



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA
DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA SOBRE
LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN VARILLAS DE
ACERO”**

ALLAUCA PANCHO FABIÁN ROBERTO

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR

2011

Espoch

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

CONSEJO DIRECTIVO

Agosto, 02 de 2011

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

FABIÁN ROBERTO ALLAUCA PANCHO

Titulada:

**“INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA SOBRE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS EN VARILLAS DE ACERO”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Geovanny Novillo A.
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Mario Pástor
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Raúl Cabrera
ASESOR DE TESIS

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: FABIÁN ROBERTO ALLAUCA PANCHO

TÍTULO DE LA TESIS: “INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA
SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN VARILLAS DE ACERO”

Fecha de Examinación: Agosto, 02 de 2011

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
ING. GEOVANNY NOVILLO (Presidente Trib. Defensa)			
ING. MARIO PÁSTOR (Director de Tesis)			
ING. RAÚL CABRERA (Asesor)			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal quien certifica al Consejo Directivo que las condiciones de la
defensa se han cumplido.

f) Presidente del Tribunal

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos- científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

f) Fabián Roberto Allauca Pancho

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarnos la oportunidad de obtener una profesión y ser personas útiles a la sociedad.

Y en especial para todos los amigos, compañeros y personas que nos apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito una etapa importante de nuestras vidas.

Fabián Roberto Allauca Pancho

DEDICATORIA

A Dios, por brindarme la vida, por darme una familia maravillosa y por darme la oportunidad de terminar mi carrera; a mis queridos padres por apoyarme incondicionalmente en mis estudios, por estar a mi lado en los momentos difíciles de mi vida, y por su incondicional amor; a mis hermanas por su ayuda, comprensión y apoyo; a mis profesores por enseñarme los conocimientos necesarios para culminar exitosamente mi carrera; y a todos mis amigos que de una u otra forma estuvieron a mi lado para incentivar me a terminar este presente trabajo.

Fabián Roberto Allauca Pancho

SIMBOLOGÍA

<i>VC</i>	Varilla corrugada
<i>C.E.</i>	Carbono equivalente
<i>Fe</i>	Hierro
<i>C</i>	Carbono
<i>Mn</i>	Manganeso
<i>Si</i>	Silicio
<i>Cu</i>	Cobre
<i>Ni</i>	Níquel
<i>Cr</i>	Cromo
<i>Mo</i>	Molibdeno
<i>V</i>	Vanadio
<i>Al</i>	Aluminio
<i>Ti</i>	Titanio
<i>Nb</i>	Niobio
<i>B</i>	Boro
<i>C_{eq}</i>	Carbono equivalente
<i>G</i>	Rapidez de crecimiento
<i>N</i>	Rapidez de nucleación
<i>°C</i>	Temperatura en grados Centígrados
<i>°K</i>	Temperatura en grados Kelvin (absoluta)
<i>°F</i>	Temperatura en grados Fahrenheit
<i>HB</i>	Dureza Brinell
<i>P</i>	Carga aplicada en Kg
<i>D</i>	Diámetro de la bola en mm
<i>d</i>	Diámetro de la huella en mm
<i>Hv</i>	Dureza Vickers
<i>HRC</i>	Dureza Rockwell C
<i>fcc</i>	Estructura cúbica centrada en las caras
<i>bcc</i>	Estructura cúbica centrada en el cuerpo
<i>bct</i>	Estructura tetragonal centrada en el cuerpo

Fe_3C	Cementita
α	Ferrita
γ	Austenita
μm	Micras
mm	Milímetros
kg	Kilogramos
lb	Libra
$pu\lg$	Pulgada
M	Martensita
A	Austenita
P	Perlita
F	Ferrita
$f.W$	Ferrita Widmanstatten
MPa	Mega Pascales
V_{ef}	Velocidad de enfriamiento
T_0	Temperatura inicial de la muestra sujeta al análisis
T_f	Temperatura final de la muestra sujeta al análisis
t	tiempo en que la muestra pasa de T_0 a T_f
$H50$	Varilla enfriada en el horno a 50°C
$N20$	Varilla enfriada al medio ambiente
$1V$	Varilla enfriada en una corriente de aire proveniente de un venterol
$2V$	Varilla enfriada en una corriente de aire proveniente de dos venteroles
N	Número de granos observados / $pu\lg^2$ a una ampliación de 100x
n	Número de tamaño de grano
f	Multiplicador de Jeffries
G	Tamaño de grano ASTM austenítico
Fa	Varilla en condición de suministro
S	Esfuerzo
ε	Deformación unitaria
S_y	Límite de fluencia
S_{ut}	Resistencia última a la tracción

LISTA DE ABREVIACIONES

<i>NTE</i>	Normas Técnicas Ecuatorianas
<i>INEN</i>	Institute Nacional Ecuatoriano de Normalización
<i>GLP</i>	Gas Licuado de Petróleo
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>ESPOCH</i>	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
<i>CCT</i>	Cooling Continues Transformations
<i>TEC</i>	Transformación a Enfriamiento Continuo
<i>IPS</i>	Deformación del plano invariante (del inglés <i>invariant plane strain</i>)

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO 1:** Informe de composición química de aceros de baja aleación
- ANEXO 2:** Ensayos de tracción para probetas de varilla corrugada de 12mm de diámetro, en condiciones de suministro (Fa) y tratadas térmicamente (H50, N20, 1V, 2V).
- ANEXO 3:** Ensayos de tracción para probetas de varilla corrugada de 14mm de diámetro, en condiciones de suministro (Fa) y tratadas térmicamente (H50, N20, 1V, 2V).

RESUMEN

Con el propósito de determinar las microestructuras que presenten propiedades mecánicas óptimas, se ha estudiado la Influencia de la Microestructura sobre las Propiedades Mecánicas en Varillas de Acero. Se realizaron transformaciones de fase usando diferentes velocidades de enfriamiento y luego se caracterizaron las propiedades mecánicas y tecnológicas (ensayos metalográficos, ensayos mecánicos y ensayos tecnológicos) en varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro proporcionadas por la empresa NOVACERO S.A.

Las probetas de varilla corrugada fueron sometidas a un proceso de calentamiento hasta la temperatura de austenitización de 900°C seguida de enfriamiento hasta 400°C. Las velocidades de enfriamiento a las cuales fueron expuestas las muestras fueron en total cuatro, las mismas que dieron como resultado variaciones de los porcentajes de fases presentes en las diferentes muestras.

Los ensayos mecánicos y tecnológicos demostraron que las probetas enfriadas bajo velocidades de 2,9762 °C/s para varillas de 12 mm de diámetro y 2,6316 °C/s para varillas de 14 mm de diámetro presentaron las mejores propiedades mecánicas de tensión. Sin embargo, éstas produjeron también la reducción de la resistencia al impacto. Esto se debe a que las microestructuras que se encontraron a las velocidades de enfriamiento antes mencionadas en la capa subsuperficial (zona 2) fueron perlita media y ferrita Widmanstaetten placas laterales primarias y secundarias. Esta capa muestra una importante variación con respecto al núcleo (zona 3) en la cual se encontraron perlita gruesa y ferrita alotriomórfica. Por otro lado, los resultados del ensayo de doblado fueron completamente satisfactorios y no se encontraron fisuras superficiales.

Los resultados obtenidos muestran que al enfriar las varillas en el rango de velocidades estudiadas, se pueden conseguir incrementos de las propiedades mecánicas de tensión de alrededor del 10,96% a costa de la reducción en la resistencia al impacto de alrededor del 8,68% en comparación con las muestras de varilla corrugada en condiciones de suministro. Sin embargo, la reducción de la resistencia al impacto no afectará significativamente el comportamiento de la varilla en el ensayo estandarizado de dobles.

SUMMARY

With the purpose of determining the micro-structures with optimum mechanical properties, the Influence of the Micro-Structure on the Mechanical Properties in Steel Rods has been studied. Phase transformations were performed by using different cooling speeds, and then, both the mechanical and technological properties (metallographic, mechanical, and technological tests) were characterized in corrugated rods of 12 and 14 mm diameter provided by NOVACERO S. A.

The corrugated rod test-tubes were put into a heating process up to a temperature of 900°C followed by a cooling one up to 400°C. The cooling speeds to which the samples were exposed were four and gave as a result percentage variations of present phases in the different samples.

Both the mechanical and technological tests showed that the test-tubes cooled under speeds of 2,9762°C/s for 12 mm-diameter rods, and 2,6316°C/s for 14 mm-diameter rods showed the best stress mechanical properties. However, these also produce the decrease of the impact resistance. The reason is that the micro-structures found to the cooling speeds above mentioned in the sub-surface stratum (zone 2) were medium pearlite and Widmanstatten ferrite, primary and secondary side plates. This stratum shows an important variations with respect to the nucleus (zone 3) into which gross pearlite and allotriomorphs ferrite were found. On the other side, the results of the bending test were completely satisfactory and superficial fissures were not found.

The results got show that on cooling the rods in the variation of the speeds studied, increases of the stress mechanical properties can be obtained in about 10,96% at the cost of the reduction of the impact resistance in about 8,68% in comparison with the samples of corrugated rod in supply conditions. However, the decrease of the impact resistance will not affect meaningfully on the performance of the rod in the bending standardized test.

TABLA DE CONTENIDOS

<u>CAPÍTULO</u>		<u>PÁGINA</u>
1.	GENERALIDADES	
1.1.	Antecedentes.....	1
1.2.	Justificación.....	2
1.3.	Objetivos.....	3
1.3.1.	Objetivo general.....	3
1.3.2.	Objetivos específicos.....	3
2.	MARCO TEÓRICO	
2.1.	Proceso de fabricación de la varilla de construcción.....	5
2.1.1.	Introducción.....	5
2.1.2.	Procesos para la obtención del acero.....	5
2.1.2.1.	Obtención del acero a través de minerales de hierro.....	6
2.1.2.2.	Obtención del acero a través de la chatarra de acero o fundiciones reciclables.....	7
2.1.3.	Colada continua.....	7
2.1.4.	Procesos de laminación.....	8
2.1.4.1.	Laminación en caliente.....	9
2.1.4.2.	Trenes de laminación.....	9
2.1.5.	Propiedades de las varillas.....	10
2.2.	Transformaciones de fase en el acero.....	13
2.2.1.	Introducción.....	13
2.2.2.	Mecanismo de cristalización.....	14
2.2.3.	Tamaño de grano.....	15
2.2.4.	Difusión atómica.....	16
2.2.4.1.	Difusión por vacantes.....	17
2.2.4.2.	Difusión intersticial.....	18
2.2.5.	Transformación de la austenita.....	18
2.2.5.1.	Recocido.....	20

2.2.5.1.1.	Diagrama de fase hierro-carburo de hierro.....	20
2.2.5.1.2.	Desarrollo de microestructuras en aleaciones hierro-carbono.....	24
2.2.5.1.3.	Definición de estructuras.....	28
2.2.5.2.	Normalizado.....	29
2.2.5.2.1.	Diagramas de transformación por enfriamiento continuo.....	31
2.2.5.2.2.	Ferrita.....	34
2.2.5.2.2.1.	Morfología de la ferrita.....	35
2.2.5.3.	Temple.....	38
2.2.5.3.1.	Martensita.....	39
2.2.6.	Comportamiento mecánico de las aleaciones hierro-carbono.....	40
2.2.6.1.	Ferrita.....	40
2.2.6.2.	Perlita.....	40
2.2.6.3.	Bainita.....	42
2.2.6.4.	Martensita.....	43

3. EXPERIMENTACIÓN

3.1.	Obtención, selección y preparación de probetas de varillas corrugadas de diferentes diámetros.....	45
3.1.1.	Obtención de probetas de varilla corrugada.....	45
3.1.2.	Selección de probetas de varilla corrugada.....	45
3.1.3.	Preparación de probetas de varilla corrugada.....	46
3.2.	Transformaciones de fase en probetas con diferentes velocidades de enfriamiento.....	46
3.2.1.	Cálculo de la velocidad de enfriamiento para varillas corrugadas laminadas en fábrica.....	47
3.2.2.	Determinación de las distintas velocidades de enfriamiento para muestras de varillas corrugadas.....	48
3.2.2.1.	Procedimiento de preparación de muestras.....	49
3.2.2.2.	Ensayos para la determinación de las velocidades de enfriamiento...	49
3.3.	Ensayo espectrométrico.....	52
3.4.	Ensayos metalográficos.....	55
3.4.1.	Preparación de muestras metalográficas.....	55

3.4.2.	Inclusiones no metálicas.....	61
3.4.2.1.	Ensayo de inclusiones.....	63
3.4.2.2.	Procedimiento para el ensayo de inclusiones.....	65
3.4.2.3.	Resultados obtenidos para el ensayo de inclusiones.....	66
3.4.3.	Determinación del tamaño de grano.....	67
3.4.3.1.	Método de comparación.....	68
3.4.3.2.	Método de intercepción (o de Heyn).....	69
3.4.3.3.	Método planimétrico (o de Jeffries).....	69
3.4.3.4.	Procedimiento para la medición del tamaño de grano mediante el método de intercepción.....	70
3.4.3.5.	Resultados del tamaño de grano.....	71
3.4.4.	Determinación del porcentaje de fases.....	73
3.4.4.1.	Procedimiento para la determinación del porcentaje de fases.....	73
3.4.4.2.	Resultados de la determinación del porcentaje de fases.....	74
3.5.	Ensayos mecánicos.....	75
3.5.1.	Dureza.....	76
3.5.1.1.	Ensayo de dureza Brinell.....	77
3.5.1.2.	Procedimiento para el ensayo de dureza Brinell.....	78
3.5.1.3.	Resultados obtenidos para el ensayo de dureza.....	79
3.5.2.	Ensayo de tracción.....	80
3.5.2.1.	Propiedades de tensión (o tensil).....	81
3.5.2.2.	Procedimiento para el ensayo de tracción.....	84
3.5.2.3.	Resultados del ensayo de tracción.....	85
3.6.	Ensayos tecnológicos.....	86
3.6.1.	Ensayo de doblado.....	86
3.6.1.1.	Procedimiento para el ensayo de doblado.....	87
3.6.1.2.	Ensayo no destructivo de líquidos penetrantes.....	88
3.6.1.2.1.	Clases de líquidos penetrantes.....	89
3.6.1.2.2.	Sistemas penetrantes.....	89
3.6.1.2.3.	Procedimiento del ensayo de líquidos penetrantes.....	90
3.6.1.3.	Decapado químico.....	92
3.6.1.3.1.	Procedimiento para el decapado químico.....	92
3.6.2.	Resistencia al impacto.....	93

3.6.2.1.	Tenacidad y pruebas de impacto.....	93
3.6.2.2.	Ensayo Charpy.....	95
3.6.2.3.	Procedimiento para el ensayo Charpy.....	95
3.6.2.4.	Resultados del ensayo Charpy.....	96

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.	Introducción.....	98
4.2.	Análisis metalográfico.....	98
4.2.1.	Análisis de inclusiones.....	98
4.2.2.	Efecto de las inclusiones sobre las propiedades mecánicas	101
4.2.2.	Análisis de la determinación del tamaño de grano.....	103
4.2.3.	Determinación del porcentaje de fases.....	108
4.3.	Análisis de los ensayos mecánicos.....	121
4.3.1.	Análisis de los ensayos de dureza.....	121
4.3.2.	Análisis de los ensayos de tracción.....	124
4.4.	Análisis de los ensayos tecnológicos.....	127
4.4.1.	Análisis del ensayo de doblado.....	127
4.4.2.	Análisis del ensayo de impacto.....	131
4.5.	Establecer la relación microestructuras – propiedades mecánicas de la varilla.....	134
4.6.	Analizar que microestructura presenta propiedades óptimas.....	136

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.	Conclusiones.....	140
5.2	Recomendaciones.....	142

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA

LINKOGRAFÍA

ANEXOS

LISTA DE TABLAS

<u>TABLA</u>		<u>PÁGINA</u>
2.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS VARILLAS CON RESALTES PARA HORMIGÓN ARMADO.....	11
2.2	COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	11
2.3	COMPOSICIÓN QUÍMICA. ESPECIFICACIONES PARA EL CONTENIDO DE AZUFRE Y FÓSFORO.....	12
2.4	ESPECIFICACIONES MECÁNICAS DE LAS VARILLAS CON RESALTES PARA HORMIGÓN ARMADO.....	12
3.1	TIEMPO Y VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO PROMEDIO PARA VARILLAS CORRUGADAS DE 12mm DE DIÁMETRO PROVENIENTES DEL LOTE 4141.....	48
3.2	TIEMPOS PROMEDIOS PARA VARILLAS CORRUGADAS DE 12mm DE DIÁMETRO ENFRIADAS DE 900°C A 400°C.....	51
3.3	VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO PROMEDIO PARA VARILLAS CORRUGADAS DE 12mm DE DIÁMETRO ENFRIADAS DE 900°C A 400°C.....	51
3.4	TIEMPOS PROMEDIOS PARA VARILLAS CORRUGADAS DE 14mm DE DIÁMETRO ENFRIADAS DE 900°C A 400°C.....	52
3.5	VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO PROMEDIO PARA VARILLAS CORRUGADAS DE 14mm DE DIÁMETRO ENFRIADAS DE 900°C A 400°C.....	52
3.6	RESULTADOS DEL ENSAYO ESPECTROMÉTRICO PARA VARILLAS CORRUGADAS DE 12 Y 14mm DE DIÁMETRO.....	54
3.7	REACTIVOS DE ATAQUE PARA EXAMEN MICROSCÓPICO.....	61
3.8	CLASIFICACIÓN DE LAS INCLUSIONES.....	62
3.9	INTERVALOS DE TAMAÑO DE GRANO DE LA ASTM, $N=2^{n-1}$	68
3.10	RELACIÓN ENTRE LA AMPLIACIÓN UTILIZADA Y EL MULTIPLICADOR DE JEFFRIES PARA UN ÁREA DE 5000mm ²	70
3.11	NÚMERO DE GRANOS INTERSECADOS VC12Fa.....	71

3.12	TAMAÑOS DE GRANO PRESENTES EN VARILLAS CORRUGADAS DE 12 Y 14mm DE DIÁMETRO ENFRIADAS A DISTINTAS VELOCIDADES.....	72
3.13	PORCENTAJES DE FASES PRESENTES EN VARILLAS DE 12 Y 14mm DE DIÁMETRO.....	75
3.14	DUREZA BRINELL OBTENIDA PARA CADA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO (VARILLAS DE 12 Y 14mm DE DIÁMETRO).....	80
3.15	RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN PARA PROBETAS DE 12 Y 14mm DE DIÁMETRO.....	85
3.16	RESULTADOS DEL ENSAYO DE IMPACTO.....	97
4.1	TAMAÑOS DE GRANO PRESENTES EN VARILLAS CORRUGADAS DE 12 Y 14mm DE DIÁMETRO ENFRIADAS A DISTINTAS VELOCIDADES.....	103
4.2	TAMAÑOS DE GRANOS ENCONTRADOS DESPUÉS DE REALIZAR EL BARRIDO COMPLETO EN VARILLAS CORRUGADAS DE 12 Y 14 mm DE DIÁMETRO ENFRIADAS A DISTINTAS VELOCIDADES.....	105
4.3	PORCENTAJES DE FASES PRESENTES EN VARILLAS DE 12 Y 14mm DE DIÁMETRO.....	108
4.4	MORFOLOGÍAS DE FERRITA Y PERLITA PRESENTES EN VARILLAS CORRUGADAS DE 12 mm DE DIÁMETRO.....	111
4.5	MORFOLOGÍAS DE FERRITA Y PERLITA PRESENTES EN VARILLAS CORRUGADAS DE 14 mm DE DIÁMETRO.....	112
4.6	MORFOLOGÍA DE LA FERRITA PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO EN VARILLAS CORRUGADAS DE 12mm DE DIÁMETRO.....	114
4.7	MORFOLOGÍA DE LA FERRITA PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO EN VARILLAS CORRUGADAS DE 14mm DE DIÁMETRO.....	116
4.8	DUREZA BRINELL OBTENIDA PARA CADA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO (VARILLAS DE 12 Y 14mm DE DIÁMETRO.....	121
4.9	DUREZA BRINELL CALCULADA Y TEÓRICA OBTENIDA PARA DISTINTAS VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO.....	123

4.10	RESISTENCIA ÚLTIMA A LA TRACCIÓN CALCULADA Y TEÓRICA OBTENIDA PARA DISTINTAS VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO.....	126
4.11	RESULTADOS DEL ENSAYO DE DOBLADO PARA PROBETAS DE 12 Y 14mm DE DIÁMETRO.....	127
4.12	RESULTADOS DEL ENSAYO DE LÍQUIDOS PENETRANTES.....	128
4.13	RESULTADOS DEL ENSAYO DE IMPACTO.....	131
4.14	RELACIÓN ENTRE LAS MICROESTRUCTURAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN VARILLAS DE 12mm DE DIÁMETRO.....	135
4.15	RELACIÓN ENTRE LAS MICROESTRUCTURAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN VARILLAS DE 14mm DE DIÁMETRO.....	135
4.16	COMPARACIÓN ENTRE PROBETAS 12-Fa, 14-Fa Y 12-2V, 14-2V...	138
4.17	VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO, TAMAÑO DE GRANO, % PERLITA, DUREZA, RESISTENCIA AL IMPACTO Y ESFUERZO DE FLUENCIA PARA VARILLAS DE 12mm DE DIÁMETRO.....	139
4.13	VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO, TAMAÑO DE GRANO, % PERLITA, DUREZA, RESISTENCIA AL IMPACTO Y ESFUERZO DE FLUENCIA PARA VARILLAS DE 14mm DE DIÁMETRO.....	139

LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>		<u>PÁGINA</u>
2.1	Diagrama del alto horno.....	6
2.2	Horno de arco eléctrico, vista en corte.....	7
2.3	Proceso de colada continua.....	8
2.4	Trenes de laminación en caliente.....	9
2.5	Varillas con resaltes transversales perpendiculares.....	12
2.6	Varillas con resaltes transversales inclinados.....	13
2.7	Varillas con ranuras longitudinales.....	13
2.8	Dendritas de magnesio que crecen a partir de un líquido.....	14
2.9	Representación esquemática de la frontera de grano entre dos cristales.....	14
2.10	Representación esquemática del proceso de cristalización por nucleación y crecimiento dendrítico.....	15
2.11	a) Fragilidad de un metal de grano grueso al impacto; b) frecuente cambio de dirección de la fuerza en la ruptura de un metal de grano fino.....	16
2.12	Representación esquemática de la difusión a) por vacantes y b) intersticial.....	17
2.13	Estructura cristalina de la austenita: El hierro (en gris) esta dispuesto en una estructura fcc, mientras que el carbono (en azul) está presente como defecto intersticial.....	19
2.14	Microestructura de la austenita.....	19
2.15	Diagrama de fase hierro-carburo de hierro.....	21
2.16	Fotomicrografía de (a) ferrita α (x90) y (b) austenita (x325).....	22
2.17	Representación esquemática de las microestructuras de un acero al carbono eutectoide (0,77%C) por encima y por debajo de la temperatura eutectoide.....	25
2.18	Microestructura perlítica de un acero eutectoide mostrando láminas alternas de ferrita α (fase clara) y Fe_3C (láminas más delgadas y oscuras). x500.....	25

2.19	Representación esquemática de las microestructuras de un acero al carbono hipoeutectoide de composición C_0 (menor de 0,77%C) a medida que se enfría desde la fase austenítica hasta por debajo de la temperatura eutectoide.....	27
2.20	Fotomicrografía de un acero 0,38%C con una microestructura constituida por perlita y ferrita proeutectoide x635.....	27
2.21	Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipereutectoide de composición C_1 (cuyo contenido de carbono está comprendido entre el 0,77 y el 2,1%) enfriado desde la región de fases austenítica hasta por debajo de la temperatura eutectoide.....	28
2.22	Microestructura de un acero con 1,4%C formado por cementita proeutectoide blanca reticulada alrededor de las colonias de perlita. x1000.....	28
2.23	Intervalo de recocido, normalizado y endurecimiento para aceros al carbono.....	30
2.24	Acero normalizado al 0,50%C, calentado a 980°C y enfriado al aire; 100x las áreas perlíticas están rodeadas por ferrita proeutectoide.....	31
2.25	Esquema que muestra la diferencia en estructura perlítica, debido al recocido y normalizado.....	31
2.26	Diagramas sobreimpresos de transformación isotérmica y de enfriamiento continuo de un acero eutectoide.....	32
2.27	Curvas de enfriamiento moderadamente rápido y lento sobreimpresas encima de un diagrama de transformación de un acero eutectoide.....	32
2.28	Diagrama de transformación por enfriamiento continuo para un acero de 0,53%C.....	33
2.29	Microestructuras obtenidas al realizar enfriamientos a diferentes velocidades para un acero de 0,53%C a) Microestructura 100% martensítica obtenida al enfriar en un tiempo de 0,60 segundos obteniendo una dureza de 761Hv. b) Fotomicrografía 90% martensita, 10% perlita fina. c) Fotomicrografía 100% perlita gruesa. d) Fotomicrografía del material base.....	34

2.30	a) Ferrita alotriomórfica a x500 obtenida de un acero de 0,34%C, enfriado durante 12 minutos desde 790°C. b) Ferrita alotriomórfica y ferrita ideomórfica a x500 obtenida de un acero de 0,34%C, enfriado durante 12 minutos desde 790°C.....	36
2.31	Ferrita Widmanstatten (<i>f.W</i>).....	37
2.32	Fotomicrografía de un acero con microestructura martensítica. Los granos en forma de aguja son el constituyente martensita y las regiones blancas son austenita retenida; no se ha transformado durante el temple rápido. 1220x.....	40
2.33	(a) Límite elástico, resistencia a la tracción y dureza Brinell frente a porcentaje de carbono de un acero al carbono y microestructura de perlita fina. (b) Ductilidad (%EL y %AR) y energía de impacto izod frente a porcentaje de carbono de un acero al carbono y microestructura de perlita fina.....	41
2.34	(a) Durezas Brinell y Rockwell frente a porcentaje de C de un acero al carbono y microestructura de perlita gruesa y esferoidal. (b) Ductilidad (%AR) en función del porcentaje de C de un acero al carbono y microestructura de perlita gruesa y esferoidal.....	42
2.35	Dureza Brinell y resistencia a la tracción Vs la temperatura isotérmica de transformación para un acero eutectoide, para una estructura bainítica y perlítica.....	43
2.36	Durezas en función del porcentaje de C de un acero al carbono y microestructura de martensita y de perlita fina.....	44
3.1	Almacenamiento de varillas.....	45
3.2	Fotografía de un lote de varillas de 12mm de diámetro nominal y 600mm de longitud.....	46
3.3	Fotografía de un lote de varillas de 14mm de diámetro nominal y 600mm de longitud.....	46
3.4	Temperatura de austenitización para un acero normalizado con 0,3%C.....	47
3.5	Secciones de 35cm y 25cm de longitud de varillas corrugadas, ubicadas dentro del horno eléctrico.....	49
3.6	Medición de temperatura para muestras de varillas.....	51

3.7	Venterol Blower.....	51
3.8	Pulido de la muestra en la lijadora.....	53
3.9	Base de apoyo.....	53
3.10	a) Fotomicrografía de la diferencia en composición química de las fases. b) Fotomicrografía de hierro puro.....	60
3.11	Imágenes de inclusiones; en la parte izquierda se indican microfotografías de inclusiones en varillas de 12 y 14mm de diámetro; en la parte derecha se indica imágenes tomadas de la norma ASTM E45-95. a) Sulfuro A2 en varilla de 14mm de diámetro. b) Alúmina B1 en varilla de 12mm. c) Silicato C1½ en varilla de 12mm. d) Óxido globular D1 en varilla de 12mm.....	65
3.12	Inclusiones en varilla de 12mm de diámetro.....	66
3.13	Inclusiones en varilla de 14mm de diámetro.....	67
3.14	Microestructura de varilla corrugada de 12mm de diámetro atacada con nital 2%.....	71
3.15	(a) Microfotografía de la varilla corrugada de 12mm de diámetro en condición de suministro, tomada a 100x y atacada con nital al 2%. (b) Microfotografía analizada en el programa ScopePhoto, áreas rojas perlita y áreas blancas ferrita. (c) Imagen del programa ScopePhoto donde se muestra las curvas que nos indican el porcentaje de áreas rojas (150 de 255).....	74
3.16	Esquema de una esfera de penetración de diámetro y carga conocida aplicada sobre la superficie de un material.....	77
3.17	Durómetro.....	79
3.18	Muestra tensil fijada a un extensómetro.....	80
3.19	a) Gráfica esfuerzo-deformación para un acero dúctil. b) Gráfica esfuerzo-deformación para un material frágil.....	81
3.20	Muestra tensil antes y después de que el material falle.....	82
3.21	Máquina Universal-Tinius Olson.....	85
3.22	Material y equipo utilizado en el ensayo de tracción.....	85
3.23	Máquina Universal-Tinius Olson – Ensayo de Doblado.....	88
3.24	Esquema del procedimiento del ensayo de líquidos penetrantes.....	91

3.25	Kit MAGNAFLUX – SPOTCHECK para ensayo de líquidos penetrantes.....	91
3.26	a) Solución de ácido sulfúrico al 10% utilizado para el decapado químico. b) Tanque y calentador eléctrico utilizado para el decapado químico. c) probetas sumergidas en ácido sulfúrico al 10%.....	92
3.27	a) Dispositivo de ensayo Charpy. b) Muestras típicas.....	94
3.28	Péndulo Charpy – CEAST.....	96
3.29	Péndulo Charpy – ESPOCH.....	96
4.1	Inclusiones en varilla de 12mm de diámetro.....	99
4.2	Inclusiones en varilla de 14mm de diámetro.....	101
4.3	Efectos de la cantidad de azufre y la orientación sobre la resistencia al impacto.....	102
4.4	Barrido microscópico horizontal y vertical en una sección transversal de varilla corrugada.....	104
4.5	Diagrama Tamaño de Grano Vs Distancia, para una probeta de varilla corrugada de 12 mm de diámetro enfriada a 1,1287 °C/s.....	106
4.6	Diagrama Tamaño de Grano Vs Velocidad de Enfriamiento, para probetas de varilla corrugada de 12 mm de diámetro tratadas térmicamente.....	107
4.7	Diagrama Tamaño de Grano Vs Velocidad de Enfriamiento, para probetas de varilla corrugada de 14 mm de diámetro tratadas térmicamente.....	109
4.8	Diagrama CCT para un acero con 0,53%C y curvas con las diferentes velocidades de enfriamiento (H50, N20, 1V, 2V, COM).....	106
4.9	Diagrama Velocidad de enfriamiento Vs % Perlita, para probetas de varilla corrugada de 12mm de diámetro.....	110
4.10	Diagrama Velocidad de enfriamiento Vs % Perlita, para probetas de varilla corrugada de 14mm de diámetro.....	110
4.11	Diagrama esquemático en donde se muestran tres zonas. En estas zonas se aprecian distintas morfologías tanto para la ferrita, como para la perlita.....	113
4.12	Fotografía de (a) perlita gruesa y (b) perlita media. Tomada a una ampliación de 1000x.....	119

4.13	Durezas obtenidas para la perlita gruesa y perlita fina; con un contenido de carbono de 0,5%.....	120
4.14	Fotografía de (a) perlita gruesa y (b) perlita fina. 3000x.....	120
4.15	Diagrama % Perlita Vs Dureza Brinell para varillas corrugadas de 12mm de diámetro tratadas térmicamente.....	121
4.16	Diagrama % Perlita Vs Dureza Brinell para varillas corrugadas de 14mm de diámetro tratadas térmicamente.....	122
4.17	Esquema de la posición de la huella para el ensayo de dureza Brinell..	123
4.18	Diagrama Velocidad de Enfriamiento Vs Esfuerzo de Fluencia, Límite y Ruptura para varillas corrugadas de 12mm de diámetro tratadas térmicamente.....	124
4.19	Diagrama Velocidad de Enfriamiento Vs Esfuerzo de Fluencia, Límite y Ruptura para varillas corrugadas de 14mm de diámetro tratadas térmicamente.....	125
4.20	Diagrama % Perlia Vs Energía Absorbida (J), para varillas corrugadas de 12mm de diámetro tratadas térmicamente.....	132
4.21	Diagrama % Perlia Vs Energía Absorbida (J), para varillas corrugadas de 14mm de diámetro tratadas térmicamente.....	133
4.22	Diagrama % Perlita Vs Esfuerzo de Fluencia, Límite y Ruptura para varillas corrugadas de 12mm de diámetro.....	137
4.23	Diagrama % Perlita Vs Esfuerzo de Fluencia, Límite y Ruptura para varillas corrugadas de 14mm de diámetro.....	137

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES.

