INVESTIGATIVO DE LA ESCUELA.....	22
1.3.4 OBTENER FACTORES DE RELACIÓN POR MEDIO DE LOS VALORES REALES DE ESFUERZOS ÚLTIMOS PARA GENERAR UNA TABLA CON FACTORES QUE PERMITA UN CALCULO APROXIMADO DE RESISTENCIAS , SABIENDO EL VALOR DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN .....	23
1.3.5 CREAR UN BORRADOR DE LA NORMA ECUATORIANA DE FUNDICIÓN DE HIERRO NODULAR CORRIGIENDO Y ADAPTANDO NORMAS EXTRANJERAS PARA QUE TENGAN UNA TOTAL APLICABILIDAD EN NUESTRO MEDIO .....	23
1.4 ALCANCE DEL PROYECTO .....	23
1.5 JUSTIFICACION E IMPORTANCIA .....	24
CAPITULO 2.....	25
INTRODUCCIÓN.....	25
2.1 PROPIEDADES Y TIPOS DE FUNDICIÓN .....	28
2.1.1 PRINCIPALES PROPIEDADES DE LAS FUNDICIONES .....	28
2.1.2 TIPOS DE FUNDICIÓN.....	29
2.1.2.1 Fundición gris .....	29
2.1.2.2 Fundición blanca .....	30
2.1.2.3 Fundición maleable .....	31
2.1.2.4 Hierros colados de aleación.....	31
2.1.2.5 Fundición atruchada .....	32
2.1.2.6 Aceros para fundición .....	32
2.1.2.7 Fundiciones aleadas .....	33
Tabla 2.2 Efectos de aleantes en la fundición.....	33
2.1.2.8 Fundiciones Especiales .....	35
2.1.2.8.1 Fundiciones Grises aciculares .....	35
2.1.2.8.2 Fundiciones Inoculadas.....	35
2.1.2.8.3 Hierro colado dúctil o nodular .....	35
2.1.3 CLASIFICACIÓN DEL HIERRO DÚCTIL O NODULAR.....	36
2.1.4 MICRO ESTRUCTURAS DELGRAFITO ESFEROIDAL .....	39
2.1.4.1 Tamaño del grafito (tamaño del nódulo).....	39
2.1.4.2 Forma del Grafito (tipos de nódulo).....	39
2.1.4.3 Cantidad de Grafito (conteo de nódulos) .....	39
2.1.4.4 Anomalías en las formas de Grafito .....	40
2.1.4.4.1 Grafito Alineado.....	40
2.1.4.4.2 Grafito Aglomerado .....	40
2.1.4.4.3 Flotación de Carbón.....	40
2.1.4.4.4 Grafito Compactado .....	41

2.1.4.4.5 Grafito en forma de huella de cangrejo.....	43
2.1.4.4.6 Grafito Explotado.....	43
2.1.4.4.7 Formas de Grafito en hierro nodular .....	44
2.1.4.4.8 Grafito Irregular .....	45
2.1.4.4.9 Grafito Nodular .....	46
2.1.4.4.10 Grafito Secundario .....	47
2.1.4.4.11 Grafito Impecable.....	47
2.1.4.4.12 Grafito Vermicular .....	47
2.2 IMPORTANCIA DE LA FUNDICION NODULAR .....	47
2.3 LOS PROCEDIMIENTOS PARA LA OBTENCIÓN DE HIERRO NODULAR .....	49
2.3.1 DESULFURACIÓN .....	50
2.3.1.1 Factores que influyen en la desulfuración .....	51
2.3.1.2 Cantidad de desulfurante .....	51
2.3.2 NODULIZACIÓN .....	51
2.3.2.1 Recuperación de magnesio.....	53
2.3.2.2 Desvanecimiento del efecto de nodulización .....	53
2.3.2.3 Tipos de nodulizantes a base de magnesio .....	55
2.3.2.4 Cantidad de aleación nodulizante .....	56
2.3.3 INOCULACIÓN.....	58
2.3.3.1 Eficiencia de la inoculación .....	60
2.3.3.2 Cantidad de Inoculante.....	60
2.4 LOS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FUNDICIÓN NODULAR ..	61
2.5 LOS LABORATORIOS DE LA ESPE .....	68
2.6 NORMAS DE REFERENCIA NACIONALES Y EXTRANJERAS .....	68
2.7 ANALISIS DE MUESTREO.....	69
2.7.1 NUMERO DE ENSAYOS .....	70
2.7.2 DESCRIPCIÓN DE UN LOTE.....	70
2.8 PROCESOS DE OBTENCION DE MUESTRAS .....	72
2.8.1 MOLDEO EN ARENA VERDE.....	72
2.8.2 CAPACIDAD REFRACTARIA .....	73
2.8.3 TIPOS.....	73
2.8.4 ÁREA DE CONTACTO .....	74
2.8.5 ARCILLAS.....	74
2.8.6 CANTIDAD DE ARCILLA Y AGUA.....	75
2.8.7 MÉTODOS DE CONTROL.....	76
2.8.8 CARBONES.....	76
2.8.9 MÉTODOS DE CONTROL.....	77
2.8.10 MOLIENDA.....	77
2.8.11 DESARROLLO DE LA RESISTENCIA .....	78
2.8.12 MANTENIMIENTO DE LA ARENA DEL SISTEMA ....	78
2.8.13 PÉRDIDAS DEBIDAS AL RECICLAJE.....	79
2.8.14 ARENA CALIENTE .....	80
2.8.15 ENFRIAMIENTO DE ARENA .....	80
2.8.16 MOLDEO EN ARENA SECA .....	81
2.8.17 MOLDEO MECÁNICO.....	81
2.8.18 MOLDEO A LA CERA PERDIDA O MICROFUSIÓN .....	81
2.8.19 FUNDICIÓN EN COQUILLA.....	82
2.8.20 MUESTRAS OBTENIDAS POR COLADO.....	82
2.8.21 MUESTRAS OBTENIDAS POR MAQUINADO.....	82

CAPITULO 3.....	84
3.1 COMPOSICION QUÍMICA DEL HIERRO NODULAR .....	84
3.1.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA .....	84
3.1.2 CARBÓN EQUIVALENTE (CE) .....	85
3.1.3 CARBÓN (C ) .....	85
3.1.4 SILICIO (Si) .....	86
3.1.5 MANGANESO(Mn) .....	87
3.1.6 AZUFRE (S).....	88
3.1.7 FÓSFORO (P) .....	88
3.2 PROCESOS DE OBTENCIÓN DE HIERRO NODULAR .....	88
3.2.1 FUNDICIÓN DE HIERRO DÚCTIL O NODULAR EN CUBILOTES .....	89
3.2.1.1 Principio de Operación .....	92
3.2.1.2 Prácticas en Cubilote Ácido .....	93
3.2.1.3 Prácticas en Cubilote Básico .....	93
3.2.2 HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO.....	95
3.2.2.1 Principio de Operación .....	95
3.2.3 HORNOS DE INDUCCIÓN .....	97
3.2.3.1 Principio de Operación .....	97
3.2.4 HORNOS DE INDUCCIÓN DE CANAL.....	100
3.2.5 PRECALENTAMIENTO .....	101
3.2.6 PROCEDIMIENTOS DE CONTROL DEL HIERRO NODULAR ..	101
3.2.6.1 Materias Primas.....	102
3.2.6.2 Practicas de Tratamiento.....	102
3.2.6.3 Química del Metal .....	103
3.2.6.4 Temperatura del Metal.....	104
3.2.6.5 Nodulización .....	105
3.2.6.6 Efecto del tiempo.....	106
3.2.6.7 Metalografía .....	110
3.2.6.8 Pruebas de Control de Calidad.....	111
CAPITULO 4.....	115
4.1 VERIFICACIÓN DE EQUIPOS.....	115
4.2 ENSAYO DE CARACTERISTICAS METALURGICAS .....	118
4.2.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA .....	118
4.2.2 MICROGRAFÍA .....	121
4.2.3 MACROGRAFÍA .....	137
4.3 ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS.....	139
4.3.1 ENSAYOS ESTATICOS .....	139
4.3.2 ENSAYOS DINÁMICOS .....	193
CAPITULO 5.....	202
5.1 RESULTADOS DE ENSAYOS METALÚRGICOS .....	202
5.2 ANALISIS DE MICROGRAFÍA.....	203
5.3 TAMAÑO DE GRANO.....	204
5.4 MACROGRAFÍA.....	204
5.5 ENSAYOS MECÁNICOS.....	205
5.6 COEFICIENTES DE RELACION.....	207
CAPITULO 6.....	208
6.1 OBJETIVO DE LA NORMA .....	208
6.1.1 OBJETIVO.....	208
6.2 PROCEDIMIENTO DE CREACIÓN .....	208

6.2.1 OBJETO .....	209
6.2.2 DEFINICIONES .....	209
6.2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS DOCUMENTOS NORMATIVOS .....	212
6.2.4 ESTRUCTURA Y PRESENTACIÓN DE LOS DOCUMENTOS NORMATIVOS .....	213
6.2.5 TRAMITE REGULAR PARA LA ELABORACIÓN Y APROBACIÓN DE DOCUMENTOS NORMATIVOS.....	213
6.2.6 TRAMITE DE URGENCIA PARA LA ELABORACIÓN Y APROBACIÓN DE DOCUMENTOS NORMATIVOS.....	215
6.2.7 ADOPCIÓN DE DOCUMENTOS NORMATIVOS .....	216
6.2.8 SISTEMA DE REVISIÓN DE DOCUMENTOS NORMATIVOS...	216
6.2.9 SISTEMA DE ANULACIÓN DE DOCUMENTOS NORMATIVO .....	217
6.2.10 DE LOS SUBCOMITÉS TÉCNICOS .....	217
6.2.11 DEL PROCEDIMIENTO PARA EL ESTUDIO Y APROBACIÓN DE LOS DOCUMENTOS NORMATIVOS .....	222
6.3 BORRADOR DE LA NORMA .....	223
6.3.1. OBJETO .....	223
6.3.2. NORMAS QUE SE PUEDEN CONSULTAR .....	223
6.3.2.1 Terminología estandarizada de Hierro Fundido.....	224
6.3.3. ENSAYO DE TRACCION EN FUNDICION DE HIERRO NODULAR .....	226
6.3.3.1 Objeto .....	226
6.3.3.2 Documentos a consultar .....	226
6.3.3.3 Producción .....	227
6.3.3.4 Propiedades de tracción.....	227
6.3.3.5 Barras fundidas para ensayo.....	227
6.3.3.6 Selección de barras de ensayo.....	228
6.3.3.7 Ensayo de tensión.....	228
6.3.3.8 Número de ensayos.....	229
6.3.3.9 Descripción de un lote .....	229
6.3.3.10 Tamaño de las barras de ensayo.....	231
6.3.4 ENSAYO DE COMPRESION .....	231
6.3.4.1 Objeto .....	231
6.3.4.2 Normas a consultar .....	232
6.3.4.3 Muestras de ensayo.....	232
Probeta mediana.....	232
6.3.4.4 Procedimiento.....	232
6.3.4.5 Reporte de resultados .....	233
6.3.5 ENSAYO DE DUREZA BRINELL .....	233
6.3.5.1 Objetivo .....	233
6.3.5.2 Probetas de ensayo .....	234
6.3.5.3 Procedimiento.....	234
6.3.5.4 Relación entre la resistencia a la tracción y la dureza .....	235
6.3.6 DETERMINACIÓN DEL MODULO DE ELASTICIDAD Y COEFICIENTE DE POISSON .....	236
6.3.6.1 Modulo de Elasticidad.....	236
6.3.6.2 Consideraciones Generales.....	236
6.3.6.3 Procedimiento.....	237
6.3.6.4 Interpretación de datos .....	237

6.3.7 ENSAYO DE FLEXION .....	238
6.3.7.1 Objeto .....	238
6.3.7.2 Significado.....	238
6.3.7.3 Forma y Dimensión de las probetas.....	238
6.3.8 ENSAYO DE IMPACTO CHARPY .....	240
6.3.8.1 Objeto .....	240
6.3.9.2 Documentos a consultar .....	240
6.3.9.3 Procedimiento.....	240
6.3.8.4 Tamaño de la probeta.....	241
6.3.8.5 Informe de Resultados.....	243
6.3.9 EVALUACION DE LA MICROESTRUCTURA DEL GRAFITO EN FUNDICIONES DE HIERRO .....	243
6.3.9.2 Documentos a Consultar .....	243
6.3.9.4 Probetas .....	244
6.3.9.5 Pulido de muestras .....	244
6.3.9.6 Clasificación del Grafito de acuerdo a la tabla .....	244
6.3.9.7 Tamaño de nódulos .....	246
6.3.9.8 Reporte de resultados .....	246
6.3.10 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO .....	247
6.3.10.1 Objeto .....	247
6.3.10.2 Documentos Relacionados .....	247
6.3.10.3 Granos.....	247
6.3.10.4 Métodos de medición.....	248
6.3.11 DESGASTE EN HIERRO NODULAR.....	249
6.3.13.1 OBJETIVO .....	249
6.3.13.3 RESUMEN DE PRACTICA .....	250
6.3.12 ENSAYO DE TORSIÓN .....	252
6.3.12.1 Objetivo .....	252
6.3.12.2 Selección del ensayo.....	252
6.3.12.3 Cálculo de esfuerzos superficiales .....	252
6.3.12.4 Equipamiento.....	253
6.3.12.5 Probetas.....	253
6.3.13 ENSAYO DE FATIGA.....	253
6.3.13.1 Objetivo .....	253
6.3.13.2 Documentos aplicables .....	253
6.3.13.3 Significado .....	254
6.3.13.5 Ejemplos de probetas.....	254
6.3.13.6 Frecuencia de Ensayo.....	255
CAPITULO 7.....	256
7.1 EVALUACION ECONOMICA.....	256
UNIDADES.....	256
Ejecutores .....	256
7.2 EVALUACIÓN FINANCIERA.....	257
CAPITULO 8.....	258
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	258
8.1 CONCLUSIONES.....	258
8.2 RECOMENDACIONES .....	259

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Composición Química.....	27
Tabla 2.2 Efectos de aleantes en la fundición.....	33
Tabla 2.3 Clasificación del Grafito basada en el tamaño.....	36
Tabla 2.4 Composición Química de los nodulizantes en base a Ni.....	55
Tabla 3.1 Contenido de CE según la medida de la Sección.....	85
Tabla 3.2 Tipo de carga para el proceso en cubilote.....	90
Tabla 3.3 Diferencias del proceso en cubilote Ácido o Básico.....	91
Tabla 3.4 Composición típica de la carga para producción en horno de arco eléctrico.....	95
Tabla 3.5 Rangos de Frecuencia.....	97
Tabla 3.6 Limite de Poder.....	98
Tabla 3.7 Composición de la carga Para Horno de Inducción y proceso de Hierro Dúctil con Matriz de Perlita.....	98
Tabla 3.8 Composición de la carga Para Horno de Inducción y proceso de Hierro Dúctil con Matriz de Ferrita.....	99
Tabla 4.1 Verificación de la calibración de la máquina de ensayos universales AMSLER con celda de carga de 20000 Kgf.....	115
Tabla 4.2 Valores de torque máquina AVERY.....	117
Tabla 4.3 Resultados de análisis químico.....	120
Tabla 4.4 Ensayo de Tracción 1.....	141
Tabla 4.5 Ensayo de Tracción 2.....	143
Tabla 4.6 Ensayo de Tracción 3.....	145
Tabla 4.7 Ensayo de Tracción 4.....	147
Tabla 4.8 Ensayo de Tracción 5.....	149
Tabla 4.9 Ensayo de Flexión 1.....	154
Tabla 4.10 Ensayo de Flexión 2.....	155
Tabla 4.11 Ensayo de Flexión 3.....	156
Tabla 4.12 Ensayo de Flexión 4.....	157
Tabla 4.13 Ensayo de Flexión 5.....	158
Tabla 4.14 Dureza Brinel.....	159
Tabla 4.15 Ensayo Torsión 1.....	164
Tabla 4.16 Ensayo Torsión 2.....	168
Tabla 4.17 Ensayo Torsión 3.....	171
Tabla 4.18 Ensayo Torsión 4.....	174
Tabla 4.19 Ensayo Torsión 5.....	177
Tabla 4.20 Ensayo de Compresión 1.....	181
Tabla 4.21 Ensayo de Compresión 2.....	183
Tabla 4.22 Ensayo de Compresión 3.....	184
Tabla 4.23 Ensayo de Compresión 4.....	185
Tabla 4.24 Ensayo de Compresión 5.....	185
Tabla 4.25 Determinación Modulo de Elasticidad.....	189
Tabla 4.26 Coeficiente de Poisson.....	192
Tabla 4.27 Ensayo de Impacto Charpa.....	195
Tabla 4.28 Ensayo de Fatiga.....	200
Tabla 5.1 Resultados de análisis químico.....	202
Tabla 5.2 Porcentaje de área de nódulos y poros.....	203
Tabla 5.3 Esferoidización de nódulos y poros.....	203

Tabla 5.4 Propiedades Mecánicas.....	205
Tabla 5.5 Propiedades Mecánicas del Hierro Dúctil 65 45 12.....	206
Tabla 5.6 Esfuerzos de Diseño Sugeridos.....	206
Tabla 5.7 Coeficientes de relación entre Esfuerzos Comunes.....	207
Tabla 6.1 ASTM A536-70.....	227
Tabla 6.2 ASTM A48.....	228
Tabla 6.3 Dimensiones de las Barras de ensayo.....	231
Tabla 6.4 Normas ASTM A 256.....	232
Tabla 6.5 Tamaños de probeta.....	238
Tabla 6.6 Tamaños y tolerancias.....	239
Tabla 6.7 Medidas de Probetas.....	242
Tabla 6.8 Clasificación del Grafito basado en el tamaño.....	246
Tabla 7.1 Evaluación Económica.....	256

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Microestructura típica de fundición gris.....	30
Figura 2.2 Fundición blanca.....	30
Figura 2.3 Fundición maleable ferrítica.....	31
Figura 2.4 Fundición atruchada.....	32
Figura 2.5 desplazamiento de puntos eutectoides.....	34
Figura 2.6 Clases de formas hierro grafito dúctil.....	37
Figura 2.7 Clasificación del hierro grafito dúctil basado en nódulos /mm <sup>2</sup> .....	38
Figura 2.8 Flotación de carbono mostrada en el área de la fundición, sin tratamiento.....	40
Figura 2.9 Hierro dúctil con 50% de nodulización.....	41
Figura 2.10 Grafito Vermicular (C.G.iron).....	41
Figura 2.11 Grafito Vermicular mostrando algunos nódulos irregulares.....	42
Figura 2.12 Extremadamente grueso, nódulos irregulares.....	42
Figura 2.13 Una fisura seguida de un Molde de grafito Vermicular .....	42
Figura 2.14 Grafito en forma de cangrejo.....	43
Figura 2.15 Grafito esferoidal explotado.....	43
Figura 2.16 Grafito explotado.....	44
Figura 2.17 Reacción superficie-arena.....	44
Figura 2.18 Grafito irregular en una matriz.....	45
Figura 2.19 Nódulos de grafito irregular .....	45
Figura 2.20 Grafito irregular en una matriz ferrítica.....	46
Figura 2.21 Grafito nodular rodeado por perlita y ferrita.....	46
Figura 2.22 Tensión y fluencia de un hierro nodular.....	63
Figura 2.23 Número de nódulos vs. Cantidad de silicio añadido.....	64
Figura 2.24 Efecto de nodularidad.....	65
Figura 2.25 Efecto de la nodularidad.....	66
Figura 2.26 Relación entre la resistencia a la tracción y contenido de perlita.....	67
Figura 3.1 Rangos de Carbono y Silicio.....	86
Figura 3.2 Efecto del Silicio en la Temperatura de transición del Hierro Dúctil..	86
Figura 3.3 Curvas Normalizadas de Transformación del Manganeso.....	87
Figura 3.4 Relación entre la Temperatura de Colado y la composición química del hierro y la escoria.....	90
Figura 3.5 Diagrama de un Horno Cubilote.....	94
Figura 3.6 Esquema de Horno de Arco Eléctrico.....	96
Figura 3.7 Esquema de Horno de Inducción.....	99
Figura 3.8 Esquema de un Horno de Canal.....	100
Figura 3.9 Variaciones en la recuperación de Mg.....	105
Figura 3.10 Disminución del Magnesio en el Hierro Dúctil.....	107
Figura 3.11 Disminución de la Nodularización en el hierro dúctil.....	108
Figura 3.12 Disminución del conteo de nódulos.....	109
Figura 3.13 Micrografía obtenida después de aplicar una técnica apropiada de pulido.....	111
Figura 3.14 Micrografía Obtenida después de aplicar mal pulido.....	111
Figura 3.15 Bloque Quilla.....	112
Figura 3.16 a – e Bloque Y dimensiones.....	113
Figura 3.17 Probeta Estándar ASTM para ensayos de Esfuerzos Forma y Medidas.....	113
Gráfico 4.1.....	119

Gráfico 4.2 Probeta toma 1 sin realizar ataque químico.....	121
Gráfico 4.3 Probeta toma 2 sin realizar ataque químico.....	122
Gráfico 4.4 Probeta toma 1 después de ataque químico.....	122
Gráfico 4.5 Probeta toma 1 mostrando nódulos.....	123
Gráfico 4.6 Probeta toma 1 mostrando nódulos y poros.....	123
Gráfico 4.7 Probeta toma 1 paso 12.....	124
Gráfico 4.8 Probeta toma 1 paso 14.....	124
Gráfico 4.9 Probeta toma 1 área de nódulos y poros.....	125
Gráfico 4.10 Probeta toma 1 esferoidización de nódulos y poros.....	126
Gráfico 4.11 Probeta toma 1 tamaño de grano.....	127
Gráfico 4.12 Probeta toma 2 después de ataque químico.....	127
Gráfico 4.13 Probeta toma 2 mostrando nódulos.....	128
Gráfico 4.14 Probeta toma 2 paso7.....	128
Gráfico 4.15 Probeta toma 2 paso8.....	129
Gráfico 4.16 Probeta toma 2 paso13.....	129
Gráfico 4.17 Probeta toma 2 paso14.....	130
Gráfico 4.18 Probeta toma 2 área de nódulos y poros.....	130
Gráfico 4.19 Probeta toma 2 esferoidización de nódulos y poros.....	131
Gráfico 4.20 Probeta toma 2 tamaño de grano.....	131
Gráfico 4.21 Probeta toma 3 después de ataque químico.....	132
Gráfico 4.22 Probeta toma 3 mostrando nódulos.....	132
Gráfico 4.23 Probeta toma 3 paso 7.....	133
Gráfico 4.24 Probeta toma 3 paso 8.....	133
Gráfico 4.25 Probeta toma 3 paso 13.....	134
Gráfico 4.26 Probeta toma 3 paso 14.....	134
Gráfico 4.27 Probeta toma 3 paso 18.....	135
Gráfico 4.28 Probeta toma 3 área de nódulos y poros.....	135
Gráfico 4.29 Probeta toma 3 esferoidización de nódulos y poros.....	136
Gráfico 4.30 Probeta toma 3 tamaño de grano.....	136
Gráfico 4.31 Superficie de Fractura.....	138
Gráfico 4.32 Superficie de Fractura.....	138
Figura 4.33 Esquema de ensayo a tracción.....	139
Imagen 4.34 Maquina de Ensayos Universales AMSLER RM 29.....	140
Imagen 4.35 Probetas para Ensayos de Tracción.....	140
Gráfico 4.36 Ensayo tracción 1.....	142
Gráfico 4.37 Ensayo tracción 2.....	144
Gráfico 4.38 Ensayo tracción 3.....	146
Gráfico 4.39 Ensayo tracción 4.....	148
Gráfico 4.40 Ensayo tracción 5.....	150
Imagen 4.41 Durante el Ensayo de Tracción.....	151
Figura 4.42 Esquema de Ensayo a Flexión.....	152
Imagen 4.43 Apoyos Para Ensayo de Flexión.....	154
Imagen4.44 Probetas para ensayo de flexión.....	154
Grafico 4.45 Fuerza Vs. Deflexión Ensayo 1.....	155
Grafico 4.46 Fuerza Vs. Deflexión Ensayo 2.....	156
Grafico 4.47 Fuerza Vs. Deflexión Ensayo 3.....	157
Grafico 4.48 Fuerza Vs. Deflexión Ensayo 4.....	158
Grafico 4.49 Fuerza Vs. Deflexión Ensayo 5.....	159
Imagen 4.50 Ensayo de Flexión.....	159

Imagen 4.51 Indentación de Muestras.....	160
Imagen 4.52 Probeta con Indentación.....	160
Figura 4.53 Esquema Ensayo de Torsión.....	162
Imagen 4.54 Maquina Avery Ensayo Torsión.....	164
Imagen 4.55 Probetas de Torsión.....	164
Grafico 4.56 Ángulo Vs. Esfuerzo Torsional Ensayo 1.....	167
Grafico 4.57 Ángulo Vs. Esfuerzo Torsional Ensayo 2.....	170
Grafico 4.58 Ángulo Vs. Esfuerzo Torsional Ensayo 3.....	173
Grafico 4.59 Ángulo Vs. Esfuerzo Torsional Ensayo 4.....	176
Grafico 4.60 Ángulo Vs. Esfuerzo Torsional Ensayo 5.....	179
Imagen 4.61 Durante Ensayo de torsión.....	180
Figura 4.62 Esquema de ensayo de Compresión.....	180
Imagen 4.63 Maquina de Ensayos Universales RM 29.....	181
Imagen 4.64 Probetas de Compresión.....	181
Grafico 4.65 Ensayo compresión 1.....	182
Grafico 4.66 Ensayo compresión 2.....	183
Grafico 4.67 Ensayo compresión 3.....	184
Grafico 4.68 Ensayo compresión 4.....	185
Grafico 4.69 Ensayo compresión 5.....	186
Imagen 4.70 Durante el Ensayo de Compresión.....	187
Grafico 4.71 Curva característica del Hierro Dúctil A Tracción.....	188
Gráfico 4.72 Determinación Gráfica de E(Gpa).....	189
Figura 4.73 Esquema de Ensayo Charpy.....	194
Imagen 4.74 Ensayo de Impacto Charpy.....	197
Imagen 4.75 Maquina AMSLER para ensayo de desgaste.....	197
Figura 4.76 Esquema de Ensayo de Fatiga.....	199
Imagen 4.77 Maquina RM Ensayo de Fatiga.....	199
Imagen 4.78 Probetas de fatiga.....	199
Gráfico 6.1 Probeta Estándar ASTM.....	231
Figura 6.2 Botón de Brinell Fuente INCOTEC.....	234
Figura 6.3 Probeta Rectangular.....	242
Figura 6.4 Clases de formas hierro grafito dúctil.....	245

# NOMENCLATURA

A	Área
d	Diámetro
F	fuerza
$\sigma$	Esfuerzo de tracción
g	gravedad
$\delta$	Deflexión
L	longitud
I	inercia
HBN	dureza Brinell
T	torque
Y	Angulo torsional
J	Momento polar de inercia
G	Modulo torsional
$\rho$	Distancia del centro de la probeta a la periferia
Lo	longitud original
Lf	longitud final
E	Modulo de elasticidad
U	Energía absorbida por la probeta durante el impacto
$\mu$	Coefficiente de Poisson
Sf	Esfuerzo a un numero de ciclos (fatiga)
Sy	Esfuerzo Fluencia Tracción
Suy	Esfuerzo ultimo de tracción
Sb	Esfuerzo ultimo de Flexión
Sst	Esfuerzo cortante

## **ANEXOS**

- Anexo A Norma Colombiana NTC 1370
- Anexo B Normas ASTM referentes a hierro Fundido
- Anexo C Gráficos obtenidos en las máquinas del Laboratorio
- Anexo D Cálculos y gráfico del ensayo a Fatiga
- Anexo E Análisis químico ANDEC-FUNASA

## RESUMEN

En la actualidad, la industria metalúrgica ecuatoriana se encuentra en pleno desarrollo, por lo cual, se ve la necesidad de implementar y elaborar nuevos productos que sean capaces de satisfacer las necesidades, ofreciendo una alta calidad y desempeño, brindándole a la industria ecuatoriana la capacidad de competir en los mercados internacionales.

Debido a esta tendencia de superación, es necesario realizar estudios que permitan a la industria metalúrgica, un avance industrial encaminado a la producción sustentable y sostenida en calidad, por esta razón, nos enfocamos en investigaciones para caracterizar la fundición de hierro nodular, la cual no se encuentra muy desarrollada ni difundida en nuestro país pero brinda grandes prestaciones al tener mejores características que las del hierro gris.

Nuestro objetivo es dar información clara y precisa a las industrias que deseen implementar la producción de hierro nodular o que necesitan hacer controles de calidad en elementos elaborados de dicha fundición, además establecer procedimientos para el análisis del material del que se obtendrá la información, la misma que se hará a través de la realización de muestras y probetas, donde los ensayos de laboratorio darán resultados que permitirán sacar conclusiones y tomar correctivos para mejorar la calidad de nuestros productos.

El afán nuestro, es el de proporcionar, información y datos concernientes a las propiedades mecánicas y características acerca de la fundición del hierro nodular, para facilitar el diseño óptimo y confiable de elementos.

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

En la actualidad, la industria metalúrgica ecuatoriana se encuentra en pleno desarrollo, por lo cual, se ve la necesidad de implementar y elaborar nuevos productos que sean capaces de satisfacer las necesidades, ofreciendo una alta calidad y desempeño, brindándole a la industria ecuatoriana la capacidad de competir en los mercados internacionales.

Debido a esta tendencia de superación, es necesario realizar estudios que permitan a la industria metalúrgica, un avance industrial encaminado a la producción sustentable y sostenida en calidad, por esta razón, nos enfocamos en investigaciones para caracterizar la fundición de hierro nodular, la cual no se encuentra muy desarrollada ni difundida en nuestro país pero brinda grandes prestaciones al tener mejores características que las del hierro gris.

Nuestro objetivo es dar información clara y precisa a las industrias que deseen implementar la producción de hierro nodular o que necesitan hacer controles de calidad en elementos elaborados de dicha fundición, además establecer procedimientos para el análisis del material del que se obtendrá la información, la misma que se hará a través de la realización de muestras y probetas, donde los ensayos de laboratorio darán resultados que permitirán sacar conclusiones y tomar correctivos para mejorar la calidad de nuestros productos.

El afán nuestro, es el de proporcionar, información y datos concernientes a las propiedades mecánicas y características acerca de la fundición del hierro nodular, para facilitar el diseño óptimo y confiable de elementos.

## 1.2 DEFINICION DEL PROBLEMA

Los productos elaborados con fundición de hierro dúctil, esferoidal o nodular aun no se encuentran muy difundidos en nuestro país pero paulatinamente la exigencia por sus prestaciones está haciendo que esta tecnología este en vías de desarrollo.

Es un hecho que el hierro nodular debido a sus buenas propiedades mecánicas en prestaciones de alto desempeño ha desplazado a la frágil fundición nodular, ya que múltiples productos como rejillas, tapas de alcantarillas, aunque no están sometidas a grandes esfuerzos hoy en día el municipio de Quito esta exigiendo que sean de hierro nodular, y otros productos que resisten grandes esfuerzos como por ejemplo discos de frenos, bloques de motor, árboles de transmisión, cigüeñales se desarrollan en hierro nodular.

Por estas razones es indispensable normalizar y caracterizar la fundición de hierro nodular para que de esta forma las empresas que estén interesadas en el desarrollo de esta tecnología puedan tener un punto firme de referencia, ya que hoy en día en el Ecuador no existe una norma para esta finalidad.

El afán de crear la propuesta de norma y caracterizar al hierro nodular es el de brindar datos relevantes y verídicos que ayuden a los diseñadores a producir piezas con una mayor seguridad sobre su eficacia al momento de ser usados y exigidos .

Esta investigación , pretende determinar parámetros para generar una tabla de valores que logre constituirse en la norma ecuatoriana de hierro nodular, a partir de la cuál el productor estará en capacidad de asegurar qué tipo de hierro es capaz de producir y qué tipos de aplicación puede resistir con seguridad , con la propuesta de norma ecuatoriana de caracterización de hierro .

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 ESTUDIAR Y REALIZAR LAS PRUEBAS VIABLES CON EL FIN DE OBTENER RESULTADOS CONFIABLES**

Dentro de los estudios a realizar y las pruebas a efectuar se encuentran dos grandes campos de la Ingeniería Mecánica involucrados que son la Metalurgia y la Resistencia de Materiales, las que nos ayudaran a comprender el comportamiento del hierro nodular cuando es sometido a cargas, a fatiga , etc., así como observar su micro estructura que también determinara el comportamiento del material e intrínsecamente sus propiedades mecánicas.

### **1.3.2 DISEÑAR UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN PARA EL HIERRO NODULAR**

Al realizar la caracterización del hierro nodular se utilizara un método probado y confiable preferentemente sugerido por instituciones tales como ASTM ,para así obtener resultados verídicos, además se pretende marcar las pautas y generar un procedimiento para realizar caracterizaciones exitosas de este material.

### **1.3.3 EFECTUAR PRUEBAS EN LOS LABORATORIOS DE LA ESPE Y ASÍ DAR A CONOCER EL POTENCIAL INVESTIGATIVO DE LA ESCUELA**

Los ensayos casi en su totalidad serán efectuados en los laboratorios de la ESPE, lo cual demuestra que esta institución está en capacidad de brindar el apoyo necesario a un sin fin de investigaciones en el campo de la metalurgia y Resistencia de Materiales.

#### **1.3.4 OBTENER FACTORES DE RELACIÓN POR MEDIO DE LOS VALORES REALES DE ESFUERZOS ÚLTIMOS PARA GENERAR UNA TABLA CON FACTORES QUE PERMITA UN CALCULO APROXIMADO DE RESISTENCIAS , SABIENDO EL VALOR DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN**

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos mecánicos se calcularán factores de relación entre los diferentes esfuerzos aplicados el hierro nodular, que en un futuro permitirá generar mediante la ampliación de este estudio tablas que ayuden a conocer rápidamente todos los valores de esfuerzo, dureza, etc.. con solo realizar un ensayo mecánico como por ejemplo el de tracción ,que es el mas común lo que facilitará el diseño de productos.

#### **1.3.5 CREAR UN BORRADOR DE LA NORMA ECUATORIANA DE FUNDICIÓN DE HIERRO NODULAR CORRIGIENDO Y ADAPTANDO NORMAS EXTRANJERAS PARA QUE TENGAN UNA TOTAL APLICABILIDAD EN NUESTRO MEDIO**

En el INEN existen un gran número de normas nacionales y extranjeras , pero no cuenta con una norma local de caracterización de hierro Nodular , como fin este proyecto debe generar un borrador de la norma Ecuatoriana de Caracterización de hierro nodular , la misma que debe contener : Tipos de hierro , vocabulario relacionado objetivo , procedimiento y tamaño de las probetas a usarse .

### **1.4 ALCANCE DEL PROYECTO**

La finalidad que este proyecto desea alcanzar es la creación de una herramienta con parámetros que pueda ser usada por toda empresa que emprenda la tarea de crear hierro nodular, lo que les permitirá conocer de una manera mas fácil, detallada y objetiva las características de esta material, y al

ampliar sus conocimientos en el campo de la fundición de hierro nodular les brindará la oportunidad de generar una ventaja competitiva en el mercado.

## **1.5 JUSTIFICACION E IMPORTANCIA**

A través de un estudio minucioso se determinará las características que el hierro nodular. En el Ecuador el proceso esta en pleno desarrollo para lo cual se realizará este estudio con el fin de iniciar el proceso de normalización del hierro nodular.

Entre los capítulos que tiene este proyecto se detallan todos los métodos y procedimientos seguidos hasta la redacción del primer borrador de la norma ecuatoriana de caracterización de hierro nodular, los análisis, cuadros de datos y resultados obtenidos durante la investigación realizada en los laboratorios se presenta bien detallada y permite realizar con facilidad las conclusiones a las que llegamos, con el fin de proporcionar datos confiables sobre las características de esta fundición para facilitar el diseño de elementos y productos.

## CAPITULO 2

### FUNDAMENTOS TEORICOS

#### INTRODUCCIÓN

La producción de hierro gris , uno de los materiales mas antiguos utilizados por el hombre, fue hasta el final del siglo pasado basado en una experiencia totalmente empírica. Su micro estructura fue determinada a ser una mezcla de acero (  $Fe_3C + Fe$ ) y grafito el cual se presentaba en forma de hojuelas, y en la matriz metálica se observaban algunos contenidos de perlita, ferrita, y en ocasiones carburo férrico ( $Fe_3C$ ) además de algunos inclusiones de elementos no metálicos, y otro componente estructural del hierro gris es el fosfito férrico ( $Fe_3P$ ).

La presencia combinada de las hojuelas de grafito y del duro pero frágil carburo férrico y el fósforo dan a esta frágil aleación un máximo de elongación en un rango de 0.1 a 0.5 % y una resistencia a la tensión baja normalmente entre 15.000 y 50.000 psi.

La observación del grafito esferoidal en las aleaciones maleables ha sido posible solo gracias al desarrollo de los microscopios. Es un hecho que el grafito esferoidal esta presente en la naturaleza y se forma de manera natural como se puede observar en algunas rocas eutécticas como la pigmetita.

A mediados de los años 30 del siglo pasado fue reportado y observada la presencia de formaciones de grafito esferoidal en las fundiciones de hierro, de hecho el grafito esferoidal ha estado presente desde que el hombre produce hierro gris.

En los años 20 K.V Kerplely reporto que al sobrecalentar la colada para obtener hierro gris en un horno básico de arco directo bajo una altamente básica escoria produjo un hierro gris con una resistencia a tensión de 56.000 psi y con un porcentaje de elongación del 3 al 4 %, esta aleación fue una muy grande aproximación al hierro dúctil.

En 1936 una fundición de hierro con una completa esferoidización del grafito fue presentada como curiosidad en el sexto congreso de fundición en Dusseldorf – Alemania, y desde ahí empezó la carrera para la producción de la fundición de hierro esferoidal ya que se había notado las grandes mejoras en las propiedades mecánicas en relación a la fundición gris.

Entonces 3 de las entidades mas exitosas entraron en esta carrera el Instituto de Fundición en Aachen-Alemania, La Asociación Británica de investigación del Hierro Fundido en Alvechurch-Inglaterra , Y el Laboratorio Internacional de Investigación del Níquel Co, Inc en New Jersey.

Puede parecer extraño que el anuncio de éxito fuera casi simultaneo pero esto fue la simple confirmación del hecho de que era solo cuestión de tiempo para que se produzca el descubrimiento del hierro dúctil.

El trabajo en Aachen se realizado entre los años 1937 a 1948 , dieron como consecuencia 3 valiosas conclusiones para la obtención del hierro dúctil o esferoidal.

- Obtener una estructura eutectica o hipereutectica de carbón equivalente (CE).
- Sobrecalentar la colada en un horno eléctrico con una carga de escoria básica y con un contenido de azufre que no exceda el 0.008%
- Una alta taza de enfriamiento de la colada.

La búsqueda en la Asociación Británica de investigación del Hierro Fundido presuntamente comenzaron también a los finales de los 30 cubriendo no solamente al hierro (Fe), Silicio (Si) sino que también los sistemas de el Níquel (Ni)-C y el cobalto (Co)-C. La rata de alto enfriamiento e inoculación con Calcio-

Silicio llevo hacia la precipitación del grafito esferoidal en las aleaciones de Ni y Co. Después se descubrió que la adición del Cerio (Ce) producía grafito esferoidal en todos los sistemas probados, el contenido de azufre fue muy bajo.

Tanto el proceso alemán y el Británico tenían sus desventajas en cuanto a la producción comercial dado que el sistema alemán requiere un horno eléctrico para la fundición y un gran control sobre las tasas de enfriamiento de la colada. El proceso más práctico de los británicos, estaba limitado a los hierros hipereutecticos, lo que representaba cierto tipo de restricción para la mayoría de los productores de fundición.

La investigación acerca de los efectos de la adición de el magnesio en las fundiciones de hierro, empezaron en 1942 en el Laboratorio Internacional de Investigación del Níkel Co, Inc en New Jersey, con el objetivo de remplazar el cromo con el magnesio como un carburo estabilizador en la resistencia a la abrasión de los hierros blancos martensíticos. Luego estas investigaciones se extendieron hasta las fundiciones del hierro gris.

En este instituto se prepararon 2 fundiciones con la composición química que se muestra en la tabla:

**Tabla2.1 Composición Química**

Tipo	Composición Química %			CE
	TC	Si	Ni	
Clase 20	3.5	2.25	2	4.2
Clase 40	3.2	1.75	1	3.74

Fuente : Ductile Iron Handbook

Ambas muestras fueron tratadas con 0.15 a 0.50% de Magnesio, adicionado como una aleación de 80% Ni – 20% Magnesio e inoculado subsecuentemente

con 0.5% de Ferro-Silicio (15% Fe-85% Si). La resistencia a la tensión esperada para la clase 20 era de 20,000 psi. Pero el resultado medido fue 5 veces mayor, 112,000 psi., algo similar paso con el de clase 40, mostrando ambas clases una esferoidización completa del grafito.

Estas pruebas demostraron las grandes propiedades mecánicas de la fundición nodular, lo que a influenciado el desarrollo de nuevas y mejores técnicas para su obtención.

## **2.1 PROPIEDADES Y TIPOS DE FUNDICIÓN**

### **2.1.1 PRINCIPALES PROPIEDADES DE LAS FUNDICIONES**

Las fundiciones presentan las siguientes propiedades entre otras:

- Las piezas en fundición son, en general más baratas que las de acero (material más comúnmente en los talleres, fábricas de maquinaria, motores, instalaciones, etc.), además de que su fabricación es más sencilla al emplearse instalaciones menos costosas y realizarse la fusión a temperaturas más bajas que las que corresponden al acero.
- Las fundiciones son, en general, mucho más fáciles de mecanizar que los aceros.
- Se pueden fabricar con relativa facilidad piezas de muy grandes dimensiones y también piezas pequeñas y complicadas, obteniéndolas con gran precisión de formas y medidas, siendo además en ellas mucho menos frecuentes la aparición de zonas porosas que en las fabricadas con acero fundido.

- La resistencia a la compresión de las fundiciones varía desde 490 a 980 Mpa y su resistencia a la tensión puede variar de 117 a 880 Mpa<sup>1</sup> por lo que son utilizadas para la fabricación de varios elementos de maquinaria.
- Absorben las vibraciones de mejor manera que el acero y presentan buena resistencia al desgaste.
- La temperatura de fusión de las fundiciones son relativamente bajas por lo que en general se pueden conseguir temperaturas en las cuales presentan gran fluidez lo que facilita el colado y la fabricación de piezas.

## 2.1.2 TIPOS DE FUNDICIÓN

Existen cuatro grandes grupos que son , fundición blanca , fundición gris , fundición atruchada y maleable y se clasificaron de esta manera por la fractura que presentan.

### 2.1.2.1 Fundición gris

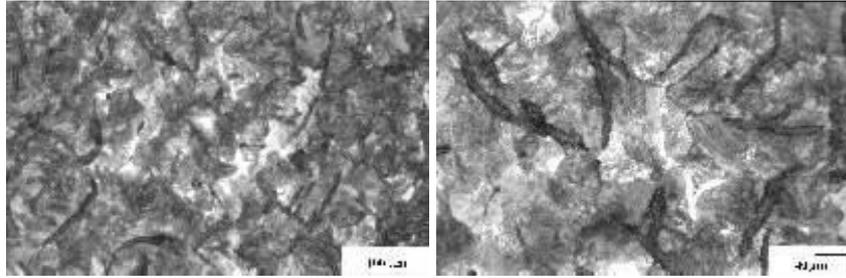
De todas los matrices para fundición, el hierro gris es el que más comúnmente se usa debido a su costo relativamente bajo, la facilidad de ser fundido o colación en grandes cantidades y a su fácil maquinado. Las principales objeciones son: su fragilidad y su baja resistencia a la tensión. Este material no se suelda con facilidad debido a que puede agrietarse.

El Hierro Gris tiene entre 2.5 y 4% de Carbón y de 1 a 3% de Silicio.

Las fundiciones de Hierro Gris son débiles, con esfuerzos de tensión última del orden de 150 a 400 MPa y no presentan practicamente ninguna capacidad de deformación.

---

<sup>1</sup> 1 psi = 9.80665 pa

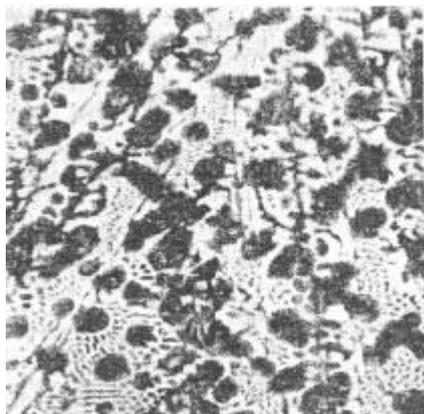


**Figura 2.1 Microestructura típica de fundición gris, atacada con nital al 2%, x1000**

### **2.1.2.2 Fundición blanca**

Si todo el carbono en un hierro de fundición está en forma de cementita y perlita sin que haya grafito, la estructura resultante se conoce como hierro colado blanco. Se puede producir en dos variedades y uno u otro método dan por resultado un metal con grandes cantidades de cementita, y así el producto será muy frágil y duro para el maquinado, pero también muy resistente al desgaste.

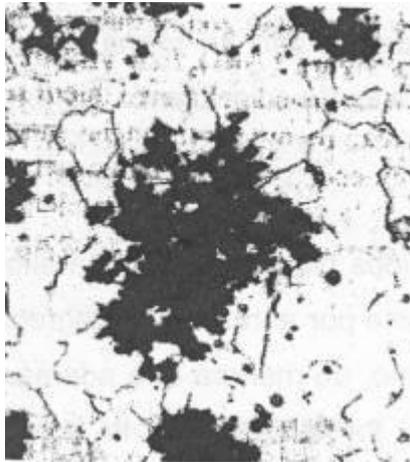
El Hierro Blanco, contiene entre 2 y 3.3% de carbón



**Figura 2.2 Fundición blanca, sin tratamiento, (x1000)<sup>3</sup>**

### 2.1.2.3 Fundición maleable

Si el hierro fundido blanco se somete a un proceso de recocido, el producto se le llama hierro colado maleable. Un hierro maleable de buena clase puede tener una resistencia a la tensión mayor que 350 Mpa., con una elongación de hasta el 18%. Debido al tiempo que se requiere para el recocido, el hierro maleable necesariamente es más costoso que el gris.



**Figura 2.3 Fundición maleable ferrítica, x200**

### 2.1.2.4 Hierros colados de aleación

El níquel, el cromo y el molibdeno son los elementos de aleación más utilizados con el hierro fundido. El níquel aumenta la resistencia y la densidad, mejora la resistencia al desgaste. Cuando se agrega cromo y níquel, la dureza y la resistencia mejoran sin que haya reducción en la maquinabilidad. El molibdeno aumenta la rigidez, la dureza y la resistencia a la tensión y al impacto.

### 2.1.2.5 Fundición atruchada

Son fundiciones en la que parte del carbono se encuentra combinado formando cementita y parte libre del grafito. A este grupo pertenece la mayoría de las fundiciones y utilizan normalmente como son las fundiciones grises, atruchadas, perlíticas.

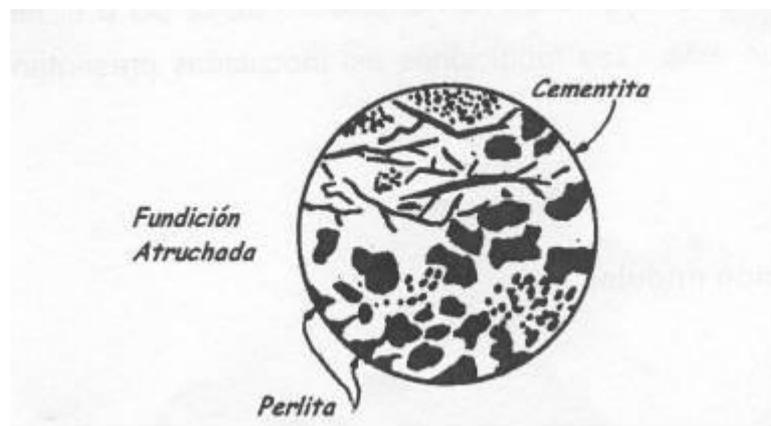


Figura 2.4 Fundición atruchada, x50

### 2.1.2.6 Aceros para fundición

La ventaja del proceso de colado es que piezas con formas complejas se pueden fabricar a un costo menor que por otros medios. Los mismos elementos de aleación que se utilizan en aceros para forja se emplean con los aceros para fundición, a fin de mejorar la resistencia y otras propiedades mecánicas. Las piezas de acero fundido también pueden ser tratadas térmicamente a fin de modificar las propiedades mecánicas y, a diferencia de los hierros fundidos, pueden ser soldadas.

### 2.1.2.7 Fundiciones aleadas

Se denominan fundiciones aleadas a aquellas que se les ha agregado aleaciones y dentro de su composición se encuentra Ni , Cr , Mn , Cu etc. en porcentajes suficientes que logren cambiar las propiedades mecánicas .

Hay elementos que se disuelven en la ferrita , logran endurecerla y aumentar la resistencia mecánica a la tracción estos son silicio , cobre , níquel y el aluminio , este ultimo presenta problemas , su adición causa un fenómeno de volcán y salpica con violencia por la baja temperatura de fusión del aluminio

El cromo , manganeso y molibdeno tiende a aglutinar el carbono y forman carburo , los mismos que al enfriarse formaran fundiciones blancas .

En la tabla siguiente se puede apreciar la influencia que tienen los aleantes sobre las fundiciones

**Tabla 2.2 Efectos de aleantes en la fundición**

Elemento	Grafitización y coeficientes de grafitización	Efectos sobre los carburos a alta temperatura	Efectos en la estructura del grafito	Efectos en el carbono combinado en la perlita	Efectos que produce en la matriz
Carbono	Favorece	Desestabiliza	Engrosa	Decrece Fuerte	Favorece la formación de ferrita
Silicio	Favorece +1	Desestabiliza	Engrosa	Decrece Fuerte	Favorece la formación de ferrita
Aluminio	Favorece +0.5	Desestabiliza	Engrosa	Decrece Fuerte	Favorece la formación de ferrita
Titanio	Favorece +0.4	Desestabiliza	Afina fuerte	Decrece Fuert	Favorece la formación de ferrita
Níquel	Favorece +0.3	Desestabiliza	Afina poco	Estabiliza	Afina la perlita y da dureza

Cobre	Favorece +0.2	Indiferente	Afina	Decrece	Da dureza
Manganeso	Se opone-0.2	estabiliza	Afina	Aumenta	Afina la perlita y da dureza
Molibdeno	Se opone-0.3	indiferente	Afina Fuerte	Aumenta	Afina la perlita y da dureza
Cromo	Se opone-1	estabiliza	Afina poco	Aumenta	Afina la perlita y da resistencia
Vanadio	Se opone-2.5	estabiliza	Afina	Aumenta	Afina la perlita y da dureza

**Continuación Tabla 2.2**

Fuente: Fundiciones José Apraiz B.

El silicio al ser introducido en la fundición desplaza los puntos eutécticos hacia la izquierda y hacia arriba la temperatura eutécticoide.

El níquel y cromo desplazan los puntos eutécticos hacia la izquierda y la temperatura baja.

El manganeso desplaza los puntos hacia la derecha y hacia arriba .

Todos los aleantes mencionados desplazan el punto eutécticoide hacia la izquierda en la gráfica hierro carbono.

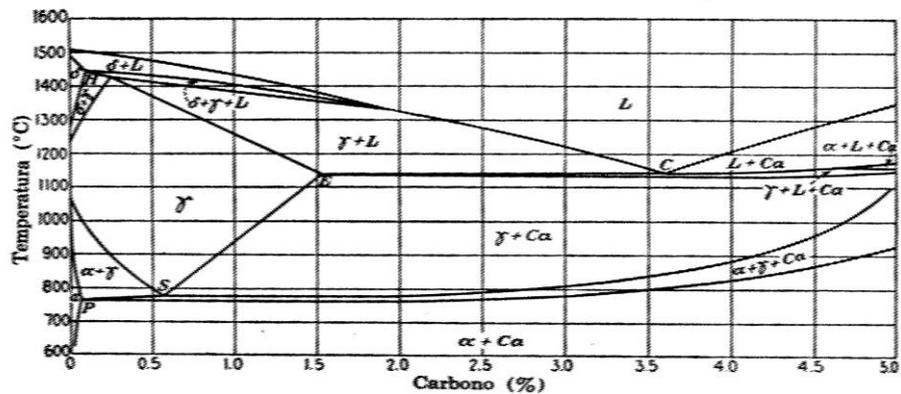


FIG. 314. Diagrama hierro-carbono-silicio, con 2% de silicio (Greiner-Marsh-Stoughton).

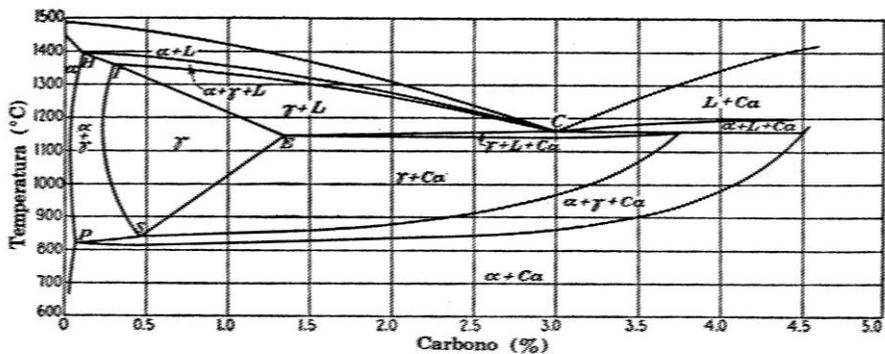


FIG. 315. Diagrama hierro-carbono-silicio, 3.8% de silicio (Greiner-Marsh-Stoughton).

**Figura 2.5 desplazamiento de puntos eutécticos**

## **2.1.2.8 Fundiciones Especiales**

### 2.1.2.8.1 Fundiciones Grises aciculares

Estas fundiciones tienen resistencias que varían desde 392 a 588 Mpa lo que resulta más elevado que otro tipo de fundiciones grises. Debido a que su matriz es acicular de tipo bainítico y láminas de grafito.

Son fáciles de mecanizar, su resistencia al desgaste es elevada, posee una alta tenacidad y resistencia al choque en comparación de la fundición gris.

### 2.1.2.8.2 Fundiciones Inoculadas

Son aquellas en las que se introduce en el metal fundido un elemento que es una especie de catalizador que favorece la formación de una estructura perlítica en lugar de cementita.

Los materiales inyectados son siliciuro de calcio o el ferrosilicio con más del 50% de este. Las fundiciones así inoculadas presentan grafito libre microforme.

### 2.1.2.8.3 Hierro colado dúctil o nodular

Se combinan las propiedades dúctiles del hierro maleable y la facilidad de fundición y maquinado del gris, y que al mismo tiempo poseyera estas propiedades después del colado.

El hierro colado dúctil es esencialmente el mismo hierro maleable, sin embargo, el hierro dúctil se obtiene agregando magnesio al metal fundido.

El hierro dúctil tiene un alto módulo de elasticidad( de 172 Gpa). El hierro nodular posee una resistencia a la compresión que es mayor que la resistencia a la tensión, aunque la diferencia no es tan grande. Su intervalo de

aplicaciones resulta utilizable en piezas de fundición que requieran resistencia a cargas de choque o impacto.

### 2.1.3 CLASIFICACIÓN DEL HIERRO DÚCTIL O NODULAR

La ASTM emitió estándares para la clasificación del hierro grafito basada en el tipo, tamaño y distribución. ASTM A 247-67 (reaprobada en 1984) con el título de: “Método Estándar para la evaluación de la micro estructura de las fundiciones de Hierro y Grafito”, consiste en el método en donde la micro estructura observada de las partículas del Grafito son comparadas con las micro estructuras ideales publicadas en tablas o en donde su rango está basado en la semejanza a las estructuras ideales publicadas. Ejemplos de las clasificaciones del Grafito se muestran en la tabla 2.3 y figuras 2.6 y 2.7.

**Tabla 2.3 Clasificación del Grafito basada en el tamaño.**

Clase de tamaño	Dimensión máxima (mm) x 100
1	128
2	64
3	32
4	16
5	8
6	4
7	2
8	1

Fuente : Ductile Iron Handbook

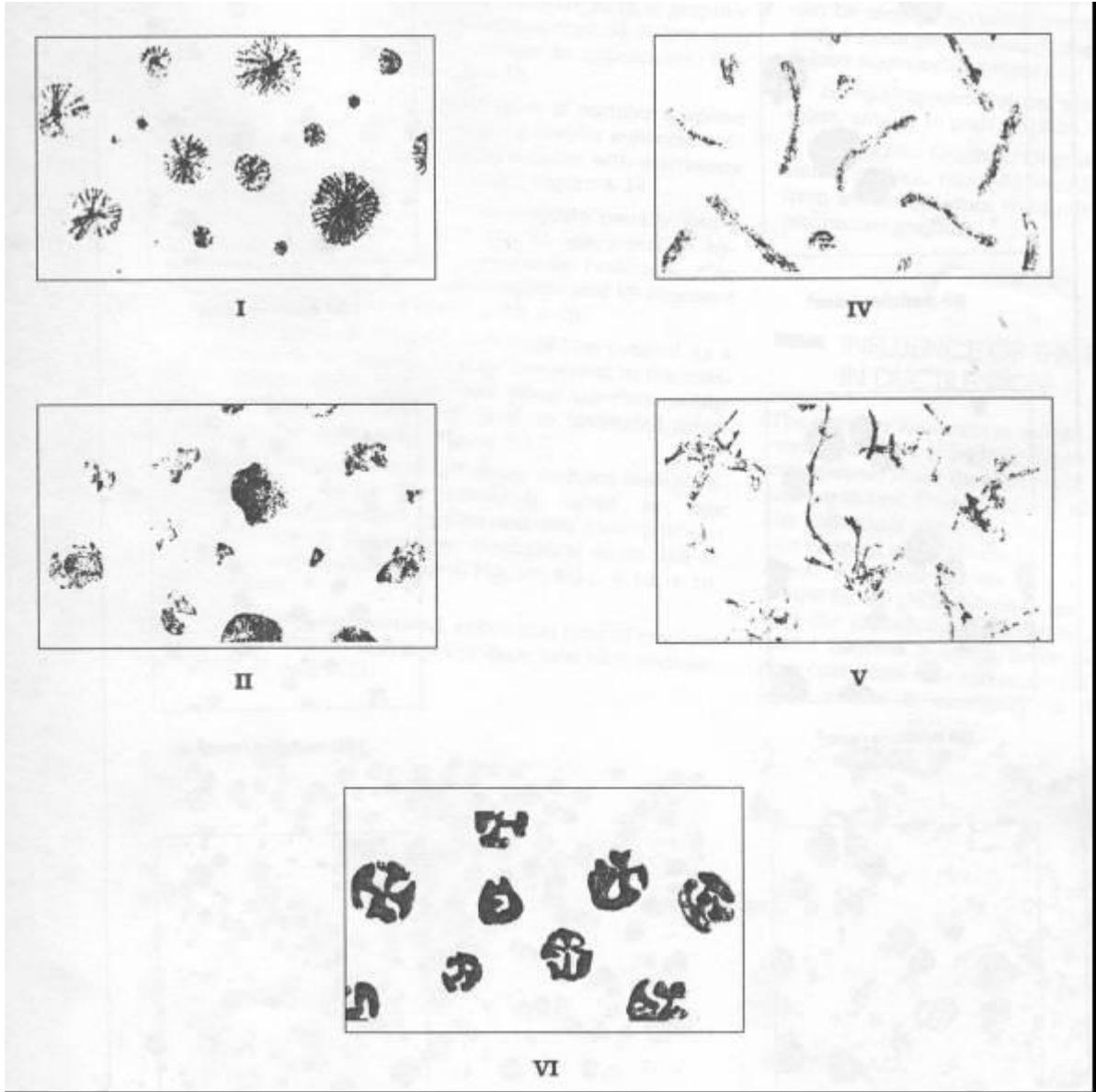


Figura 2.6 Clases de formas hierro grafito dúctil, x100.

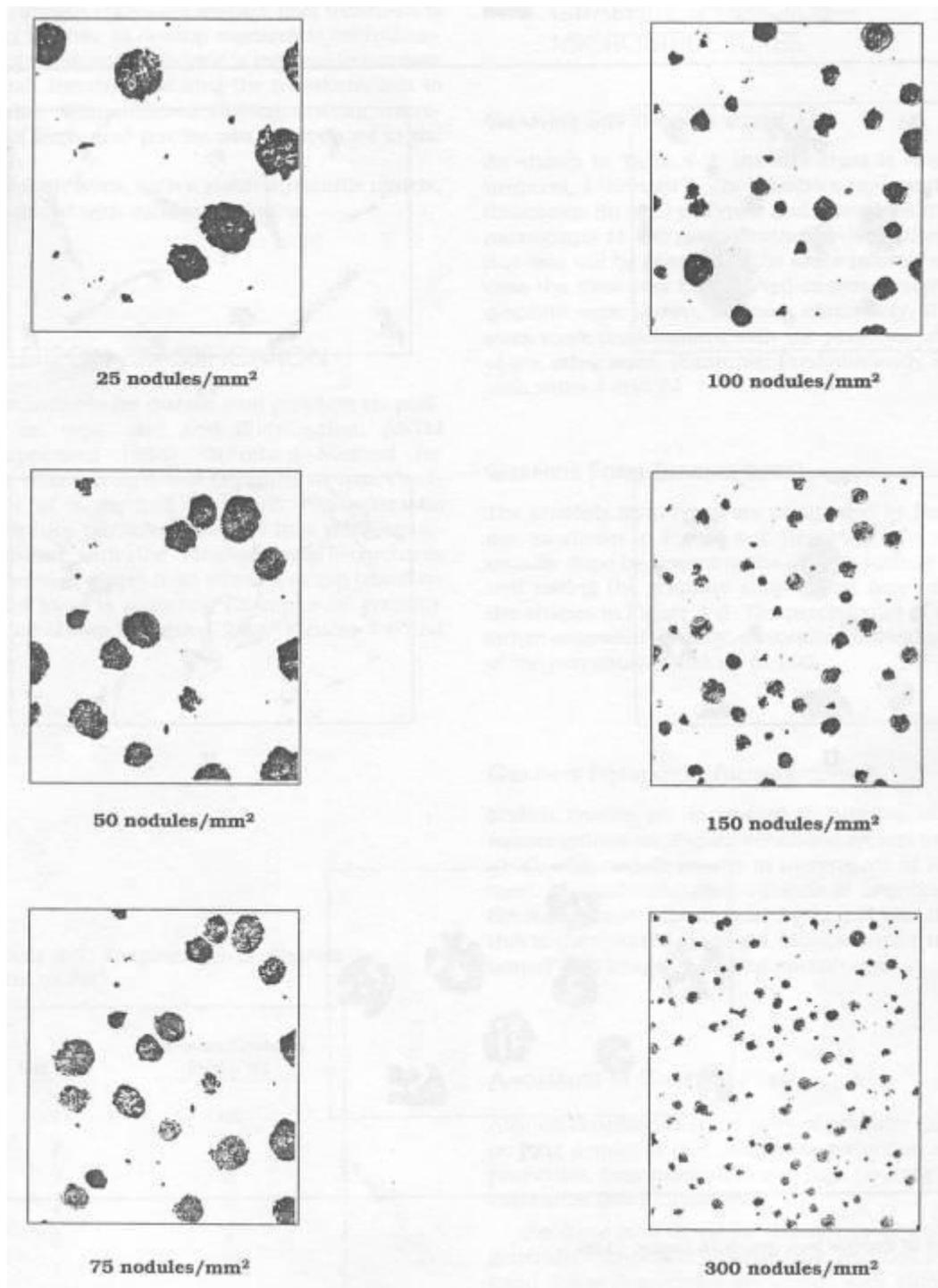


Figura 2.7 Clasificación del hierro grafito dúctil basado en nódulos /mm<sup>2</sup> .

## **2.1.4 MICRO ESTRUCTURAS DEL GRAFITO ESFEROIDAL**

### **2.1.4.1 Tamaño del grafito (tamaño del nódulo)**

Como se mostró en la tabla 2.3, la clase del tamaño está designado por medio de un numeral, del 1 al 8. Los números representan la máxima dimensión (en mm) de tipo I y II nódulos medidos en un micrográfico en 100 magnificaciones (x 100). A menudo, más de un tamaño puede estar presente en el mismo micrográfico, en tal caso, los tamaños pueden ser presentados como porcentajes de el área total mostrada del grafito, o más comúnmente, indicando los tamaños más predominantes con la presencia de algunos nódulos de diferentes tamaños. (Ejemplo: Predominantemente tamaños 5 y 6 con algunos de tamaño 4 y 7.)

### **2.1.4.2 Forma del Grafito (tipos de nódulo)**

Los tipos de forma del Grafito son designados por números romanos, así como se muestra en la figura 2.6. Los tipos de nódulos se presentan mediante el escaneo de la muestra en un micrográficas (x 100) y las formas del grafitos concuerdan muy cercanamente con las formas mostradas en la figura 2.6. Los porcentajes de cualquiera de los dos son estimados visualmente, o contados individualmente, la suma de los porcentajes nos tiene que dar 100.

### **2.1.4.3 Cantidad de Grafito (conteo de nódulos)**

El conteo de los nódulos está expresado en número de nódulos por milímetro cuadrado. La figura 2.7 muestra micrografía (x 100), con conteos de nódulos en incrementos de 25 y 50 por mm<sup>2</sup>. La estimación manual consiste en el conteo de partículas en un microscopio con una malla superpuesta y visualmente comparar esta con la estándar seleccionada. Resultados más exactos son obtenidos mediante un microscopio de análisis de imagen.

#### **2.1.4.4 Anomalías en las formas de Grafito**

##### **2.1.4.4.1 Grafito Alineado**

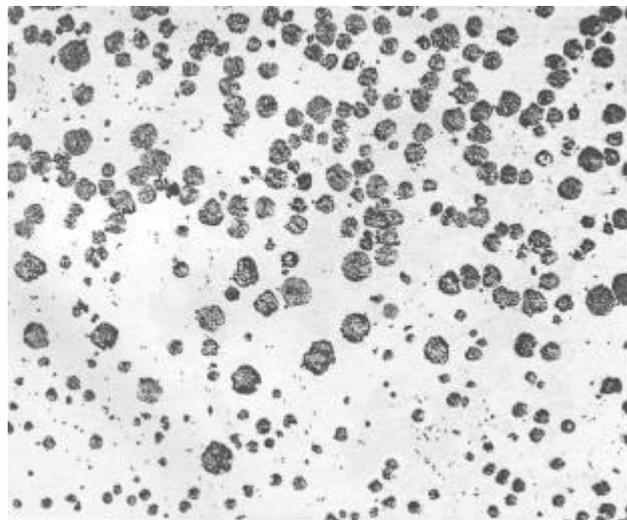
Son distintas hileras de nódulos del grafito se forman en largas dendritas que pueden causar la reducción de las propiedades mecánicas. Nucleación pobre y altas temperaturas pueden causar este tipo de deformaciones.