1.1. ANTECEDENTES.

Uno de los materiales de fabricación y construcción más versátil, más adaptable y más ampliamente usado es el **acero**. A un precio relativamente bajo, el **acero** combina la resistencia y la ductilidad. Además, sus propiedades pueden ser manejadas de acuerdo a necesidades específicas mediante tratamientos térmicos, deformaciones plásticas o mediante aleaciones. Una de las aplicaciones del **acero** en la construcción más utilizadas en la industria es en el hormigón reforzado, conocido también como **hormigón armado**.

El **hormigón armado** se ha utilizado desde mediados del siglo XIX. El constructor Willian Wilkinson fue quién solicitó la patente, años posteriores, otros constructores e ingenieros, mejoraron la idea del hormigón armado. Pero desde Wilkinson, el hormigón armado ha sido identificado como la unión de armaduras de acero con hormigón [1].

La armadura de acero es la unión de barras de acero llamadas **varillas corrugadas**, que dan un refuerzo al hormigón. Las varillas son generalmente de sección circular con diámetros específicos a partir de 6 mm. Normalmente las superficies de estas varillas presentan rebordes (corrugado) cuya función es mejorar la adherencia a los materiales aglomerantes e inhibir el movimiento relativo longitudinal entre la varilla y el concreto que la rodea [2].

Los grandes rascacielos del mundo trabajan con **hormigón armado** como por ejemplo: El Taipei 101 ubicado en Taipéi (Taiwán) posee columnas de hormigón armado y acero hasta el piso 26, Las Torres Petronas ubicadas en Kuala Lumpur (Malasia) fueron construidas totalmente en hormigón armado sus 88 pisos [3].

Estos y todos los edificios deben resistir sismos y velocidades de viento elevadas y por ende; sus estructuras de hormigón deben soportar grandes cargas, para no colapsar.

De aquí la importancia de realizar un estudio para mejorar las propiedades del armazón de acero (*varillas corrugadas*). Siendo las varillas de acero el elemento que brinda refuerzo al hormigón, estas no pueden ser ni muy frágiles ni muy dúctiles, ya que perjudicaría las propiedades de la estructura. Por este motivo nos vemos en la necesidad de hallar un punto de comportamiento entre estas dos propiedades.

Las normas ecuatorianas NTE INEN 0102:2003-3R y NTE INEN 2167:2003-1R establecen que las varillas se clasifican de acuerdo a la calidad del acero, en dos grados correspondientes con su límite de fluencia mínimo:

- a) Varillas de acero grado A28, fluencia mínima $27,5 \text{ daN/mm}^2$ (28 kg/mm^2)
 - b) Varillas de acero grado A42, fluencia mínima $41,2 \text{ daN/mm}^2$ (42 kg/mm^2)
- [4].

En la actualidad la información que se posee sobre la influencia de la microestructura sobre las propiedades mecánicas en varillas de acero, es muy limitada, y los estudios disponibles que se han realizado para mejorar propiedades del acero no son específicos para *varillas corrugadas*.

Lo que se propone es realizar un estudio para conocer la influencia que presentan las diversas microestructuras sobre las propiedades mecánicas en las varillas de acero y de este modo determinar cuáles son las microestructuras óptimas que nos brinden las propiedades mecánicas deseadas.

1.2. JUSTIFICACIÓN.

En los últimos años se ha evidenciado un incremento en la actividad sísmica del planeta. Por este motivo, las edificaciones modernas de hormigón armado exigen mejores materiales de construcción para poder resistir de mejor manera las inclemencias de la naturaleza. El armazón de acero que brinda refuerzo al hormigón, debe poseer

cada vez mejores características de resistencia y flexibilidad, para soportar todas las cargas que pesen sobre él.

Ante este problema de mejorar las características de las varillas de acero, se ve en la necesidad de realizar esta investigación. Por medio de este estudio, se obtendrá información valiosa que ayudará a la industria ecuatoriana a fabricar una varilla de mejor calidad.

Con una varilla de mejor calidad, las edificaciones brindarán mayor seguridad; serán más resistentes a sismos y esto es de gran importancia ya que Ecuador y toda la región Interandina del continente se encuentra en una zona sísmica.

Industrialmente los beneficios serán enormes, la empresa o las empresas que obtengan la información de este estudio estarán un paso adelante, ya que los resultados que arroje esta investigación ayudarán a ajustar los diferentes procesos de manufactura de las varillas y de este modo presentar un producto superior al de la competencia.

En lo personal, se reforzarán los conocimientos aprendidos en las aulas; y por medio de la investigación y la experimentación se tendrán conocimientos más profundos sobre el tema, que en lo posterior nos servirán para ser profesionales capaces de solucionar diversos problemas que presenten las industrias.

1.3. OBJETIVOS.

1.3.1. OBJETIVO GENERAL.

- Determinar la relación que existe entre las microestructuras presentes en las varillas de acero y sus propiedades mecánicas.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Analizar las microestructuras en las varillas de acero a diferentes velocidades de enfriamiento.

- Determinar las propiedades mecánicas en las varillas de acero a diferentes velocidades de enfriamiento.
- Establecer la relación microestructuras – propiedades mecánicas de la varilla de construcción.
- Determinar los parámetros óptimos de enfriamiento que resulten en las propiedades más convenientes para las varillas de construcción.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA VARILLA DE CONSTRUCCIÓN.

2.1.1. INTRODUCCIÓN.

El acero es una aleación de hierro y carbono, donde el carbono no supera el 2,1% en peso de la composición de la aleación. Los aceros son las aleaciones más utilizadas en la construcción de maquinaria, herramientas, edificios y obras públicas, habiendo contribuido al alto nivel de desarrollo tecnológico de las sociedades industrializadas [5].

Las *varillas corrugadas* poseen un porcentaje de carbono en el rango de 0,30% a 0,33% de acuerdo a la norma NTE INEN 2 167:2003. Porcentajes menores o mayores a los antes mencionados, cambiarán las propiedades de las varillas [4].

La varilla de construcción es una sólida barra redonda con resaltes dispuesta de manera longitudinal, para generar una adherencia mecánica con el hormigón. Con propiedades sismo resistentes, la varilla de construcción es el refuerzo ideal para obras civiles especiales como puentes, edificios expuestos a sismos y otras estructuras en las que los ciclos de carga y descarga sean un factor fundamental a tomar en cuenta [25].

2.1.2. PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DEL ACERO.

El acero se obtiene a partir de dos materias primas fundamentales:

- Los minerales de hierro: en forma de óxidos que existen en la naturaleza bajo distintas leyes de concentración, tales como hemátitas, sideritas, magnetitas, limonitas, etc.

- Las chatarras de acero o fundiciones reciclables: que se encuentran como parte de maquinarias, equipos y otros, o en forma de desechos metálicos.

Ambas procedencias del acero producen óptimas calidades del mismo dependiendo de la precisión y calidad tecnológica con que sean empleadas [6].

2.1.2.1. OBTENCIÓN DEL ACERO A TRAVÉS DE MINERALES DE HIERRO [7].

El hierro generalmente es encontrado en forma de óxido de hierro, magnetita, hematita, limonita, u óxidos hidratados. Se extrae del mineral por medio de los altos hornos tal como puede volverse a fundir y colar para darle cualquier forma, o bien refinarse para transformarlo en acero o hierro forjado. Hoy en día los hornos pueden producir entre 500 y 1200 toneladas de hierro por día.

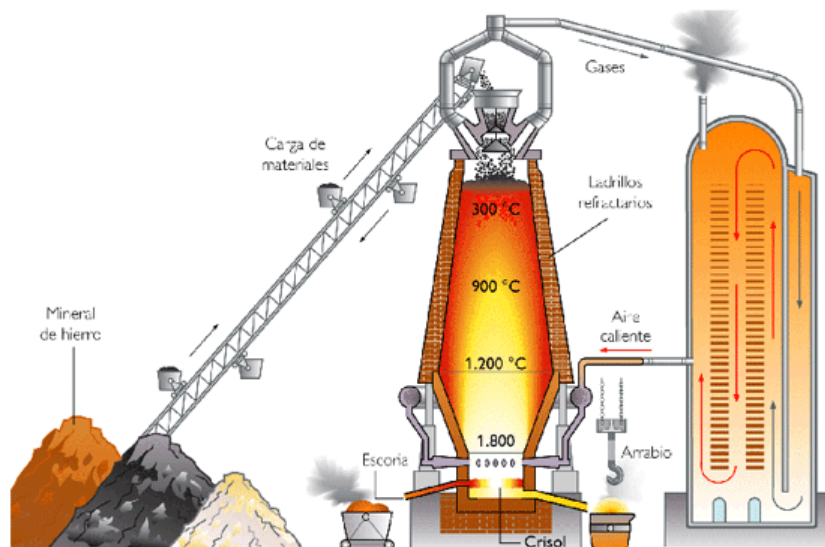


Figura 2.1: Diagrama del alto horno [7]

El hierro es un acero con alto contenido en carbono por eso se transporta cuando sale del alto horno en vagonetas llamadas torpedos hasta el convertidor donde al hierro se le baja el contenido de carbono mediante ferroaleaciones, fundentes o chatarra; estos tres productos pueden ir directamente al convertidor para ayudar en la obtención del acero o también puede ser convertidos en acero en un horno eléctrico.

2.1.2.2. OBTENCIÓN DEL ACERO A TRAVÉS DE LA CHATARRA DE ACERO O FUNDICIONES RECICLABLES [8].

La chatarra de acero reciclada se funde y se convierte en acero de alta calidad a través de hornos de arco eléctrico de alta potencia. La principal tarea de la mayoría de los hornos de arco eléctrico modernos es convertir las materias primas sólidas en acero crudo líquido lo más rápido posible y luego afinarlas aún más en los sucesivos procesos de la metalurgia secundaria.

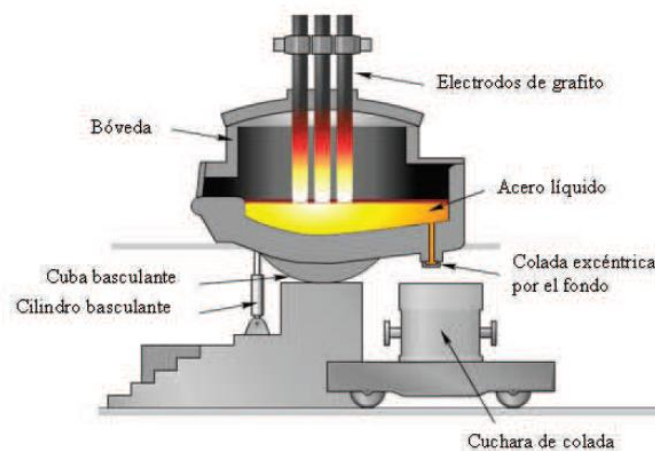


Figura 2.2: Horno de arco eléctrico, vista en corte [8]

2.1.3. COLADA CONTINUA [8].

El acero líquido de la cuchara se vacía en la artesa, en la cual se abre la compuerta y a velocidad controlada, pasa a un molde de sección cuadrada para formar la palanquilla, el acero mientras se desliza a través de los rodillos es enfriado con chorros de agua fría, formándose una costra sólida que se extiende en toda la palanquilla, la cual ayuda a que se mantenga la forma y no se deforme por la presión ferro-estática del acero.

El molde o palanquilla falsa sirve para guiar la colada a través del proceso en el momento inicial. El acero al rojo vivo, pasa por una serie de rodillos que lo transporta hasta llegar a una mesa donde continúa el enfriamiento con agua.

Las palanquillas son cortadas en tramos de longitudes deseadas, con sopletes de oxígeno y Gas Licuado de Petróleo (GLP), finalmente la palanquilla pasa a una cama de enfriamiento en el ambiente.

Luego se identifican con un número, dependiendo a que colada pertenece, finalmente son apiladas y almacenadas para luego pasar al proceso de laminación, la palanquilla es la materia prima para producir las varillas de construcción.

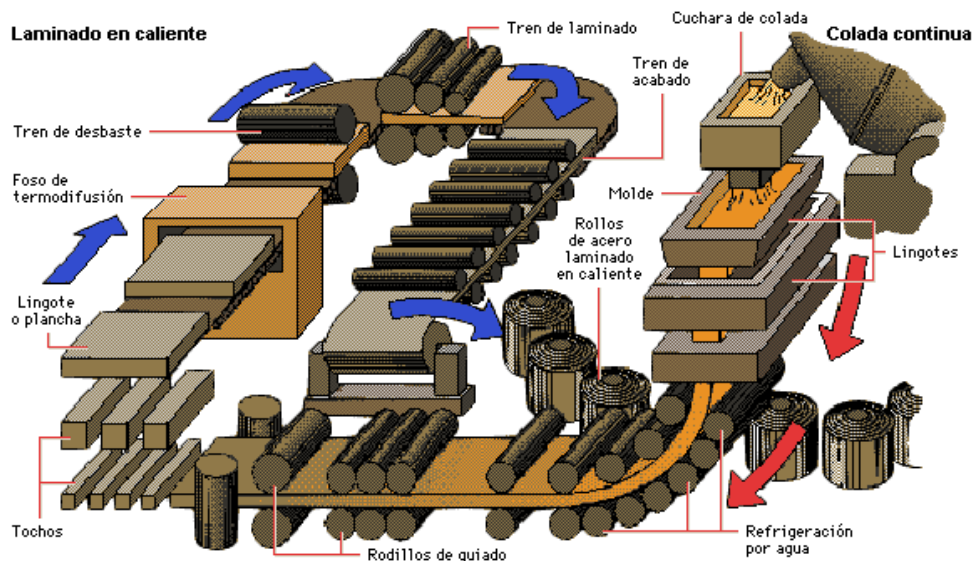


Figura 2.3: Proceso de colada continua [7]

2.1.4. PROCESO DE LAMINACIÓN [7].

Podemos definir la laminación como el proceso de manufactura mediante el cual se transforma el acero haciéndolo pasar entre dos rodillos o cilindros, que giran a la misma velocidad y en sentidos contrarios. El acero pasa desde una forma y longitud inicial a una forma final más pequeña y longitud mayor definida por el trazado del producto que se quiera fabricar.

Es por esto que la calidad del producto dependerá mucho de la calidad del acero que se utilice. Este proceso aprovecha la ductilidad del acero, es decir, su capacidad de deformarse, tanto mayor cuanto mayor es su temperatura, por lo tanto se puede realizar en frío o en caliente.

2.1.4.1. LAMINACIÓN EN CALIENTE [7].

Donde las palanquillas son introducidas automáticamente en un horno para su recalentamiento. Una vez han obtenido la temperatura adecuada y mediante sucesivas pasadas entre los cilindros de laminación, que llevan canales tallados en una secuencia cuadrado/óvalo - óvalo/redondo, van reduciendo su sección a la vez que aumentan su longitud.

Este proceso tiene lugar en un "tren continuo", de tal forma que la velocidad está automáticamente controlada, para que aumente en cada pasada, en la misma proporción en que se redujo la sección en la anterior. Este "tren continuo" que es de dos líneas, se halla formado por el tren de desbaste, seguido del tren intermedio: a partir de aquí se ramifica en tres trenes acabadores, según el material a obtener sean barras finas o barras gruesas.

En las barras para el armado de hormigón, los resaltes se consiguen en la última pasada, dado que el cilindro correspondiente está diseñado para tal función. Durante todo el proceso, el material está identificado y separado por coladas, siendo las mismas la unidad básica de referencia para todos los efectos del Control de Calidad, desde el inicio, hasta el final.



Figura 2.4: Trenes de laminación en Caliente [7]

2.1.4.2. TRENES DE LAMINACIÓN [7].

El tren de laminación está formado por parejas de cilindros que van reduciendo la sección de la palanquilla. Primero de la forma cuadrada a forma de óvalo, y después de forma de óvalo a forma redonda. A medida que disminuye la sección, aumenta la longitud del producto transformado y, por tanto, la velocidad de laminación. El tren se controla de forma automática, de forma que la velocidad de las distintas cajas que lo

componen va aumentando en la misma proporción en la que se redujo la sección en la anterior.

Los trenes de laminación se dividen en tres partes:

- Tren de desbaste: donde la palanquilla sufre una primera pasada muy ligera para romper y eliminar la posible capa de cascarilla formada durante su permanencia en el horno.
- Tren intermedio: formado por distintas cajas en las que se va conformando por medio de sucesivas pasadas la sección
- Tren acabador: donde el producto experimenta su última pasada y obtiene su geometría de corrugado.

Las barras ya laminadas se depositan en una gran placa o lecho de enfriamiento, de donde es trasladado a las líneas de corte a medida y empaquetado, de donde pasa a la zona de almacenamiento y despacho.

2.1.5. PROPIEDADES DE LAS VARILLAS [4].

Las normas ecuatorianas NTE INEN 0102:2003-3R y NTE INEN 2167:2003-1R establecen que las varillas se clasifican de acuerdo a la calidad del acero, en dos grados correspondientes con su límite de fluencia mínimo:

- a) Varillas de acero grado A28, fluencia mínima $27,5 \text{ daN/mm}^2$ (28 kg/mm^2)
- b) Varillas de acero grado A42, fluencia mínima $41,2 \text{ daN/mm}^2$ (42 kg/mm^2)

Las varillas corrugadas (con resaltes) de acero ya sean de grado A28 ó A42, poseen características especiales que deben de cumplir de acuerdo a normas. En las tablas que se muestran a continuación, se indica las propiedades físicas, químicas y las formas de los resaltes que presentan las distintas varillas corrugadas que se fabrican en el Ecuador, de acuerdo a la norma INEN.

Tabla 2.1: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS VARILLAS CON RESALTES PARA HORMIGÓN ARMADO [4]

Diámetro Nominal (mm)	Dimensiones de los resaltes (mm)			Masa (kg/m)		
	Máximo a	Mínimo b	Máximo c	Nominal d	Máximo e	Mínimo e
8	5,60	0,32	3,10	0,395	0,418	0,371
10	7,00	0,40	3,90	0,617	0,654	0,580
12	8,40	0,48	4,70	0,888	0,941	0,835
14	9,80	0,67	5,50	1,208	1,281	1,136
16	11,20	0,72	6,20	1,578	1,673	1,484
18	12,60	0,88	7,00	1,998	2,117	1,878
20	14,00	1,01	7,80	2,466	2,614	2,318
22	15,40	1,11	8,60	2,984	3,163	2,805
25	17,50	1,26	9,80	3,853	4,085	3,622
28	19,60	1,39	11,00	4,834	5,124	4,544
32	22,40	1,64	12,00	6,313	6,692	5,935
36	25,20	1,84	14,00	7,990	8,470	7,511
40	28,00	1,96	15,70	9,865	10,456	9,273

- espaciamiento promedio de los resaltes transversales
- altura promedio de los resaltes transversales
- ancho en la base de los resaltes longitudinales o ancho de la ranura
- valor calculado a partir del diámetro nominal, considerando una densidad del acero de $7,85 \text{ kg/dm}^3$.
- Límites en la masa por metro para cada una de las unidades de muestreo.

Tabla 2.2: COMPOSICIÓN QUÍMICA [4]

Elemento	Análisis de cuchara Máximo	Análisis de comprobación Máximo	ENSAYO
Carbono	0,30%	0,33%	NTE INEN 120
Manganeso	1,50%	1,56%	NTE INEN 118
Fósforo	0,035%	0,043%	NTE INEN 107
Azufre	0,045%	0,053%	NTE INEN 108
Silicio	0,50%	0,55%	NTE INEN 119

Se deberá garantizar para el análisis de colada que el carbono equivalente máximo sea de 0,55%, cuando se determine de acuerdo con la siguiente fórmula [4]:

$$\% C.E. = \%C + \% \frac{Mn}{6} + \% \frac{Cu}{40} + \% \frac{Ni}{20} + \% \frac{Cr}{10} - \% \frac{Mo}{50} - \% \frac{V}{10} \quad (2.1)$$

Tabla 2.3: COMPOSICIÓN QUÍMICA. ESPECIFICACIONES PARA EL CONTENIDO DE AZUFRE Y FÓSFORO [4]

ELEMENTO	ANÁLISIS DE CUCHARA	ANÁLISIS DE COMPROBACIÓN
Fósforo	máx. 0,04 %	máx. 0,045 %
Azufre	máx. 0,04 %	máx. 0,045 %
% azufre + % fósforo	máx. 0,07 %	máx. 0,08 %

Tabla 2.4: ESPECIFICACIONES MECÁNICAS DE LAS VARILLAS CON RESALTES PARA HORMIGÓN ARMADO [4]

ENSAYO		UNIDAD	GRADO DE ACERO	
			A 28	A 42
Tracción (a)	Límite de fluencia, mínima	daN/mm ²	27,5(28)	41,2(42)
	Resistencia máximo, mínimo	daN/mm ²	43,2(44)	61,8(63)
	Alargamiento, mínimo (b)	%	22	15
Doblado a 180° (c)	$d \leq 14$	mm	D = 3d	D = 3,5d
	$16 \leq d \leq 22$	mm	D = 3,5d	D = 5d
	$25 \leq d \leq 32$	mm	D = 5d	D = 7d

(a) entre paréntesis: valor aproximado en kgf/mm²
 (b) ensayo con probeta de $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$ (ver nota 1)
 (c) d = diámetro de la varilla en mm
 D = diámetro del mandril en mm

Los resaltes tienen la función de mejorar la adherencia a los materiales aglomerantes e inhibir el movimiento relativo longitudinal entre la varilla y el concreto que la rodea. Por esta razón existen tres tipos de resaltes, los mismos que se muestran a continuación:

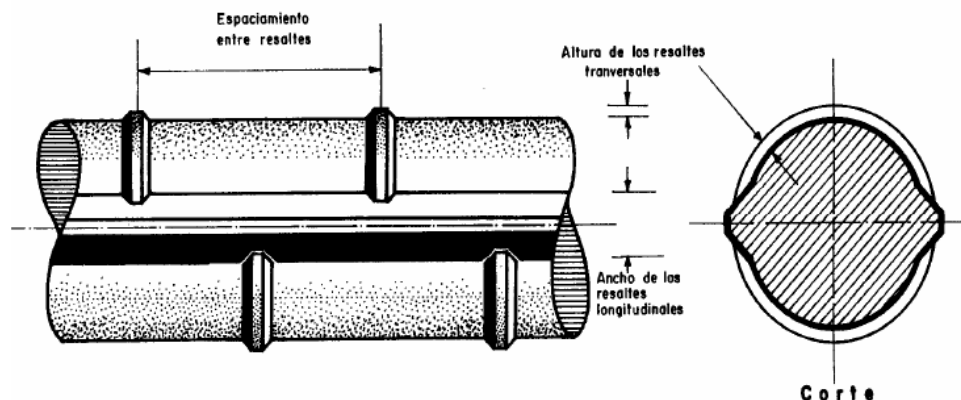


Figura 2.5: Varillas con resaltes transversales perpendiculares [4]

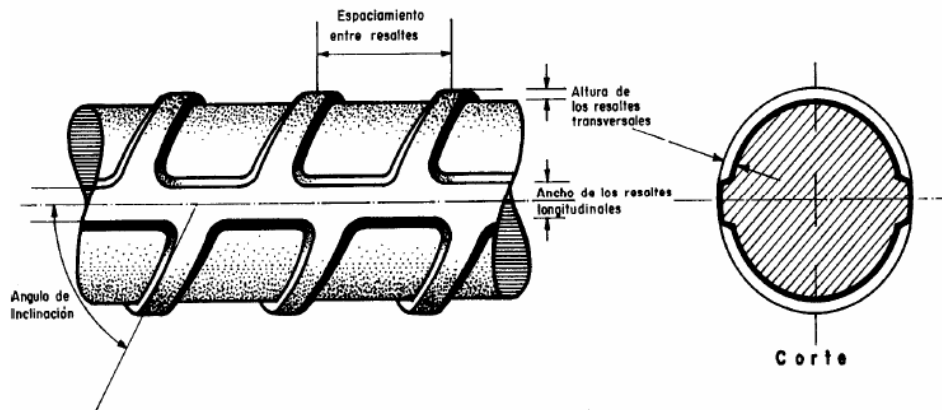


Figura 2.6: Varillas con resaltes transversales inclinados [4]

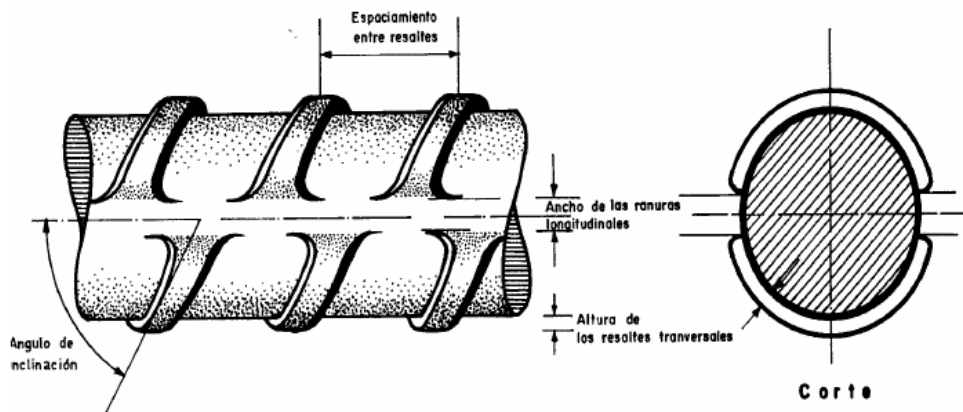


Figura 2.7: Varillas con ranuras longitudinales [4]

2.2. TRANSFORMACIONES DE FASE EN EL ACERO.

2.2.1. INTRODUCCIÓN.

Los materiales metálicos son versátiles debido a la gran variedad de propiedades mecánicas susceptibles de alteración por diferentes medios. Las propiedades del acero tienen una fuerte dependencia de la microestructura que presentan en su interior y esta se desarrolla desde el inicio de la solidificación.

La resistencia mecánica se puede mejorar por diversos métodos tales como: afinamiento del tamaño de grano, disolución sólida, endurecimiento por deformación y modificando la microestructura [9].

Al realizar operaciones de calentamiento y enfriamiento en el acero, con diferentes velocidades de enfriamiento se puede modificar la microestructura del acero

para obtener propiedades deseadas. Al calentar el acero a temperatura de austenización, se obtiene 100% austenita, y dependiendo de la velocidad de enfriamiento, la austenita puede transformarse en diferentes tipos de microestructuras, tales como: ferrita, perlita (ferrita + cementita), bainita y martensita o más comúnmente combinaciones de estas. Cada microestructura presenta variaciones y propiedades únicas.

2.2.2. MECANISMO DE CRISTALIZACIÓN [10].

La cristalización es la transición del estado líquido al sólido y ocurre en dos etapas; la formación de núcleos y el crecimiento del cristal. Cuando la temperatura del metal líquido ha disminuido en forma suficiente por debajo de su punto de congelación, aparecen espontáneamente agregados o *núcleos* estables en diversos puntos del líquido. Estos núcleos, que ahora se han solidificado, actúan como centros para cristalización ulterior. Conforme continúa el enfriamiento, más átomos tienden a congelarse y pueden unirse a aquellos núcleos ya existentes o formar por sí mismos nuevos núcleos. Cada núcleo crece al atraer átomos del líquido e incluirlos en su red espacial. El crecimiento del cristal continúa en tres dimensiones, con los átomos uniéndose entre ellos en ciertas direcciones preferidas, generalmente a lo largo de los ejes del cristal.

Esto da lugar a una estructura característica con apariencia de árbol, llamada *dendrita* (Figura 2.8). Como cada núcleo se forma de manera casual, los ejes del cristal están apuntados al azar y las dendritas que crecen de ellos se desarrollarán en diferentes direcciones en cada cristal.

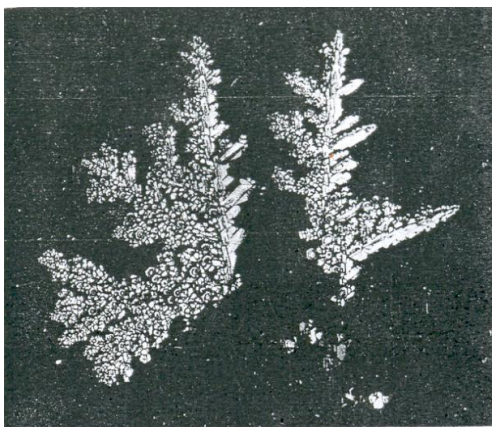


Figura 2.8: Dendritas de magnesio que crecen a partir de un líquido [10].

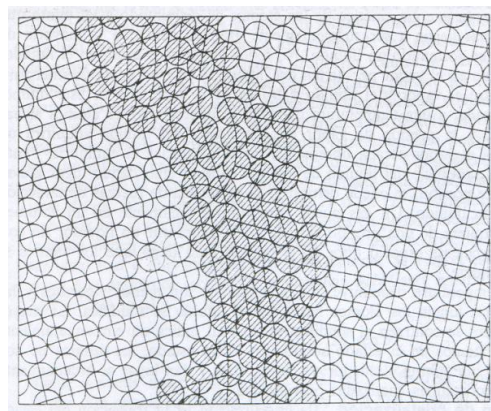


Figura 2.9: Representación esquemática de la frontera de grano entre dos cristales [10].

Finalmente, al disminuir la cantidad de líquido, las separaciones entre las ramas de la dendrita se llenarán y el crecimiento de la dendrita lo obstruirá mutuamente el de sus vecinos. Esto da lugar a una forma externa muy irregular. Los cristales encontrados en todos los metales comerciales comúnmente se llaman **granos**, debido a esta variación en forma externa. El área a lo largo de la cual están unidos los cristales se conoce como **frontera de grano**, y es una región de apareamiento deficiente (Figura 2.9).

El resultado es una estructura (amorfa) no cristalina en la frontera de grano, estando los átomos espaciados irregularmente. Como los últimos residuos del líquido se solidifican, por lo general a lo largo de las fronteras de grano, tiende a haber mayor concentración de impurezas atómicas en esa área. La Figura 2.10 muestra esquemáticamente el proceso de cristalización desde la formación del núcleo hasta los granos definitivos.

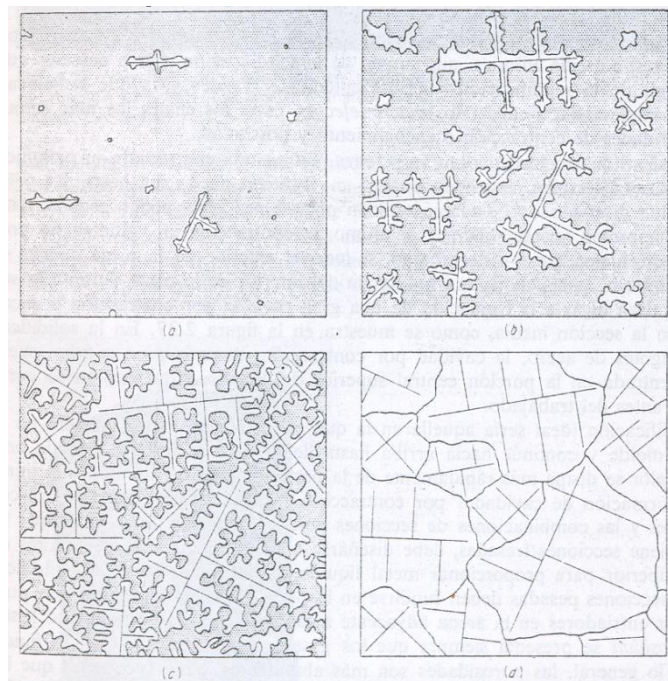


Figura 2.10: Representación esquemática del proceso de cristalización por nucleación y crecimiento dendrítico [10].

2.2.3. TAMAÑO DE GRANO [10].

El tamaño de los granos en una pieza colada está determinado por la relación entre la rapidez de crecimiento G y la rapidez de nucleación N . Si el número de núcleos

formados es alto se producirá un material de grano fino, y si solo se forman unos pocos núcleos se producirá un material de grano grueso.

La rapidez de enfriamiento es el factor más importante para determinar la rapidez de nucleación y, por tanto, el tamaño de grano. El enfriamiento rápido (colada fría) dará como resultado que se forme un gran número de núcleos y que se obtenga un tamaño de grano fino, en tanto que en el enfriamiento lento (fundición en arena o molde caliente) sólo se forman algunos núcleos y tendrán la oportunidad de crecer, consumiendo el líquido antes que se puedan formar más núcleos.

Otros factores que aumentan la rapidez de nucleación, causando así la formación de grano fino son; impurezas insolubles, como el aluminio y el titanio, que forma óxidos insolubles en el acero; la agitación de la colada durante la solidificación, lo cual tiende a fragmentar los cristales antes que tengan la oportunidad de crecer mucho.

En general, los materiales de grano fino muestran mejor tenacidad o resistencia al impacto (Figura 2.11); además; son más duros y fuertes que los materiales de grano grueso.

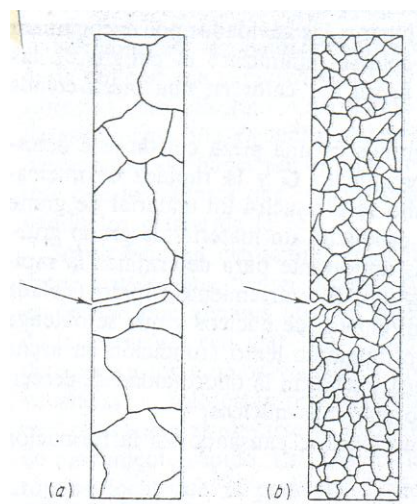


Figura 2.11: a) Fragilidad de un metal de grano grueso al impacto; b) frecuente cambio de dirección de la fuerza en la ruptura de un metal de grano fino [10].

2.2.4. DIFUSIÓN ATÓMICA [9].

A nivel atómico, la difusión consiste en la emigración de los átomos de un sitio de la red a otro sitio. En los materiales sólidos, los átomos están en continuo

movimiento, cambian rápidamente de posición. La movilidad atómica exige dos condiciones: 1) un lugar vecino vacío, y 2) el átomo debe tener suficiente energía como para romper los enlaces con los átomos vecinos y distorsionar la red durante el desplazamiento. Esta energía es de naturaleza vibratoria.

A una temperatura determinada, alguna pequeña fracción del número total de átomos es capaz de difundir debido a la magnitud de su energía vibratoria. Esta fracción aumenta al ascender la temperatura.

2.2.4.1. DIFUSIÓN POR VACANTES [9].

En la Figura 2.12a se ha esquematizado un mecanismo de difusión que implica el cambio de un átomo desde una posición reticular normal a una vacante o lugar reticular vecino vacío. Este mecanismo recibe el nombre de *difusión por vacantes*. En este caso la posibilidad de la difusión por vacantes dependerá del número de defectos que existan, y como estos aumentan con la temperatura, a mayor temperatura más rápida será este mecanismo de difusión.

La autodifusión y la interdifusión ocurren por éste mecanismo; en la interdifusión los átomos de soluto sustituyen a los del disolvente.

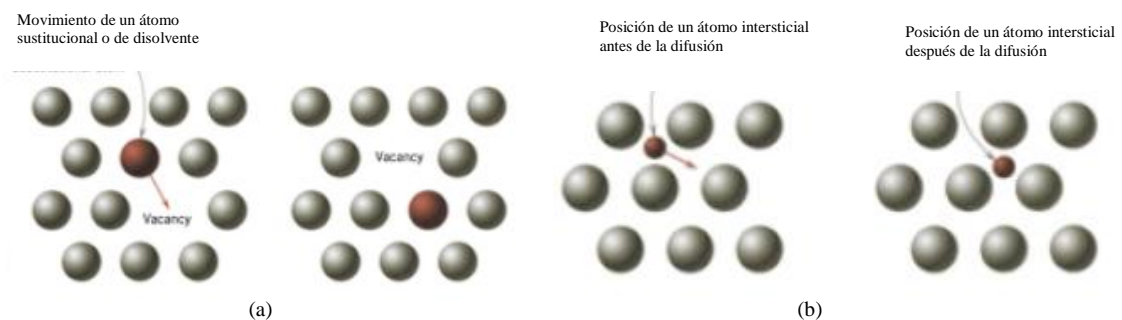


Figura 2.12: Representación esquemática de la difusión a) por vacantes y b) intersticial [9]

2.2.4.2. DIFUSIÓN INTERSTICIAL [9].

El segundo tipo de difusión implica a átomos que van desde una posición intersticial a otra vecina desocupada. El mecanismo tiene lugar por interdifusión de solutos tales como hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, que tienen átomos pequeños, idóneos para ocupar posiciones intersticiales. Los átomos de soluto sustitucionales raramente ocupan posiciones intersticiales y no difunden por este mecanismo. Este fenómeno se denomina *difusión intersticial*. (Figura 2.12b).

En la mayoría de las aleaciones, la difusión intersticial ocurre más rápidamente que la difusión por vacantes, ya que los átomos intersticiales son más pequeños que las vacancias y tienen mayor movilidad. Teniendo en cuenta que hay más posiciones intersticiales vacías que vacancias, la probabilidad del movimiento atómico intersticial es mayor que la difusión por vacantes.

2.2.5. TRANSFORMACIÓN DE LA AUSTENITA.

La austenita es el constituyente más denso de los aceros y está formado por una solución sólida por inserción de carbono en hierro gamma, como lo muestra la Figura 2.13. La cantidad de carbono disuelto, varía de 0.8 al 2 % C que es la máxima solubilidad a la temperatura de 1130 °C. La austenita no es estable a la temperatura ambiente pero existen algunos aceros al cromo-níquel denominados austeníticos cuya estructura es austenita a temperatura ambiente.

La austenita está formada por cristales cúbicos centrados en las caras, con una dureza de 300 Brinell, una resistencia a la tracción de 100 kg/mm² y un alargamiento del 30 %, no es magnética [26].

La austenita no puede atarcarse con nital, se disuelve con agua regia en glicerina apareciendo como granos poligonales frecuentemente maclados, como lo muestra la Figura 2.14 [26].

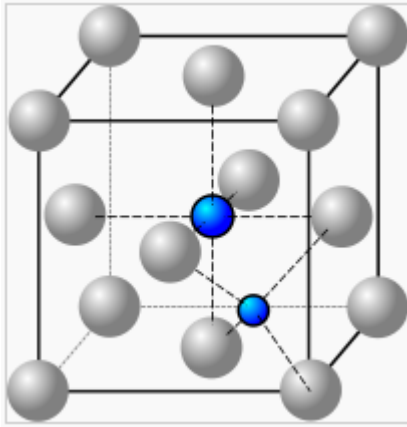


Figura 2.13: Estructura cristalina de la austenita: El hierro (en gris) está dispuesto en una estructura fcc, mientras que el carbono (en azul) está presente como defecto intersticial [1].

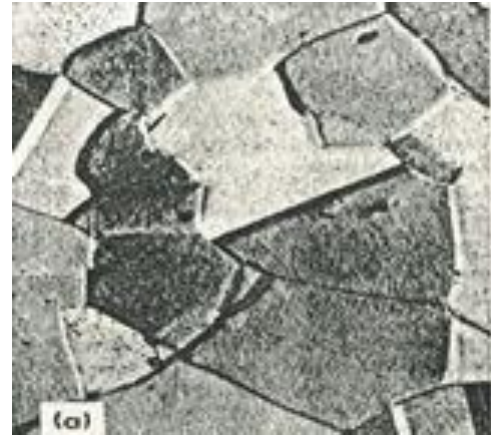


Figura 2.14: Microestructura de la austenita [10].

Todos los procesos básicos para las transformaciones de fase en el acero incluyen la transformación o descomposición de la austenita. Para realizar las transformaciones de fase en el acero tenemos que calentar la muestra de acero hasta una temperatura por encima de la temperatura crítica superior para formar austenita y luego enfriarla. La velocidad de enfriamiento determinará la microestructura en que se transforme la austenita.

En el diagrama de equilibrio se observa que cuando el acero, con constitución austenítica se enfría lentamente, la austenita se transforma en distintos productos; así por ejemplo, si el acero es hipoeutectoide la austenita se transforma inicialmente en ferrita hasta la temperatura eutectoide, a la cual la austenita remanente se transforma en perlita. La microestructura final será perlita y ferrita proeutectoide en una proporción que depende de la composición y la velocidad de enfriamiento [27].

Si el acero es de composición eutectoide, la austenita se transforma completamente en perlita; si la composición es hipereutectoide se obtiene cementita proeutectoide y perlita como producto de la transformación. Cuando la velocidad de enfriamiento aumenta, la morfología de la ferrita y la cementita proeutectoide cambia y la perlita se hace más fina. A una velocidad elevada, los anteriores constituyentes desaparecen súbitamente a una velocidad de enfriamiento crítico, y aparece una estructura nueva más dura, la martensita [27].

Dependiendo de la velocidad de enfriamiento, existen diferentes tratamientos térmicos; como por ejemplo, recocido, normalizado y temple.

2.2.5.1. RECOCIDO [10].

Este proceso consiste en calentar el acero a la temperatura adecuada y luego enfriar lentamente a lo largo del intervalo de transformación, preferentemente en el horno o en cualquier material que sea buen aislante al calor. Por lo general, el enfriamiento lento continúa a temperaturas más bajas.

El propósito del recocido puede ser refinar el grano, proporcionar suavidad, mejorar las propiedades eléctricas y magnéticas y, en algunos casos, mejorar el maquinado. Como la masa total del horno debe enfriarse junto con el material, el recocido es un proceso de enfriamiento muy lento y, por tanto, llega a estar muy próximo al siguiente diagrama hierro-carburo de hierro.

2.2.5.1.1. DIAGRAMA DE FASE HIERRO-CARBURO DE HIERRO.

La Figura 2.15 representa una parte del diagrama de fases hierro-carbono.

El hierro puro, al calentarse, experimenta dos cambios de la estructura cristalina antes de fundir. A temperatura ambiente la forma estable se llama **ferrita** o hierro α y tiene la estructura BCC. La ferrita experimenta a 912°C una transformación polimórfica a **austenita** FCC o hierro γ . La austenita persiste hasta 1394°C , temperatura a la que la austenita vuelve a convertirse en una fase BCC conocida como ferrita δ , que funde a 1538°C . Todos estos cambios aparecen a lo largo del eje vertical izquierdo del diagrama de fases [9].

El eje de composición de la Figura 2.15 sólo llega hasta 6,70% en peso de C, concentración que coincide con la del compuesto intermedio carburo de hierro o **cementita** (Fe_3C), representado por una línea vertical en el diagrama de fases. Así, el sistema hierro-carbono se puede dividir en dos partes: una parte rica en hierro, que coincide con la mostrada en la Figura 2.15 y otra parte (no mostrada) de composición comprendida entre 6,70% y 100% C (grafito puro) [9].

Prácticamente todos los aceros y fundiciones tienen porcentajes de carbono inferiores a 6,70% C; por lo tanto, sólo se considera la parte rica en hierro del sistema hierro-carburo de hierro. La Figura 2.15 muestra, propiamente, el diagrama Fe-Fe₃C, ya que el Fe₃C se considera un componente. La convención y la conveniencia imponen expresar la concentración en “% C” en lugar del “%Fe₃C”; 6,70% en peso C corresponde al 100% en peso de Fe₃C [9].

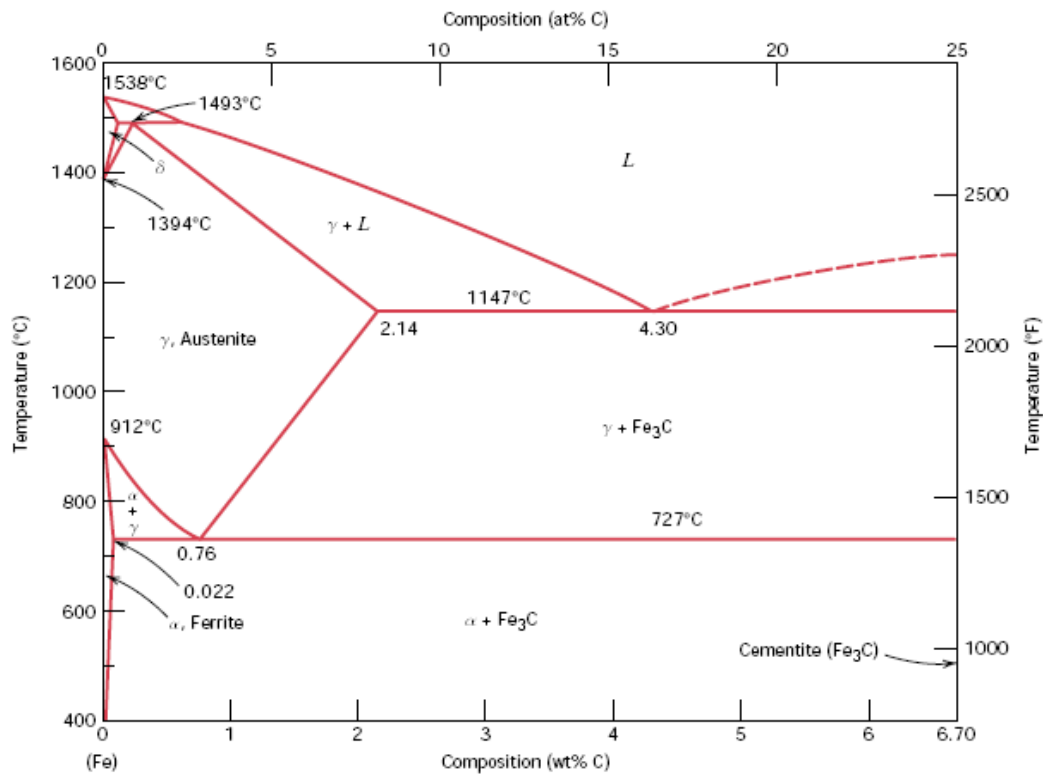


Figura 2.15: Diagrama de fases hierro-carburo de hierro [9]

El carbono es un soluto intersticial en el hierro y forma soluciones sólidas con la ferrita α , con la ferrita δ y con la austenita γ de la Figura 2.15. En la ferrita α BCC sólo son solubles muy pequeñas concentraciones de carbono; la solubilidad máxima es de 0,022% en peso y corresponde a 727°C. Esta pequeña solubilidad se explica teniendo en cuenta la forma y el tamaño de las posiciones intersticiales de la estructura BCC, que dificultan la acomodación de los átomos de carbono. Aunque presente en muy baja proporción, el carbono ejerce gran influencia en las propiedades mecánicas de la ferrita. Esta fase hierro-carbono es relativamente blanda, magnética por debajo de los 768°C y tiene una densidad de 7,88g/cm³. La Figura 2.16a es una fotomicrografía de la ferrita α [9].

La austenita, o fase γ del hierro, cuando está aleado con carbono, no es estable por debajo de los 727°C , como indica la Figura 2.15. La máxima solubilidad del carbono en austenita es 2,11% en peso a 1148°C . Esta solubilidad es aproximadamente 100 veces superior que la máxima para la ferrita BCC, ya que las posiciones intersticiales de la estructura FCC tienen la forma adecuada para que al llenarse de átomos de carbono la deformación impuesta a los átomos de hierro vecinos sea mucho menor. Las transformaciones de fase de la austenita son muy importantes en los tratamientos térmicos de los aceros, como demuestra la discusión siguiente. De paso es conveniente citar que la austenita es no magnética. La Figura 9.16b muestra una fotomicrografía de la fase austenita [9].

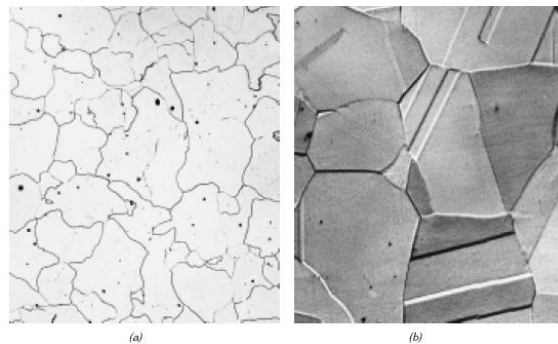


Figura 2.16: Fotomicrografías de (a) ferrita α (x 90) y (b) austenita (x 325) [9]

La ferrita δ es como la ferrita α , y sólo se diferencian en el tramo de temperaturas en el cual existen. Teniendo en cuenta que la ferrita δ sólo es estable a altas temperaturas [9].

Se forma cementita (Fe_3C) cuando se excede el límite de solubilidad del carbono en ferrita α por debajo de 727°C (la composición está comprendida en la región de fases $\alpha+\text{Fe}_3\text{C}$). La Figura 2.15 indica que la cementita también coexiste con la fase γ entre 727 y 1148°C . La cementita, desde el punto de vista mecánico, es dura y frágil, y su presencia aumenta considerablemente la resistencia de algunos aceros [9].

Estrictamente hablando, la cementita es sólo metaestable; esto es, permanece como compuesto a temperatura ambiente indefinidamente. Pero si se calienta entre 650 y 700°C durante varios años, cambia gradualmente o se transforma en hierro α y carbono, en forma de grafito, que permanece al enfriar hasta temperatura ambiente. Es decir, el diagrama de fases de la Figura 2.15 no está verdaderamente en equilibrio porque la cementita no es un compuesto estable. Sin embargo, teniendo en cuenta que la

velocidad de descomposición de la cementita es extraordinariamente lenta, en la práctica todo el carbono del acero aparece como Fe_3C en lugar de grafito y el diagrama de fases hierro-carburo de hierro es, en la práctica, válido [9].

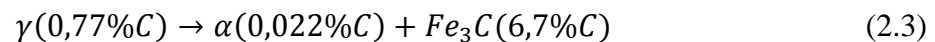
En la Figura 2.15, correspondiente al sistema hierro-carburo de hierro, se observan regiones bifásicas y un eutéctico a 4,30% en peso de C y 1148°C.

La reacción eutéctica,



implica solidificación del líquido para generar las fases austenita y cementita. El posterior enfriamiento hasta temperatura ambiente produce cambios de fases adicionales [9].

Se aprecia la existencia de un punto invariante a la composición de 0,77% en peso C y a la temperatura de 727°C. Esta reacción eutectoide se puede representar por



o, enfriando, la fase sólida γ se transforma en hierro α y cementita. Los cambios de fases descritos por la Ecuación 2.3, referidos a las transformaciones de fases del eutectoide, son fundamentales para los tratamientos térmicos del acero [9].

Las aleaciones denominadas férreas tienen al hierro como principal componente, aunque pueden contener carbono y otros elementos de aleación. La clasificación de las aleaciones férreas según el contenido de carbono comprende tres grupos: hierro, acero y fundición. El hierro puro contiene menos de 0,008% en peso de C y, en el diagrama de equilibrio, comprende las fases ferrita a temperatura ambiente. Las aleaciones hierro-carbono que contienen entre 0,008 y 2,11% en peso de C se clasifican como aceros. La microestructura de la mayoría de los aceros consiste en las fases α y Fe_3C . Aunque un acero puede contener como máximo un 2,11% en peso de C, en la práctica la concentración de carbono raramente excede del 1,0%. Las fundiciones se definen como aleaciones férreas que contienen entre 2,11 y 6,70% en peso de C. Sin embargo, las fundiciones comerciales normalmente contienen menos del 4,5% C [9].

2.2.5.1.2. DESARROLLO DE MICROESTRUCTURAS EN ALEACIONES HIERRO-CARBONO.

- a) **Aceros eutectoides:** al enfriar una composición eutécticoide (0,77% en peso de C) desde los 800°C de la región monofásica γ (punto *a* de la Figura 2.17) equivale a descender por la vertical *xx'*. Inicialmente la aleación de composición 0,77% C tiene la microestructura austenítica indicada en la Figura 2.17. Al enfriar no ocurre ningún cambio hasta llegar a la temperatura eutectoide (727°C). En el punto *b*, por debajo de esta temperatura, la austenita se transforma según la Ecuación 2.3. La austenita de composición 0,77%C forma ferrita, con bajo contenido en carbono (0,002%C) y Fe₃C con un contenido de 6,7% en carbono. Este cambio de fase necesita la difusión del carbono porque las tres fases tienen distintas composiciones [9].

La microestructura del acero eutectoide enfriado lentamente a través de la temperatura eutectoide es análoga a la de una aleación de composición eutéctica; es decir, se forman capas o láminas alternas de las dos fases (α y Fe₃C) durante la transformación. En este caso, la relación de los espesores de las dos capas es de 8 a 1. La microestructura, esquematizada en el punto *b* de la Figura 2.17, se denomina **perlita** porque tiene la apariencia de la madreperla al observarse microscópicamente a pocos aumentos. La fotomicrografía de la Figura 2.18, corresponde a una perlita de un acero eutectoide. La perlita aparece en granos denominados “colonias”; dentro de cada colonia las capas están orientadas esencialmente en la misma dirección y esta dirección varía de una colonia a otra. Las capas delgadas claras son de ferrita y la cementita aparece como capas delgadas más oscuras [9].

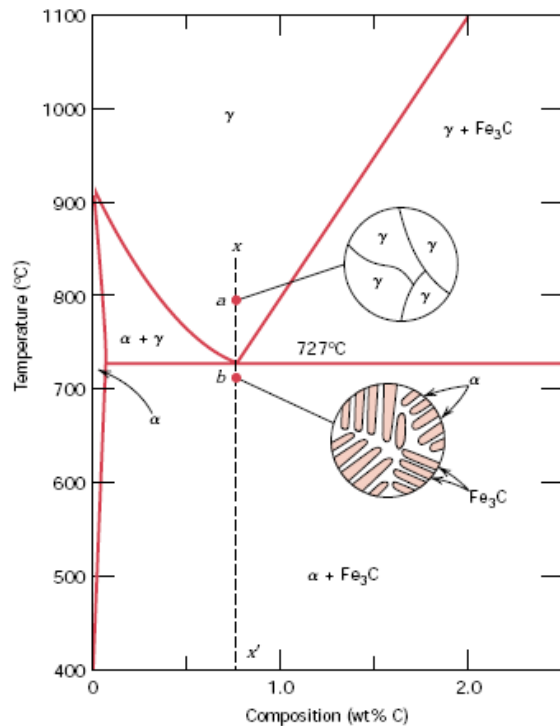


Figura 2.17: Representación esquemática de las microestructuras de un acero al carbono eutéctico (0,77% C) por encima y por debajo de la temperatura eutéctica [9].

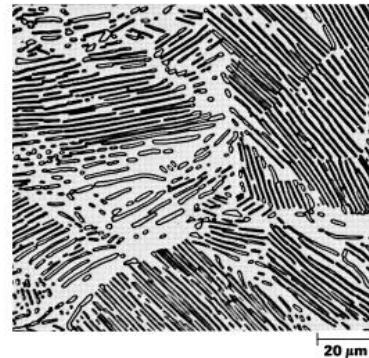


Figura 2.18: Microestructura perlítica de un acero eutéctico mostrando láminas alternas de ferrita α (fase clara) y Fe_3C (láminas más delgadas y oscuras). X 500 [9].

Mecánicamente las perlitas tienen las propiedades intermedias entre la blanda y dúctil ferrita y la dura y quebradiza cementita.

La disposición alternada de capas $\alpha\text{-Fe}_3\text{C}$ se debe a que el carbono necesita difundir durante una distancia relativamente corta para originar esta microestructura. Además, el posterior enfriamiento de la perlita, a partir del punto *b* de la Figura 2.17, produce cambios microestructurales relativamente insignificantes [9].

- b) Aceros hipoeutécticos:** Una aleación de composición C_0 a la izquierda del eutéctico, entre 0,022 y 0,77% C se denomina aleación hipoeutéctico (menos que la eutéctico). El enfriamiento de una aleación de esta composición está representado en el descenso a lo largo de la vertical yy' de la Figura 2.19. Hacia los 875°C, punto *c*, la microestructura consta enteramente de granos de fase γ , como está esquematizado en la figura. En el punto *d* de la región bifásica $\alpha+\gamma$, a unos 775°C, estas fases coexisten, según indica el esquema microestructural. La

mayoría de las partículas α se generan en los límites de los granos γ originales [9].

Cuando se enfría un acero a través de la región de fases $\alpha+\gamma$, la composición de la ferrita varía según la línea MN, del límite de fase $\alpha-(\alpha+\gamma)$ y se enriquece ligeramente en carbono. Al mismo tiempo, la composición, de la austenita cambia de modo mucho más drástico, pues la composición frente a la temperatura sigue la línea MO del límite de fase $(\alpha+\gamma)-\gamma$ [9].

Enfriado desde el punto d al e , muy próximo al eutectoide pero dentro de la región $\alpha+\gamma$, se aprecia un incremento de la microestructura de la fracción de fase α [9].

Al descender la temperatura al punto f , justo por debajo del eutectoide, toda la fase γ , presente a la temperatura T_e , y con la composición del eutectoide, se transforma en perlita según la reacción de la Ecuación 2.3. La fase α existe en el punto e prácticamente no cambia al cruzar la temperatura eutectoide: permanece como matriz continua alrededor de las colonias de perlita. La microestructura del punto f aparece como indica el esquema de la Figura 2.19 [9].

De este modo la ferrita presente en el acero procede del enfriamiento a través de la región $\alpha+\gamma$ y de la reacción eutectoide. La ferrita de la perlita se denomina ferrita eutectoide y la ferrita formada antes de T_e se denomina **ferrita proeutectoide** (que significa pre- o antes del eutectoide) como se indica en la Figura 2.19. La Figura 2.20 reproduce una fotomicrografía de un acero 0,38% en peso de C. Las regiones blancas corresponden a la ferrita proeutectoide. En la perlita, la distancia entre las capas α y Fe_3C varía de un grano al otro; a veces la perlita aparece oscura porque la distancia entre capas es indistinguible a los aumentos de la fotomicrografía [9].

Cabe anotar la existencia de dos microconstituyentes en esta fotomicrografía: ferrita proeutectoide y perlita. Estos microconstituyentes aparecen en todos los aceros hipoeutectoides enfriados lentamente desde la temperatura eutectoide [9].

microestructura resultante consiste en perlita y cementita proeutectoide como microconstituyentes (Figura 2.21) [9].

Obsérvese (Figura 2.22) que la fotomicrografía de un acero de 1,4%C la cementita aparece con una tonalidad clara. Ya que tiene una apariencia parecida a la ferrita proeutectoide (Figura 2.20) a veces es difícil distinguir la microestructura de los aceros hipo e hipereutectoides [9].