##### **2.1.4.4.2 Grafito Aglomerado**

Son agrupaciones o racimos de nódulos, generalmente comprendían nódulos de tamaño pequeño en campos sobre inoculados. A veces asociado con puntos brillantes/duros de inoculaciones no disueltas vistas en superficies maquinadas.

##### **2.1.4.4.3 Flotación de Carbón**

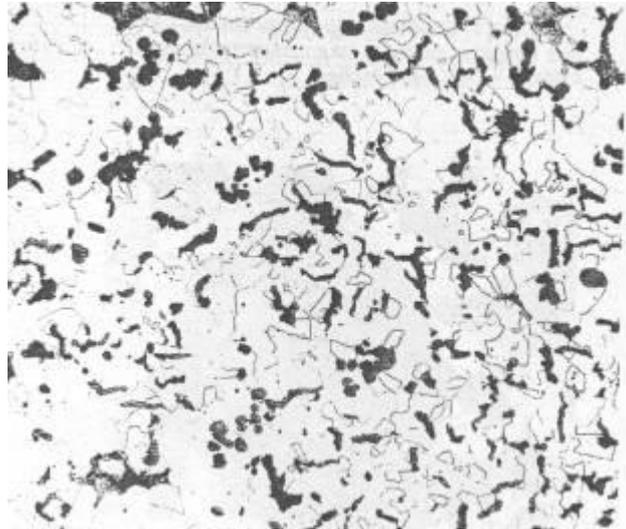
Es cuando grafito que se encuentra libre se forma previamente a la solidificación en hierro hipereutectico y flota al tope dela fundición (o hacia dentro de la superficie en fundiciones centrífugas) cuando la fundición se solidifica. Figura 2.8.



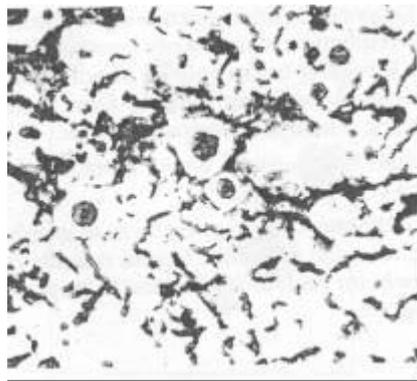
**Figura 2.8 Flotación de carbono mostrada en el área de la fundición, sin tratamiento, x50 .**

#### 2.1.4.4.4 Grafito Compactado

Es una forma intermedia de grafito caracterizado por ser corto, pequeños y gruesos elementos interconectados con extremos redondos. El Vermicular es similar en apariencia. Fig 2.9, 2.10, 2.11, 2.12 y 2.13.



**Figura 2.9 Hierro dúctil con 50% de nodulización .**



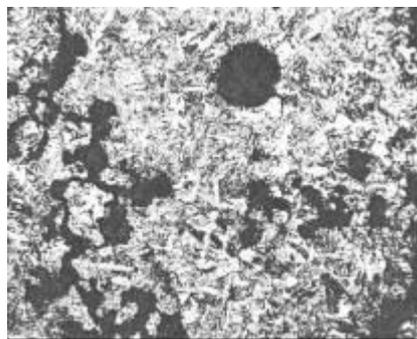
**Figura 2.10 Grafito Vermicular (C.G.iron) con nódulos afuera en la matriz primaria ferrítica, x 100, 2%, tratada con nital**



**Figura 2.11 Grafito Vermicular mostrando algunos nódulos irregulares en la matriz perlítica-ferrítica, x 250 perfilada con nital .**



**Figura 2.12 Extremadamente grueso, nódulos irregulares mostrando formaciones vermiculares en la matriz perlítica-ferrítica, x 250, 2%, tratada con nital .**



**Figura 2.13 Una fisura seguida de un Molde de grafito Vermicular en la matriz, x 100, 2%, perfilada con nital .**

#### 2.1.4.4.5 Grafito en forma de huella de cangrejo

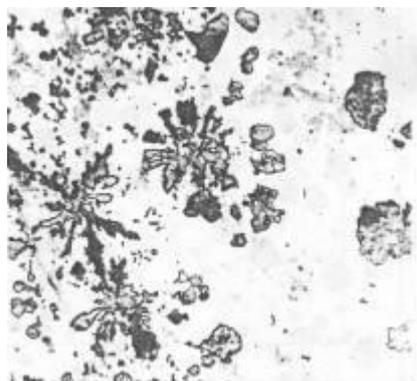
Es una forma degenerada del grafito nodular (causada por el magnesio sobre tratado y/o elementos subversivos) caracterizados por nódulos deformados con extensiones o elementos gruesos, pareciéndose a las patas de cangrejo. Fig 2.14.



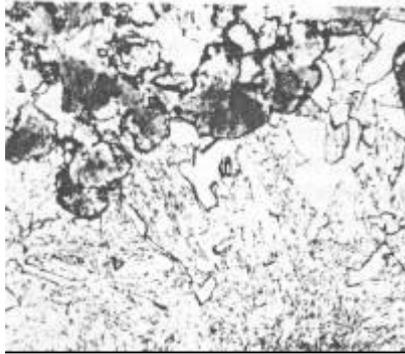
**Figura 2.14 Grafito en forma de cangrejo es mostrado a x 1000, sin tratamiento.**

#### 2.1.4.4.6 Grafito Explotado

Es una forma de grafito encontrado usualmente en la parte superior de las superficies de las fundiciones, en secciones pesadas, hierros hipereutéticos con altos residuos de magnesio. También por inoculación pesada/tarde. Agravada por cantidades excesivas de tierras extrañas. Fig. 2.15, 2.16.



**Figura 2.15 Grafito esferoidal explotado en sección pesada de fundición de hierro dúctil hipereutético, x 100, 2%, tratada con nital.**



**Figura 2.16 Grafito explotado a x 250, tratada con nital.**

#### 2.1.4.4.7 Formas de Grafito en hierro nodular

Puede estar presente como una capa en la superficie o como ( islas de gris) inmersas en la fundición. Generalmente atribuidas a la interfase de reacciones al azufre molde-metal, o salpicaduras de metal sin tratamiento en la cavidad del molde. Fig 2.17.



**Figura 2.17 Reacción superficie-arena. Ocurre comúnmente a 0.02 pulg en las superficies de las fundiciones o fundiciones de hierro dúctil pesado, o de mayor forma en fundiciones en moldes hechos con uniones de seguros químicos orgánicos, x 100, tratada con nital.**

#### 2.1.4.4.8 Grafito Irregular

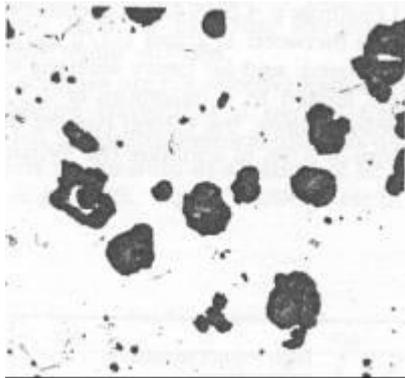
Son deformaciones de los nódulos asociados con la falta del agente nodulizante o tardía postinoculación. Excesivo cerio y sobretratamiento pueden también causar deformaciones en los nódulos. Trabajo mecánico (en frío o caliente) puede cambiar la forma de los nódulos. Fig. 2.11, 2.12, 2.18, 2.19 y 2.20



**Figura 2.18 Grafito irregular en una matriz causado por un sobretratamiento con cerio (0.20% Ce), x 250, 2%, tratada con nital.**



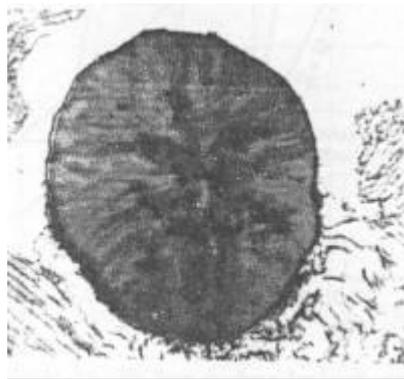
**Figura 2.19 Nódulos de grafito irregular y un pedazo de grafito, x 250, 2%, tratada con nital.**



**Figura 2.20 Grafito irregular en una matriz ferrítica , x 250, 2%, tratada con nital.**

#### 2.1.4.4.9 Grafito Nodular

Es redondo, esferoidal de grafito creado por tratamiento de una base de hierro de bajo azufre por medio de agentes nodulizantes. Fig 2.21



**Figura 2.21 Grafito nodular rodeado por perlita y ferrita , x 1500.**

#### 2.1.4.4.10 Grafito Secundario

Son partículas de grafito que se forman después de la solidificación por precipitación de carbón previamente combinado. Esto puede ser visto en tratamientos del hierro o en fundiciones lentamente enfriadas lo suficiente. El grafito secundario puede formar una esfera concéntrica rodeando a los nódulos primarios (u originales).

#### 2.1.4.4.11 Grafito Impecable

Son nódulos con uno o más sobresalientes, similar a la de grafito en forma de cangrejo.

#### 2.1.4.4.12 Grafito Vermicular

Es una forma degenerada del grafito constituido de gruesas formas de gusanos redondeados, usualmente resultantes de los bajos residuos de magnesio. Similar en apariencia al grafito compacto.

## 2.2 IMPORTANCIA DE LA FUNDICION NODULAR

El hierro es un elemento relativamente abundante en el universo: se encuentra en el Sol y en muchos tipos de estrellas en cantidades importantes. Sus núcleos son muy estables. Es el componente principal de un tipo de meteoritos denominados sideritas.

Se cree que el núcleo de la Tierra está, en gran parte, compuesto por hierro en la corteza es el cuarto elemento más abundante (5,63% en peso), tras el silicio, el oxígeno y el aluminio. Sólo se encuentra en estado elemental en los meteoritos. Sus minerales son muy abundantes (más de 400) y destacan: la más común de todas ellas es el hematites que forma las arenas negras de playas y arroyos (hasta un 65% de hierro), la magnetita (hasta un 70% de hierro), la siderita (hasta un 40% de hierro) y la pirita (hasta un 46% de hierro).

Los procesos de obtención del metal y sus aleaciones constituyen lo que se conoce como siderurgia: en un horno a inducción se reducen los minerales de hierro con carbón a alta temperatura y añadiendo el inoculante se obtiene el hierro nodular.

La producción de metales básicos es uno de los parámetros económicos más usados en la clasificación de países ya que la producción de acero está ligada al hierro como materia prima de éste, y esto refleja la industrialización que cada país tiene, la maquinaria está hecha de metales como el acero, la industria petroquímica y el sector energético necesitan máquinas éstas necesitan de energía para trabajar, es por esta consideración que es un círculo cerrado.

A nivel mundial se estima que el sector siderúrgico genera empleo para unos 800 millones de personas. Sólo el sector del hierro y del acero representa aproximadamente el 75% de este total. La producción mundial de hierro en 1999 llegó a unos 540 millones de toneladas al año, y la de acero bruto a 825 millones de toneladas, en el 2000, 7% más que en 1999. El consumo de productos ferrosos en 2000 fue de 755 millones de toneladas. En total, la producción de los principales metales no ferrosos aluminio, cobre, plomo, manganeso y zinc es de unos 45 millones de toneladas al año.

Es por esto que nuestro país debe cambiar su legislación minera y aprovechar los recursos que tenemos por que el petróleo durará unos cuantos años más y luego se debería explotar hierro, carbón y bentonita con el fin de remplazar al petróleo.

## **2.3 LOS PROCEDIMIENTOS PARA LA OBTENCIÓN DE HIERRO NODULAR**

El hierro nodular fue desarrollado en la década de los años 40. Es referido a veces como hierro dúctil o hierro de grafito esferoidal. En la década de los años 50 el hierro nodular tuvo un fenomenal incremento de nueve veces en su uso como un material de ingeniería. Sus propiedades son una combinación inusual debido a que su grafito en forma de esferoides mejora la resistencia a la tracción así como una mayor deformación en comparación con los flóculos presentes en el hierro gris

El modo de solidificación es obtenido por la adición de una pequeña pero específica cantidad de magnesio en el hierro líquido de composición apropiada.

El hierro base es severamente restringido en los contenidos de aleantes los cuales pueden interferir en la formación del grafito esferoidal. El magnesio reacciona con el azufre y oxígeno en el hierro líquido y cambia la manera en que se forma el grafito. El alto contenido de carbono y silicio en el hierro nodular proporciona ventajas en los procesos de fundición.

El hierro nodular 100- 70-03 por ejemplo muestra una relación lineal esfuerzo - deformación considerando la resistencia a la rotura de 689 MPa y la resistencia a la fluencia de 483 MPa, además un porcentaje de elongación del 3% aproximadamente.

Las diferentes clases de hierro nodular son producidas controlando la matriz alrededor del grafito en la fundición o por un subsecuente tratamiento térmico. Existen solamente diferencias menores en la composición entre las clases regulares, y estos ajustes son hechos para promover la matriz deseada. Se pueden añadir aleantes al hierro nodular para ayudar en el control de la matriz en la fundición o para proporcionar ciertas respuestas a los tratamientos térmicos.

### 2.3.1 DESULFURACIÓN

El obtener un contenido de azufre inferior al 0.02% en el metal líquido es una necesidad básica para la esferoidización del grafito. Por esta razón resulta muy beneficioso un tratamiento de desulfuración previo al tratamiento de nodulización cuando el contenido de azufre en el hierro base es demasiado alto.

El magnesio como otros elementos nodulizantes reaccionan inmediatamente con el azufre y forman compuestos mas estables que el sulfuro de manganeso (SMn), es decir, que el elemento nodulizante podrá ser utilizado como un agente desulfurante.

Los beneficios de la desulfuración en el hierro líquido base son: reducción de la tendencia al endurecimiento superficial del hierro, y reducción de la cantidad de magnesio necesaria para obtención del hierro nodular.

Para remover el contenido de azufre se pueden utilizar uno de los siguientes métodos:

- a) Adición de carburo de calcio ( $\text{CaC}_2$ ).
- b) Adición de sosa calcinada ( $\text{Na}_2 \text{CO}_3$ ).
- c) Adición de caliza (carbonato de calcio,  $\text{Ca CO}_3$ ).
- d) Adición de cal quemada ( $\text{CaO}$ ).
- e) Adición de sosa cáustica ( $\text{NaHO}$ ).

Una vez realizada la desulfuración es conveniente inducir el contenido de azufre a un nivel bajo, en la vecindad del 0,01 %. Esto se debe a que el azufre no es necesario para la esferoidización del grafito y mientras mas bajo es el contenido de azufre en el hierro base, es mejor. Esto sin embargo ha sido el asunto de mucha controversia sin resolver. El carburo de calcio puede desulfurar hasta cualquier nivel deseado, además favorece las propiedades mecánicas del hierro colado y su costo no es excesivo.

### 2.3.1.1 Factores que influyen en la desulfuración

Los factores que tienen mayor importancia son:

- a) Temperatura de tratamiento.
- b) Tipo de recipiente empleado.
- c) Tiempo de contacto entre el agente desulfurante y metal líquido.
- d) Cantidad de azufre en el hierro antes de desulfurar.
- e) Forma de adición del desulfurante.
- f) Tamaño de la partícula del desulfurante.

### 2.3.1.2 Cantidad de desulfurante

La reacción química del S removido con el desulfurante escogido ( $\text{CaC}_2$ ) se puede describir así:



En teoría, para remover 0.1% de S tan solo 0.2% de  $\text{CaC}_2$  son necesarios. Puesto que parte del desintegrado  $\text{CaC}_2$  formará  $\text{CaO}$  en vez de  $\text{CaS}$  y se disolverá en la escoria, de 5 a 10 veces de la cantidad teórica deben ser utilizados, es decir de 1 a 2%.

### 2.3.2 NODULIZACIÓN

El propósito del tratamiento de esferoidización o nodulización es el de cambiar la composición química y las condiciones físicas del metal de tal manera que después de un tratamiento de inoculación el grafito precipite en forma de esferoides.

Esta definición implica que el tratamiento debe ser seguido por una inoculación. En algunas ocasiones el hierro es nodulizado y colado sin inoculación.

Diversos elementos son capaces de esferoidizar el grafito. De estos elementos el Mg es el único comercialmente práctico, pero como se expondrá posteriormente la adición de Mg esta casi siempre acompañada por la adición de otro u otros elementos esferoidizantes.

Es apropiado comentar ahora sobre la práctica referida en cuanto a precondiciones. Un primer tratamiento para esferoidizar es desulfurar. Otra necesidad es la tener la condición física adecuada en el metal líquido para la provisión de núcleos en los cuales precipitará el grafito. No existe evidencia práctica o experimental para probar cual acción es la que ocurre. Si una precondición ayuda al tratamiento de esferoidización, tal como adicionar Ca-Si o tierras raras, esto deberá ser considerado parte del proceso de tratamiento.

Los cambios en la composición química del metal líquido tratado con Mg suceden básicamente en tres caminos:

- Reducción de contenido de azufre (S) por abajo del 0.02%
- Reducción del contenido común de oxígeno (O<sub>2</sub>) de 100 a 130 ppm a aproximadamente 30 ppm (0.003%)
- Retención de contenido de magnesio (Mg) de al menos 0.02%, comúnmente entre 0.03 y 0.05%

Introducir una adecuada cantidad de Mg no es trabajo fácil. El Mg esta en ebullición a cualquier temperatura del hierro líquido. Es decir que el Mg estará en ebullición alrededor de los 1480°C (2700°F) y para evitar esto hay que tener una presión alrededor de 13 veces la de la atmósfera (cerca de 200 Psi). Sin embargo el Mg en contacto con el aire se quema violentamente formando MgO . Los esfuerzos para vencer esta dificultad han sido encaminados de tres maneras. Una es la de desarrollar aleaciones dominantes en el contenido de Mg que al añadir al hierro líquido minimiza la violencia de la evaporación y

quemado del Mg. Otra ha sido la de desarrollar técnicas de tratamiento con el mismo fin anterior, y por último la de utilizar elementos con punto de ebullición a presión atmosférica mucho más alta que la del Mg (por ejemplo Ca, Ce, Y).

### **2.3.2.1 Recuperación de magnesio**

Es muy importante que el tratamiento de nodulización deje en el producto final contenidos residuales de Mg. El Mg añadido en el tratamiento, parte es consumido por el S y parte se pierde en la reacción al ser introducido en el metal líquido. La diferencia de Mg, dada en porcentaje sirve para calcular la recuperación de Mg, la misma que esta influenciada por algunas variables, entre las que se pueden citar:

- Composición química del metal base.
- Concentración de Mg en el nodulizante.
- Cantidad de nodulizante.
- Tamaño del nodulizante.
- Método de adición del nodulizante.
- Temperatura de tratamiento.

En general, se obtienen recuperaciones mas bajas de Mg para temperaturas más altas de nodulización. En cambio, se obtienen recuperaciones más altas, cuando se utilizan aleaciones de menor concentración de Mg.

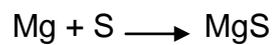
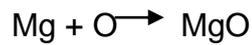
### **2.3.2.2 Desvanecimiento del efecto de nodulización**

El Mg tiene baja solubilidad en el hierro líquido y es altamente reactivo. Por esta razones, el contenido de Mg residual baja con el tiempo.

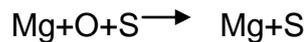
El desvanecimiento se manifiesta por el apareamiento de estructuras laminares de grafito, o como un decrecimiento de la cantidad de nódulos y deterioramiento de la forma de los esferoides en la fundición obtenida. En realidad, lo anterior es el resultado tanto del desvanecimiento del efecto

esferoidizante como del inoculante, efectos que en la práctica están íntimamente relacionados.

Resultados de diferentes investigaciones indican que este desvanecimiento es un fenómeno complicado. La manera más simple de explicarlo es aceptando la pérdida de Mg por oxidación o por combinación con el S. Las reacciones correspondientes pueden ser tan sencillas como:



O considerando la relativa estabilidad de estos compuestos, una reacción más probable es:



Si la fuente del  $\text{O}_2$  es un óxido, sílice por ejemplo, las reacciones correspondientes son:



Lo que está bien establecido es que la velocidad del desvanecimiento es influenciada por:

- Contenido inicial de Mg; mientras mayor, más rápido es el desvanecimiento.
- La temperatura; mientras más alta, más rápido es el desvanecimiento.
- La remoción de la escoria; mientras más rápido mejor.
- El tipo de refractario del horno; el peor ácido, el mejor básico.

Generalmente la pérdida de Mg se produce durante el manejo y el colado del hierro tratado, por lo que se deben tomar las precauciones necesarias para prevenir esta situación. Bajo condiciones normales, el metal tratado pierde 0.001% de Mg por minuto.

### 2.3.2.3 Tipos de nodulizantes a base de magnesio

Los nodulizantes a base de Mg se han desarrollado en dos tipos: en estado elemental, y aleados. Los primeros requieren métodos sofisticados para su uso.

Los nodulizantes aleados más ampliamente usados se han desarrollado en una gran variedad, siendo los más utilizados los a base de Ni y los a base de Si. Los nodulizantes en base a Ni para la producción de hierro nodular tienen la composición química que se presenta en la Tabla 2.4, esta composición es la más generalizada.

Las aleaciones 1 y 2 por su alto contenido de Mg producen una violenta reacción presentando problemas en el proceso. Con una tecnología adecuada se logran recuperaciones de Mg que frecuentemente superan el 50%.

**Tabla 2.4 Composición Química de los nodulizantes en base a Ni**

Aleación	Composición (%)				
	Mg	Si	C	Fe	Ni
1	13-16		2		Balance
2	13-16	26-33		5 Máx	Balance
3	4.2-4.8		2.0 Máx		Balance
4	4.0-4.5		2.5 Máx	32-36	Balance

Fuente: Granja V, Fundición Nodular Ferrítica

Las aleaciones 3 y 4 debido a su contenido más bajo de Mg dan recuperaciones del orden del 80 y 90%. Se las denomina aleaciones sin humo ya que producen mínimas cantidades de vapores de Mg. Una característica importante de estos nodulizantes es que su densidad de 7.7 y 7.3 g/cm<sup>3</sup> es

mas alta que la del hierro líquido (alrededor de 6.9 g/cm<sup>3</sup>). Los nodulizantes en base a silicio denominadas aleaciones ferro-silicio-magnesio, confirman la tendencia a disminuir el contenido de Mg para mejorar su recuperación. Estas aleaciones contienen Ce y tierras raras para contrarrestar el efecto de elementos nocivos (Pb, Ti, etc).

#### 2.3.2.4 Cantidad de aleación nodulizante

En todos los métodos de tratamiento del hierro con magnesio, es esencial la medida exacta del peso de metal a tratar y la cantidad de magnesio que vaya a añadir.

El contenido de azufre inicial del hierro y la temperatura del tratamiento también se deben conocer porque ellos influyen en el contenido final del, magnesio. La recuperación de magnesio puede expresarse como:

$$\% \text{ Recuperación} = \left( \frac{(\% \text{ contenido .final.de.magnesio})}{(\% \text{ añadido.de.magnesio}) - \frac{3}{4}(\% \text{ inicial .de.azufre})} \right)$$

#### Ecuación 2.1

El sulfuro de magnesio producido por las reacciones entre el magnesio y el metal lo encontramos en la parte superior de la cuchara en forma de escoria y está se quita desnatando o por uso de un cuchara de tipo especial. Los valores típicos de recuperación a una temperatura del tratamiento de 1450 °C son :

- 50% para una aleación al 16% de Ni-Mg agregando en la cuchara de tratamiento
- 40% para una aleación ferrosilicio con 9% de Mg usando el proceso sándwich.

- 60% para una aleación ferrosilicio con 5% de Mg usando el proceso sándwich.
- 50% para magnesio puro agregado en el convertidor

Durante el tratamiento con el magnesio, hay normalmente una disminución de la temperatura de metal de 35 a 50°C

1.Cantidad de Mg consumida por el azufre:

$$C1 = (3/4) (S_o \text{ metal})$$

**Ecuación 2.2**

Donde:  $S_o$ , es la cantidad porcentual de S en el hierro inicial.

2.Cantidad de Mg en el metal a tratar ( $C_2$ ):

El Mg residual que se requiere luego de la nodulización en el metal base puede ser 0.03%

3.Cantidad requerida de Mg ( $C_{req}$ ) :

$$C_{req} = C1 + C2$$

**Ecuación 2.3**

Esta cantidad de Mg es la suficiente y necesaria para el tratamiento de nodulización.

Dependiendo de la técnica y de la temperatura de tratamiento se tiene una recuperación de Mg (Rec) en el tratamiento.

Supongamos que se tiene una recuperación del 40%. La cantidad de Mg a introducir en el baño ( $C_{real}$ ), lógicamente, será mayor a la cantidad requerida de Mg ( $C_{req}$ ).

Siguiendo el ejemplo, supongamos que  $Rec = 40\%$ .

$$C_{real} = \left( \frac{C_{req}}{\frac{\% Rec}{100}} \right)$$

**Ecuación 2.4**

La cantidad de aleación ( $C_{aleación}$ ) a añadir depende de la composición con respecto al Mg.

$$C_{aleación} = C_{real} \times \left( \frac{100}{\% Mg_{aleación}} \right)$$

**Ecuación 2.5**

### 2.3.3 INOCULACIÓN

Metalúrgicamente, la inoculación provee en el metal líquido semillas (núcleos) que ayudan en la formación de los nacientes cristales metálicos que luego crecerán al seguir enfriándose. La nucleación pueden ser finalmente cristales dispersos del mismo metal u otro metal extraño apropiado.

Puesto que ninguna de las partículas diminutas de Si o grafito puro se conocen para inocular grafito nodular, es mas probable que los núcleos para grafito esferoidal sean de tipo extraño a estos. Existe alguna evidencia que partículas diminutas de  $SiO_2$  pueden jugar un papel importante en la nucleación del grafito.

El hierro tratado con Mg, pero sin inoculación, usualmente se enfría y forma solamente un poco de pobres formas esferoidales y grandes cantidades de carburo masivo. Cuando la aleación de tratamiento, sin embargo, contiene

elementos que son agentes nucleantes, la estructura microscópica puede darse completamente grafitica y ser aceptable sin inoculación.

Una aleación de tratamiento de este tipo esta disponible comercialmente y contiene alrededor del 45 al 50% de Si y 5% de Ba, este último es un inoculante activo. El contenido de Mg puede ser seleccionado también al nivel 5 o 9%, la misma aleación esta también ofertada en un 0.5 a 1% de carburo de bario ( $Ba_4C$ ). El boro en pequeñas cantidades es también un buen inoculante y puede ser la alternativa para usar una única aleación.

La alternativa de usar una aleación simple es para mezclar la aleación a base de Mg con el inoculante y ejecutar la acción del tratamiento de Mg e inoculación conjuntamente. Al contrario de las opiniones actuales, ha sido establecido que la eficiencia de tal inoculación no es inferior a la ejecutada después del tratamiento de Mg, proveyendo que la temperatura de inoculación es la misma.

En el proceso tradicional, la inoculación es un tratamiento posterior, la temperatura de inoculación es mucho más baja que la de tratamiento con Mg. Si la temperatura de tratamiento es reducida a la de inoculación en el proceso tradicional, el tratamiento e inoculación pueden ser hechas conjuntamente.

Naturalmente, se puede pensar que una baja temperatura de tratamiento podría también resultar en una baja temperatura de colado pero este no es el caso necesariamente. La mayor causa de pérdidas de temperatura parece ser el movimiento en la cuchara misma y no el movimiento violento del líquido durante el tratamiento con Mg.

Igualmente, las temperaturas de colado después de la inoculación mientras se remueve en la cuchara y después de un paso del tratamiento con Mg e inoculación serán aproximadamente idénticos. Las ventajas del tratamiento de un paso son obvias: temperatura mas baja del horno, mejor recuperación, menor aleación dominante necesitada, reacción quieta, y eliminación de un movimiento de cuchara.

### 2.3.3.1 Eficiencia de la inoculación

Muchas variables influyen en la efectividad de inoculación:

- a) Influencia del hierro base.
- b) Influencia del inoculante.
- c) Influencia del tiempo
- d) Influencia de la temperatura del hierro líquido.
- e) Influencia del modo de inoculación.
- f) Influencia de almacenamiento de inoculante.

### 2.3.3.2 Cantidad de Inoculante

El efecto de la relación entre contenido de Si del hierro base no tratado y el Si como inoculante, ejerce un efecto considerable en la estructura del hierro nodular, lo cual se explica en base a la expresión:

$$\text{Relación de Si} = \text{Contenido de Si del hierro base} / \text{Si en el inoculante} .$$

Si esta relación es infinitamente grande, por ejemplo si el hierro no es inoculado, la calidad metalúrgica es mala. Similarmente se tiene una calidad muy pobre (baja cantidad de nódulos, presencia de carburos), cuando la relación es cero, significando que no ha existido Si en el metal base. Se obtiene calidad óptima entre estos extremos, dependiendo del resto de variables.

Esta relación queda bien establecida para cada operación, aumentando o disminuyendo al contenido del Si del hierro base, con la correspondiente disminución o aumento de la cantidad del inoculante, de tal manera que el contenido final de Si no varíe. Para calcular la relación, el Si introducido con la aleación nodulizante debe ser desatendido

La cantidad de Si a añadir es la diferencia entre el contenido de Si en el metal base antes del tratamiento y el contenido de Si luego del tratamiento:

1. Hierro antes de inoculación: %Si<sub>1</sub>
2. Hierro luego de inoculación: %Si<sub>2</sub>
3. Cantidad de hierro a inocular M
4. Contenido de Si en aleación inoculante: %Si<sub>inoculante</sub><sup>2</sup>.

$$\text{Si en el hierro antes de la inoculación} = Mx \left( \frac{\%Si_1}{100} \right) = Si_o \quad \text{Ecuación 2.6}$$

$$\text{Si en el hierro luego de la inoculación} = Mx \left( \frac{\%Si_2}{100} \right) = Si_f \quad \text{Ecuación}$$

**2.7**

Cantidad de Si a añadir = Si<sub>f</sub> - Si<sub>o</sub> = Si

$$\text{Cantidad de aleación inoculante a añadir} = Si_x \left( \frac{100Kg_{aleación}}{\%Si_{inoculante}} \right) \quad \text{Ecuación 2.8}$$

## 2.4 LOS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FUNDICIÓN NODULAR

El tamaño y la uniformidad de distribución de los nódulos, ejercen su influencia sobre las propiedades mecánicas de la fundición de hierro nodular, pero siempre en menor grado que la forma del grafito, la configuración esferoidal siempre será considerada, sinónimo de buenas propiedades en la fundición.

La presencia de nódulos de grafito, pequeños en tamaño pero numerosos en cantidad, indican que se trata de un hierro nodular de alta resistencia. La cantidad y la configuración del grafito se establecen durante la solidificación,

---

<sup>2</sup> Nota: se supone que la recuperación del 100% en el tratamiento de inoculación.

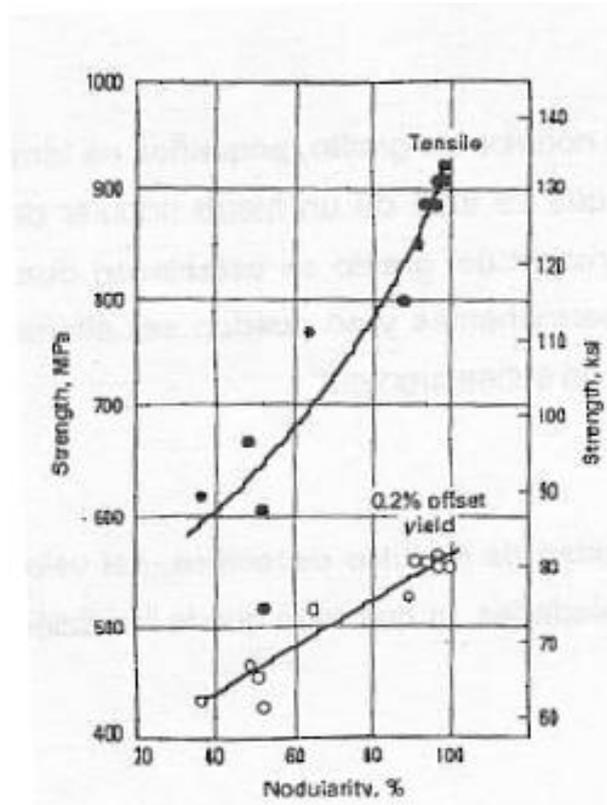
estos valores serán permanentes y no pueden ser alterados por la aplicación de tratamientos térmicos subsecuentes.

Existe una densidad de nódulos específica, del valor de ésta dependen los valores de las propiedades, lo que hará que la fundición sea apropiada para talo cual aplicación.

Todas las propiedades físicas y mecánicas características del hierro nodular, son el resultado de la conformación del grafito, cualquier alejamiento de ésta, especialmente en lo que respecta a la proporción, es causa de algunas desviaciones, generalmente se acepta que la cantidad de nódulos de grafito en la colada de hierro nodular por  $\text{mm}^2$ , sea del 80 al 100%.

Todas las propiedades de resistencia y ductilidad crecen en la proporción en que el grafito nodular se incrementa, las propiedades relacionadas con la fractura como la resistencia a la tracción ya la fatiga son afectadas mayoritariamente por pequeñas cantidades de grafito nodular como indica la Figura 2.22 :

La configuración de grafito en forma no nodular en la colada de hierro nodular, es de considerable importancia, porque la presencia de las delgadas laminillas tienen efectos adversos sobre las propiedades de resistencia, lo que no tienen las formas compactas del grafito con bordes redondeados.

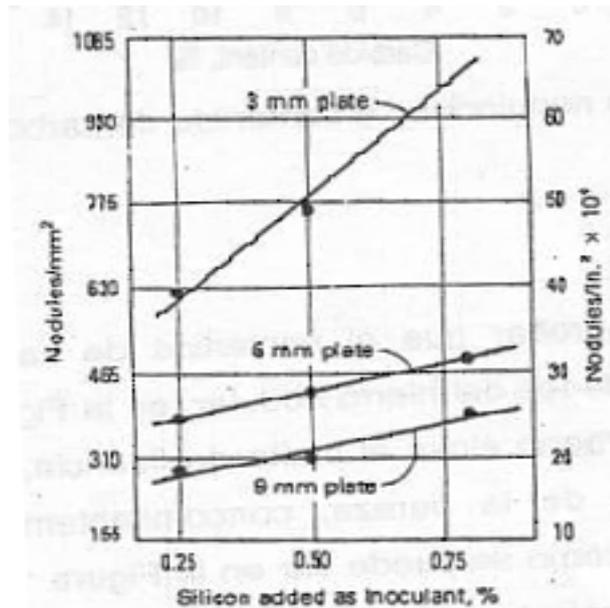


**Figura 2.22 Tensión y fluencia de un hierro nodular para varios grados de nodularidad.**

En la cuantificación de las propiedades de una fundición de hierro nodular, la estimación visual del porcentaje de nodularidad en una probeta sometida a ensayos metalográficos, constituye solamente una guía práctica de apreciación, el método más preciso de medición es el que usa frecuencias resonantes y métodos de velocidad ultrasónica, se conoce también que la forma del grafito afecta al módulo de elasticidad.

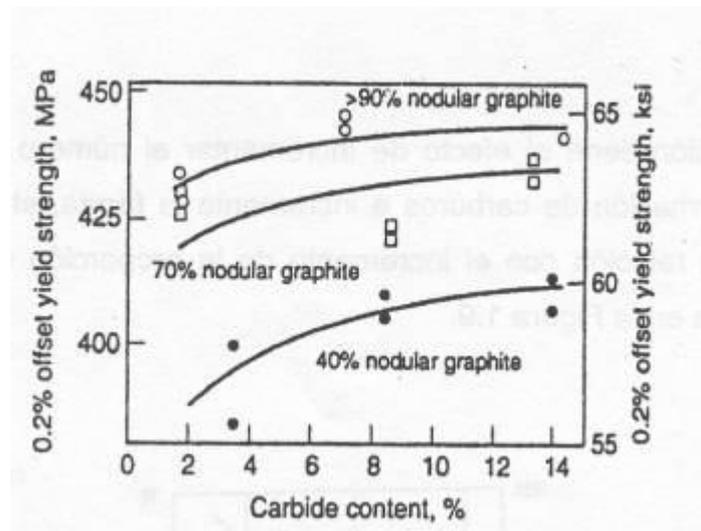
Un bajo porcentaje de nodularidad afecta a la ductilidad, reduce la resistencia a la fatiga, incrementa la capacidad de rotura, eleva la conductividad térmica y disminuye la resistividad eléctrica.

La inoculación tiene el efecto de incrementar el número de nódulos, lo cual prevé la formación de carburos e incrementa la ferrita, el incremento de nódulos está en relación con el incremento de la proporción del nodulizante como se muestra en la Figura 2.23.



**Figura 2.23 Número de nódulos vs. Cantidad de silicio añadido como inoculante**

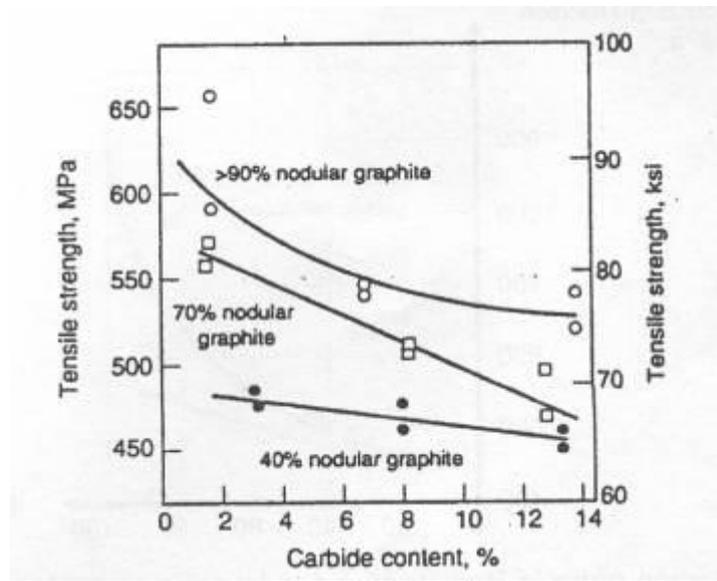
El incremento de grafito debido a la inoculación produce disminuciones relativamente pequeñas en los valores de la resistencia y elongación, se establece una disminución del módulo de elasticidad y un decrecimiento de la densidad; en general esos efectos son pequeños comparados con las consecuencias sobre otras variables, por que el carbono equivalente contenido en el grafito esferoidal no constituye la mayor variable y generalmente se mantiene cercana al valor eutéctico.



**Figura 2.24 Efecto de nodularidad y contenido de carbono sobre el límite de fluencia**

Se ha podido comprobar que el contenido de carbono tiene efectos directos sobre las propiedades del hierro nodular, en la figura 2.24 se muestra que el incremento de carbono eleva el límite de fluencia, se conoce además que existe un aumento de la dureza, concomitantemente se reduce la resistencia a la tracción, como se puede ver en la figura 2.25. Esta tendencia entre el límite de fluencia y la resistencia a la tracción produce un decremento en la elongación.

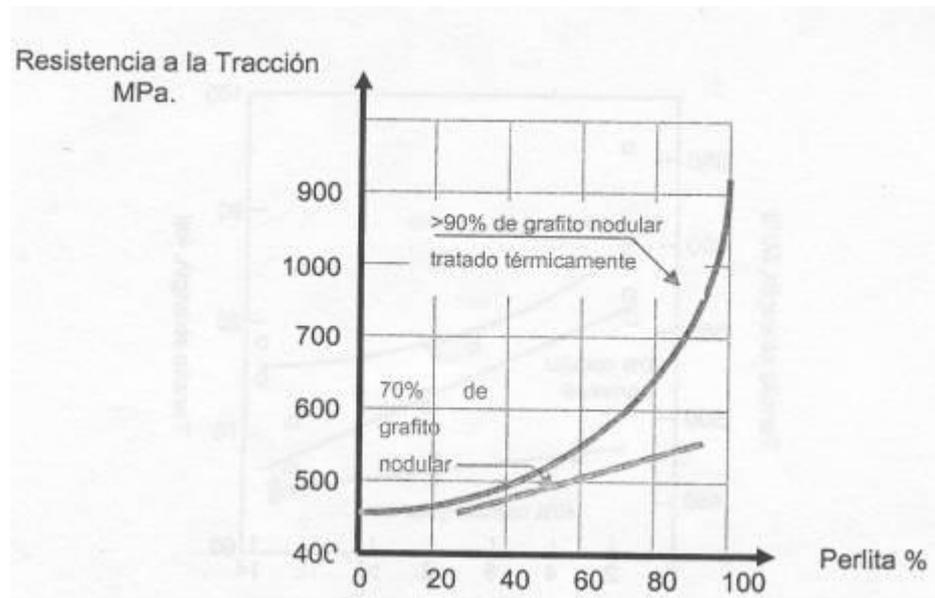
La presencia de carburos en la matriz tiene como efecto el incremento del módulo de elasticidad y la reducción significativa de la maquinabilidad, para minimizar estos efectos negativos algunos autores recomiendan que el máximo contenido de carbono en la fundición debe ser del 5% como máximo. Estos niveles pueden ser logrados restringiendo la presencia de elementos formadores de carbono a través del empleo de materias primas de alta pureza en la carga del horno de fundición y el empleo de buenas prácticas de inoculación.



**Figura 2.25 Efecto de la noduralidad y contenido de carbono sobre la resistencia a la tensión**

El principal factor para determinar los diferentes grados de una fundición de hierro nodular es la estructura de la matriz. La condición de la matriz consiste en proporciones variables de perlita y ferrita.

Conforme crece la cantidad de perlita, la resistencia a la tracción y la dureza de la fundición nodular se incrementan, la ductilidad y las propiedades frente al impacto son determinadas principalmente por las proporciones de ferrita y perlita presente en la matriz, conforme la cantidad de perlita disminuye, la resistencia al impacto se incrementa. Con el propósito de mejorar las propiedades de la fundición de hierro nodular, se hace necesario alterar la estructura de la matriz, lo que puede hacerse exclusivamente mediante tratamientos térmicos, de éstos se prefieren aquellos que puedan generar una matriz totalmente ferrítica y posteriormente mediante normalización producir una matriz substancialmente perlítica.



**Figura 2.26 Relación entre la resistencia a la tracción y contenido de perlita.**

El tratamiento térmico de normalización aplicado a la fundición de hierro nodular produce en ésta, alta resistencia a la tracción con incremento de la elongación en las fundiciones de matrices perlíticas. En el caso de formación de la matriz, las propiedades se deben al grado de refinación y homogenización del grano de la ferrita, un posterior tratamiento térmico de normalización produce una estructura perlítica fina, lo que incrementa la resistencia a la tracción y la ductilidad, como puede verse en la Figura 2.26 .

La configuración del grafito puede afectar la estructura de la matriz, un incremento de la cantidad de nódulos a través de una buena inoculación tenderá a ocasionar un aumento de la cantidad de ferrita en la colada. La presencia de una mayor cantidad de carburos, reduce la ductilidad, incrementa la dureza y ocasiona roturas prematuras frente a cargas de tensión, impacto y fatiga.

Deben tenerse especiales cuidados por que la presencia de carburos, solo es posible detectarla mediante ensayos destructivos, por lo que se hace necesario controlar la aparición de formadores de carbón, por ello, es preferible asegurar un adecuado contenido de silicio y cromo en los procesos de inoculación.

En general se puede advertir que el deterioro de las propiedades mecánicas siempre ocurre como consecuencia de la descomposición estructural debida a cambios térmicos.

## **2.5 LOS LABORATORIOS DE LA ESPE**

La Escuela Politécnica del Ejército cuenta con laboratorios bien equipados donde se pueden realizar la mayor parte de los ensayos propuestos en esta tesis , para la realización de ésta caracterización se requiere el uso de los laboratorios de Metalurgia , Resistencia de Materiales y Máquinas herramienta, todos ellos con sus equipos funcionando y en buen estado , Los laboratorios están localizados en la ESPE que se encuentra en Sangolquí , Provincia de Pichincha , Ecuador.

## **2.6 NORMAS DE REFERENCIA NACIONALES Y EXTRANJERAS**

Con el objeto de sustentar este proyecto se buscó tomar como referencia algunas normas nacionales y extranjeras , estas normas están a disposición en la biblioteca general de la ESPE , Escuela Politécnica Nacional , INEN y algunas se encuentran en los laboratorios de la ESPE.

Dentro de las normas consultadas se encuentran las siguientes :

Las siguientes normas contienen disposiciones que mediante su referencia en este texto forman parte del mismo . Se consultó normas del INEN , ASTM e INCOTEC.

A 644 Definiciones estandarizadas de terminología relativa a hierro fundido .

A 48 Especificación estándar para hierro fundido

A 256 Ensayo de compresión de hierro fundido

A 327 Ensayo de impacto en hierro fundido.

A 438 Ensayo transversal en hierro fundido ( Flexión)

E 8 Ensayo de tracción en metales.

E9 Ensayo de compresión en metales a temperatura ambiente

E 10 Ensayo de dureza Brinell .

E 74 Verificación de Máquinas que aplican carga.

E 111 Ensayo para obtener el Módulo de Young

E 132 Ensayo para la obtención de la relación de Poisson .

INCOTEC NTC 1370

## **2.7 ANALISIS DE MUESTREO**

El análisis para el muestreo de un proceso de producción de piezas de hierro fundido se realizó observando las recomendaciones de las normas de la ASTM y del INCOTEC dentro de las cuales se especifica y define que es un lote y como se deben tomar las muestras .

Las muestras de un lote de fundición se toman de la misma cuchara de colada y las probetas deben ser fundidas en forma separada o como un apéndice de las mismas; el proceso de obtención de muestras, como apéndices o separadas; será un acuerdo entre el productor y el comprador.

### **2.7.1 NUMERO DE ENSAYOS**

El fabricante deberá preparar al menos tres barras de ensayo por cada lote de fundición, como se menciona en la norma ASTM A 48 e INCOTEC 1370 , si las probetas presentan defectos que las inutilicen para el ensayo , éstas deberán ser cambiadas por otras provenientes del mismo lote .

De las tres probetas que le corresponden a cada lote se debe ensayar sólo una , si ésta no cumple con las especificaciones se deberá determinar si fue falla del material o de la probeta , si la probeta presenta evidentes defectos que invaliden el resultado se deberá cambiar por otra del mismo lote , si un ensayo es válido y la probeta no cumple con las especificaciones esperadas se deberá realizar dos reensayos del mismo lote , si alguno de los reensayos válidos falla , el lote no debe ser aceptado .

Es el caso que no existan suficientes barras de ensayo se deberá sacar las probetas de alguna de las piezas fundidas pertenecientes al lote , en un acuerdo entre el fabricante y el comprador.

### **2.7.2 DESCRIPCIÓN DE UN LOTE**

Dentro de la norma ASTM A-48 en el Numeral 15 , página 20 se lee:

“ 15.1 A menos que exista otra especificación el productor define un lote como alguna de las siguientes definiciones

15.1.1 un grupo de fundiciones que pesen menos de 2000 lb. (910 Kg. ) cada uno, coladas en un periodo de 2h , con cargas consecutivas similares en el tipo de material .

15.1.2 Un grupo de fundiciones que pesen 2000 lb (910 Kg. ) cada una, donde el peso total no exceda las 8000 lb (3600Kg) y en donde las fundiciones del lote sean coladas en un periodo de 4h en la misma colada y con cargas consecutivas similares en materiales de las mismas características

Fundiciones individuales que pesen más de 2000lb (910 Kg.)

Un crisol que pese más de 2000lb (910 Kg.)

15.2 Cuando una pieza de fundición deba ser colada con más de un crisol o cuando el hierro sea fundido en más de un horno o sea más de una fundición con una carga de distintas características dentro del mismo horno o ambos hierro y colada , o carga y horno , se considerará un lote.

15.3 Cuando más de un lote se use para una sola fundición cada lote debe estar bajo esta especificación .

15.4 Cuando una fundición individual sea colada de más de un horno o cuando hierros de distintas fuentes sean mezclados antes de colados, se deben considerar como un lote .”

Dentro de la norma Colombiana NTC 1370 página 7 numeral 8 se lee :

“ Un Lote debe constar de piezas fundidas tomadas de la misma cuchara de colada. La masa máxima de un lote es normalmente de 2000 Kg. de piezas fundidas desbarbadas , esta masa se puede variar en donde resulte práctico , mediante acuerdo entre el fabricante y comprador .

Una pieza fundida individual debe constituir un lote si su masa es igual a 2000 Kg. o más

Para fundiciones continuas del mismo grado de hierro gris en tonelajes grandes , la masa máxima de un lote se debe restringir a 2h de vaciado.”

## **2.8 PROCESOS DE OBTENCION DE MUESTRAS**

Las muestras de hierro se deben obtener según el tipo de ensayo que se vaya a realizar sobre ellas , existen dos tipos de muestras que se usan en los ensayos , muestras obtenidas por colado y otras que son , coladas y maquinadas.

En la norma ASTM A 48 se especifica que las muestras pueden ser un apéndice de las piezas o podrán ser fundidas en forma separada , esto es un acuerdo entre el productor y el comprador.

Las muestras han de ser fundidas en moldes de arena verde y serán desmoldadas al mismo tiempo que las piezas que representan .

### **2.8.1 MOLDEO EN ARENA VERDE**

La arena es el principal componente de la arena verde. Las arenas verdes están normalmente hechas de arena sílice ( $\text{SiO}_2$ ). El tamaño y distribución de los granos de arena son en extremo importante para controlar el acabado superficial de las piezas. Estas características también afectan la habilidad del molde para apoyar la evacuación de gases formados durante la transformación de agua a vapor y la descomposición de los constituyentes orgánicos de los aglutinantes y los aditivos de la arena verde. La correcta distribución de la arena es también crítica para reducir la ocurrencia de defectos por expansión de arena.

## **2.8.2 CAPACIDAD REFRACTARIA**

Un molde de arena verde debe resistir la temperatura de vaciado de la aleación fundida. Una arena sílice en forma pura, 98% SiO<sub>2</sub>, tiene un punto de fusión de aproximadamente 3100 ° F (1704 ° C). Si el contenido de SiO<sub>2</sub> en la arena se reduce, entonces el punto de fusión también descenderá. Existen varios subgrupos de arena base sílice, como la arena de lago por ejemplo, que tienen porcentajes reducidos de SiO<sub>2</sub> y temperaturas correspondientes de fusión de aproximadamente 2800 F° (1538 C°) dependiendo de la composición de la arena. Las temperaturas de vaciado de los hierros fundidos y las aleaciones no ferrosas están generalmente bastante abajo que estas temperaturas de fusión.

Es más importante comprender que si el contenido de sílice de la arena del sistema se reduce a un nivel crítico, el acabado superficial de los vaciados de aleaciones con altas temperaturas de vaciado puede deteriorarse debido a la pérdida de capacidad refractaria. Una adición constante de arena nueva en el sistema ayuda a reponer el contenido de sílice del mismo y a drenar las cantidades excesivas de ceniza, finos y arcilla destruida térmicamente. Este flujo de arena nueva puede ser el resultado de arena proveniente de machos que es separada de las piezas durante el desmolde.

## **2.8.3 TIPOS**

Aunque el sílice y los subgrupos de sílice constituyen la mayoría en los sistemas de arena, otros tipos de arena pueden ser usadas. dependiendo de la localización geográfica de la fundición y, más importante, debido a las cualidades técnicas, otros agregados pueden ser utilizados. Existe una amplia variedad disponible de agregados para el fundidor, incluyendo cromita y

zirconio. Estas arenas pueden ser utilizadas como base o arenas de careo para reducir y/o eliminar defectos de expansión y penetración de metal mientras promueve la solidificación.

#### **2.8.4 ÁREA DE CONTACTO**

El área de contacto de la arena y las materias primas son también una consideración importante en la preparación y control de la arena verde. Cualquier desviación mayor en el área de contacto pudiera tener profundos efectos en las características físicas de la arena de moldeo. Esto podría ser causado por la tendencia del sistema a requerir más o menos agua para alcanzar un valor constante de compactibilidad. Obviamente, conforme el tamaño de la arena decrece, su superficie se incrementa.

#### **2.8.5 ARCILLAS**

La arcilla es el adhesivo que mantiene la forma del molde a temperaturas tanto ambiente como elevadas. La adición de agua se requiere para activar la arcilla. El contenido de humedad del sistema es extremadamente crítico y puede afectar casi todas las propiedades físicas que son medidas en una fundición..

Existen dos tipos de arcillas naturales—bentonitas sódica y cálcica—que son utilizadas en una mayoría de operaciones de fundición. Nuevamente, el tipo de equipo, aleación y la geometría de la pieza dictarán el tipo o mezcla de arcilla utilizados por una fundición.

La bentonita sódica da como resultado resistencias altas a la compresión en seco y mayores aun a temperaturas más altas . También muestra una resistencia a la tensión en húmedo sustancialmente más alta. Las elevadas propiedades en caliente y la alta resistencia en húmedo a la tensión de la

bentonita sódica se requieren cuando se vacía hierro y acero para prevenir defectos tales como erosión de arena, inclusiones de arena y costras de expansión. Sin embargo, las propiedades en caliente incrementadas podrían aumentar la energía requerida para remover la arena de las piezas solidificadas, esto es incrementando el potencial de piezas rotas o con fracturas.

Las bentonitas cálcicas son mejor conocidas por su habilidad para rápidamente desarrollar propiedades en verde. Ellas ofrecen un mejor flujo que la bentonita sódica (la cual tiende a ser más plástica) y una mayor deformación a iguales porcentajes de humedad. Por lo tanto, tienen una mayor habilidad para fluir libremente a través del sistema de arena y dentro de profundas o cerradas cavidades en un modelo.

Ambas bentonitas pueden ser mezcladas en diferentes proporciones, lo cual es una práctica común. Al mezclar las arcillas, una fundición puede alcanzar en términos generales un promedio en las propiedades físicas.

### **2.8.6 CANTIDAD DE ARCILLA Y AGUA**

Cambiar la cantidad total de arcilla y agua puede alterar la resistencia a la compresión de la arena verde, la permeabilidad y otras propiedades físicas. Generalmente, un porcentaje más alto de arcilla, hasta 12%, traerá como resultado aumento en la resistencia. La cantidad de agua puede también tener un gran efecto en las resistencias a la compresión en verde, en seco y en caliente. Generalmente, incrementando el agua se incrementa la resistencia a la compresión en verde hasta un punto, referido como el punto de templado. Incrementos adicionales de agua traerán como resultado un decremento en la resistencia a la compresión en verde.

Ambas resistencias a la compresión, en seco y en caliente, muestran un incremento en la resistencia conforme se incrementa la humedad dentro de un rango normal.

### **2.8.7 MÉTODOS DE CONTROL**

La prueba del azul de metileno determina el porcentaje de bentonita disponible en una muestra de arena. Esta prueba de laboratorio proporciona información crítica acerca de las correctas adiciones de arcilla para mantener los niveles de ésta entre los límites de control superior e inferior. La prueba no puede diferenciar entre bentonita sódica y cálcica. Por lo tanto puede solo indicar la cantidad total de bentonita disponible en el sistema.

A diferencia de la prueba del azul de metileno, la prueba AFS (ARIDOS FINOS EN SUSPENSION ) la arcilla es una prueba de laboratorio que indica el porcentaje total de material fino en la arena. Esto incluye materiales menores a 20 micrones y/o materiales que sedimentan en el agua a una velocidad menor a una pulgada/ minuto. Estos materiales incluyen la arcilla disponible, arcilla muerta, granos finos de arena, ceniza, coque, carbón y celulosa. Los porcentajes AFS de arcilla siempre serán más altos cuando se comparan a los del azul de metileno, debido a que contiene ambas bentonitas, disponible y térmicamente destruida, junto con cualquier otra partícula extremadamente fina. Rastreando la diferencia entre los porcentajes de la arcilla AFS y los de azul de metileno, una fundición puede determinar si el contenido de material fino se está incrementando. Esta diferencia puede ser grandemente afectada por las adiciones de arena nueva.

### **2.8.8 CARBONES**

Los aditivos de carbón son generalmente agregados a los sistemas de arena de fundiciones de hierro vaciado para ayudar a reducir la ocurrencia de la penetración de metal y mejorar el acabado superficial. Existen muchas teorías sobre el por qué los aditivos de carbón, tales como carbón marino, ayudan a reducir la penetración. Estas teorías incluyen la ayuda para crear una

atmósfera reductora, cubriendo la superficie del molde con carbón lustroso y expansión de carbón.

### **2.8.9 MÉTODOS DE CONTROL**

Ambos, el material combustible y la materia volátil, son útiles en la determinación del porcentaje de carbón en el sistema de arena. La prueba de pérdidas por ignición (PPI) indica el porcentaje total de combustibles presentes en la arena incluyendo carbón, coque, residuos de aglutinantes orgánicos y el agua cristalina contenida en la bentonita disponible. La materia volátil contenida en el carbón es el ingrediente que ayuda a reducir la penetración del metal. A diferencia de la prueba de pérdidas por ignición (PPI), la cual mide todos los materiales combustibles incluyendo carbón y coque, la prueba de volátiles determina la cantidad de carbón activo en el sistema de arena.

### **2.8.10 MOLIENDA**

La molienda es uno de los aspectos más importantes en el control de la arena verde. Una fundición puede mantener todas las materias primas que restituyen la arena con una especificación muy cerrada. Si tienen una molienda y/o prácticas de molienda deficientes, los problemas del control de la arena persistirán. La función de un molino es activar la bentonita disponible dentro de la arena. Esta es una tarea en extremo difícil que requiere una cantidad extrema de energía. Debido a que una mezcla de agua y arcilla es en extremo tenaz, el molino utiliza ruedas que incorporan fuerzas tanto de compresión como de corte para activar las partículas de bentonita y untar la masilla de bentonita sobre los granos de arena. Las ruedas del molino son extremadamente importantes para generar las cargas apropiadas de compresión y corte requeridas para desarrollar plenamente las propiedades físicas de la arena de moldeo. Un completo conocimiento de la secuencia del ciclo de molienda debe ser mantenido para ayudar a minimizar el tiempo de

ciclo y optimizar la efectividad del molino. Adicionalmente, las variaciones en las adiciones de materias primas deben ser minimizadas.

### **2.8.11 DESARROLLO DE LA RESISTENCIA**

La prueba de la resistencia a la compresión en verde es extremadamente útil para ayudar en la determinación del grado de molienda alcanzado. Un incremento en la resistencia a la compresión en verde se dará de acuerdo a cómo está procediendo el proceso de molienda. Para maximizar la eficiencia de la molienda, todo esfuerzo debe hacerse para mantener los elementos mecánicos del molino. Es en extremo importante reemplazar las piezas de desgaste ya gastadas, tales como ruedas y arados y rutinariamente ajustar estos componentes a los ajustes recomendados para maximizar su desempeño y minimizar su desgaste. Un programa de mantenimiento preventivo debe ser establecido para asegurar que el molino es efectivo. Es también importante que tanto el personal de mantenimiento como el de operación sea detalladamente entrenado.

### **2.8.12 MANTENIMIENTO DE LA ARENA DEL SISTEMA**

Mantener un sistema de arena involucra la reducción de fluctuaciones y variaciones. Esto requiere no solamente un balance de los materiales que entran y los que salen sino también un balance de energía. En otras palabras, las adiciones de nueva arcilla deben ser efectuadas para compensar las pérdidas por destrucción térmica, colección de polvos, etc. La energía requerida para activar la arcilla en el molino debe ser mantenida y la energía calorífica inducida en la arena durante la solidificación del vaciado debe ser removida para mantener un equilibrio constante.

### 2.8.13 PÉRDIDAS DEBIDAS AL RECICLAJE

La arena verde está siempre en un estado de trabajo ya sea que se encuentre en el proceso de enfriamiento, molienda, moldeo, en espera del proceso de solidificación de vaciados o templándose en un silo de arena de retorno. El hecho de que la arena verde es constantemente reciclada con pequeñas adiciones de materias primas es una de sus ventajas inherentes. Sin embargo, para conocer y controlar un sistema de arena verde, existen ciertos cambios que deben ser entendidos cuando la temperatura de la arena es elevada durante el proceso de vaciado y enfriamiento de piezas dentro del molde.

Primero, el agua es removida en forma de vapor. Si la temperatura de la arena es elevada arriba de 212°F(100°C) el agua libre en la superficie es removida. La cantidad de agua libre removida puede ser estimada por el contenido de humedad determinado en el laboratorio de arena. Este cambio es reversible. Si la adición de calor fuera detenida en un punto debajo de aproximadamente 600 F° (316 °C), una adición de agua y molienda podría restituir la mezcla de arena-arcilla a las propiedades normales de trabajo.

Segundo, a temperaturas mayores que aproximadamente 600 °F(316 °C) para la bentonita cálcica y 1200 °F(648 °C) para la bentonita sódica, el agua cristalina, a menudo referida como agua combinada químicamente, es removida de la estructura enrejada de la bentonita. Esta etapa es irreversible y la fuerza aglutinante de la bentonita se pierde. Cuando secciones de la arena de moldeo alcanzan estas temperaturas, las bentonitas contenidas en estas áreas son térmicamente destruidas y son algunas veces llamadas arcilla muerta.

Una cierta cantidad de bentonita nueva debe ser agregada después de cada ciclo del sistema para reemplazar la bentonita destruida térmicamente. Aún más, arcilla adicional debe ser agregada para cubrir la arena, así como para reemplazar las pérdidas por colección de polvos y las pérdidas naturales.

Dependiendo de la temperatura y la atmósfera del molde durante el vaciado, el aditivo de carbón que regresa al molino consistirá de una combinación de carbón, coque y ceniza. Si existiera oxígeno presente en el molde, a elevadas temperaturas, el carbón se quemará y formará partículas de ceniza. Si la atmósfera en el molde fuera inerte a elevadas temperaturas, el carbón sería transformado en coque. Coque y ceniza son a menudo referidos como formas muertas de carbón y deben ser reemplazados.

#### **2.8.14 ARENA CALIENTE**

Debido a que la arena verde circula y el silicio es un excelente aislante, existe una tendencia en la temperatura de la arena a incrementarse después de múltiples ciclos. La arena caliente es uno de los más grandes problemas asociados con la arena en las actuales modernas instalaciones de fundición. La arena de retorno que entra al molino a temperaturas en exceso de 120° F(48 °C) es considerada arena caliente. Las arenas calientes de moldeo causan una variedad de problemas incluyendo arena pegada en las tolvas y transportadores, secado incontrolable de la arena, difícil sino imposible control de la humedad en el molino, pérdida de las propiedades de la arena preparada, penetración de metal, condensación, inclusiones de arena, moldes rotos, arenas frágiles e incremento en las adiciones de arcilla.

#### **2.8.15 ENFRIAMIENTO DE ARENA**

Un enfriador es el único método para enfriar arena caliente sin cambiar el tipo de vaciados, la relación arena/metal, programación de la producción y/o almacenamiento del sistema de arena. La instalación de un enfriador es a menudo la única solución práctica para un problema de arena caliente. Los enfriadores de arena de moldeo utilizan la vaporización y evaporación como el medio para reducir la temperatura de la arena. Cambiar el estado del agua de líquido a vapor requiere una considerable energía térmica y resulta en un enfriamiento de arena extremadamente eficiente. Los aspectos a considerar cuando se selecciona un enfriador incluyen el control de la humedad en la descarga, mantenimiento del equipo, pre-mezclado de la arena, tiempo

adecuado de retención, habilidad para mantener el tamaño de la arena y su distribución y alcanzar una temperatura constante de descarga debajo de 120 F° (48 C°).

### **2.8.16 MOLDEO EN ARENA SECA**

Antes de la colada, el molde se seca a elevada temperatura (entre 200 y 300°C). De este modo se incrementa la rigidez del molde, lo que permite fundir piezas de mayor tamaño, geometrías más complejas y con mayor precisión dimensional y mejor acabado superficial.

### **2.8.17 MOLDEO MECÁNICO**

Consiste en la automatización del moldeo en arena verde. La generación del molde mediante prensas mecánicas o hidráulicas, permite obtener moldes densos y resistentes que subsanan las deficiencias del moldeo tradicional en arena verde.

### **2.8.18 MOLDEO A LA CERA PERDIDA O MICROFUSIÓN**

En este caso, el modelo se fabrica en cera o plástico. Una vez obtenido, se recubre de una serie de dos capas, la primera de un material que garantice un buen acabado superficial, y la segunda de un material refractario que proporcione rigidez al conjunto.

Una vez que se ha completado el molde, se calienta para endurecer el recubrimiento y derretir la cera o el plástico para extraerla del molde en el que se verterá posteriormente el metal fundido.

Este método tiene dos ventajas principales, la ausencia de machos y de superficies de junta, con lo que se logran fieles reproducciones del modelo original sin defectos superficiales (líneas de junta y rebabas) que luego haya que pulir.

### **2.8.19 FUNDICIÓN EN COQUILLA**

En este caso, el molde es metálico , donde el molde adquiere su forma al mezclar arena sílice con resina fenólica en caliente

### **2.8.20 MUESTRAS OBTENIDAS POR COLADO**

Las muestras obtenidas por colado son aquellas que se usan para hacer los ensayos que requieren un mínimo maquinado , este puede ser , corte y pulido , estas piezas obtienen su forma directamente por colada , por ejemplo cuñas , graderíos y cilindros para el ensayo de flexión .

Los diseños de las probetas están sujetos a la norma pero cada empresa deberá variar las medidas de los moldes de acuerdo a la capacidad de su horno y a la experiencia en cuanto a contracciones rechupes y demás defectos propios de la fundición . para la elaboración de las probetas se sugiere hacer arañas de muestras , que son unas fundiciones de cilindros hechas como sifón con el objeto que la arena , gases y otros elementos extraños al hierro puedan ser expulsados hacia la superficie . la separación de las barras debe ser mayor al diámetro de las mismas , la longitud de las barras debe ser suficiente para que las probetas puedan ser cortadas a la medida especificada , se debe analizar la apariencia de las barras y seleccionar la que mejor geometría tenga para el ensayo , la arena alrededor de la probeta debe ser cernida y tiene que tener una buena compactación ya que el hierro al enfriarse tiende a expandirse y luego a contraerse , en la expansión es donde el molde se deforma , para evitar estas deformaciones es que se recomienda una buena compactación del molde .