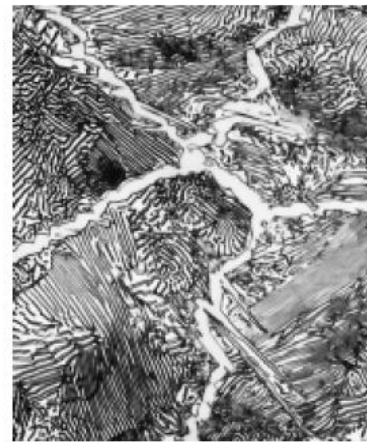
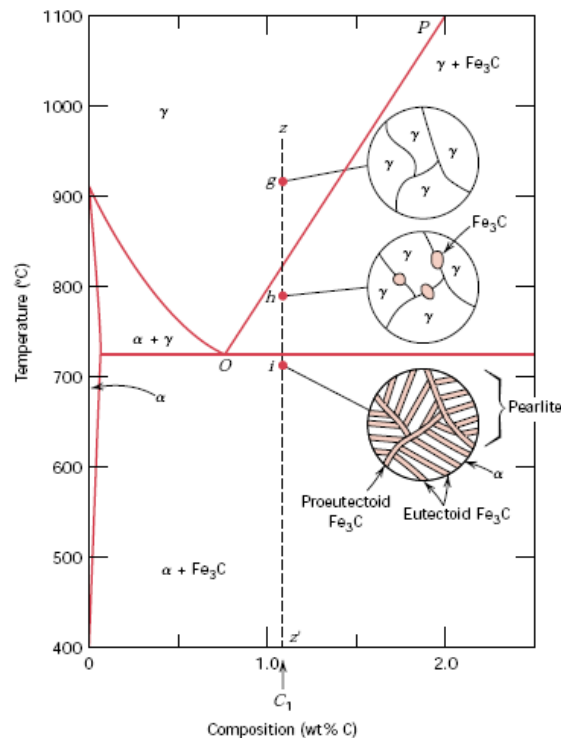


Figura 2.22: Microestructura de un acero con 1,4%C formado por cementita proeutectoide blanca reticulada alrededor de las colinas de perlita. X1000 [9].

Figura 2.21: Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipereutectoide de composición C_1 (cuyo contenido de carbono está comprendido entre el 0,77 y el 2,1%) enfriado desde la región de fases austenítica hasta por debajo de la temperatura eutéctica [9].

2.2.5.1.3. DEFINICIÓN DE ESTRUCTURAS.

Ahora se definirán los nombres que, por razones descriptivas o conmemorativas, se han asignado a las estructuras que aparecen en el diagrama hierro-carburo de hierro.

La *cementita* o carburo de hierro, fórmula química Fe_3C , contiene 6,67% de C por peso. Es un compuesto intersticial típicamente duro y frágil de baja resistencia tensil

(aprox. 5 000 lb/pulg²), pero de alta resistencia compresiva. Es la estructura más dura que aparece en el diagrama. Su estructura cristalina es ortorrómbica [10].

Ferrita es el nombre dado a la solución sólida α . Es una solución sólida intersticial de una pequeña cantidad de carbón disuelto en hierro α (b.c.c.). La máxima solubilidad es 0,022% de C a 727°C, y disuelve sólo 0,008% de C a temperatura ambiente. Es la estructura más suave que aparece en el diagrama. Las propiedades promedio son: resistencia tensil, 40 000 lb/pulg²; elongación, 40 por ciento en 2 pulg; dureza, menor que la Rockwell C 0 o que la Rockwell B 90 [10].

Perlita es la mezcla eutectoide que contiene 0,77 por ciento de C y se forma a 727°C a un enfriamiento muy lento. Es una mezcla muy fina, tipo placa o laminar de ferrita y cementita. La Figura 2.18, muestra la fina mezcla tipo huella dactilar, llamada perlita. La base o matriz ferrítica blanca que forma la mayoría de la mezcla eutectoide contiene delgadas placas de cementita. Las propiedades promedio son: resistencia tensil, 120 000 lb/pulg²; elongación, 20% en 2 pulg; dureza, Rockwell C 20, Rockwell B 95-100 o BHN 250-300 [10].

2.2.5.2. NORMALIZADO [10].

La normalización del acero se lleva a cabo al calentar aproximadamente 100°F (40°C) por encima de la línea de temperatura crítica superior (A_{c3} o A_{cm}) seguida por un enfriamiento en aire quieto hasta la temperatura ambiente.

La Figura 2.23, muestra el intervalo de temperatura para normalización.

El propósito de la normalización es producir un acero más duro y más fuerte que el obtenido por recocido total, de manera que para algunas aplicaciones la normalización pueda ser un tratamiento térmico final.

Por tanto, para aceros hipereutectoides, es necesario calentar por encima de la línea A_{cm} a fin de disolver la red de cementita. La normalización también puede utilizarse para mejorar la maquinabilidad, modificar y refinar las estructuras dendríticas de piezas de fundiciones, y refinar el grano y homogeneizar la microestructura para mejorar la respuesta en las operaciones de endurecimiento.

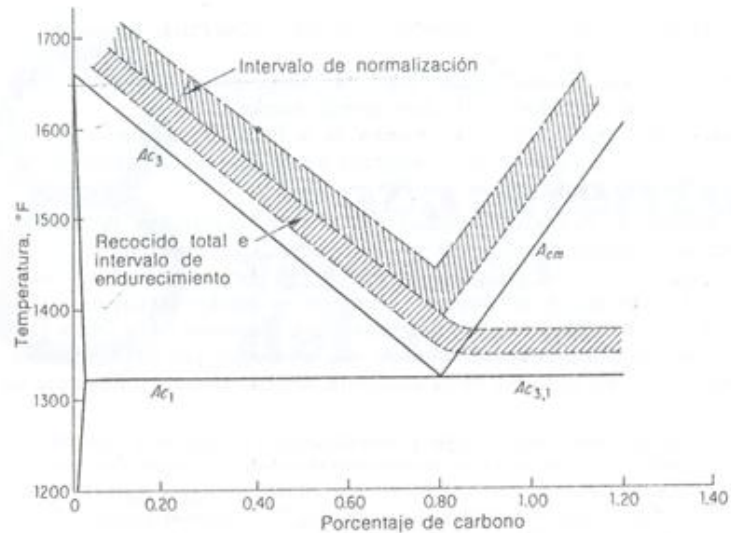


Figura 2.23: Intervalo de recocido, normalización y endurecimiento para aceros al carbono [10]

El incremento en la velocidad de enfriamiento por aire cuando se compara con el enfriamiento por horno afecta en varias formas la transformación de la austenita y de la microestructura resultante. Como ya no se enfría en condiciones de equilibrio, el diagrama hierro-carburo de hierro no puede utilizarse para predecir las proporciones de ferrita y perlita proeutectoide o cementita y perlita proeutectoide que existirán a temperatura ambiente. Hay menos tiempo para la formación de la constituyente proeutectoide; en consecuencia, habrá menos ferrita proeutectoide en los aceros normalizados hipoeutectoides y menos cementita proeutectoide en los aceros hipereutectoides en comparación con los aceros recocidos [10].

La Figura 2.24, muestra la microestructura de un acero normalizado al 0,50% de carbono. En la condición de recocido, este acero tendría aproximadamente 62% de perlita y 38% de ferrita proeutectoide. Debido al enfriamiento por aire, esta muestra tiene sólo como el 10% de ferrita proeutectoide, que es la red blanca que rodea las áreas oscuras de perlita. Para los aceros hipereutectoides, la normalización reducirá la continuidad de la red de cementita proeutectoide, y en algunos casos puede eliminarse por completo. Como la presencia de la red de cementita redujo la resistencia de los aceros recocidos hipereutectoides, los aceros normalizados deben mostrar un aumento en resistencia [10].

Aparte de influir la cantidad de constituyente proeutectoide que formará, la mayor rapidez de enfriamiento en la normalización también afectará la temperatura de

la transformación de la austenita y la fineza da la perlita. En general, mientras más rápido sea el enfriamiento menor será la temperatura de transformación de la austenita y más fina será la perlita. La Figura 2.25 muestra esquemáticamente la diferencia en espaciamiento de las placas de cementita en la perlita entre recocido y normalización [10].

En el caso de perlita normalizada media, las placas de cementita más próximas entre sí tienden a endurecer la ferrita de modo que no cederá tan fácilmente, aumentando así la dureza. Si la perlita recocida gruesa tiene una dureza Rockwell C 10 aproximada, entonces la perlita normalizada media será Rockwell C 20 aproximadamente. El enfriamiento fuera del equilibrio también cambia el punto eutectoide hacia un contenido de carbono más bajo en los aceros hipoeutectoides y hacia un contenido de carbono más alto en aceros hipereutectoides. El efecto neto es que la normalización produce una estructura de perlita más fina y más abundante que la obtenida por recocido, lo cual resulta en un acero más duro y más fuerte [10].

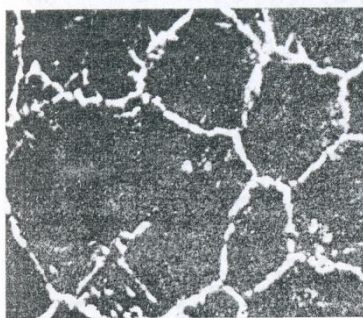


Figura 2.24: Acero normalizado al 0,50% C, calentado a 980°C y enfriado al aire; 100x. las áreas perlíticas están rodeadas por ferrita proeutectoide [10]

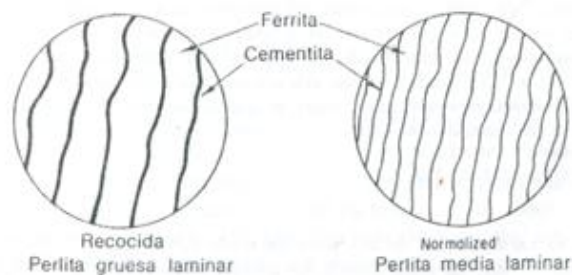


Figura 2.25: Esquema que muestra la diferencia en estructura perlítica, debido al recocido y normalizado [10].

2.2.5.2.1. DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN POR ENFRIAMIENTO CONTINUO.

En la práctica los tratamientos isotérmicos son difíciles de llevar a cabo porque una aleación debe enfriarse rápidamente desde una temperatura superior a la eutectoide y mantenerse a elevada temperatura. La mayoría de los tratamientos térmicos del acero implican enfriamiento continuo de la muestra hasta temperatura ambiente [9].

En los enfriamientos continuos, los tiempos requeridos para que la reacción empiece y termine se retrasan. De este modo el diagrama isotérmico se desplaza en el sentido que necesita más tiempo y menos temperatura, como indica la Figura 2.26, correspondiente al acero eutectoide [9].

La representación gráfica de las curvas de inicio y fin de la transformación se denominan *diagramas de transformación por enfriamiento continuo (TEC)*. La velocidad de enfriamiento se puede controlar modificando el medio de enfriamiento [9].

En la Figura 2.27 se superponen dos curvas de enfriamiento correspondientes al acero eutectoide. La transformación se inicia en el tiempo indicado por la intersección de la gráfica del enfriamiento con la del inicio de la reacción y termina una vez cruzada la curva de final de transformación. Los productos microestructurales de las curvas de enfriamiento moderadamente rápido y lento de la Figura 2.27 son perlita fina y gruesa, respectivamente [9].

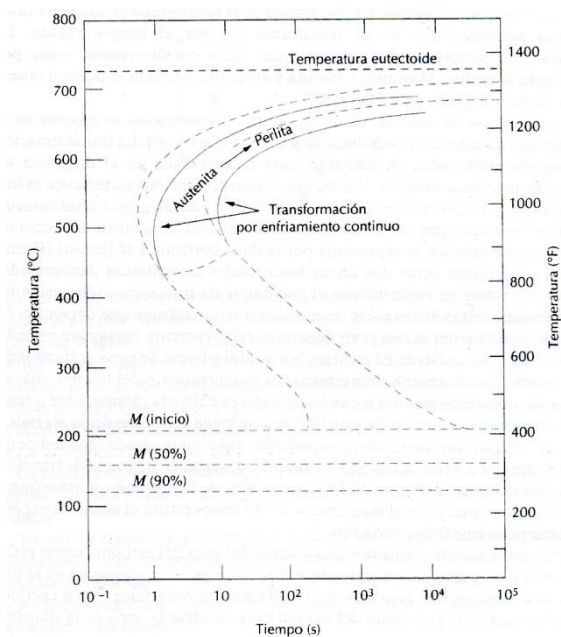


Figura 2.26: Diagramas sobreimpuestos de transformación isotérmica y de enfriamiento continuo de un acero eutectoide [9].

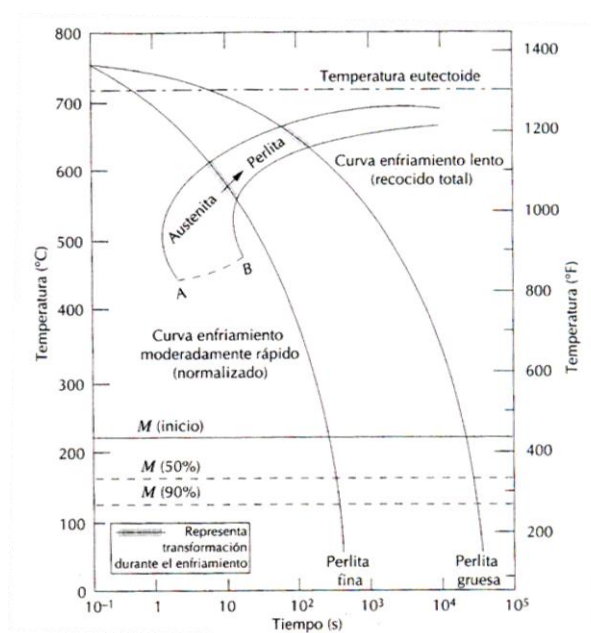


Figura 2.27: Curvas de enfriamiento moderadamente rápido y lento sobreimpuestas encima de un diagrama de transformación de un acero eutectoide [9].

El diagrama de transformación por enfriamiento continuo (TEC) para un acero con contenido de carbono de 0.53%C se muestra a continuación.

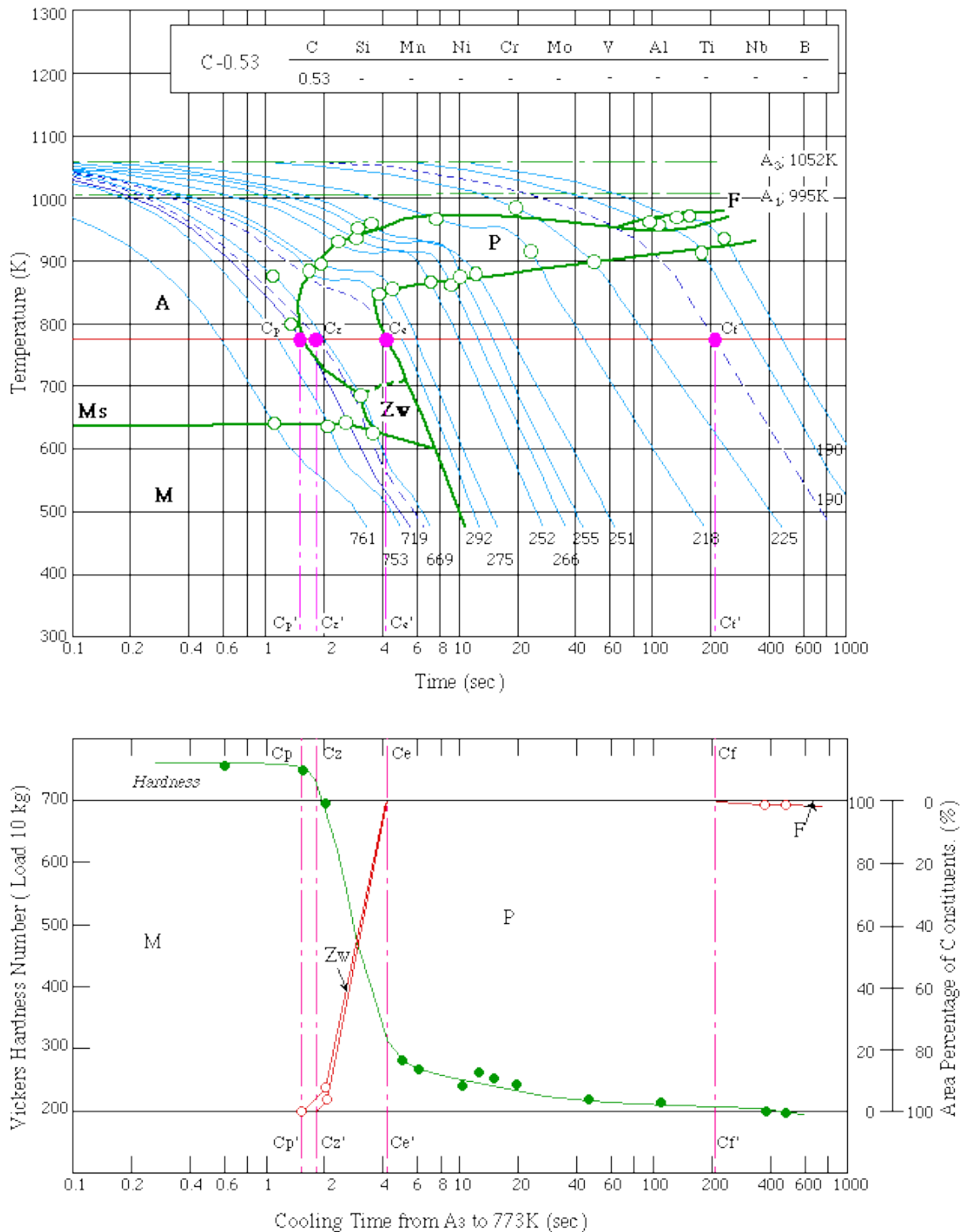


Figura 2.28: Diagrama de transformación por enfriamiento continuo para un acero de 0,53%C (Tomada de www.mits.nims.go.jp/db_top_eng.htm)

En la Figura 2.28 se puede observar dos secciones. La primera en donde se muestra el diagrama de transformación por enfriamiento continuo para un acero de 0,53%C, en este diagrama se ha trazado diferentes curvas, las mismas que representan velocidades de enfriamiento, estas velocidades van desde velocidades lentas a

velocidades rápidas, también se puede observar que se ha indicado las durezas que poseen luego del enfriamiento, expresadas en dureza Vickers. La segunda sección es un diagrama en donde se ha dibujado la dureza Vickers Vs tiempo, en este diagrama la dureza varía desde 190 Vickers hasta 761 Vickers, dependiendo de la velocidad de enfriamiento utilizada.

Las microestructuras de igual forma varían dependiendo de la velocidad de enfriamiento. A continuación se presentan algunas microestructuras.

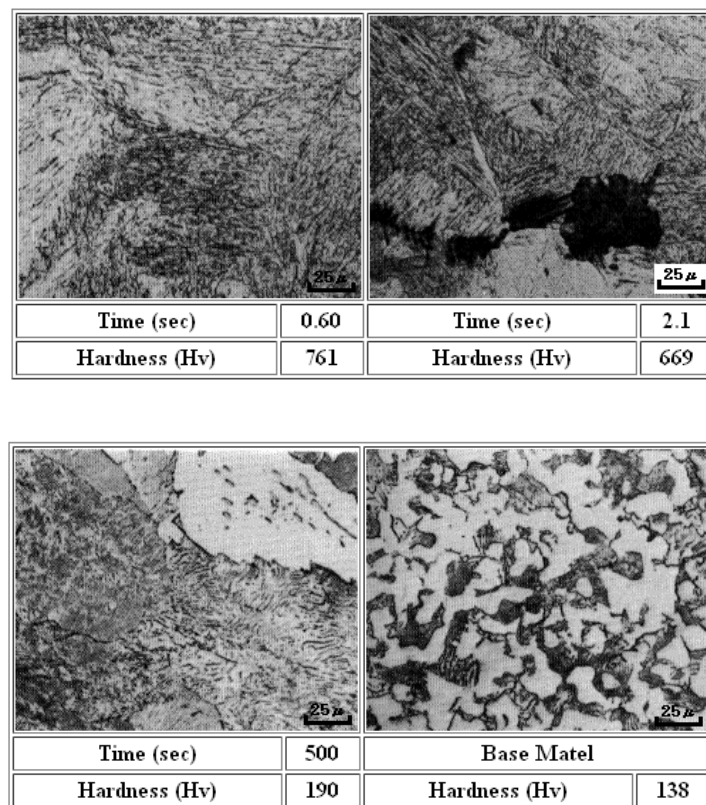


Figura 2.29: Microestructuras obtenidas al realizar enfriamientos a diferentes velocidades para un acero de 0,53%C a) Microestructura 100% martensítica obtenida al enfriar en un tiempo de 0,60 segundos obteniendo una dureza de 761Hv. b) Fotomicrografía 90% martensita 10% perlita fina. c) Fotomicrografía 100% perlita gruesa. d) Fotomicrografía del material base. (Tomada de www.mits.nims.go.jp/db_top_eng.htm)

2.2.5.2.2. FERRITA.

El hierro tiene cuatro variedades alotrópicas: por debajo de 768° C el hierro cristaliza en la variedad alfa. De 768° a 910° cristaliza en la variedad beta. De 910° C a

1400° C cristaliza en la variedad gamma y desde 1539° C hasta la fusión cristaliza en la variedad delta.

El hierro que cristaliza en la variedad alfa cristaliza por debajo de 768° como ya se dijo. La red espacial a que pertenece es la cúbica centrada, es decir, con un átomo en cada vértice del cubo y otro en el centro. El hierro alfa no disuelve prácticamente el carbono, no llegando al 0,008% a la temperatura ambiente, siendo la máxima solubilidad de 0,02 a 723° C. Entre algunas de sus propiedades principales destaca que el hierro alfa es magnético.

2.2.5.2.2.1. MORFOLOGÍA DE LA FERRITA.

1.- Fases presentes en Proceso de Transformación Difusional: estas fases se presentan cuando el proceso de enfriamiento es lo suficientemente lento como para permitir movilidad atómica, provocándose un constante intercambio de átomos en forma aleatoria y poco ordenada de un lado al otro de la interface respectiva. Las fases formadas por este mecanismo son las siguientes:

a).- Ferrita Alotriomórfica: El término “alotriomórfico” significa que esta fase es cristalina y ordenada en su estructura interna pero no en sus bordes exteriores. Esto implica que las superficies limitantes del cristal no son regulares y no demuestran la simetría presente en su estructura interna. De este modo, la ferrita que tiende a nuclearse en los bordes de grano de la austenita, tiende a crecer a lo largo de las paredes de la austenita a niveles mayores de lo que lo hace en la dirección normal. Aunque la ferrita alotriomórfica no necesariamente debe formarse justo en los bordes de la austenita, en la práctica lo hace, presumiblemente debido a que no existe otro sitio heterogéneo de nucleación bi-dimensional como la austenita. La definición para la ferrita alotriomórfica se aplica a escala óptica, en que sus caras se ven aleatorias y amorfas, y no a su estructura cristalina interna que es ordenada [11].

b).- Ferrita Idiomórfica: esta fase presenta ópticamente caras con forma cristalina. En los aceros, la ferrita idiomórfica se considera que aproximadamente posee una morfología equiaxial, y se forma intragranularmente supuestamente en torno a inclusiones u otros sitios de nucleación heterogéneos. La ferrita idiomórfica refleja ante el microscopio óptico la simetría del bicristal austenita-ferrita (γ - α), aunque no refleje ni

importe su estructura o morfología cristalina interna. Debido a que la ferrita idiomórfica, así como también la ferrita alotriomórfica, deben su formación a un mecanismo de transformación difusional, el crecimiento de ambas no se restringe exclusivamente al borde de grano de la austenita, sino que la extensión de la penetración dentro de un grano particular puede variar de acuerdo a cómo pueda cambiar la relación de orientación de la interface γ - α [11].

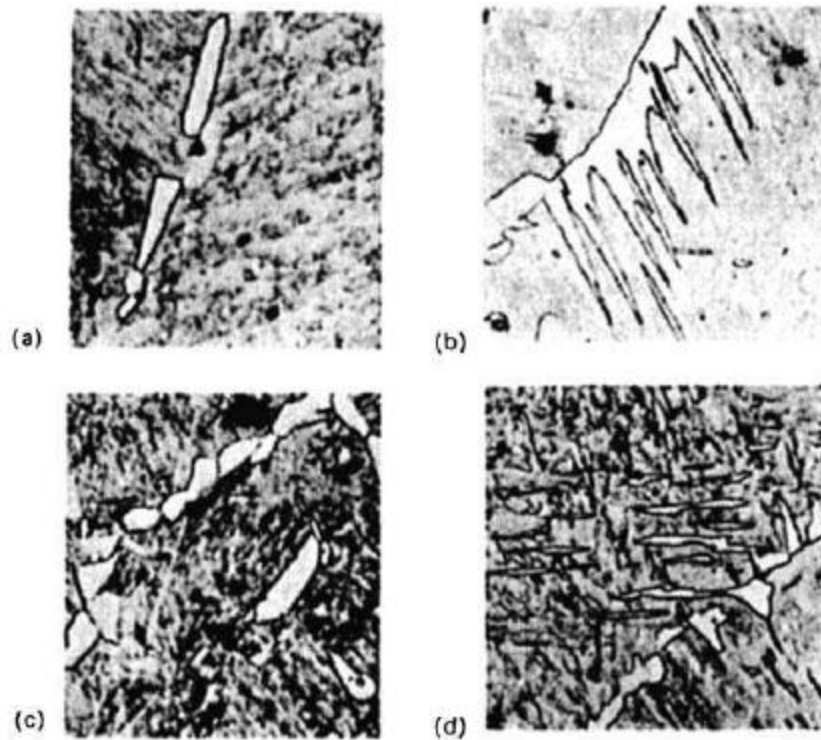


Figura 2.30: (a) Ferrita alotriomórfica a 500X obtenida de un acero de 0,34%C, enfriado durante 12 minutos desde 790°C. (b) Ferrita Widmanstatten a 500X obtenida de un acero de 0,34%C, enfriado durante 15 min desde 725°C. (c) Ferrita alotriomórfica y ferrita ideomórfica a 500X obtenida de un acero de 0,34%C, enfriado durante 12 minutos desde 790°C. (d) Placas intergranulares de ferrita Widmanstatten a 500X obtenida de un acero de 0,34%C, enfriado durante 15 min desde 725°C. [28]

c).- Ferrita Maciza: tiene la particularidad de que esta fase hereda la composición de la austenita de origen, llamada también austenita progenitora. La capacidad para cruzar el borde de grano de la austenita origen por parte de esta ferrita es particularmente pronunciada durante la transformación completa, de modo que el tamaño de grano de la ferrita puede ser mayor que el tamaño de grano inicial de la austenita. La ausencia de un cambio en la composición de la ferrita Maciza permite a la transformación continuar hasta que toda la austenita se consuma. Estos factores combinados resultan en una microestructura de un gran grano de ferrita de una sola fase; grano que posee una morfología aproximadamente equiaxial debido a influencias entre granos vecinos [11].

2.- Fases presentes sin Proceso Difusional. Las fases que aquí se describen se producen por enfriamiento lo suficientemente rápido de manera que evitan la movilidad atómica entre las interfaces. Así, las fases aquí producidas están circunscritas fundamentalmente a un grano único de austenita, de modo que se evita el que átomos aleatoriamente se muevan entre un grano de austenita y otro vecino.

a).- Ferrita Widmanstatten: esta fase se forma a un bajo enfriamiento inferior a la temperatura Ae_3 donde la fuerza motriz para la transformación es pequeña, de modo que es una necesidad termodinámica la fragmentación del carbón durante dicha transformación. A una escala óptica, la ferrita Widmanstatten tiene la forma entre placas y listones. La formación de la ferrita Widmanstatten va también acompañada por un cambio en la forma de la región transformada. Este cambio consiste en dos planos de tensión de deformación invariantes adyacentes y opuestos. Estos planos **IPS** (deformación de plano invariante) de deformación poseen componentes de corte grandes e implican la existencia de una correspondencia atómica entre las fases original y producto en la medida que se relacionen los átomos en solución del hierro y sustitucionales. Los átomos intersticiales como el carbono se puede difundir durante el crecimiento sin afectar la forma o el carácter displacivo de la transformación [11].

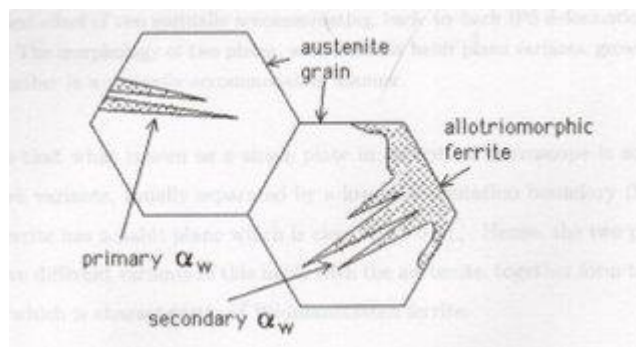


Figura 2.31: Ferrita Widmanstatten (f.W) [11].

Si se considera la figura anterior se puede distinguir que existen dos tipos de ferrita Widmanstatten (f. W):

- **La ferrita secundaria** o denominada en inglés “Widmanstatten ferrite side-plate”: es la ferrita Widmanstatten que tiene lugar su nucleación a partir de los bordes de la ferrita alotriomórfica que ya se ha formado en el borde del grano de austenita. Este tipo de f.W. se produce generalmente en granos pequeños de austenita cuando el proceso de enfriamiento ha sido relativamente lento, debido

a la presencia del mecanismo de transformación difusional ya descrito. En otras palabras, como la ferrita Widmanstätten compite con la alotriomórfica, si se forma la una la otra tiende a desaparecer. Al ser el grano de austenita pequeño y si el enfriamiento no es tan rápido y da paso a la movilidad atómica, es la ferrita alotriomórfica la que se forma en gran medida, quedando menos espacio para formar ferrita Widmanstätten (**f.W**) [11].

- **La ferrita primaria** o en inglés “W.f. primary side-plate”. Esta ferrita se forma directamente en los bordes del grano de Austenita y crece en forma perpendicular a dichos bordes, hacia el interior de la austenita. Como la **f.W.** es un proceso no difusional, al disminuir bruscamente la temperatura, las placas de ferrita Widmanstätten se formarán rápidamente impidiendo la formación de ferrita alotriomórfica [11].

2.2.5.3. TEMPLE.

Su finalidad es aumentar la dureza y la resistencia del acero. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior (entre 900 - 950° C) y se enfría luego más o menos rápidamente (según características de la pieza) en un medio como agua, aceite, etc [12].

Existen diferentes tipos de temple de los cuales se describe los más interesantes.

- **Temple continuo completo.** Se aplica a los aceros hipereutectoides (contenido de carbono inferior a 0,9%). Se calienta la pieza hasta la temperatura de temple y seguidamente se enfría en el medio adecuado (agua, aceite, sales, aire) con lo que se obtiene como elemento constituyente *martensita* [12].
- **Temple escalonado.** Consiste en calentar el acero a temperatura adecuada y mantenerlo hasta que se transforme en austenita, seguidamente se enfría con una temperatura uniforme en un baño de sales hasta transformarlo en *bainita* [12].
- **Temple superficial.** Se basa en un calentamiento superficial muy rápido de la pieza y un enfriamiento también muy rápido, obteniendo la austenización solo en la capa superficial, quedando el núcleo de la pieza blando y tenaz y la superficie exterior dura y resistente al rozamiento [12].

2.2.5.3.1. MARTENSITA [10].

Bajo enfriamientos lentos o moderados, los átomos de carbono pueden difundirse hacia afuera de la estructura de austenita. De este modo, los átomos de hierro se mueven ligeramente para llegar a ser b.c.c. (cúbica centrada en el cuerpo). Esta transformación gamma – alfa tiene lugar mediante un proceso de nucleación y crecimiento y depende del tiempo.

Con un aumento adicional en la rapidez de enfriamiento, no hay tiempo suficiente para que el carbono se difunda de la solución y, aunque tiene lugar algún movimiento de los átomos de hierro, la estructura no puede llegar a ser b.c.c., ya que el carbono está atrapado en la solución.

La estructura resultante, llamada *martensita*, es una solución sólida sobresaturada de carbono atrapado en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo. Dos dimensiones de la celda unitaria son iguales, pero la tercera está ligeramente extendida debido al carbono atrapado. La razón axial c/a aumenta con el contenido de carbono a un máximo de 1.08.

Esta estructura reticular altamente distorsionada es la principal razón para la alta dureza de la martensita. Como los átomos de la martensita están menos densamente empaquetados que en la austenita durante la transformación, ocurre una expansión; sin embargo, durante la formación de martensita, dicha expansión produce altos esfuerzos localizados que dan como resultado la deformación plástica de la matriz.

Después de un enfriamiento drástico (*temple*), la martensita aparece microscópicamente como una estructura blanca acicular o tipo aguja, descrita algunas veces como un haz de pajillas. En la mayoría de los aceros, la estructura martensítica vaga e indeterminable (Figura 2.32). En las aleaciones al alto carbono, en las que el fondo es austenita retenida, la estructura acicular de la martensita está definida más claramente.



Figura 2.32: Fotomicrografía de un acero con microestructura martensítica. Los granos en forma de aguja son el constituyente martensita y las regiones blancas son austenita retenida; no se ha transformado durante el temple rápido. 1220 x [10].

2.2.6. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS ALEACIONES HIERRO-CARBONO.

Se discute ahora el comportamiento mecánico de los aceros al carbono con perlita fina, perlita gruesa, esferoidita, bainita y martensita y la relación entre la microestructura y las propiedades mecánicas. En la perlita se puede considerar que existe dos fases: ferrita y cementita [9].

2.2.6.1. FERRITA.

La ferrita es el constituyente más blando de los aceros. Sus características mecánicas son 90 HB, 300 MPa de carga de rotura R_m , y 40% de alargamiento. Es menos dura que la austenita, por su menor contenido en C, y más plástica que ella; aunque cristaliza en un sistema (el cúbico centrado en el cuerpo) que no presenta planos compactos [13].

2.2.6.2. PERLITA.

La cementita es más dura y más frágil que la ferrita. Por este motivo al aumentar la fracción de Fe_3C en un acero, mientras permanezcan constantes los otros elementos microestructurales, resulta un material duro y resistente. La Figura 2.33a) es la representación gráfica de la resistencia a la tracción, del límite elástico y de la dureza en función del porcentaje en peso de carbono (o equivalente como porcentaje de Fe_3C)

para los aceros que contienen perlita fina. Los tres parámetros aumentan al incrementar la concentración de carbono. Puesto que la cementita es más frágil, incrementando su contenido disminuye la ductilidad y la tenacidad (o energía al impacto). Estos efectos para el mismo acero con perlita fina se indican en la Figura 2.33b) [9].

Los espesores de las capas de ferrita y cementita también influyen en el comportamiento mecánico del material. La perlita fina es más dura y resistente que la perlita gruesa, como indica la representación gráfica de la dureza frente a la concentración de carbono (Figura 2.34a) [9].

La razón de este comportamiento radica en los fenómenos que ocurren en los límites de fases α - Fe_3C . En primer lugar hay un alto grado de adherencia entre las dos fases en el límite. Por lo tanto, la resistencia y la rigidez de la fase cementita restringe la deformación de la fase ferrita, más blanda, en las regiones adyacentes al límite; es decir, la cementita refuerza a la ferrita. Este grado de reforzamiento es más elevado en la perlita fina porque es mayor la superficie de límites de fases por unidad de volumen del material. Además, los límites de fases sirven de barrera para el movimiento de dislocaciones del mismo modo que los límites de grano [9].

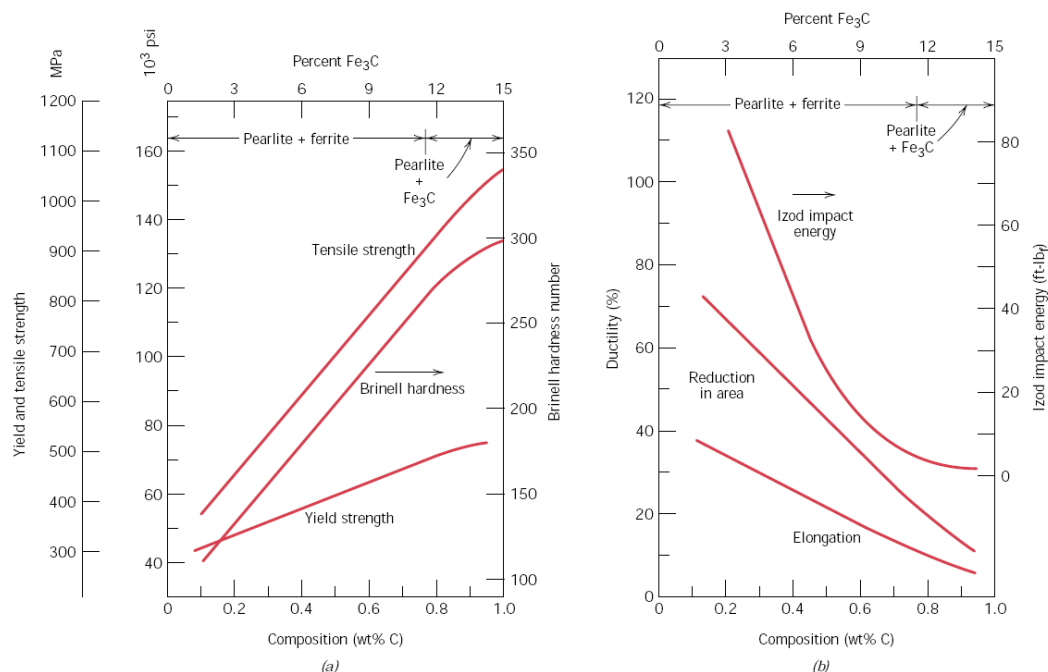


Figura 2.33: (a) Límite elástico, resistencia a la tracción y dureza Brinell frente a porcentaje de carbono de un acero al carbono y microestructura de perlita fina. (b) Ductilidad (%EL y %AR) y energía de impacto izod frente a porcentaje de carbono de un acero al carbono y microestructura de perlita fina [9].

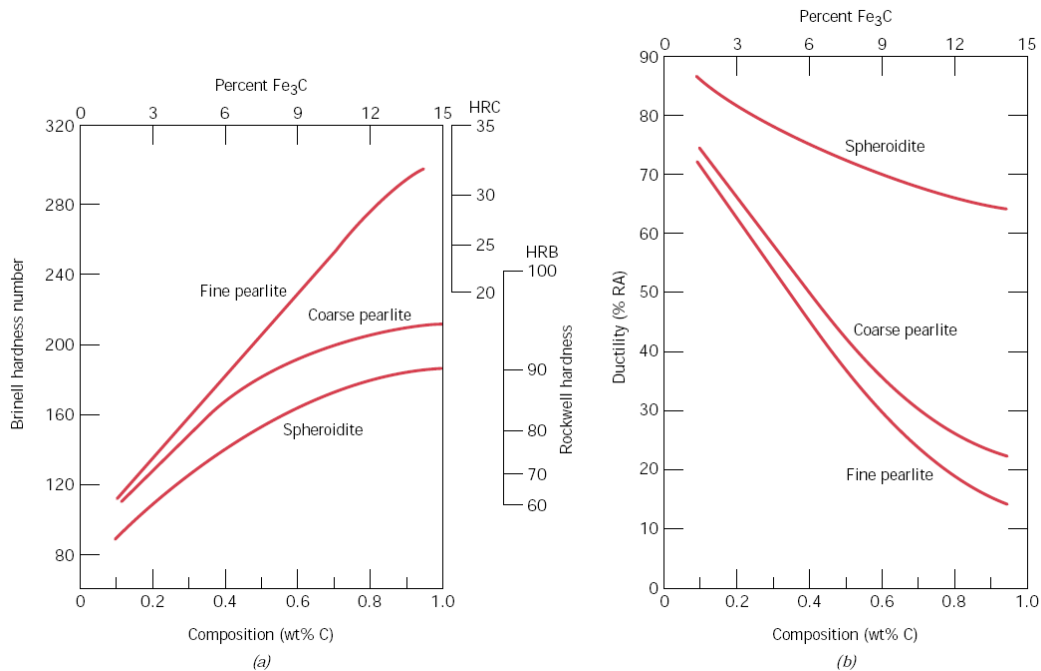


Figura 2.34: (a) Durezas Brinell y Rockwell frente a porcentaje de C de un acero al carbono y microestructura de perlita gruesa y esferoidita. (b) Ductilidad (%AR) en función del porcentaje de C de un acero al carbono y microestructura de perlita gruesa y esferoidita [9].

En la perlita fina y durante la deformación plástica las dislocaciones deben cruzar más límites de fases que en la perlita gruesa. De este modo el mayor reforzamiento y restricción del movimiento de las dislocaciones en la perlita fina se traducen en mayor dureza y resistencia mecánica [9].

La perlita gruesa es más dúctil que la perlita fina, como ilustra la Figura 2.34b), que indica el porcentaje de estricción en función del contenido en carbono para ambas microestructuras. Este comportamiento es consecuencia de la mayor restricción de la perlita fina a la deformación plástica [9].

2.2.6.3. BAINITA.

Los aceros bainíticos son más duros y resistentes que los perlíticos porque tienen una estructura más fina a base de partículas diminutas de Fe₃C en una matriz ferrítica; por este motivo exhiben una interesante combinación de resistencia y ductilidad. La

Figura 2.35 muestra la influencia de la temperatura de transformación sobre la resistencia a la tracción y dureza de un acero eutectoide [9].

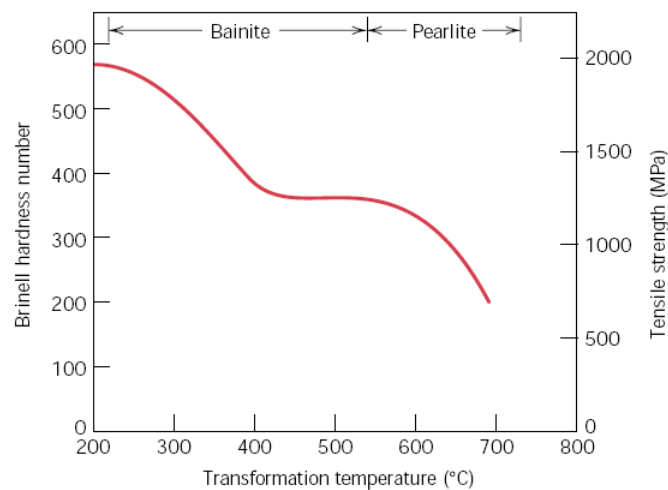


Figura 2.35: Dureza Brinell y resistencia a la tracción Vs la temperatura isotérmica de transformación para un acero eutectoide, para una estructura bainítica y perlítica [9].

2.2.6.4. MARTENSITA.

Los aceros con microestructura martensítica son los más duros y mecánicamente resistente, pero también los más frágiles y menos dúctiles, la dureza de estos aceros dependen del contenido en carbono, como demuestra la Figura 2.36, donde están representados los valores de la dureza en función del porcentaje en carbono, para aceros superiores al 0,6%C, de la martensita y de la perlita. Por el contrario, los aceros perlíticos, menos resistentes y duros que los martensíticos, no son tenaces debido a la microestructura. Estas propiedades se explican mejor por la poca efectividad de los átomos de carbono intersticial para trabajar las dislocaciones como efecto de una disolución sólida y los relativamente pocos sistemas de deslizamiento (para desplazar las dislocaciones) de la estructura BCT [9].

La austenita es ligeramente más densa que la martensita y, por lo tanto, el volumen aumenta durante la transformación de fase que ocurre durante el temple. Consiguientemente, el temple rápido de piezas relativamente grandes puede producir grietas debido a las tensiones internas; problema especialmente importante si el contenido en carbono del acero es superior al 0,5% en peso [9].

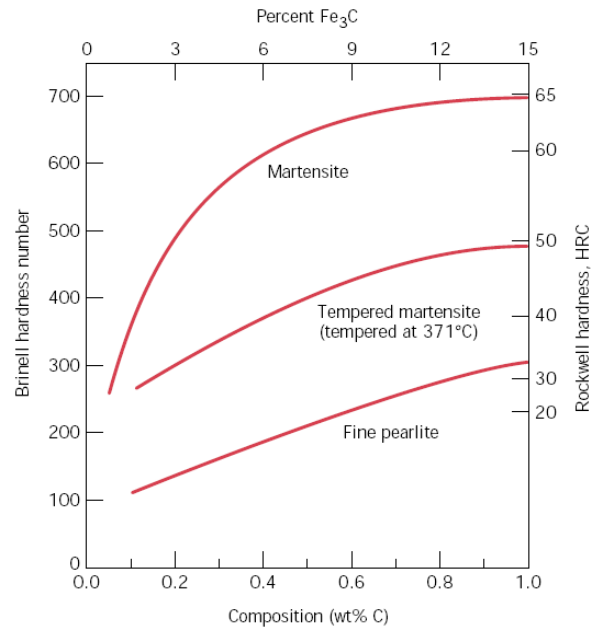


Figura 2.36: Durezas en función del porcentaje de C de un acero al carbono y microestructura de martensita y de perlita fina [9].

CAPÍTULO III

3. EXPERIMENTACIÓN

3.1. OBTENCIÓN, SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE PROBETAS DE VARILLAS CORRUGADAS DE DIFERENTES DIÁMETROS.

3.1.1. OBTENCIÓN DE PROBETAS DE VARILLA CORRUGADA.

Para el presente trabajo de investigación, se contó con el apoyo de la empresa privada NOVACERO S.A. empresa ecuatoriana de gran experiencia en producir una gama de productos derivados del acero, como son tuberías y perfiles, modelos de estilpanel, *varillas corrugadas*, entre otros.

NOVACERO S.A. aportó las muestras de varillas corrugadas de 12 mm y 14 mm de diámetro, procedentes del lote LA002964-1 y colada 5378. Estas varillas poseen características químicas semejantes.



Figura 3.1: Almacenamiento de varillas

3.1.2. SELECCIÓN DE PROBETAS DE VARILLA CORRUGADA.

La selección del diámetro de las varillas corrugadas fabricadas en NOVACERO S.A. fue realizada tomando en cuenta la disponibilidad del material y la necesidad del estudio para dichas varillas; tomando en cuenta estos antecedentes, la empresa recomendó realizar estos estudios en varillas de 12mm y 14mm de diámetro, puesto que estas varillas son las de mayor comercialización.

3.1.3. PREPARACIÓN DE PROBETAS DE VARILLA CORRUGADA.

Luego de realizar la selección de las varillas corrugadas, se procedió a prepararlas para el transporte desde la planta ubicada en Laso, hasta los laboratorios en Riobamba ubicados en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo-Escuela de Ingeniería Mecánica. Las varillas de 12mm y 14mm de diámetro y 12m de largo, fueron cortadas en una prensa hidráulica en pedazos de 60cm de longitud. Se optó por cortarlas en esta longitud, puesto que este tamaño facilita la manipulación en los diferentes ensayos que posteriormente se realizarán en dichas varillas.



Figura 3.2: Fotografía de un lote de varillas de 12mm de diámetro nominal y 600mm de longitud



Figura 3.3: Fotografía de un lote de varillas de 14mm de diámetro nominal y 600mm de longitud

3.2. TRANSFORMACIONES DE FASE EN PROBETAS CON DIFERENTES VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO.

En las muestras de varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro, procedentes del lote LA002962-1 y colada 5378, proporcionadas por la Empresa NOVACERO S.A., se procede a realizar diversas transformaciones de fase, para lo cual se realizan enfriamientos a diferentes velocidades.

Las velocidades de enfriamiento a las cuales van a ser expuestas las muestras, estarán en un rango de menor y mayor velocidad de enfriamiento, en comparación con la velocidad de enfriamiento a las cuales fueron laminadas en La Planta Laso de NOVACERO S.A.

3.2.1. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO PARA VARILLAS CORRUGADAS LAMINADAS EN FÁBRICA.

El cálculo de la velocidad de enfriamiento para varillas corrugadas laminadas en fábrica se realizó en varillas corrugadas de 12 mm de diámetro provenientes del lote 4141.

La velocidad de enfriamiento viene expresada en unidades de temperatura sobre tiempo, por lo cual se debe conocer el tiempo que se demora la varilla corrugada laminada en La Planta Laso de NOVACERO S.A. en pasar de 900 a 400°C.

El rango de temperatura se determinó con la ayuda de la Figura 2.27, mencionada en el Capítulo II, para un porcentaje de carbono de 0,3% y un acero sometido a normalizado. En la Figura 3.4, se observa la temperatura ideal para obtener un 100% de austenita para un acero de 0,3%C. La misma que es de 1650°F (898,89°C), para la práctica se optó por la temperatura de 900°C.

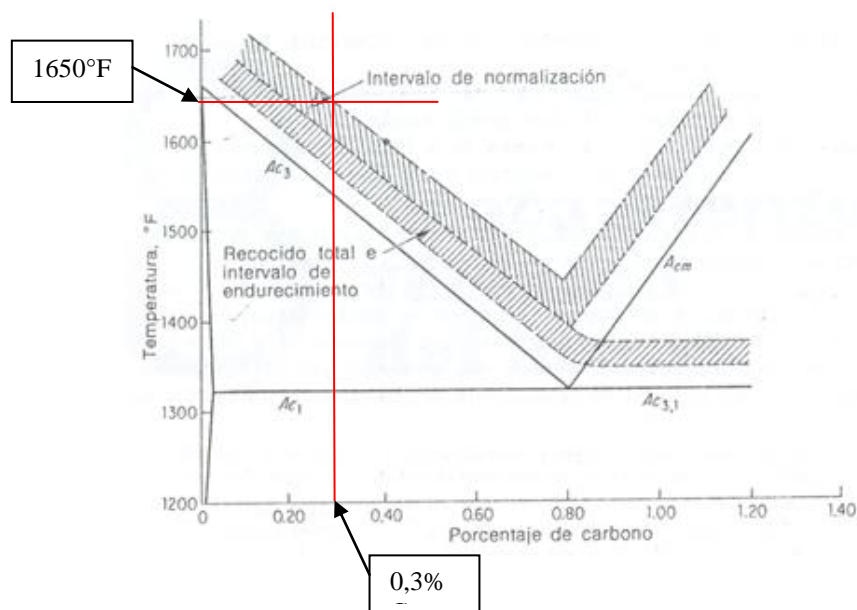


Figura 3.4: Temperatura de austenización para un acero normalizado con 0,3%C.

Para conocer el tiempo se contó con un pirómetro óptico Raytek – Raynger MX, cuyo rango de temperatura oscila entre -30°C a 900°C y un cronómetro portátil.

La velocidad de enfriamiento se calcula mediante la Ecuación 3.1.

$$V_{ef} = \frac{T_0 - T_f}{t} \quad (3.1)$$

donde:

V_{ef} = Velocidad de enfriamiento, (°C/s)

T_0 = Temperatura inicial de la muestra sujeta al análisis, (900°C)

T_f = Temperatura final de la muestra sujeta al análisis, (400°C)

t = tiempo en que la muestra pasa de T_0 a T_f , (s)

El tiempo y velocidad de enfriamiento promedio que se encontró se expresa en la siguiente tabla:

Tabla 3.1: TIEMPO Y VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO PROMEDIO PARA VARILLAS CORRUGADAS DE 12mm DE DIÁMETRO PROVENIENTES DEL LOTE 4141.

Lecturas	Tiempo (s)	Velocidad de enfriamiento (°C/s)
1	340	1,4706
2	360	1,3889
3	358	1,3966
4	342	1,4620
5	360	1,3889
Promedio	352	1,4204

3.2.2. DETERMINACIÓN DE LAS DISTINTAS VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO PARA MUESTRAS DE VARILLAS CORRUGADAS.

Antes de determinar las velocidades de enfriamiento para las muestras de varillas corrugadas, se debe tener un procedimiento de preparación de muestras.

3.2.2.1. PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS.

En el laboratorio de metalurgia de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo –Escuela de Ingeniería Mecánica, se aplicó el siguiente procedimiento para preparar las muestras de varillas corrugadas de 60cm de longitud provenientes de la Planta Lasso de NOVACERO S.A. para los diferentes ensayos, tanto térmicos (transformaciones de fase) como mecánicos, tecnológicos y metalográficos.

En primer lugar se procede a cortar nuestras probetas de varilla corrugada, tanto las de 12mm como las de 14mm de diámetro; en dos secciones una de 35cm de longitud y otra de 25cm de longitud. La primera sección se utilizará para ensayos de tracción y el segundo segmento se utilizará para ensayos metalográficos y tecnológicos.

Posteriormente, se introducirán las dos secciones de 35cm y 25cm de longitud al horno eléctrico. En el horno se calentarán las muestras hasta los 900°C y permanecerán a esta temperatura durante una hora. Luego, se retirarán del horno y se enfriarán a la velocidad deseada.



Figura 3.5: Secciones de 35cm y 25cm de longitud de varillas corrugadas, ubicadas dentro del horno eléctrico.

3.2.2.2. ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO.

Para determinar las distintas velocidades de enfriamiento se realizaron cuatro ensayos, estos ensayos consisten en enfriar las probetas en diferentes ambientes para obtener varias velocidades de enfriamiento. Para realizar estos ensayos, se utilizó un pirómetro óptico InfraPro 5 – OAKTON y un cronómetro portátil. Para cada ensayo se

utilizaron diferentes equipos para proporcionar las cuatro velocidades diferentes de enfriamiento. La primera en horno eléctrico calentada a 50°C, la segunda en aire a temperatura ambiente, la tercera y cuarta, enfriadas con aire circulante y caudales distintos.

- Para el primer ensayo: Horno eléctrico, las probetas se enfrían en el interior del horno cuya temperatura es de 50°C. A este primer ensayo se lo codificó con las letras **H50** por ser enfriado en el horno a 50°C. De aquí en adelante a este ensayo se lo conocerá por las siglas antes mencionadas, acompañadas del valor del diámetro que posee cada varilla. Por ejemplo la varilla corrugada de 12mm de diámetro y enfriada a estas condiciones se la escribirá de la siguiente manera, 12-H50 y a la de 14mm de diámetro, 14-H50.
- Para el segundo ensayo: Medio ambiente, las probetas se enfrían al medio ambiente, cuya temperatura es de 20°C. A este ensayo se lo codificó con las siglas 12-N20 y 14-N20, para varillas de 12 y 14mm de diámetro respectivamente.
- Tercer ensayo: Venterol (Blower) – Model SY03, Size 2½, Cycles 50/60, Volts 110, Amps 2, R.P.M. 3000/3600, velocidad de flujo 88,88 km/h, caudal 0,05004 m³/s. Las probetas se enfrían en una corriente de aire, provenientes del venterol. Codificación del ensayo, 12-1V y 14-1V.
- Cuarto ensayo: Venterol (Blower) – Model SY03, Size 2½, Cycles 50/60, Volts 110, Amps 2, R.P.M. 3000/3600, velocidad de flujo 88,88 km/h, caudal 0,05004 m³/s y Venterol (Blower) – Model SY03, Size 2, Cycles 50/60, Volts 110, Amps 2, R.P.M. 3000/3600, velocidad de flujo 77,10 km/h, caudal 0,04341 m³/s. Las probetas se enfrían en una corriente de aire, provenientes de dos venteroles. Codificación del ensayo, 12-2V y 14-2V.

En las Tablas 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 se muestran los tiempos y velocidades de enfriamiento para todos los cuatro ensayos mencionados anteriormente. La velocidad de enfriamiento se calculó por medio de la Ecuación 3.1.



Figura 3.6: Medición de temperatura para muestras de varillas



Figura 3.7: Venterol Blower

Tabla 3.2: TIEMPOS PROMEDIO PARA VARILLAS CORRUGADAS DE 12mm DE DIÁMETRO ENFRIADAS DE 900°C A 400°C.

	12-H50	12-N20	12-1V	12-2V
Lecturas	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)
1	440	380	230	178
2	455	390	237	162
3	446	385	235	165
4	434	388	240	160
5	440	392	228	175
Promedio	443	387	234	168

Tabla 3.3: VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO PROMEDIO PARA VARILLAS CORRUGADAS DE 12mm DE DIÁMETRO ENFRIADAS DE 900°C A 400°C.

	12-H50	12-N20	12-1V	12-2V
Velocidad de enfriamiento promedio (°C/s)	1,1287	1,2920	2,1368	2,9762

Tabla 3.4: TIEMPOS PROMEDIO PARA VARILLAS CORRUGADAS DE 14mm DE DIÁMETRO ENFRIADAS DE 900°C A 400°C.

	14-H50	14-N20	14-1V	14-2V
Lecturas	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)
1	500	460	260	190
2	515	455	265	195
3	502	445	270	197
4	510	450	255	185
5	513	450	270	183
Promedio	508	452	264	190

Tabla 3.5: VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO PROMEDIO PARA VARILLAS CORRUGADAS DE 14mm DE DIÁMETRO ENFRIADAS DE 900°C A 400°C.

	14-H50	14-N20	14-1V	14-2V
Velocidad de enfriamiento promedio (°C/s)	0,9843	1,1062	1,8939	2,6316

3.3. ENSAYO ESPECTROMÉTRICO.

El ensayo espectrométrico fue realizado en NOVACERO S.A. planta Laso, departamento de control de calidad. El equipo utilizado fue el espectrómetro PDA-7000 SHIMADZU.

El procedimiento que se siguió para el ensayo espectrométrico es el siguiente:

1. Tamaño de muestras: Las probetas a ser analizadas deben tener un diámetro de 60mm por una altura de 60mm, como máximos y como mínimo un diámetro de 14mm por una altura de 3mm, ya que el plato de apoyo tiene un agujero de 12mm de diámetro. Ver Figura 3.8. (Las muestras de varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro fueron deformadas plásticamente para alcanzar el diámetro mínimo requerido).

2. Lijado de muestras: las muestras de varilla corrugada de 12 y 14 mm de diámetro se lijan en una lijadora marca Yodogawa, la cual tiene una lija de zirconio (Z80) montada en una banda rotativa movida por un motor eléctrico. Ver Figura 3.9. La lijadora, está entre los accesorios del Espectrómetro de Emisión Óptica, la misma sirve para desbastar y aplanar la superficie a analizar, así se tendrá una probeta con la rugosidad adecuada para que el espectrómetro trabaje sin dificultad.
3. Montaje de la muestra en el espectrómetro: La puerta que protege la cámara de destello se abre para colocar la muestra sobre el plato, con la superficie pulida hacia abajo, (se debe tener cuidado en no dejar descubierto el orificio en el cual se encuentra el electrodo), luego se desplaza la varilla de contacto hacia la muestra y finalmente se cierra la puerta de la cámara de destello. Ver Figura 3.8.
4. Disparos del espectrómetro y lecturas de composición química: Una vez ubicada la muestra, se realiza el encendido del equipo (el equipo realiza tres disparos) y posteriormente se revisa las lecturas de la composición química. (las lecturas de la composición química se presenta en el computador por medio del software del equipo).



Figura 3.8: Pulido de la muestra en la lijadora [8]

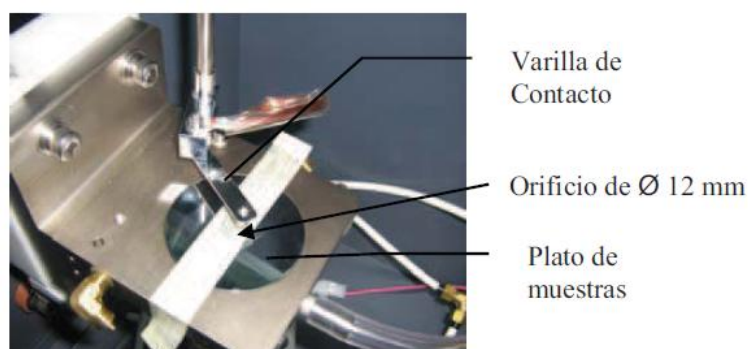


Figura 3.9: Base de apoyo [8]

Los resultados de la composición química que se obtienen de las probetas de varilla corrugada de 12 y 14 mm de diámetro en condiciones de suministro se muestran en la Tabla 3.6.

Para realizar posteriores análisis, se debe obtener el porcentaje de carbono equivalente de acuerdo a ASTM A6, el mismo que nos presenta la siguiente ecuación:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn + \%Si}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (3.2)$$

donde,

C_{eq} = Carbono equivalente, (%).

Tabla 3.6: RESULTADOS DEL ENSAYO ESPECTROMÉTRICO PARA VARILLAS CORRUGADAS DE 12 Y 14mm DE DIÁMETRO.