### **2.8.21 MUESTRAS OBTENIDAS POR MAQUINADO**

Las muestras obtenidas por maquinado se obtienen a partir de elementos fundidos como apéndices o en forma separada ya sean cilindros, paralelepípedos etc.

Estos elementos serán maquinados hasta obtener su forma final, el tocho de hierro fundido de donde se obtendrán las probetas deberá ser colado en sifón con el objeto de reducir la presencia de defectos causados por cuerpos extraños como arena y escorias .

En el maquinado se debe usar cuchillas de carburo de tungsteno, comúnmente llamadas Widias , el uso de cuchillas de Acero rápido no es aconsejable por la dureza del hierro y las condiciones de maquinado , existen inclusiones de acero , arena , poros , los cuales golpean las cuchillas y las rompen , Dentro de las cuchillas de carburo de tungsteno que hay en el mercado existen dos grupos grandes , las que son pastillas soldables y las que vienen con un agujero para empernar en porta cuchillas , debido a la rudeza del maquinado inicial en el hierro las únicas cuchillas que resisten los golpes iniciales en los primeros procesos del cilindrado y refrentado son las pastillas soldadas, como lubricante y refrigerante se debe usar taladrina u otro aceite soluble al agua en caso que no se disponga de taladrina se puede usar diesel y aplicarlo con una brocha .

Las primeras operaciones de cilindrado deben hacerse a baja velocidad hasta obtener una aproximación del cilindro inicial que se puede maquinar , no exceda los 2.0 mm. de profundidad en cada operación de cilindrado , durante el cilindrado se pueden observar las inclusiones de acero que suelen existir , cuando la cuchilla encuentra una inclusión cambia de sonido momentáneamente , pero sobre todo la sección donde hay acero es más brillante que el resto de la pieza .

Otro aspecto a considerar es la utilización del punto giratorio de torno en todas las operaciones y los reajustes de las muelas del torno , el maquinado de hierro fundido produce muchas vibraciones que aflojan las muelas y provocan roturas de cuchilla , a fin de evitar accidente se sugiere maquinar solo en una dirección , desde las muelas hasta el punto , y usar el portacuchilla lo más corto posible y con un ángulo entre 120 y 150 grados con relación a la pieza maquinando siempre hacia atrás , esta práctica protege la cuchilla y evita accidentes por detenimiento abrupto de la cuchilla.

## **CAPITULO 3**

### **OBTENCIÓN DE LA FUNDICIÓN NODULAR**

#### **3.1 COMPOSICION QUÍMICA DEL HIERRO NODULAR**

El metal fundido para la producción del hierro nodular o dúctil puede ser obtenido de diferentes formas, pero el objetivo final debe ser producir el hierro con la mejor calidad y el menor costo.

El hierro dúctil puede ser producido en cubilotes ácido o básico, hornos de arco eléctrico , de inducción , etc..Las ventajas y desventajas de cada sistema deben ser consideradas en relación con cada factor como el tonelaje requerido, tipos de fundición , composición química, propiedades mecánicas y físicas, métodos de tratamiento, capital disponible, requerimientos ecológicos, aspectos ambientales, tipo de energía y el costo de la misma.

La mayor parte de estos factores están interrelacionados fuertemente, por lo que no hay un sistema que se considere como el mejor u optimo para la producción del hierro nodular, y las decisión se toma en base al análisis de los factores y disponibilidad que se tenga.

##### **3.1.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA**

Una de las Factores determinantes de la calidad del Hierro dúctil o nodular es la composición química.

A continuación la mayor parte de elementos que intervienen en el proceso de obtención del hierro nodular se detallan a continuación:

### 3.1.2 CARBÓN EQUIVALENTE (CE)

Con la excepción de la Industria de tubería de presión, la mayoría de los hierros dúctiles son producidos Hypereutécticos con un rango de CE que va entre 4,3 a 4,7% (% C + 1/3 % Si) lo que significa que en el enfriamiento , el grafito se formará primero en el líquido y tendrá a flotar.

Esta tendencia crece cuando el CE equivalente crece, pero a causa de el rápido enfriamiento el CE puede ser alto en secciones delgadas sin experimentar el problema de la flotación.

**Tabla 3.1 Contenido de CE según la medida de la Sección**

Secciones menores a ½ in	4.6 - 4.7 % CE
Secciones de ½ a 2 in	4.4 - 4.6 % CE
Secciones de 2 a 4in	4.3 – 4.4% CE
Secciones Mayores a 4 in	Menor a 4.3 % CE

Fuente: Ductile Iron Molten Processing

### 3.1.3 CARBÓN (C )

El rango de carbón presente en los Hierros dúctiles Comerciales esta entre 3 a 4%. Solo una menor influencia es ejercida en las propiedades mecánicas por el carbón, por si mismo; sin embargo el carbón hace efecto en la formación de la micro estructura, lo que es básico para las propiedades mecánicas.

El rango deseable de C esta entre 3,6% a 3,8 % en el hierro final para una buena fluidez, baja contracción, y un alto numero de nódulos .

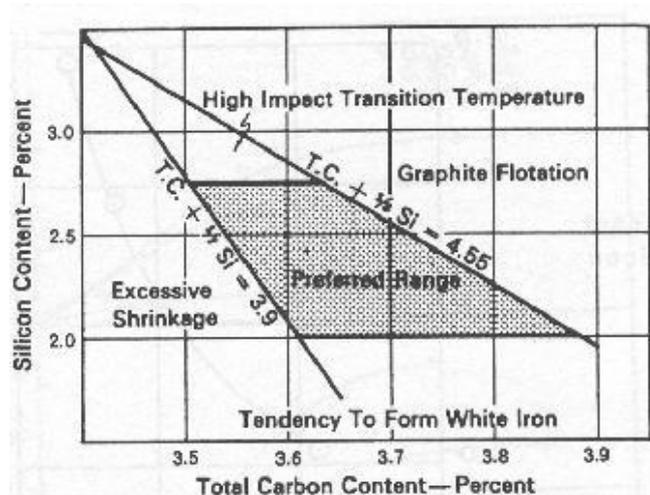


Figura 3.1 Rangos de Carbono y Silicio para el Hierro Dúctil<sup>3</sup>.

### 3.1.4 SILICIO (Si)

El rango usual de Silicio presente en el hierro dúctil esta entre 2% a 3% .El Silicio es un fuerte grafitizador, promoviendo la formación de ferrita, pero el aumento perjudica la resistencia al impacto a baja temperatura. Con contenidos de Silicio sobre el 3% mejora la resistencia a la temperatura de los hierros nodulares.

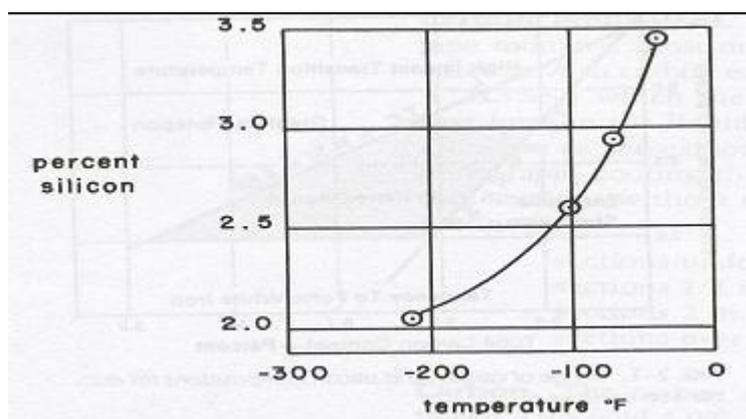


Figura 3.2 Efecto del Silicio en la Temperatura de transición del Hierro Dúctil

<sup>3</sup> Shrinkage = Contracción en el Tiempo

### 3.1.5 MANGANESO(Mn)

Debido a que el contenido de azufre es bajo en los hierros dúctiles, el Mn no tiene la función de controlar el S como en el caso del hierro gris, entonces tiene como propósito ser un elemento aleante , estabilizando la perlita.

Para mayor ductilidad , una matriz de ferrita es necesaria y consecuentemente el metal debe ser bajo en Mn (< 0.4%). Un nivel aproximado de 0.15% al 0.25% o menor favorece la formación de ferrita.

Con niveles de Mn entre el 0,5% al 0.8% resulta suficiente para estabilizar la formación de perlita cuando la rigidez es mas deseable que la ductilidad. Fig 2-

3

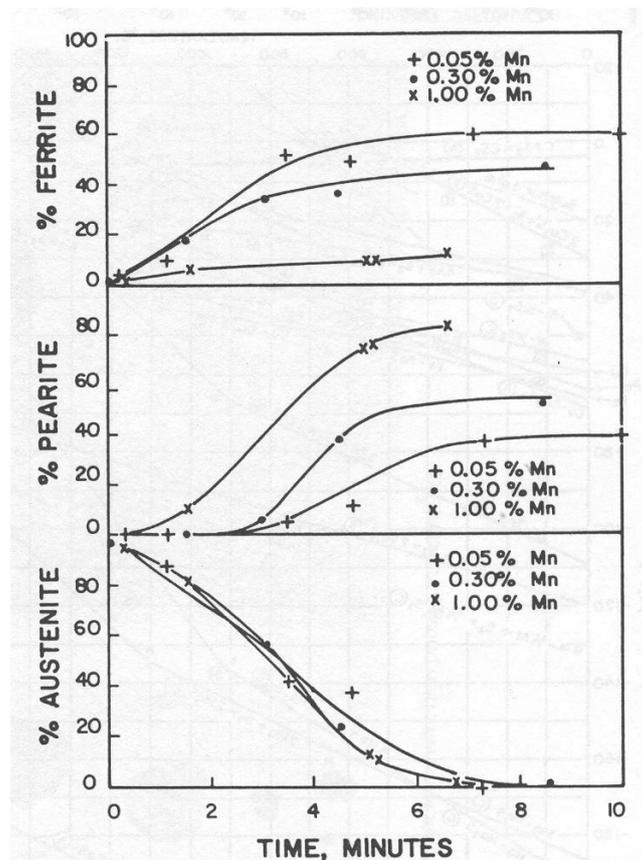


Figura 3.3 Curvas Normalizadas de Transformación del Manganeso

### **3.1.6 AZUFRE (S)**

El proceso de esferoidización del grafito para la producción de hierro dúctil llega a ser mas fácil si el hierro base usado es de bajo contenido de S (< 0.03%).

El Azufre reacciona mas con el Magnesio que con el hierro, lo que es una forma fácil y económica de remover el Azufre antes de un tratamiento con aleaciones nodulizantes. El nivel de Azufre ideal en el hierro base es de 0,01%.

### **3.1.7 FÓSFORO (P)**

Un hierro con un bajo contenido de Fósforo es necesario para la producción de hierro dúctil con las mejores propiedades mecánicas, particularmente para la resistencia al impacto.

El nivel de fósforo debe ser menor a 0,05% para prevenir la formación de fase quebradiza , aunque un nivel un poco mayor es tolerable si el material va recibir un tratamiento térmico.

## ***3.2 PROCESOS DE OBTENCIÓN DE HIERRO NODULAR***

Para la producción de hierro nodular o dúctil se debe tomar en cuenta algunos parámetros que resultan determinantes para su producción, estos son:

- Bajo contenido de Azufre (S) 0,02% o menor para reducir el uso de magnesio (Mg) para su tratamiento.
- Un relativo contenido de Silicio (Si) 1,00 – 1,50% , si una aleación convencional de Magnesio y ferro - silicio va a ser usada para el tratamiento, o de 2,00 - 2,50% para un tratamiento puro con Magnesio)
- Alto contenido en Carbono ( C ) , usualmente entre 3,60 – 4,00 %
- Alta temperatura de colado entre 1450 a 1560 C

- Bajos niveles de Cromo (Cr), Cobre (Cu), Molibdeno (Mb), Vanadio (V) , etc.. en el material usado en la carga.
- Un control efectivo de la operación de producción del hierro nodular, control rígido de la composición química, Temperatura de colado, etc..

Las unidades de producción que generalmente reúnen las características antes mencionadas para la producción del hierro nodular son: Los cubilotes y los Hornos de inducción, Hornos de Arco directo, Hornos de gas aunque estos son usados con menor frecuencia.

La decisión final de que tipo de Unidad de producción utilizar resulta complicada , basada en los factores económicos, infraestructura disponible , material de carga disponible y el conocimiento del proceso y la experiencia sobre el mismo.

### 3.2.1 FUNDICIÓN DE HIERRO DÚCTIL O NODULAR EN CUBILOTES

Hoy en día la gran mayoría de la producción de hierro dúctil se la realiza en horno cubilote

Estos hornos pueden ser de características muy similares o presentar grandes diferencia. Dos hornos de similar diseño y construcción y bajo el mismo régimen de operación no pueden producir hierro de distinta composición química pero si de diferentes propiedades físicas.

El efecto mas importante en la calidad del hierro está supeditada al tipo de carga metálica usada. Los contenidos de carbono y azufre son muy importantes para el hierro dúctil , los cuales pueden ser razonablemente determinados por el numero de pH básico de la carga mediante la siguiente formula:

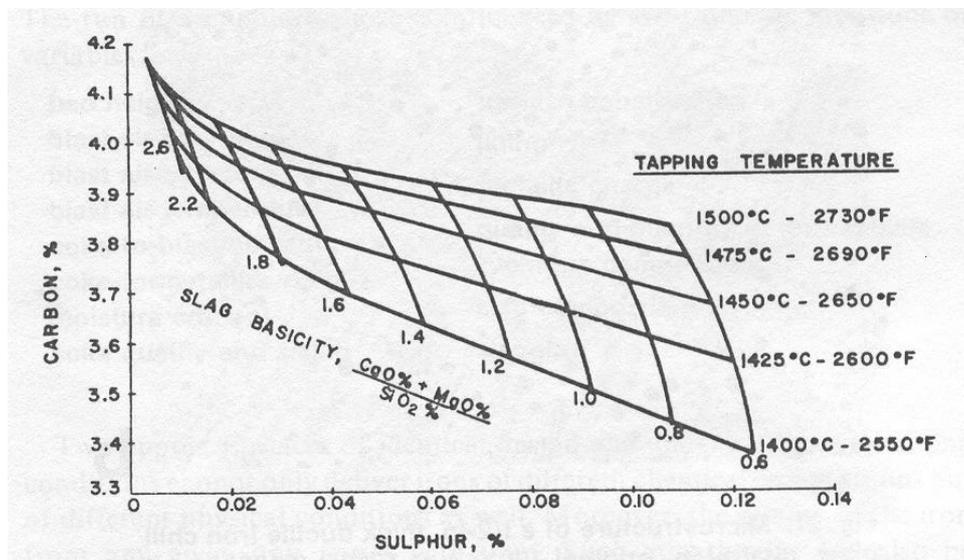
$$pH_{Basico} = \frac{CaO(\%) + MgO(\%)}{SiO_2}$$

**Ecuación 3.1**

Si el resultado es menor a 1.0 la carga metálica es ácida, si es mayor la carga es básica.

Un numero alto de pH básico usualmente significa un alto contenido de Carbono alrededor del 4 %

La siguiente Figura Muestra el porcentaje de azufre y carbono dependiendo del numero de pH básico:



**Figura 3.4 Relación entre la Temperatura de Colado y la composición química del hierro y la escoria.**

**Tabla 3.2 Tipo de carga para el proceso en cubilote.**

TIPO DE CARGA	SiO <sub>2</sub> %	CaO%	MgO%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	# BASICO
Ácida	45	35	1	11-12	0.8
Básica	25	35	25	3-10	2.4

Fuente: Ductile Iron Production Practices

A continuación se muestra un sumario de las características de la carga para la practica de producción en cubilote Ácido y Básico

**Tabla 3.3 Diferencias del proceso en cubilote Ácido o Básico**

	Cubilote ácido	Cubilote básico
C	Preferiblemente un Alto contenido de C	Como regla debe ser el contenido de Carbono muy Elevado 3,6 a 4% o superior
S	Muy alta sin desulfurización primaria del tratamiento de esferoidización	Bajo es definitivamente importante
Perdida de Si	Cerca al 10%	Alto usualmente entre 30 a 60 %
Carga	Uso de Chatarra de Hierro	No es necesario el uso de chatarra , pero se recomienda.
Mg	Usualmente Mayor cantidad de Mg es requerida	Menos magnesio es requerido
Costo del refractario	Bajo	Relativamente Alto
Consumo de Coke	Usualmente Baja	Alta
Rata de Fundicon	Alta	Baja
Temperatura de Colado	Alta	Baja, necesita una unidad de sobrecalentamiento.

Fuente: Ductile Iron Production Practices

### **3.2.1.1 Principio de Operación**

Una vez terminada una operación se debe realizar un mantenimiento en el horno para volverlo a la condición de operación, durante el mantenimiento se reemplazan los refractarios, se quita los residuos de hierro y la escoria.

Para ponerlo a operar se calienta el horno para realizar un secado de los refractarios, las compuertas del fondo se encuentran cerradas . La cama de coke es colocada en la zona de fundición y encendida hasta obtener un rojo brillante.

Una carga de coke fresco se adiciona a una altura determinada. Las dimensiones de la altura de esta cama es un parámetro crítico para proveer el monto adecuado de coke para obtener la temperatura necesaria y no alterar la composición química de la fundición.

El horno es cargado con capas alternantes de carga metálica y coke.

El aire es forzado a pasar hacia el interior del cubilote y el proceso de fundición comienza. Después de un intervalo de tiempo de entre 10 a 20 minutos la salida de descarga es abierta y empieza el flujo de metal fundido.

El hierro continúa fundiéndose, mientras el aire pase por el interior del cubilote. Las cargas están compuestas por chatarra de hierro, hierro de baja aleación y alto carbono, residuos de otros procesos de fundición, coke , aleaciones, las cuales serán cargados por la parte superior del cubilote.

Básicamente El principio de fundición en el cubilote es gracias al proceso de la combustión, por lo que es vital una alimentación continua de aire para óptimos resultados.

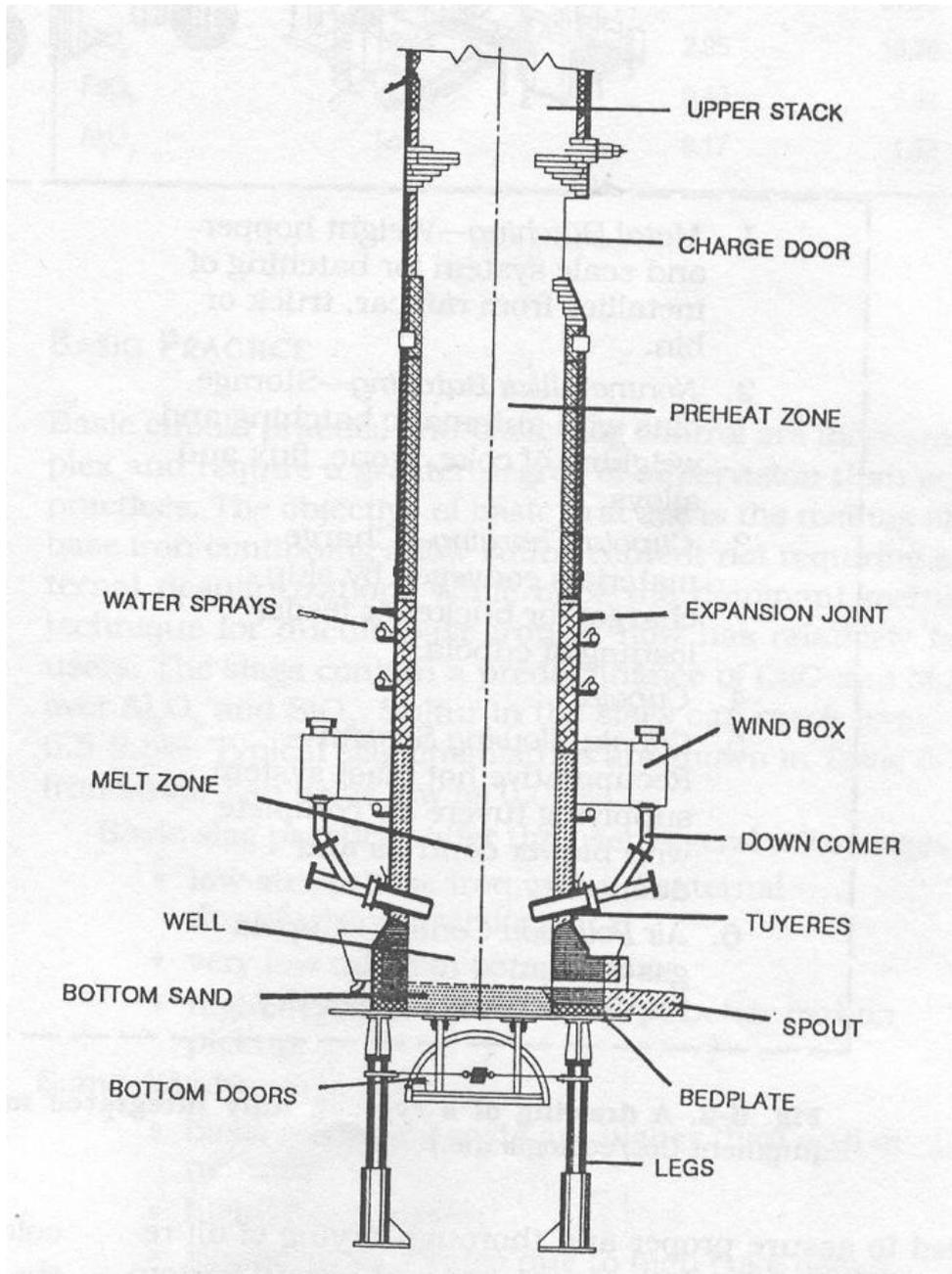
En este tipo de operaciones la seguridad es un punto muy importante.

### **3.2.1.2 Prácticas en Cubilote Ácido**

Este horno usa escoria ácida y es fácil de operar y tiene un buen recubrimiento de silicio, buen control de temperatura del metal fundido, y un buen control del carbón(C). De todas maneras , el hierro resultante tiene alto contenido de azufre (S) y requiere un tratamiento de desulfurización o el uso de una muy alta cantidad de material nodulizante, ambas cosas representan costos elevados.

### **3.2.1.3 Prácticas en Cubilote Básico**

El cubilote operado con escoria básica brinda la posibilidad de fundir grandes proporciones de desechos de acero para darle al nuevo hierro alto contenido de carbono (C ) y bajo contenido de azufre (S). La desventaja de fundir con carga básica es la pérdida de silicio (Si) de un 30<sup>a</sup> 60 %, una lenta rata de fundición lo que afecta la fluidez del metal dificultando su colado.



**Figura 3.5 Diagrama de un Horno Cubilote**

### 3.2.2 HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO

Este tipo de hornos son poderosos para la fundición y pueden ser equipados con un menor poder para usarse como uno duplex.

Para una mejor fundición este horno puede usar refractarios, es confiable y puede fundir una gran variedad de materiales. Para disminuir el contenido de azufre se puede incluir una carga de escoria básica.

Las desventajas son : La necesidad de un control del aire y del ruido que produce el horno y la falta de la acción de revolver que facilite la adición de Carbón (C ) o de aleaciones metálicas.

#### 3.2.2.1 Principio de Operación

En este tipo Los electrodos entra por el techo de la estructura y se suspenden verticalmente sobre el material a fundir, la corriente eléctrica pasa de un electrodo hacia la carga , y luego de esta hacia el otro electrodo, generando así una gran cantidad de calor. Los electrodos se encuentran separados de tal forma que el arco eléctrico no se formo entre ellos sin pasar por la carga.

Estos hornos necesitan aproximadamente 500Kwh para fundir una tonelada de hierro, el consumo de los electrodos está alrededor de 12 libras por cada tonelada de hierro fundido.

**Tabla 3.4 Composición típica de la carga para producción en horno de arco eléctrico**

Componentes %	SiO <sub>2</sub> %	CaO%	MgO%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MnO%	# BASICO
Ácida	47	28	6	14	3	0.72
Medianamente Básica	35	35	12	12	3	1.34
<b>Básica</b>	26	49	15	7	1	2.46

Fuente: Ductile Iron Molten Metal

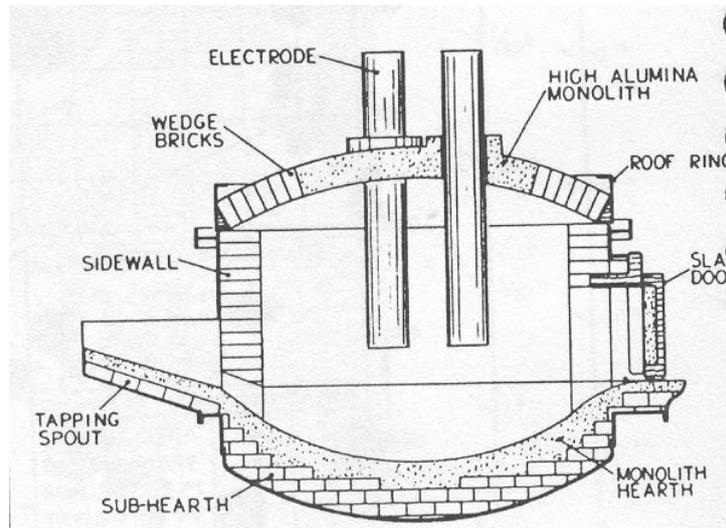
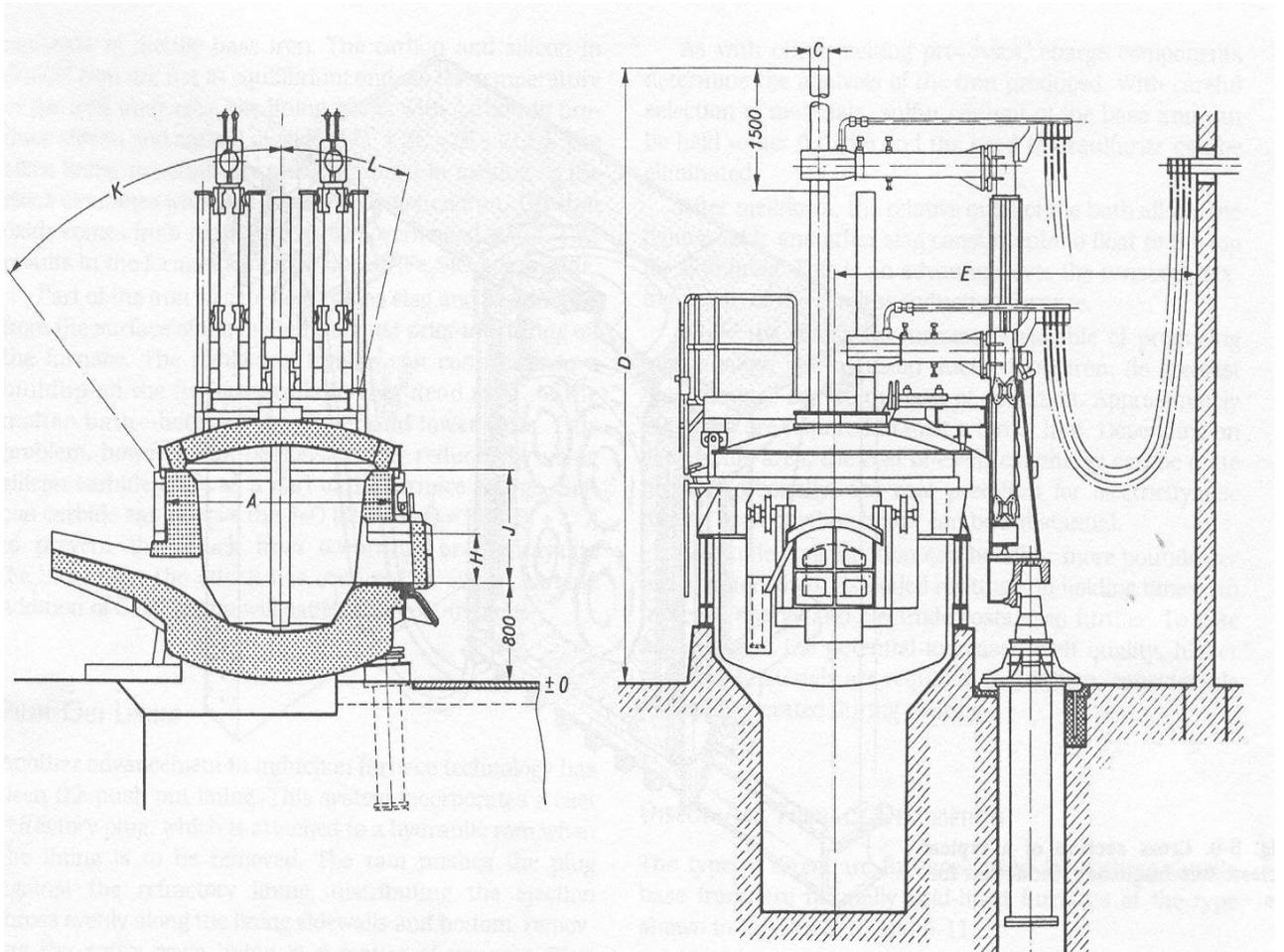


Figura 3.6 Esquema de Horno de Arco Eléctrico.

### 3.2.3 HORNOS DE INDUCCIÓN

Este tipo de horno permite el mejor control de temperatura y de la composición química, la desventaja radica en la necesidad de limpiar los desechos para minimizar los costos de refractarios y un equipo de control de contaminación.

La rápida acción de mezclado que este horno proporciona es ideal para la adición de aleaciones pero también erosiona el recubrimiento del refractario. , con una alta temperatura y un hierro base de bajo contenido de silicio, el recubrimiento puede también acelerar la transferencia del sílice de el recubrimiento refractario hacia el metal.

#### 3.2.3.1 Principio de Operación

Estos hornos funcionan bajo el principio de que al pasar corriente alterna a través de un alambre bobinado se genera un campo magnético, el cual induce corriente en el metal situado dentro del campo. Esta corriente inducida reacciona debido a la resistencia natural del metal lo que causa un incremento de temperatura.

El grado de calentamiento alcanzado es dependiente de la frecuencia del campo magnético y de su intensidad.

Las frecuencias son :

**Tabla 3.5 Rangos de Frecuencia**

BAJA	60 Hz
MEDIANA	180 – 1000 Hz
ALTA	MAYOR A 1000 Hz

Fuente: Ductile Iron Handbook

Limite de Poder en Función de la Frecuencia

**Tabla 3.6 Limite de Poder**

BAJA	250 – 350 Kw/ton
MEDIANA	600 – 1000 Kw/ton

Fuente: Ductile Iron Handbook

**Tabla 3.7 Composición de la carga Para Horno de Inducción y proceso de Hierro Dúctil con Matriz de Perlita**

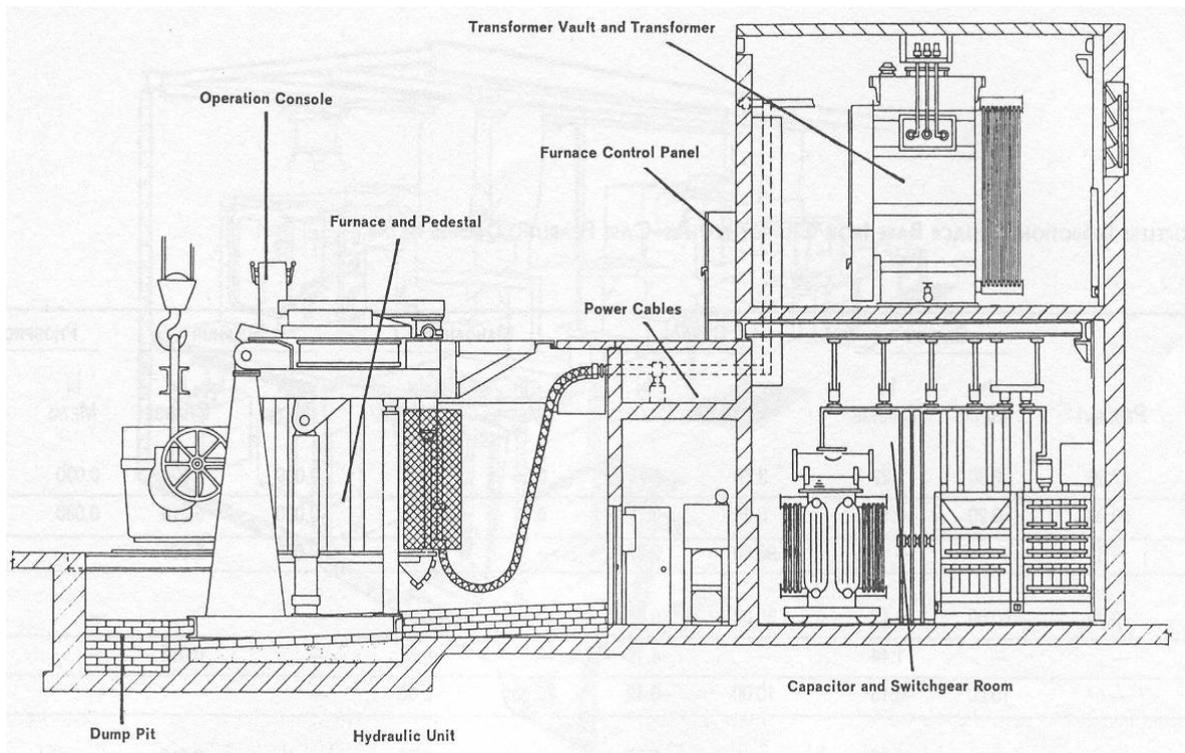
Materiales	Porcentaje	Silicio		Carbono		Manganeso		Azufre		Fósforo	
		En Metal	En Carga	En Metal	En Carga	En Metal	En Carga	En Metal	En Carga	En Metal	En Carga
Retornos	47	2.6	1.22	3.7	1.74	0.55	0.27	0.009	0.004	0.03	0.014
Desechos de Acero	50	0.2	0.1	0.25	0.12	0.6	0.3	0.02	0.01	0.03	0.015
Grafito	2.31	-	-	98.5	2.27	-	-	0.05	0.001	-	-
Carburo de Silicio (CS 90%)	0.2	60	0.12	30	0.06	-	-	-	-	-	-
<b>Totales</b>	-	-	1.44	-	4.19	-	0.57	-	0.015	-	0.029
Perdida en Fundición	-	10	-0.15	10	-0.42	10	-0.06	-	-	-	-
Composicion Estimada	-	-	1.3	-	3.77	-	0.51	-	0.015	-	0.029

Fuente: Ductile Iron Handbook

**Tabla 3.8 Composición de la carga Para Horno de Inducción y proceso de Hierro Dúctil con Matriz de Ferrita**

Materiales	Porcentaje	Silicio		Carbono		Manganeso		Azufre		Fósforo	
		En Metal	En Carga	En Metal	En Carga	En Metal	En Carga	En Metal	En Carga	En Metal	En Carga
Retornos	50	2.6	1.3	3.7	1.85	0.23	0.115	0.008	0.002	0.03	0.014
Sorelmetal	30	0.9	0.3	4.25	1.27	0.01	0.003	0.02	0.006	0.022	0.006
Desechos de Acero	19.07	0.2	0.4	0.2	0.04	0.6	0.115	0.02	0.004	0.03	0.006
Grafito	0.93	-	-	98.5	0.91	-	-	0.05	0.005	-	-
<b>Totales</b>	<b>100</b>	<b>-</b>	<b>1.37</b>	<b>-</b>	<b>4.13</b>	<b>-</b>	<b>0.232</b>	<b>-</b>	<b>0.018</b>	<b>-</b>	<b>0.0027</b>
Perdida en Fundición	-	10	-14	10	-41	10	-0.023	-	-	-	-
Composicion Estimada	-	-	1.23	-	3.72	-	0.209	-	0.018	-	0.0027

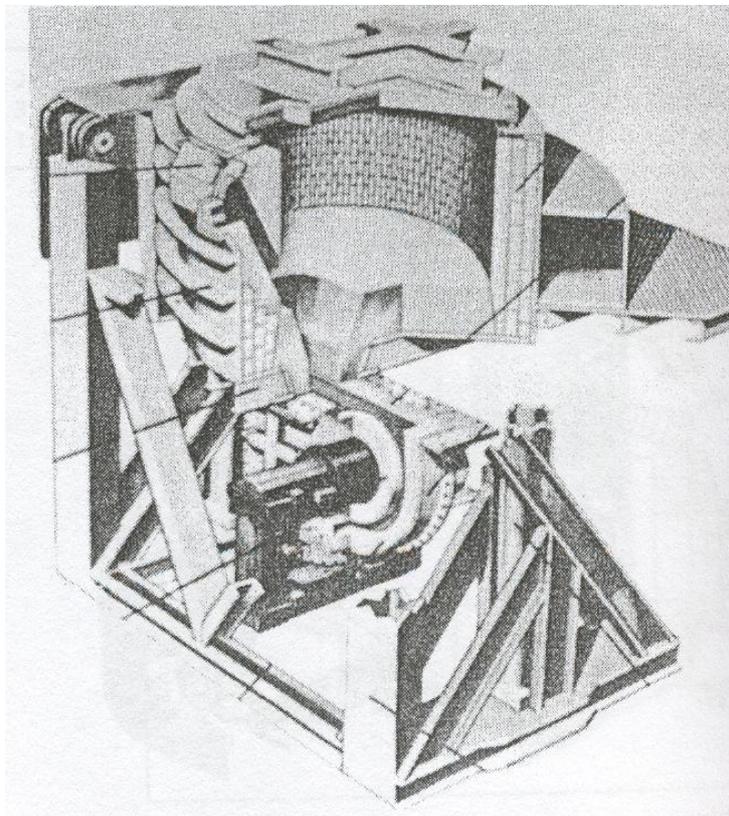
Fuente: Ductile Iron Handbook



**Figura 3.7 Esquema de Horno de Inducción**

### 3.2.4 HORNOS DE INDUCCIÓN DE CANAL

Este tipo de hornos no son usados para una fundición rápida, pero son usados como unidades de fundición primaria cuando la demanda de metal fundido es baja. Estos pueden ser unidades alargadas y son excelentes para mantener y mezclar el metal con alguna capacidad para una fundición fría. Como en los hornos de Inducción la acción de mezclado no es muy buena para la adición de aleaciones. Tampoco presentan una gran variedad de metales que pueden ser fundidos como en los hornos de inducción.



**Figura 3.8 Esquema de un Horno de Canal**

### **3.2.5 PRECALENTAMIENTO**

Las instalaciones de los hornos pueden emplear también alguna forma de precalentar la carga para asegurar que los materiales se encuentran libre de sustancias explosivas como aceite o combustibles, y para deshumedecer la carga.

Una ventaja de usar el precalentador es que se reduce el tiempo de fundición, es decir que en el horno se incrementa la tasa de fundición entre un 20 a 30 %.

Aunque el tipo de unidad de Fundición es una consideración importante en el proceso del hierro dúctil, todos los aspectos del proceso deben ser considerados con respecto a los demás para metros involucrados.

### **3.2.6 PROCEDIMIENTOS DE CONTROL DEL HIERRO NODULAR**

A continuación se tratan algunas áreas que en el proceso de producción de hierro dúctil requieren de un especial control.

Estas recomendaciones son generales ya que cada planta de producción tiene sus propias condiciones de operación, tipos de horno, etc..

Todos los operadores envueltos en la producción de hierro dúctil deben estar bien entrenados y familiarizados con las consecuencias de fallar en el cumplimiento de los procedimientos. Esta educación pagara dividendos al tener una cantidad mínima de problemas y menor cantidad de residuos en el proceso de fundición. En efecto todo el personal involucrado se convierte en una parte importante para el control de calidad del producto.

### **3.2.6.1 Materias Primas**

La manufactura del hierro dúctil con consistentes y predecibles resultados requiere control sobre la composición química de las materias primas a utilizarse. La fuente usual de contaminación es al comprar chatarra de acero o retornos de fundición. Todos los materiales no ferrosos deben ser removidos a causa del efecto indeseable que tienen en la formación de los nódulos de grafito.

Debe prestarse atención particular a los materiales que se sospechen que tienen en su contenido plomo o azufre, ya que estos productos afectan las características del hierro base.

La carga de materiales debe estar limpia y seca, ya que residuos de aceites u otras sustancias pueden causar explosiones al ser añadidas al hierro base fundido, y también pueden incrementar los niveles de hidrógeno y oxígeno.

Dado que el magnesio tienen una afinidad muy fuerte por el oxígeno en el metal fundido, cualquier forma de oxidación excesiva debe ser evitada. Algunos factores que favorecen a la oxidación son : Una cama baja en el cubilote, residuos de fundición anterior.

### **3.2.6.2 Practicas de Tratamiento**

Muchos factores deben ser considerados en el control de las prácticas de tratamiento del hierro dúctil. Estos factores incluyen la química del metal, la temperatura del metal, recubrimientos de los materiales aleados, métodos de tratamiento, tipo de aleación para le tratamiento, la geometría de la cuchara y la cantidad de la aleación para tratamiento.

### **3.2.6.3 Química del Metal**

La composición química del hierro dúctil base dependerá del tipo de unidad de fundición (horno), el agente nodulizante, tipo de fundición a producir, y el tipo y cantidad de material inoculante utilizado.

Varios métodos para análisis químico son usados para el hierro dúctil, incluyendo Espectrografías, equipos de rayos X, analizadores de absorción atómica, Eutectómetros o equipos de curvas de enfriamiento, y equipos de análisis rápido de carbón, azufre y silicio.

Los equipos de curvas de enfriamiento o Eutectómetro, son usados con una mayor frecuencia para determinar la composición química básica.

Las mediciones de Temperatura del metal líquido son usadas para el control de Carbón y Carbón Equivalente. Las curvas de enfriamiento y un análisis térmico pueden ser usadas para determinar la nodularización o el grado de oxidación del metal.

Obviamente, cualquier análisis químico es válido para la muestra de la que se está tomando.

Las muestras para Rayos X deben estar libres de escoria. Las muestras fundidas del hierro dúctil deben ser tomadas de 3 a 12 pulgadas bajo la superficie.

Las pruebas de muestras enfriadas son usadas como una referencia de chequeo rápido tanto para el hierro base como para el hierro ya tratado con nodulizantes e inoculantes.

### 3.2.6.4 Temperatura del Metal

Para la obtención del hierro base de mejores características, la determinación de la temperatura de colado es esencial, porque la temperatura de tratamiento es un factor importante en la cantidad de magnesio retenido in el hierro.

Una temperatura de tratamiento excesiva da como resultado una perdida sustancial de magnesio y produce un grafito no nodular, cuando la temperatura de tratamiento es baja se incrementa la cantidad de magnesio retenido y puede resultar en defectos de la escoria.

Varios métodos de medición de temperaturas para el hierro fundido existen, lo que incluye Pirómetros ópticos, Termocuplas de inmersión, y dispositivos de medición de radiación .

Los pirómetros Ópticos son capaces de medir la temperatura del metal fundido en el horno o en la cuchara.

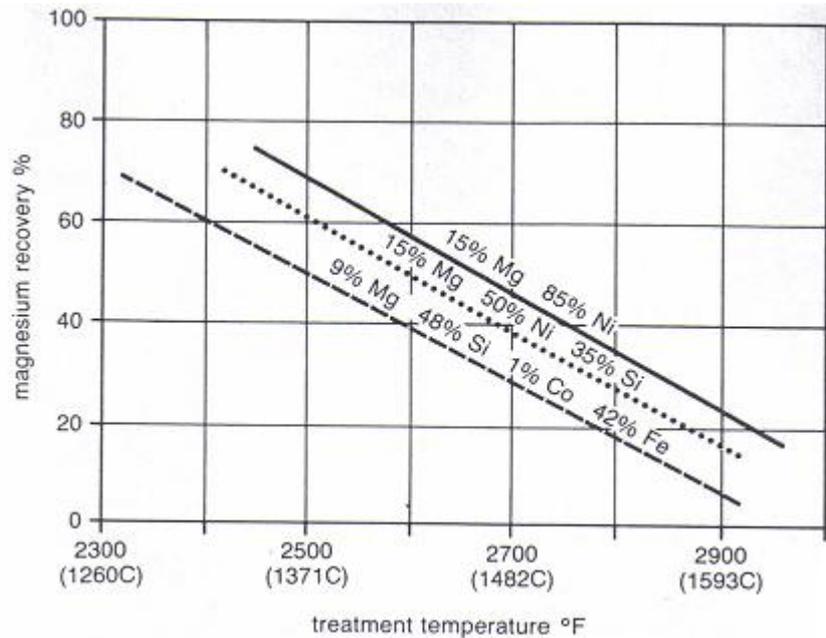
Las Termocuplas de inmersión es el método mas exacto para la medición de la temperatura del metal fundido porque son insertadas bajo la superficie y no son afectadas por otros factores externos.

Los Pirómetros de Radiación son usualmente utilizados para monitorear la temperatura de la corriente del metal que fluye del cubilote o de cualquier otro horno. Tanto los datos de las Termocuplas como los de los pirómetros de radiación pueden ser almacenados para generar una base de datos.

Una medición inexacta debido a una mala lectura o un equipo descalibrado es perjudicial para el proceso por lo cual el operador debe estar bien entrenado y los aparatos correctamente calibrados.

La adecuada temperatura de colado depende del tamaño del honro, del tipo de Fundición a producir, y la cantidad de traslado requerido desde el horno hasta la etapa de colado. La perdida de temperatura depende también del tipo de

tratamiento. Los métodos de tratamiento en cuchara y de sándwich generalmente causan menos pérdida de temperatura que otros. Así la temperatura cae en un rango de 28 a 83 C.



**Figura 3.9 Variaciones en la recuperación de Mg con una aleación maestra y con tratamiento de temperatura (Tratamiento de Transferencia en Cuchara.)**

### 3.2.6.5 Nodulización

La recuperación de magnesio del tratamiento por aleación depende no solo de la temperatura de tratamiento y del azufre contenido en el hierro base, sino del tipo de aleación y de el método de adición la metal fundido.

Las tasa de recuperación mayores al 75%, por ejemplo, está reportado un uso del 3% de aleación de magnesio y con el método del sándwich.

Un mejoramiento desde el 53 a 59 % de recubrimiento es reportado usando un 5% de MgFeSi y el tratamiento de cuchara cubierta versus el tratamiento de cuchara abierta.

La tasa de recuperación es también influenciada por la tasa a la cual la cuchara es llenada en el proceso de sándwich o a cuchara abierta , o por el tiempo de reacción durante la inmersión . Los recubrimientos reportados varían como mucho un 50 % desde el primer minuto de inmersión.

La geometría de la cuchara es especialmente importante en el proceso sándwich, y en la inmersión, porque confían en tener la profundidad necesaria para la acción de la aleación sobre el metal, y así alcanzar una efectiva recuperación del nodulizante. Las cucharas deben estar libres de escoria, residuos de fundiciones anteriores.

Todos lo materiales usados en este tratamiento y en la inoculación del metal fundido debes ser pesados con la mayor precisión posible. El metal a fundir deber ser pesado con exactitud ya que un pequeño exceso de metal para la cantidad de aleación para el tratamiento resultará en un hierro con otras características y micro estructura, y una cantidad menor de metal resultara en la formación de carburos, pobre nodulización, defectos en la estructura y exceso de magnesio en el contenido del hierro fundido.

### **3.2.6.6 Efecto del tiempo**

El tiempo es un factor de gran consideración en la producción de hierro dúctil debido a la disminución de algunos factores..

Existen 3 tipos de efectos de disminución experimentados en la producción de hierro dúctil:

- 1) Disminución del Magnesio
- 2) Disminución de la Nodularización

### 3) Disminución de la Inoculación

Aunque estas 3 están relacionadas , el efecto de cada una debe ser considerado en forma independiente.

#### 1) Disminución del Magnesio

La tasa de pérdida de magnesio desde el metal fundido es 0.001% por minuto a 1482 C. Sin embargo , hay alguna evidencia que la tasa de pérdida de magnesio decrece con un tiempo de retención extendido.

Las investigaciones indican que el hierro dúctil satisfactorio se puede producir del hierro tratado sostenido en un horno, con tal que el hierro fuera dado una inoculación conveniente y sostenido bajo cubierta conveniente para reducir al mínimo la oxidación.

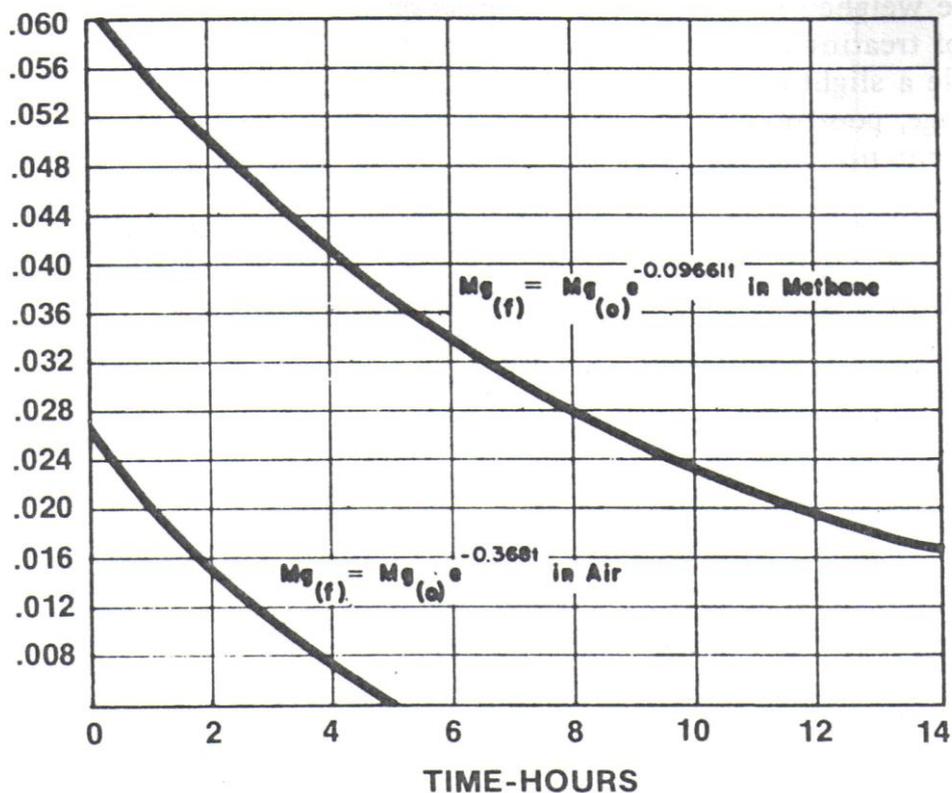


Figura 3.10 Disminución del Magnesio en el Hierro Dúctil

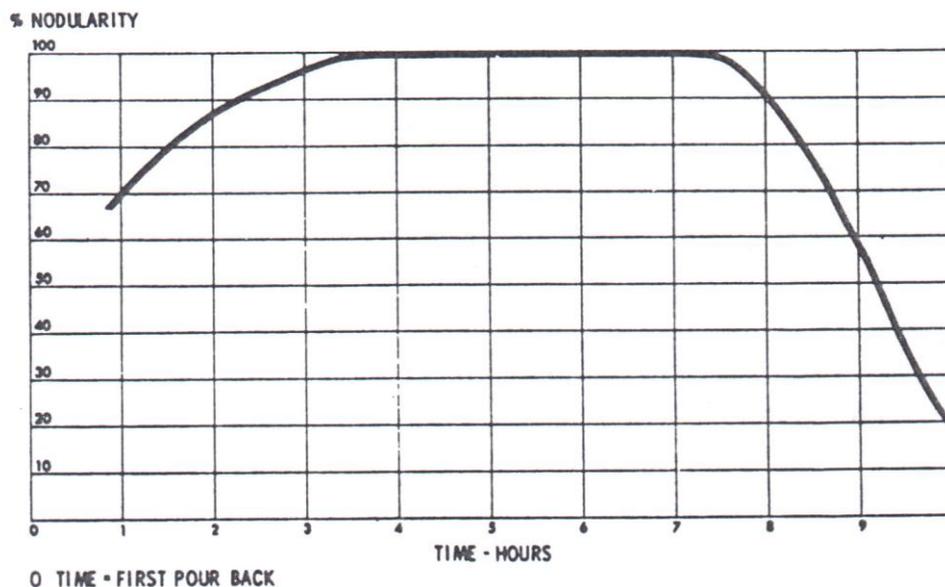
## 2) Disminución de la Nodularización:

Aunque no existe un método universalmente aceptado para medir la nodularización, los investigadores han observado que la disminución de la nodularización de grafito esferoidal al grafito vermicular no ocurre gradualmente con el tiempo al igual que la disminución del magnesio.

Los investigadores divulgan que un alto grado de nodularización es mantenido hasta que el magnesio disminuye debajo de algunos niveles críticos, en cuyo caso la nodularización disminuye rápidamente a cero.

Este efecto aun es investigado, pero el nivel crítico de magnesio es reportado entre 0.015% y 0.025%.

Los factores que afectan el nivel crítico del magnesio no han sido determinados.

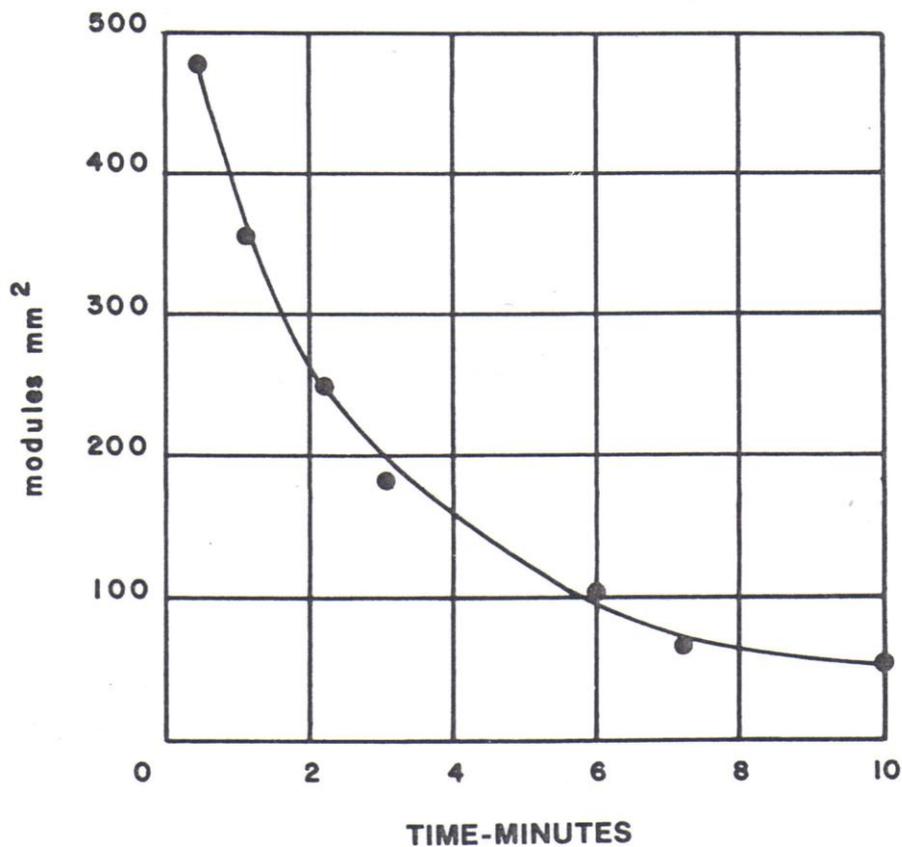


**Figura 3.11 Disminución de la Nodularización en el hierro dúctil**

### 3) Disminución de la Inoculación :

El propósito de inocular es el incrementar el numero de sitios de nucleaciones de grafito , pero una efectiva inoculación puede también mejorar la nodulización. El efecto del inoculante y la cuenta de nódulos resultantes disminuye con el tiempo. A causa de esta disminución, la mayoría de fundidores limitan el tiempo de que el metal fundido es retenido en la cuchara después de la inoculación entre 10 a 15 minutos.

Debido a la variedad de circunstancias alrededor de la producción del hierro dúctil, el efecto del tiempo debe ser considerado en cada aplicación.



**Figura 3.12 Disminución del conteo de nódulos como función del tiempo de retención después de la inoculación**

### 3.2.6.7 Metalografía

Un método simple de inspección del hierro tratado e inoculado es a través de examinar su estructura microscópica.

Una muestra de hierro fundido se vierte en un molde, como el molde de pruebas desarrollado por la AFS.

Una apropiada técnica de muestreo es necesaria para asegurar que la muestra es un ejemplo representativo del hierro fundido. Cada cuchara de tratamiento para hierro dúctil debe ser chequeada, y todas las fundiciones vertidas de esa cuchara deben ser identificadas y mantenidas por separado hasta que el análisis del micro estructura este completo.

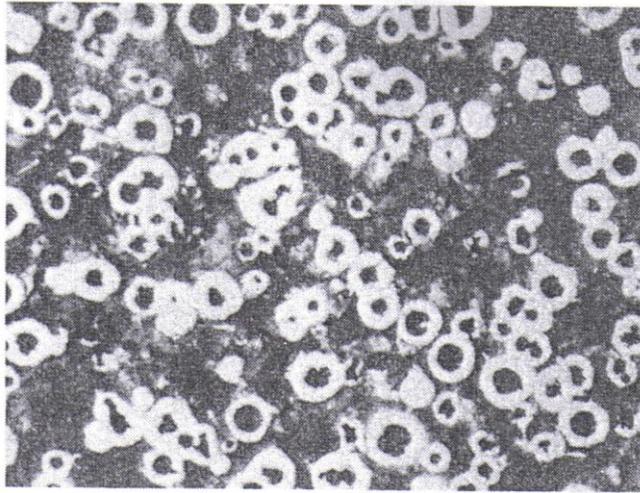
Debido a la posibilidad de la disminución del magnesio durante el colado, todo el espécimen de la prueba se debe muestrear hacia el extremo de la cuchara de la que se vierte.

El grado de nodulización varía según la aplicación la cual debe ser especificada por el cliente.

Usualmente alrededor del 10% de no nodulización del grafito es tolerada sin serias pérdidas de propiedades mecánicas.

Una vez que las muestras se hayan enfriado un poco y ya no están al rojo vivo, pueden ser enfriadas rápidamente con agua para poder ser manipuladas, y así proceder a realizar el pulido mecánico correspondiente.

Con una magnificación en el microscopio de 50X o 100 X es suficiente para determinar el grado de nodulización, y la muestra puede ser pulida un poco más para un análisis más exhaustivo.



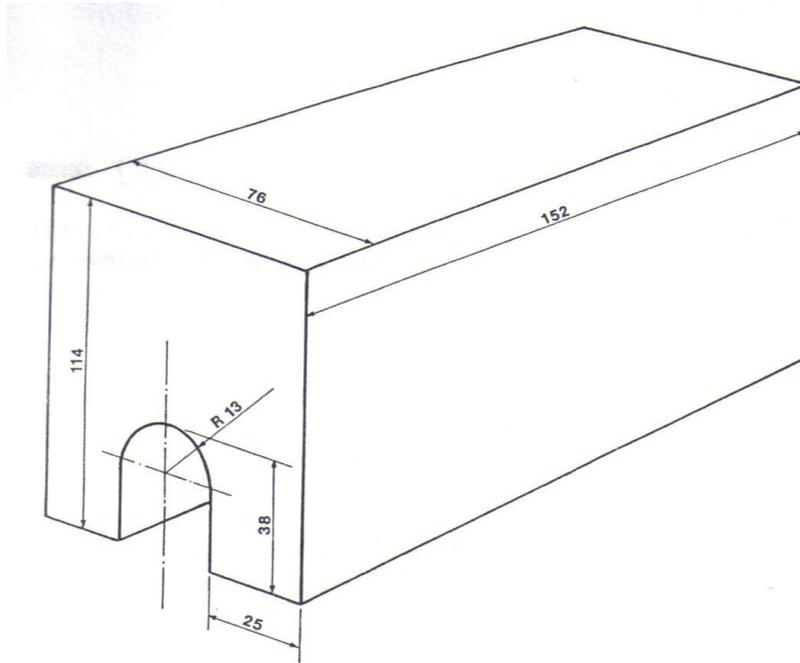
**Figura 3.13 Micrografía obtenida después de aplicar una técnica apropiada de pulido.**



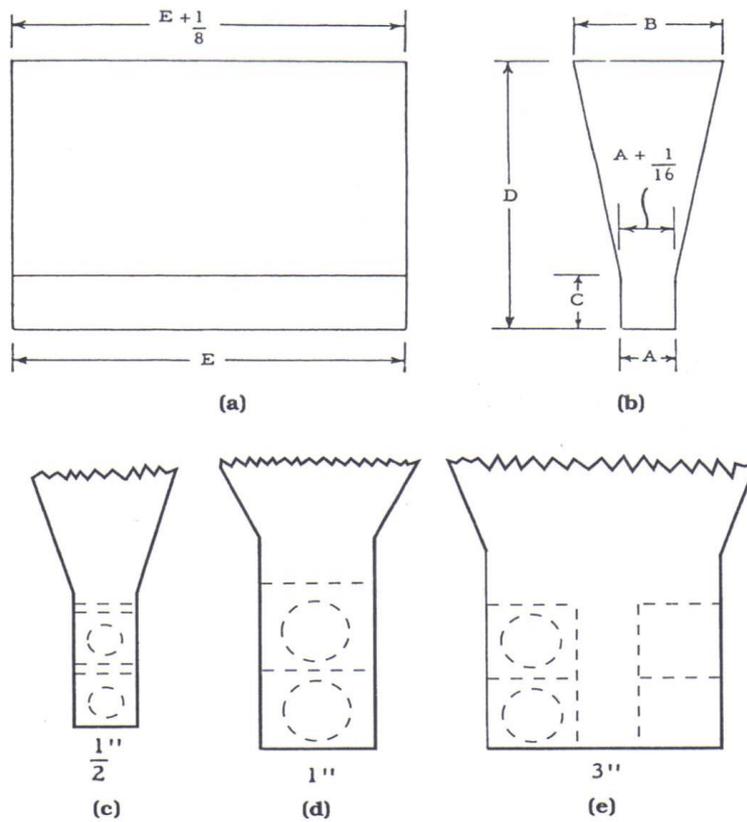
**Figura 3.14 Micrografía Obtenida después de aplicar una mala técnica de pulido.**

#### **3.2.6.8 Pruebas de Control de Calidad**

Los ensayos para el determinación de los esfuerzos a la tensión, porcentaje de elongación, dureza, y la reducción del área se realiza en las barras trabajadas a máquina de bloques “ Y” o”quilla”, cuyas medidas están especificados por los estándares de ASTM.

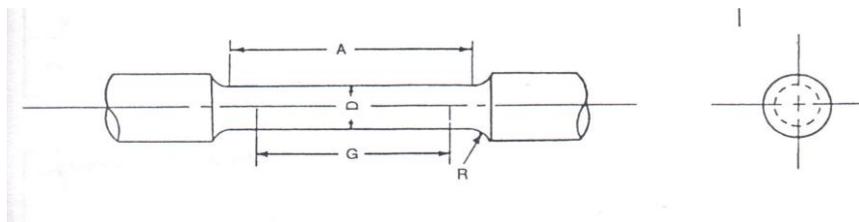


**Figura 3.15 Bloque Quilla (dimensiones en mm)**



DIMENSIÓN	TAMAÑOS DEL BLOQUE		
	1/2 IN	1 IN	3 IN
A	172	1	3
B	1 5/8	2 1/8	5
C	2	3	4
D	4	6	6
E	6 A 7	6 A7	6 A 7
PARA REPRESENTAR SECCIONES DE FUNDICIÓN	< 1/2	1/2 A 1 1/2	> 1 1/2

**Figura 3.16 a – e Bloque Y dimensiones (pulgadas) y localización de las probetas a extraer de este.**



DIMENSIONS	STANDARD SPECIMEN IN. (MM)	SMALL SIZE SPECIMENS PROPORTIONATE TO STANDARD IN. (MM)	
	1/2 ROUND (13 MM)	0.350 ROUND (8.89 MM)	0.250 ROUND (6.35 MM)
G = GAGE LENGTH	2.000 ± 0.005 (50.8 ± 0.13)	1.4 ± 0.005 (35.6 ± 0.13)	1.0 ± 0.005 (25.4 ± 0.13)
D = DIAMETER (NOTE 1)	0.500 ± 0.010 (13 ± 0.25)	0.350 ± 0.007 (8.9 ± 0.18)	0.250 ± 0.005 (6.35 ± 0.13)
R = RADIUS OF FILLET	3/8 MIN (9.5, MIN)	3/8 MIN (9.5, MIN)	1/4 MIN (6.35, MIN)
A = LENGTH OF REDUCED SECTION (NOTE 2)	2 1/4 MIN (57.2, MIN)	1 3/4 MIN (44.5, MIN)	1 1/4 MIN (31.8, MIN)

### 3.17 Probeta Estándar ASTM para ensayos de Esfuerzos Forma y Medidas

Las barras deben ser obtenidas de cada colado del metal tratado, o en periodos determinados durante la producción.

Cuando un tratamiento térmico sea necesario las barras deben ser tratadas con todo el lote de fundición al que representan.

En las especificaciones, la química del hierro dúctil es generalmente subordinada por las propiedades mecánicas, sin embargo, el grado austenítico especifica las químicas requeridas para obtener las propiedades deseadas. El porcentaje máximo de silicio es también especificado in los Grados que requieren alta resistencia al impacto.

Los análisis químicos pueden ser realizados en las barras de prueba , usando secciones sólidas de estas, sin embargo la mayoría de espectrógrafos requieren una muestra enfriada (chilled) para obtener un resultado exacto.

La muestra enfriada puede ser obtenida al vaciar el hierro en un molde metálico lo que produce que el hierro se solidifique rápidamente y disminuyen las segregaciones.

Las pruebas de dureza son empleadas generalmente para verificar la calidad de la matriz del hierro dúctil, pero no diferenciará entre el grafito nodular y otras formaciones del grafito.

Para la prueba de dureza del hierro nodular se usa la escala Brinell con una bola de 10 mm y una carga de 3000 kg.

El ensayo de dureza puede ayudar a predecir el valor del Esfuerzo a tensión mediante el uso del Factor K , el factor k es normalmente  $420 \pm 15$ .

El valor del Esfuerzo de tensión será valido si la estructura es nodular y esté libre de la presencia de carburos.

$$Su = (420 \pm 15) * HBN$$

**Ecuación 3.2**

## CAPITULO 4

### ENSAYOS Y ANÁLISIS

#### 4.1 VERIFICACIÓN DE EQUIPOS

La verificación de la máquina de ensayos universales AMSLER se realizó utilizando una celda de carga , la misma que permitió medir y comparar los valores de carga aplicada , lectura de la máquina y carta de calibración del INEN .