Elem. Disp.	Contenido			
	VC12-001	VC12-002	VC14-001	VC14-002
%C	0,305	0,305	0,289	0,292
%Mn	1,258	1,242	1,325	1,310
%Si	0,235	0,236	0,240	0,241
%Cr	0,012	0,012	0,010	0,010
%Mo	0,002	0,002	0,001	0,001
%V	0,021	0,023	0,022	0,023
%Ni	0,009	0,010	0,005	0,006
%Cu	0,015	0,017	0,015	0,015
C_{eq}	0,562	0,561	0,558	0,559
C_{eq} PROMEDIO	0,562		0,559	

El informe completo del ensayo espectrométrico para varillas de 12 y 14 mm de diámetro, realizado por NOVACERO S.A. se muestran en el ANEXO 1.

Los resultados obtenidos, muestran un porcentaje de carbono de entre el 0,289%C y 0,305%C, estos valores se encuentran dentro del límite máximo recomendado (0,33%C) por las normas ecuatorianas INEN 0102:2003-3R y NTE INEN 2167:2003-1R. Los porcentajes obtenidos para el manganeso, fósforo, azufre y silicio;

también se encuentra dentro de los límites máximo recomendados por la norma. La Tabla 2.2 mostrada en el Capítulo II muestra los valores de porcentajes máximos para el carbono, manganeso, fósforo, azufre y silicio.

3.4. ENSAYOS METALOGRAFICOS [14].

La metalografía consiste en el estudio de la constitución y la estructura de los metales y sus aleaciones.

La forma más sencilla de hacerlo es examinando las superficies metálicas a simple vista. Este examen se denomina macrográfico y de ellos se extraen datos sobre los procesos sufridos por el material, es decir, se puede determinar si el material fue trefilado, laminado, forjado, etc., además de comprobar la distribución de defectos como grietas superficiales, de forja, rechupes, partes soldadas, etc.

El examen micrográfico, es una técnica más avanzada y se basa en la ampliación de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio) para observar las características estructurales microscópicas (microestructura). Este tipo de estudio permite realizar el estudio y evaluar el proceso térmico al que ha sido sometido un metal, debido a que los mismos ponen en evidencia la estructura o los cambios estructurales que sufren en dicho proceso.

3.4.1. PREPARACIÓN DE MUESTRAS METALOGRAFICAS.

La preparación de las muestras metalográfica, para los ensayos metalográficos, se la realiza según lo establece la norma ASTM E3.

El principal objetivo de los ensayos metalográficos es revelar los componentes y la estructura de los metales y sus aleaciones por medio del microscopio óptico. En casos especiales, el objetivo del ensayo puede requerir el desarrollo de menos detalles que en otros casos, pero, en casi todas las condiciones, la adecuada selección y preparación de la muestra es de gran importancia [15].

A continuación se presenta el procedimiento a seguir para la preparación de muestras metalográficas según norma ASTM E3.

1. **Selección de muestras metalográficas:** la selección de muestras metalográficas para el ensayo metalográfico es extremadamente importante. Las muestras deben ser representativas del material que se está estudiando. La intención o el propósito del ensayo metalográfico suele dictar la ubicación de las muestras a estudiar.

Después de haber establecido la ubicación de la muestra metalográfica a estudiar, el tipo de sección que se examine deberá ser decidido. Para una fundición, una sección de corte perpendicular a la superficie mostrará las variaciones en la estructura desde el exterior hacia el interior de la fundición. Para metales trabajados en caliente o en frío, deben ser estudiados tanto la sección transversal como longitudinal. Investigaciones especiales, en ocasiones, requieren muestras con superficies preparadas en paralelo a la superficie original del producto.

Las secciones transversales tomadas perpendicularmente al eje axial del material son más adecuadas para revelar la siguiente información:

- Las variaciones en la estructura del centro a la superficie.
- Distribución de impurezas no metálicas a través de la sección.
- Descarburación en la superficie de un material ferroso. (ASTM E1077)
- Profundidad de imperfecciones superficiales.
- Profundidad de la corrosión.
- Espesor de los recubrimientos de protección.
- Estructura de la capa protectora.

Secciones longitudinales paralelos a los ejes de los materiales son más adecuados para revelar la siguiente información:

- Inclusiones contenidas en el acero (ASTM E45).
- Grado de deformación plástica, mostrado por la distorsión del grano.
- La presencia o ausencia de bandas en la estructura (ASTM E1268).
- La calidad alcanzada sin ningún tratamiento térmico.

2. **Tamaño de muestras metalográficas:** Las muestras que van a ser pulidas para el ensayo metalográfico, en general deben ser de 12 a 25 mm² (0,5 a 1,0 pulgadas cuadradas), o aproximadamente de 12 a 25 mm de diámetro si el

material es redondo. La altura de la muestra no debe ser mayor de lo necesario para un cómodo manejo durante el pulido.

No siempre es posible obtener ejemplares de las dimensiones indicadas. Cuando el material a ser examinado es menor que las dimensiones ideales, por ejemplo en el pulido de alambres, tiras, y otros artículos pequeños, es necesario montar las muestras, debido a su tamaño y forma.

3. **Corte de muestras metalográficas:** En el proceso de corte de muestras metalográficas, debe ponerse especial cuidado para minimizar la alteración de la estructura del metal. A continuación se presentan tres tipos comunes de corte:

- Cizallado: ya sea a mano o a máquina con lubricación; es fácil y rápida. Puede ser utilizado en todos los materiales con dureza por debajo de 35 HRC.
- Un disco abrasivo de corte producirá una superficie a menudo lisa, lista para un desbastado fino. La elección del disco de corte, lubricantes, condiciones de refrigeración, y el grado de dureza del metal a cortar va a influir en la calidad del corte. Una mala elección en las condiciones de corte puede sobrecalentar la muestra, produciendo una alteración de la microestructura. Los discos abrasivos de óxido de aluminio son preferidos para los metales ferrosos y los discos de carburo de silicio son los preferidos para las aleaciones de metales no ferrosos. Los discos abrasivos de corte son esenciales para el corte de metales con durezas de alrededor de 35 HRC. Para los materiales extremadamente duros: metálicos y cerámicos, el corte puede ser más efectivo usando discos de corte impregnados de diamante. Las instrucciones del fabricante se deben seguir en cuanto a la selección de los discos y las velocidades.
- El corte por flama altera por completo la estructura del metal en el borde del corte. Si el corte por flama es necesario para extraer la muestra, esta se debería cortar lo suficientemente grande para que se pueda volver a cortar al tamaño adecuado con cualquier otro método que no altere sustancialmente la estructura.

Otros métodos de corte son permitidos siempre y cuando no alteren la microestructura en el plano de pulido. Todas las operaciones de corte pueden

producir cierta profundidad de daños, que tendrán que ser removidos en los pasos de preparación posteriores.

4. **Limpieza:** Todas las grasas y aceites en la muestra deben ser eliminados por algún disolvente orgánico adecuado. Si no se limpia a fondo puede provocar que las resinas moldeables montadas en frío se adhieran a la superficie de la muestra. Cualquier cubierta metálica que interfiera con la subsecuente capa de base metálica deberá ser removida antes del pulido.

La presencia de corrosión u oxidación en la muestra, debe ser eliminada.

5. **Montaje de muestras:** Hay muchos casos en los que será ventajoso montar las muestras antes del esmerilado y pulido. El montaje se realizará generalmente en piezas pequeñas, débiles, y en aquellas que presenten formas irregulares.

Las muestras pueden ser montadas mecánicamente, en resinas plásticas, o en una combinación de las dos.

6. **Laminado de muestras:** Las muestras en las que se quiere detectar fracturas o aquellas donde es necesario examinar los bordes, son usualmente laminados para obtener buena retención del borde. El laminado puede hacerse electrolíticamente o con soluciones electrolíticas. Estas muestras son invariablemente colocadas previas a los procedimientos de pulido.

Pueden depositarse cromo, cobre, hierro, níquel, oro, plata y zinc electrolíticamente aunque se usan cobre y níquel predominantemente en los laboratorios metalúrgicos.

Limpie la superficie de la muestra completamente antes de laminar para asegurar una buena adherencia del laminado. Normalmente se laminan electrolíticamente los metales ferrosos con níquel o cobre y los metales no ferrosos con plata.

7. **Lijado y pulido:** Generalmente pueden prepararse muchos metales y aleaciones usando una secuencia similar de lijado y pulido. Las aleaciones duras pueden requerir una presión mayor que las aleaciones suaves. La diferencia mayor, sin embargo se dará en el pulido final.

- Lijado: consiste en dos fases: áspera y fina.

Lijado áspero: lija gruesa (número 180) se usa para lograr lo siguiente:

- Rectificar una irregularidad o daño de la superficie cortada.
- Quitar la desproporcionalidad y otras condiciones de la superficie antes del montaje.

- Quitar cantidades sustanciales del material de la muestra para alcanzar un plano deseado para pulir.
- Quitar de manera rápida el montaje plástico, nivelan la superficie del montaje y se bisela los bordes del montaje antes del lijado fino.

Lijado fino: la muestra se lija consecutivamente en papeles abrasivos más finos usando agua como lubricante y para eliminar residuos del lijado. La muestra debe limpiarse entre los sucesivos papeles para prevenir sobrantes de abrasivo más duro.

El lijado debe empezar con el papel de numeración más bajo capaz de alisar la muestra y quitar los efectos de operaciones anteriores. El próximo papel debe quitar los efectos del papel anterior en un tiempo corto. Una sucesión típica de papeles podría ser 240, 320, 400 y 600. Dependiendo de la suavidad de la superficie de la muestra, algunas de las calidades del papel más gruesas pueden saltarse.

En el método tradicional sostenido por la mano, la muestra se gira 90° entre los papeles, para eliminar las marcas anteriores de rayaduras. La muestra también debe moverse de un lado a otro por el papel para prevenir rayaduras en la muestra. Al final del lijado en cada papel, la superficie de la muestra y su montaje, en cualquiera de los dos, debe ser llano con un conjunto de lijado unidireccional.

Después de realizado el lijado, la muestra debe limpiarse completamente.

- Pulido: La última aproximación a una superficie plana libre de rayaduras se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño especial cargado con partículas abrasivas cuidadosamente seleccionadas en su tamaño. Existe gran disponibilidad de abrasivos para efectuar el último pulido. En tanto que muchas harán un trabajo satisfactorio, parece haber preferencia por la forma gamma del óxido de aluminio para pulir materiales ferrosos y de los basados en cobre, y óxido de cerio para pulir aluminio, magnesio y sus aleaciones. Otros abrasivos para pulido final que se empleen a menudo son la pasta de diamante, óxido de cromo y óxido de magnesio. La selección de un paño para pulir depende del

material que vaya a pulirse y el propósito del estudio metalográfico. Se pueden encontrar paños de lanilla o pelillo variable, desde aquellos que no tienen pelillo (como la seda) hasta aquellos de pelillo intermedio (como paño ancho, paño de billar y lonilla) además de aquellos de pelillo profundo (como el terciopelo). También se pueden encontrar paños sintéticos para pulir con fines de pulido general, de los cuales el Gamal y Micropaño son los que se utilizan más ampliamente. Una muestra pulida adecuadamente mostrará únicamente las inclusiones no metálicas; además estará libre de rayaduras.

8. **Ataque:** El propósito del ataque químico es hacer visibles las características estructurales del metal o aleación. El proceso debe ser tal que queden claramente diferenciadas las partes de la microestructura. Esto se logra mediante un reactivo apropiado que somete a la superficie pulida a una acción química [10].

En las aleaciones compuestas de dos o más fases, las componentes se revelan durante la acción química, al atacar preferencialmente, el reactivo, a una o más de estas constituyentes debido a la diferencia en composición química de las fases (Figura 3.10a). En las aleaciones uniformes de una sola fase o metales puros, se obtiene contraste y las fronteras de grano se hacen visibles debido a las diferencias en la rapidez a que los diversos granos son atacados por el reactivo (Figura 3.10b) [10].

La selección del reactivo de ataque está determinada por el metal o aleación y la estructura específica que se desea ver. La Tabla 3.7, enumera algunos de los reactivos de ataque comunes para acero.

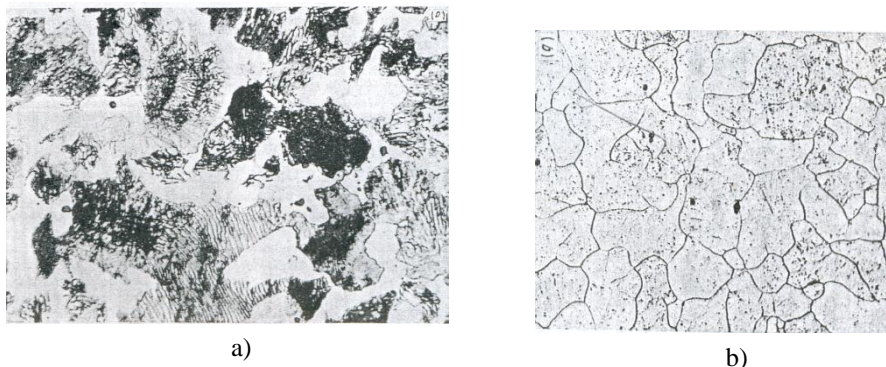


Figura 3.10: a) Fotomicrografía de la diferencia en composición química de las fases. b) Fotomicrografía de hierro puro [10]

Tabla 3.7: REACTIVOS DE ATAQUE PARA EXAMEN MICROSCÓPICO [10].

Reactivo de ataque	Composición	Usos
Ácido nítrico (nital)	Ácido nítrico blanco 1-5 ml alcohol metílico o etílico (98% o absoluto) También alcohol amílico 100ml	En aceros al carbón: a) para oscurecer perlita y dar contraste entre colonias de perlita; b) para revelar fronteras de perlita, c) para diferenciar la ferrita de la martensita.
Ácido pícrico (picral)	Ácido pícrico 4g etil o alcohol de metilo 100ml (95% o absoluto)	Para todos los grados de aceros al carbón recocidos, normalizados, templados y revenidos, esferoidizados, austenizados. Para todos los aceros de baja aleación atacados por este reactivo.
Cloruro férrico y ácido hidroclicóric	Cloruro férrico 5 g Ácido hidroclicóric 50 ml Agua 100 ml	Aceros austeníticos al níquel y aceros inoxidable.

3.4.2. INCLUSIONES NO METÁLICAS [16].

Las inclusiones no metálicas son compuestos químicos de un metal con un no metal, las cuales están presentes en el interior de aceros y aleaciones. Estas inclusiones son microscópicas ($< \sim 300\mu\text{m}$) compuestos principalmente de productos de desoxidación y posiblemente se producen cerca de la capa superficial del fondo, en la zona de sedimentación del lingote, y en la superficie superior del lingote.

Causas:

1. Inclusiones residuales no metálicas tales como óxidos, sulfuros, etc. Formados en el momento de la refinación y vertido en el lingote.
2. Mezcla de refractarios fundidos.
3. Nota: la existencia de inclusiones no metálicas es inevitable para el acero. Las inclusiones no metálicas microscópicas no son generalmente consideradas como defectos.

Clasificación de inclusiones:

Las inclusiones se pueden clasificar de distintas maneras, por ejemplo: por su origen, su composición o su tamaño. Ver Tabla 3.8

Tabla 3.8: CLASIFICACIÓN DE LAS INCLUSIONES

Origen	Composición	Tamaño
Endógenas	Óxidos	Microinclusiones
Exógenas	Sulfuros	Macroinclusiones

Por su origen: En los puntos anteriores se menciona la formación de inclusiones en el acero como resultado de la desoxidación y de la precipitación de sulfuros. Estas inclusiones, que son originadas internamente en el acero, son conocidas como *endógenas*.

Además de las anteriores, también están presentes en el acero inclusiones *exógenas*. Suelen tener mayor dimensiones que las inclusiones endógenas y, por lo tanto, son más perjudiciales. Las fuentes de las inclusiones exógenas son muy variadas destacándose:

- Reoxidación del acero: producida cuando el acero se pone en contacto con un agente oxidante, principalmente el aire atmosférico o una escoria con alto contenido de FeO.
- Emulsificación de la escoria: un agitado muy profundo o baja viscosidad de la escoria puede provocar que partículas de escoria sean atrapadas en el acero.
- Desgaste refractarios: los movimientos del acero y las altas temperaturas pueden provocar que se desprendan pequeñas partículas de refractario que pasan al acero.

Por su composición: Las inclusiones producto de la desoxidación, modificadas posteriormente, están compuestas por distintas fases de un conjunto de óxidos. En el caso de aceros calmados al aluminio tratados con calcio, estos óxidos tienen porcentajes variables de Al_2O_3 , CaO y MgO. Estos porcentajes definen las propiedades de las inclusiones que componen y varían durante el proceso de elaboración del acero.

Además de estos óxidos también se encuentran presentes en el acero sulfuros, de Ca y de Mn. Su grado de nocividad depende de la aplicación a la que será sometido el producto final.

Por su tamaño: Finalmente, las inclusiones se pueden clasificar según su tamaño, en macro y microinclusiones. La frontera que las separa es algo arbitraria y ha venido variando en el tiempo: disminuyendo a medida que los requerimientos para los aceros son más exigentes.

Las microinclusiones son las más abundantes y suelen estar distribuidas uniformemente. Debido a su menor tamaño, son menos nocivas que las macroinclusiones con respecto a las propiedades del producto final.

Las macroinclusiones pueden originar discontinuidades importantes en el acero actuando como concentradores de tensiones. Esto las hace responsables de fallas y defectos en los productos finales. El tamaño crítico a partir del cuál estas inclusiones afectan las propiedades depende directamente de la aplicación del producto final y las sollicitaciones a las que va a estar sometido.

3.4.2.1. ENSAYO DE INCLUSIONES.

Los métodos del ensayo para determinar el contenido de inclusiones no metálicas en el acero mencionadas en la norma ASTM E 45-97 son, métodos macroscópicos que incluyen macroataque, fractura, el paso hacia abajo, y pruebas de partículas magnéticas; métodos microscópicos incluyen cinco sistemas generalmente aceptados del examen. En estos métodos microscópicos, las inclusiones se asignan a una categoría basada en las semejanzas en la morfología, y no necesariamente en su identidad química [17].

Los diferentes métodos que menciona la norma no deben ser tomados como la definición o el establecimiento de límites de aceptabilidad de cualquier grado de acero.

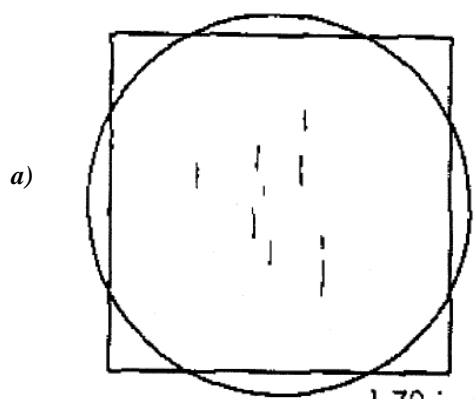
Las inclusiones se caracterizan por su tamaño, forma, concentración y distribución en lugar de la composición química.

El método usado para la determinación de inclusiones presentes en las varillas de construcción de 12 y 14 mm de diámetro fue el método microscópico A.

Los métodos microscópicos se utilizan para caracterizar el tamaño, la distribución, el número y tipo de inclusiones en una pulida superficie de la muestra. Esto se puede hacer mediante el examen de la muestra con un microscopio de luz.



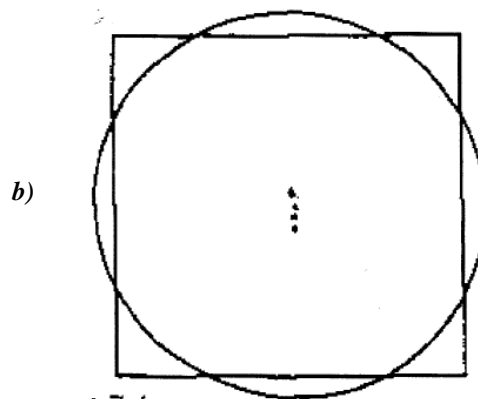
Ampliación 100X



Inclusión tipo sulfuro A2



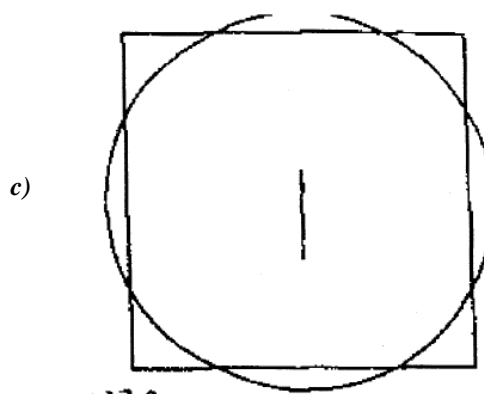
Ampliación 100X



Inclusión tipo alúmina B1



Ampliación 100X



Inclusión tipo Silicato C1½

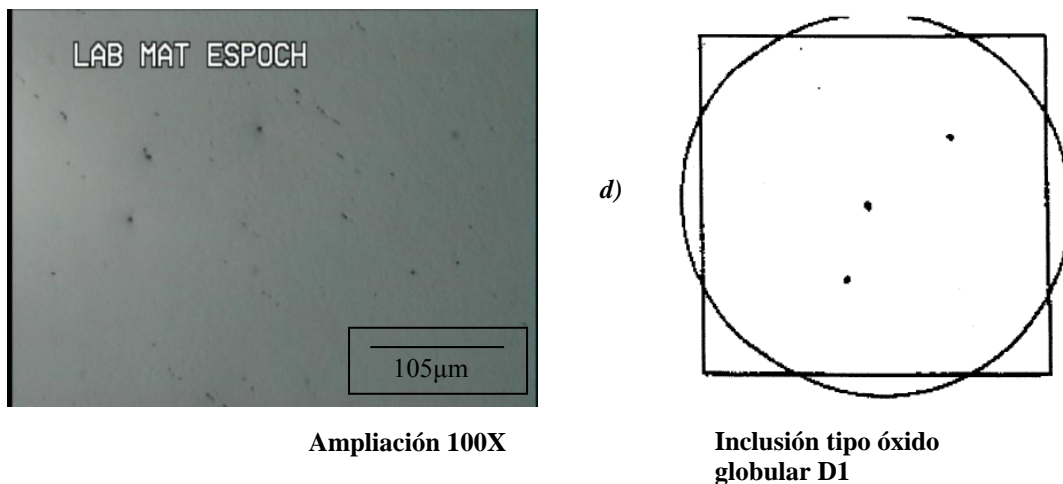


Figura 3.11: Imágenes de inclusiones; en la parte izquierda se indican microfotografías de inclusiones en varillas de 12 y 14mm de diámetro; en la parte derecha se indica imágenes tomadas de la norma ASTM E45-95. *a)* Sulfuro A2 en varilla de 14mm de diámetro. *b)* Alúmina B1 en varilla de 12mm. *c)* Silicato C1½ en varilla de 12mm. *d)* Óxido globular D1 en varilla de 12mm.

3.4.2.2. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE INCLUSIONES [17].

El ensayo de inclusiones se realizó según la norma ASTM E 45-97, por el método microscópico A, el cual las clasifica en 4 tipos: *Sulfuros (A)*, *Alúmina (B)*, *Silicatos (C)* y *Óxidos Globulares (D)*.

El procedimiento que se siguió para determinar las inclusiones no metálicas en probetas de varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro, es el que se muestra a continuación.

1. Obtener mediante corte, una superficie (160 mm^2) paralela al eje de laminación.
2. Preparar la probeta siguiendo los pasos de la norma ASTM E3.
3. Observar en el microscopio metalográfico, mediante barrido de total la superficie zonas de $0,5 \text{ mm}^2$.
4. Caracterizar las inclusiones.

En la Figura 3.11 se representan los 4 tipos de inclusiones. En la parte izquierda se muestran microfotografías de inclusiones en varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro, en la parte derecha se muestran imágenes de inclusiones obtenidas de la norma ASTM E45-97.

3.4.2.3. RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ENSAYO DE INCLUSIONES.

A continuación se presentan las microfotografías de inclusiones tomadas de varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro, las microfotografías fueron tomadas a una ampliación de 100x y sin ataque químico.

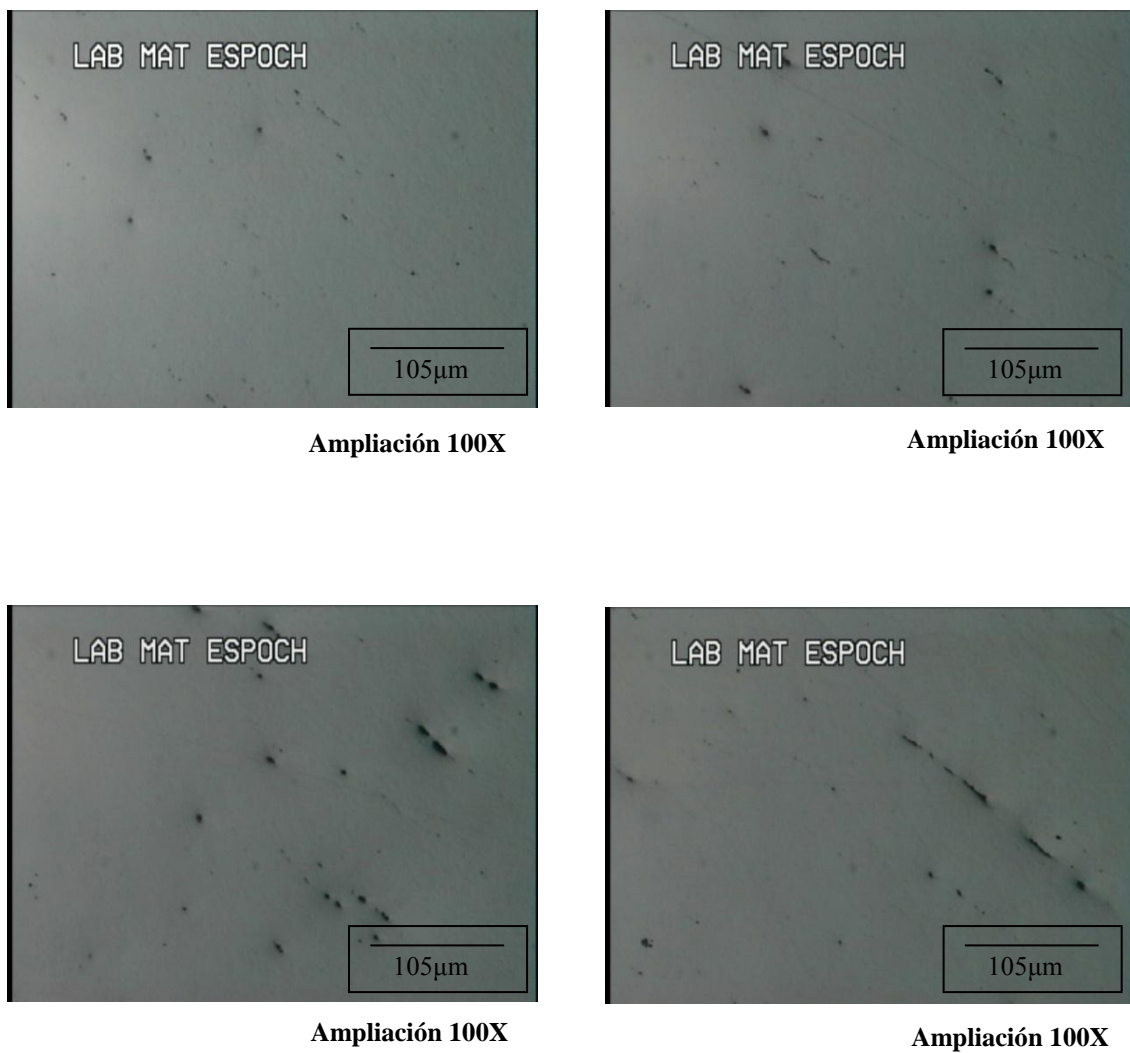


Figura 3.12: Inclusiones en varilla de 12mm de diámetro

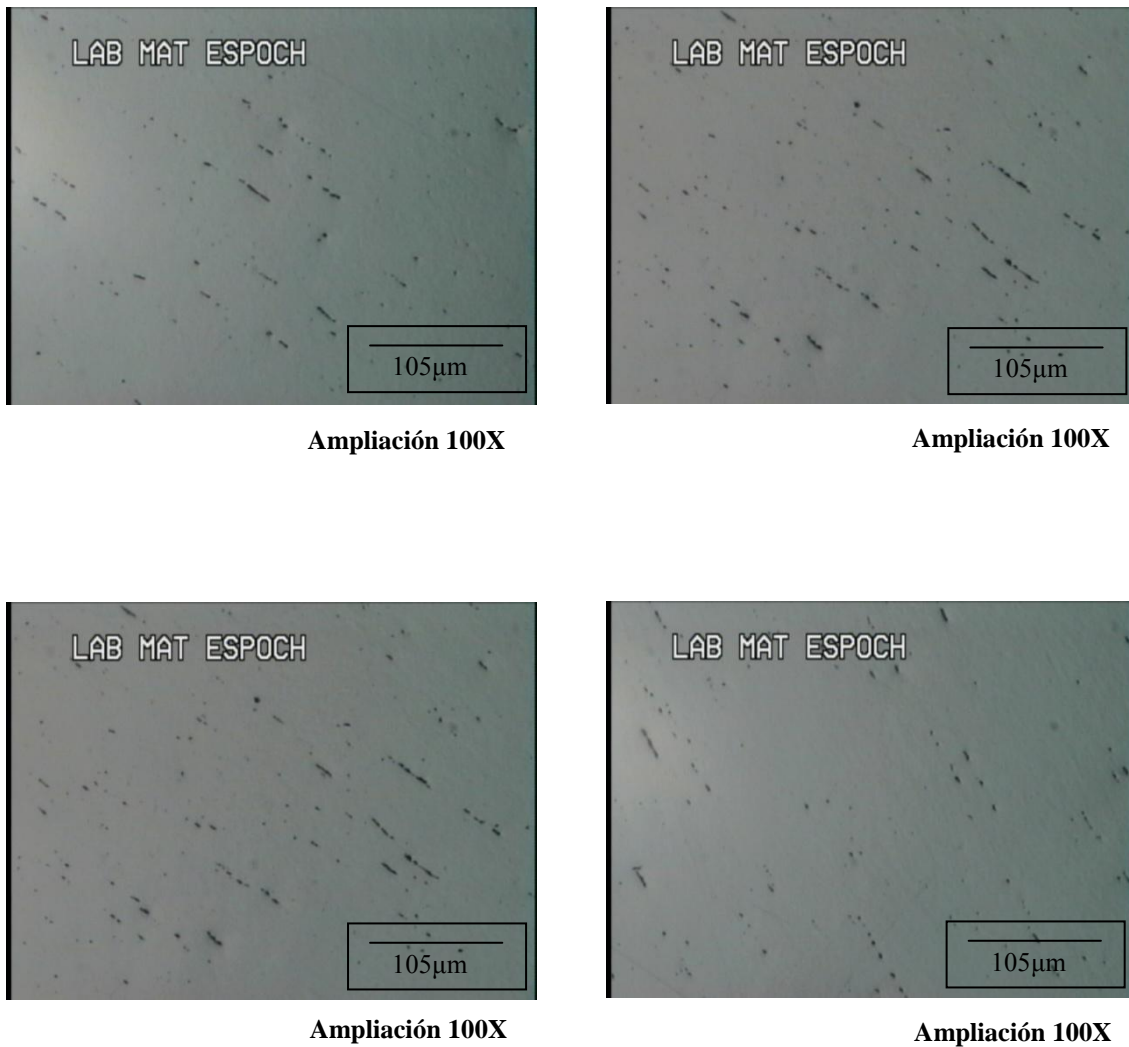


Figura 3.13: Inclusiones en varilla de 14mm de diámetro

3.4.3. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO [10].