**Tabla 4.1 Verificación de la calibración de la máquina de ensayos universales AMSLER con celda de carga de 20000 Kgf.**

<b>Fuerza aplicada (Kg.)</b>	<b>1era medida (ε)mm*10<sup>-6</sup></b>	<b>2da medida (ε)mm*10<sup>-6</sup></b>	<b>Carta de calibración (ε)mm*10<sup>-6</sup></b>
1000	0031	0031	0031
2000	0062	0063	0062
3000	0093	0093	0093
4000	0123	0123	0123
5000	0153	0153	0153
6000	0182	0182	0182
7000	0212	0212	0212
8000	0240	0240	0240
9000	0271	0270	0270

Fuente: Laboratorio de Resistencia de Materiales ESPE

Para realizar la verificación de la maquina de ensayos AMSLER para ensayos Charpy e Izod se tomo medidas del péndulo al centro del eje de giro y se obtuvieron los siguientes datos.

***Péndulo de impacto:***

Energía potencial teórica:

*masa martillo : 27,02 Kg*

*distancia eje – martillo : 700 mm*

*$E_{pt} = 27,02 \times 700 = 18,9 \text{ Kgm}$*

***Energía potencial nominal:***

Lectura escala inicial: 21,3 Kgm

Lectura escala final: 2, 5 Kgm

*$E_{pn} = 21,3 - 2,5 = 18,8 \text{ Kgm}$*

De acuerdo a las energías potenciales obtenidas, se calcula el error que presenta el equipo:

$$E\% = \frac{18,8 - 18,9}{18,8} \times 100 = 0,5$$

Para corregir los datos que proporciona la máquina se debe disminuir el valor de la diferencia entre las energías potenciales teórica y nominal , es decir 0.1 Kgm.

La Verificación de la máquina AVERY utilizada en el ensayo de torsión se realizó siguiendo los siguientes pasos:

- Verificar el juego libre del cabezal de carga, que corresponde al ubicado en el extremo de la máquina debajo del dial. Este elemento presenta juego libre sensible a la mano.
  
- Verificar la marcha del motor y de la caja de cambios. Lo observación se hizo mediante el uso de un cronometro y se comprobó que el número de

revoluciones por minuto de la caja de cambios corresponde al valor dado por el cronometro en un minuto.

- Se comprobó la existencia de los topes en ambas mordazas de los cabezales. Los topes y seguros se encuentran en buen estado.
- Para realizar la verificación del torque medido por la máquina, se utilizó una palanca de fuerza o torquímetro de trinquete y uno de aguja. Dentro de los accesorios de la máquina existe una placa cuadrada con agujero cuadrado de media pulgada estandarizado para herramienta. Esta placa se acopla mediante cuatro orificios y una corredera al cabezal de la máquina. Se debe ubicar la placa de modo que la corredera de la placa entre en el canal del cabezal, el cual asegura un distribución uniforme del torque.
- Ubicar el torquímetro de manera que permita ejercer una fuerza lenta y progresiva al operador que verificará la máquina.
- Se seleccionó torques que el operario pueda ejercer con su fuerza y se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 4.2 Valores de torque máquina AVERY**

Torque aplicado	Torque maquina	Error
30	30	0
35	35	0
40	40	0
45	45	0
50	51	-0.02
55	55	0
60	60	0
65	65	0

Fuente Laboratorio de Resistencia de materiales ESPE FIME

## **4.2 ENSAYO DE CARACTERISTICAS METALURGICAS**

Las características metalúrgicas de los metales se refieren a su composición química , la estructura que presentan las cuales dotan de forma inherente al metal o en este caso al Hierro Dúctil o Nodular de las determinadas propiedades mecánicas.

La micro estructura del hierro nodular obtenido debe ser evaluada con el fin de determinar si el metal ha alcanzado un grado aceptable de nodulización y asegurar así sus propiedades mecánicas para un óptimo desempeño.

Los ensayos metalúrgicos realizados en las probetas de hierro dúctil son Ensayos No destructivos, es decir que no se afecta la integridad física de los especímenes de prueba, aunque estas son afectadas ligeramente al momento de realizar el pulido mecánico correspondiente para su posterior observación de la estructura bajo el microscopio.

### **4.2.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA**

La realización del análisis químico de las muestras permite conocer los elementos que constituyen a la muestra metálica que en el caso de el Hierro dúctil los elementos mas importantes sobre los que se debe conocer su porcentaje de participación en esta son : Carbono, Silicio, Magnesio, Azufre, Manganeso, Fósforo , Níquel, Cobre , Cromo y Molibdeno, ya que su presencia en determinadas cantidades hará variar las propiedades de esta fundición.

Existen distintos métodos para determinar la composición química , existe por ejemplo el método el de Vía Húmeda, el cuál consiste en utilizar polvo de hierro nodular y disolverlo junto con todos los elementos contenidos en la muestra con el propósito de determinar la pérdida de masa y de estas forma obtener la masa de cada elemento y su porcentaje en la muestra.

Otros procedimientos llamados de Vía Seca son aquellos en los que se utiliza equipos especiales como espectrógrafos donde la muestra es analizada bajo una atmósfera de argón y dependiendo del espectro emitido por cada elemento se logra determinar la composición química de la muestra u otros equipos especiales como Equipos de difracción de rayos X, Analizadores de absorción atómica.

En este caso el análisis químico se realizará con un Espectrógrafo que es uno de los pocos aparatos existentes en el Ecuador en las instalaciones de el consorcio ANDEC – FUNASA.

El funcionamiento del Espectrómetro se puede ilustrar de la siguiente manera:

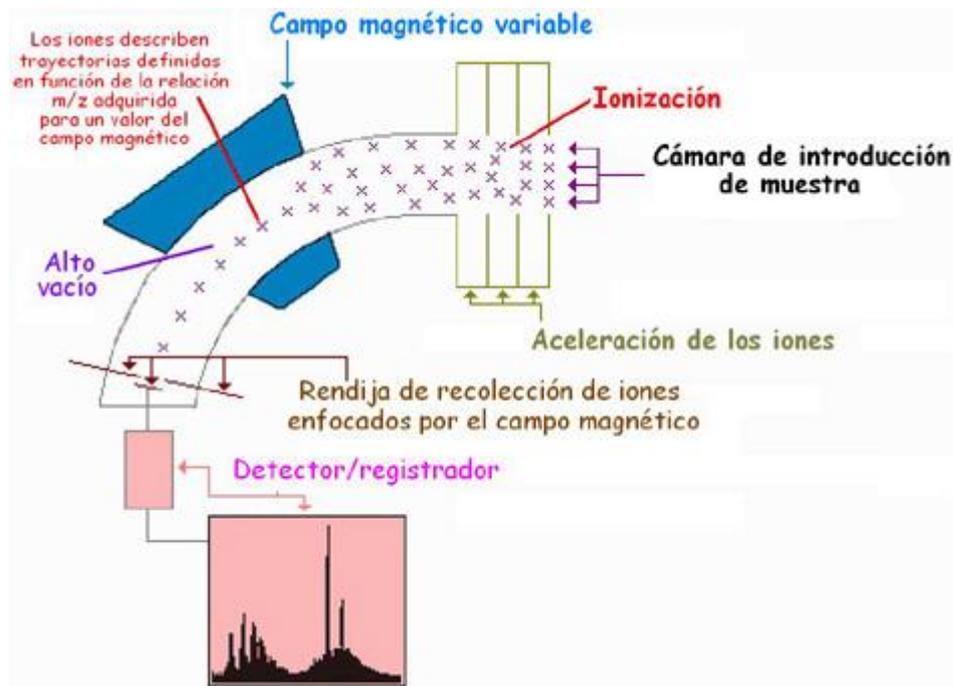


Gráfico 4.1 Fuente [www.uam.es/ciencias/](http://www.uam.es/ciencias/)

La muestra de hierro dúctil para ser analizada debe ser templada (chilled) al momento de su manufactura , caso contrario la muestra tendrá valores de carbón extremadamente altos , lo que invalida el experimento .

**Tabla 4.3 Resultados de análisis químico**

<b>Muestra</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
<b>%Fe</b>	86.498	92.687
<b>%C</b>	4.11	3.66
<b>%Mn</b>	0.8	0.35
<b>%Si</b>	3.39	2.03
<b>%P</b>	0.179	0.124
<b>%S</b>	0.248	0.091
<b>%Cu</b>	1.35	0.18
<b>%Cr</b>	0.1	0.03
<b>%Ni</b>	1.31	0.07
<b>%Mo</b>	0.19	0.07
<b>%Sn</b>	0.198	0.06
<b>%Al</b>	0.4203	0.2209
<b>%Pb</b>	0.15	0.076
<b>%V</b>	1.056	0.351

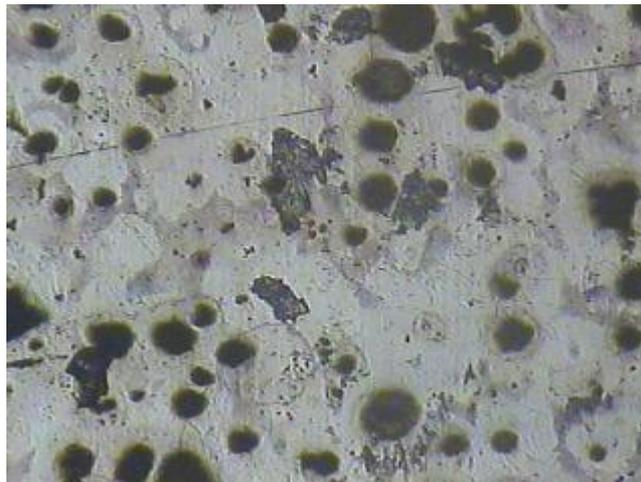
Fuente: ANDEC FUNASA lab. de Espectrometría

#### 4.2.2 MICROGRAFÍA

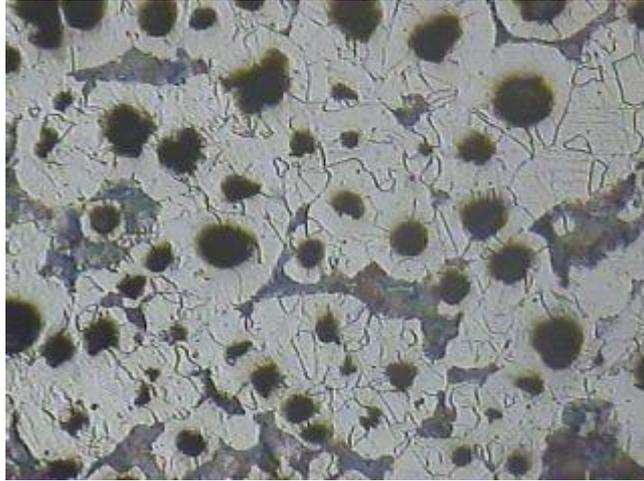
La micrografía de las probetas de hierro Dúctil se las realizó en el Laboratorio de Metalurgia de la ESPE, mediante un programa llamado CLEMEX, el cual permite obtener datos tales como el tamaño de grano, en este caso el conteo de nódulos, el tipo de matriz de la muestra, etc..

Los resultados se muestran a continuación:

Primero mostramos las muestras tomadas a 50 X pero antes de realizar el ataque químico.

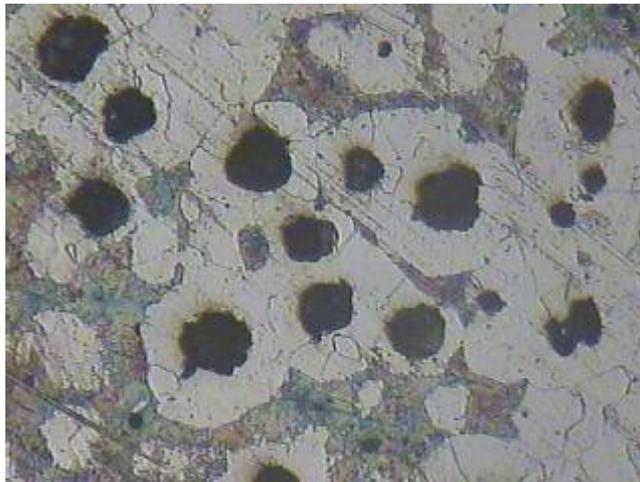


**Gráfico 4.2 Probeta toma 1 sin realizar ataque químico a 50x.**



**Gráfico 4.3 Probeta toma 2 sin realizar ataque químico a 50x.**

A continuación presentaremos fotos de probetas después de haber sido tratadas químicamente, estas son tomadas de diferentes partes de la misma probeta.



**Gráfico 4.4 Probeta toma 1 después de ataque químico a 100x.**

La siguiente foto presenta una vez corrido el programa como pone los mismos en color rojo.

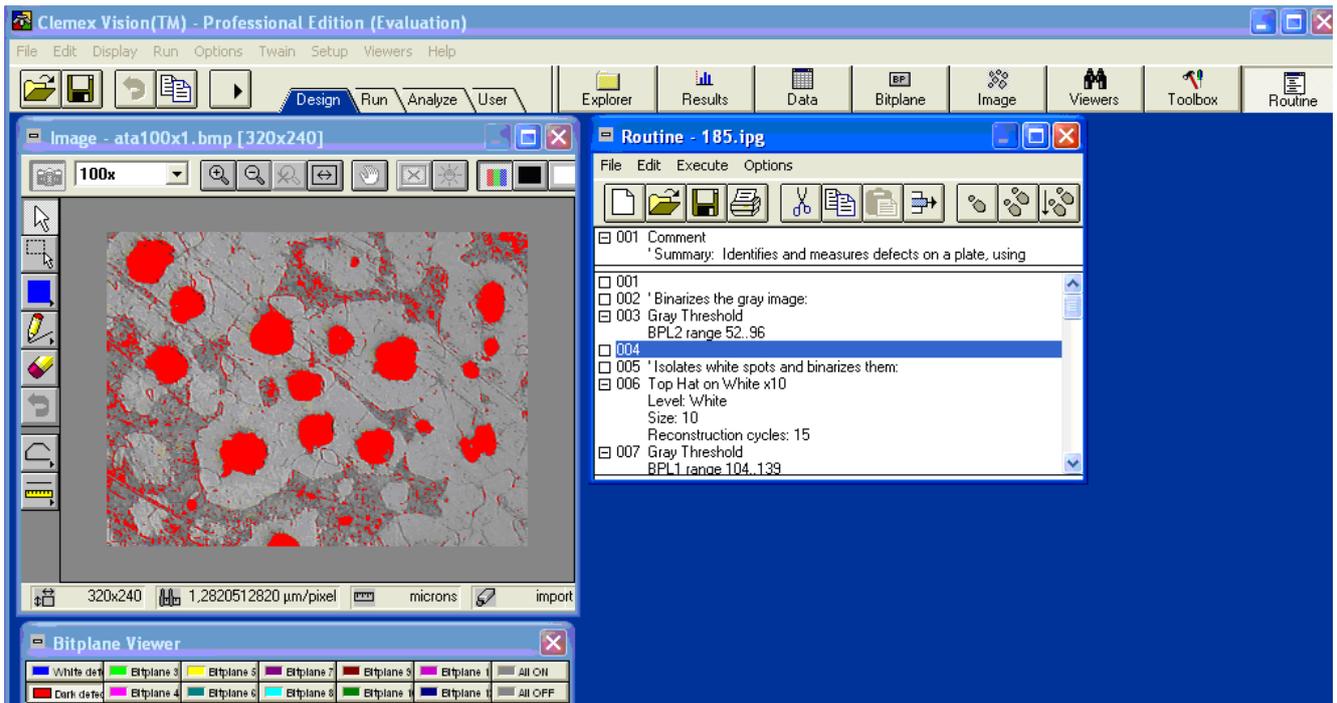


Gráfico 4.5 Probeta toma 1 mostrando nódulos.

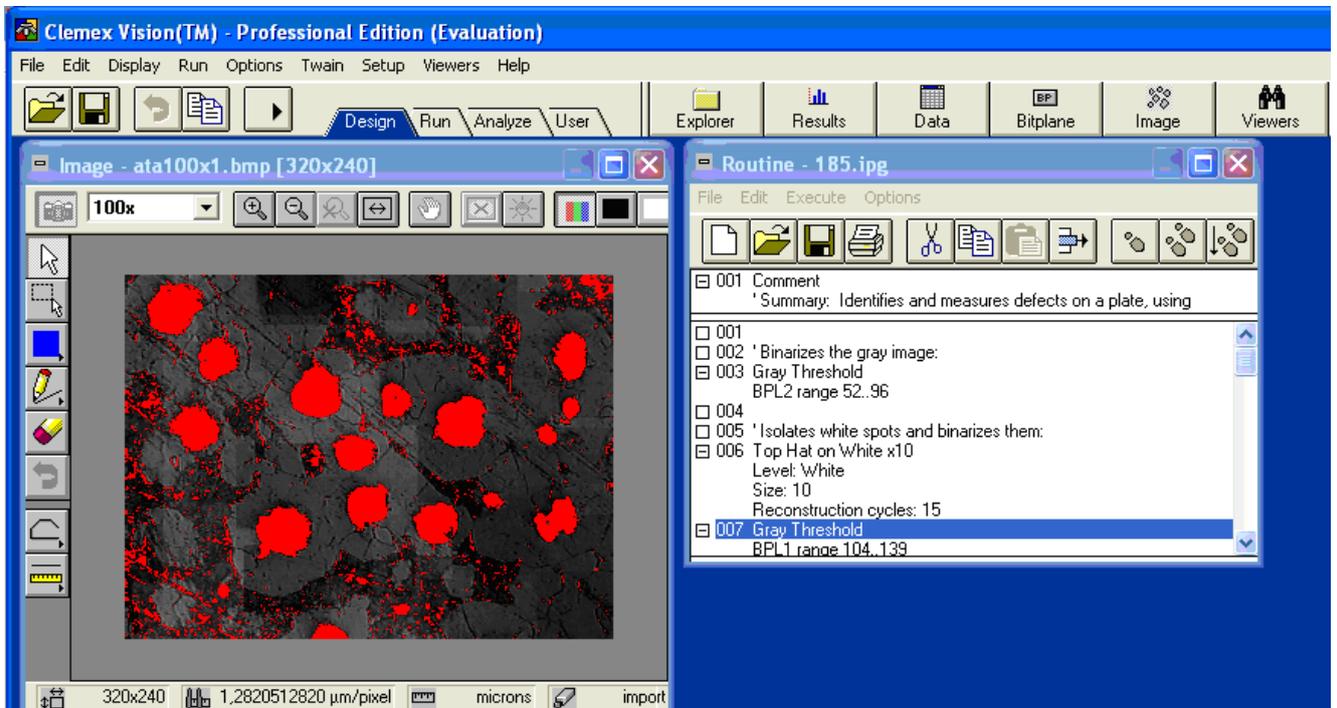


Gráfico 4.6 Probeta toma 1 mostrando nódulos y poros.

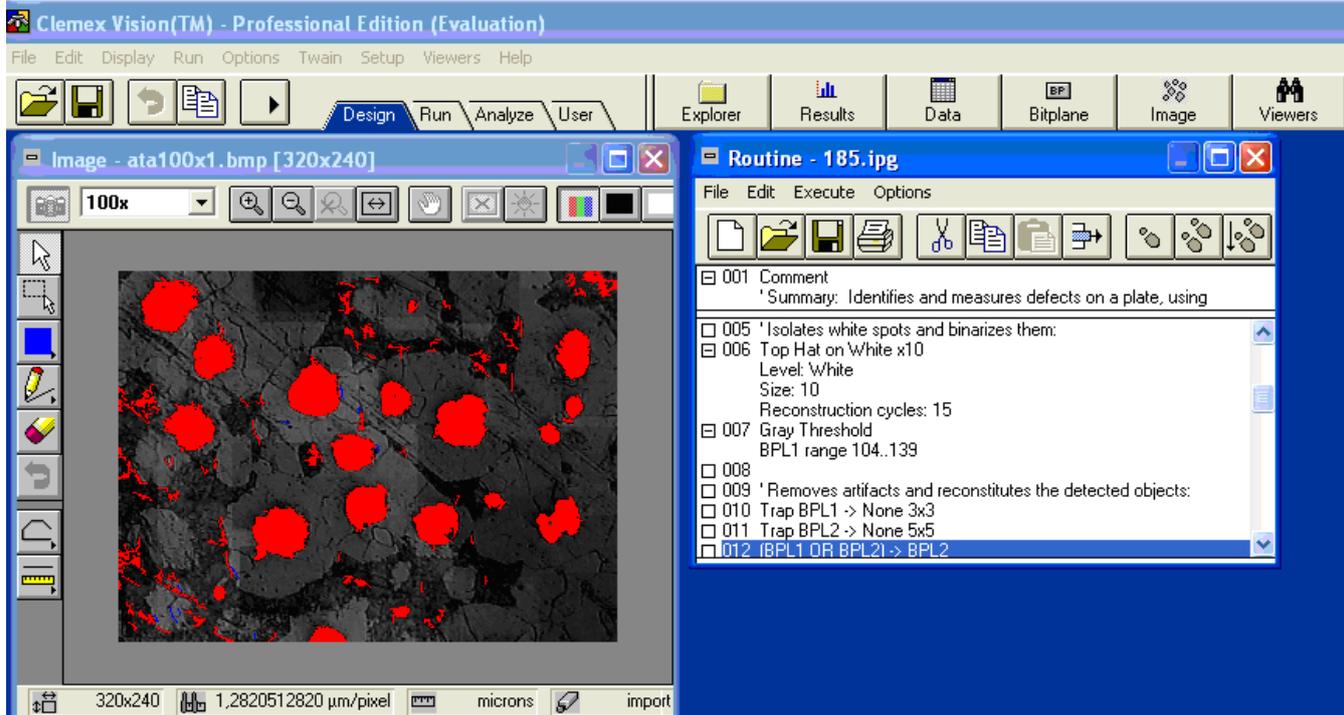


Gráfico 4.7 Probeta toma 1 paso 12.

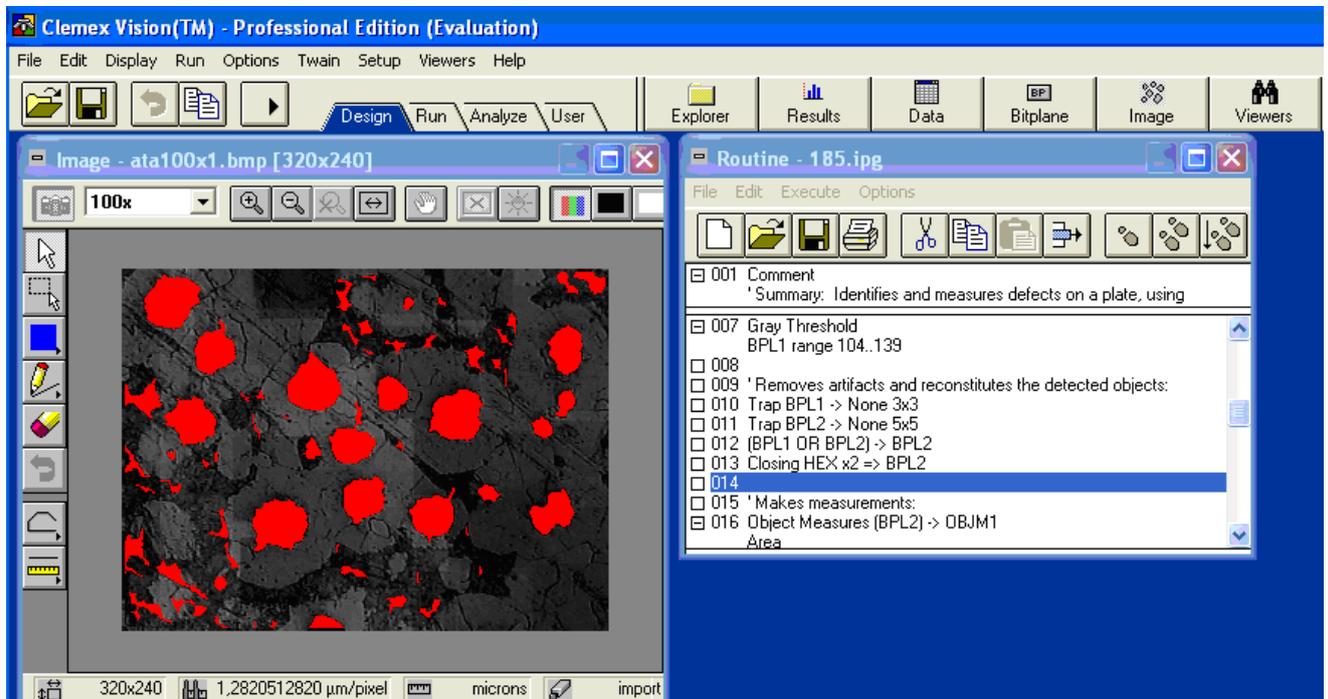


Gráfico 4.8 Probeta toma 1 paso 14.

A continuación, veremos la imagen de el área que ocupan los nódulos y los poros dentro de la misma, en donde los poros se los representa con el color rojo y los nódulos de color azul.

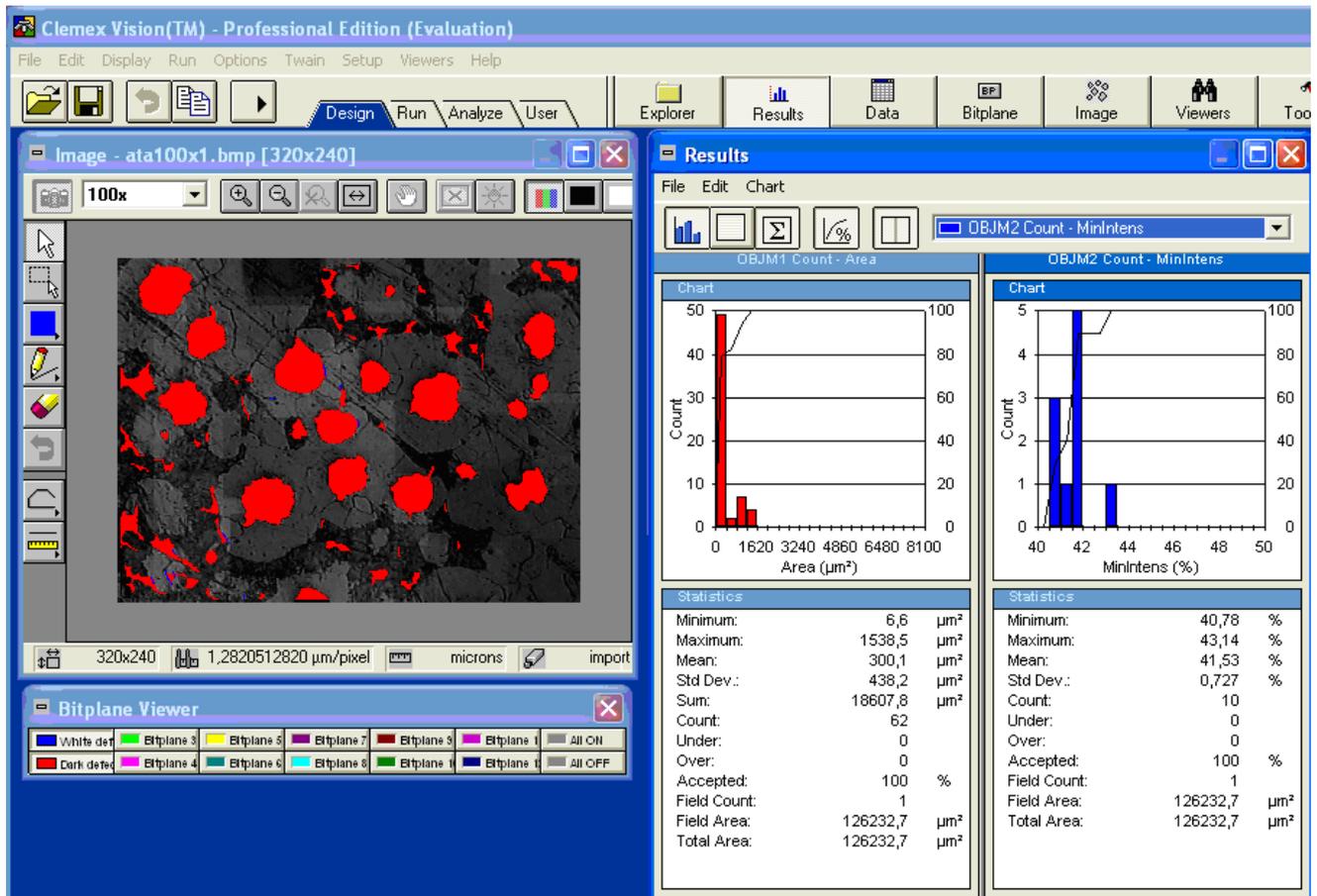


Gráfico 4.9 Probeta toma 1 área de nódulos y poros.

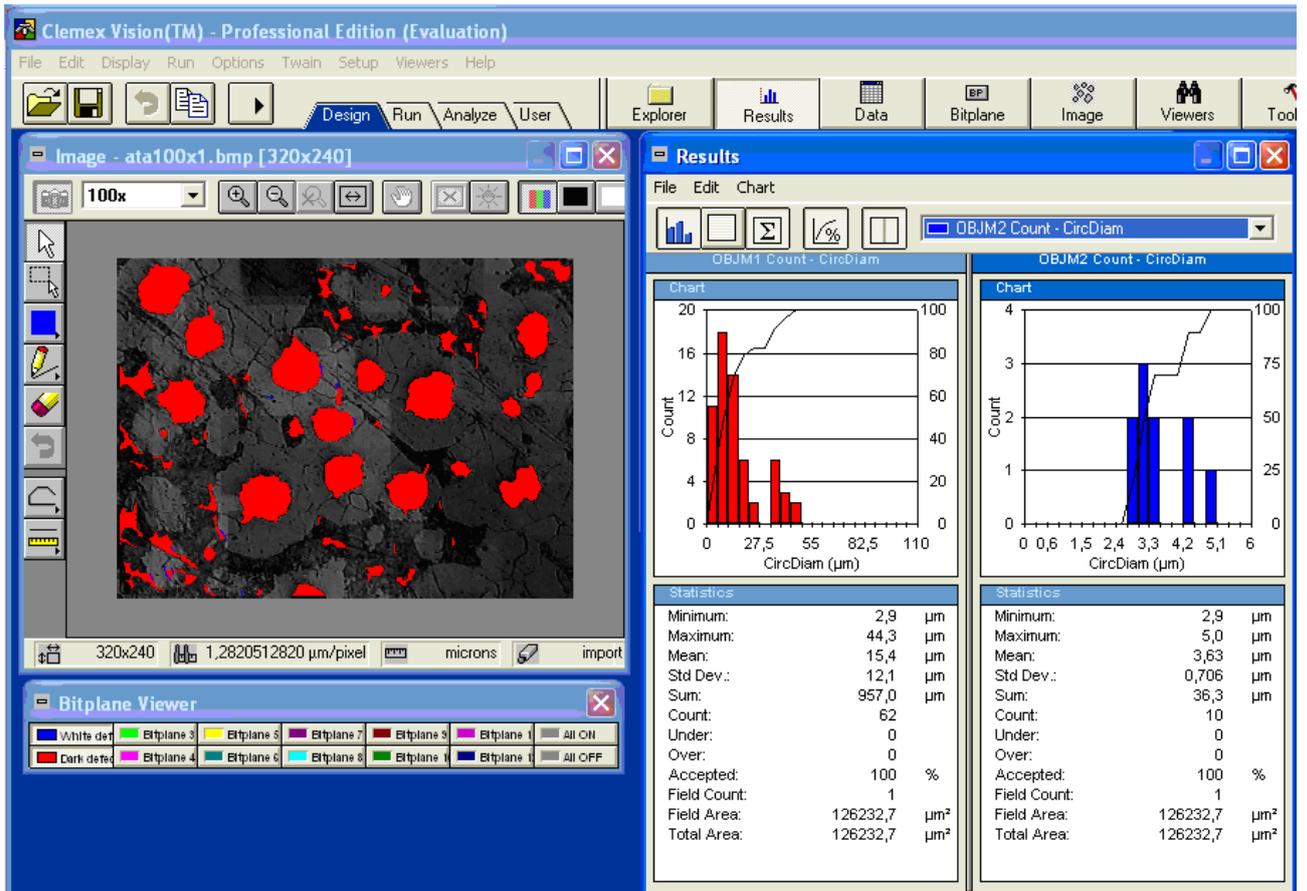
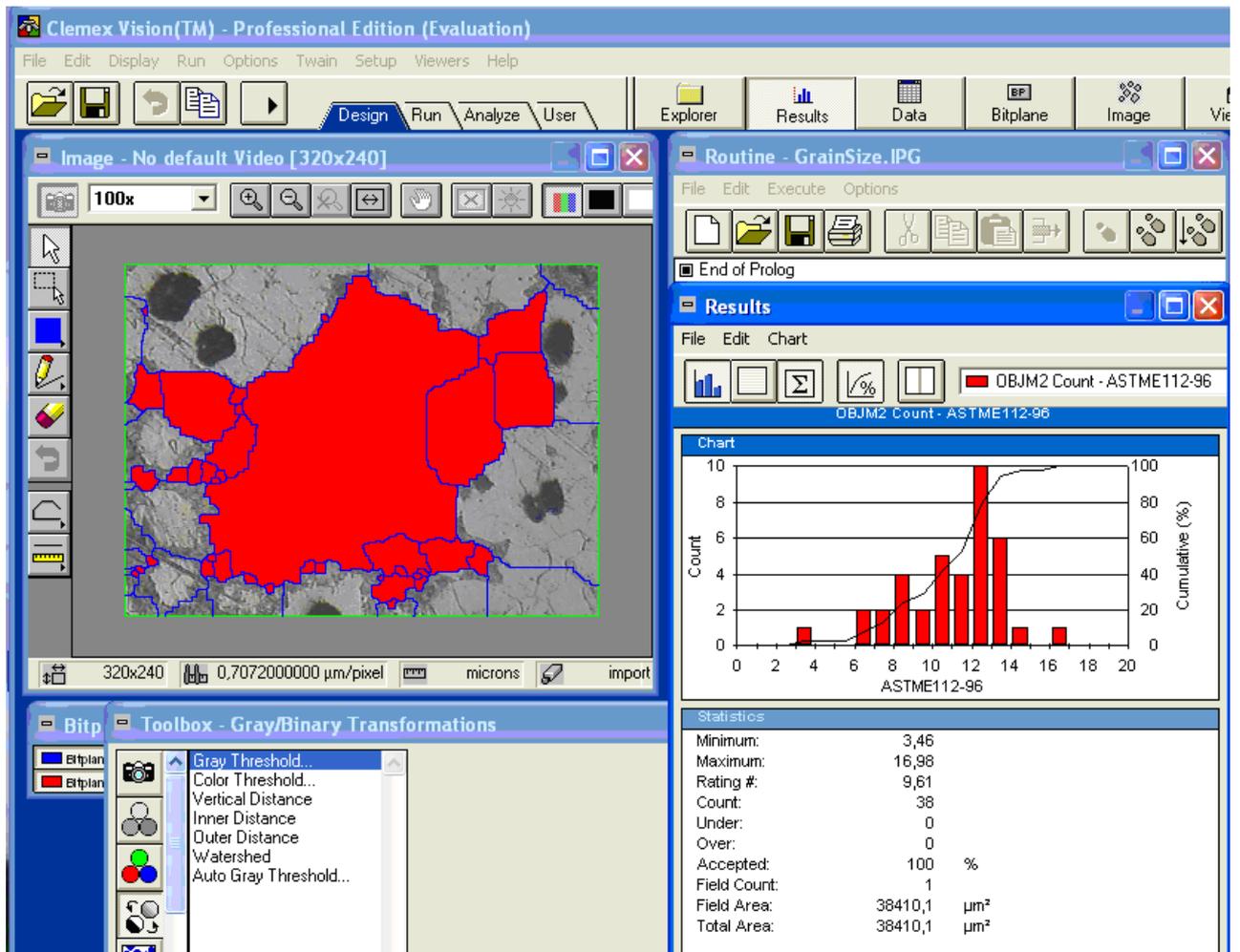
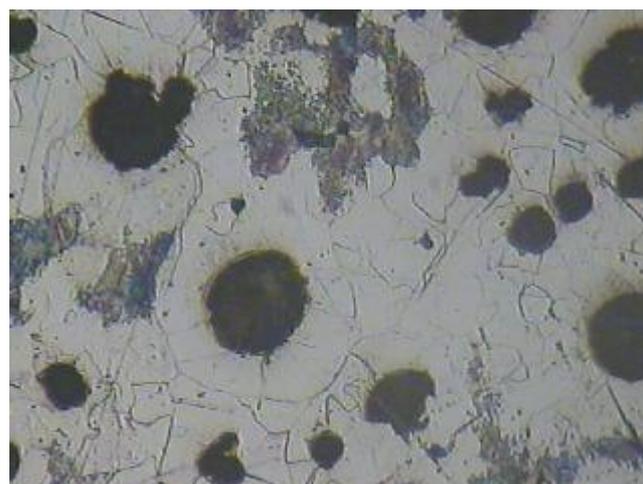


Gráfico 4.10 Probeta toma 1 esferoidización de nódulos y poros.



**Gráfico 4.11 Probeta toma 1 tamaño de grano.**



**Gráfico 4.12 Probeta toma 2 después de ataque químico a 100x.**

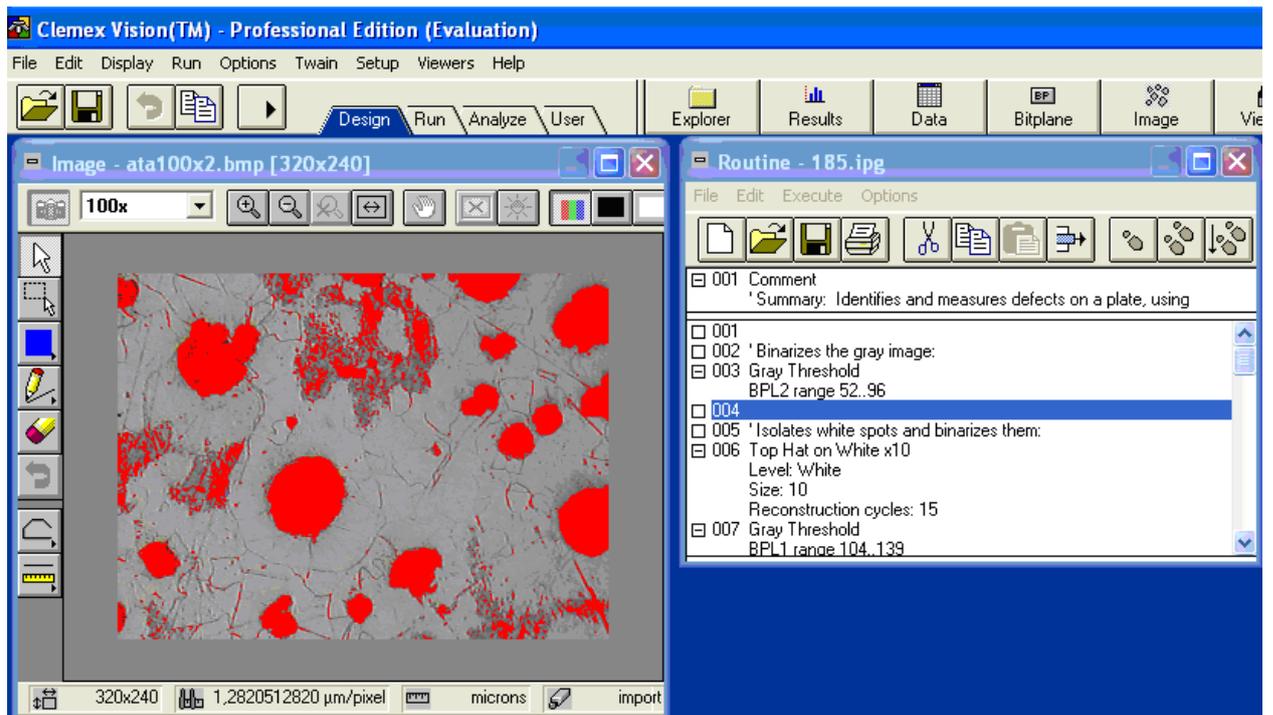


Gráfico 4.13 Probeta toma 2 mostrando nódulos.

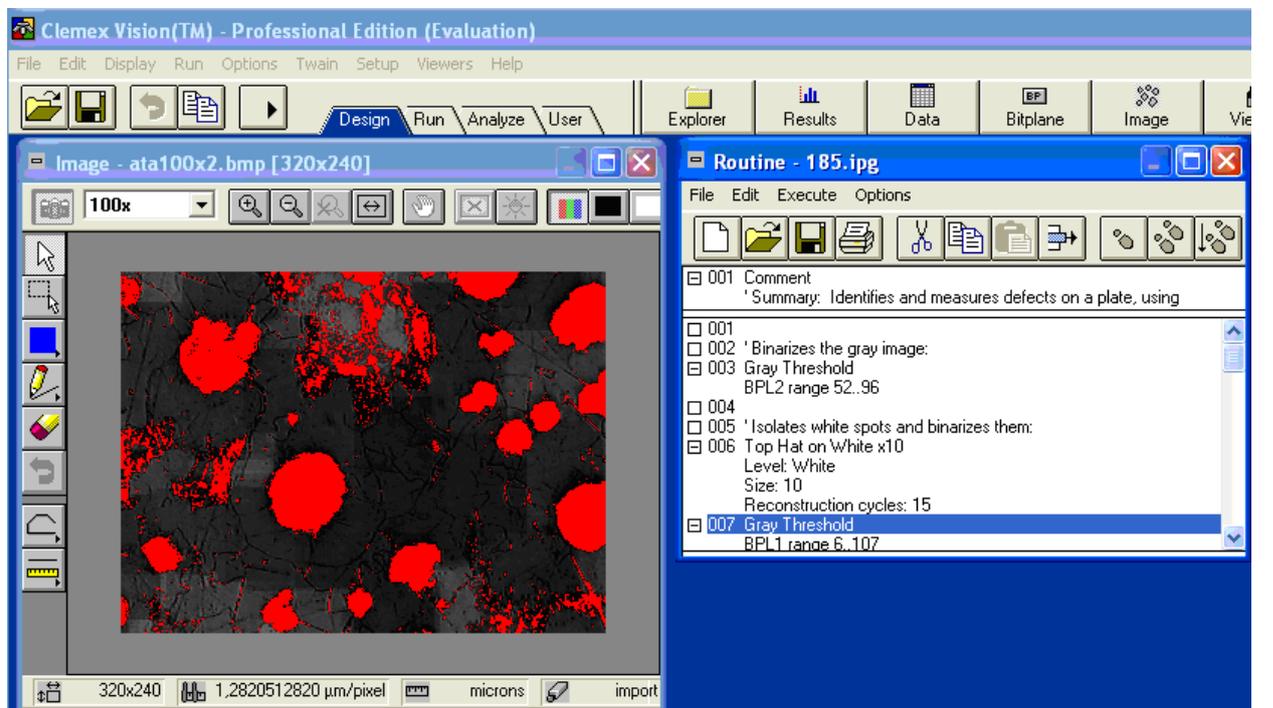


Gráfico 4.14 Probeta toma 2 paso7.

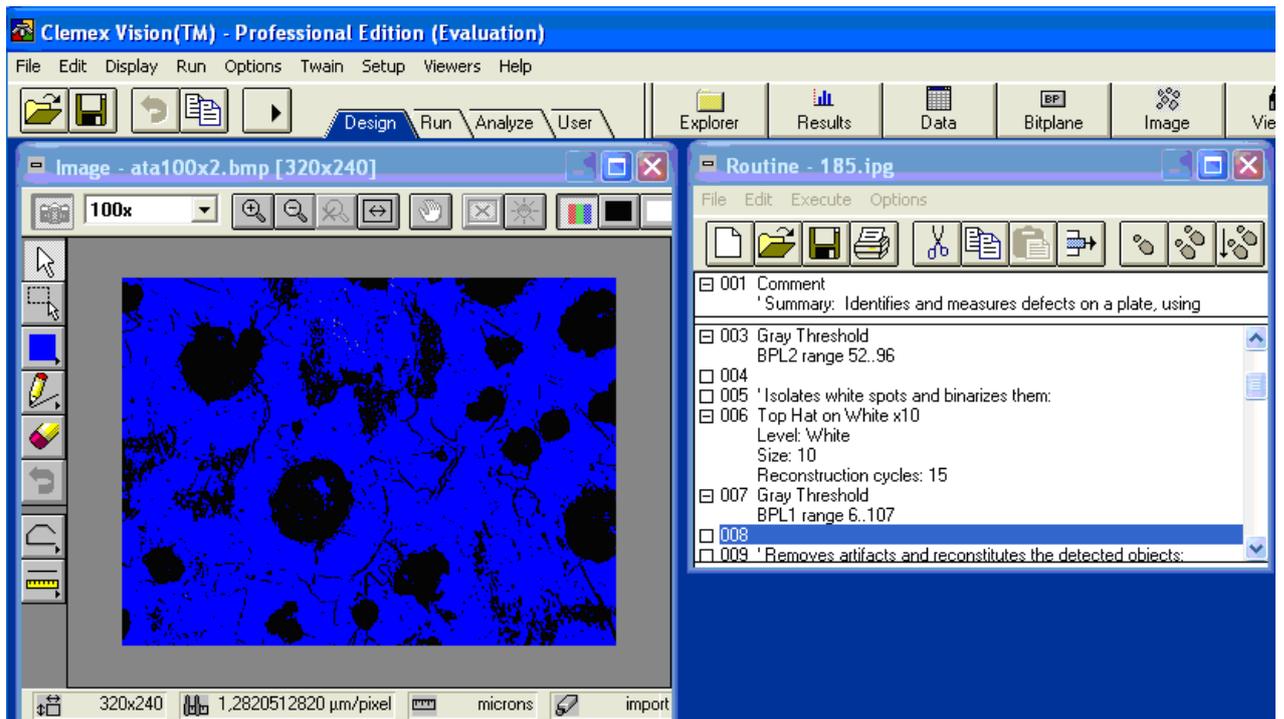


Gráfico 4.15 Probeta toma 2 paso8.

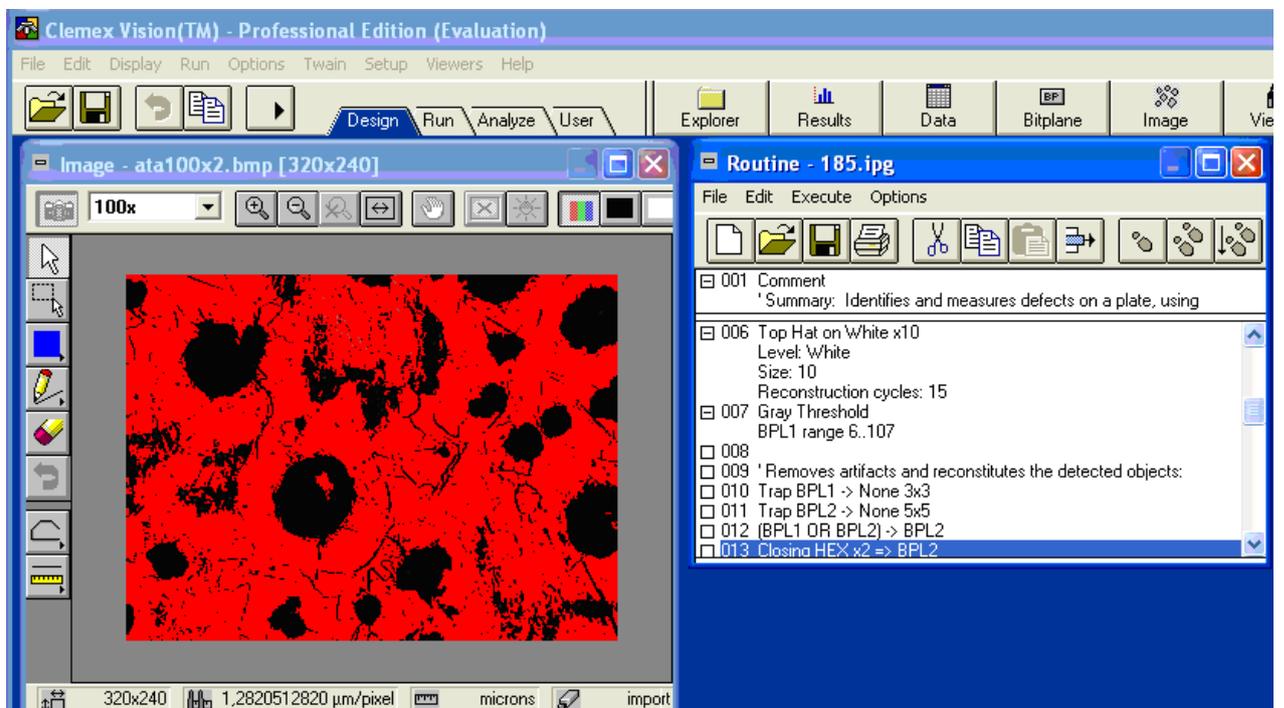


Gráfico 4.16 Probeta toma 2 paso13.

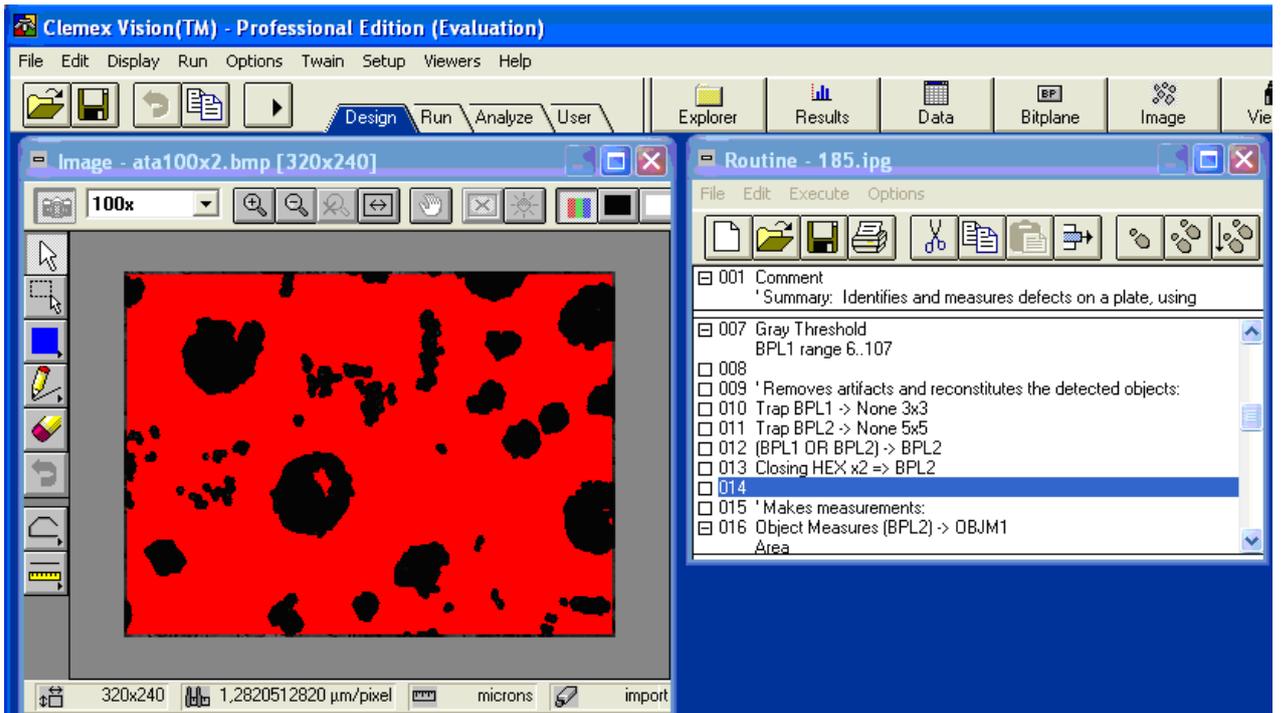


Gráfico 4.17 Probeta toma 2 paso14.

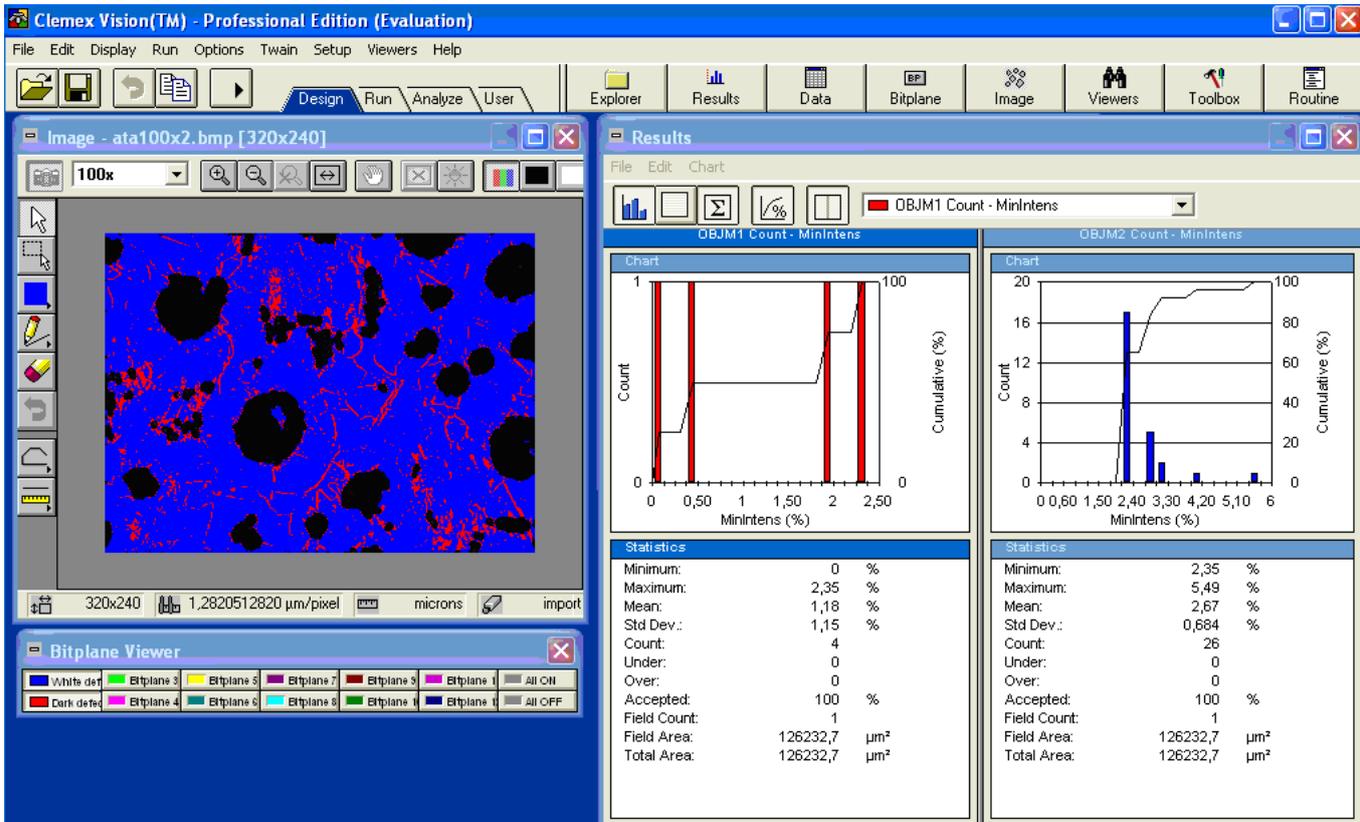
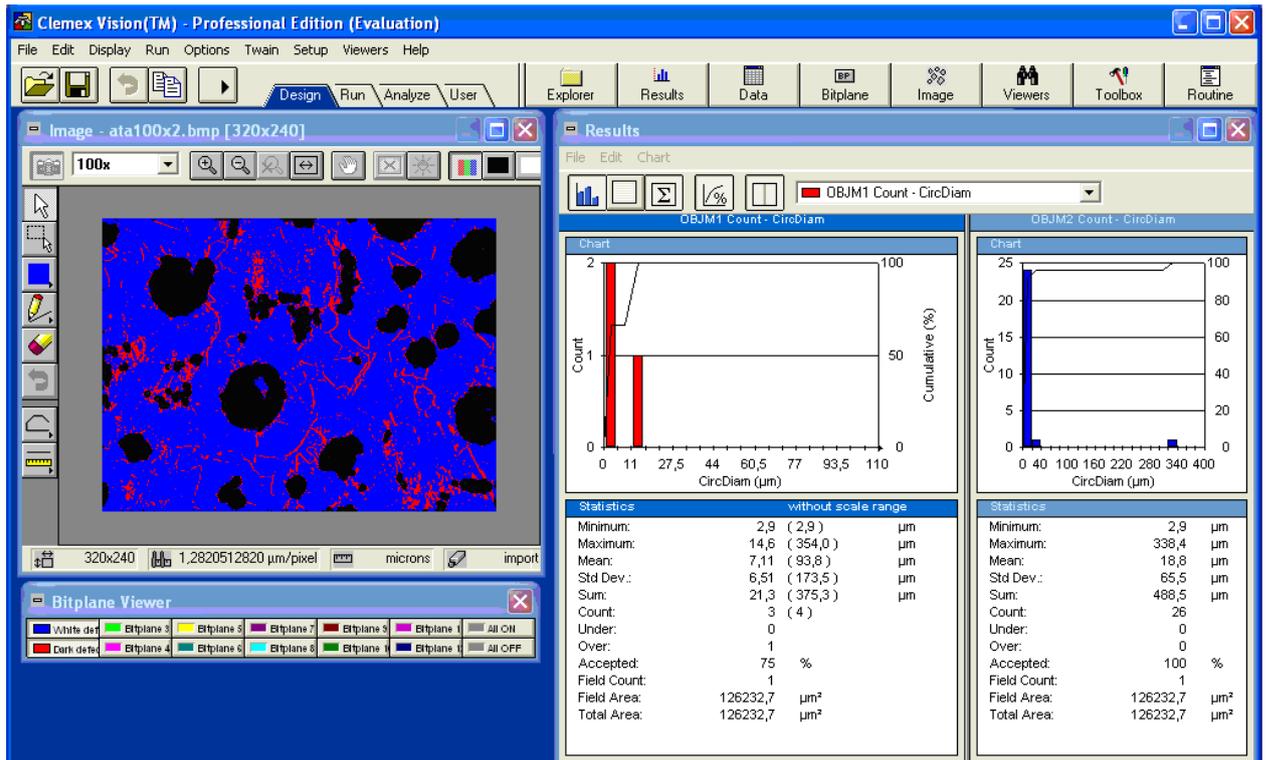
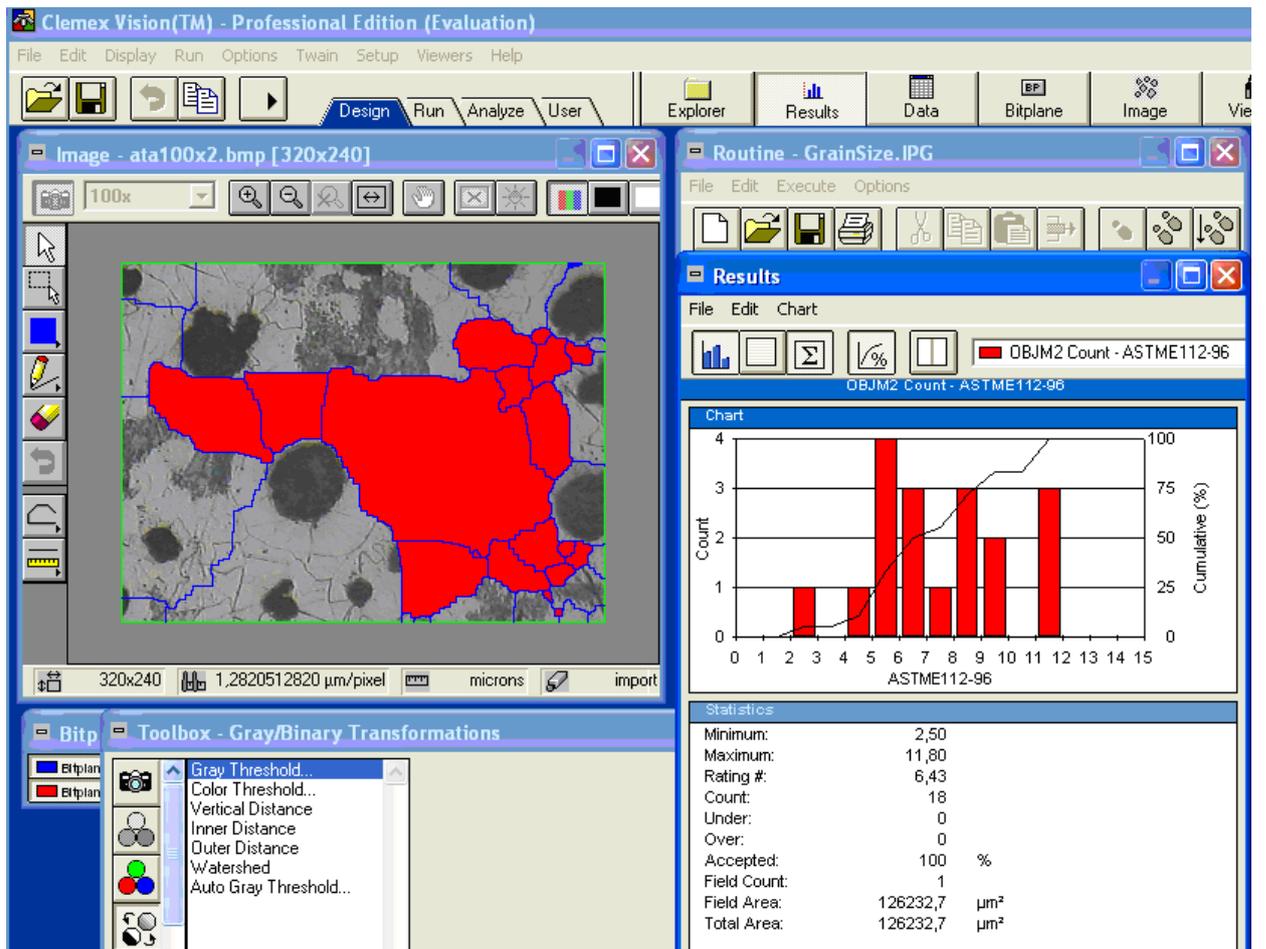


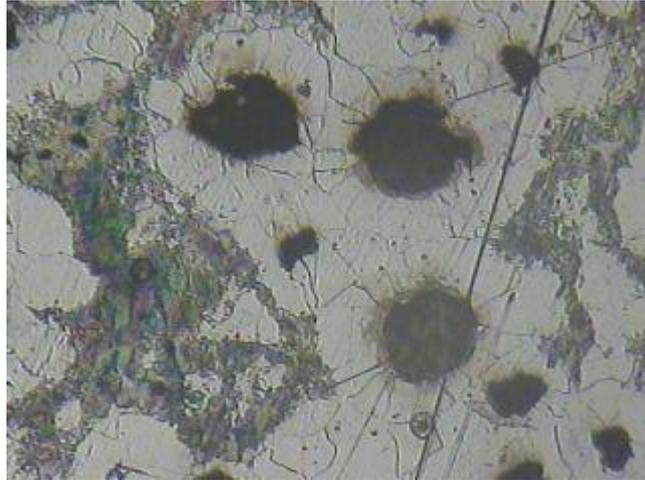
Gráfico 4.18 Probeta toma 2 área de nódulos y poros.



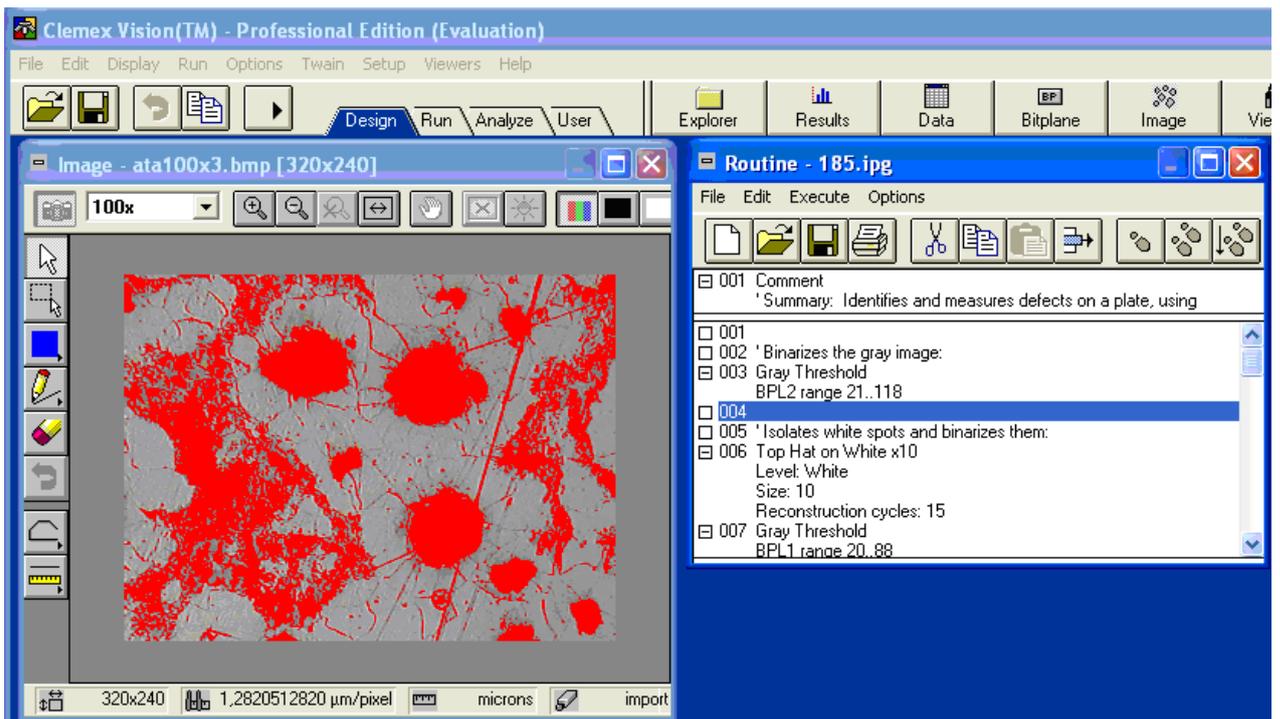
**Gráfico 4.19** Probeta toma 2 esferoidización de nódulos y poros.



**Gráfico 4.20** Probeta toma 2 tamaño de grano.



**Gráfico 4.21** Probeta toma 3 después de ataque químico a 100x.



**Gráfico 4.22** Probeta toma 3 mostrando nódulos.

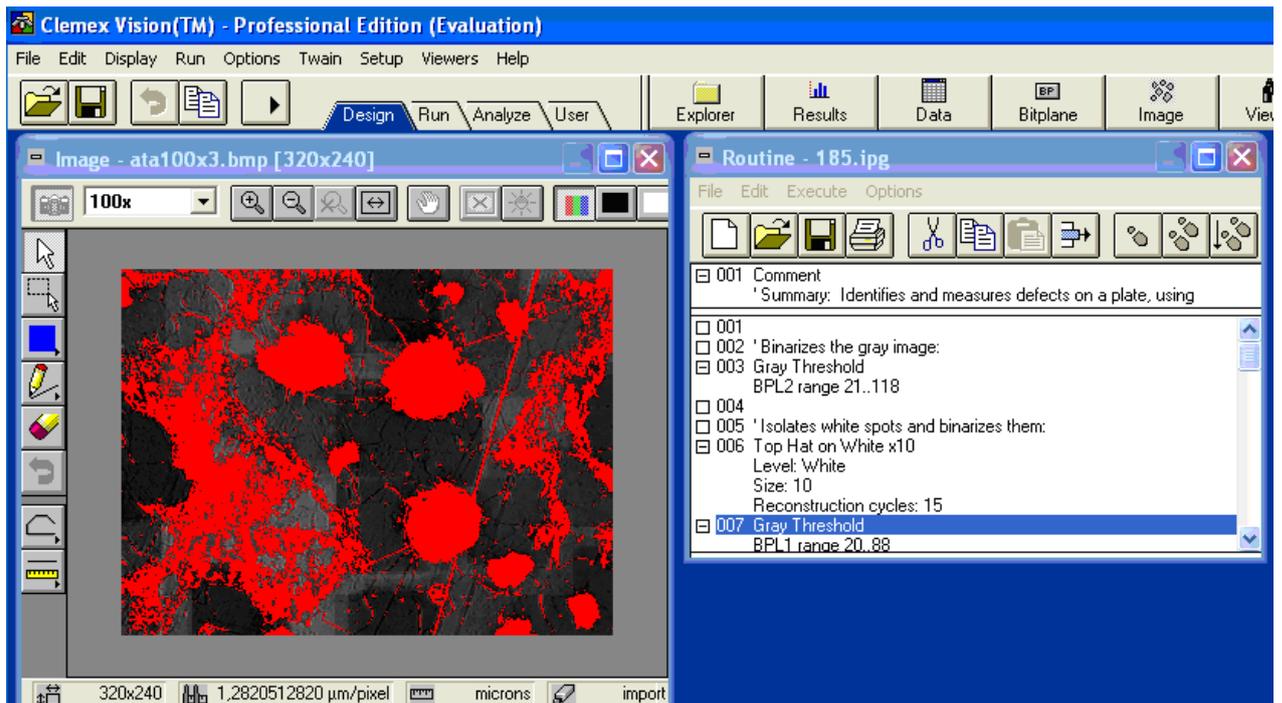


Gráfico 4.23 Probeta toma 3 paso 7.

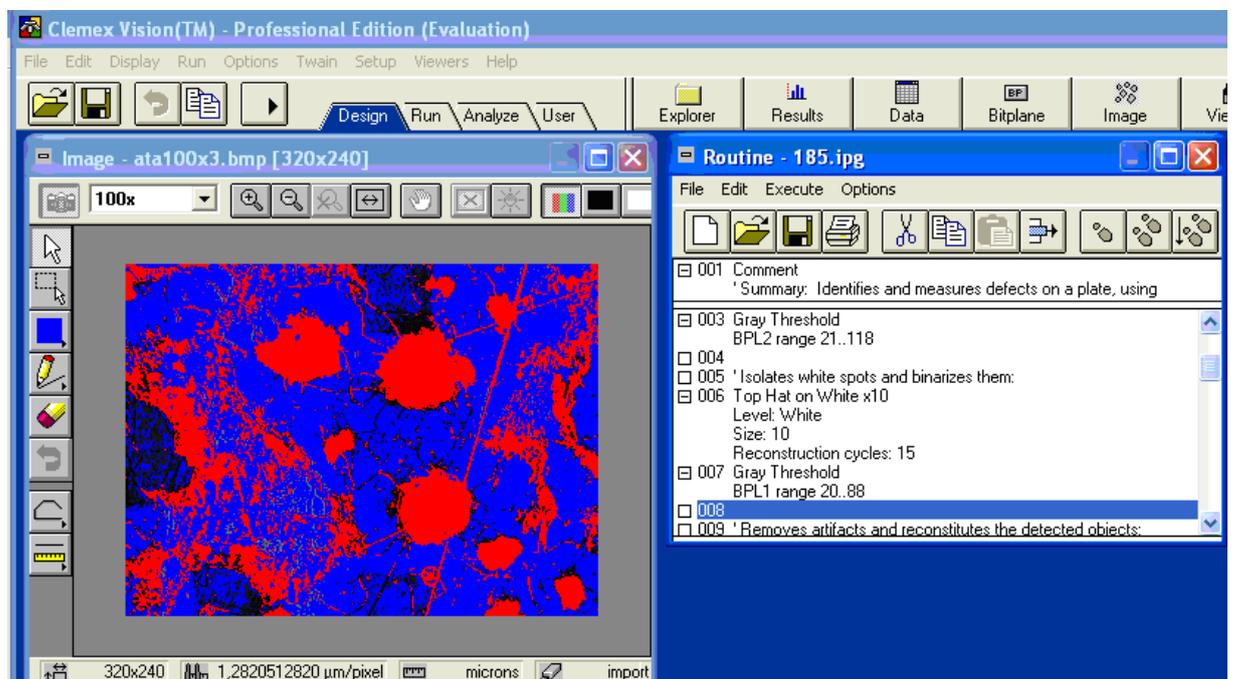


Gráfico 4.24 Probeta toma 3 paso 8.

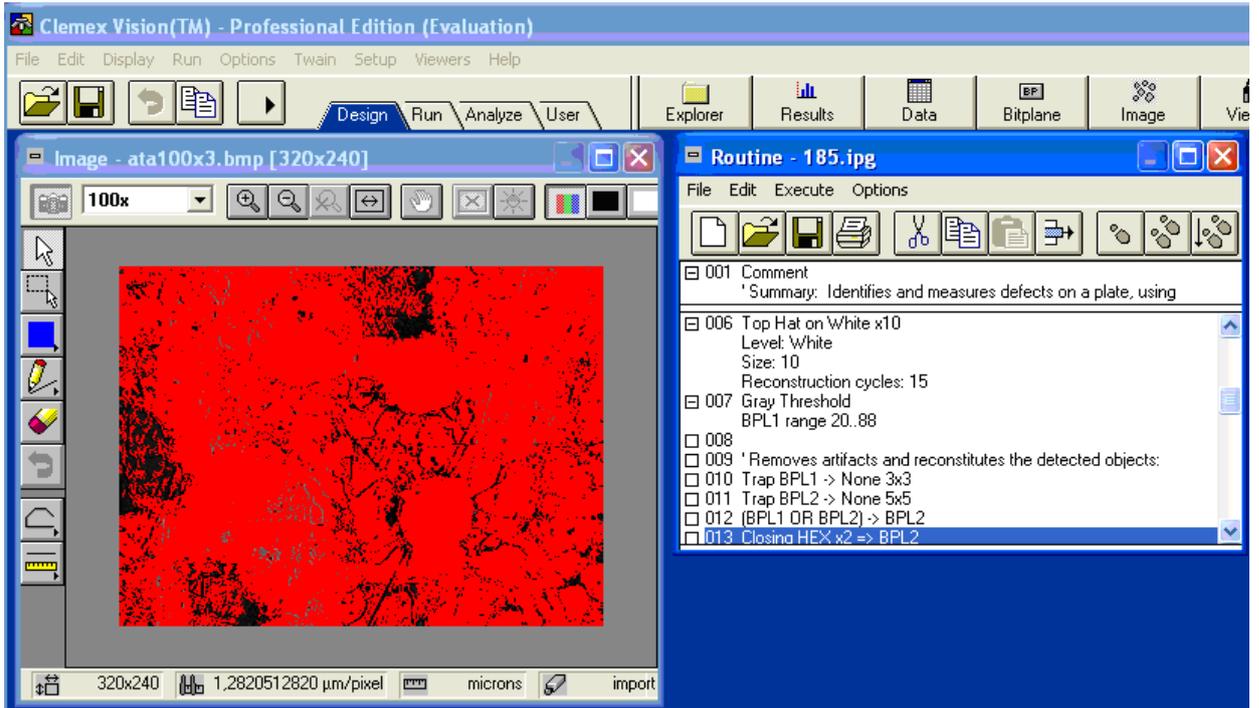


Gráfico 4.25 Probeta toma 3 paso 13.

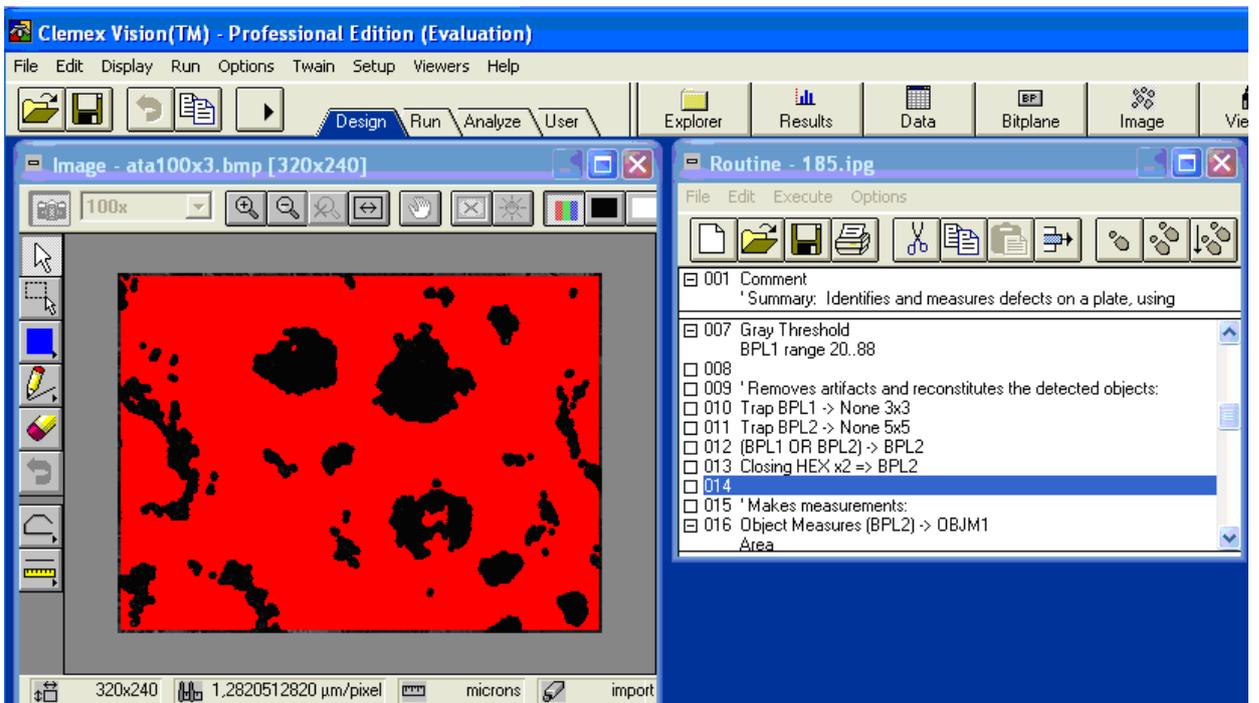


Gráfico 4.26 Probeta toma 3 paso 14.

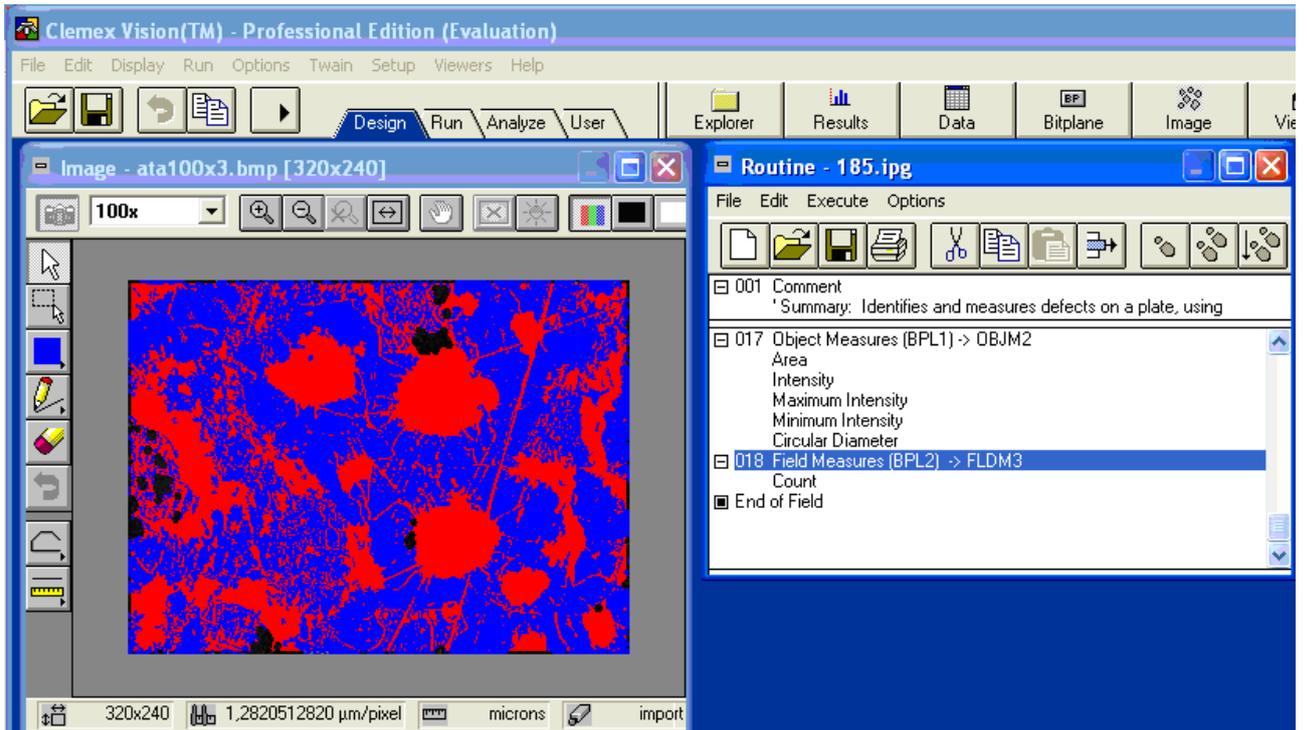


Gráfico 4.27 Probeta toma 3 paso 18.

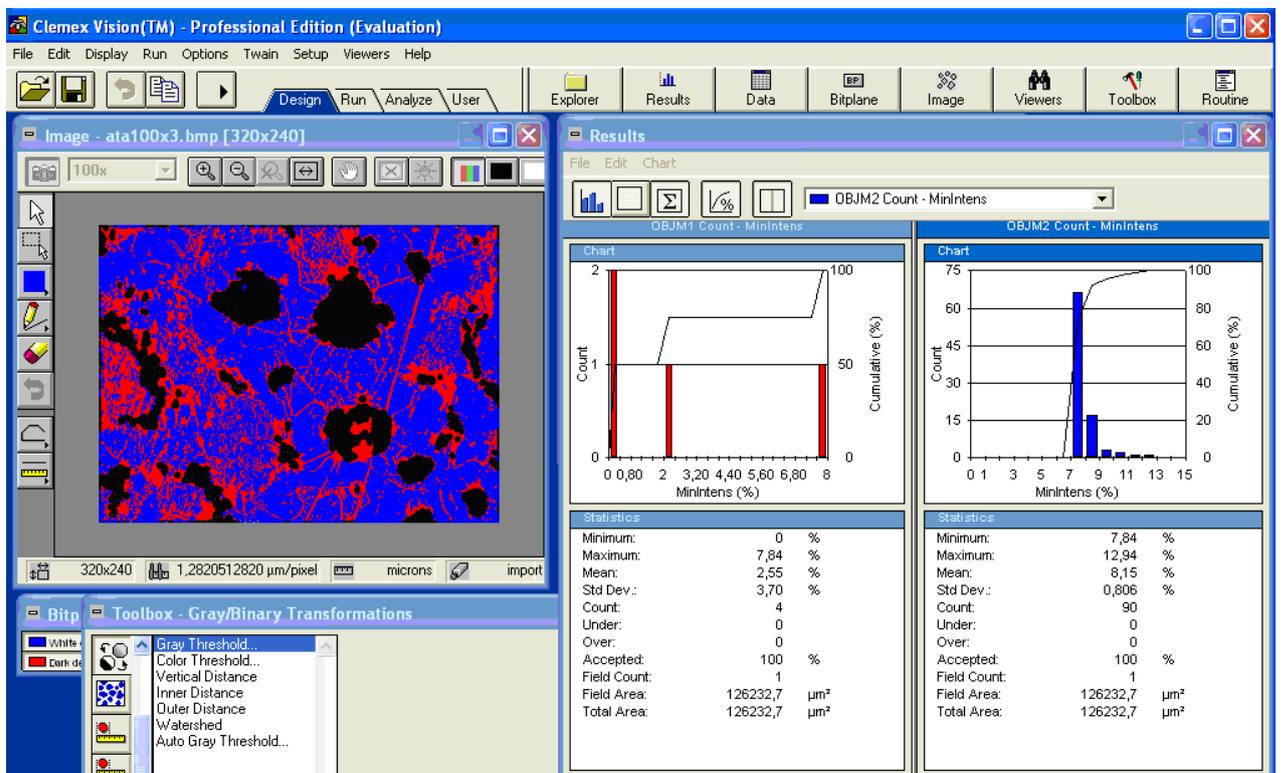
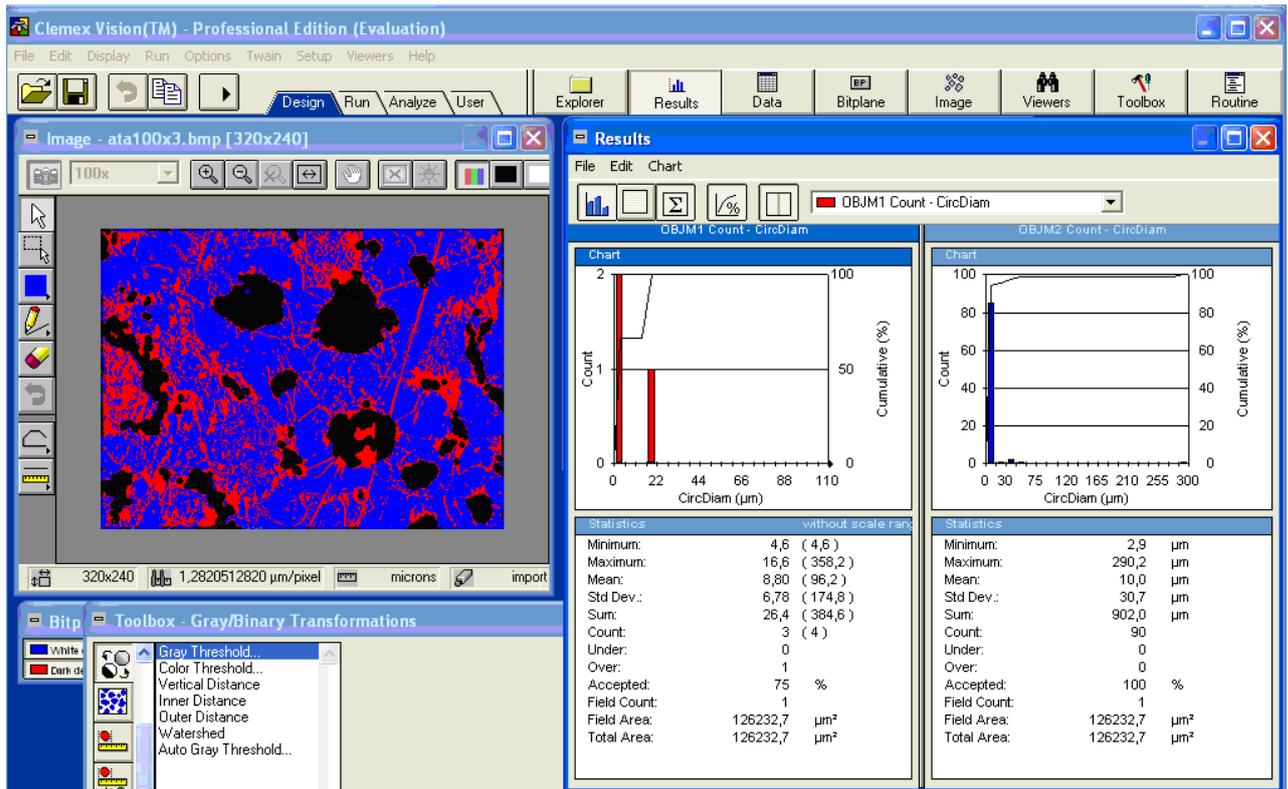
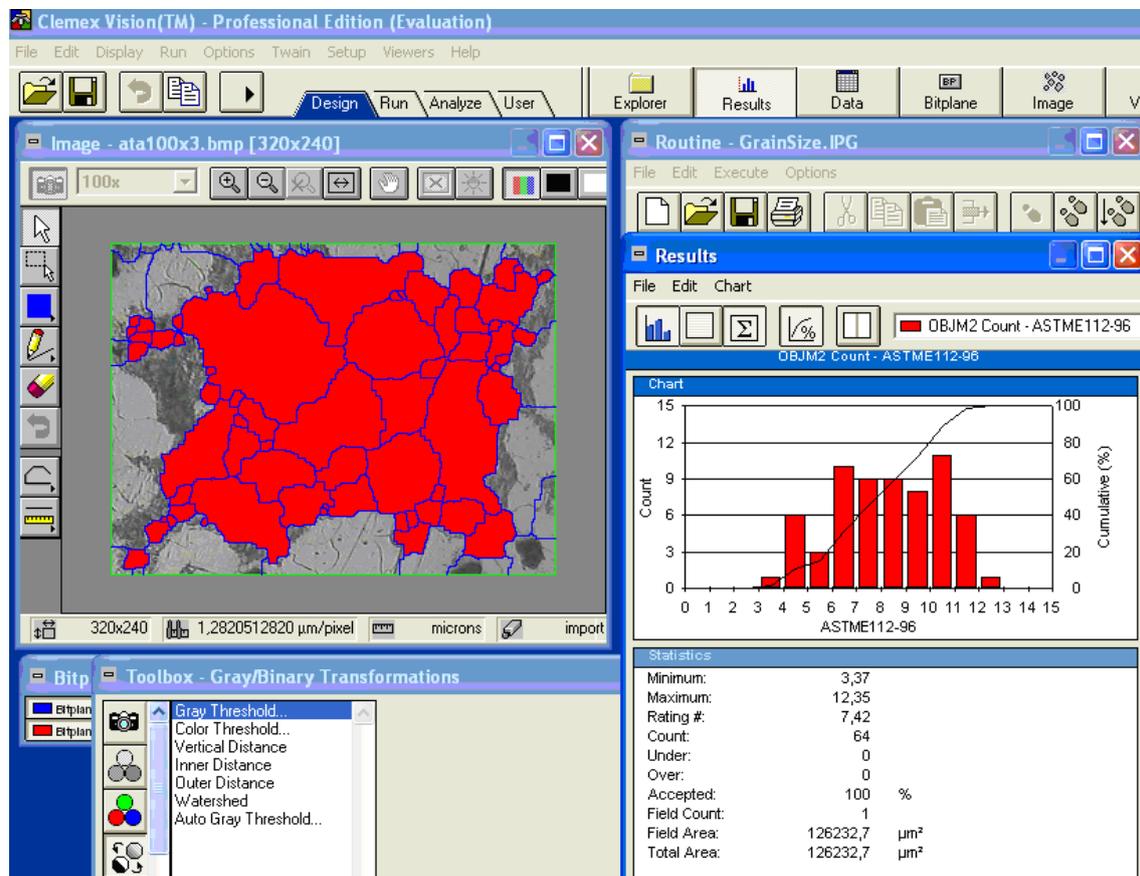


Gráfico 4.28 Probeta toma 3 área de nódulos y poros.



**Gráfico 4.29** Probeta toma 3 esferoidización de nódulos y poros.



**Gráfico 4.30** Probeta toma 3 tamaño de grano.

### 4.2.3 MACROGRAFÍA

La macrografía se realizó tomando fotos de las probetas que habían sido utilizadas para los ensayos mecánicos en donde el aspecto de las superficies de fractura varía de acuerdo con las Etapas del crecimiento de grietas; en la etapa I no se presentan rasgos macroscópicos sobresalientes, en esta zona las superficies son lisas, planas, brillantes y con muy pocas rayas; pudiendo notarse pequeños escalones en la zona de iniciación debido a la nucleación de varias microgrietas simultáneamente y usualmente el límite de la zona de iniciación está bien definido por una línea de frente de propagación.

En la etapa II, en la mayoría de los casos, se presentan rayas como patrones de río o marcas de playa, los cuales indican las progresiones de las deformaciones plásticas del material por efecto del proceso de fatiga.

Finalmente, en la etapa III, el aspecto de la superficie es el que presenta típicamente una fractura frágil, es decir, son superficies que presentan ausencia de deformaciones y con brillo.

Las grietas por fatiga inician por lo general en la superficie del componente y están asociadas a concentradores de esfuerzos (térmicos, mecánicos, inclusiones, etc.). Estos hacen que macroscópicamente sea relativamente sencillo identificar la zona de inicio, pues ésta se localizará conectada a una superficie libre y donde se encuentre un concentrador de esfuerzos. Sin embargo, en piezas con severos defectos internos (como piezas de fundición con rechupes) y en materiales con partículas de formas agudas, las grietas por fatiga pueden nuclear en el interior; en este caso, las mismas características macroscópicas serán observadas alrededor del defecto iniciador, estos pueden ser: escalones, patrones de río, con superficies lisas y brillantes, como se observa en la figuras.

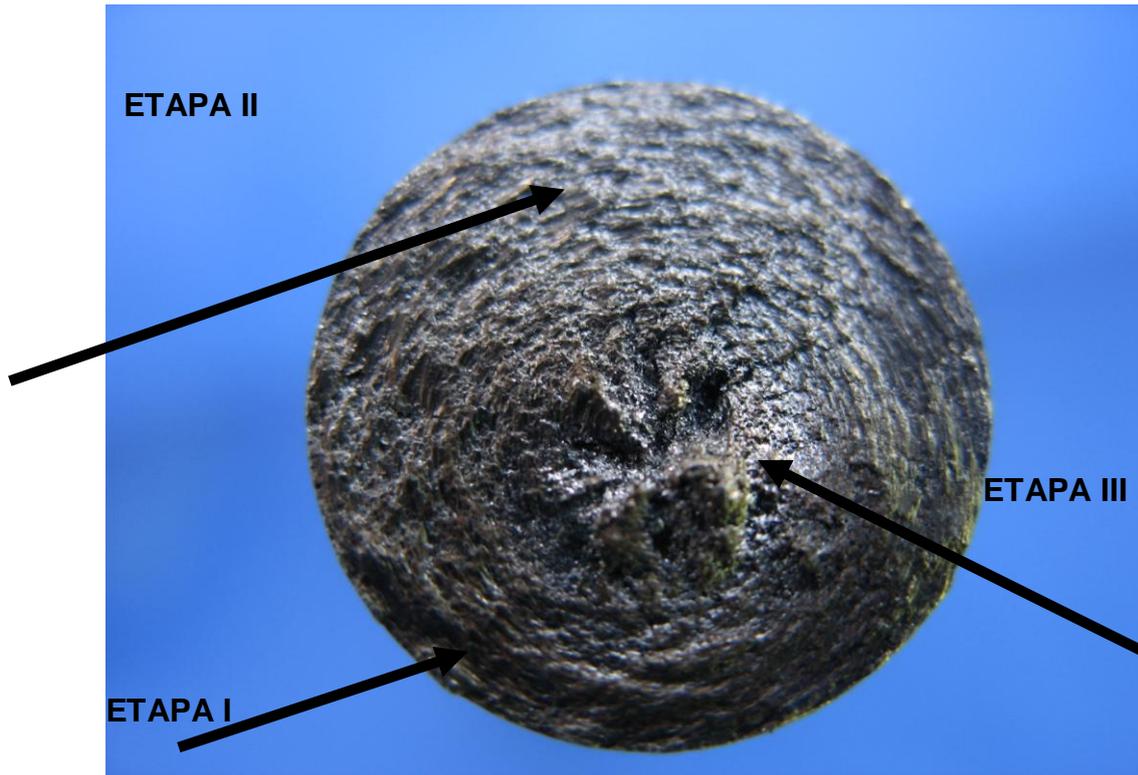


Gráfico 4.31 Superficie de Fractura

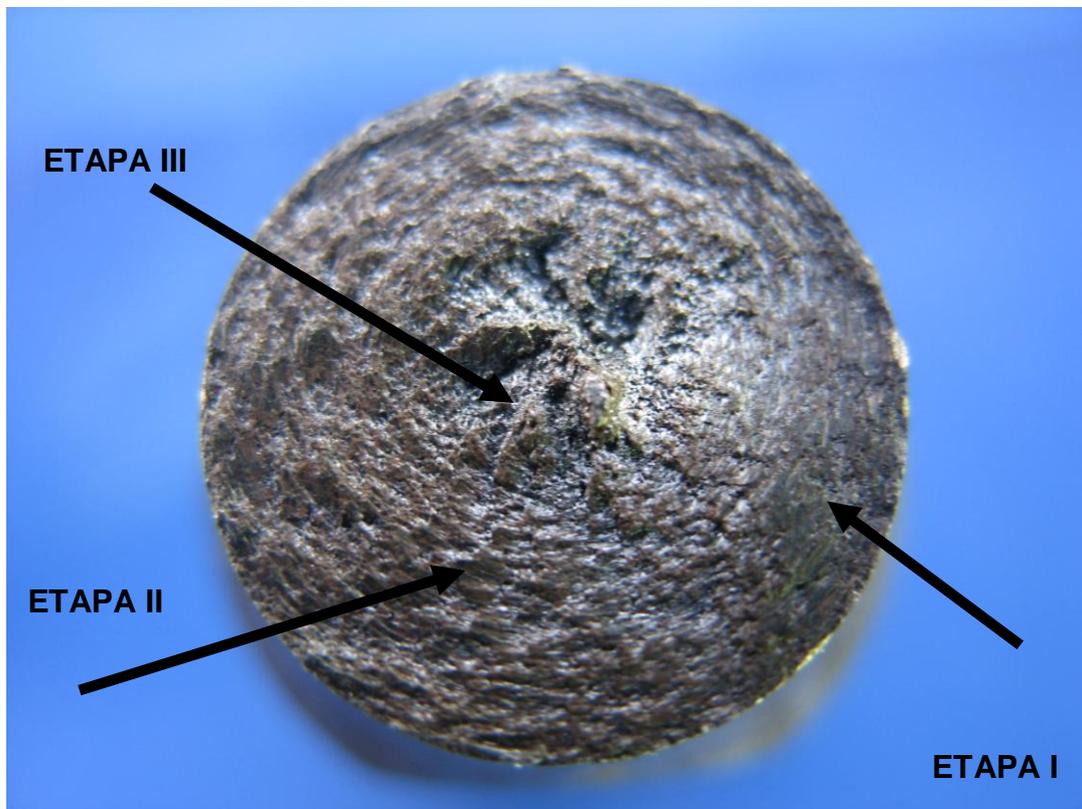


Gráfico 4.32 Superficie de Fractura

## 4.3 ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS

### 4.3.1 ENSAYOS ESTATICOS

#### 4.3.1.1 Tracción

El ensayo de tracción consiste en aplicar una fuerza de tensión en una superficie perpendicular a esta , es decir que la fuerza está en la misma línea del eje de la sección, y mediante una curva en función de la elongación del material y la fuerza aplicada se puede definir puntos importantes como Esfuerzo de tracción el cual se encuentra en el limite de proporcionalidad de la curva y dentro de la zona elástica del material y el Esfuerzo Ultimo o de rotura el cual en materiales frágiles es casi el mismo que el de Tracción.



**Figura 4.33 Esquema de ensayo a tracción**

El Esfuerzo de Tracción se define como:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

**Ecuación 4.1**

El área de la sección :

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

**Ecuación 4.2**

Y la Fuerza  $F$  es función de la Gravedad  $g$  ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) y la carga  $Q$  (kg ) aplicada en el ensayo.

$$F = Q * g$$

#### **Ecuación 4.3**

La maquina de ensayos universales AMSLER RM 29 ubicada en le laboratorio de resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPE, fue utilizada después de la respectiva verificación para le Ensayo de Tracción de Hierro Dúctil o nodular.

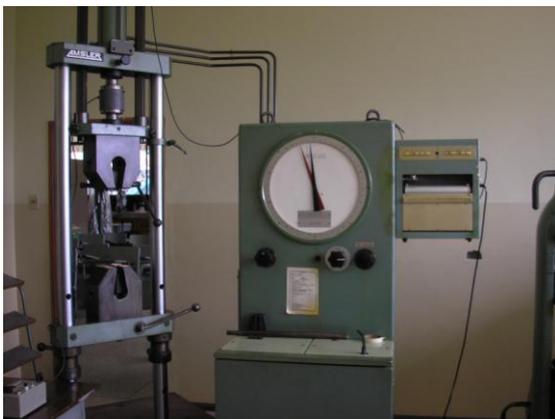
La cuál posee las mordazas de sujeción de tipo cuña para conseguir un ajuste adecuado en las probetas cuando se ejerce la fuerza de tracción sobre esta, un graficador , y un indicador de la fuerza aplicada.

Se uso la escala de 10000 Kg :

Eje X elongación 1mm

Eje y Fuerza 1mm @ 50 Kg.

La fuerza se aplica en forma progresiva, no bruscamente, y el ensayo debe durar mas de 15 segundos, esta referencia de tiempo es tomada de la Norma ASTM A48 (ART 9.2)para ensayos en fundición de hierro.



**Imagen 4.34** Maquina de Ensayos Universales AMSLER RM 29



**Imagen 4.35** Probetas para Ensayos de Tracción

**Dimensiones de la Probeta según ASTM A536-70 :**

D: 13mm

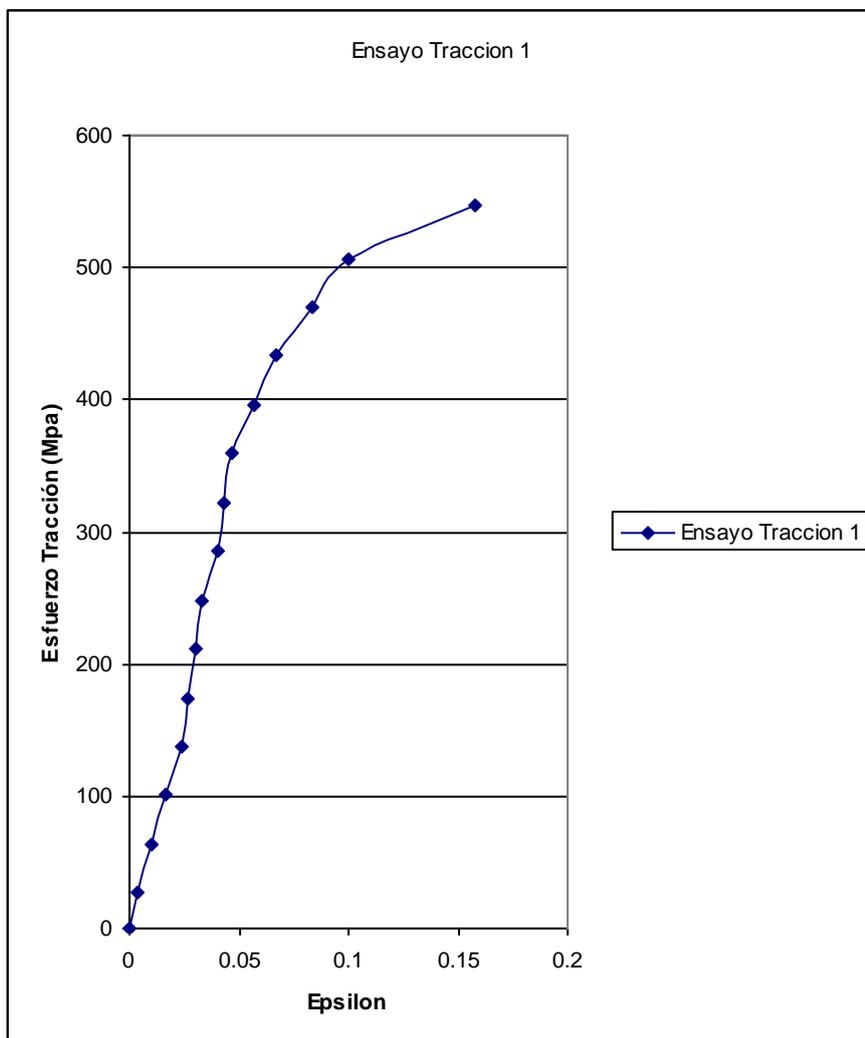
L calibrada: 50.8 +/- 0.13.

**Tabla 4.4 Ensayo de Tracción 1**

Ensayo 1	
D Inicial (mm)	13
D Final (mm)	12.26
L inicial(mm)	50.8
L Final (mm)	58.8
Def %	15.75
Area(mm <sup>2</sup> )	132.73
Cabezal (kg)	140
g (m/s <sup>2</sup> )	9.81
1 psi	0.00689476 Mpa

Carga	Fuerza	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformacion	Epsilon
Kg	N	Mpa	Psi	mm	
0	0	0	0	0	0
500	3531.6	26.61	3859.01	0.17	0.003
1000	8436.6	63.56	9218.74	0.51	0.010
1500	13341.6	100.52	14578.48	0.85	0.017
2000	18246.6	137.47	19938.21	1.19	0.023
2500	23151.6	174.42	25297.95	1.36	0.027
3000	28056.6	211.38	30657.68	1.53	0.030
3500	32961.6	248.33	36017.42	1.7	0.033
4000	37866.6	285.29	41377.15	2.04	0.040
4500	42771.6	322.24	46736.88	2.21	0.044
5000	47676.6	359.19	52096.62	2.38	0.047
5500	52581.6	396.15	57456.35	2.89	0.057
6000	57486.6	433.10	62816.09	3.4	0.067
6500	62391.6	470.06	68175.82	4.25	0.084
7000	67296.6	507.01	73535.56	5.1	0.100
7550	72692.1	547.66	79431.26	8	0.157

Fuente: Personal



**Gráfico 4.36 Ensayo tracción 1**

**Tabla 4.5 Ensayo de Tracción 2**

Ensayo 2	
D Inicial (mm)	13.02
D Final (mm)	12.28
L inicial(mm)	50.8
L Final (mm)	58.78
Def %	15.71
Area(mm <sup>2</sup> )	133.14
Cabezal (kg)	140
g (m/s <sup>2</sup> )	9.81
1 psi	0.00689476 Mpa

<b>Carga</b>	<b>Fuerza</b>	<b>Esfuerzo</b>	<b>Esfuerzo</b>	<b>Deformacion</b>	<b>Epsilon</b>
<b>Kg</b>	<b>N</b>	<b>Mpa</b>	<b>Psi</b>	<b>mm</b>	
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
500	3531.6	26.53	3847.16	0.17	0.003
1000	8436.6	63.37	9190.44	0.51	0.010
1500	13341.6	100.21	14533.72	0.85	0.017
2000	18246.6	137.05	19877.01	1.19	0.023
2500	23151.6	173.89	25220.29	1.36	0.027
3000	28056.6	210.73	30563.57	1.53	0.030
3500	32961.6	247.57	35906.85	1.7	0.033
4000	37866.6	284.41	41250.13	2.04	0.040
4500	42771.6	321.25	46593.41	2.21	0.044
5000	47676.6	358.09	51936.69	2.38	0.047
5500	52581.6	394.93	57279.97	2.89	0.057
6000	57486.6	431.77	62623.25	3.4	0.067
6500	62391.6	468.61	67966.53	4.25	0.084
7000	67296.6	505.45	73309.81	5.1	0.100
7450	71711.1	538.61	78118.77	7.98	0.157

Fuente: Personal

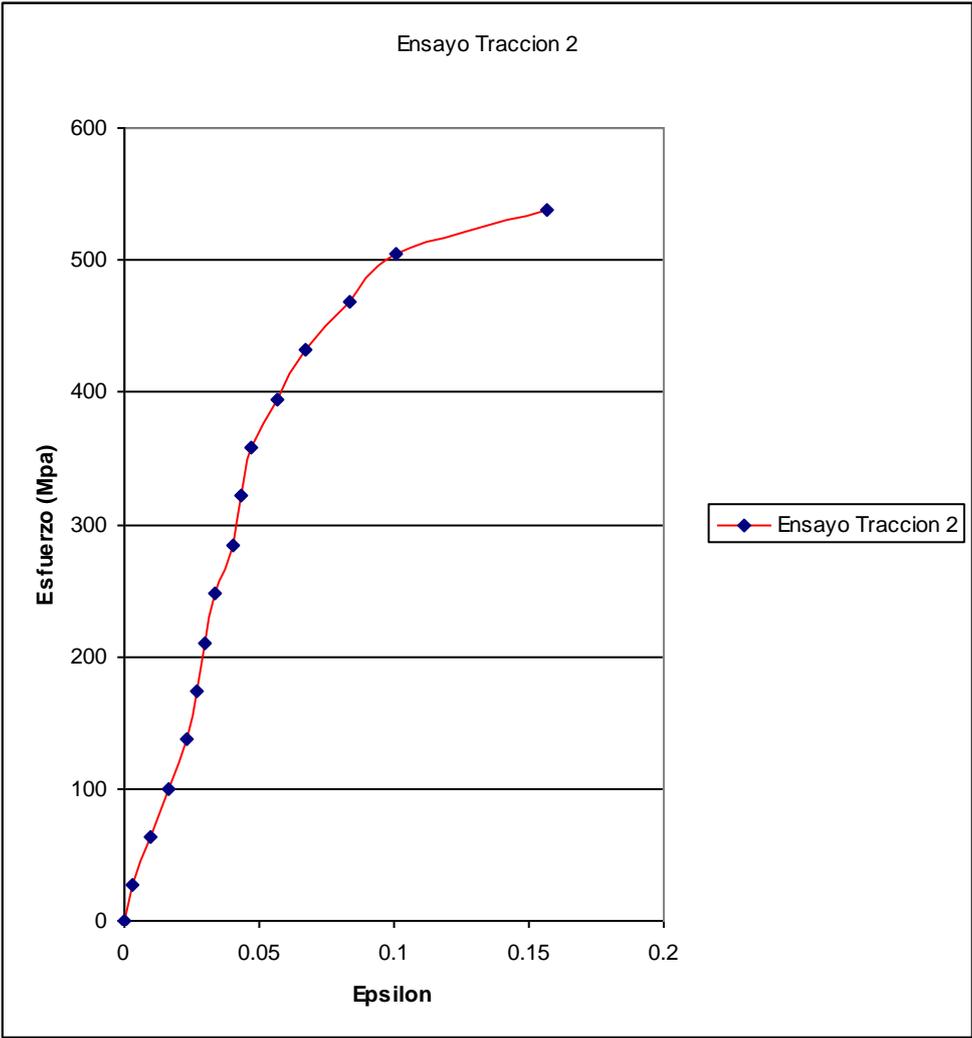


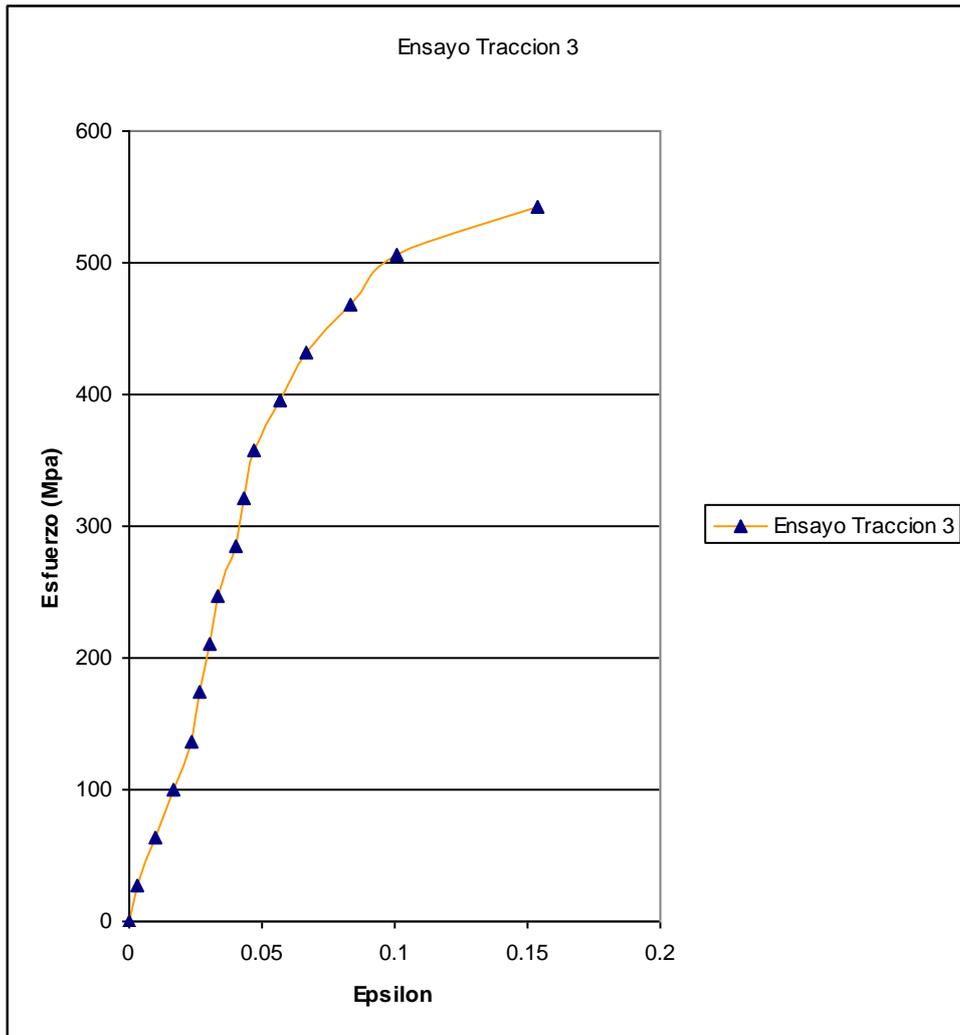
Gráfico 4.37 Ensayo tracción 2

**Tabla 4.6 Ensayo de Tracción 3**

Ensayo 3	
D Inicial (mm)	13.02
D Final (mm)	12.26
L inicial(mm)	50.8
L Final (mm)	58.6
Def %	15.35
Area(mm <sup>2</sup> )	133.14
Cabezal (kg)	140
g (m/s <sup>2</sup> )	9.81
1 psi	0.00689476 Mpa

Carga	Fuerza	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformacion	Epsilon
Kg	N	Mpa	Psi	mm	
0	0	0	0	0	0
500	3531.6	26.53	3847.16	0.17	0.003
1000	8436.6	63.37	9190.44	0.51	0.010
1500	13341.6	100.21	14533.72	0.85	0.017
2000	18246.6	137.05	19877.01	1.19	0.023
2500	23151.6	173.89	25220.29	1.36	0.027
3000	28056.6	210.73	30563.57	1.53	0.030
3500	32961.6	247.57	35906.85	1.7	0.033
4000	37866.6	284.41	41250.13	2.04	0.040
4500	42771.6	321.25	46593.41	2.21	0.044
5000	47676.6	358.09	51936.69	2.38	0.047
5500	52581.6	394.93	57279.97	2.89	0.057
6000	57486.6	431.77	62623.25	3.4	0.067
6500	62391.6	468.61	67966.53	4.25	0.084
7000	67296.6	505.45	73309.81	5.1	0.100
7500	72201.6	542.29	78653.10	7.8	0.154

Fuente: Personal



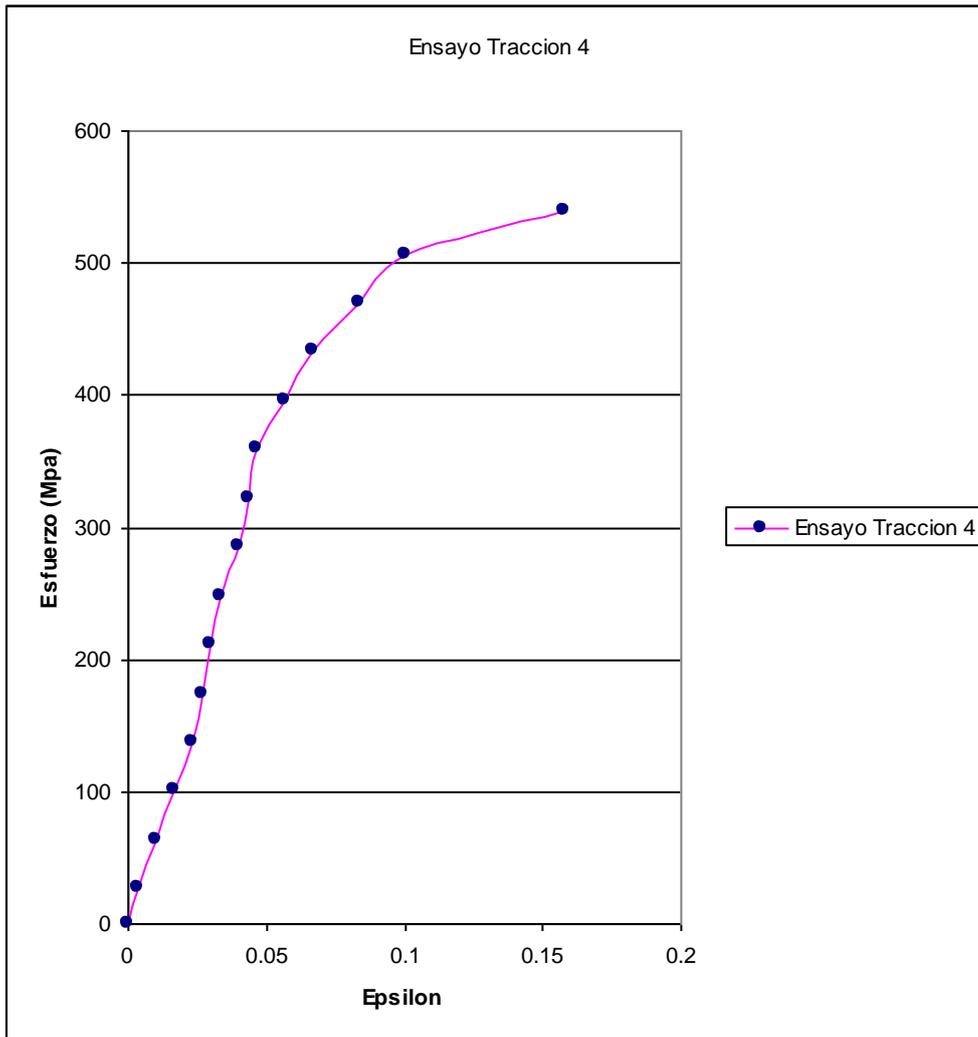
**Gráfico 4.38 Ensayo tracción 3**

**Tabla 4.7 Ensayo de Tracción 4**

Ensayo 4	
D Inicial (mm)	13
D Final (mm)	12.3
L inicial(mm)	50.8
L Final (mm)	58.8
Def %	15.75
Area(mm <sup>2</sup> )	132.73
Cabezal (kg)	140
g (m/s <sup>2</sup> )	9.81
1 psi	0.00689476 Mpa

Carga	Fuerza	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformacion	Epsilon
Kg	N	Mpa	Psi	mm	
0	0	0	0	0	0
500	3531.6	26.61	3859.01	0.17	0.003
1000	8436.6	63.56	9218.74	0.52	0.010
1500	13341.6	100.52	14578.48	0.85	0.017
2000	18246.6	137.47	19938.21	1.19	0.023
2500	23151.6	174.42	25297.95	1.36	0.027
3000	28056.6	211.38	30657.68	1.53	0.030
3500	32961.6	248.33	36017.42	1.7	0.033
4000	37866.6	285.29	41377.15	2.04	0.040
4500	42771.6	322.24	46736.88	2.21	0.044
5000	47676.6	359.19	52096.62	2.38	0.047
5500	52581.6	396.15	57456.35	2.89	0.057
6000	57486.6	433.10	62816.09	3.4	0.067
6500	62391.6	470.06	68175.82	4.25	0.084
7000	67296.6	507.01	73535.56	5.1	0.100
7450	71711.1	540.27	78359.32	8	0.157

Fuente: Personal



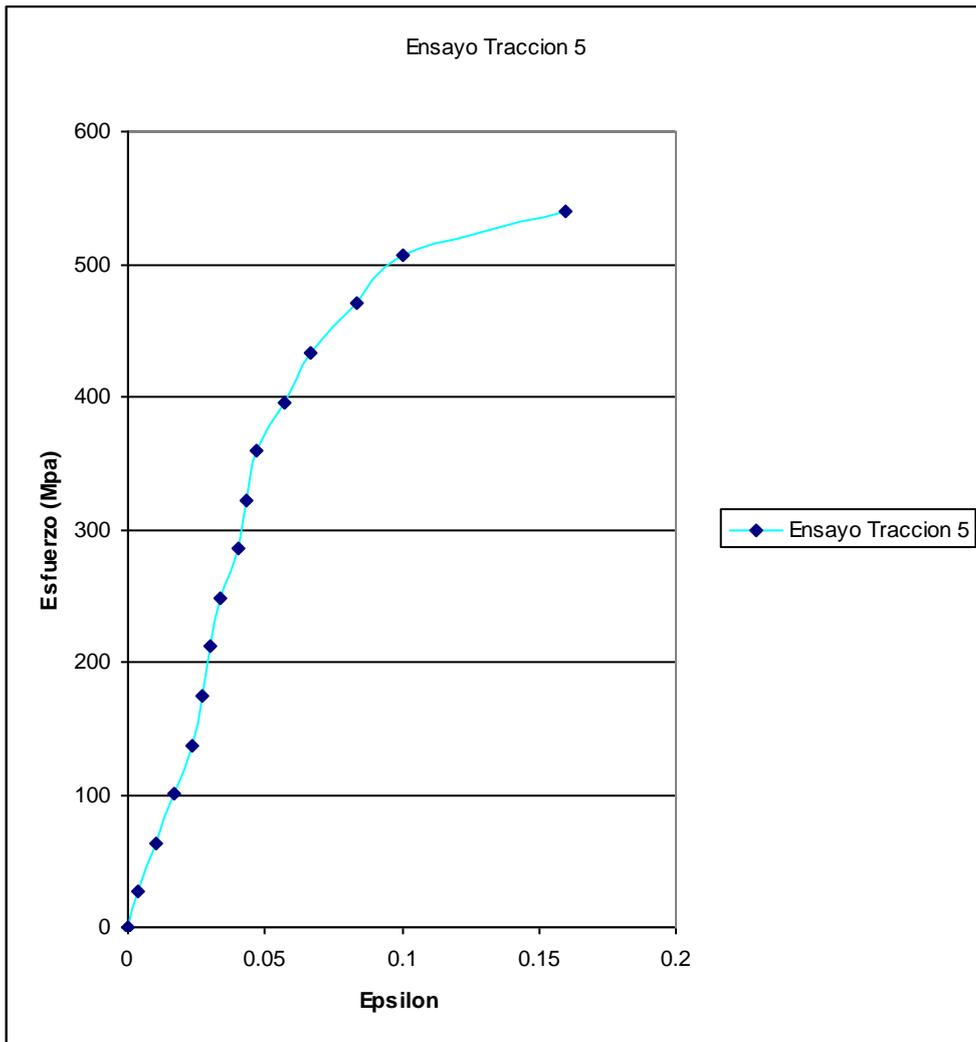
**Gráfico 4.39 Ensayo tracción 4**

**Tabla 4.8 Ensayo de Tracción 5**

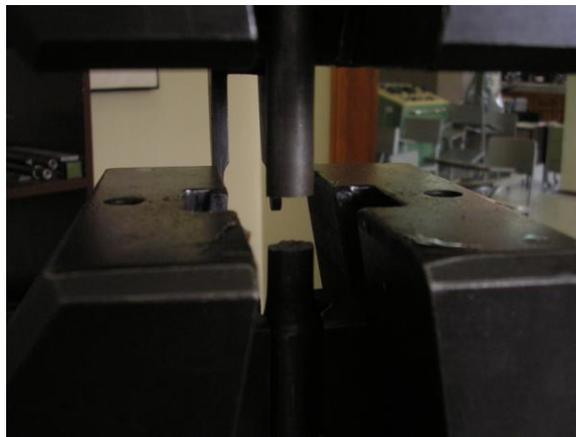
Ensayo 5	
D Inicial (mm)	13
D Final (mm)	12.3
L inicial(mm)	50.8
L Final (mm)	58.9
Def %	15.94
Area(mm <sup>2</sup> )	132.73
Cabezal (kg)	140
g (m/s <sup>2</sup> )	9.81
1 psi	0.00689476 Mpa

Carga	Fuerza	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformacion	Epsilon
Kg	N	Mpa	Psi	mm	
0	0	0	0	0	0
500	3531.6	26.61	3859.01	0.17	0.003
1000	8436.6	63.56	9218.74	0.52	0.010
1500	13341.6	100.52	14578.48	0.85	0.017
2000	18246.6	137.47	19938.21	1.19	0.023
2500	23151.6	174.42	25297.95	1.36	0.027
3000	28056.6	211.38	30657.68	1.53	0.030
3500	32961.6	248.33	36017.42	1.7	0.033
4000	37866.6	285.29	41377.15	2.04	0.040
4500	42771.6	322.24	46736.88	2.21	0.044
5000	47676.6	359.19	52096.62	2.38	0.047
5500	52581.6	396.15	57456.35	2.89	0.057
6000	57486.6	433.10	62816.09	3.4	0.067
6500	62391.6	470.06	68175.82	4.25	0.084
7000	67296.6	507.01	73535.56	5.1	0.100
7450	71711.1	540.27	78359.32	8.1	0.159

Fuente: Personal



**Gráfico 4.40 Ensayo tracción 5**



**Imagen 4.41 Durante el Ensayo de Tracción**

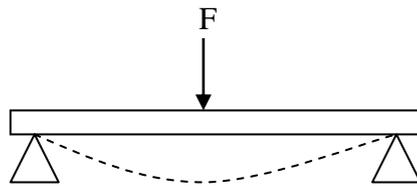
**Esfuerzo Limite Proporcional ( $S_y$ ): 358,5 (Mpa) , 52032,3 Psi**

**Esfuerzo Promedio ( $S_{uy}$ ) : 536,49 (Mpa), 77811.3 (Psi)**

**% elongación Promedio: 15,71**

#### 4.3.1.2 Flexión

El ensayo de flexión consiste en aplicar una fuerza a una distancia X paralela a la sección de superficie del espécimen , el cual se encuentra apoyado, lo cual genera la deflexión del elemento y mediante una curva obtenida durante el ensayo de la deflexión del material y la fuerza aplicada y de esta forma determinar la resistencia del material a al flexión.



**Figura 4.42 Esquema de Ensayo a Flexión**

El Esfuerzo de Flexión se define como:

$$\sigma = \frac{M \times y}{I} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Deflexión en vigas

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Donde

M: Momento Flector

Y: Distancia a la línea neutra

I: Inercia de la Sección (mm<sup>4</sup>)

E: Modulo de Elasticidad del Hierro Nodular

L: Longitud de la viga entre apoyos

P: fuerza Aplicada.

El ensayo de flexión se realizo basado en los lineamientos establecidos en ASTM 438, pero debido a que los especimenes de ensayos que pudimos conseguir eran especimenes para tracción cuyas medidas totales eran 15 cm de largo y diámetro de 13mm , se procedió ha realizar una relación de diámetros y longitud en función de ASTM 438 Probeta B.

**ASTM 438 establece:**

Longitud : 533 mm (Lb) tol = 25.4 mm

Diámetro : 30.5 mm (Db) tol = 1.5mm

Distancia entre apoyos: 457 mm (Ab)

Tiempo mínimo de Ensayo : 20 s

**Probeta Tracción disponibles de Hierro Nodular :**

Longitud: 150 mm(L)

Diámetro: 13 mm (D)

Distancia entre apoyos: (A)

**Calculo de relaciones:**

**Relación de Diámetro con Longitud**

$$\frac{Db}{D} = \frac{Lb}{L} \quad D = \frac{Db * L}{Lb} \quad \mathbf{D = 8,58 \text{ mm}}$$

**Df = 9mm**

**Relación Distancia Entre Apoyos con Longitud**

$$A = \frac{Ab * L}{Lb} \quad \mathbf{A = 128.6 \text{ mm}}$$

Para este ensayo se utilizo la maquina de Ensayos Universales AMSLER RM 29

Se uso la escala de 1000 Kg :

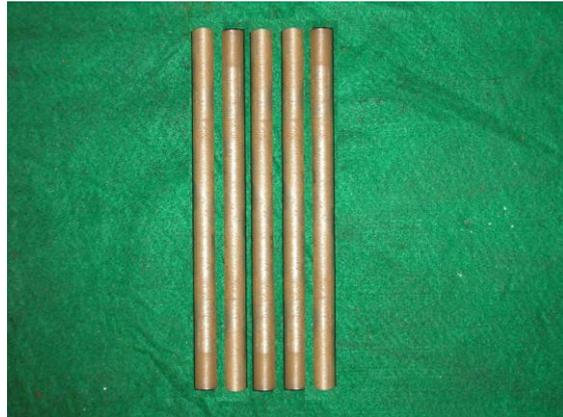
Eje X deflexión 1 cuadro @ 0.4mm

Eje y Fuerza 1 cuadro @ 5 Kg.

Factor 2,5 (Propio de la Maquina) corrige el valor de deflexión.