Para determinar experimentalmente el tamaño de grano de una microestructura la ASTM recomienda tres métodos:

1. Método de comparación.
2. Método de intercepción (o de Heys).
3. Método planimétrico (o de Jeffries).

3.4.3.1. MÉTODO DE COMPARACIÓN [10].

La muestra luego de ser preparada mediante la norma ASTM E3 (corte, pulido grueso, pulido fino y ataque químico) se analiza la imagen de la microestructura a una ampliación de 100x, o una fotomicrografía de la estructura a igual ampliación, ésta se compara contra una serie de patrones estándar clasificados, que cubren los diversos tamaños de grano (ASTM E112-63).

Mediante el método de prueba y error se encuentra un patrón que coincide con la muestra en estudio y entonces se designa el tamaño de grano del metal por el número correspondiente al número índice del patrón coincidente. Los metales que muestran un tamaño de grano mixto se tratan de manera semejante, en cuyo caso se acostumbra especificar el tamaño de grano en términos de dos números que denotan el porcentaje aproximado de cada tamaño presente.

El método de comparación es más conveniente y bastante preciso en muestras de granos de ejes iguales. El número de tamaño de grano ASTM n puede obtenerse con:

$$N = 2^{n-1} \quad (3.3)$$

donde,

N = número de granos observados / pulg² a una ampliación de 100x.

n = número de tamaño de grano.

Tabla 3.9: INTERVALOS DE TAMAÑO DE GRANO DE LA ASTM, $N=2^{n-1}$.

NÚMERO DEL TAMAÑO DE GRANO	GRANOS POR PULG ² A 100x	
	MEDIA	INTERVALO
$n = 1$	$N = 1$	-----
2	2	1.5-3
3	4	3-6
4	8	6-12
5	16	12-24
6	32	24-48
7	64	48-96
8	128	96-192
9	256	192-384
10	512	384-768

3.4.3.2. MÉTODO DE INTERCEPCIÓN (O DE HEYN) [10].

El tamaño de grano se estima contando por medio de una pantalla dividida de vidrio, o por fotomicrografía o sobre la propia muestra, el número de granos intersecados por una o más líneas rectas. Los granos tocados por el extremo de una línea se cuentan sólo como medios granos. Las cuentas se hacen por lo menos en tres posiciones distintas para lograr un promedio razonable. La longitud de la línea en milímetros, dividida entre el número promedio de granos intersecados por ella, da la longitud de intercepción promedio o “diámetro” de grano.

El método de intercepción se recomienda especialmente para granos que no sean de ejes iguales.

3.4.3.3. MÉTODO PLANIMÉTRICO (O DE JEFFRIES) [10].

Un círculo o un rectángulo de área conocida (generalmente de 5000 mm^2) se inscribe en una fotomicrografía o en la pantalla dividida de un vidrio. Se debe escoger una ampliación tal que dé por lo menos 50 granos en el campo o área que va a contarse. La suma de todos los granos incluidos dentro del área conocida más la mitad del número de granos intersecados por la circunferencia del área, da el número total o equivalente de granos enteros dentro del área.

Si se conoce la ampliación de la muestra, se puede determinar el número de granos por milímetro cuadrado, multiplicando para ello el número equivalente de granos enteros por el factor de ampliación correspondiente (multiplicador de Jeffries) f dado en la Tabla 3.10.

Al emplear cualquier método para determinar el tamaño de grano, es importante darse cuenta de que la estimación no es una medición correcta. Una estructura metálica es una mezcla de cristales tridimensionales de tamaños y formas variables. Aun si todos los cristales fueran idénticos en tamaño y forma, las secciones transversales de los granos de la superficie pulida mostrarían áreas variables, dependiendo de dónde el plano de la superficie cortara cada cristal individual. Por tanto, ningún campo de observación puede ser exactamente igual.

Tabla 3.10: RELACIÓN ENTRE LA AMPLIACIÓN UTILIZADA Y EL MULTIPLICADOR DE JEFFRIES PARA UN ÁREA DE 5000 mm²

Amplificación Utilizada	f
1	0,002
25	0,125
50	0,5
75	1,125
100	2,0
200	8,0
300	18,0
500	50,0
1000	200,0

3.4.3.4. PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO MEDIANTE EL MÉTODO DE INTERCEPCIÓN [18].

1. Preparar metalográficamente en base a la norma ASTM E3 la superficie transversal del material.
2. Atacar químicamente por inmersión en Nital 2% por 30 segundos.
3. Observar la microestructura y fotografiar los resultados para el posterior análisis.
4. Dibujar por lo menos 3 líneas verticales y horizontales en la fotomicrografía para contar el número de granos que intersecan a la línea.
5. Realizar un promedio del número de granos intersecados en las líneas.
6. Determinar el tamaño de grano austenítico mediante la Ecuación 3.4

$$G = 10 - 6,6439 \log \left(\frac{E}{10} \right) \quad (3.4)$$

donde,

G = Tamaño de grano ASTM austenítico.

$$E = \frac{\text{ancho o altura de la fotomicrografía}}{\text{promedio de granos intersecados por las líneas horizontales o verticales}}$$

3.4.3.5. RESULTADOS DEL TAMAÑO DE GRANO.

La determinación del tamaño de grano se realizó según norma ASTM E112, por el método de intercepción (o de Heys). A continuación se presenta un ejemplo del procedimiento empleado para la determinación del tamaño de grano.

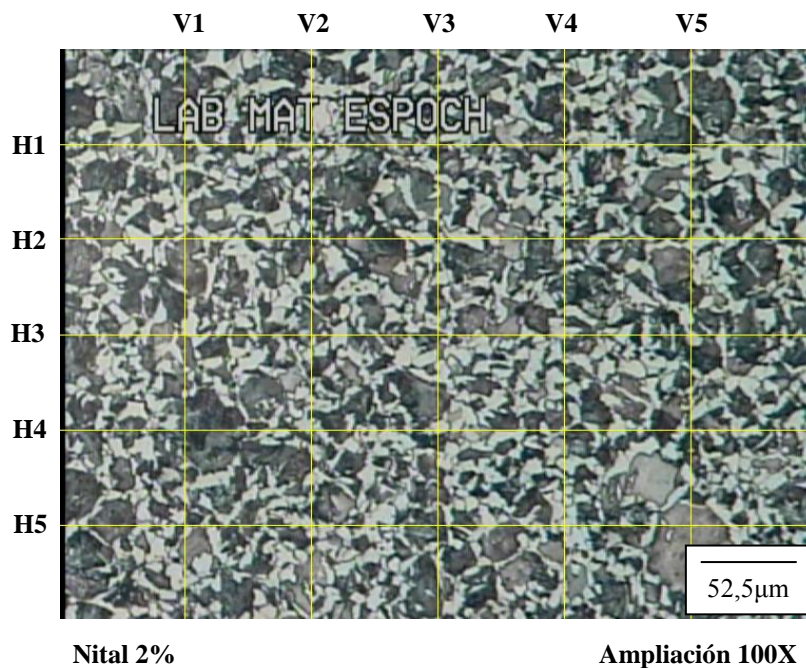


Figura 3.14: Microestructura de varilla corrugada de 12mm de diámetro atacada con nital al 2%

Tabla 3.11: NÚMERO DE GRANOS INTERSECADOS VC12Fa

Línea	Verticales					Horizontales				
	V1	V2	V3	V4	V5	H1	H2	H3	H4	H5
# Granos	21	28	27	26	20	39	28	35	28	33
Promedio	24,4					32,6				

Cálculo del tamaño de grano:

Para realizar el cálculo del tamaño de grano, se utilizó la Ecuación 3.4, tanto para líneas horizontales, como para líneas verticales.

Líneas horizontales:

$$E = \frac{420\mu m}{32,6 \text{ granos}} = 12,88\mu m$$

$$G = 10 - 6,6439 \log \left(\frac{E}{10} \right)$$

$$G_{HORIZONTAL} = 9,2 \approx 9$$

Líneas verticales:

$$E = \frac{420\mu m}{24,4 \text{ granos}} * \left(\frac{3}{4} \right) = 12,9\mu m$$

$$G = 10 - 6,6439 \log \left(\frac{E}{10} \right)$$

$$G_{VERTICAL} = 9,3 \approx 9$$

Con los cálculos realizados, se puede concluir que la muestra de varilla corrugada de 12mm de diámetro en condiciones de fábrica posee un tamaño de grano ASTM 9.

En la Tabla 3.12, se muestran los resultados de tamaños de grano para varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro en condición de suministro (Fa) y tratadas térmicamente (transformaciones de fase) a diferentes velocidades de enfriamiento.

Tabla 3.12: TAMAÑOS DE GRANO PRESENTES EN VARILLAS CORRUGADAS DE 12 Y 14 mm DE DIÁMETRO ENFRIADAS A DISTINTAS VELOCIDADES

Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=12mm	Tamaño de grano ASTM	Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=14mm	Tamaño de grano ASTM
1,1287	9	0,9843	8
1,2920	9,5	1,1062	9,5
1,4204	9	-----	9
2,1368	9	1,8939	9
2,9762	9,5	2,6316	9

En color gris se marcan las varillas corrugadas de 12 y 14mm de diámetro en condiciones de suministro.

3.4.4. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE FASES.

Como se indicó en la sección 3.3, el porcentaje de carbono y carbono equivalente; para varillas corrugadas de 12 mm de diámetro corresponde al 0,305%C y 0,562% de carbono equivalente y para varillas de 14 mm de diámetro 0,291%C y 0,559% de carbono equivalente.

Las microestructuras o fases típicas presentes en aceros hipoeutectoides son ferrita y perlita. Debido a las distintas velocidades de enfriamiento a las cuales fueron expuestas las varillas tanto de 12 como de 14 mm de diámetro, los porcentajes y morfologías de la ferrita y perlita serán diferentes para cada velocidad de enfriamiento.

3.4.4.1. PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE FASES.

El procedimiento que se siguió para la determinación del porcentaje de fases es el que se menciona a continuación.

1. Preparación de las probetas siguiendo los pasos de la norma ASTM E 3.
2. Observar y fotografiar las microestructuras presentes en las probetas.
3. Introducir las fotografías al programa de análisis de imagen, ScopePhoto.
4. Una vez introducida la fotomicrografía en el programa, se selecciona la opción “process” la misma que se encuentra en la barra de herramientas y luego se selecciona “segmentation”
5. Aparecerá un cuadro de diálogo en el cuál se mostrará dos curvas, se debe seleccionar mediante una línea vertical la mitad de las dos curvas.
6. Luego de aquello se tendrá el valor del porcentaje en la parte superior de la pantalla (cabe recalcar que ese valor es un valor que se debe transformar a porcentaje).

A continuación se presenta un ejemplo para la determinación del porcentaje de fases presentes en las probetas de 12 mm de diámetro en condición de suministro. La morfología de los granos de la varilla corrugada de 12mm de diámetro en condiciones de fábrica es *ferrita alotriomórfica*.

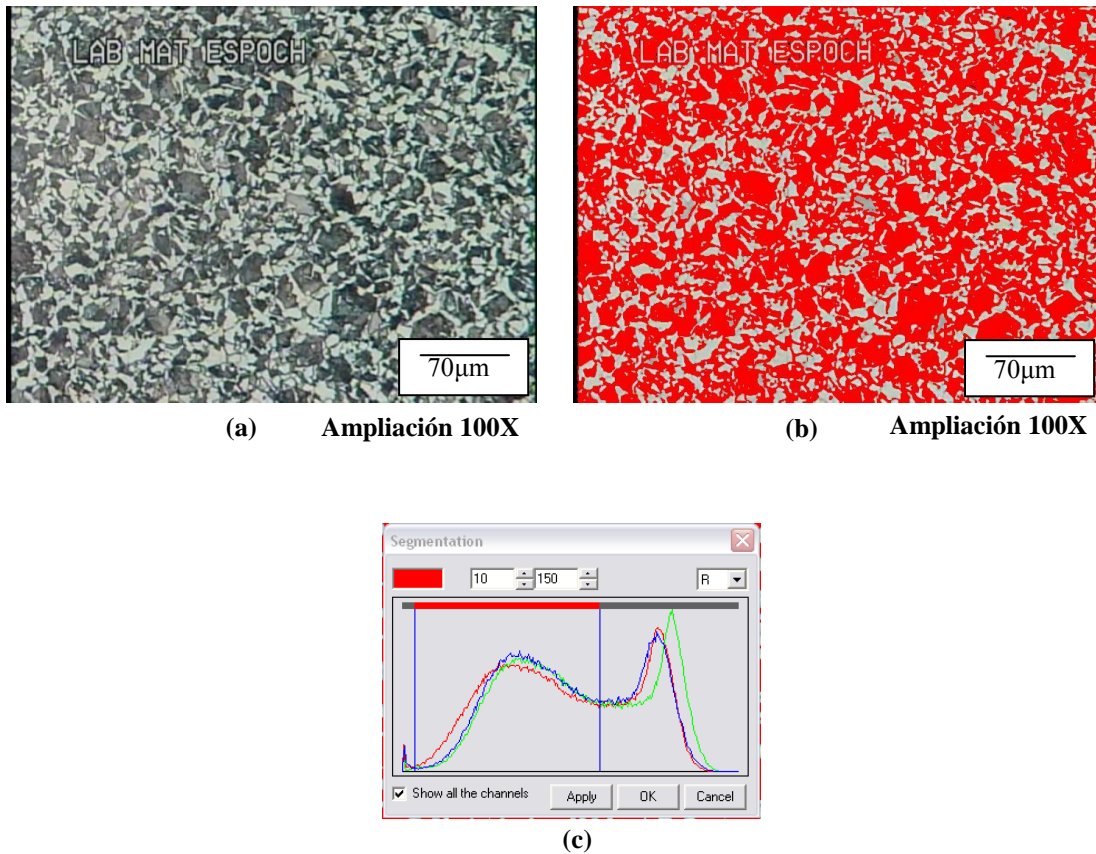


Figura 3.15: (a) Microfotografía de la varilla corrugada de 12mm de diámetro en condición de suministro, tomada a 100X y atacada con nital al 2%. (b) Microfotografía analizada en el programa ScopePhoto, áreas rojas perlita y áreas blancas ferrita. (c) Imagen del programa ScopePhoto donde se muestra las curvas que nos indican el porcentaje de áreas rojas (150 de 255)

Con ayuda de programa ScopePhoto, se puede determinar el porcentaje de perlita y ferrita, la misma que se calcula de la siguiente manera:

$$\%P = \frac{150}{255} * 100\%$$

$$\%P = 58,82\%$$

$$\%\alpha = 41,18\%$$

3.4.4.2. RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE FASES.

La tabla 3.13 muestra los porcentajes de fases presentes en las distintas probetas de varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro, en condiciones de suministro y tratadas térmicamente.

Tabla 3.13: PORCENTAJES DE FASES PRESENTES EN VARILLAS DE 12 Y 14 mm DE DIÁMETRO.

Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=12mm	% Ferrita	% Perlita	Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=14mm	% Ferrita	% Perlita
1,1287	56,86	43,14	0,9843	59,90	40,10
1,2920	47,06	52,94	1,1062	51,18	48,82
1,4204	41,18	58,82	-----	44,78	55,22
2,1368	26,66	73,33	1,8939	28,92	71,08
2,9762	18,04	81,96	2,6316	20	80

En color gris se marcan las varillas corrugadas de 12 y 14mm de diámetro en condiciones de suministro.

3.5. ENSAYOS MECÁNICOS.

Cuando un técnico proyecta una estructura metálica, diseña una herramienta o una máquina, define las calidades y prestaciones que tienen que tener los materiales constituyentes. Como hay muchos tipos de aceros diferentes y, además, se pueden variar sus prestaciones con tratamientos térmicos, se establecen una serie de ensayos mecánicos para verificar principalmente la dureza superficial, la resistencia a los diferentes esfuerzos que pueda estar sometido, el grado de acabado del mecanizado o la presencia de grietas internas en el material.

Las normas ecuatorianas NTE INEN 0102:2003-3R y NTE INEN 2167:2003-1R, establecen los requisitos que deben cumplir las varillas con resaltes de acero al carbono laminadas en caliente para utilizarse en hormigón armado. Las especificaciones mecánicas de las varillas con resaltes para hormigón armado se muestran en la Tabla 2.3. La misma que especifica los requerimientos de la resistencia a la tracción.

Las normas ecuatorianas no mencionan ningún requerimiento para la dureza de las varillas con resaltes; sin embargo se utilizará la norma ASTM E10 para realizar el ensayo de dureza Brinell.

3.5.1. DUREZA [14].

La dureza es una medida de la resistencia de un material a la deformación permanente (plástica) en su superficie. La dureza de un metal se mide forzando con un penetrador sobre su superficie.

El material del penetrador, que es usualmente una esfera, pirámide o cono; está hecho de un material mucho más duro que el material bajo ensayo. El acero endurecido, el carburo de tungsteno y el diamante son los materiales comúnmente utilizados como penetradores.

Para la mayoría de los ensayos de dureza estándar se aplica lentamente una carga conocida, presionando el penetrador a 90° en la superficie del material bajo ensayo.

Después de realizar la incisión, se retira el penetrador de la superficie. Se calcula el valor de dureza empírica o se lee en una escala analógica (o pantalla digital), que se basa en el área de la sección o en la profundidad de la impresión.

La dureza de un metal depende de la facilidad con la que se deforma plásticamente. Por ello, para un metal particular, puede determinarse empíricamente una relación entre la dureza y la resistencia.

El ensayo de dureza es mucho más simple que un ensayo de tensión y puede no llegar a ser destructivo (por ejemplo, la pequeña incisión del penetrador puede que no perjudique al uso del objeto).

Debe tenerse en cuenta que un número o valor de dureza no puede utilizarse directamente en trabajos de diseño, como se puede hacer con un valor de resistencia a la tracción, ya que los números de dureza no tienen significado intrínseco.

Recuérdese que la dureza no es una propiedad fundamental de un material, sino que está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas. El valor de dureza obtenido en una prueba determinada sirve sólo como comparación entre materiales o tratamientos térmicos.

3.5.1.1. ENSAYO DE DUREZA BRINELL.

Como se indicó anteriormente, existen muchos sistemas de medición de esta propiedad, aquí sólo se considerará el de mayor uso para aceros de bajo carbono (varillas corrugadas).

La dureza Brinell es un ensayo de utilización muy general y se la realiza en base a la norma ASTM E10.

Este ensayo se utiliza en materiales blandos (de baja dureza) y muestras delgadas. La máquina Brinell principalmente consta de una prensa hidráulica vertical de operación manual, en la cual se requiere ajustar en la parte superior una bola de acero templado de 2,5 mm de diámetro [19].

En el ensayo típico se suele utilizar una bola de acero de 2,5 milímetros de diámetro, con una fuerza de 1838 newtons. Para metales ferrosos el tiempo de presión de la bola sobre la muestra es de aproximadamente 15 segundos; el valor medido es el diámetro del casquete en la superficie del material [19].

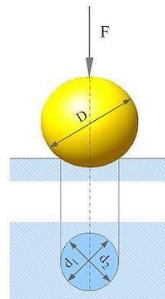


Figura 3.16: Esquema de una esfera de penetración de diámetro y carga conocida aplicada sobre la superficie de un material [19].

La fuerza necesaria para el ensayo se puede obtener con la siguiente expresión:

$$P = KD^2 \quad (3.5)$$

donde:

P: carga a utilizar medida en [kilogramos].

K: constante para cada material, que puede valer 5 (aluminio, magnesio y sus aleaciones), 10 (cobre y sus aleaciones), y 30 (aceros).

D: diámetro de la bola (indentador) medida en [mm].

Este ensayo sólo es válido para valores menores de 600 HB en el caso de utilizar la bola de acero, pues para valores superiores la bola se deforma y el ensayo no es válido [19].

Fórmula aplicada [10].

Para determinar el valor de la dureza Brinell se emplea la siguiente ecuación:

$$HB = \frac{P}{\pi D/2(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.6)$$

Donde:

HB= Dureza Brinell.

P= Carga aplicada en Kg.

D= Diámetro de la bola en mm.

d= Diámetro de la huella en mm.

3.5.1.2. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE DUREZA BRINELL.

La prueba de dureza Brinell consiste en marcar sobre la superficie de una pieza en examen una *huella permanente*, mediante una esfera de acero sobre la que se aplica, *sin choque*, una carga prefijada.

El procedimiento, de forma resumida, es el siguiente [20]:

1. Cortar las muestras de varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro, de una longitud de 15 mm.
2. Dejar las superficies cortadas paralelas entre sí.

3. Una de las superficies cortadas, se debe lijar desde la lija 180 hasta la 400 (para que la superficie en donde se va a imprimir la huella, esté lisa y libre de rayaduras).
4. Seleccionar el indentador o penetrador adecuado (para nuestro caso bola de 2,5mm de diámetro.)
5. Seleccionar la carga adecuada (1838N)
6. Colocar la muestra sobre el soporte cilíndrico del durómetro.
7. Aplicar la precarga.
8. Aplicar la carga (1838N).
9. Retirar la carga y retirar la muestra del soporte cilíndrico del durómetro.
10. Medir la huella impresa sobre la muestra, en un microscopio provisto de una escala graduada.
11. Aplicar la Ecuación 3.6 para calcular el valor de la dureza Brinell.

En la Figura 3.17 se muestra el dispositivo empleado para la medición de la dureza.



Figura 3.17: Durómetro

Datos del ensayo:

- Diámetro de la esfera: $D=2,5\text{mm}$.
- Carga aplicada: $P=1838\text{N}$
- Tiempo en carga: $t=15$ segundos

3.5.1.3. RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ENSAYO DE DUREZA.

Los resultados que se obtuvieron para el ensayo de dureza se muestran en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14: DUREZA BRINELL OBTENIDA PARA CADA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO (VARILLAS DE 12 Y 14 mm DE DIÁMETRO)

Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=12mm	Dureza Brinell (HB)	Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=14mm	Dureza Brinell (HB)
1,1287	148,47	0,9843	145,323
1,2920	159,135	1,1062	156,667
1,4204	162,145	-----	160,46
2,1368	195,61	1,8939	194,81
2,9762	214,7	2,6316	212,94

En color gris se marcan las varillas corrugadas de 12 y 14mm de diámetro en condiciones de suministro.

3.5.2. ENSAYO DE TRACCIÓN.

Después de la prueba de dureza, la prueba de tensión es la realizada más frecuentemente para determinar ciertas propiedades mecánicas. Una muestra o probeta preparada específicamente se coloca en las cabezas de la máquina de prueba y se somete a una carga axial por medio de un sistema de carga de palanca, mecánico o hidráulico.

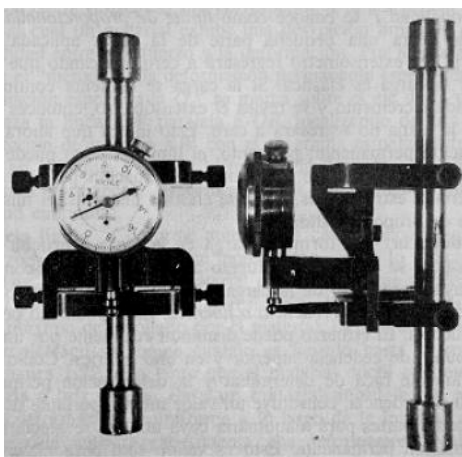


Figura 3.18: Muestra tensil fijada a un extensómetro [10].

La fuerza se indica en un disco calibrado. Si se conoce el área transversal original de la muestra, puede calcularse el esfuerzo desarrollado a cualquier carga. La deformación o alargamiento se mide en una longitud establecida, generalmente 2 pulg,

por un disco medidor llamado *extensómetro* (véase Figura 3.18). Entonces, la deformación unitaria puede determinarse dividiendo el alargamiento medido entre la longitud original marcada en la probeta. En algunos casos, puede utilizarse un medidor eléctrico de la deformación para medir la deformación total [10].

La Figura 3.19a) muestra la relación entre esfuerzo unitario S y deformación unitaria ε , encontrada experimentalmente, mediante la gráfica esfuerzo-deformación para un material dúctil y la grafica de la Figura 3.19b) para un material frágil [10].

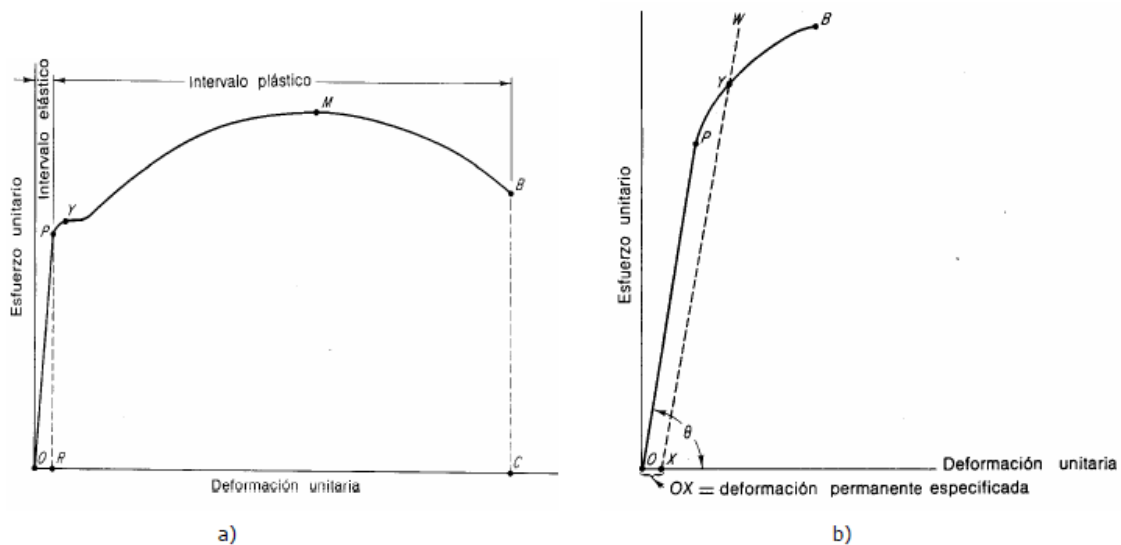


Figura 3.19: a) Gráfica esfuerzo-deformación para un acero dúctil. b) Gráfica esfuerzo-deformación para un material frágil [10].

3.5.2.1. PROPIEDADES DE TENSIÓN (O TENSIL).

Las propiedades que se pueden determinar con una prueba de tensión se explica en seguida.

Límite proporcional: En el intervalo OP de la Figura 3.19, el esfuerzo y la deformación son proporcionales entre sí. El esfuerzo en el límite del punto de proporcionalidad P se conoce como *límite de proporcionalidad* [10].

Límite elástico: El límite elástico puede definirse como el esfuerzo mínimo al que ocurre la primera deformación permanente. Para la mayoría de los materiales estructurales, el límite elástico tiene casi el mismo valor numérico que el límite de proporcionalidad [10].

Punto de cedencia o fluencia: Conforme la carga en la probeta aumenta más allá del límite elástico, se alcanza un esfuerzo al cual el material continúa deformándose sin que haya incremento de la carga. El esfuerzo en el punto Y de la Figura 3.19a) se conoce como punto de *cedencia o fluencia* (este fenómeno ocurre sólo en ciertos materiales dúctiles), en este punto la deformación permanente es pequeña; por tal motivo constituye un valor muy importante en el diseño de elementos de máquinas [10].

Para materiales frágiles el punto de cedencia se determina por el “método de la deformación permanente especificada”. En la Figura 3.19b), la deformación específica OX se marca sobre el eje de la deformación, se traza la línea XW paralela a OP, encontrando el punto Y (punto de cedencia). El valor de la deformación permanente específica es generalmente entre 0,10 y 0,20% de la longitud calibrada [10].

Resistencia límite: La resistencia límite es el esfuerzo máximo desarrollado por el material. Un material frágil se rompe cuando es llevado hasta la resistencia límite (punto B de la Figura 3.19b)), en tanto que el material dúctil continuará alargándose [10].

Resistencia a la ruptura: Para un material dúctil, hasta el punto de resistencia límite, la deformación es uniforme a lo largo de la longitud de la barra. Al esfuerzo máximo, la muestra experimenta una deformación localizada o formación de cuello y la carga disminuye conforme el área decrece. Esta elongación en forma de cuello es una deformación no uniforme y ocurre rápidamente hasta el punto en que el material falla (Figura 3.20). Para un material frágil, la resistencia límite y la resistencia de ruptura coinciden [10].

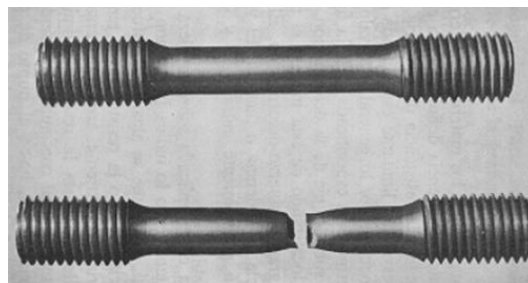


Figura 3.20: Muestra tensil antes y después de que el material falle [10].

Ductilidad: La ductilidad de un material se determinará a partir de la cantidad de deformación que le es posible soportar hasta que se fractura. Esta se determina en una prueba de tensión mediante dos mediciones:

Elongación: Se determina juntando, después de la fractura, las partes de la muestra y midiendo la distancia entre las marcas puestas en la muestra antes de la prueba,

$$\text{Elongación (por ciento)} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 \quad (3.7)$$

donde:

L_f = longitud de la medida final,

L_0 = longitud de la medida original, generalmente 2 pulg.