**Imagen 4.43 Apoyos Para Ensayo de Flexión**



**Imagen 4.44 Probetas para ensayo de flexión.**

**Características de la probeta:**

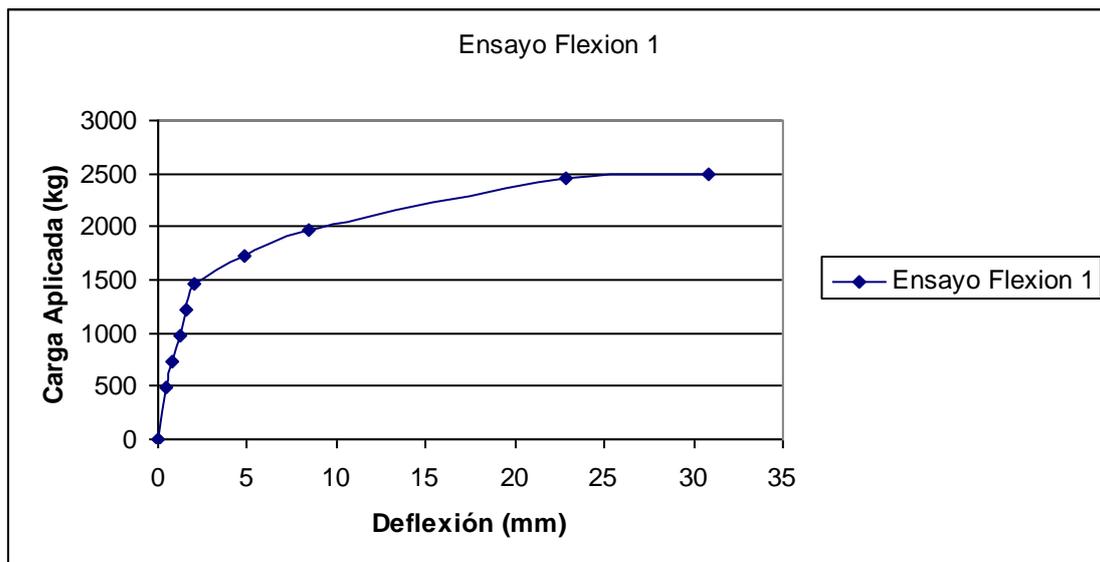
Longitud: 150 +/- 0,2 mm

Diámetro: 9 +/- 0,2 mm

**Tabla 4.9 Ensayo de Flexión 1**

Ensayo 1							
Diametro (mm)	9						
Area(mm <sup>2</sup> )	63.62						
Dist Apoyos(mm)	130						
Inercia I (mm <sup>4</sup> )	322.06						
y (mm)	4.5						
Carga	Deflexion	Deflex. Real	F	V	Momento	Esfuerzo	Esfuerzo
Kg	Mm	Mm	N	N	N*mm	Mpa	Psi
0	0	0	0	0	0.00	0	0
50	1	0.4	490.5	245.25	15941.25	222.74	32305.45
75	2	0.8	735.75	367.875	23911.88	334.11	48458.18
100	3	1.2	981	490.5	31882.50	445.48	64610.90
125	4	1.6	1226.25	613.125	39853.13	556.85	80763.63
150	5	2	1471.5	735.75	47823.75	668.21	96916.35
175	12	4.8	1716.75	858.375	55794.38	779.58	113069.08
200	21	8.4	1962	981	63765.00	890.95	129221.80
250	57	22.8	2452.5	1226.25	79706.25	1113.69	161527.25
<b>255</b>	<b>77</b>	<b>30.8</b>	<b>2501.55</b>	<b>1250.775</b>	<b>81300.38</b>	<b>1135.97</b>	<b>164757.80</b>

Fuente: Personal

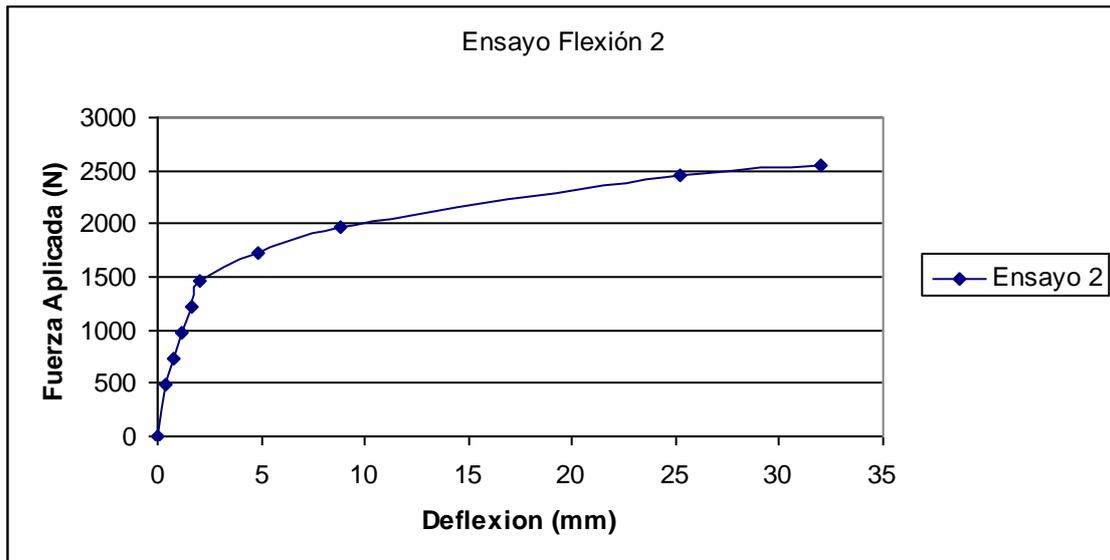


**Gráfico 4.45 Fuerza Vs. Deflexión Ensayo 1**

**Tabla 4.10 Ensayo de Flexión 2**

Ensayo 2							
Diametro (mm)	9						
Area(mm <sup>2</sup> )	63.62						
Dist Apoyos(mm)	130						
Inercia I (mm <sup>4</sup> )	322.06						
y (mm)	4.5						
Carga	Deflexion	Deflx. Real	F	V	Momento	Esfuerzo	Esfuerzo
Kg	mm	Mm	N	N	N*mm	Mpa	Psi
0	0	0	0	0	0.00	0	0
50	1	0.4	490.5	245.25	15941.25	222.74	32305.45
75	2	0.8	735.75	367.875	23911.88	334.11	48458.18
100	3	1.2	981	490.5	31882.50	445.48	64610.90
125	4	1.6	1226.25	613.125	39853.13	556.85	80763.63
150	5	2	1471.5	735.75	47823.75	668.21	96916.35
175	12	4.8	1716.75	858.375	55794.38	779.58	113069.08
200	22	8.8	1962	981	63765.00	890.95	129221.80
250	63	25.2	2452.5	1226.25	79706.25	1113.69	161527.25
<b>260</b>	<b>80</b>	<b>32</b>	<b>2550.6</b>	<b>1275.3</b>	<b>82894.50</b>	<b>1158.24</b>	<b>167988.34</b>

Fuente : Personal

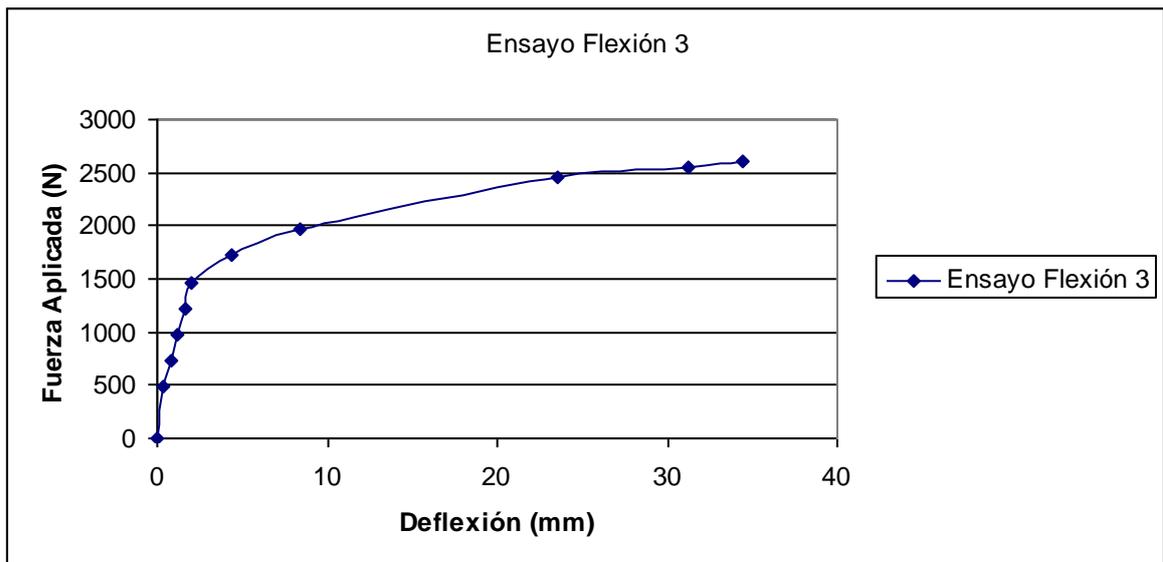


**Gráfico 4.46 Fuerza Vs. Deflexión Ensayo 2**

**Tabla 4.11 Ensayo de Flexión 3**

Ensayo 3							
Diametro (mm)	9.04						
Area(mm <sup>2</sup> )	64.18						
Dist Apoyos(mm)	130						
Inercia I (mm <sup>4</sup> )	327.83						
y (mm)	4.52						
Carga	Deflexión	Deflx. Real	F	V	Momento	Esfuerzo	Esfuerzo
Kg	mm	mm	N	N	N*mm	Mpa	Psi
0	0	0	0	0	0.00	0	0
50	1	0.4	490.5	245.25	15941.25	222.74	32305.45
75	2	0.8	735.75	367.875	23911.88	334.11	48458.18
100	3	1.2	981	490.5	31882.50	445.48	64610.90
125	4	1.6	1226.25	613.125	39853.13	556.85	80763.63
150	5	2	1471.5	735.75	47823.75	668.21	96916.35
175	11	4.4	1716.75	858.375	55794.38	779.58	113069.08
200	21	8.4	1962	981	63765.00	890.95	129221.80
250	59	23.6	2452.5	1226.25	79706.25	1113.69	161527.25
260	78	31.2	2550.6	1275.3	82894.50	1158.24	167988.34
<b>265</b>	<b>86</b>	<b>34.4</b>	<b>2599.65</b>	<b>1299.825</b>	<b>84488.63</b>	<b>1180.51</b>	<b>171218.89</b>

Fuente: Personal

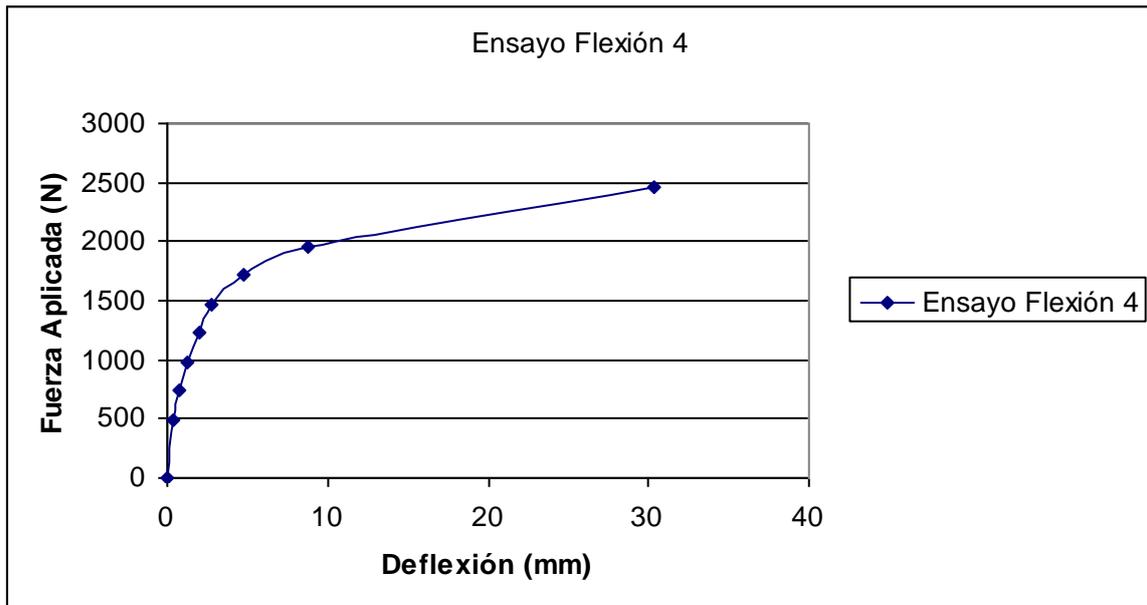


**Gráfico 4.47 Fuerza Vs. Deflexión Ensayo 3**

**Tabla 4.12 Ensayo de Flexión 4**

Ensayo 4							
Diametro (mm)		8.98					
Area(mm <sup>2</sup> )		63.33					
Dist Apoyos(mm)		130					
Inercia I (mm <sup>4</sup> )		319.21					
y (mm)		4.49					
Carga	Deflexion	Deflx. Real	F	V	Momento	Esfuerzo	Esfuerzo
Kg	mm	mm	N	N	N*mm	Mpa	Psi
0	0	0	0	0	0.00	0	0
50	1	0.4	490.5	245.25	15941.25	224.23	32521.78
75	2	0.8	735.75	367.875	23911.88	336.34	48782.67
100	3	1.2	981	490.5	31882.50	448.46	65043.56
125	5	2	1226.25	613.125	39853.13	560.57	81304.45
150	7	2	1471.5	735.75	47823.75	672.69	97565.34
175	12	4.8	1716.75	858.375	55794.38	784.80	113826.23
200	22	8.8	1962	981	63765.00	896.92	130087.12
<b>250</b>	<b>76</b>	<b>23.2</b>	<b>2452.5</b>	<b>1226.25</b>	<b>79706.25</b>	<b>1121.15</b>	<b>162608.90</b>

Fuente: Personal

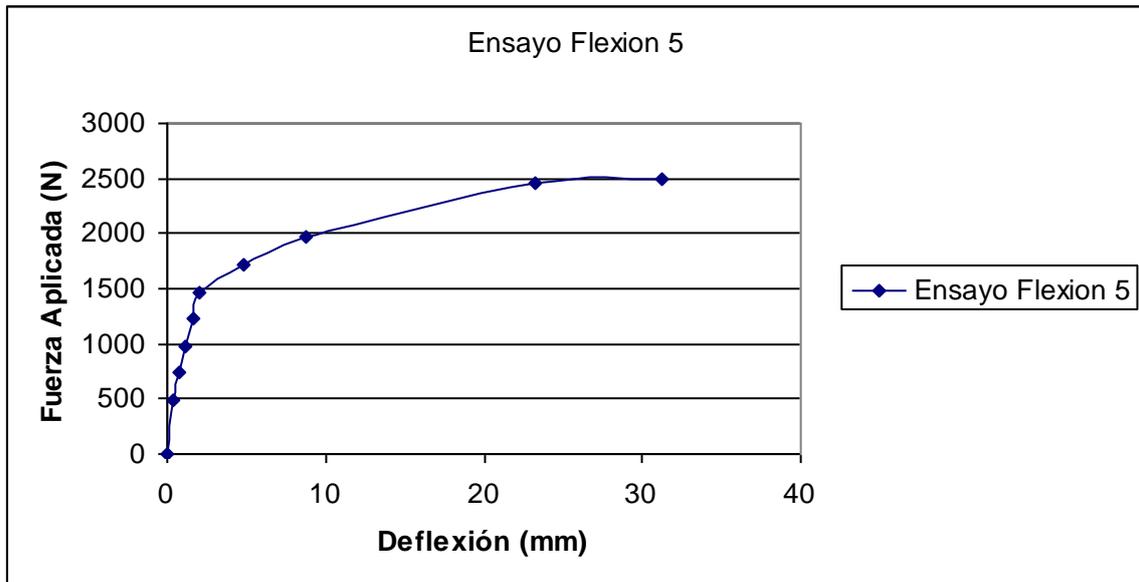


**Gráfico 4.48 Fuerza Vs. Deflexión Ensayo 4**

**Tabla 4.13 Ensayo de Flexión 5**

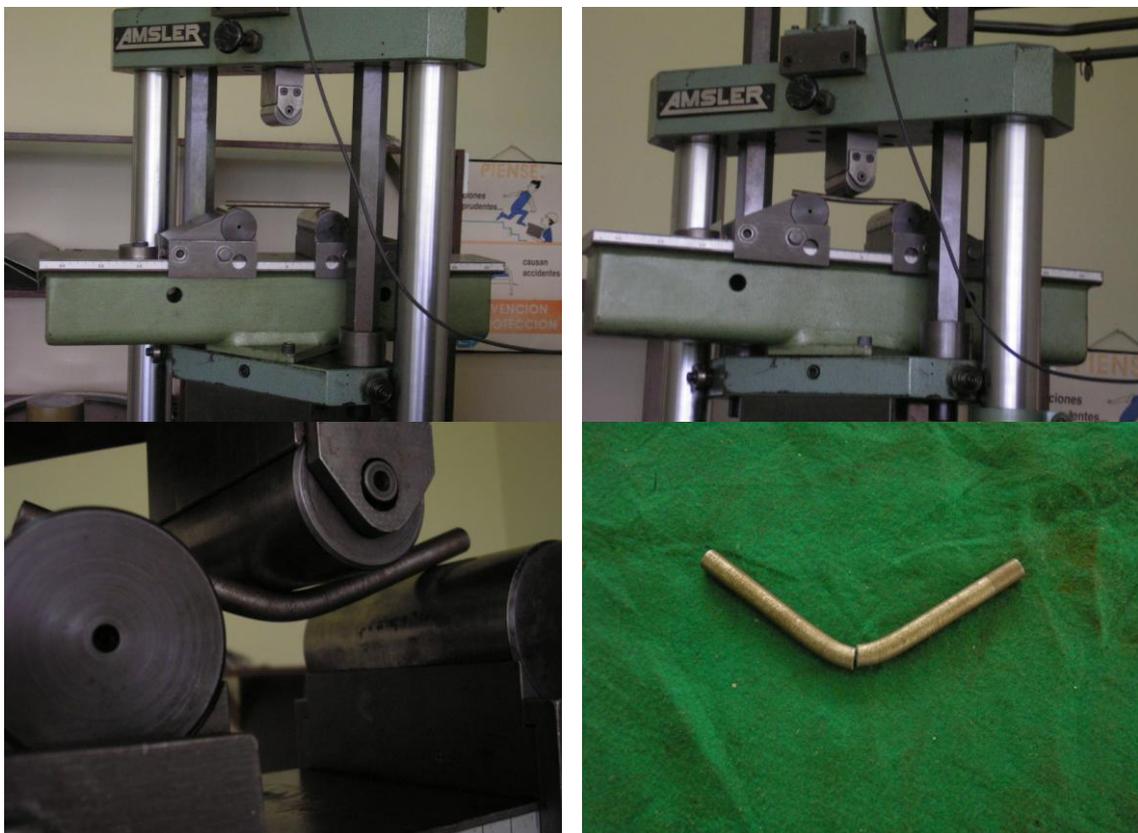
Ensayo 5							
Diametro (mm)	9.18						
Area(mm <sup>2</sup> )	66.19						
Dist Apoyos(mm)	130						
Inercia I (mm <sup>4</sup> )	348.61						
y (mm)	4.59						
Carga	Deflexion	Deflx. Real	F	V	Momento	Esfuerzo	Esfuerzo
Kg	mm	Mm	N	N	N*mm	Mpa	Psi
0	0	0	0	0	0.00	0	0
50	1	0.4	490.5	245.25	15941.25	224.23	32521.78
75	2	0.8	735.75	367.875	23911.88	336.34	48782.67
100	3	1.2	981	490.5	31882.50	448.46	65043.56
125	4	1.6	1226.25	613.125	39853.13	560.57	81304.45
150	5	2	1471.5	735.75	47823.75	672.69	97565.34
175	12	4.8	1716.75	858.375	55794.38	784.80	113826.23
200	22	8.8	1962	981	63765.00	896.92	130087.12
250	58	23.2	2452.5	1226.25	79706.25	1121.15	162608.90
<b>255</b>	<b>78</b>	<b>31.2</b>	<b>2501.55</b>	<b>1250.775</b>	<b>81300.38</b>	<b>1143.57</b>	<b>165861.08</b>

Fuente: Personal



**Grafico 4.49 Fuerza Vs. Deflexión Ensayo 5**

**Momento Flector Máximo promedio: 81940 Nmm**  
**Esfuerzo Promedio: 1148 Mpa, 166 503 Psi.**



**Imagen 4.50 Ensayo de Flexión**

#### 4.3.1.3 Dureza

EL Ensayo de Dureza se lo Realizo en la maquina de Ensayos universales AMSLER RM 29

Este ensayo se realizo en la Escala Brinell de dureza para lo cual se utilizó una bola de acero de 10mm y una carga de 3000 Kg., cada indentación duró 15 segundos realizase 3 indentaciones por ensayo.

La huella dejada por la esfera en la cara de la probeta fue medido con el microscopio de Herramientas del laboratorio de Metrología . Las probetas deben ser previamente pulidas las caras que vayan a recibir la indentación con el fin de poder observar claramente la huella.

Las lecturas tomadas en el microscopio de herramientas en cada uno de los ejes , se nombran como (  $X_n$  ,  $Y_n$  ) , de las cuáles se obtiene la diferencia que representa el diámetro de la huella ,en los casos donde la diferencia es negativa se obtuvo el valor absoluto para luego encontrar el promedio entre los diámetros horizontal y vertical .Con el diámetro promedio se obtuvo una dureza para cada indentación

El calculo de la Dureza Brinell se realizo mediante la siguiente fórmula.

$$HB = 2P / D\pi(D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

**Ecuación 4.6**



**Imagen 4.51 Indentación de Muestras    Imagen 4.52 Probeta con Indentación**

**Tabla 4.14 Dureza Brinel**

<b>Ensayo 1</b>			Diferencia		Diametro	Indentor	carga	HB
	mm	mm	mm	mm	Mm		Kg.	Kg/mm <sup>2</sup>
Medida x1	8.519	4.999	3.52	3.52	3.5165	10	3000	299.03
Medida y1	12.439	8.926	3.513	3.513				
Medida x2	6.321	2.189	4.132	4.132	4.1675	10	3000	209.92
Medida y2	4.567	0.364	4.203	4.203				
Medida x3	9.623	5.49	4.133	4.133	4.1715	10	3000	209.50
Medida y3	12.345	8.135	4.21	4.21				
							<b>HB media</b>	<b>239.49</b>

<b>Ensayo 2</b>			Diferencia		Diametro	Indentor	carga	HB
	mm	mm	mm	mm	Mm		Kg.	Kg/mm <sup>2</sup>
Medida x1	10.302	6.076	4.226	4.226	4.268	10	3000	199.66
Medida y1	13.276	8.966	4.31	4.31				
Medida x2	7.984	3.996	3.988	3.988	4.006	10	3000	228.05
Medida y2	11.346	7.322	4.024	4.024				
Medida x3	9.604	5.472	4.132	4.132	4.1835	10	3000	208.24
Medida y3	14.667	10.432	4.235	4.235				
							<b>HB media</b>	<b>211.99</b>

<b>Ensayo 3</b>			Diferencia		Diametro	Indentor	carga	HB
	mm	mm	mm	mm	Mm		Kg.	Kg/mm <sup>2</sup>
Medida x1	11.983	8.002	3.981	3.981	4.2555	10	3000	200.90
Medida y1	6.834	2.304	4.53	4.53				
Medida x2	7.895	3.675	4.22	4.22	4.191	10	3000	207.46
Medida y2	8.563	4.401	4.162	4.162				
Medida x3	13.986	9.741	4.245	4.245	4.293	10	3000	197.22
Medida y3	7.592	3.251	4.341	4.341				
							<b>HB media</b>	<b>201.86</b>

<b>Ensayo 4</b>			Diferencia		Diametro	Indentor	carga	HB
	mm	mm	mm	mm	Mm		Kg.	Kg/mm <sup>2</sup>
Medida x1	6.734	2.413	4.321	4.321	4.2095	10	3000	205.55
Medida y1	12.354	8.256	4.098	4.098				
Medida x2	9.568	5.431	4.137	4.137	4.184	10	3000	208.19
Medida y2	13.983	9.752	4.231	4.231				

Medida x3	9.321	5.257	4.064	4.064	4.105	10	3000	216.69
Medida y3	7.491	3.345	4.146	4.146				
HB media								<b>210.14</b>

<b>Ensayo 5</b>			Diferencia		Diametro	Indentor	carga	HB
	mm	mm	mm	mm	Mm		Kg.	Kg/mm <sup>2</sup>
Medida x1	13.870	9.647	4.223	4.223	4.205	10	3000	206.01
Medida y1	6.265	2.078	4.187	4.187				
Medida x2	9.873	5.659	4.214	4.214	4.2115	10	3000	205.34
Medida y2	12.682	8.473	4.209	4.209				
Medida x3	14.653	10.456	4.197	4.197	4.1465	10	3000	212.16
Medida y3	9.603	5.507	4.096	4.096				
HB media								<b>207.84</b>

<b>HB</b>	<b>214.26</b>
-----------	---------------

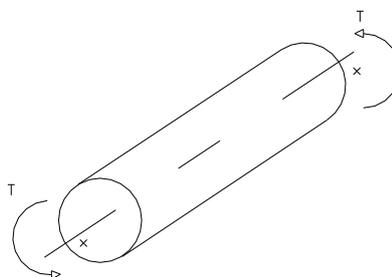
#### Continuación de tabla 4.14

Fuente: Personal

**Dureza Promedio : 214 HBN.**

#### 4.3.1.4 Torsión

El ensayo de torsión consiste en provocar el giro alrededor del eje axial , donde la probeta se encuentra empotrada de un lado y en el otro lado se aplica el torque necesario para generar la torsión de esta.



**Figura 4.53 Esquema Ensayo de Torsión**

El ensayo de torsión se realizó en una máquina para ensayo de torsión Avery , del laboratorio de Resistencia de Materiales de la ESPE , esta cuenta con un dispositivo que permite la medición del ángulo de giro entre los extremos de la probeta, se ajusto las probeta en las mordazas de modo que no haya ningún juego entre mordaza y probeta y se procedió a realizar el ensayo encerrando la maquina.

El ensayo se realiza a velocidad de 3 grados por minuto , cuando la probeta llegó a su resistencia máxima se escucha un sonido fuerte y seco , se evidencia la pérdida de carga de la máquina lo que indica que el ensayo termina.

La escala de la máquina es N\*m y se tomaron ciertos parámetros necesarios para la realización de los cálculos.

Por la dimensiones de las probetas a ensayar se modifiko el medidor angular para realizar los ensayos.

Las fórmulas usadas en el análisis de resistencia a la torsión son

Angulo girado (radianes)  $\theta = \frac{TL}{JG}$  **Ecuación 4.7**

Esfuerzo cortante debido a la torsión  $\tau = \frac{T\rho}{J}$  **Ecuación 4.8**

Momento polar de inercia  $J = \frac{\pi d^2}{32}$  **Ecuación 4.9**



**Imagen 4.54 Maquina Avery Ensayo Torsión**



**Imagen 4.55 Probetas de Torsión**

**Características de la probeta:**

**Longitud Calibrada:** 126.43 mm.

**Diámetro:** 13 mm.

**Momento de Inercia Polar J:** 2803.97mm<sup>4</sup>

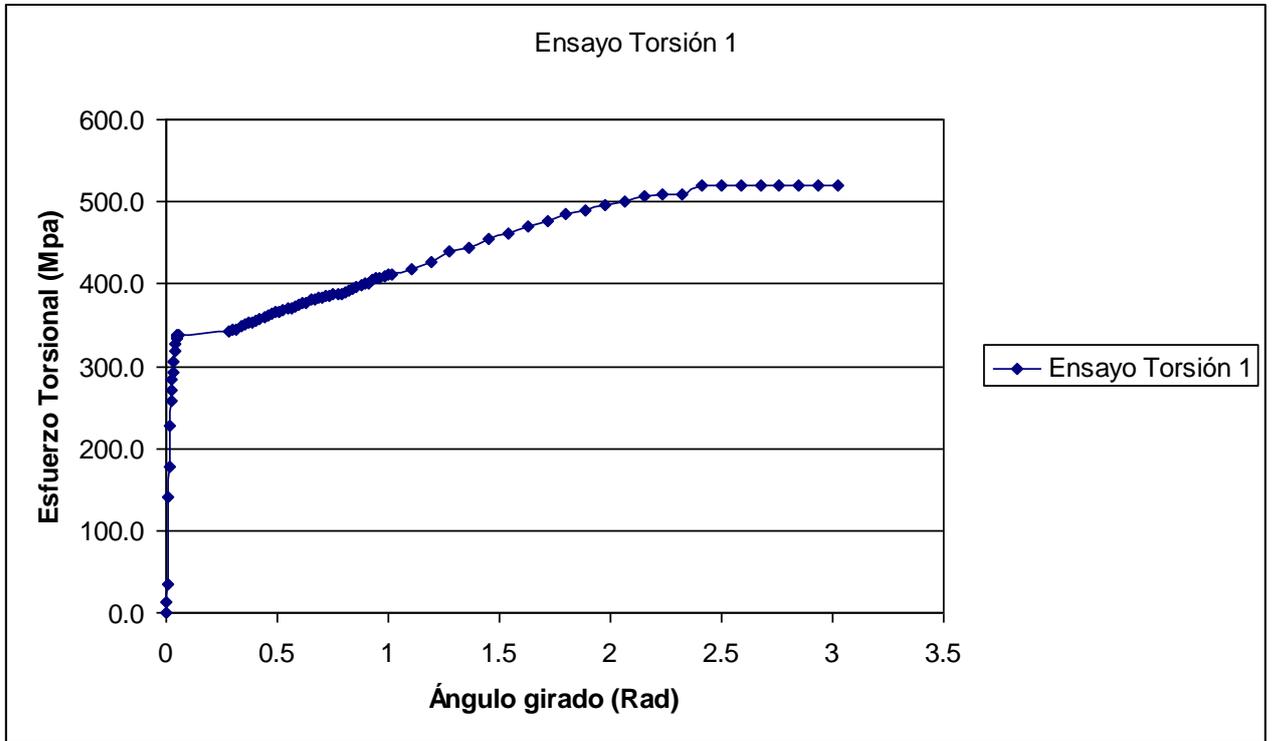
**Tabla 4.15 Ensayo Torsión 1**

Ensayo 1					mod. rig	esf. Tors	esf. Tors
Angulo	Torque Nm	Angulo Corr	Torque Corr	Angulo en Rad	G	$\tau$	$\tau$
grados	Nm	grados	Nmm	Rad	Mpa	Mpa	Psi
1	6	0	0	0	0	0.0	0.0
2	14	0.2	6000	0.003	77503.2	13.9	2017.3086
3	23	0.4	15000	0.007	96879.0	34.8	5043.2715
4	69	0.6	61000	0.010	262649.8	141.4	20509.3041
5	85	0.8	77000	0.014	248656.1	178.5	25888.7936
6	106	1	98000	0.017	253177.2	227.2	32949.3737
7	119	1.2	111000	0.021	238968.2	257.3	37320.2090
8	125	1.4	117000	0.024	215901.8	271.2	39337.5176
9	130	1.6	122000	0.028	196987.3	282.8	41018.6081
10	134	1.8	126000	0.031	180840.8	292.1	42363.4805

11	140	2	132000	0.035	170507.1	306.0	44380.7891
12	145	2.2	137000	0.038	160877.9	317.6	46061.8796
13	149	2.4	141000	0.042	151777.1	326.9	47406.7520
14	152	2.6	144000	0.045	143082.9	333.8	48415.4063
15	153	2.8	145000	0.049	133785.3	336.1	48751.6244
16	154	3	146000	0.052	125727.4	338.4	49087.8425
17	154	3.2	146000	0.056	117869.5	338.4	49087.8425
18	156	16.2	148000	0.283	23601.8	343.1	49760.2787
19	157	17.2	149000	0.300	22379.8	345.4	50096.4968
20	157	18.2	149000	0.318	21150.1	345.4	50096.4968
21	158	19.2	150000	0.335	20183.1	347.7	50432.7149
22	159	20.2	151000	0.353	19311.9	350.0	50768.9330
23	160	21.2	152000	0.370	18522.8	352.4	51105.1511
24	160	22.2	152000	0.387	17688.4	352.4	51105.1511
25	161	23.2	153000	0.405	17037.3	354.7	51441.3692
26	162	24.2	154000	0.422	16440.1	357.0	51777.5873
27	163	25.2	155000	0.440	15890.2	359.3	52113.8054
28	164	26.2	156000	0.457	15382.3	361.6	52450.0235
29	165	27.2	157000	0.475	14911.8	363.9	52786.2416
30	166	28.2	158000	0.492	14474.6	366.3	53122.4597
31	166	29.2	158000	0.510	13978.9	366.3	53122.4597
32	167	30.2	159000	0.527	13601.6	368.6	53458.6778
33	168	31.2	160000	0.545	13248.4	370.9	53794.8959
34	168	32.2	160000	0.562	12837.0	370.9	53794.8959
35	169	33.2	161000	0.579	12528.1	373.2	54131.1140
36	170	34.2	162000	0.597	12237.3	375.5	54467.3321
37	171	35.2	163000	0.614	11963.1	377.9	54803.5502
38	171	36.2	163000	0.632	11632.6	377.9	54803.5502
39	172	37.2	164000	0.649	11389.4	380.2	55139.7683
40	172	38.2	164000	0.667	11091.2	380.2	55139.7683
41	173	39.2	165000	0.684	10874.2	382.5	55475.9864
42	173	40.2	165000	0.702	10603.7	382.5	55475.9864
43	174	41.2	166000	0.719	10409.0	384.8	55812.2045
44	174	42.2	166000	0.737	10162.3	384.8	55812.2045
45	175	43.2	167000	0.754	9986.9	387.1	56148.4226
46	175	44.2	167000	0.771	9761.0	387.1	56148.4226
47	175	45.2	167000	0.789	9545.0	387.1	56148.4226
48	176	46.2	168000	0.806	9394.3	389.4	56484.6407
49	177	47.2	169000	0.824	9250.0	391.8	56820.8588

50	178	48.2	170000	0.841	9111.7	394.1	57157.0769
51	179	49.2	171000	0.859	8979.0	396.4	57493.2950
52	180	50.2	172000	0.876	8851.6	398.7	57829.5131
53	181	51.2	173000	0.894	8729.2	401.0	58165.7312
54	181	52.2	173000	0.911	8562.0	401.0	58165.7312
55	183	53.2	175000	0.929	8498.2	405.7	58838.1674
56	184	54.2	176000	0.946	8389.0	408.0	59174.3855
57	184	55.2	176000	0.963	8237.1	408.0	59174.3855
58	185	56.2	177000	0.981	8136.5	410.3	59510.6036
59	186	57.2	178000	0.998	8039.4	412.6	59846.8217
60	186	58.2	178000	1.016	7901.2	412.6	59846.8217
65	188	63.2	180000	1.103	7357.9	417.3	60519.2579
70	192	68.2	184000	1.190	6970.0	426.5	61864.1303
75	198	73.2	190000	1.278	6705.7	440.4	63881.4389
80	200	78.2	192000	1.365	6343.0	445.1	64553.8751
85	204	83.2	196000	1.452	6086.0	454.4	65898.7475
90	207	88.2	199000	1.539	5828.9	461.3	66907.4017
95	211	93.2	203000	1.627	5627.0	470.6	68252.2741
100	214	98.2	206000	1.714	5419.4	477.5	69260.9284
105	217	103.2	209000	1.801	5232.0	484.5	70269.5827
110	219	108.2	211000	1.888	5037.9	489.1	70942.0189
115	222	113.2	214000	1.976	4883.9	496.1	71950.6732
120	224	118.2	216000	2.063	4721.0	500.7	72623.1094
125	227	123.2	219000	2.150	4592.3	507.7	73631.7637
130	228	128.2	220000	2.238	4433.4	510.0	73967.9818
135	228	133.2	220000	2.325	4266.9	510.0	73967.9818
140	232	138.2	224000	2.412	4187.3	519.3	75312.8542
145	232	143.2	224000	2.499	4041.1	519.3	75312.8542
150	232	148.2	224000	2.587	3904.8	519.3	75312.8542
155	232	153.2	224000	2.674	3777.4	519.3	75312.8542
160	232	158.2	224000	2.761	3658.0	519.3	75312.8542
165	232	163.2	224000	2.848	3545.9	519.3	75312.8542
170	232	168.2	224000	2.936	3440.5	519.3	75312.8542
175	232	173.2	224000	3.023	3341.2	519.3	75312.8542

Fuente: Personal



**Grafico 4.56 Ángulo Vs. Esfuerzo Torsional Ensayo 1**

**Tabla 4.16 Ensayo Torsión 2**

Ensayo 2					mod. rig	esf. Tors	esf. Tors
Angulo	Torque Nm	Angulo Corr	Torque Corr	Angulo en Rad	G	$\tau$	$\tau$
grados	Nm	grados	Nmm	Rad	Mpa	Mpa	Psi
1	6	0	0	0	0	0.0	0.0
2	15	0.2	7000	0.003	90420.4	16.2	2353.5
3	22	0.4	14000	0.007	90420.4	32.5	4707.1
4	70	0.6	62000	0.010	266955.5	143.7	20845.5
5	85	0.8	77000	0.014	248656.1	178.5	25888.8
6	105	1	97000	0.017	250593.7	224.9	32613.2
7	120	1.2	112000	0.021	241121.1	259.6	37656.4
8	124	1.4	116000	0.024	214056.5	268.9	39001.3
9	133	1.6	125000	0.028	201831.3	289.8	42027.3
10	135	1.8	127000	0.031	182276.1	294.4	42699.7
11	140	2	132000	0.035	170507.1	306.0	44380.8
12	145	2.2	137000	0.038	160877.9	317.6	46061.9
13	148	2.4	140000	0.042	150700.7	324.5	47070.5
14	152	2.6	144000	0.045	143082.9	333.8	48415.4
15	154	2.8	146000	0.049	134708.0	338.4	49087.8
16	154	3	146000	0.052	125727.4	338.4	49087.8
17	155	3.2	147000	0.056	118676.8	340.8	49424.1
18	155	16.2	147000	0.283	23442.3	340.8	49424.1
19	156	17.2	148000	0.300	22229.6	343.1	49760.3
20	156	18.2	148000	0.318	21008.2	343.1	49760.3
21	158	19.2	150000	0.335	20183.1	347.7	50432.7
22	159	20.2	151000	0.353	19311.9	350.0	50768.9
23	159	21.2	151000	0.370	18400.9	350.0	50768.9
24	160	22.2	152000	0.387	17688.4	352.4	51105.2
25	162	23.2	154000	0.405	17148.7	357.0	51777.6
26	164	24.2	156000	0.422	16653.6	361.6	52450.0
27	165	25.2	157000	0.440	16095.2	363.9	52786.2
28	165	26.2	157000	0.457	15480.9	363.9	52786.2
29	166	27.2	158000	0.475	15006.7	366.3	53122.5
30	166	28.2	158000	0.492	14474.6	366.3	53122.5
31	167	29.2	159000	0.510	14067.4	368.6	53458.7

32	168	30.2	160000	0.527	13687.1	370.9	53794.9
33	169	31.2	161000	0.545	13331.2	373.2	54131.1
34	169	32.2	161000	0.562	12917.2	373.2	54131.1
35	169	33.2	161000	0.579	12528.1	373.2	54131.1
36	172	34.2	164000	0.597	12388.4	380.2	55139.8
37	173	35.2	165000	0.614	12109.9	382.5	55476.0
38	173	36.2	165000	0.632	11775.4	382.5	55476.0
39	174	37.2	166000	0.649	11528.3	384.8	55812.2
40	174	38.2	166000	0.667	11226.5	384.8	55812.2
41	174	39.2	166000	0.684	10940.1	384.8	55812.2
42	174	40.2	166000	0.702	10667.9	384.8	55812.2
43	175	41.2	167000	0.719	10471.7	387.1	56148.4
44	175	42.2	167000	0.737	10223.6	387.1	56148.4
45	175	43.2	167000	0.754	9986.9	387.1	56148.4
46	175	44.2	167000	0.771	9761.0	387.1	56148.4
47	176	45.2	168000	0.789	9602.2	389.4	56484.6
48	176	46.2	168000	0.806	9394.3	389.4	56484.6
49	177	47.2	169000	0.824	9250.0	391.8	56820.9
50	177	48.2	169000	0.841	9058.1	391.8	56820.9
51	179	49.2	171000	0.859	8979.0	396.4	57493.3
52	180	50.2	172000	0.876	8851.6	398.7	57829.5
53	180	51.2	172000	0.894	8678.7	398.7	57829.5
54	182	52.2	174000	0.911	8611.5	403.4	58501.9
55	183	53.2	175000	0.929	8498.2	405.7	58838.2
56	184	54.2	176000	0.946	8389.0	408.0	59174.4
57	185	55.2	177000	0.963	8283.9	410.3	59510.6
58	186	56.2	178000	0.981	8182.4	412.6	59846.8
59	186	57.2	178000	0.998	8039.4	412.6	59846.8
60	186	58.2	178000	1.016	7901.2	412.6	59846.8
65	187	63.2	179000	1.103	7317.0	414.9	60183.0
70	188	68.2	180000	1.190	6818.5	417.3	60519.3
75	193	73.2	185000	1.278	6529.2	428.9	62200.3
80	198	78.2	190000	1.365	6276.9	440.4	63881.4
85	200	83.2	192000	1.452	5961.8	445.1	64553.9
90	204	88.2	196000	1.539	5741.0	454.4	65898.7
95	207	93.2	199000	1.627	5516.1	461.3	66907.4
100	210	98.2	202000	1.714	5314.2	468.3	67916.1
105	214	103.2	206000	1.801	5156.9	477.5	69260.9
110	218	108.2	210000	1.888	5014.1	486.8	70605.8

115	220	113.2	212000	1.976	4838.2	491.4	71278.2
120	222	118.2	214000	2.063	4677.3	496.1	71950.7
125	227	123.2	219000	2.150	4592.3	507.7	73631.8
130	230	128.2	222000	2.238	4473.7	514.6	74640.4
135	230	133.2	222000	2.325	4305.7	514.6	74640.4
140	231	138.2	223000	2.412	4168.6	516.9	74976.6
145	232	143.2	224000	2.499	4041.1	519.3	75312.9
150	232	148.2	224000	2.587	3904.8	519.3	75312.9
155	233	153.2	225000	2.674	3794.2	521.6	75649.1
160	233	158.2	225000	2.761	3674.3	521.6	75649.1
165	233	163.2	225000	2.848	3561.7	521.6	75649.1
170	233	168.2	225000	2.936	3455.9	521.6	75649.1
175	233	173.2	225000	3.023	3356.1	521.6	75649.1

Fuente: Personal

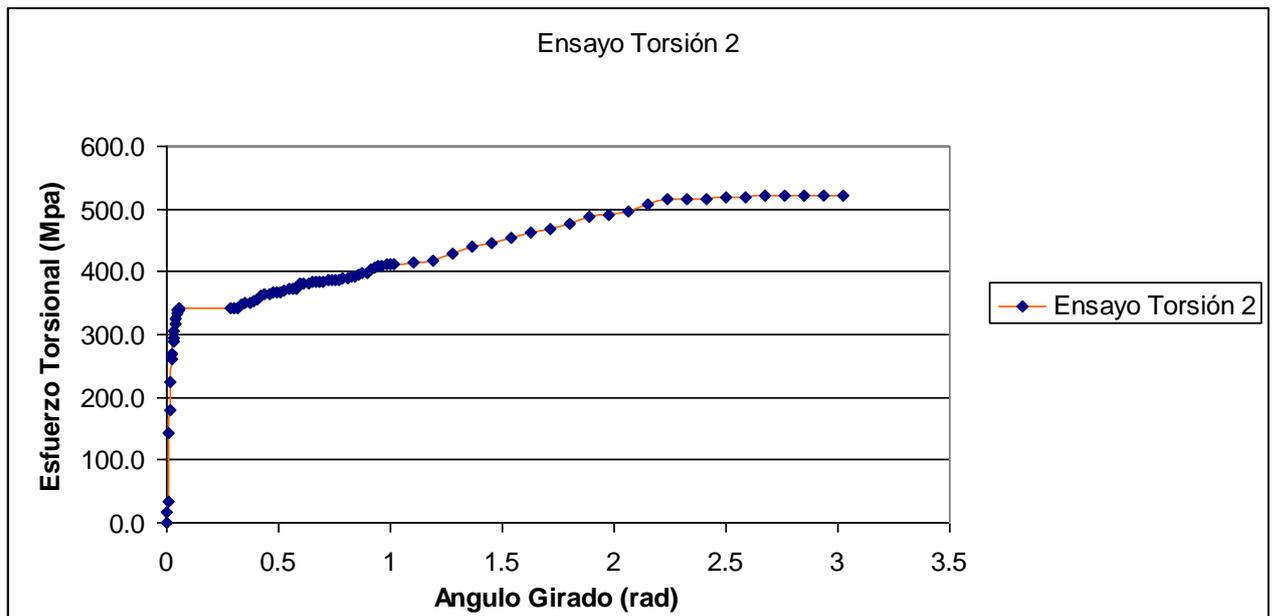


Grafico 4.57 Ángulo Vs. Esfuerzo Torsional Ensayo 2

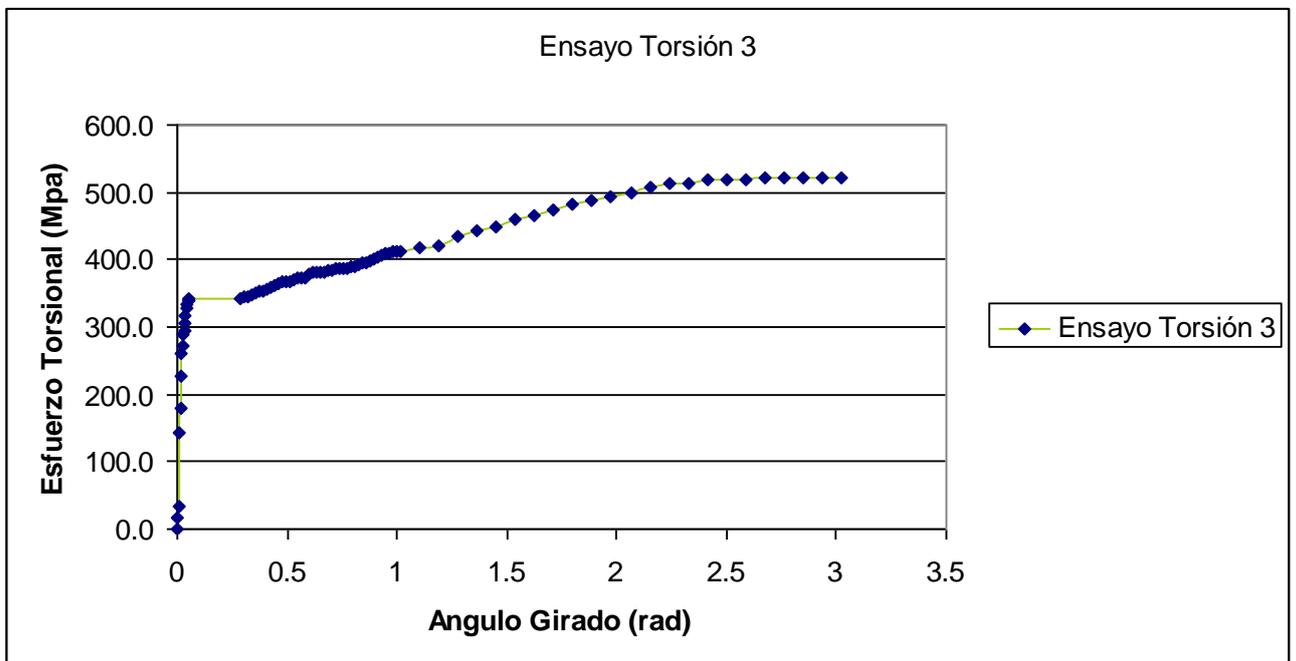
**Tabla 4.17 Ensayo Torsión 3**

Ensayo 3					mod. rig	esf. Tors	esf. Tors
Angulo	Torque Nm	Angulo Corr	Torque Corr	Angulo en Rad	G	$\tau$	$\tau$
grados	Nm	grados	Nmm	Rad	Mpa	Mpa	Psi
1	6	0	0	0	0	0.0	0.0
2	15	0.2	7000	0.003	90420.4	16.2	2353.5
3	23	0.4	15000	0.007	96879.0	34.8	5043.3
4	70	0.6	62000	0.010	266955.5	143.7	20845.5
5	85	0.8	77000	0.014	248656.1	178.5	25888.8
6	106	1	98000	0.017	253177.2	227.2	32949.4
7	120	1.2	112000	0.021	241121.1	259.6	37656.4
8	125	1.4	117000	0.024	215901.8	271.2	39337.5
9	132	1.6	124000	0.028	200216.6	287.4	41691.0
10	135	1.8	127000	0.031	182276.1	294.4	42699.7
11	140	2	132000	0.035	170507.1	306.0	44380.8
12	145	2.2	137000	0.038	160877.9	317.6	46061.9
13	149	2.4	141000	0.042	151777.1	326.9	47406.8
14	152	2.6	144000	0.045	143082.9	333.8	48415.4
15	154	2.8	146000	0.049	134708.0	338.4	49087.8
16	154	3	146000	0.052	125727.4	338.4	49087.8
17	155	3.2	147000	0.056	118676.8	340.8	49424.1
18	156	16.2	148000	0.283	23601.8	343.1	49760.3
19	157	17.2	149000	0.300	22379.8	345.4	50096.5
20	157	18.2	149000	0.318	21150.1	345.4	50096.5
21	158	19.2	150000	0.335	20183.1	347.7	50432.7
22	159	20.2	151000	0.353	19311.9	350.0	50768.9
23	160	21.2	152000	0.370	18522.8	352.4	51105.2
24	160	22.2	152000	0.387	17688.4	352.4	51105.2
25	162	23.2	154000	0.405	17148.7	357.0	51777.6
26	163	24.2	155000	0.422	16546.8	359.3	52113.8
27	164	25.2	156000	0.440	15992.7	361.6	52450.0
28	165	26.2	157000	0.457	15480.9	363.9	52786.2
29	166	27.2	158000	0.475	15006.7	366.3	53122.5
30	166	28.2	158000	0.492	14474.6	366.3	53122.5
31	167	29.2	159000	0.510	14067.4	368.6	53458.7

32	168	30.2	160000	0.527	13687.1	370.9	53794.9
33	169	31.2	161000	0.545	13331.2	373.2	54131.1
34	169	32.2	161000	0.562	12917.2	373.2	54131.1
35	169	33.2	161000	0.579	12528.1	373.2	54131.1
36	171	34.2	163000	0.597	12312.9	377.9	54803.6
37	172	35.2	164000	0.614	12036.5	380.2	55139.8
38	172	36.2	164000	0.632	11704.0	380.2	55139.8
39	173	37.2	165000	0.649	11458.8	382.5	55476.0
40	173	38.2	165000	0.667	11158.8	382.5	55476.0
41	174	39.2	166000	0.684	10940.1	384.8	55812.2
42	174	40.2	166000	0.702	10667.9	384.8	55812.2
43	175	41.2	167000	0.719	10471.7	387.1	56148.4
44	175	42.2	167000	0.737	10223.6	387.1	56148.4
45	175	43.2	167000	0.754	9986.9	387.1	56148.4
46	175	44.2	167000	0.771	9761.0	387.1	56148.4
47	176	45.2	168000	0.789	9602.2	389.4	56484.6
48	176	46.2	168000	0.806	9394.3	389.4	56484.6
49	177	47.2	169000	0.824	9250.0	391.8	56820.9
50	178	48.2	170000	0.841	9111.7	394.1	57157.1
51	179	49.2	171000	0.859	8979.0	396.4	57493.3
52	180	50.2	172000	0.876	8851.6	398.7	57829.5
53	181	51.2	173000	0.894	8729.2	401.0	58165.7
54	182	52.2	174000	0.911	8611.5	403.4	58501.9
55	183	53.2	175000	0.929	8498.2	405.7	58838.2
56	184	54.2	176000	0.946	8389.0	408.0	59174.4
57	185	55.2	177000	0.963	8283.9	410.3	59510.6
58	186	56.2	178000	0.981	8182.4	412.6	59846.8
59	186	57.2	178000	0.998	8039.4	412.6	59846.8
60	186	58.2	178000	1.016	7901.2	412.6	59846.8
65	188	63.2	180000	1.103	7357.9	417.3	60519.3
70	190	68.2	182000	1.190	6894.2	421.9	61191.7
75	196	73.2	188000	1.278	6635.1	435.8	63209.0
80	199	78.2	191000	1.365	6309.9	442.8	64217.7
85	202	83.2	194000	1.452	6023.9	449.7	65226.3
90	206	88.2	198000	1.539	5799.6	459.0	66571.2
95	209	93.2	201000	1.627	5571.6	465.9	67579.8
100	212	98.2	204000	1.714	5366.8	472.9	68588.5
105	216	103.2	208000	1.801	5206.9	482.2	69933.4
110	219	108.2	211000	1.888	5037.9	489.1	70942.0

115	221	113.2	213000	1.976	4861.1	493.8	71614.5
120	223	118.2	215000	2.063	4699.2	498.4	72286.9
125	227	123.2	219000	2.150	4592.3	507.7	73631.8
130	229	128.2	221000	2.238	4453.5	512.3	74304.2
135	229	133.2	221000	2.325	4286.3	512.3	74304.2
140	232	138.2	224000	2.412	4187.3	519.3	75312.9
145	232	143.2	224000	2.499	4041.1	519.3	75312.9
150	232	148.2	224000	2.587	3904.8	519.3	75312.9
155	233	153.2	225000	2.674	3794.2	521.6	75649.1
160	233	158.2	225000	2.761	3674.3	521.6	75649.1
165	233	163.2	225000	2.848	3561.7	521.6	75649.1
170	233	168.2	225000	2.936	3455.9	521.6	75649.1
175	233	173.2	225000	3.023	3356.1	521.6	75649.1

Fuente: Personal



**Gráfico 4.58 Ángulo Vs. Esfuerzo Torsional Ensayo 3**

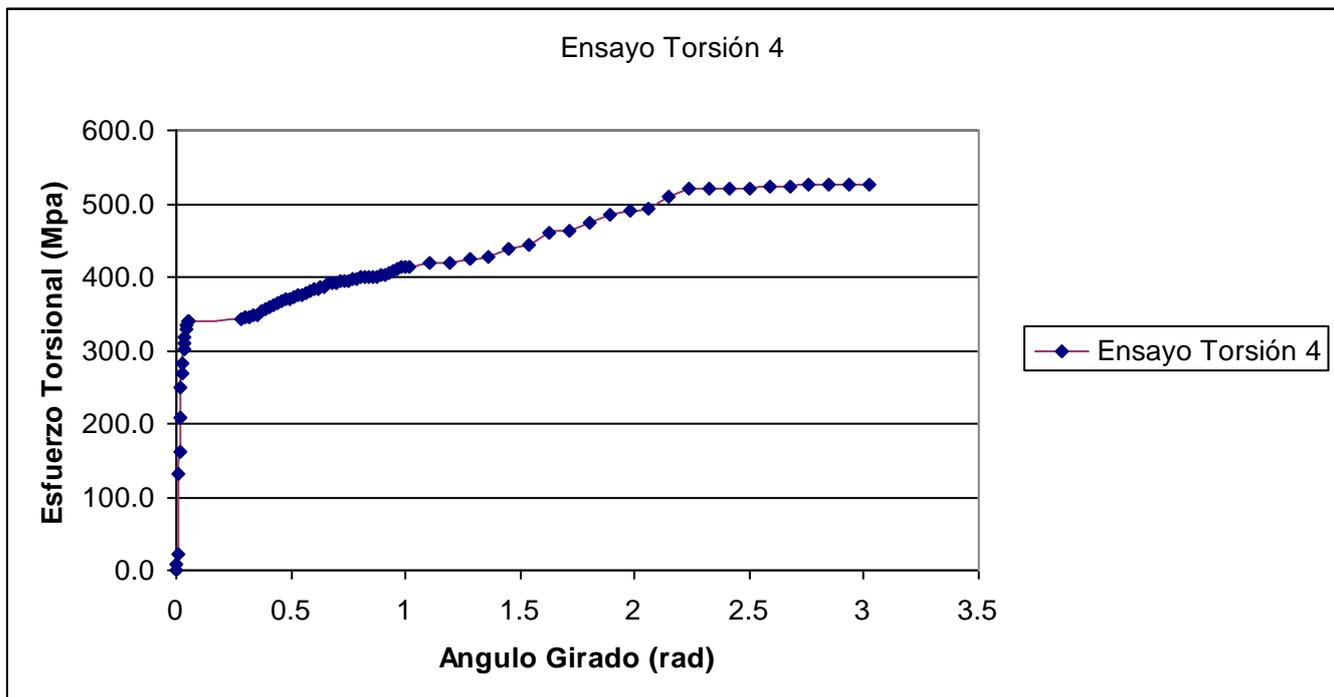
**Tabla 4.18 Ensayo Torsión 4**

Ensayo 4					mod. rig	esf. Tors	esf. Tors
Angulo	Torque Nm	Angulo Corr	Torque Corr	Angulo en Rad	G	$\tau$	$\tau$
grados	Nm	grados	Nmm	Rad	Mpa	Mpa	Psi
1	5	0	0	0	0	0.0	0.0
2	12	0.2	4000	0.003	51668.8	9.3	1344.9
3	18	0.4	10000	0.007	64586.0	23.2	3362.2
4	65	0.6	57000	0.010	245426.8	132.1	19164.4
5	78	0.8	70000	0.014	226051.0	162.3	23535.3
6	98	1	90000	0.017	232509.6	208.6	30259.6
7	115	1.2	107000	0.021	230356.8	248.0	35975.3
8	124	1.4	116000	0.024	214056.5	268.9	39001.3
9	130	1.6	122000	0.028	196987.3	282.8	41018.6
10	138	1.8	130000	0.031	186581.8	301.4	43708.4
11	142	2	134000	0.035	173090.5	310.6	45053.2
12	145	2.2	137000	0.038	160877.9	317.6	46061.9
13	150	2.4	142000	0.042	152853.6	329.2	47743.0
14	152	2.6	144000	0.045	143082.9	333.8	48415.4
15	154	2.8	146000	0.049	134708.0	338.4	49087.8
16	155	3	147000	0.052	126588.6	340.8	49424.1
17	155	3.2	147000	0.056	118676.8	340.8	49424.1
18	156	16.2	148000	0.283	23601.8	343.1	49760.3
19	157	17.2	149000	0.300	22379.8	345.4	50096.5
20	157	18.2	149000	0.318	21150.1	345.4	50096.5
21	158	19.2	150000	0.335	20183.1	347.7	50432.7
22	158	20.2	150000	0.353	19184.0	347.7	50432.7
23	160	21.2	152000	0.370	18522.8	352.4	51105.2
24	162	22.2	154000	0.387	17921.2	357.0	51777.6
25	163	23.2	155000	0.405	17260.1	359.3	52113.8
26	164	24.2	156000	0.422	16653.6	361.6	52450.0
27	165	25.2	157000	0.440	16095.2	363.9	52786.2
28	166	26.2	158000	0.457	15579.5	366.3	53122.5
29	168	27.2	160000	0.475	15196.7	370.9	53794.9
30	168	28.2	160000	0.492	14657.8	370.9	53794.9
31	169	29.2	161000	0.510	14244.3	373.2	54131.1
32	170	30.2	162000	0.527	13858.2	375.5	54467.3
33	170	31.2	162000	0.545	13414.0	375.5	54467.3

34	171	32.2	163000	0.562	13077.7	377.9	54803.6
35	172	33.2	164000	0.579	12761.6	380.2	55139.8
36	174	34.2	166000	0.597	12539.5	384.8	55812.2
37	174	35.2	166000	0.614	12183.3	384.8	55812.2
38	175	36.2	167000	0.632	11918.1	387.1	56148.4
39	175	37.2	167000	0.649	11597.7	387.1	56148.4
40	177	38.2	169000	0.667	11429.4	391.8	56820.9
41	177	39.2	169000	0.684	11137.8	391.8	56820.9
42	177	40.2	169000	0.702	10860.7	391.8	56820.9
43	178	41.2	170000	0.719	10659.8	394.1	57157.1
44	178	42.2	170000	0.737	10407.2	394.1	57157.1
45	178	43.2	170000	0.754	10166.3	394.1	57157.1
46	179	44.2	171000	0.771	9994.8	396.4	57493.3
47	179	45.2	171000	0.789	9773.6	396.4	57493.3
48	180	46.2	172000	0.806	9618.0	398.7	57829.5
49	180	47.2	172000	0.824	9414.2	398.7	57829.5
50	180	48.2	172000	0.841	9218.9	398.7	57829.5
51	181	49.2	173000	0.859	9084.0	401.0	58165.7
52	181	50.2	173000	0.876	8903.1	401.0	58165.7
53	182	51.2	174000	0.894	8779.7	403.4	58501.9
54	182	52.2	174000	0.911	8611.5	403.4	58501.9
55	183	53.2	175000	0.929	8498.2	405.7	58838.2
56	184	54.2	176000	0.946	8389.0	408.0	59174.4
57	185	55.2	177000	0.963	8283.9	410.3	59510.6
58	186	56.2	178000	0.981	8182.4	412.6	59846.8
59	187	57.2	179000	0.998	8084.5	414.9	60183.0
60	187	58.2	179000	1.016	7945.6	414.9	60183.0
65	189	63.2	181000	1.103	7398.8	419.6	60855.5
70	189	68.2	181000	1.190	6856.3	419.6	60855.5
75	191	73.2	183000	1.278	6458.6	424.2	61527.9
80	192	78.2	184000	1.365	6078.7	426.5	61864.1
85	197	83.2	189000	1.452	5868.6	438.1	63545.2
90	200	88.2	192000	1.539	5623.8	445.1	64553.9
95	206	93.2	198000	1.627	5488.4	459.0	66571.2
100	208	98.2	200000	1.714	5261.6	463.6	67243.6
105	212	103.2	204000	1.801	5106.8	472.9	68588.5
110	217	108.2	209000	1.888	4990.2	484.5	70269.6
115	220	113.2	212000	1.976	4838.2	491.4	71278.2
120	221	118.2	213000	2.063	4655.4	493.8	71614.5

125	228	123.2	220000	2.150	4613.3	510.0	73968.0
130	232	128.2	224000	2.238	4514.0	519.3	75312.9
135	232	133.2	224000	2.325	4344.5	519.3	75312.9
140	233	138.2	225000	2.412	4206.0	521.6	75649.1
145	233	143.2	225000	2.499	4059.2	521.6	75649.1
150	234	148.2	226000	2.587	3939.7	523.9	75985.3
155	234	153.2	226000	2.674	3811.1	523.9	75985.3
160	235	158.2	227000	2.761	3707.0	526.2	76321.5
165	235	163.2	227000	2.848	3593.4	526.2	76321.5
170	235	168.2	227000	2.936	3486.6	526.2	76321.5
175	235	173.2	227000	3.023	3385.9	526.2	76321.5

Fuente: Personal



**Gráfico 4.59 Ángulo Vs. Esfuerzo Torsional Ensayo 4**

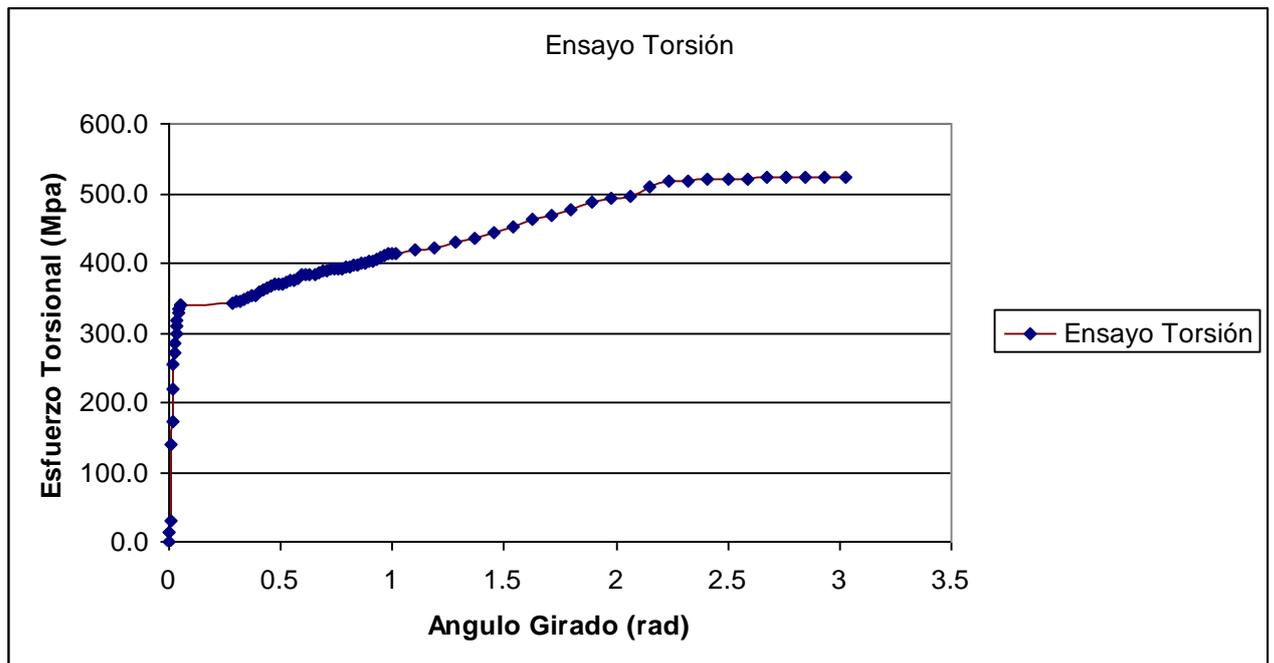
**Tabla 4.19 Ensayo Torsión 5**

Ensayo 5					mod. rig	esf. Tors	esf. Tors
Angulo	Torque Nm	Angulo Corr	Torque Corr	Angulo en Rad	G	$\tau$	$\tau$
grados	Nm	grados	Nmm	Rad	Mpa	Mpa	Psi
1	6	0	0	0	0	0.0	0.0
2	14	0.2	6000	0.003	77503.2	13.9	2017.3
3	21	0.4	13000	0.007	83961.8	30.1	4370.8
4	68	0.6	60000	0.010	258344.0	139.1	20173.1
5	82	0.8	74000	0.014	238968.2	171.5	24880.1
6	102	1	94000	0.017	242843.4	217.9	31604.5
7	118	1.2	110000	0.021	236815.4	255.0	36984.0
8	125	1.4	117000	0.024	215901.8	271.2	39337.5
9	131	1.6	123000	0.028	198602.0	285.1	41354.8
10	137	1.8	129000	0.031	185146.6	299.0	43372.1
11	141	2	133000	0.035	171798.8	308.3	44717.0
12	145	2.2	137000	0.038	160877.9	317.6	46061.9
13	150	2.4	142000	0.042	152853.6	329.2	47743.0
14	152	2.6	144000	0.045	143082.9	333.8	48415.4
15	154	2.8	146000	0.049	134708.0	338.4	49087.8
16	155	3	147000	0.052	126588.6	340.8	49424.1
17	155	3.2	147000	0.056	118676.8	340.8	49424.1
18	156	16.2	148000	0.283	23601.8	343.1	49760.3
19	157	17.2	149000	0.300	22379.8	345.4	50096.5
20	157	18.2	149000	0.318	21150.1	345.4	50096.5
21	158	19.2	150000	0.335	20183.1	347.7	50432.7
22	159	20.2	151000	0.353	19311.9	350.0	50768.9
23	160	21.2	152000	0.370	18522.8	352.4	51105.2
24	161	22.2	153000	0.387	17804.8	354.7	51441.4
25	163	23.2	155000	0.405	17260.1	359.3	52113.8
26	164	24.2	156000	0.422	16653.6	361.6	52450.0
27	165	25.2	157000	0.440	16095.2	363.9	52786.2
28	166	26.2	158000	0.457	15579.5	366.3	53122.5
29	167	27.2	159000	0.475	15101.7	368.6	53458.7
30	167	28.2	159000	0.492	14566.2	368.6	53458.7
31	168	29.2	160000	0.510	14155.8	370.9	53794.9

32	169	30.2	161000	0.527	13772.6	373.2	54131.1
33	170	31.2	162000	0.545	13414.0	375.5	54467.3
34	170	32.2	162000	0.562	12997.4	375.5	54467.3
35	171	33.2	163000	0.579	12683.8	377.9	54803.6
36	173	34.2	165000	0.597	12464.0	382.5	55476.0
37	173	35.2	165000	0.614	12109.9	382.5	55476.0
38	174	36.2	166000	0.632	11846.7	384.8	55812.2
39	174	37.2	166000	0.649	11528.3	384.8	55812.2
40	175	38.2	167000	0.667	11294.1	387.1	56148.4
41	176	39.2	168000	0.684	11071.9	389.4	56484.6
42	176	40.2	168000	0.702	10796.5	389.4	56484.6
43	177	41.2	169000	0.719	10597.1	391.8	56820.9
44	177	42.2	169000	0.737	10346.0	391.8	56820.9
45	177	43.2	169000	0.754	10106.5	391.8	56820.9
46	177	44.2	169000	0.771	9877.9	391.8	56820.9
47	178	45.2	170000	0.789	9716.5	394.1	57157.1
48	178	46.2	170000	0.806	9506.2	394.1	57157.1
49	179	47.2	171000	0.824	9359.5	396.4	57493.3
50	179	48.2	171000	0.841	9165.3	396.4	57493.3
51	180	49.2	172000	0.859	9031.5	398.7	57829.5
52	181	50.2	173000	0.876	8903.1	401.0	58165.7
53	182	51.2	174000	0.894	8779.7	403.4	58501.9
54	182	52.2	174000	0.911	8611.5	403.4	58501.9
55	183	53.2	175000	0.929	8498.2	405.7	58838.2
56	184	54.2	176000	0.946	8389.0	408.0	59174.4
57	185	55.2	177000	0.963	8283.9	410.3	59510.6
58	186	56.2	178000	0.981	8182.4	412.6	59846.8
59	187	57.2	179000	0.998	8084.5	414.9	60183.0
60	187	58.2	179000	1.016	7945.6	414.9	60183.0
65	189	63.2	181000	1.103	7398.8	419.6	60855.5
70	190	68.2	182000	1.190	6894.2	421.9	61191.7
75	194	73.2	186000	1.278	6564.5	431.2	62536.6
80	196	78.2	188000	1.365	6210.8	435.8	63209.0
85	200	83.2	192000	1.452	5961.8	445.1	64553.9
90	203	88.2	195000	1.539	5711.7	452.0	65562.5
95	208	93.2	200000	1.627	5543.9	463.6	67243.6
100	210	98.2	202000	1.714	5314.2	468.3	67916.1
105	214	103.2	206000	1.801	5156.9	477.5	69260.9
110	218	108.2	210000	1.888	5014.1	486.8	70605.8

115	221	113.2	213000	1.976	4861.1	493.8	71614.5
120	222	118.2	214000	2.063	4677.3	496.1	71950.7
125	228	123.2	220000	2.150	4613.3	510.0	73968.0
130	231	128.2	223000	2.238	4493.8	516.9	74976.6
135	231	133.2	223000	2.325	4325.1	516.9	74976.6
140	233	138.2	225000	2.412	4206.0	521.6	75649.1
145	233	143.2	225000	2.499	4059.2	521.6	75649.1
150	233	148.2	225000	2.587	3922.2	521.6	75649.1
155	234	153.2	226000	2.674	3811.1	523.9	75985.3
160	234	158.2	226000	2.761	3690.6	523.9	75985.3
165	234	163.2	226000	2.848	3577.6	523.9	75985.3
170	234	168.2	226000	2.936	3471.2	523.9	75985.3
175	234	173.2	226000	3.023	3371.0	523.9	75985.3

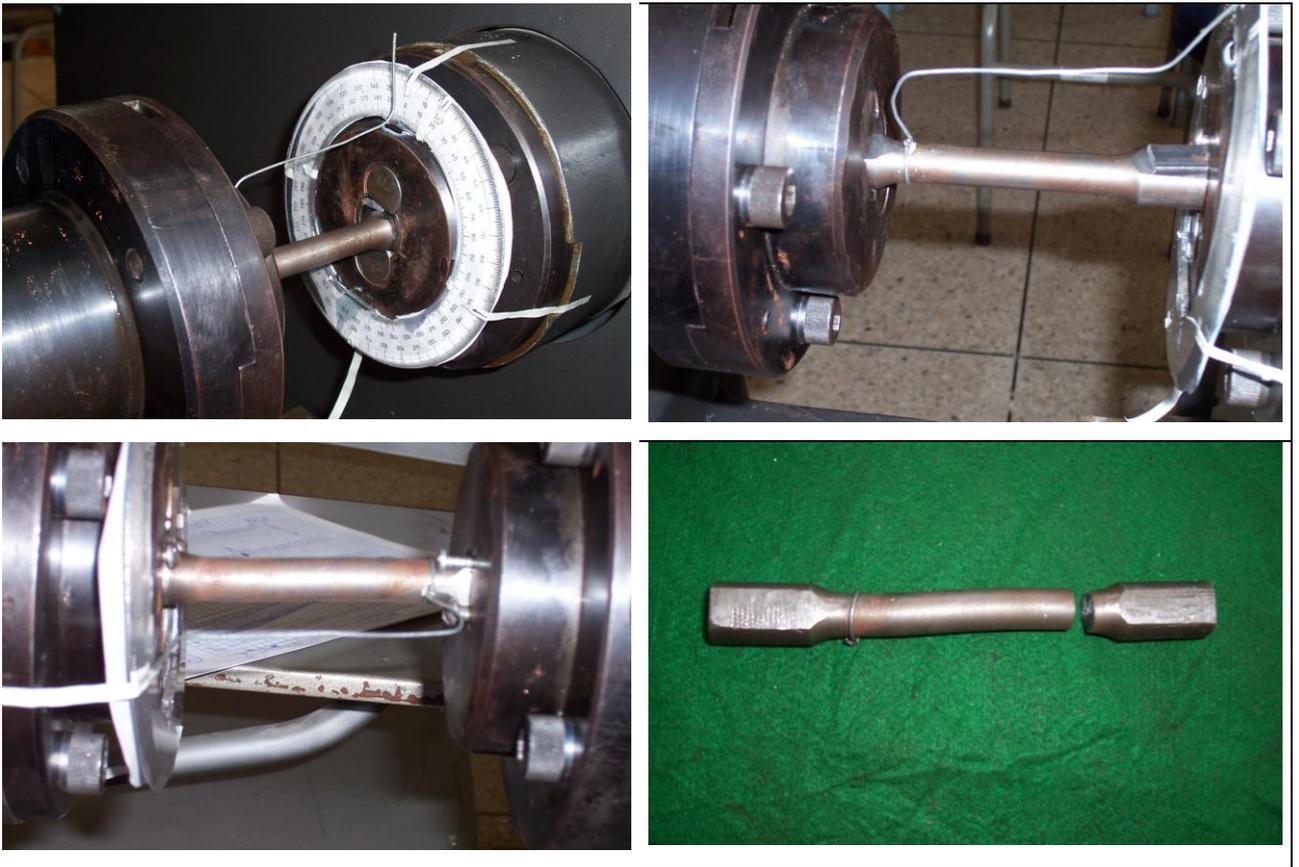
Fuente: Personal



**Gráfico 4.60 Ángulo Vs. Esfuerzo Torsional Ensayo 5**

**Módulo de Rigidez Promedio G:** 3362.05 Mpa

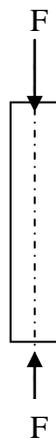
**Esfuerzo Torsional Promedio  $\tau$  :** 524.35 Mpa, 75783.56 Psi



**Imagen 4.61 Durante Ensayo de torsión.**

#### 4.3.1.5 Compresión

El ensayo de compresión consiste en aplicar una fuerza de compresión en una superficie perpendicular a esta , es decir que la fuerza está en la misma línea del eje de la sección, y mediante los datos de fuerza y deformación obtenidos durante el ensayo se determinará el valor del Esfuerzo de Compresión .



**Figura 4.62 Esquema de ensayo de Compresión.**

El Esfuerzo de compresión se define como:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

**Ecuación 4.10**

El área de la sección :

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

**Ecuación 4.11**

Y la Fuerza F es función de la Gravedad g (9.81 m/s<sup>2</sup>) y la carga Q (kg ) aplicada en el ensayo.

$$F = Q * g$$

**Ecuación 4.12**



**Imagen 4.63 Maquina de Ensayos Universales RM 29**



**Imagen 4.64 Probetas de Compresión**

El Ensayo se realizó en la maquina de ensayos universales AMSLER RM 29 ubicada en le laboratorio de resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPE, la máquina cuenta con un dispositivo con círculos concéntricos trazados en el lugar donde se debe colocar las probetas, tiene una capacidad de 40 toneladas , se coloca la probeta en el centro de los platos y se un comprador de reloj en el cabezal móvil ,con el objetivo de medir el desplazamiento del plato .

La fuerza se aplica en forma progresiva, no bruscamente, y el ensayo debe durar mas de 15 segundos, esta referencia de tiempo es tomada de la Norma ASTM A48 (ART 9.2) para ensayos en fundición de hierro.

**Características de la Probeta:**

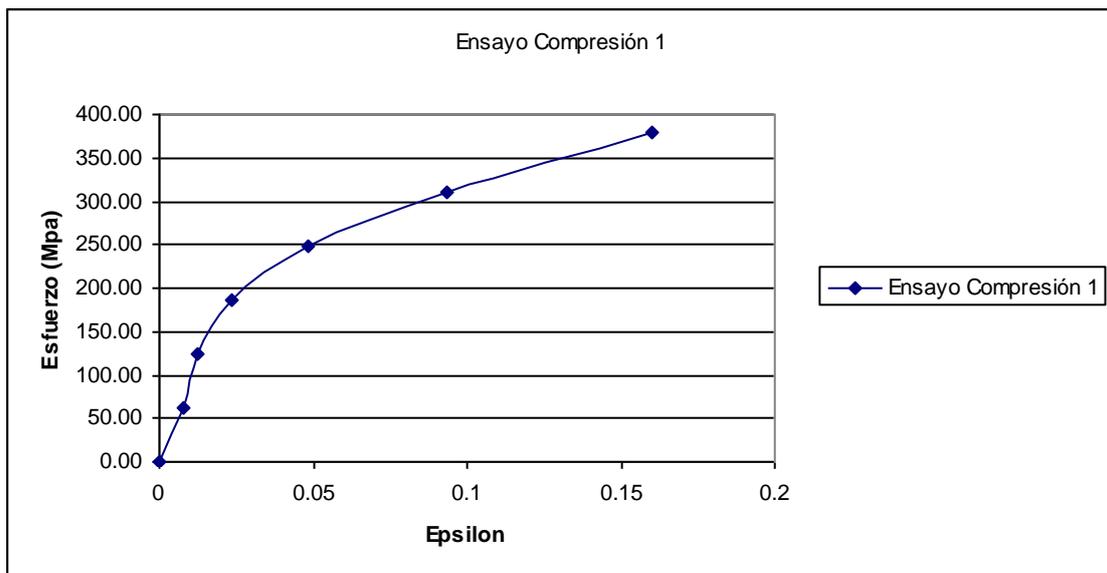
Diámetro : 20+/- 0,04 mm

Longitud: 30 +/- 0,04 mm

**Tabla 4.20 Ensayo de Compresión 1**

Ensayo 1										
Compresión	Carga	Diámetro	Area	Lo	Lf	F	Esfuerzo	Esfuerzo	% e	Epsilon
	Ton	mm	mm <sup>2</sup>	mm	Mm	N	Mpa	Psi		
0	0	20.04	315.42	30	30	30	0.00	0.00	0.00	0
0.24	2	20.04	315.42	30	29.76	19620	62.20	9021.83	0.80	0.01
0.38	4	20.04	315.42	30	29.62	39240	124.41	18043.66	1.27	0.01
0.7	6	20.04	315.42	30	29.3	58860	186.61	27065.48	2.33	0.02
1.45	8	20.04	315.42	30	28.55	78480	248.81	36087.31	4.83	0.05
2.8	10	20.04	315.42	30	27.2	98100	311.02	45109.14	9.33	0.09
<b>4.8</b>	<b>12.2</b>	<b>20.04</b>	<b>315.42</b>	<b>30</b>	<b>25.2</b>	<b>119682</b>	<b>379.44</b>	<b>55033.15</b>	<b>16.00</b>	<b>0.16</b>

Fuente: Personal

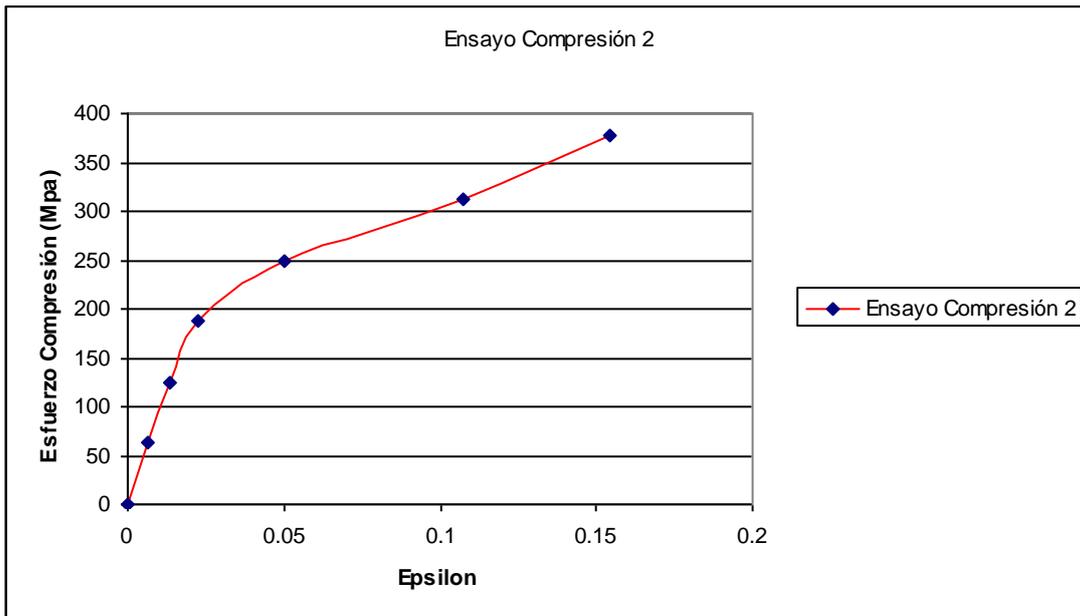


**Gráfico 4.65 Ensayo compresión 1**

**Tabla 4.21 Ensayo de Compresión 2**

Ensayo 2										
Compresión	Carga	Diametro	Area	Lo	Lf	F	Esfuerzo	Esfuerzo	% e	Epsilon
mm	Ton	mm	mm <sup>2</sup>	mm	Mm	N	Mpa	Psi		
0	0	20	314.16	29.8	29.8	0	0	0	0.00	0
0.2	2	20	314.16	29.8	29.6	19620	62.45	9057.95	0.67	0.01
0.4	4	20	314.16	29.8	29.4	39240	124.90	18115.90	1.34	0.01
0.67	6	20	314.16	29.8	29.13	58860	187.36	27173.85	2.25	0.02
1.5	8	20	314.16	29.8	28.3	78480	249.81	36231.80	5.03	0.05
3.2	10	20	314.16	29.8	26.6	98100	312.26	45289.76	10.74	0.11
<b>4.6</b>	<b>12.1</b>	<b>20</b>	<b>314.16</b>	<b>29.8</b>	<b>25.2</b>	<b>118701</b>	<b>377.84</b>	<b>54800.60</b>	<b>15.44</b>	<b>0.15</b>

Fuente: Personal

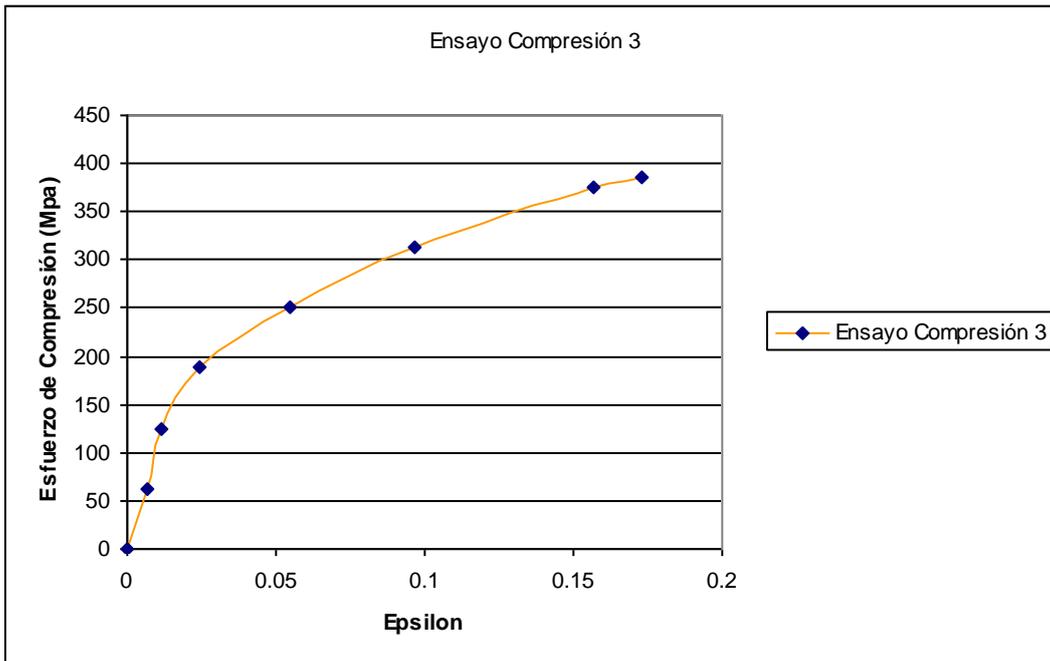


**Gráfico 4.66 Ensayo de Compresión 2**

**Tabla 4.22 Ensayo de Compresión 3**

<b>Ensayo 3</b>										
Compresión	Carga	Diametro	Area	Lo	Lf	F	Esfuerzo	Esfuerzo	% e	Epsilon
mm	Ton	mm	mm <sup>2</sup>	mm	Mm	N	Mpa	Psi		
0	0	19.96	312.9	30.02	30.02	0	0	0	0.00	0
0.2	2	19.96	312.90	30.02	29.82	19620	62.70	9094.29	0.67	0.01
0.34	4	19.96	312.90	30.02	29.68	39240	125.41	18188.58	1.13	0.01
0.73	6	19.96	312.90	30.02	29.29	58860	188.11	27282.88	2.43	0.02
1.65	8	19.96	312.90	30.02	28.37	78480	250.81	36377.17	5.50	0.05
2.9	10	19.96	312.90	30.02	27.12	98100	313.51	45471.46	9.66	0.10
4.7	12	19.96	312.90	30.02	25.32	117720	376.22	54565.75	15.66	0.16
<b>5.2</b>	<b>12.3</b>	<b>19.96</b>	<b>312.90</b>	<b>30.02</b>	<b>24.82</b>	<b>120663</b>	<b>385.62</b>	<b>55929.90</b>	<b>17.32</b>	<b>0.17</b>

Fuente: Personal

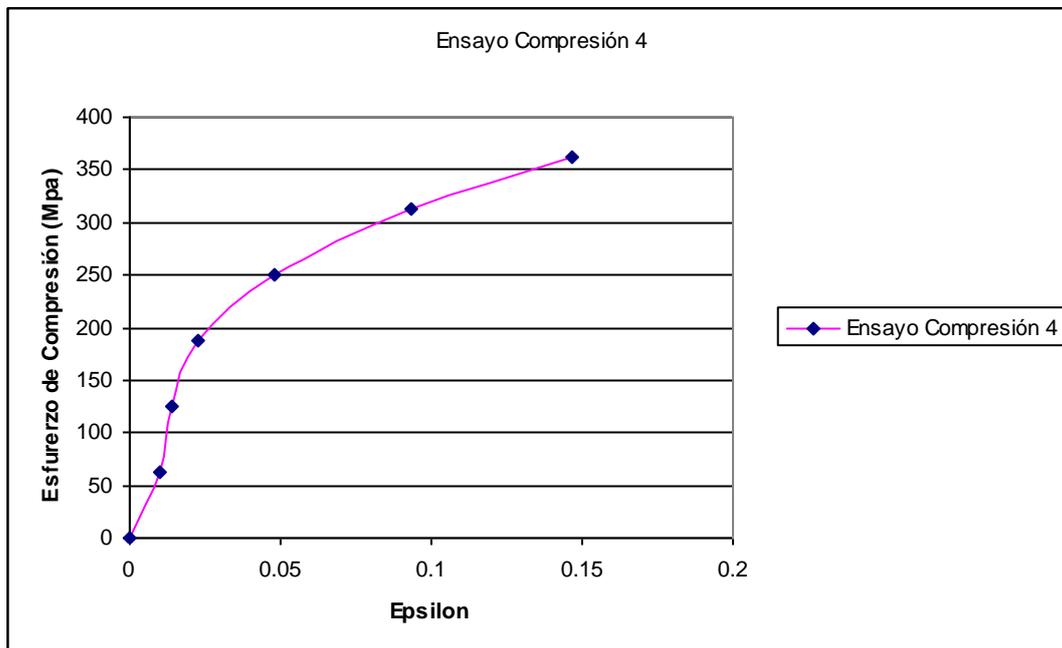


**Gráfico 4.67 Ensayo de Compresión 3**

**Tabla 4.23 Ensayo de Compresión 4**

<b>Ensayo 4</b>										
Compresión	Carga	Diametro	Area	Lo	Lf	F	Esfuerzo	Esfuerzo	% e	Epsilon
mm	Ton	mm	mm2	mm	Mm	N	Mpa	Psi		
0	0	20	314.16	30.04	29.54	0	0	0	0.00	0
0.3	2	20	314.16	30.04	29.74	19620	62.45	9057.95	1.00	0.01
0.42	4	20	314.16	30.04	29.62	39240	124.90	18115.90	1.40	0.014
0.68	6	20	314.16	30.04	29.36	58860	187.36	27173.85	2.26	0.02
1.45	8	20	314.16	30.04	28.59	78480	249.81	36231.80	4.83	0.05
2.8	10	20	314.16	30.04	27.24	98100	312.26	45289.76	9.32	0.09
<b>4.4</b>	<b>11.6</b>	<b>20</b>	<b>314.16</b>	<b>30.04</b>	<b>25.64</b>	<b>113796</b>	<b>362.22</b>	<b>52536.12</b>	<b>14.65</b>	<b>0.15</b>

Fuente: Personal

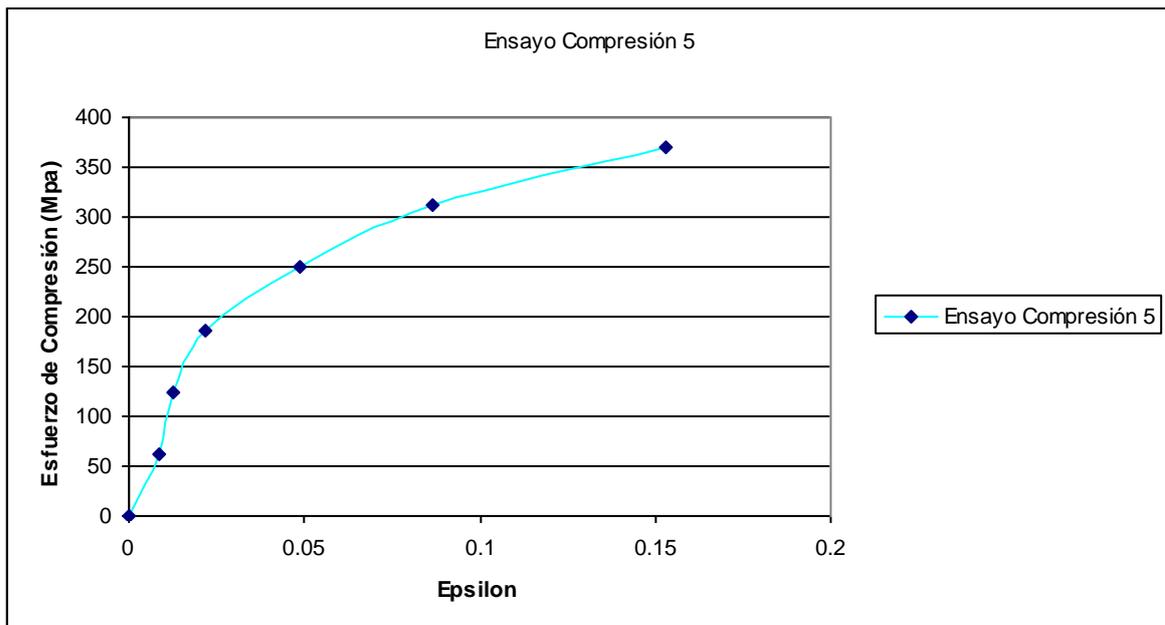


**Gráfico 4.68 Ensayo de compresión 4**

**Tabla 4.24 Ensayo de compresión 5**

<b>Ensayo 5</b>										
Compresión	Carga	Diametro	Area	Lo	Lf	F	Esfuerzo	Esfuerzo	% e	Epsilon
mm	Ton	mm	mm2	mm	Mm	N	Mpa	Psi		
0	0	20.02	314.79	30.02	30.02	0	0	0	0.00	0
0.26	2	20.02	314.79	30.02	29.76	19620	62.33	9039.86	0.87	0.01
0.38	4	20.02	314.79	30.02	29.64	39240	124.66	18079.72	1.27	0.013
0.66	6	20.02	314.79	30.02	29.36	58860	186.98	27119.59	2.20	0.02
1.46	8	20.02	314.79	30.02	28.56	78480	249.31	36159.45	4.86	0.05
2.6	10	20.02	314.79	30.02	27.42	98100	311.64	45199.31	8.66	0.09
<b>4.6</b>	<b>11.9</b>	<b>20.02</b>	<b>314.79</b>	<b>30.02</b>	<b>25.42</b>	<b>116739</b>	<b>370.85</b>	<b>53787.18</b>	<b>15.32</b>	<b>0.15</b>

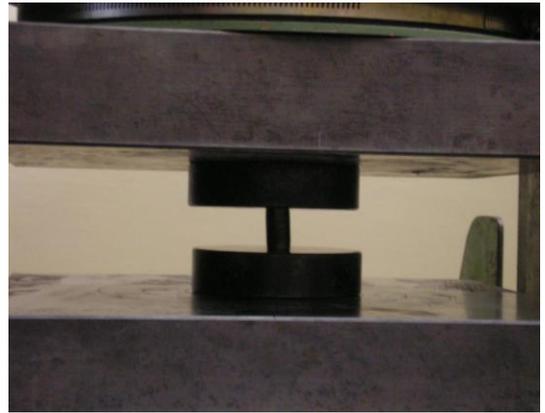
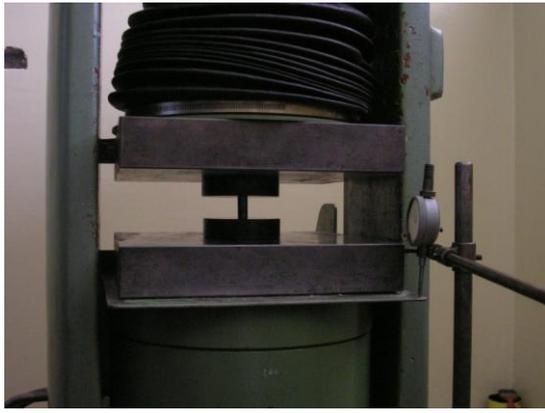
Fuente: Personal



**Gráfico 4.69 Ensayo Compresión 5**

**Esfuerzo compresión promedio: 375 Mpa , 54 417 Psi.**

**% e promedio : 15.75 %**



**Imagen 4.70 Durante el Ensayo de Compresión**

#### 4.1.3.6 Modulo de elasticidad y Coeficiente de Poisson

##### 4.1.3.6.1 Modulo de Elasticidad:

La parte inicial de los diagramas de esfuerzo deformación (Ensayo tracción) son generalmente una línea casi recta, y es una practica común aproximar a esta línea recta los puntos del gráfico para promediar un valor del modulo de elasticidad, que según la ley de Hooke (Ecuación 4...) es la pendiente de esta recta.

$$\sigma = E * \varepsilon$$

**Ecuación 4.13**

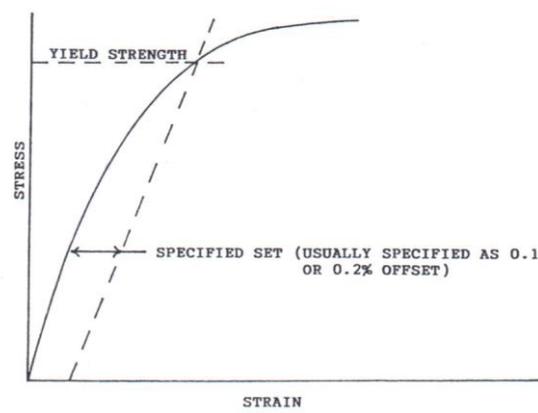
Donde:

E: Modulo de Elasticidad o de Young

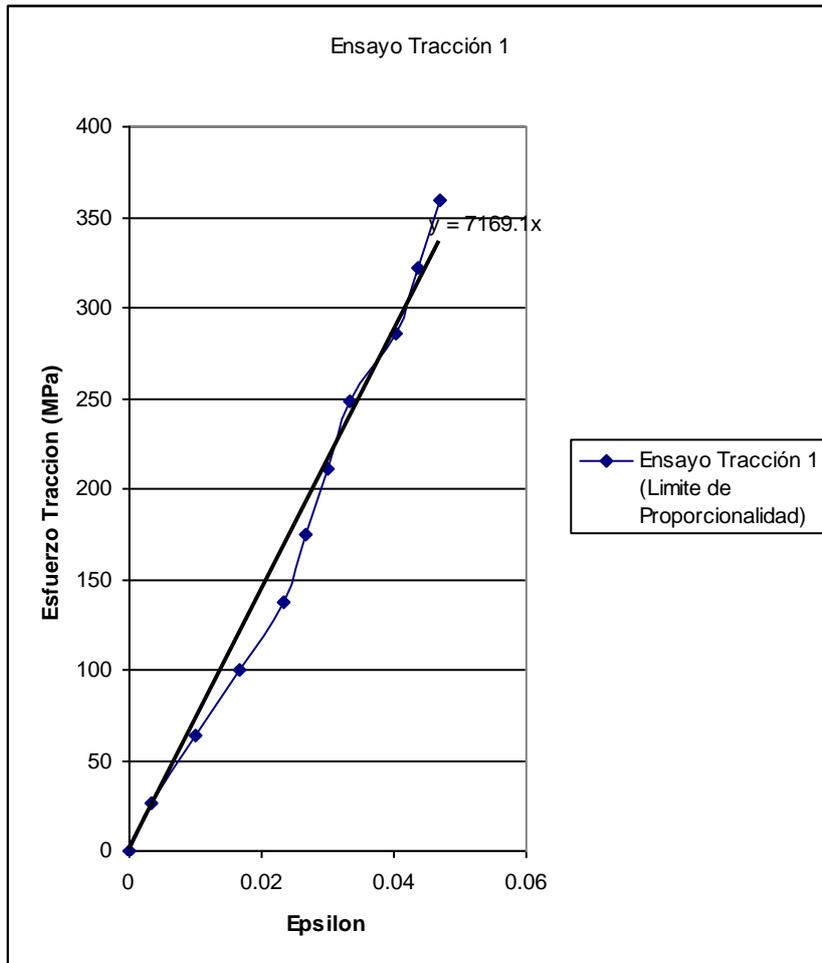
$\varepsilon$ : Deformación unitaria

$\sigma$ : Esfuerzo (Tracción)

Para determinar el valor del Modulo de Elasticidad  $E$  , se tomará los valores de los ensayos de tracción hasta los puntos que determina el límite de fluencia ya que estos determinan el comportamiento casi recto de el gráfico, se usará un grafico referencial del Ensayo de Tracción 1 para mostrar lo antes expuesto.



**Gráfico 4.71 Curva característica del Hierro Dúctil A Tracción**



**Gráfico 4.72 Determinación Gráfica de E(Gpa)**

**Pendiente (E) =7169 Mpa**

**Tabla 4.25 Determinación Modulo de Elasticidad:**

Ensayo 1				
Esfuerzo	Esfuerzo	Epsilon	E	E
Mpa	Psi		Mpa	Psi
0	0	0	0	0
26.61	3859.01	0.003	7950.78	1,153,162.63
63.56	9218.74	0.010	6331.18	918,259.13
100.52	14578.48	0.017	6007.26	871,278.43
137.47	19938.21	0.023	5868.43	851,143.85
174.42	25297.95	0.027	6515.22	944,952.71
211.38	30657.68	0.030	7018.28	1,017,915.16
248.33	36017.42	0.033	7420.73	1,076,285.12
285.29	41377.15	0.040	7104.17	1,030,372.16

322.24	46736.88	0.044	7407.14	1,074,313.90
359.19	52096.62	0.047	7666.82	1,111,978.25
		<b>E</b>	<b>6929.00</b>	<b>1,004,966.13</b>

**Ensayo 2**

<b>Esfuerzo</b>	<b>Esfuerzo</b>	<b>Epsilon</b>	<b>E</b>	<b>E</b>
<b>Mpa</b>	<b>Psi</b>		<b>Mpa</b>	<b>Psi</b>
0.00	0	0	0	0
26.53	3,847	0.003	7926.37	1,149,622.61
63.37	9,190	0.010	6311.74	915,440.22
100.21	14,534	0.017	5988.81	868,603.75
137.05	19,877	0.023	5850.42	848,530.97
173.89	25,220	0.0268	6495.22	942,051.86
210.73	30563.57	0.030	6996.74	1,014,790.33
247.57	35906.85	0.033	7397.95	1,072,981.10
284.41	41250.13	0.040	7082.36	1,027,209.09
321.25	46593.41	0.044	7384.40	1,071,015.93
358.09	51936.69	0.047	7643.29	1,108,564.66
		<b>E</b>	<b>6907.73</b>	<b>1,001,881.05</b>

**Ensayo 3**

<b>Esfuerzo</b>	<b>Esfuerzo</b>	<b>Epsilon</b>	<b>E</b>	<b>E</b>
<b>Mpa</b>	<b>Psi</b>		<b>Mpa</b>	<b>Psi</b>
0	0	0	0	0
26.61	3859.01	0.00	7950.78	1,153,162.63
63.56	9218.74	0.01	6331.18	918,259.13
100.52	14578.48	0.02	6007.26	871,278.43
137.47	19938.21	0.02	5868.43	851,143.85
174.42	25297.95	0.03	6515.22	944,952.71
211.38	30657.68	0.03	7018.28	1,017,915.16
248.33	36017.42	0.03	7420.73	1,076,285.12
285.29	41377.15	0.04	7104.17	1,030,372.16
322.24	46736.88	0.04	7407.14	1,074,313.90
359.19	52096.62	0.05	7666.82	1,111,978.25
		<b>E</b>	<b>6930</b>	<b>1,005,000.27</b>

**Ensayo 4**

<b>Esfuerzo</b>	<b>Esfuerzo</b>	<b>Epsilon</b>	<b>E</b>	<b>E</b>
<b>Mpa</b>	<b>Psi</b>		<b>Mpa</b>	<b>Psi</b>
0	0	0	0	0
26.61	3859.01	0.003	7950.78	1,153,162.63

63.56	9218.74	0.010	6209.42	900,600.30
100.52	14578.48	0.017	6007.26	871,278.43
137.47	19938.21	0.023	5868.43	851,143.85
174.42	25297.95	0.027	6515.22	944,952.71
211.38	30657.68	0.030	7018.28	1,017,915.16
248.33	36017.42	0.033	7420.73	1,076,285.12
285.29	41377.15	0.040	7104.17	1,030,372.16
322.24	46736.88	0.044	7407.14	1,074,313.90
359.19	52096.62	0.047	7666.82	1,111,978.25
			<b>E</b>	<b>6916.82</b>
				<b>1,003,200.25</b>

Ensayo 5				
<b>Esfuerzo</b>	<b>Esfuerzo</b>	<b>Epsilon</b>	<b>E</b>	<b>E</b>
<b>Mpa</b>	<b>Psi</b>		<b>Mpa</b>	<b>Psi</b>
0	0	0	0	0
26.61	3859.01	0.003	7950.780	1,153,162.63
63.56	9218.74	0.010	6209.423	900,600.30
100.52	14578.48	0.017	6007.256	871,278.43
137.47	19938.21	0.023	5868.433	851,143.85
174.42	25297.95	0.027	6515.222	944,952.71
211.38	30657.68	0.030	7018.281	1,017,915.16
248.33	36017.42	0.033	7420.728	1,076,285.12
285.29	41377.15	0.040	7104.169	1,030,372.16
322.24	46736.88	0.044	7407.137	1,074,313.90
359.19	52096.62	0.047	7666.823	1,111,978.25
			<b>E</b>	<b>6916.825</b>
				<b>1,003,200.25</b>

**Continuación Tabla 4.25**

Fuente: Personal

**Modulo de Elasticidad E:** 6920 Mpa ,1 003 672 Psi

4.3.1.6.2 Coeficiente de Poisson:

El coeficiente de Poisson relaciona las deformaciones tanto perpendiculares como paralelas a la carga a la que un material se encuentra sometido. Dado que la deformación axial y lateral tiene signos opuestos , el signo negativo de la expresión asegura un valor positivo para estas, y la relación está dado por:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{lat}}{\varepsilon_{long}}$$

**Ecuación 4.14**

La relación de Poisson es una constante para esfuerzos que se encuentran por debajo de el límite de proporcionalidad y tiene un valor entre ¼ y 1/3 para la mayoría de los metales.

Para determinar el coeficiente de Poisson se realizo las mediciones mediante el uso de galgas extensiométricas una en sentido longitudinal y otro en sentido transversal para obtener los datos de deformación.

**Tabla 4.26 Coeficiente de Poisson**

<b>Ensayo 1</b>							
Ref Trans	2230						
Ref Axial	1654						
Coeficiente de Poisson							
	Transversal		Axial			Coef Poisson	
Kg	Lectura	Diferencia	Lectura	Direrencia			
500	2187	-43	1810	156		0.276	
1000	2180	-50	1824	170		0.294	
1500	2173	-57	1868	214		0.266	
2000	2161	-69	1901	247		0.279	
2500	2156	-74	1916	262		0.282	
3000	2142	-88	1958	304		0.289	
3500	2133	-97	2004	350		0.277	
4000	2112	-118	2074	420		0.281	
					<b>Promedio</b>	<b>0.281</b>	

<b>Ensayo 2</b>							
Ref Trans	1910						
Ref Axial	2345						
Coeficiente de Poisson							
	Transversal		Axial			Coef Poisson	
Kg	Lectura	Diferencia	Lectura	Direrencia			
500	1887	-23	2445	100		0.230	
1000	1872	-38	2481	136		0.279	
1500	1861	-49	2519	174		0.282	

2000	1848	-62	2564	219	0.283
2500	1832	-78	2605	260	0.300
3000	1818	-92	2669	324	0.284
3500	1796	-114	2748	403	0.283
4000	1775	-135	2822	477	0.283
<b>Promedio</b>					<b>0.278</b>

<b>Ensayo 3</b>					
Ref Trans	2458				
Ref Axial	1352				
Coeficiente de Poisson					
	Transversal		Axial		Coef Poisson
Kg	Lectura	Diferencia	Lectura	Diferencia	
500	2428	-30	1463	111	0.270
1000	2417	-41	1498	146	0.281
1500	2388	-70	1592	240	0.292
2000	2376	-82	1646	294	0.279
2500	2362	-96	1698	346	0.277
3000	2349	-109	1736	384	0.284
3500	2336	-122	1782	430	0.284
4000	2314	-144	1863	511	0.282
<b>Promedio</b>					<b>0.281</b>

**Coeficiente de Poisson Promedio: 0.280**

### Continuación Tabla 4.26

Fuente: Personal

### 4.3.2 ENSAYOS DINÁMICOS

Los Ensayos Dinámicos de Propiedades Mecánicas son ensayos destructivos, en los cuales las probetas son sometidas a cargas rápidamente aplicadas y a altas velocidad generalmente superiores a los 20 ciclos por segundo.

De igual manera que los ensayos estáticos los valores obtenidos mediante estos ensayos nos ayudan a predecir el comportamiento del material bajo ciertas circunstancias y parámetros que permitirá al diseñador realizar un trabajo preciso.

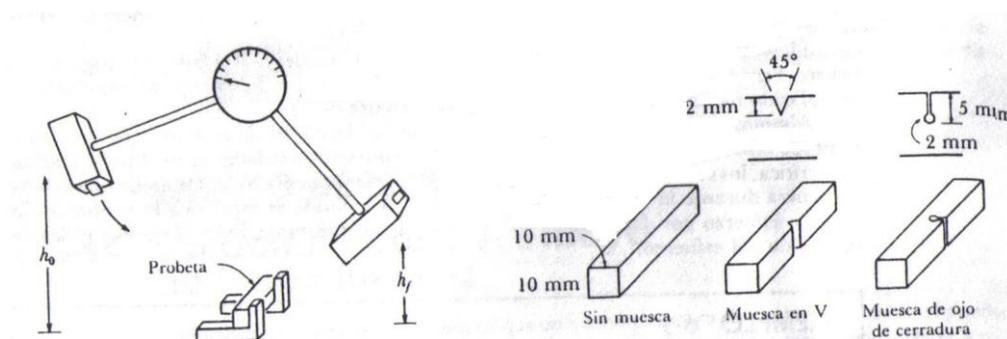
#### 4.3.2.1 Ensayo de Impacto Charpy

El ensayo de Impacto Charpy permite determinar la capacidad de absorción de energía de un material sometido a un impacto o choque brusco, es decir que se determina su resistencia a la ruptura bajo estas circunstancias extremas de carga.

Las probetas de ensayo Charpy pueden o no tener muescas, las probetas con muesca en V miden mejor la resistencia a la propagación de la fractura.

En el ensayo un péndulo pesado parte de una altura ( $h_0$ ) y gira, golpea y rompe la probeta, lo que causa que el péndulo al final del recorrido alcance una altura  $h_f$  menor a  $h_0$ , lo cual permite conocer la variación de energía potencial, esta diferencia es la energía absorbida por la probeta durante la ruptura, la capacidad de resistencia al impacto también se denomina tenacidad.

Debido a que frecuentemente no es posible predecir o controlar todas estas condiciones, el ensayo de impacto se utiliza mejor para la comparación y selección de materiales que para obtener criterios de diseño.



**Figura 4.73 Esquema de Ensayo Charpy**

El Ensayo de impacto Charpy se realizó en el laboratorio de resistencia de materiales de la facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPE en la máquina AMSLER para ensayo Charpy e Izod .

**Características de la Probeta:**

Longitud : 80 mm

Lado : 10mm x 10mm

Muesca V : 2mm profundidad a 45°

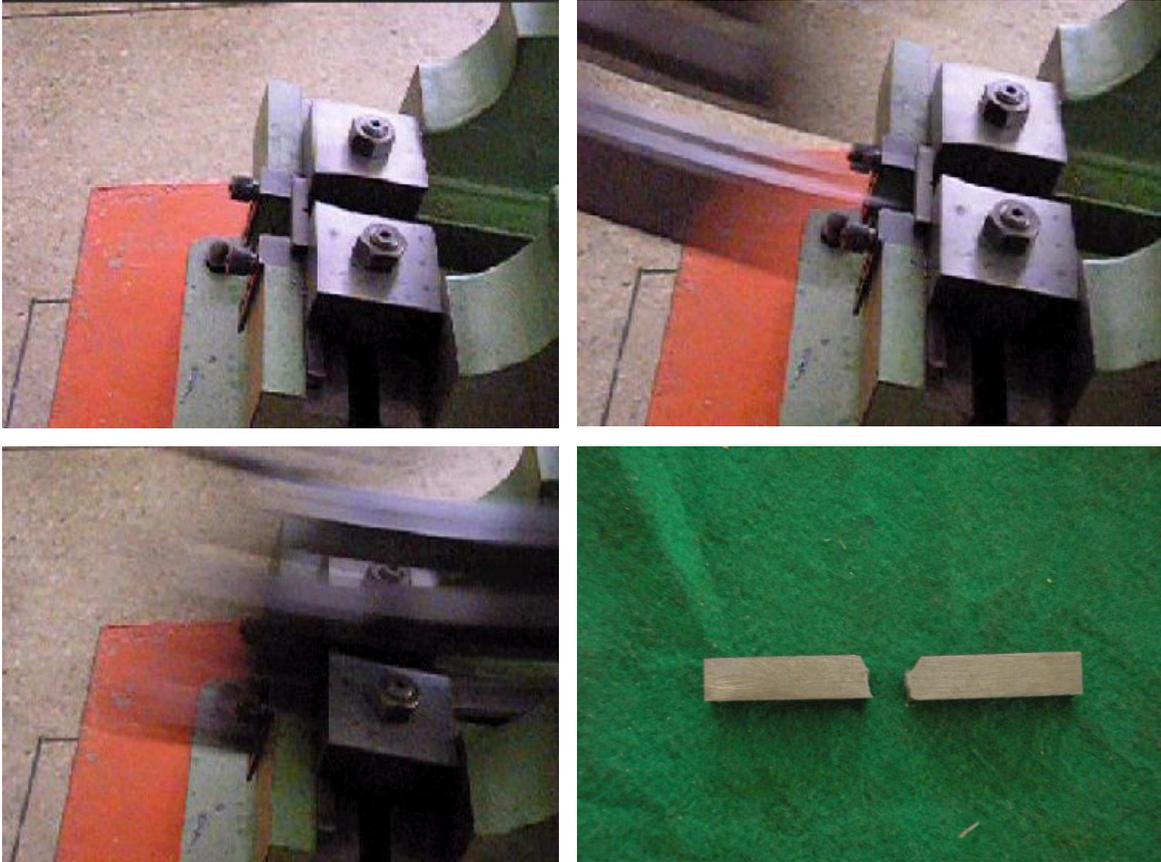
**Tabla 4.27 Ensayo de Impacto Charpy**

	Referencia	Lectura	Energía	Energía Corregida	E Absorbida	E Absorbida
	Kgm	Kgm	Kgm	Kgm	J*	Lbf x pie**
<b>Ensayo 1</b>	2.4	4.2	1.8	1.7	16.7	12.30
<b>Ensayo 2</b>	2.4	4.3	1.9	1.8	17.7	13.02
<b>Ensayo 3</b>	2.4	4.42	2.02	1.92	18.8	13.89
<b>Ensayo 4</b>	2.4	4.24	1.84	1.74	17.1	12.59
<b>Ensayo 5</b>	2.4	4.36	1.96	1.86	18.2	13.46
				<b>Energía Promedio</b>	<b>17.7</b>	<b>13.05</b>

$g^*(m/s^2) = 9.81$

$1 \text{ lbf x pie} = 1.356 \text{ J}$

Fuente: Personal



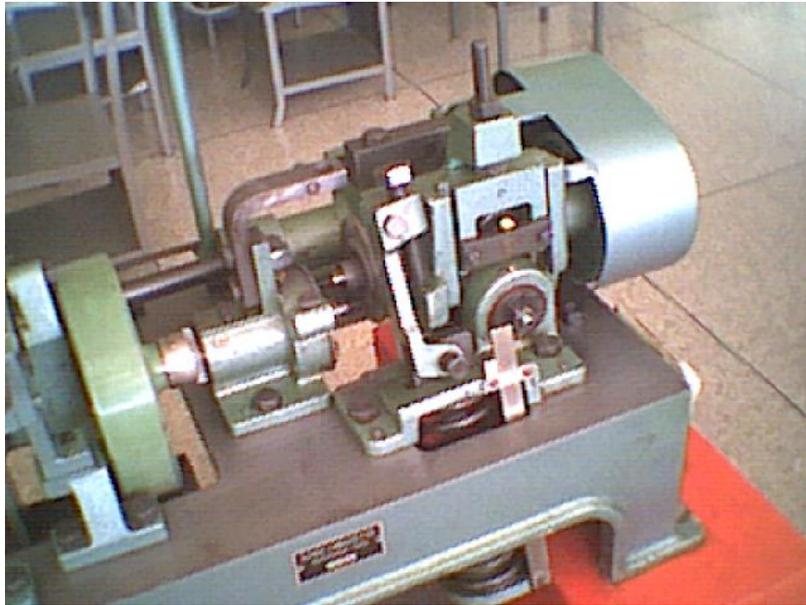
**Imagen 4.74 Ensayo de Impacto Charpy**

#### 4.3.2.2 Ensayo de Desgaste

El ensayo de desgaste no fue posible de realizar dado que las probetas para el ensayo de desgaste presentaban dimensiones muy superiores a las probetas disponibles y la maquina para este ensayo no admite probetas de una dimensión diferente a las establecidas para este, y las únicas probetas disponibles tienen las dimensiones para tracción de las cuales se realizaron la mayor cantidad de modificaciones para poder realizar el resto de ensayos.

Por otro lado uno de los objetivos de este documento es dejar precedentes de la manera de realizar los distintos ensayos mecánicos con el fin de caracterizar a los productos de fundiciones de hierro nodular o dúctil , se presenta el procedimiento del Ensayo de Desgaste.

El ensayo de desgaste puede ejecutarse en la maquina AMSLER de desgaste en metales, la máquina nos permite cambiar las cargas de contacto entre los discos de ensayo y medir el torque que esta ejerce para realizar el deslizamiento entre las probetas .



**Imagen 4.75 Maquina AMSLER para ensayo de desgaste**

La probetas son discos que giran en el mismo sentido , contacto tangencial , lo que produce el mayor desgaste entre las superficies en contacto .

El montaje es sencillo , las probetas se sujetan a los ejes de la máquina con tuercas , hay que tomar en cuenta que la tuerca superior tiene rosca derecha y la inferior rosca izquierda , para montar o desmontar las probetas se debe aflojar el perno de carga del resorte , esto libera la bisagra , permitiendo pivotar la masa superior de la máquina liberando espacio para realizar el montaje o desmontaje de las probetas .

Esfuerzos de Hertz Fuente Manual de resistencia de Materiales Pisarenko

$$\sigma = 0.5642 \sqrt{\frac{PE}{rl(1-u^2)}}$$

**Ecuación 4.15**

Donde

P = Fuerza

E = Módulo de elasticidad

r = radio de la probeta

l = Espesor de la probeta

u = Coeficiente de Poisson

### **Características de las probetas:**

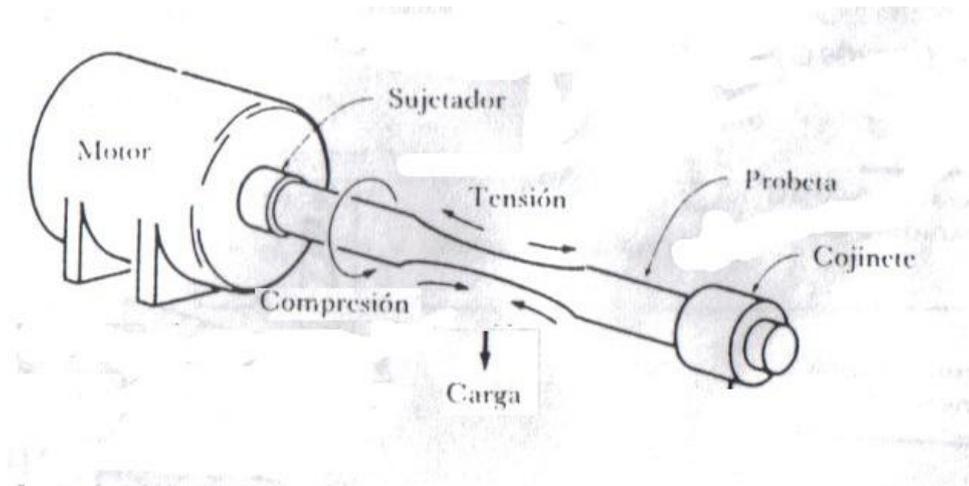
Diámetro : 45 mm

Espesor : 10mm

#### 4.3.2.3 Ensayo de Fatiga

La aplicación de una carga en forma repetida , ya sean cargas por rotación, flexión o vibración, y aun cuando esta sea menor a la carga máxima admisible que soporta el material puede llegar a fracturarse.

Un método común usado es usando un viga apoyada , la probeta es montada entre los apoyos , donde uno de ellos va unido a un motor que producirá el giro, y en la mitad de la probeta se coloca una carga flexionante que provocara esfuerzos de compresión y tracción en diferentes puntos de la probeta, los cuales serán alternantes , es decir que cada punto experimente un esfuerzo máximo de compresión y de tracción repetidas veces.



**Figura 4.76 Esquema de Ensayo de Fatiga**

El ensayo de fatiga se realizó en el Laboratorio de Mecánica de Materiales en la máquina de ensayos de fatiga.



**Imagen 4.77 Máquina RM Ensayo de Fatiga**



**Imagen 4.78 Probetas de fatiga**

### Características de la probeta (dimensiones probeta de Moore)

**Longitud :** 120 mm

**Diámetro Mayor:** 11.4 mm

**Diámetro Menor:** 7.6 mm

Distancia Aplicación de la Carga : 0.2 m 0 200 mm (Sirve para calcular el Momento) Parámetro Propio de la maquina de Fatiga del laboratorio de Resistencia de Materiales FIME – ESPE.

**Tabla 4.28 Ensayo de Fatiga:**

#### **ENSAYO DE FATIGA**

	Dist Maquina	Diametro	Area	Inercia	Y		
	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup>	mm		
	200	7.6	45.36	163.77	3.8		
	200	7.58	45.13	162.05	3.79		
	200	7.6	45.36	163.77	3.8		

Ensayo	Carga	Fuerza	V	Momento	Ciclos	Esfuerzo	Esfuerzo
	Kg	N	N	N*mm	Htz	Mpa	Psi
1	4	39.24	19.62	3924	214	91.05	13205.94
2	6	58.86	29.43	5886	89	137.66	19966.12
3	8	78.48	39.24	7848	49	182.10	26411.87

Fuente: Personal

La ecuación general para fatiga es:

$$S_f = a * N^b$$

**Ecuación 4.16**

Donde :

Sf : Esfuerzo de Fatiga (igual Esfuerzo Flector en vigas  $\sigma_b = \frac{M * Y}{I}$ )

a: Parámetro de Ecuación

b: Parámetro Ecuación

N: Numero de Ciclos

La Ecuación que Caracteriza al material ensayado es:

$$Sf = 1132 * N^{-0.47}$$

**Ecuación 4.17**

Los valores de a y b se obtuvieron realizando un sistema de ecuaciones con 2 incógnitas, basado en los resultados obtenidos de Sf y N del ensayo 1 y 3 .

Sf =? A N = 1000

$$Sf = 1132 * 1000^{-0.47}$$

$$Sfu = 44 \text{ Mpa} .$$

## CAPITULO 5

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1 RESULTADOS DE ENSAYOS METALÚRGICOS

Los ensayos metalúrgicos se realizaron en diversas instituciones , las cuales proveen cierto tipo de servicio que fue requerido para la realización de este proyecto de grado , el primer ensayo que se realizo fue el análisis de composición química , para el mismo que se uso monedas pulidas , estas fueron analizadas por el espectrómetro de la empresa ANDEC FUNASA en Guayaquil , antes de ser enviadas la muestras fueron enfriadas en salmuera que es agua con un poco de sal cuando estas estuvieron al rojo pero en estado sólido, esto se lo hizo para templarlas y así obtener porcentajes más realistas. Este análisis fue realizado correctamente cuanto al procedimiento y arrojó los siguientes datos porcentuales :

**Tabla 5.1 Resultados de análisis químico**

<b>Muestra</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
<b>%Fe</b>	86.498	92.687
<b>%C</b>	4.11	3.66
<b>%Mn</b>	0.8	0.35
<b>%Si</b>	3.39	2.03
<b>%P</b>	0.179	0.124
<b>%S</b>	0.248	0.091
<b>%Cu</b>	1.35	0.18
<b>%Cr</b>	0.1	0.03
<b>%Ni</b>	1.31	0.07
<b>%Mo</b>	0.19	0.07
<b>%Sn</b>	0.198	0.06
<b>%Al</b>	0.4203	0.2209
<b>%Pb</b>	0.15	0.076
<b>%V</b>	1.056	0.351

Fuente: ANDEC FUNASA Lab. de Espectrometría

Este análisis con muestras templadas permitió conocer con certeza cuál es la composición del nodular , la diferencia de porcentajes se da porque fueron coladas en distintos tiempos.

## 5.2 ANALISIS DE MICROGRAFÍA

Los análisis de metalografía se realizaron en los Laboratorios de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPE. Para la realización de los análisis se utilizó el programa CLEMEX que permite analizar las fotografías en forma digital , las fotografías las podemos observar en el Capítulo 4.2.2 .

En el programa, por medio de las fotos, pudimos obtener tanto la esferoidización como el porcentaje de área que ocupan los nódulos y poros, los que podemos ver en la siguiente tabla:

**Tabla 5.2 Porcentaje de área de nódulos y poros.**

% Área	Toma 1		Toma 2		Toma 3	
	Nod	Por	Nod	Por	Nod	Por
<b>Minimum</b>	0	40.78	0	2.35	0	7.84
<b>Maximum</b>	5.3	43.14	2.35	5.49	7.84	12.94
<b>Mean</b>	2.7	41.53	1.18	2.67	2.55	8.15

Fuente: Personal

**Tabla 5.3 Esferoidización de nódulos y poros.**

Esferoid.	Toma 1		Toma 2		Toma 3	
	Nod	Por	Nod	Por	Nod	Por
<b>Minimum</b>	2.9	2.9	2.9	2.9	4.6	2.9
<b>Maximum</b>	44.3	5	14.6	338.4	16.6	290.2
<b>Mean</b>	15.4	3.63	7.11	18.8	8.8	10

Fuente: Personal

### **5.3 TAMAÑO DE GRANO**

El tamaño de grano promedio aproximado del hierro nodular obtenido en las probetas esta entre un tamaño 6 y 10 de área , ( ver Capítulo 4.2.2 )estos valores se tomaron de una probeta sin ser ensayada pero sometido a un ataque químico con Nital creada para este efecto , en la que se realizaron 3 diferentes tomas de la misma probeta.

### **5.4 MACROGRAFÍA**

Por medio de las fotos micrográficas que obtuvimos de la probeta que había sido utilizadas para los ensayos mecánicos en donde el aspecto de las superficies de fractura varía de acuerdo con las Etapas del crecimiento de grietas; en la etapa I no se presentan rasgos macroscópicos sobresalientes, en esta zona las superficies son lisas, planas, brillantes y con muy pocas rayas; pudiendo notarse pequeños escalones en la zona de iniciación debido a la nucleación de varias microgrietas simultáneamente y usualmente el límite de la zona de iniciación está bien definido por una línea de frente de propagación.

En la etapa II, en la mayoría de los casos, se presentan rayas como marcas de playa, los cuales indican las progresiones de las deformaciones plásticas del material por efecto del proceso de fatiga. Y si muestra como patrones de río, quiere decir que la fractura fue abrupta.

Finalmente, en la etapa III, el aspecto de la superficie es el que presenta típicamente una fractura frágil, es decir, son superficies que presentan ausencia de deformaciones y con brillo. Todas las etapas las podemos observar en el capítulo 4.2.3.

## 5.5 ENSAYOS MECÁNICOS

Los ensayos mecánicos arrojaron los siguientes resultados:

**Tabla 5.4 Propiedades Mecánicas**

Esfuerzo Fluencia Tracción (Sy)	358 Mpa	52 032 Psi
Esfuerzo ultimo de tracción (Suy)	536,5 Mpa	77 811 Psi
Esfuerzo ultimo de Flexión (Sb)	1148 Mpa	166 503 Psi
Dureza Brinell (HBN)	214	
Esfuerzo ultimo de Torsión (Sst)	524.35 Mpa	75783.56 Psi
Esfuerzo ultimo de compresión (Suy)	375 Mpa	54 417 Psi.
Modulo de Elasticidad (E)	6920 Mpa	1 003 672 Psi
% Elongacion (%e)	15,71 %	
Coefficiente de Poisson (u)	0,28	
Energía de impacto	17.7 J	13.05 Lbf* ft
Esfuerzo ultimo de fatiga (1000 ciclos)	44 Mpa	6387 Psi

Fuente: Personal

Los valores de esfuerzos obtenidos en los ensayos al ser han sido comparados con los valores de las tablas del Ductile Iron Handbook de American Foundrymen`s Society, lo cual ha permitido clasificar al Hierro Nodular ensayado como Hierro Dúctil de Clase 65 45 12 , a continuación citamos las propiedades de este material:

**Tabla 5.5 Propiedades Mecánicas del Hierro Dúctil 65 45 12:**

Esfuerzo a tensión (Suy)	65 000 Psi (mínimo)
Esfuerzo Fluencia (0,2% de Suy) (Sy)	45.000 Psi (mínimo)
Esfuerzo Compresión (Suy)	33 500 Psi (minimo)
Esfuerzo Cortante Puro (Ssy)	59 500 Psi (0.9 * Suy)
Esfuerzo Cortante Torsión ( Sst)	59 500 Psi (0.9 * Suy)
Modulo de Elasticidad	2 450 000 Psi
Coficiente de Poisson (u)	0.280
Limite de Fatiga (Sin muesca)	29 000 - 31 000 Psi
HBN	150 – 220
Densidad	0.245 – 0.255 Lb/in <sup>3</sup>
Energía Impacto (20 C o 72 F)	12 – 16 lbf*ft

Fuente : Ductile Iron Handbook Paginas 31 a 36

**Tabla 5.6 Esfuerzos de Diseño Sugeridos**

Tensión Directa	25 000 psi
Compresión Directa	34 500 Psi
Fatiga (sin muesca)	13 500 Psi

Fuente : Ductile Iron Handbook Paginas 31 a 36

Para mayor Información sobre las otras clases de Hierro Nodular como 60 40 18, 65 45 12, 80 55 6 y 100 70 03 que son fundiciones no aleadas refiérase a las paginas antes citadas del Ductile Iron Handbook.

## 5.6 COEFICIENTES DE RELACION

El Objetivo de Caracterizar un material es que sus propiedades mecánicas intrínsecas puedan ser conocidas mediante la realización de un ensayo característico como es el de tracción por ejemplo y en base al cual en este documento se presentan los coeficientes de relación entre los esfuerzos mas comunes que en un diseño se presentan:

**Tabla 5.7 Coeficientes de relación entre Esfuerzos Comunes**

Esfuerzo de tracción a		Multiplique Por
	Corte	0.9
	Compresión	0.7
	Flexión	2.1
	Torsión	0.97

Fuente: Personal

## **CAPITULO 6**

### **PROYECTO DE NORMA ECUATORIANA PARA CARACTERIZACIÓN DE HIERRO NODULAR**

#### **6.1 OBJETIVO DE LA NORMA**

##### **6.1.1 OBJETIVO**

Esta norma tiene como objetivo proveer un instrumento público al país para estandarizar los métodos de ensayo sobre probetas de hierro nodular con el fin de obtener datos y resultados que permitan hacer comparaciones técnicas entre fundiciones locales e internacionales .

Presentar un documento que pueda servir para mediar conflictos y llegar a acuerdos entre partes interesadas , así mismo permitir una buena selección del tipo de hierro a ser usado para una aplicación requerida , evitando así sobreprecios o falsas adjudicaciones .

No es objetivo de esta norma establecer la forma de operación de cubilotes o un control de las cargas , esta norma permite obtener características del hierro fundido ya producido.

#### **6.2 PROCEDIMIENTO DE CREACIÓN**

El procedimiento de creación y legalización esta bien establecido , una persona natural , no puede realizar el tramite respectivo , debe hacerlo una institución o persona jurídica y someterse a lo estipulado en el registro oficial , numero 744 del día Martes 14 de Enero del 2003 el mismo que dice lo siguiente :

### **6.2.1 OBJETO**

**Art. 193.-** Este reglamento establece la nomenclatura clasificación, estructura, presentación y el procedimiento de elaboración, aprobación, adopción y revisión de los documentos normativos.

### **6.2.2 DEFINICIONES**

**Art. 194.-** Para los efectos de este reglamento se adoptan las definiciones contempladas en las GPE INEN-ISO / TEC 2 y 21. Y las que a continuación se detallan:

- a) Comité Consultivo del INEN: Es el grupo conformado por representantes del sector productivo nacional para analizar las propuestas de trabajo presentada por el INEN, emitir sugerencias y presentar recomendaciones. Este comité se podrá reunir por convocatoria del Director General del INEN, quien lo presidirá.
  
- b) Comité Técnico de Normalización: Es el grupo técnico de trabajo conformado por especialista en un determinado campo industrial, comercial o tecnológico para analizar los temas de trabajo de normalización técnica en un campo específico. El Comité General del INEN quien lo presidirá.
  
- c) Subcomité Técnico de Normalización.- Es el grupo técnico de trabajo que siendo parte integrante de un determinado campo industrial, comercial o tecnológico representa a una actividad específica de ese campo y está conformado por técnicos especializados representantes de los sectores público y privado. El Subcomité Técnico de Normalización se reunirá por convocatoria del Director General del INEN, para estudiar y aprobar a su nivel los documentos normativos relativos a su campo de acción.

- d) Grupo de Trabajo: Es el Grupo Técnico de personas que siendo parte integrante de un Subcomité Técnico, son designados por el Presidente para resolver un determinado tema. El grupo de trabajo estudiará el tema y presentará al Presidente el informe técnico respectivo.
  
- e) Comité Interno del INEN: Es el grupo técnico de trabajo presidido por el Subdirector Técnico y conformado por los directores nacionales del INEN o sus representantes técnicos para estudiar y aprobar a su nivel los documentos normativos que se le asigne de acuerdo a los programas de trabajo.
  
- f) Proyecto de Documento Normativo: Es el documento no oficial que sirve de base para la elaboración de una norma técnica, un código, guía de práctica o un reglamento técnico ecuatoriano.
  
- g) Documento normativo: Es el documento emitido por el INEN, que proporciona reglas, instrucciones o características para las actividades o resultados, tales como normas técnicas, código y guías de práctica y reglamentos técnicos ecuatorianos.
  
- h) Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN: Es el documento expedido por el INEN, oficializando mediante acuerdo por el Ministro de Comercio Exterior, Industrializado y Pesca que establece reglas, condiciones o métodos que resuelven problemas repetitivos, formulado en base a investigaciones y estudios que recogen los resultados consolidados de la ciencia, la tecnología y la experiencia teniendo en cuenta los criterios de todo los sectores interesados.
  
- i) Código de Práctica Ecuatoriano, CPE INEN: Es el documento expedido por el INEN, oficializado mediante Acuerdo por el Ministro de Comercio Exterior, Industrialización y Pesca, que describe prácticas recomendadas para el

diseño, fabricación, construcción, mantenimiento, utilización de equipos, instalaciones, estructuras o productos.

- j) Reglamento Técnico Ecuatoriano, RTE INEN: Es el documento aprobado por el INEN, expedido mediante acuerdo por el Ministro de Comercio Exterior, Industrialización y Pesca que establece requisitos técnicos obligatorios, directamente o por referencia a una norma técnica, especificación técnica o código de práctica.
- k) Guía de Práctica Ecuatoriana GPE INEN: Es el documento expedido por el INEN, mediante acuerdo del Director General del INEN, que recomienda un conjunto de reglas e introduce y divulga procedimientos determinados de trabajo.
- l) Documento auxiliar. Es el documento emitido por el INEN con el objeto de ilustrar o aclarar un documento informativo.
- m) Fe de Erratas: Documento que corrige los errores de impresión, contenidos en un documento normativo y es una adición al mismo.
- n) Folleto técnico: Documento que ilustra el contenido de uno o más documentos normativos.
- o) Enmienda: Es el documento expedido por el Director General del INEN que modifica parte de un documento normativo con excepción de las normas técnicas, códigos de práctica y es una adición al mismo.
- p) Adopción: Oficialización de una norma internacional, regional, nacional de otro país u otras de reconocido prestigio como Norma Técnica Ecuatoriana.

La adopción cumplirá el mismo trámite que las otras normas técnicas ecuatorianas y luego de su oficialización tendrá su mismo valor.

### **6.2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS DOCUMENTOS NORMATIVOS**

**ART. 195.-** Por sus etapas de elaboración, los proyectos de documentos normativos se clasifican en:

- a) Proyecto A1: Proyecto de documento normativo presentado para su estudio por una persona natural o jurídica.
- b) Proyecto A2.- Proyecto de documento normativo formulado por el INEN en base a estudio propio o al proyecto A1, destinado a estudio y aprobación de un Subcomité Técnico o del Comité Interno del INEN.
- c) Proyecto B: Proyecto de documento normativo que se encuentra en estudio en un Subcomité Técnico o en el Comité Interno del INEN; y,
- d) Proyecto C: Es el texto final del proyecto de documento normativo aprobado por un Subcomité Técnico o por el Comité Interno del INEN que se entrega a la Dirección General para ser presentado a conocimientos y aprobación del Consejo Directivo.

**Art. 196.-** Por su carácter los documentos normativos se clasifican en:

- a) Obligatorios: Aquellos que establecen requisito y tienen relación con los objetivos legítimos del país que son entre otros: la seguridad nacional, la prevención de práctica que puedan inducir o error o engaño, la protección de la salud o seguridad humana, de la vida o la salud animal o vegetal, o del medio ambiente, y

b) Voluntarios: Aquellos que establecen criterios o métodos de trabajo recomendables o adecuados sin ser los únicos aplicables.

#### **6.2.4 ESTRUCTURA Y PRESENTACIÓN DE LOS DOCUMENTOS NORMATIVOS**

**Art.- 197.-** La estructura y presentación de los documentos normativos, debe sujetarse a las disposiciones establecidas en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 0.

#### **6.2.5 TRAMITE REGULAR PARA LA ELABORACIÓN Y APROBACIÓN DE DOCUMENTOS NORMATIVOS**

**Art. 198.-** De conformidad con el Plan Operativo aprobado por el Consejo Directivo del INEN, por resolución de éste, o de la Dirección General se preparará el proyecto A2.

**Art. 199.-** La Dirección General del INEN, previo informe de la Dirección Nacional de Normalización, pondrá en consulta pública, a través del Boletín Oficial del Instituto Ecuatoriano de Normalización, los proyectos de documentos normativos y los avances de estos en las diferentes etapas.

**Art. 200.-** La Dirección General del INEN, convocará al Subcomité Técnico o al Comité Interno del INEN para que se encargue el estudio y aprobación del proyecto B, constituyéndose éste en proyecto C.

**Art. 201.-** El proyecto C será entregado a la Dirección General del INEN para el trámite de oficialización. El Director General del INEN de considerarlo necesario podrá devolver el proyecto C al Subcomité Técnico o al Comité Interno del INEN explicando las razones de su devolución. El Subcomité Técnico o Comité Interno del INEN, una vez absuelta la mismas remitirá a la

Dirección Nacional de Normalización el nuevo proyecto C para que continúe el trámite previsto.

**Art. 202.-** El Director General del INEN, presentará el proyecto C al Consejo Directivo para su aprobación, recomendado el carácter de voluntario u obligatorio. De considerarse necesario se adjuntará información adicional sobre los documentos normativos presentados.

**Art. 203.-** El Consejo Directivo del INEN, en dos sesiones consecutivas aprobará o rechazará el documento normativo, de ser necesario, solicitará información adicional o ampliación de una consulta pública cuyo resultados serán conocidos y tratados en la próxima reunión.

**Art. 204.-** Los documentos normativos aprobados por el Consejo Directivo, se enviarán al Ministro de Comercio Exterior, Industrialización y Pesca para u oficialización, con el carácter de voluntario u obligatorio, de acuerdo a lo resuelto por el Consejo Directivo, lo que constará en el informe respectivo suscrito por el Presidente y el Secretario. Entrará en vigencia una vez que el acuerdo ministerial sea publicado en el Registro Oficial.

**Art. 205.-** Publicado en el Registro Oficial un documento normativo, no se podrá modificar o aumentar su texto, sino mediante el procedimiento de revisión previsto en este reglamento.

**Art. 206.-** Los documentos normativos oficializados se incluirán en el Catálogo de normas INEN que periódicamente publica el instituto.

**Art. 207.-** Los proyectos no aprobados por el Consejo Directivo se devolverán a la Dirección Nacional de Normalización para que los subcomités técnicos de origen o el Comité Interno del INEN consideren las observaciones que motivaron su rechazo, una vez absueltas, los proyectos se pondrán nuevamente a consideración del Consejo Directivo.

**Art. 208.-** Cuando por alguna circunstancia especial, no fuera posible conformar o mantener en funciones a un Subcomité Técnico, la Dirección General dispondrá el trámite a través del Comité Interno del INEN hasta que se conforme un Subcomité Técnico sobre ese tema.

#### **6.2.6 TRAMITE DE URGENCIA PARA LA ELABORACIÓN Y APROBACIÓN DE DOCUMENTOS NORMATIVOS**

**Art.- 209.-** Los documentos normativos de tramitarán de urgencia por decisión del Consejo Directivo, a solicitud expresa de un Organismo del Estado para resolver una situación que afecte a los objetivos legítimos del país o para enfrentar una emergencia nacional.

**Art. 210.-** La Dirección General del INEN dispondrá que la Dirección Nacional de Normalización elabore el proyecto A2 en 5 días laborables contados de la fecha de notificación de la declaratoria de urgencia. Este proyecto elaborado será estudiado y aprobado por el Comité Interno del INEN en 2 días laborables, luego del o cual se remitirá el Consejo Directivo del INEN para su aprobación y determinación del tiempo de vigencia.

**Art. 211.-** Transcurrido el tiempo de vigencia, se remitirán al Consejo Directivo para la extensión de su vigencia o derogatoria. Durante ese periodo se considerará como documento normativo en consulta pública.

## **6.2.7 ADOPCIÓN DE DOCUMENTOS NORMATIVOS**

**Art. 212.-** La Dirección General del INEN solicitará al Consejo Directivo la adopción como documento normativo INEN de un documento normativo extranjero, a través de un informe técnico, en el que se debe explicar y justificar la necesidad de su adopción, su utilización en el ámbito nacional, las particularidades que requieren de la inclusión / exclusión de determinados términos, criterio o parámetro si fuera del caso.

**Art. 213.-** El Consejo Directivo del INEN decidirá sobre la adopción o no del documento normativo propuesto. En el caso positivo se observará el trámite previsto para los proyectos contemplados en el Plan Operativo.

**Art. 214.-** La adopción se debe realizar tomando como base documentos normativos internacionales, documentos regionales o nacionales de otros países, que recojan el estado actual de la ciencia, la tecnología y la experiencia, y puedan ser aplicados eficazmente en el país.

**Art. 215.-** La adopción de normas internacionales ISO, se efectuará según los lineamientos establecidos para el efecto en la guía de práctica ecuatoriana GPE INEN-ISO / IEC 21.

## **6.2.8 SISTEMA DE REVISIÓN DE DOCUMENTOS NORMATIVOS**

**Art. 216.-** Para la revisión de documentos normativos se seguirá el trámite regular de urgencia establecido en este reglamento y procederá cuando la solicitud presentada al Director General del INEN está acompañada de una exposición de motivos teóricamente sustentados.

**Art. 217.-** Las modificaciones de los documentos normativos se realizarán mediante la revisión total o parcial, que amerita de su impresión, estas

modificaciones deben ser estudiadas y aprobadas por el Subcomité Técnico respectivo, antes de seguir el trámite de su oficialización.

**Art. 218.-** La fe de erratas requerirá la aprobación del Director General del INEN para ser incorporada al documento normativo como una hoja suelta.

### **6.2.9 SISTEMA DE ANULACIÓN DE DOCUMENTOS NORMATIVO**

**Art. 219.-** Cuando por algún motivo un documento normativo no sea aplicable en el país, la Dirección General, sobre la base de un Informe Técnico de la Dirección Nacional de Normalización, solicitará al Consejo Directivo su anulación.

**Art. 220.-** La anulación del documento normativo será oficializada luego de la aprobación del Consejo Directivo del INEN mediante acuerdo del Ministro de Comercio Exterior, industrialización y pesca, publicado en el Registro Oficial, los documentos anulados se indicarán en el Catálogo de Normas INEN.

### **6.2.10 DE LOS SUBCOMITÉS TÉCNICOS**

**Art. 221.-** De su funciones: Es función del Subcomité Técnico estudiar y aprobar a su nivel los documentos normativos puestos a su consideración por el INEN y recomendar su oficialización con carácter obligatorio o voluntario.

**Art. 222.-** Los subcomités técnicos estarán en funciones mientras dure el estudio del tema o tema para los cuales fueron conformado, luego del o cual entrarán en receso, pudiendo reactivarse si el caso lo amerita.

**Art. 223.-** De su conformación: Conformación del Subcomité Técnico. El Subcomité Técnico se conformará con representantes técnicos de los productores consumidores pertenecientes al sector público y privado y personal técnico especializado que han sido convocados por el INEN, para participar en el estudio y aprobación de los documentos normativos quienes se constituyen

en miembros permanentes con su participación regular en las reuniones convocadas.

**Art. 224.-** Los miembros del Subcomité Técnico deben pertenecer preferentemente a los siguientes sectores:

Sector público:

- Ministerios y sus entidades adscritas.
- Empresas estatales.
- Instituciones autónomas de derecho público.
- Universidades y Escuelas politécnicas.
- Otras entidades oficiales.

Sector privado:

- Cámara de industrias, pequeñas industrias de servicios y artesanías, comercio, agricultura y construcciones y otros sectores productivos.
- Empresas de producción o de servicios.
- Organizaciones de usuarios o consumidores.
- Universidades, instituciones de enseñanza o investigación.
- Colegios de profesionales.
- Entidades científicas.
- Personas naturales de mérito o prestigio científico o intelectual.
- Organizaciones no gubernamentales cuya esencialidad coincida con el tema tratado.

**Art. 225.-** De sus dignidades.- Las dignidades del Subcomité Técnico son: el Presidente, el Vicepresidente y el Secretario Técnico. El Presidente y Vicepresidente se elegirán en la primera reunión y pertenecerán indistinta y alternadamente a los sectores público y privado, el Secretario Técnico será un funcionario del INEN. La duración en funciones del Presidente y Vicepresidente será igual al tiempo en que realice el trabajo el Subcomité Técnico.

**Art. 226.-** Del Presidente: Son funciones y atribuciones del Presidente:

- a) Dirigir las reuniones y servir de moderador en las discusiones y controles a las técnicas que se suscitasen;
- b) Encargar la Presidencia al Vicepresidente o a otro miembro a fin de intervenir en las discusiones que tuviesen lugar durante una reunión;
- c) Señalar fechas para las próximas reuniones en consulta con sus miembros;
- d) Limitar la intervenciones de los miembro a no más de dos oportunidades sobre un mismo asunto;
- e) Permitir la asistencia de las personas que sin ser miembros desearan participar en las reuniones en calidad de asesores u observadores;
- f) Conformar grupos de trabajo para estudios específicos, si fuere necesario;
- g) Cumplir y hacer cumplir las resoluciones adoptadas; y,
- h) Firmar conjuntamente entre el Secretario Técnico las actas de las reuniones y documentos normativos aprobados.

**Art. 227.-** Del Vicepresidente. Son funciones del Vicepresidente:

- a) La mismas del Presidente por encargo expreso o ausencia de éste; y,
- b) Coordinar las actividades técnicas de los grupos de trabajo.

Del Secretario Técnico:

**Art. 228.-** Son funciones del Secretario Técnico:

- a) Preparar la lista de representante convocados a las reuniones de los subcomités técnicos de acuerdo a los estipulado en el Art. 33 de este reglamento;
- b) Proporcionar los documentos técnicos necesarios para la realización de las reuniones;
- c) Preparar las actas de cada reunión y responsabilizarse de que los documentos aprobados sean fielmente transcritos;
- d) Realizar el respectivo seguimiento del Subcomité Técnico y del documento analizado e informar a la Dirección Nacional de Normalización luego de cada reunión, sobre la marcha del mismo y el avance del documento estudiado;
- e) Firmar conjuntamente con el Presidente las actas de cada reunión y los documentos normativos aprobados; y,
- f) Llevar el control de asistencia de los miembros del Subcomité Técnico a las diferentes reuniones y hacer constar en la información complementaria del documento a quienes tengan una asistencia mínima del 50% a la reuniones convocadas.

**Art. 229.-** De sus miembros: Son deberes de los miembros del Subcomité Técnico:

- a) Asistir regularmente a las reuniones convocadas;
- b) Participar en el estudio y aprobación de los proyectos y en la revisión de los documentos normativos;

- c) Participar en los grupos de trabajo conformados por el Presidente y remitir los informes técnicos solicitados;
- d) Firmar las hojas de asistencia a las reuniones; y,
- e) Actuar como Presidente ocasional en ausencia del Presidente y Vicepresidente titulares, por resolución de los miembros presentes.

**Art. 230.-** De las reuniones: Las reuniones serán convocadas por el Director General del INEN.

**Art. 231.-** La primera reunión del Subcomité Técnico será presidida por el Director General del INEN o por el Subdirector Técnico y se procederá a designar por simple mayoría sus dignidades, las cuáles se posesionarán y ejercerán sus funciones inmediatamente.

**Art. 232.-** Para conformar un Subcomité Técnico, se requiere al menos la presencia de cuatro miembros representante de los sectores convocados. El quórum requerido para que una reunión se efectúe será de cuatro miembros; en caso contrario, los concurrentes se construirán en Comisión General y sus resoluciones serán conocidas en las siguiente reunión.

**Art. 233.-** La inasistencia a las reuniones convocadas será considerada como conformidad con la resoluciones tomadas en el Subcomité Técnico. Luego de dos inasistencias consecutivas, el Secretario Técnico notificará a la institución representada de dicha situación.

**Art. 234.-** Las reuniones ordinarias se realizarán cada 15 días calendario y las extraordinarias cuando el Director General del INEN la convoque para tratar determinado asuntos de carácter especial.

## **6.2.11 DEL PROCEDIMIENTO PARA EL ESTUDIO Y APROBACIÓN DE LOS DOCUMENTOS NORMATIVOS**

**Art. 235.-** Para el estudio y aprobación se seguirá el siguiente procedimiento:

- a) En la primera reunión el INEN a través del Secretario Técnico entregará a cada uno de los asistentes un ejemplar del documento a ser estudiado;
- b) A partir de la segunda reunión los asistentes presentarán al Presidente por escrito las observaciones al documento en estudio, sustentadas técnicamente;
- c) El Presidente pondrá a consideración las observaciones siguiendo la estructura del documento en estudio para que se tome la resolución correspondiente. Las resoluciones se tomarán por consenso de los miembros presentes;
- d) En caso de no existir consenso sobre un determinado tema el Presidente encomendará su estudio técnico a un grupo de trabajo formado con parte de los miembros y postergará el estudio y resolución del mismo a la siguiente reunión. El grupo de trabajo presentará al Presidente el informe técnico del estudio encomendado, el mismo que será puesto a consideración de los miembros, para su aprobación;
- e) Si después de haber conocido y estudiado el informe técnico del grupo de trabajo no se obtiene el consenso, se adoptará el criterio del INEN sobre dicho tema a través de la resolución que tome el Comité Interno;
- f) La reconsideración de una resolución aprobada solo puede hacerse con un sustento técnico, a pedido de uno de los miembros que haya estado presente en la sesión de aprobación y con la aceptación de la mayoría de los asistentes;

- g) La versión final del documento normativo aprobado (Proyecto C) llevará la firma del Presidente y Secretario Técnico en cada una de sus páginas; y,
- h) Si un Subcomité Técnico no llega a instalarse o no se reúne después de tres convocatorias consecutivas, la Dirección General del INEN podrá disponer la continuación del trámite respectivo a través del Comité Interno.

## **6.3 BORRADOR DE LA NORMA**

### **NORMA ECUATORIANA DE CARACTERIZACION DE HIERRO NODULAR**

#### **6.3.1. OBJETO**

Esta norma establece una clasificación del hierro basada en la resistencia a la tracción en probetas maquinadas y fundidas en forma separada o como apéndices de piezas , así mismo como la clasificación de acuerdo a la distribución del carbón en aleaciones de hierro - carbón.

#### **6.3.2. NORMAS QUE SE PUEDEN CONSULTAR**

Las siguientes normas contienen disposiciones que mediante su referencia en este texto forman parte del mismo , se recomienda a las partes que necesiten acuerdos mediante esta norma que investiguen la posibilidad de aplicar ediciones más actualizadas .

Normas ASTM:

- A 644 Definiciones estandarizadas de terminología relativa a hierro fundido .
- A 48 Especificación estándar para hierro fundido
- A 256 Ensayo de compresión de hierro fundido
- A 327 Ensayo de impacto en hierro fundido.
- A 438 Ensayo transversal en hierro fundido ( Flexión)

- E 8 Ensayo de tracción en metales.
- E9 Ensayo de compresión en metales a temperatura ambiente
- E 10 Ensayo de dureza Brinell .
- E 74 Verificación de Máquinas que aplican carga.
- E 111 Ensayo para obtener el Módulo de Young
- E 132 Ensayo para la obtención de la relación de Poisson .

### 6.3.2.1 Terminología estandarizada de Hierro Fundido

**Hierro fundido.-** Es la forma genérica de una serie de aleaciones de hierro y carbón y sílice en la que el carbón queda retenido en una solución austenítica a la temperatura eutéctica.

**Cementita.-** Compuesto duro y brillante de hierro y carbón de fórmula  $Fe_3C$ .

**Hierro Templado .-** Fundición Gris que ha sido enfriada bruscamente con el fin de transformarla en fundición blanca .

**Metal Dual .-** Metal compuesto de dos fundiciones distintas coladas conjuntamente.

**Hierro Dúctil .-** Es el hierro que ha sido aleado cuando estuvo en estado líquido con el fin de que el grafito forme nódulos .

**Ferritizar.-** Procedimiento Térmico que incrementa la cantidad de ferrita .

**Ferritización lenta.-** Proceso mediante el cual se calienta en hierro y se lo enfría lentamente con el propósito de producir una matriz ferrítica predominante en la estructura del hierro fundido.

**Hojuela de Grafito . -** Partícula de grafito de forma irregular con apariencia de hojuela similar a las encontradas en la fundición gris.

**Grafito nodular.**- Grafito que adquiere la forma de esferas o nódulos , encontrado típicamente en los hierros nodular y dúctil .

**Roseta de grafito.**- Arreglo de las hojuelas de grafito en forma de roseta cuyo centro está en los núcleos de cristalización de las fundiciones grises .

**Grafito Esferoidal .-** Grafito en forma de esfera que tiene una estructura policristalina radial encontrado en los hierros dúctiles .

**Grafitizar .-** Precipitar grafito en una aleación de hierro carbón .

**Hierro fundido gris .-** Hierro que tiene una fractura gris debido a la gran cantidad de hojuelas de grafito .

**Hierro maleable .-** Hierro de fundición blanca que con un tratamiento térmico se transforma en una matriz metálica con nódulos de carbón templado.

**Maleable perlítico .-** Aleación ferrosa fundida como hierro blanco , que con tratamiento térmico se transforma en una matriz controlada , la misma que contiene carbón templado dentro de una estructura de perlita o de martensita templada .

**Hierro comercial .-** Hierro producido sin control que se vende en lingotes a las fundiciones .

**Fundición mezclada .-** Estructura de hierro gris y hierro blanco , en proporciones variables , cuya fractura presenta una apariencia mixta .

**Grado de nodulización .-** Proporción volumétrica de grafito nodular o esferoidal en una matriz de hierro dúctil.

**Pig Iron .-** Hierro obtenido mediante la reducción de minerales de hierro con el fin de obtener lingotes que serán usados como materia prima ,denominado también Hierro comercial .

**Muestra** .- Porción de material que representa al resto .

**Carbón Templado** .- Agregados de grafito en forma de nódulos encontrado en los hierros maleables como resultado de un tratamiento térmico .

**Cupón de ensayo**.- Apéndice de una fundición que se corta con el fin de ser analizada para verificar la calidad de la fundición de la que proviene .

**Espécimen de muestra** .- Muestra obtenida y preparada con el propósito de evaluar sus propiedades físicas , químicas , mecánicas o metalúrgicas o todas ellas a la vez .

**Hierro blanco** .- Fundición que presenta una fractura blanca debido a la solución de carbón que contiene.

### **6.3.3. ENSAYO DE TRACCION EN FUNDICION DE HIERRO NODULAR**

#### **6.3.3.1 Objeto**

Esta norma cubre las fundiciones de hierro nodular donde la característica relevante sea su resistencia a la tracción , las fundiciones serán clasificadas de acuerdo a su resistencia con probetas fundidas separadamente.

#### **6.3.3.2 Documentos a consultar**

ASTM A 48 , Norma Americana

### 6.3.3.3 Producción

El método de producción se deja a discreción del fabricante, pero en aplicaciones especiales se puede usar un acuerdo entre el fabricante y el comprador .

### 6.3.3.4 Propiedades de tracción

Existen 5 grados de fundiciones de hierro nodular de acuerdo a la norma ASTM A536-70 como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 6.1 ASTM A536-70**

Clase	Resistencia mínima a la rotura	Esfuerzo de tracción al 0.2%	Elongación mínima ( 2- in.g.l) %
60-40-10	60000	40000	18
65-45-12	65000	45000	12
80-55-06	80000	55000	6
100-70-03	100000	70000	3
120-90-02	120000	90000	2

Fuente : Ductile Iron Production Practices

### 6.3.3.5 Barras fundidas para ensayo

Las barras fundidas para ensayo se deben hacer en moldes de arena similares a las fundiciones que representan , más de una barra se debe fundir en cada molde , debe colarse el hierro en forma de sifón con el fin de reducir al mínimo las imperfecciones por caída de arena o poros propios del proceso de colado .

La distancia entre las barras coladas debe ser mayor al diámetro de las barras , éstas deben recibir el mismo tratamiento térmico de las fundiciones que representan .

### 6.3.3.6 Selección de barras de ensayo

Las barras de ensayo se deben maquinar de acuerdo a la tabla , la cuál indica el espesor de interés en las piezas y cuál debe ser el tamaño de las probetas .

**Tabla 6.2 ASTM A48**

#### **Espesor de la pared en la sección**

<b>de control</b>	<b>Probeta</b>
Menor a 6 mm	<b>E</b>
De 6 a 12 mm	<b>A</b>
De 13 a 25 mm	<b>B</b>
De 26 a 50 mm	<b>C</b>
Sobre 50 mm	<b>E</b>

Fuente : Ductile Iron Handbook

Las probetas marcadas con **E** son Especiales y las dimensiones que tendrá serán un acuerdo entre el fabricante y el comprador .

El uso de probetas tipo **B** o **C** será impuesto por el productor , todas las probetas deben ser maquinadas de forma concéntrica .

### 6.3.3.7 Ensayo de tensión

Este ensayo será realizado en una máquina de ensayos universales , la cual pueda transmitir carga a las probetas axialmente con una sujeción adecuada , el tiempo de ensayo debe ser de al menos **15** segundos para las probetas de tipo **A** y de **20** segundos para las probetas **B** o **C** .

### **6.3.3.8 Número de ensayos**

El fabricante deberá preparar al menos tres barras ( **3** ) de ensayo por cada lote de fundición , si las probetas presentan defectos que las inutilicen para el ensayo , está deberá ser cambiada por otra proveniente del mismo lote .

De las tres probetas que le corresponden a cada lote se debe ensayar sólo una , si esta no cumple con las especificaciones se deberá determinar si fue falla del material o de la probeta , si la probeta presenta evidentes defectos que invaliden el resultado se deberá cambiar por otra del mismo lote , si un ensayo es valido y la probeta no cumple con las especificaciones esperadas se deberá realizar dos reensayos del mismo lote , si alguno de los reensayos válidos falla , el lote no debe ser aceptado .

En el caso que no existan suficientes barras de ensayo se deberá sacar las probetas de alguna de las piezas fundidas pertenecientes al lote , en un acuerdo entre el fabricante y el comprador .

En nuestro caso realizamos cada ensayo con 5 probetas.

### **6.3.3.9 Descripción de un lote**

- Un Lote debe constar de piezas fundidas tomadas de la misma cuchara de colada.
- La masa máxima de un lote es normalmente de 2000 kg. de piezas fundidas y desbarbadas , esta masa se puede variar en donde resulte práctico , mediante acuerdo entre el fabricante y comprador .
- Una pieza fundida individual debe constituir un lote si su masa es igual a 2000 Kg. o más.

- Para fundiciones continuas del mismo grado de hierro nodular en tonelajes grandes , la masa máxima de un lote se debe restringir a 2h de vaciado.
- A menos que exista otra especificación el productor define un lote como alguna de las siguientes definiciones.

**6.3.3.9.1** Un grupo de fundiciones que pesen menos de 2000 lb. (910 Kg. ) cada uno, coladas en un periodo de 2h , con cargas consecutivas similares en el tipo de material .

**6.3.3.9.2** Un grupo de fundiciones que pesen 2000 lb. (910 Kg. ) cada una, donde el peso total no exceda las 8000 lb. (3600Kg) y en donde las fundiciones del lote sean coladas en un periodo de 4h en la misma colada y con cargas consecutivas similares en materiales de las mismas características .

**6.3.3.9.3** Fundiciones individuales que pesen más de 2000lb (910 Kg.)

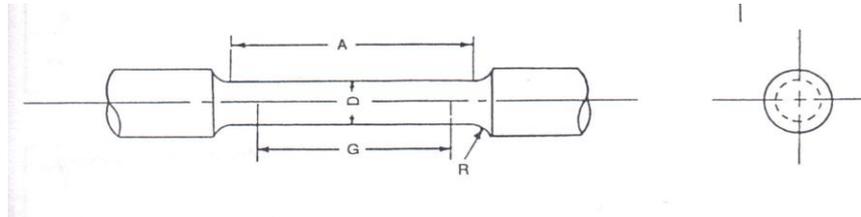
**6.3.3.9.4** Un crisol que pese más de 2000lb (910 kg.)

**6.3.3.9.5** Cuando una pieza de fundición deba ser colada con más de un crisol o cuando el hierro sea fundido en más de un horno o sea más de una fundición con una carga de distintas características dentro del mismo horno o ambos hierro y colada , o carga y horno , se considerará un lote.

**6.3.3.9.6** Cuando más de un lote se use para una sola fundición cada lote debe estar bajo esta especificación .

**6.3.3.9.7** Cuando una fundición individual sea colada de más de un horno o cuando hierros de distintas fuentes sean mezclados antes de colados, se deben considerar como un lote .

### 6.3.3.10 Tamaño de las barras de ensayo



**Gráfico 6.1 Probeta Estándar ASTM**

**Tabla 6.3 DIMENSIONES DE LAS BARRAS DE ENSAYO**

DIMENSIONS	STANDARD SPECIMEN IN. (MM)	SMALL SIZE SPECIMENS PROPORTIONATE TO STANDARD IN. (MM)	
	1/2 ROUND (13 MM)	0.350 ROUND (8.89 MM)	0.250 ROUND (6.35 MM)
G = GAGE LENGTH	2.000 ± 0.005 (50.8 ± 0.13)	1.4 ± 0.005 (35.6 ± 0.13)	1.0 ± 0.005 (25.4 ± 0.13)
D = DIAMETER (NOTE 1)	0.500 ± 0.010 (13 ± 0.25)	0.350 ± 0.007 (8.9 ± 0.18)	0.250 ± 0.005 (6.35 ± 0.13)
R = RADIUS OF FILLET	3/8 MIN (9.5, MIN)	3/8 MIN (9.5, MIN)	1/4 MIN (6.35, MIN)
A = LENGTH OF REDUCED SECTION (NOTE 2)	2 1/4 MIN (57.2, MIN)	1 3/4 MIN (44.5, MIN)	1 1/4 MIN (31.8, MIN)

Fuente : Ductile Iron Handbook

## 6.3.4 ENSAYO DE COMPRESION

### 6.3.4.1 Objeto

Esta sección cubre los requerimientos del ensayo de compresión en hierro fundido.

#### 6.3.4.2 Normas a consultar

Consultar norma ASTM E9 y ASTM A256

#### 6.3.4.3 Muestras de ensayo

Existen dos clases de muestras para el ensayo de compresión , muestras medianas y largas , use las muestras medianas para determinar el esfuerzo de compresión y las probetas largas para determinar el módulo de elasticidad en compresión .

**Tabla 6.4 Normas ASTM A 256**

	<b>Diámetro</b>	<b>longitud</b>
<b>Probeta mediana</b>	20.27+/- 0.3 mm	30 mm
<b>Probeta larga</b>	20.27+/- 0.3 mm	162 mm

Fuente: Normas ASTM A256

#### 6.3.4.4 Procedimiento

- Limpiar las probetas para quitar cualquier exceso de cualquier lubricante que exista.
- Las dimensiones de la probeta deben ser medidas , las mismas deben aproximarse a 0.02 mm , hacer por lo menos dos medidas y sacar el promedio .
- La instalación de la probeta en la máquina de ensayos debe hacerse asegurándose que no se produzcan esfuerzos distintos al axial , para esto asegúrese que el eje de la probeta coincida con el eje de la

máquina , si la maquina dispone de dispositivos de seguridad , utilícelos y en caso de que estos tengan que ser ajustados a un torque especificado use un torquímetro para asegurar una buena instalación.

- La instalación de transductores tales como galgas extensiométricas deberá hacerse en el centro de la probeta o alejada un diámetro o más de los extremos .
- Coloque algún dispositivo que pueda prevenir heridas causadas por la salida repentina de la probeta durante el ensayo .
- Use las probetas medianas para determinar el esfuerzo de compresión y las probetas largas para determinar módulo de elasticidad .

#### **6.3.4.5 Reporte de resultados**

En el reporte se debe incluir las dimensiones de la probeta y máximo esfuerzo de compresión .

### **6.3.5 ENSAYO DE DUREZA BRINELL**

#### **6.3.5.1 Objetivo**

El ensayo determina la dureza del material al ser penetrado por una bola de 10 mm. de diámetro de acero templado .

La dureza Brinell se determina con la ecuación

$$HB = 2P / D\pi(D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

**P** = carga en Kgf. 3000Kgf

**D** = Diámetro de la bola 10 mm

**d** = Diámetro de la huella.

### 6.3.5.2 Probetas de ensayo

Los ensayos deben hacerse en lo posible en un área del producto listo para su comercialización , la superficie debe ser lijada o maquinada al punto que permita la medición de la huella dejada por el ensayo , otros tipos de probetas se pueden usar en un acuerdo entre el fabricante y el comprador , estas pueden ser monedas cuyo grosor permita que las huellas dejadas por el indentor no se evidencien en la cara opuesta a la del ensayo .

El botón de Brinell es una probeta con forma de cono truncado que permite hacer las indentaciones con gran seguridad , ya que no puede resbalar o moverse debido a su forma , las dimensiones de esta probeta están dadas en la figura 6.2 con sus dimensiones en mm.

### 6.3.5.3 Procedimiento

Para realizar el ensayo de dureza se debe colocar la probeta y realizar la indentación por 10 o 15 segundos , esto puede variar si se sospecha que el material es demasiado suave .

- Se deben hacer 3 indentaciones en forma aleatoria y de estas sacar un promedio.

En caso que la forma de la pieza no permita la medición de la dureza se puede recurrir al botón de Brinell , que es una probeta fundida como un apéndice de las piezas a controlar y que será cortada de las mismas , se puede usar en fundiciones donde la sección de control sea de un espesor mayor a 20 mm.

- **Formación de lotes** : Los lotes se forman con el mismo criterio que los lotes del ensayo de Tracción .

- **Numero de ensayos por lote** . El numero de ensayos por lote se debe acordar entre el comprador y el fabricante .
- **Validez de los ensayos** .- Un ensayo se invalida por una de las razones que se detallan a continuación :
  - a) Incorrecta preparación de probetas
  - b) Defectos tales como poros en las fundiciones
  - c) Montaje defectuoso
  - d) Operación defectuosa de la máquina .

**NOTA** Las probetas cuyos ensayos se invalidaron se pueden reutilizar luego de un corte y/o pulido , el reensayo sustituye al ensayo fallido .

Si alguno de los ensayos falla se deben realizar dos reensayos por cada ensayo fallido .

Si alguno de los reensayos falla el lote no debe aceptarse.

#### **6.3.5.4 Relación entre la resistencia a la tracción y la dureza**

El modulo de Young , el modulo de rigidez , la resistencia a la tracción y la dureza se relacionan ente si , el aumento del valor en una de estas se refleja en el aumento de las otras .

$$S_u = (K \pm 15) * HBN$$

En donde:

$K = 420$  para fundición sin tratamiento.

$K = 475$  para hierros normalizados o bainíticos

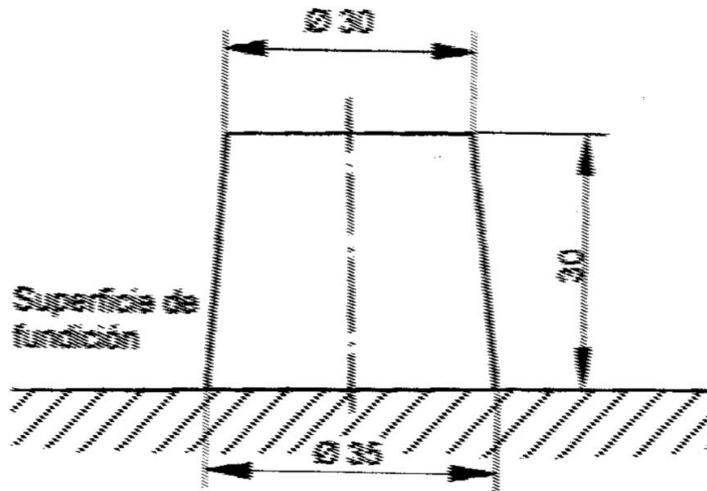


Figura 6.2 Botón de Brinell Fuente INCOTEC

### 6.3.6 DETERMINACIÓN DEL MODULO DE ELASTICIDAD Y COEFICIENTE DE POISSON

#### 6.3.6.1 Modulo de Elasticidad

Es la correlación que existe entre el esfuerzo y la deformación al aplicar esfuerzos de compresión o tensión por debajo del límite proporcional del material .

#### 6.3.6.2 Consideraciones Generales

La precisión requerida para determinar el modulo de Elasticidad es mayor que la requerida en la determinación de otras propiedades mecánicas .

La orientación de los cristales es primordial e la determinación del modulo de Elasticidad , en el caso del hierro la orientación de los cristales es aleatoria y el material no es homogéneo por lo que la determinación del modulo de Young

no es tan precisa, se debe tener en cuenta también la alineación de las probetas ya que esfuerzos extraños se producen por la falta de alineación al aplicar la fuerza .

#### 6.3.6.3 Procedimiento

- Mida diametralmente las probetas con una precisión de 0.0025 mm y saque promedios , se recomienda usar micrómetros para esta operación.
- Alinee bien la probeta en la máquina de ensayos universales y asegure una buena sujeción de la misma .
- Tome medidas simultáneas de la carga y el esfuerzo , la velocidad del ensayo debe ser lo suficientemente baja para evitar esfuerzos térmicos y suficientemente alta para evitar el efecto Creep , los cambios de temperatura durante el ensayo no serán tomados en cuenta .
- Utilice la mitad del valor del esfuerzo último como esfuerzo máximo durante el ensayo , se recomienda hacer 5 mediciones de deformación al aplicar 5 cargas sucesivas incrementadas en un mismo valor hasta llegar al valor máximo de  $\sigma$  último dividido por 2 .

#### 6.3.6.4 Interpretación de datos

Las lecturas del strain gage deben ser consideradas con la apreciación del instrumento , restando los valores iniciales para obtener las deformaciones reales , al tener registrados los valores de deformación y carga se utiliza la ecuación de **Esfuerzo = Modulo de Elasticidad \*  $\epsilon$**  luego estos datos se agrupan y se obtiene un promedio de ellos , debe quitarse valores extraños que pudiesen existir .

Para la determinación del coeficiente de Poisson se debe utilizar galgas extensiométricas de la misma marca , ubicadas en el centro de la probeta , uno longitudinal y otro transversal

### **6.3.7 ENSAYO DE FLEXION**

#### **6.3.7.1 Objeto**

El objeto de esta norma es establecer el procedimiento de ensayo en probetas de hierro gris fundidas separadamente en moldes de arena verde.

#### **6.3.7.2 Significado**

El ensayo de flexión en probetas de hierro se lo realiza en probetas sin maquinar ya que es útil y rápido , pero no debe sustituir al ensayo de tracción

Este tipo de ensayo es también muy útil para determinar la ductilidad relativa entre probetas de hierro fundido.

#### **6.3.7.3 Forma y Dimensión de las probetas**

Las probetas deben ser fundidas en forma separada con forma cilíndrica , existen tres tamaños de probetas que serán seleccionados de acuerdo a la sección de control que estas representan .

**Tabla 6.5 Tamaños de probeta**

	<b>Diámetro</b>	<b>Espesor de la sección de control</b>
<b>A</b>	22.5	De 6.4 mm. Hasta 12.7mm.
<b>B</b>	30.5	De 13.0 mm. Hasta 25.4 mm.
<b>C</b>	50.8	De 25.7 mm. Hasta 50.8 mm.

Fuente: Normas ASTM A 438

Los moldes de las probetas deben estar a temperatura ambiental antes de que el hierro sea colado , deben ser hechos en arena con las mismas características que la arena usada para las fundiciones que representan , luego de coladas las probetas deben permanecer en los moldes por lo menos hasta una temperatura de 500 °C ., antes de ser desmoldados o pueden ser desmoldados al mismo tiempo que las fundiciones que representan .

Las probetas sin maquinar deben asegurar que el punto de contacto entre los apoyos y la probeta sea puntual , así mismo como el contacto entre la probeta y la carga aplicada .

Se consideran probetas cilíndricas a aquellas en donde el diámetro no difiere mas de **0.64 mm**. En el caso de la probeta **A** , **1.27 mm** en el caso de las probetas **B y C** .

**Tabla 6.6 Tamaños y tolerancias**

	<b>Long. Total</b>	<b>Tolerancia</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Tolerancia</b>	<b>Dist entre apoyos</b>
<b>A</b>	381	25.4	22.4	0.8	305
<b>B</b>	533	25.4	30.5	1.5	457
<b>C</b>	686	25.4	50.8	2.5	610

Fuente: Normas ASTM A 438

En la tabla se Presentan los factores de corrección para las cargas de rotura y las cargas medidas , mida el diámetro en el lugar de la rotura.

## **6.3.8 ENSAYO DE IMPACTO CHARPY**

### **6.3.8.1 Objeto**

Esta norma establece el método de ensayo por impacto Charpy en hierro nodular.

### **6.3.9.2 Documentos a consultar**

Norma ASTM A 327 y E 10

### **6.3.9.3 Procedimiento**

El ensayo Charpy se debe realizar en una maquina de péndulo simple y con un solo impacto esta debe tener al menos una capacidad de 150 j .

Coloque el péndulo en el punto mas alto y mida la energía liberada , anote los resultados , verifique la libre oscilación del péndulo.

Coloque la probeta simétricamente entre lo apoyos y el lugar de impacto , asegure la probeta con las mordazas provistas si es del caso .

Realice el ensayo y mida la cantidad de energía que el péndulo alcanzo , la diferencia entre la energía liberada sin probeta y la energía con la probeta es la cantidad absorbida por la probeta .

Si una probeta no se rompe significa que absorbe el 100% de la energía y el ensayo debe ser anotado pero no se debe repetir sobre la misma probeta .

Una caracterización se debe hacer ensayando cuando menos tres probetas .

#### 6.3.8.4 Tamaño de la probeta

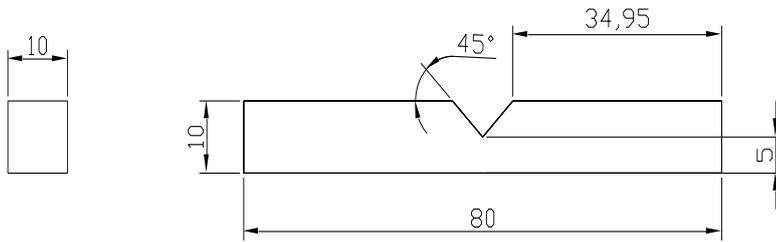
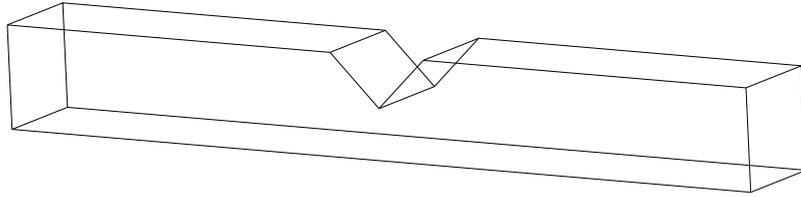
Las probetas deben ser maquinadas y deben cumplir con las siguientes medidas.

**Tabla 6.7 Medidas de Probetas**

	TIPO A	TIPO B
Diámetro	<b>28.57 mm +/- 0.051mm</b>	<b>20.00 mm +/- 0.03 mm</b>
Longitud	<b>203 mm +/- 13 mm</b>	<b>120 mm +/- 2mm.</b>
Distancia entre apoyos	<b>152 mm.</b>	<b>100mm +/- 0.5 mm.</b>

**Fuente Normas ASTM A 438**

O como en nuestro caso, la forma de la probeta de ensayo no es cilíndrica, sino como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 6.3 Probeta Rectangular**

### **6.3.8.5 Informe de Resultados**

El informe de resultados debe presentarse de la siguiente manera:

Los resultados son \_\_\_\_\_pies \*Lbf en una probeta de hierro fundido de diámetro \_\_\_\_\_ al realizar el ensayo de impacto Charpy .

### **6.3.9 EVALUACION DE LA MICROESTRUCTURA DEL GRAFITO EN FUNDICIONES DE HIERRO**

#### **6.3.9.1 OBJETO**

Este método cubre la clasificación de las hojuelas de grafito en las fundiciones grises , blancas y nodulares .

Los estándares que se presentan son los mismos que presenta la norma **ASTM A 247** , estas clasificaciones de los tamaños de hojuelas de grafito , su forma y distribución , son una adaptación de los estándares de la mencionada norma.

La determinación de el tamaño y distribución del grafito involucran el uso de reactivos químicos , y maquinaria , esta norma no establece los riesgos ni las normas de seguridad a seguir , la observación de medidas de seguridad será exclusivamente de las personas involucradas .

#### **6.3.9.2 Documentos a Consultar**

Normas ASTM E9 y A 247

### **6.3.9.3 Resumen del Método**

Existen gráficas estandarizadas de la distribución del grafito y las fotos obtenidas deberán ser comparadas con las estándar, esto no determina el tamaño de las hojuelas de grafito pero sí su distribución y tipo, tampoco establece la aplicabilidad de las fundiciones.

### **6.3.9.4 Probetas**

Las probetas deben ser un apéndice de las funciones o deben ser fundidas en forma separada, con una probeta es suficiente para saber cuál es la tendencia de grafitación en las piezas de control, se sugiere el uso de un cupón de ensayo o de la rotura de una parte de la pieza previamente diseñada para el ensayo.

### **6.3.9.5 Pulido de muestras**

Durante el pulido se deben observar las recomendaciones de la norma **E3** la cual establece las precauciones al pulir, observar que se debe girar la pieza **90** grados cada vez que se cambia de papel de lija a uno de granulometría mayor y no se debe regresar a una lija anterior, debe existir durante todo el proceso suficiente refrigerante con el objeto de no calentar la probeta, en la etapa final debe usarse pulimento de alúmina o pasta de diamante los cuales no extraen el grafito de la superficie pulida.

### **6.3.9.6 Clasificación del Grafito de acuerdo a la tabla**

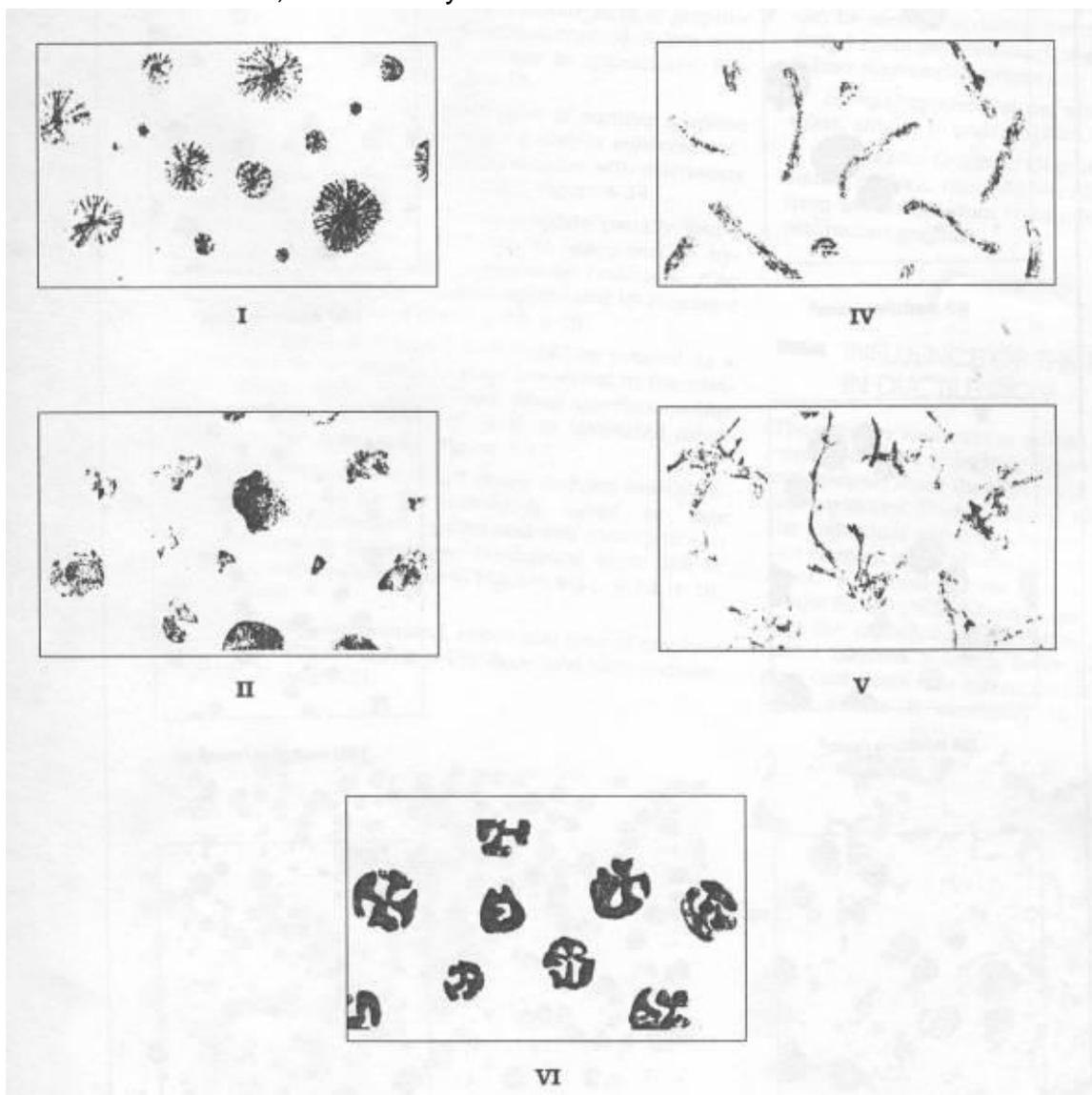
**Tipo I** .- Es la distribución del grafito esperada en las fundiciones dúctiles donde se observan esferulitas con una apariencia circular bien definida presentándose en distintos tamaños.

**Tipo II** .- El grafito esferoidal tiene unas deformidades que dan una apariencia de círculos discontinuos con pocas entrantes y salientes que no tienen efectos adversos en sus propiedades.

**Tipo III** .- Es la forma de grafito mas común en los hierros fundidos maléales en los cuales las esferulitas de grafito se presentan como estrellas , en esta distribución también se puede hallar grafito del tipo I y II .

**Tipo IV , V , VI** son las distribuciones mas usuales en los hierros dúctiles donde se observan grafitos laminares en el tipo IV , una formación híbrida entre esferulita y hojuela en el tipo V esferulitas porosas en la distribución del tipo VI .

**Tipo VII** .- Es la mas usual en los hierros de fundición gris con hojuelas de distintos tamaños , orientadas y distribuidas en forma aleatoria .



**Figura 6.4 Clases de formas hierro grafito dúctil, x100.**

### 6.3.9.7 Tamaño de nódulos

Los nódulos pueden ser medidos y clasificados de acuerdo a la tabla siguiente

**Tabla 6.8 Clasificación del Grafito basado en el tamaño**

<b>Tamaño</b>	<b>Dimensión máxima en mm. a100x</b>
1	128
2	64
3	32
4	16
5	8
6	4
7	2
8	1

Fuente: Ductile Iron Handbook

Para realizar la medición se debe analizar cuales son los nódulos mas frecuentes y medirlos , luego se saca un promedio de las dimensiones y se establece a que categoría pertenecen .

### 6.3.9.8 Reporte de resultados

El reporte será escrito de forma clara , precisa y sencilla como por ejemplo:

En la probeta ----- se encontró grafito eutectoide de clase VII D7 donde se aprecian un 30% de VIIA4 y un 70% VIID7 .

## 6.3.10 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO

### 6.3.10.1 Objeto

Determinar los procedimientos de determinación de tamaño de grano en metales.

### 6.3.10.2 Documentos Relacionados

Norma ASTM E 112 , E 3 .

### 6.3.10.3 Granos

Para las determinaciones de la norma se establece que un grano es un área cerrada de un material , cuando en los granos se evidencie la presencia de 2 constituyentes gemelos , las dos partes se consideraran un solo grano .

**Tamaño de grano.-** Cuando un grano tenga mas de un constituyente el tamaño de grano se refiriere a la matriz pero , cuando, exista un segundo elemento que tenga una presencia significativa será considerado como parte de la matriz y será contado como un grano , cuando existan constituyentes menores , inclusiones y defectos estos no serán considerados .

**Subgranos .-** Los subgranos son divisiones internas de los granos y para su conteo y medición se debe observar los mismos criterios que para los granos .

**Generalidades .-** Los granos dentro de la sección de estudio tienen valores que van desde un máximo hasta cero , dependiendo como hayan sido cortados los cristales por el plano de estudio , las dimensiones serán aproximadas por la inexistencia de 2 o mas planos de estudio gemelos en la misma probeta .

#### 6.3.10.4 Métodos de medición

**Método Planimétrico** .- En una fotografía tomada con un aumento de 100x a una probeta atacada sobreponer un rectángulo o círculo de área conocida , se recomienda un círculo o rectángulo de 5000mm<sup>2</sup> de área.

Contar los granos que se encuentran en el interior del área de control , mas la mitad de los granos intersecados por las líneas de contorno del círculo o rectángulo seleccionado , dividir el área entre el numero de granos , encontrando el tamaño de cada grano , deben existir a menos 50 granos en cada área de control , si existen menos de 50 granos esta área no se considerara representativa de la matriz y no será tomada en cuenta , para tener una buena aproximación y un promedio aceptable debe estudiarse al menos 3 áreas de control en las misma probeta .

Cuando se evidencie que los granos no tienen una orientación equiaxial se debe de tomar las lecturas en tres planos perpendiculares xy ,xz ,yz y sacar el tamaño de grano en cada uno de ellos , luego usar la formula :

$$N = 0.8\sqrt{N_{xy} * N_{xz} * N_{yz}}$$

#### 6.3.10.5 Tamaño de grano efectivo en metales conteniendo más de una fase

**Objetivo** .- Cuando un metal esta compuesto de mas de una fase , la determinación del tamaño de grano debe hacerse con precaución y aplicando criterios especiales .

Para la determinación del tamaño de grano en matrices con mas de 1 fase creada deliberadamente o aquellas accidentalmente creadas como las

inclusiones no serán tomadas en cuenta y todas las fases serán tratadas de una misma manera.

Se debe incluir el termino tamaño de grano efectivo para describir el tamaño de grado asumido donde se indicara que el grano esta constituido por ----- partículas .

Cuando existan islas de una de las fases esta debe ser contada como 1 solo grano o no tener en cuenta las divisiones internas de la isla .

Si alguna isla presenta interés se puede tratar separadamente incluyendo en los resultados el área que ocupa la isla y el tamaño de los granos que la constituyen , en la siguiente tabla se especifica el tamaño de grano relacionado con el área .

También existe un método lineal que consiste en atravesar por los granos una línea de 100 mm y contar el numero de granos intersecados , todos estos métodos no son exactos ya que dependen de la subjetividad del operador .

### **6.3.11 DESGASTE EN HIERRO NODULAR**

Este ensayo no fue posible realizarlo debido a las dimensiones de las probetas de hierro nodular por nosotros conseguidas, pero a continuación detallamos el proceso del mismo.

#### **6.3.13.1 OBJETIVO**

Esta norma cubre las características que debe tener un ensayo de desgaste por deslizamiento sobre probetas cilíndricas de hierro fundido , pueden usarse distintas condiciones de prueba que simulen condiciones de reales de trabajo .

#### **6.3.13.2 DOCUMENTOS RELACIONADOS .**

Dentro de los documentos relacionados se sugiere la consulta de las normas **ASTM G77 y G40** que fueron revisadas y adaptadas para la redacción de esta norma .

#### **6.3.13.3 RESUMEN DE PRACTICA**

El ensayo de desgaste se realiza al rotar dos probetas cilíndricas una contra la otra en el mismo sentido , lo que provocara el máximo deslizamiento relativo , creando la condición mas agresiva de desgaste , donde se determina la perdida de masa , la fuerza de contacto y la fuerza de fricción .

#### **6.3.13.4 SIGNIFICADO Y USO .**

Esta practica de laboratorio podrá ser usada como referencia siempre y cuando las condiciones de prueba sean similares a las condiciones de trabajo de la aplicación.

En esta practica se establecen los métodos de cálculo y el procedimiento del ensayo , los parámetros de ensayo son una potestad del usuario , aclarando que el desgaste no tiene un comportamiento lineal con relación a la distancia de ensayo .

#### **6.3.13.5 DEFINICIÓN .**

El desgaste es la perdida de masa superficial y progresiva debida a la acción de un movimiento relativo entre dos superficies .

### 6.3.13.6 PROCEDIMIENTO .

En el ensayo de desgaste se deben tomar los siguientes datos , tiempo de ensayo , revoluciones de la probeta , diámetro inicial y final , fuerza de contacto , fuerza de fricción entre la probeta y el elemento de desgaste , peso de la probeta inicial y final , y determinar la densidad .

### 6.3.13.7 REPORTE DE RESULTADOS .-

En el reporte se debe incluir :

- Material de la probeta
- Diámetro ancho
- Tiempo de ensayo
- Revoluciones de la probeta
- RPM de la probeta
- Fuerza de contacto
- Perdida de volumen
- Coeficiente de fricción
- Esfuerzos de Hertz

### 6.3.13.8 MÉTODO DE CALCULO.-

Para el calculo de la perdida de volumen , coeficiente de fricción y esfuerzo de Hertz se deben usar las siguientes formulas .

Esfuerzo de Hertz 
$$\sigma = 0.564 \sqrt{\frac{WE}{tD(1-v^2)}}$$

Coeficiente de fricción 
$$f = \frac{F}{W}$$

Perdida de volumen 
$$V_p = \frac{mf - mi}{d}$$

Coeficiente de fricción **f**

Fuerza de fricción **F**

Fuerza de contacto **W**

Masa inicial	<b>mi</b>
Masa final	<b>mf</b>
Densidad	<b>d</b>
Ancho	<b>t</b>
Modulo de elasticidad	<b>E</b>
Diámetro de la probeta	<b>D</b>
Coefficiente de Poisson	<b>v</b>

La geometría de la probeta y sus dimensiones serán según la probeta que cada equipo utilice.

## **6.3.12 ENSAYO DE TORSIÓN**

### **6.3.12.1 Objetivo**

Esta norma establece parámetros de ensayo para la practica del ensayo cuasi estático de torsión .

Esta norma hace referencia las normas **ASTM E 143 y E 558**

### **6.3.12.2 Selección del ensayo**

Para materiales tales como las fundiciones de hierro el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo ultimo se consideran los mismos.

### **6.3.12.3 Cálculo de esfuerzos superficiales**

Para el calculo de esfuerzos superficiales de debe usar la formula

$$S_s = \frac{16T}{\pi D^3}$$

Donde:

**Ss** es el esfuerzo superficial

**T** el torque aplicado

**D** es el diámetro de la probeta en la sección calibrada

#### **6.3.12.4 Equipamiento**

El equipo necesario para realizar este ensayo es una maquina capaz de aplicar torque a baja velocidad , la velocidad debe se cercana a los 10 grados por minuto , debe contar con un graduador relativo capaz de medir ángulos de 0.01 grados .

#### **6.3.12.5 Probetas**

La longitud y tamaño de las probetas serán las estipuladas por los fabricantes de los equipos , así mismo como la forma de sujeción de la probeta a las mordazas .

### **6.3.13 ENSAYO DE FATIGA**

#### **6.3.13.1 Objetivo**

Esta norma establece los parámetros a seguirse para la realización del ensayo a fatiga a temperatura ambiental con una amplitud constante de esfuerzos.

#### **6.3.13.2 Documentos aplicables**

ASTM E 206 , E 466 .

### 6.3.13.3 Significado

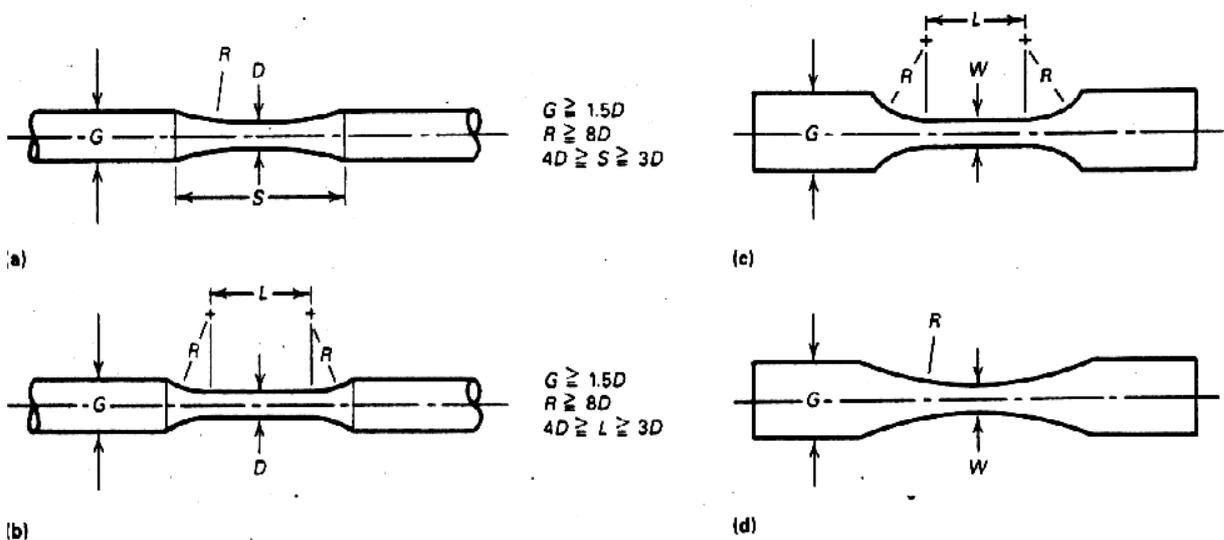
El ensayo a fatiga de una viga rotatoria con carga constante se puede usar como criterio para selección de materiales que estarán sometidos a dichos esfuerzos cíclicos, los esfuerzos podrán ser usados con fines de diseño únicamente cuando los esfuerzos a los que se someta al material sean idénticos a los del ensayo.

### 6.3.13.4 Diseño de la probeta

El diseño de la probeta dependerá del objetivo del ensayo, el espécimen de prueba debe cumplir ciertas características

La probeta deberá tener una sección calibrada que asegure el fallo en esa posición, la longitud calibrada de la probeta debe ser mayor a 4 veces el diámetro de la sección calibrada, los radio deben ser de al menos 8 veces el diámetro de la sección calibrada con el fin de eliminar los concentradores de esfuerzos.

### 6.3.13.5 Ejemplos de probetas



### 6.3.13.6 Frecuencia de Ensayo

Este ensayo debe realizarse sobre los 100 ciclos por minuto hasta los 10 000 ciclos por minuto , y a un máximo de 50 000 inversiones de esfuerzo .

### 6.3.13.7 Procedimiento

Calcule el esfuerzo flector que desea provocar a la probeta , ubique las cargas correspondientes a dicho esfuerzo , al inicial la rotación , tome el tiempo y las r.p.m. , con estos datos de carga y numero de ciclos se puede determinar una ecuación del tipo

$$S_n = aN^b$$

donde  $S_n$  es el esfuerzo a la fatiga ,  $N$  numero de ciclos y  $a$  ,  $b$  deben determinarse por métodos algebraicos .

## CAPITULO 7

### EVALUACIÓN ECONOMICA Y FINANCIERA

#### 7.1 EVALUACION ECONOMICA

La evaluación económica involucra el análisis de costos generados realizados durante la ejecución del proyecto, los que serán detallados en la tabla siguiente.

Tabla 7.1 Evaluación Económica

ITEM	VALOR UNITARIO	UNIDADES	TOTAL
<b>Ejecutores</b>	4 USD /Hora	500 h	200 x 2 = 4000
<b>Director</b>	20 USD /Hora	50 h	1000
<b>Codirector</b>	20 USD / Hora	50 h	1000
<b>Maestro Tornero y fresador</b>	6 USD/Hora	30 h	180
<b>Envío muestras Guayaquil</b>	4 USD	1 envío	4
<b>Análisis Químico Andec Funasa</b>	40 USD	2 análisis	80
<b>Ensayo de Tracc.</b>	10 USD	5 ensayos	50
<b>Ensayo de Comp.</b>	15 USD	5 ensayos	75
<b>Ensayo de Torsión</b>	20 USD	5 ensayos	100
<b>Ensayo de Dureza</b>	10 USD	5 ensayos	50
<b>Impacto Charpy</b>	7 USD	5 ensayos	35
<b>Ensayo de Fatiga</b>	5 USD	3 ensayos	15
<b>Suministros de</b>	150 USD	150 USD	150

<b>oficina</b>			
<b>Toner B/N y color</b>	40 USD	4	160
<b>Vehiculo</b>	400 USD		400
<b>Computador</b>	1 UDS / Hora	400	400
<b>Internet</b>	1.20 UDS / Hora	85	102
<b>Micelaneos</b>	200 USD		200
<b>Empastados</b>	12 USD	5	60
<b>Copias Libros</b>	0.02 USD	750	15
<b>Anillados Libros</b>	2 USD	3	6
<b>Copias Extras</b>	0.02 USD	100	20
<b>CD' s</b>	1.20 USD/CD	5	6
<b>TOTAL</b>			<b>8108 USD</b>

Continuación Tabla 7.1

Fuente: Personal

## 7.2 EVALUACIÓN FINANCIERA

Dado el objetivo general de este proyecto el cual es plantear una Propuesta de Norma para Caracterizar la fundición de hierro nodular, una evaluación financiera no puede llevarse a cabo, dado a que el valor de este bien será determinado por su volumen de ventas, es decir por el numero de paginas originales y copias certificadas que se emitan, por lo cual al momento no es posible establecer cualquier clase de índices financieros como el TIR y VAN.

## CAPITULO 8

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 8.1 CONCLUSIONES

- A lo largo de este proyecto, fueron realizados todos los ensayos, tanto mecánicos como estáticos, dinámicos, de estructura y químicos (espectrografía) los que proporcionaron datos necesarios para conocer las características del material ensayado (hierro nodular clase ASTM 65 45 12).

Esfuerzo Fluencia Tracción (Sy)	358 Mpa	52 032 Psi
Esfuerzo ultimo de tracción (Suy)	536,5 Mpa	77 811 Psi
Esfuerzo ultimo de Flexión (Sb)	1148 Mpa	166 503 Psi
Dureza Brinell (HBN)	214	
Esfuerzo ultimo de Torsión (Sst)	524.35 Mpa	75783.56 Psi
Esfuerzo ultimo de compresión (Suy)	375 Mpa	54 417 Psi.
Modulo de Elasticidad (E)	6920 Mpa	1 003 672 Psi
% Elongacion (%e)	15,71 %	
Coeficiente de Poisson (u)	0,28	
Energía de impacto	17.7 J	13.05 Lbf* ft
Esfuerzo ultimo de fatiga (1000 ciclos)	44 Mpa	6387 Psi

Fuente : Personal

- La metalografía permitió determinar con certeza ciertas características importantes de la estructura del material como la esferoidización, porcentaje en área, etc. Por medio de los ensayos realizados en los Laboratorios de la ESPE y con la ayuda de la documentación apropiada (normas), se diseñó una Propuesta de Norma y Caracterización de Hierro Nodular que facilitará el conocimiento de propiedades y características así como sus respectivos métodos de ensayo.
- Los Laboratorios de Metalurgia y Resistencia de Materiales de la ESPE, están en capacidad de ser utilizados para los ensayos de características

mecánicas mencionadas en este proyecto arrojando resultados coherentes y confiables. El laboratorio de Metalurgia al momento cuenta con las herramientas necesarias para hacer un análisis micrográfico de alta precisión y calidad mediante el Software Fly Video y CLEMEX.

- Los esfuerzos últimos (promedio) de torsión, flexión y compresión han sido relacionados con el esfuerzo último de tracción.

Esfuerzo de tracción a		Multiplique Por
	Corte	0.9
	Compresión	0.7
	Flexión	2.1
	Torsión	0.97

Fuente: Personal

- El objetivo de crear la propuesta de Norma del Hierro Nodular es el de dejar precedentes para que la Industria Nacional tenga mayor facilidad y efectividad al momento de verificar si las características de su producto se apegan a los valores estándar por medio de comparar con Normas para Fundiciones.
- La propuesta de Norma presentada en este proyecto fue avalizada mediante un certificado otorgado por un especialista en la industria de la Fundición (Anexo F).
- La dificultad de obtener el hierro nodular en el país, hizo que para realizar los ensayos necesarios se hayan hecho ciertas adaptaciones de las probetas disponibles.

## **8.2 RECOMENDACIONES**

- Se deben analizar los resultados obtenidos en la práctica con aquellos obtenidos teóricamente.
- Al realizar los ensayos mecánicos, se deben tener muy en cuenta todas las Normas y procedimientos de seguridad.
- Es recomendable que antes de realizar cualquier ensayo, se deba calibrar y encerar la máquina para obtener resultados fiables.

## **BIBLIOGRAFÍA**

USA ASTM STANDARS. A247 , A48 , A644 , A256 ,A327 , A438 , E8, E9, E10 , E111, E112, E74, E709, E85 G77 ,G40

E143, A206, E466 Referentes a ensayos sobre hierro fundido

USA 1982 varias secciones.

APRAIZ J. Editorial URMO 1978, Hierro, Aceros y Fundiciones.

SHIGLEY J Y MISCHKE CH. , Mc Graw Hill 1990, Diseño en Ingeniería Mecánica.

APRAIZ J. Editorial Limusa 1998, Fundiciones.

COLOMBIA, INCONTEC Norma colombiana de clasificación de fundición 2001

AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY Ductile Iron Molten Metal Processing, AFS 1994, 2nd edition.

AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY Ductile Iron Handbook, ASM 1992.

S. I. KARSAY Ductile Iron Practice, AFS 1985.