Al reportar el porcentaje de elongación, debe especificarse la longitud de la medida original, ya que el porcentaje de elongación variará de acuerdo con la longitud original.

Reducción en área: Esta también se determina a partir de las mitades rotas de la muestra bajo la tensión, midiendo para ello el área transversal mínima y con la fórmula:

$$\text{Reducción en área (porcentaje)} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad (3.8)$$

donde:

A_0 = área transversal original

A_f = área transversal final

Módulo de elasticidad o módulo de Young: El módulo de elasticidad o módulo de Young se determina dividiendo el esfuerzo para la deformación, en la zona OP de la Figura 3.19. El módulo de elasticidad por consiguiente es la constante de proporcionalidad de la recta OP.

El módulo de elasticidad, indicación de la rigidez de un material, se mide en libras por pulgada cuadrada; por ejemplo, el módulo de elasticidad del acero es 30 millones de lb/pulg² aproximadamente, en tanto que el del aluminio es 10 millones de

lb/pulg². Por ende, el acero es aproximadamente tres veces más rígido que el aluminio [10].

3.5.2.2. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE TRACCIÓN.

El ensayo de tracción se lo realizará en base a la norma ASTM E8.

Un resumen de este procedimiento es el siguiente [21]:

1. Se prepara las probetas con las dimensiones establecidas por la norma.
2. Desde el centro de las probetas se mide 1 pulg hacia ambos extremos, obteniendo la longitud de ensayo (2 pulg).
3. Se realizan marcas en estos puntos con un punzón de manera que se formen unos agujeros pequeños.
4. De los dos extremos de las probetas se mide 8 cm hacia el centro de la probeta y se los señala con tiza o marcador. (en estas secciones señaladas se sujetarán las mordazas).
5. Luego, se coloca la probeta en las mordazas de la máquina universal.
6. Se coloca un deformímetro, haciendo coincidir su dispositivo de sujeción en los agujeros creados por el punzón.
7. Se aplica una precarga, según sea el material a ensayar. Para varillas corrugadas se recomienda una precarga de 10 kg.
8. Se aplica la carga de forma gradual y continua, se lee la deformación cada cierto intervalo de carga. Para varillas corrugadas, el intervalo de lectura de deformación es cada 100 kg.
9. Finalmente se toma nota de la deformación y de la carga aplicada, para posteriormente tabular los datos y determinar los valores requeridos.

La Figura 3.21 muestra una máquina universal típica para ensayos mecánicos en materiales metálicos.



Figura 3.21: Máquina Universal-Tinius Olson.



Figura 3.22: Material y equipo utilizado en el ensayo de tracción.

3.5.2.3. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.

La Tabla 3.15, muestra los resultados obtenidas del ensayo de tracción para probetas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro.

Tabla 3.15: RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN PARA PROBETAS DE 12 Y 14 mm DE DIÁMETRO.

Identificación	Velocidad de enfriamiento (°C/s)	Esfuerzo de cedencia o fluencia (kg/cm ²)	Esfuerzo límite (kg/cm ²)	Esfuerzo de Ruptura (kg/cm ²)	Elongación (%)	Reducción de área (%)
12-H50	1,1287	3226,14	4997,32	3354,08	29,15	71,71
12-N20	1,2920	3569,06	5373,51	3863,66	21,17	68,20
12-Fa	1,4204	3679,79	5404,08	3871,43	20,86	61,50
12-1V	2,1368	3890,78	5529,15	3974,47	9,03	67,26
12-2V	2,9762	3989,45	6053,01	4344,52	27,93	69,40
14-H50	0,9843	3356,43	5282,30	3566,97	25,83	66,09
14-N20	1,1062	3591,86	5301,25	3613,31	28,87	68,27
14-Fa	-----	3648,53	5427,12	3677,34	22,65	61,39
14-1V	1,8939	3737,21	5690,43	3743,18	11,87	67,38
14-2V	2,6316	4091,53	6235,19	4206,32	12,27	64,43

Los informes completos del ensayo de tracción para varillas corrugadas de 12 y 14mm de diámetro en condiciones de suministro (Fa) y tratadas térmicamente, se muestran en el ANEXO 2 y 3.

3.6. ENSAYOS TECNOLÓGICOS.

Los ensayos tecnológicos determinan el comportamiento de los materiales ante operaciones industriales, tales como; doblado, plegado, forja, embutición, soldadura, laminación entre otras. De igual manera que los ensayos mecánicos, los ensayos tecnológicos sirven para determinar propiedades características en los materiales.

3.6.1. ENSAYO DE DOBLADO.

El doblado es un indicador de la ductilidad del material definido por la ausencia o presencia de fisuras en este ensayo. Además permite determinar la aptitud a la deformación plástica por doblado del material.

El ensayo consiste en someter una probeta de sección circular, cuadrada, rectangular o poligonal a una deformación plástica por flexión, sin inversión del sentido de flexión durante el ensayo, hasta un ángulo especificado. Para ello se dobla la probeta mediante prensa y por flexión.

Primero se doblan las probetas por flexión hasta un ángulo determinado y posteriormente se comprueban las fisuras por aplastamiento.

Existen dos tipos de ensayos de doblado; los ensayos de doblado simple, y los ensayos de doblado-desdoblado.

Ensayo de doblado simple: se toma una barreta y se coloca en la prensa plegadora, procediendo a su doblado con un radio de giro marcado en la norma y que depende del diámetro de dicha barra. Se dobla 180° respecto a la posición original y no deben aparecer ningún tipo de grietas en la zona de doblado.

Ensayo de doblado-desdoblado: se toma una barra y se coloca en la prensa plegadora. Se coge el mandril en función del radio de giro y del diámetro de la barra (no

corresponde con el del ensayo de doblado simple), se dobla la barra 90° y posteriormente se la desdobla 20°. No deben aparecer ni grietas ni fisuras, al finalizar el ensayo, en la zona del doblado (ni en la zona exterior ni en la interior).

3.6.1.1. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE DOBLADO [3].

El ensayo o prueba de doblado se realizó en base a las normas ecuatorianas NTE INEN 0102:2003-3R y NTE INEN 2167:2003-1R, las mismas que recomiendan lo siguiente:

- Las varillas deben ser sometidas al ensayo de doblado simple a 180⁰ a la temperatura ambiente. Las probetas, luego del ensayo, no deben presentar agrietamiento en el lado exterior del doblado.
- El diámetro de los mandriles para el ensayo de doblado se encuentra establecido en la Tabla 2.3.
- El ensayo de doblado debe hacerse con probetas de suficiente longitud para asegurar un doblado libre, y con un equipo que proporcione:
 - Aplicación continua y uniforme de la fuerza durante todo el ensayo.
 - Libre movimiento de la probeta en los puntos de contacto con el equipo: mandril central y apoyos.
 - Contacto permanente de la probeta alrededor del mandril durante la operación de doblado.
- Las probetas para el ensayo de doblado deben ser de la sección completa de la varilla laminada.
- Pueden utilizarse otros métodos para el ensayo de doblado, pero sus resultados de falla no deben constituir una base para el rechazo.
- Las varillas de 36 y 40 mm de diámetro no están sujetas a los requisitos del ensayo de doblado, a menos que se establezcan requisitos complementarios entre comprador y fabricante.

El procedimiento consiste en lo siguiente:

1. Cortar las muestras de varillas a una longitud de 20 cm (con lo que se asegura una longitud adecuada para que se produzca un doblado libre).
2. Señalar el punto medio de la sección de 20 cm de longitud (para ubicar la probeta en el centro de los apoyos).
3. Ubicar la probeta en los apoyos (asegurarse que esté bien centrada la probeta).
4. Colocar el mandril sobre la probeta.
5. Aplicar la carga de forma gradual y continua, para provocar el doblado de 180° sobre la muestra.
6. Tomar nota de la carga máxima producida al realizar el dobles y verificar si existen agrietamientos en el lado exterior del doblado.

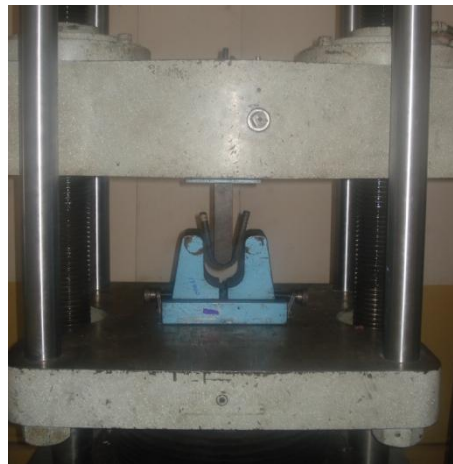


Figura 3.23: Máquina Universal-Tinius Olson – Ensayo de Doblado.

El ensayo de doblado simple consiste en doblar 180° la muestra, para que la muestra cumpla la norma de doblado, ésta no debe tener grietas en el lado exterior del doblado. Esta condición (presencia de grietas) en ciertos casos es difícil de percibirla a simple vista, por esta razón es necesario realizar ensayos no destructivos de líquidos penetrantes en el lado exterior del doblado para observar de una manera más precisa la presencia o ausencia de grietas.

3.6.1.2. ENSAYO NO DESTRUCTIVO DE LÍQUIDOS PENETRANTES [22].

Cuando se requiere detectar defectos muy finos, se los debe magnificar con un método apropiado para su visualización.

En el ensayo por líquidos penetrantes las indicaciones se magnifican debido a la capacidad de absorción del revelador (pequeñas partículas que se aplican sobre la superficie de la pieza) que actúa sobre el penetrante que ha quedado retenido en las discontinuidades, y extrayéndolo a la superficie.

Se puede luego observar fácilmente la indicación del defecto usando ya sea penetrantes coloreados o fluorescentes.

El ensayo por líquidos penetrantes sólo detecta discontinuidades abiertas a la superficie.

El ensayo por líquidos penetrantes puede ser aplicado en cualquier tipo de material, metálicos o no metálicos, salvo en aquellos materiales porosos o con alta rugosidad. El tamaño mínimo de un defecto detectable es aproximadamente de 1 mm de longitud y dependiendo de la técnica y la calidad de los productos utilizados, el ancho del defecto detectable puede ir desde 1µm.

3.6.1.2.1. CLASES DE LÍQUIDOS PENETRANTES [22].

Existen dos tipos básicos de líquidos penetrantes, fluorescentes y no fluorescentes. La característica distintiva principal entre los dos tipos es:

- a) Los líquidos penetrantes fluorescentes contienen un colorante que flouresce bajo la luz negra o ultravioleta.
- b) Los líquidos penetrantes no flourecentes contienen un colorante de alto contraste bajo luz blanca.

3.6.1.2.2. SISTEMAS PENETRANTES [22].

Los sistemas penetrantes generalmente se identifican por el método empleado en la remoción del exceso del líquido penetrante. Estos sistemas son:

- a) removible con agua
- b) post-emulsificable lipofilico

- c) removible con solventes
- d) post-emulsificable hidrofílico

Estos sistemas son comunes tanto a los tipos de penetrante fluorescente como a los de colorante visible.

En el caso de penetrantes removibles con agua, el exceso de penetrante es removido con un simple lavado con agua.

En el caso de penetrantes post-emulsificables, se requiere una etapa adicional separada, que consiste en la aplicación de un emulsificador que hace que el penetrante pueda ser removido posteriormente con un lavado con agua.

En el caso de penetrantes removibles con solvente, el exceso de penetrante se remueve utilizando trapos o papeles absorbentes impregnados con solventes especialmente formulados para este fin.

3.6.1.2.3. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE LÍQUIDOS PENETRANTES [23].

Las cinco etapas siguientes se ejecutan en el ensayo por líquidos penetrantes.

1. Limpieza inicial: se remueve la suciedad de la superficie de la pieza y del interior de los defectos.
2. Penetración: se aplica un penetrante (líquido con alta capilaridad) sobre la pieza a ser examinada y se lo deja penetrar dentro de los defectos.
3. Limpieza intermedia: se remueve el exceso de penetrante de la superficie de la pieza.
4. Revelado: se aplica un revelador blanco a la superficie de la pieza que extrae el penetrante de los defectos.
5. Observación: se observan las indicaciones de los defectos bajo luz natural en el caso de los penetrantes coloreados o usando luz negra en el caso de los penetrantes fluorescentes.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de la detección de un defecto abierto a la superficie por líquidos penetrantes.

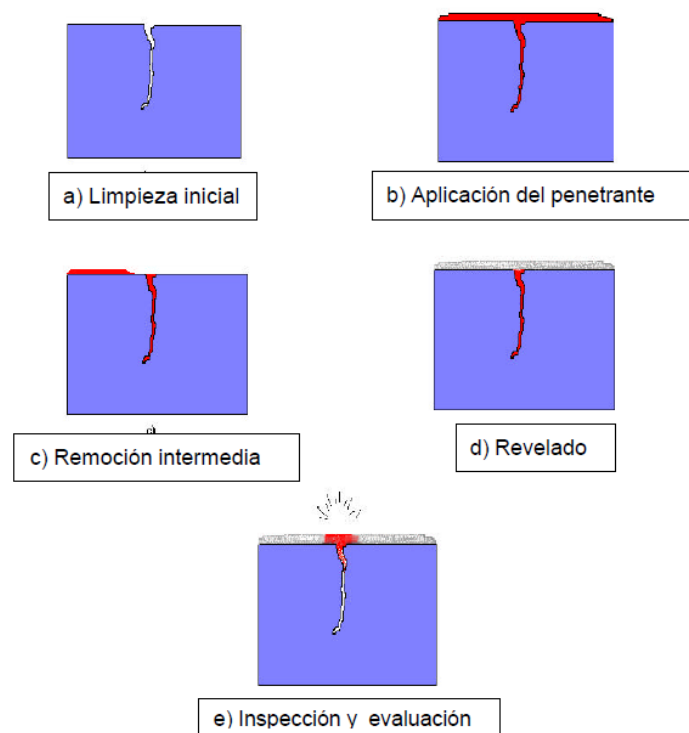


Figura 3.24: Esquema del procedimiento del ensayo de líquidos penetrantes

El ensayo de tintas penetrantes fue realizado con el equipo de MAGNAFLUX-SPOTCHECK; limpiador (SKC-S), penetrante (SKL-SP1), revelador (SKD-S2).



Figura 3.25: Kit MAGNAFLUX – SPOTCHECK para ensayo de líquidos penetrantes.

Para realizar los ensayos no destructivos de líquidos penetrantes en probetas de varilla corrugada, que se les realizó el ensayo de doblado, se debe en primer lugar

realizar un decapado químico; puesto que nuestras probetas tratadas térmicamente sufrieron un proceso de calentamiento y enfriamiento; y en la superficie de las muestras existen óxidos de carburo, que deben ser eliminados.

3.6.1.3. DECAPADO QUÍMICO.

El decapado químico es un procedimiento que se utiliza para eliminar cascarilla de laminación, óxidos y otros materiales extraños al metal por medio de la acción de ácidos inorgánicos que los disuelven o transforman en otros productos eliminables por lavado posterior con agua.

3.6.1.3.1. PROCEDIMIENTO PARA EL DECAPADO QUÍMICO.

El procedimiento que se tomó para realizar el decapado químico fue el siguiente:

- a. Calentamiento de la solución al 10% de ácido sulfúrico hasta los 80°C.
- b. Inmersión de las probetas dentro del tanque donde se encuentra la solución al 10% de ácido sulfúrico a una temperatura de 80°C.
- c. Permanencia de las probetas en la solución durante 15 minutos.
- d. Lavado de probetas con agua.



a)



b)



c)

Figura 3.26: a) Solución de ácido sulfúrico al 10% utilizado para el decapado químico. b) Tanque y calentador eléctrico utilizado para el decapado químico. c) probetas sumergidas en ácido sulfúrico al 10%.

3.6.2. RESISTENCIA AL IMPACTO [14].

El impacto se refiere a la colisión de dos masas con velocidad inicial relativa.

En algunos casos se desea lograr un impacto conocido en el diseño, así sucede por ejemplo, en el diseño de prensas de acuñado, estampado y formado. En otras ocasiones, el impacto ocurre por deflexiones excesivas o por holguras entre partes, y en esas circunstancias se desean minimizar los defectos.

El *choque* es un término más general que se usa para describir cualquier carga o perturbación aplicada repentinamente. Así, el estudio del choque incluye el impacto como un caso especial. Hay dos métodos generales para el estudio del choque, según sea que se utilice sólo la estática en el análisis o si se usan la estática y la dinámica; el estudio de ambos casos queda fuera del alcance y del propósito de este trabajo, razones por las cuales no se volverá a hacer referencia a los mismos.

Una fuerza aplicada a una estructura o a una parte, se llama *carga de impacto*, si el tiempo de aplicación es menor que 1/3 del período natural de vibración mínimo de la parte o de la estructura. De otro modo, se llama simplemente *carga estática*.

Cuando un material se sujeta a un golpe repentino y violento, en el que la velocidad de deformación es extremadamente rápida, se puede comportar en una forma mucho más frágil que la que se observa en el ensayo de tensión.

Con frecuencia se usa un ensayo de impacto para evaluar la fragilidad de un material bajo estas condiciones. En contraste con el ensayo de tensión, en el de impacto las tasas de deformación unitaria son mucho mayores ($\dot{\epsilon} \approx 10^3 s^{-1}$).

3.6.2.1. TENACIDAD Y PRUEBAS DE IMPACTO [14].

La *tenacidad* es una medida de la cantidad de energía que un material puede absorber antes de su fractura. Esta propiedad es de importancia en ingeniería cuando se considera la habilidad del material a soportar un impacto sin fracturarse.

Aunque la tenacidad de un material puede obtenerse calculando el área bajo el diagrama esfuerzo-deformación, una prueba de impacto indicará la tenacidad relativa.

Se han inventado muchos procedimientos de prueba, incluyendo el ensayo de *Charpy* y el ensayo de *Izod* (véase la Figura 3.27). Los ensayos de impacto se realizan bajo la norma ASTM E23.

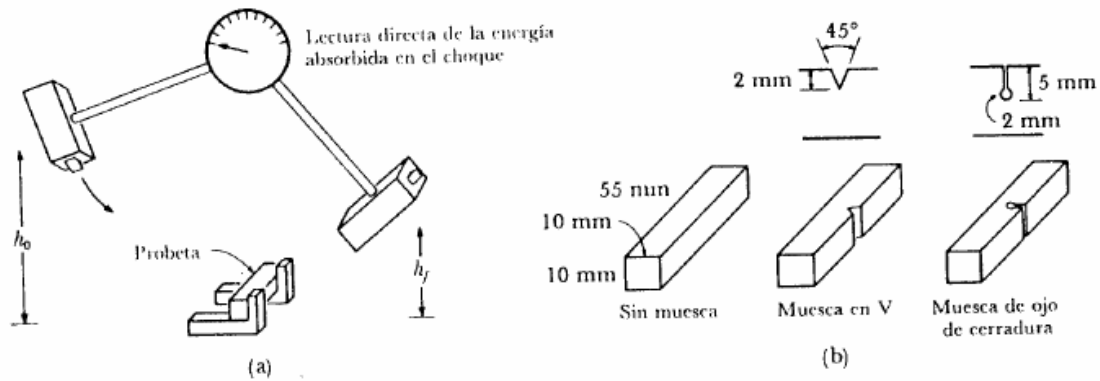


Figura 3.27: a) Dispositivo de ensayo Charpy. b) Muestras típicas [14]

El ensayo de Izod se usa frecuentemente en materiales plásticos. El espécimen de ensayo puede o no tener muesca; los especímenes con muesca en V son mejores para medir la resistencia del material a la propagación de grietas.

En el ensayo hay un péndulo pesado que comienza a moverse a una altura h_0 , describe su arco, golpea y rompe el espécimen, y llega a una altura final h_f menor. Si se conocen las alturas inicial y final del péndulo se puede calcular la diferencia de energía potencial. Esta diferencia es la *energía de impacto* que absorbió el espécimen cuando falló.

Para el ensayo Charpy, la energía se suele expresar en joules (J) o en libra-pie (lb.ft). Los resultados del ensayo Izod se expresan en J/m o en lb.ft/in.

De la descripción de la prueba, es obvio que la prueba de impacto no da la tenacidad verdadera, sino su comportamiento en función de una muesca en particular; sin embargo, los resultados son útiles para propósitos de comparación.

Las pruebas de impacto como la descrita anteriormente generan útiles datos cuantitativos con muestras y equipos relativamente simples. Sin embargo, estas pruebas no proporcionan datos adecuados para el diseño de secciones de materiales que contengan grietas o defectos.

Este tipo de datos se obtienen desde la disciplina de la *Mecánica de la Fractura*, en la cual se realizan análisis teóricos y experimentales de la fractura de materiales estructurales que contienen grietas o defectos preexistentes.

3.6.2.2. ENSAYO CHARPY [14].

La resiliencia, considerada como *aptitud para resistir sollicitaciones por impacto*, puede admitirse que es directamente proporcional a la tenacidad del material, pero hay que tener en cuenta que la resiliencia por sí sola no es suficiente para valorar la tenacidad.

Un material puede llamarse tenaz cuando tiene una buena resistencia a la tracción asociada a un buen alargamiento y a una buena resiliencia.

Puesto que el impacto es una sollicitación dinámica, ya que la carga se aplica instantáneamente con su valor máximo, la resiliencia se mide determinando la energía cinética absorbida por la rotura del material.

3.6.2.3. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO CHARPY.

La prueba de impacto se la realiza con el *péndulo de Charpy*.

El ensayo de impacto fue realizado según norma ASTM E23, la norma describe los ensayos de impacto del acero para propósitos de producción como sigue:

Un ensayo de impacto es un ensayo dinámico en el cual se golpea y se rompe, mediante un solo golpe, una probeta seleccionada, maquinada o pulida superficialmente y en forma usual ranurada. Se efectúa en una máquina especialmente diseñada y se mide la energía absorbida al romperse la probeta. Los valores de energía determinados son comparaciones cualitativas sobre una probeta seleccionada y no puede convertirse en cifras de energía que sirvan para cálculos de diseño de ingeniería. El comportamiento de la ranura indicado en un ensayo individual es aplicable solamente al tamaño de la probeta, la geometría de la ranura, y las condiciones de ensaye involucradas, y no puede aplicarse a otros tamaños de probetas y otras condiciones. Los requerimientos de impacto mínimos generalmente se especifican solamente para materiales enfriados y

templados, normalizados y templados o normalizados, según se estipula en las especificaciones apropiadas para el producto [24].

El procedimiento que se siguió para realizar el ensayo de impacto, consiste en lo siguiente [24]:

1. Se coloca un martillo a una altura determinada y se la sostiene por medio de un dispositivo de enganche.
2. La probeta, con las dimensiones estándar, se dispone sobre una base y se apoya en ambos extremos de modo que la muesca se encuentre del lado contrario en donde el martillo la golpeará.
3. Finalmente, se desengancha el martillo, éste impacta sobre la probeta y se lee directamente el valor de la energía absorbida por el material en una carátula.

Las Figuras 3.28 y 3.29 muestran la máquina de péndulo de Charpy.



Figura 3.28: Péndulo Charpy – CEAST



Figura 3.29: Péndulo Charpy – ESPOCH

3.6.2.4. RESULTADOS DEL ENSAYO CHARPY.

El ensayo de impacto fue realizado en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la ESPOCH, el equipo utilizado fue: Pendulo Charpy – CEAST: para probetas tratadas térmicamente de 12 mm de diámetro

y Péndulo Charpy – ESPOCH – INGENIERÍA MECÁNICA (Capacidad de Energía de la máquina $E=335,4$ Joule ó $34,22$ kg-m): para probetas tratadas térmicamente de 14 mm de diámetro.

Las probetas de 12mm de diámetro fueron maquinadas a tamaño estándar, (40x6x4)mm y ranuradas a 2 mm de profundidad a un ángulo de 45° , mientras que las probetas de 14mm de diámetro fueron maquinadas a tamaño estándar, (55x10x10), con las mismas características de ranurado que las anteriores.

Los resultados que se obtuvieron se muestran a continuación.

Tabla 3.16: RESULTADOS DEL ENSAYO DE IMPACTO

Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=12mm	Energía absorbida Tenacidad relativa (J)	Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=14mm	Energía absorbida Tenacidad relativa (J)
1,1287	20,23	0,9843	65
1,2920	21,07	1,1062	67,2
1,4204	20,50	-----	65,4
2,1368	18,77	1,8939	62,2
2,9762	18,57	2,6316	60,2

En color gris se marcan las varillas corrugadas de 12 y 14mm de diámetro en condiciones de suministro.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

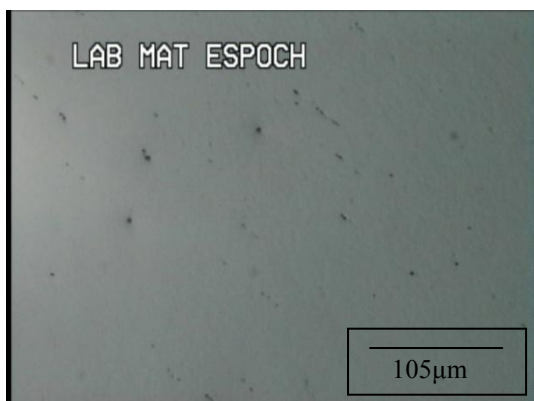
4.1. INTRODUCCIÓN.

En el capítulo anterior se ha descrito los procedimientos necesarios para realizar los ensayos térmicos (transformaciones de fase), mecánicos, tecnológicos y metalográficos en varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro procedentes del lote LA002964-1 y colada 5378 laminados en NOVACERO S.A., planta Laso. En este capítulo se analizarán los datos obtenidos de los ensayos antes mencionados, con el propósito de establecer una relación entre microestructura y propiedades mecánicas y tecnológicas.

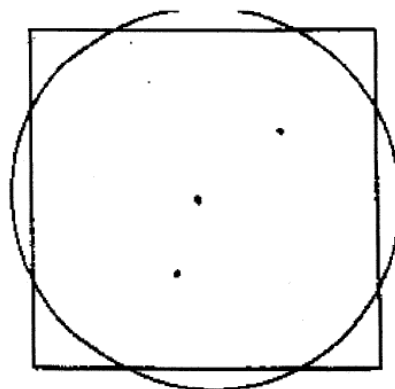
4.2. ANÁLISIS METALOGRÁFICO.

4.2.1. ANÁLISIS DE INCLUSIONES.

A continuación se muestran las imágenes más relevantes luego de realizar el barrido en la muestra de corte longitudinal en varilla corrugada de 12mm de diámetro.



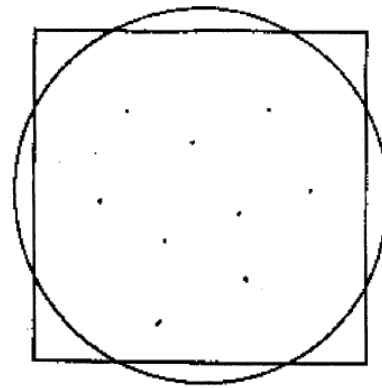
Ampliación 100X



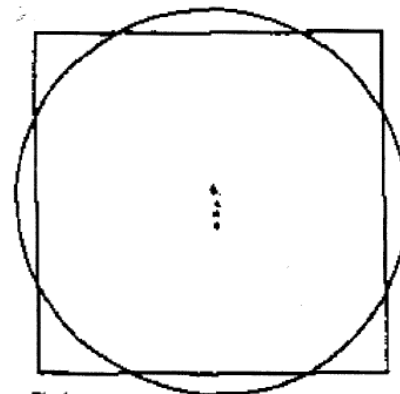
**Inclusión tipo óxido
globular D1**



Ampliación 100X

Inclusión tipo óxido
globular D1½

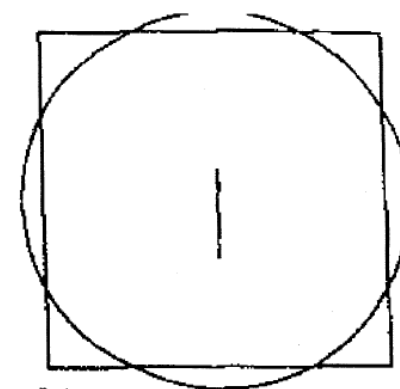
Ampliación 100X



Inclusión tipo alúmina B1



Ampliación 100X



Inclusión tipo Silicato C1½

Figura 4.1: Inclusiones en varilla de 12mm de diámetro

En la varilla corrugada de 12mm de diámetro se observan inclusiones de tipo óxido globular D1 y D1½; producidas posiblemente en el proceso de refinación y vertido en el lingote. También se puede observar la presencia de inclusiones tipo

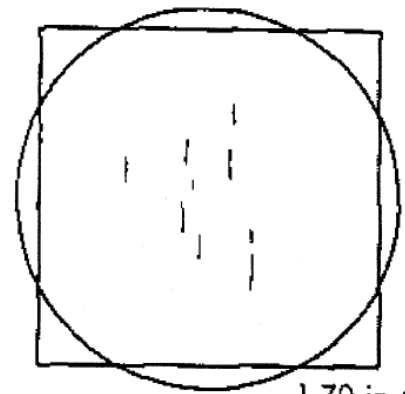
alúmina B1 e inclusiones tipo silicato C1½; producidas posiblemente por la mezcla de refractarios fundidos. Como se mencionó en el Capítulo 3, literal 3.4.2, la existencia de inclusiones no metálicas es inevitable en el acero y estas inclusiones no son consideradas como defectos.

La Norma ASTM E45-97 indica que los diferentes métodos que menciona la norma, no deben ser tomados como la definición o el establecimiento de límites de aceptabilidad de cualquier grado de acero.

A continuación se muestran las imágenes más relevantes luego de realizar el barrido en la muestra de varilla corrugada de 14mm de diámetro.



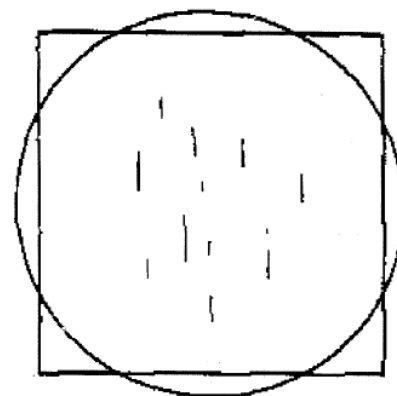
Ampliación 100X



Inclusión tipo sulfuro A2



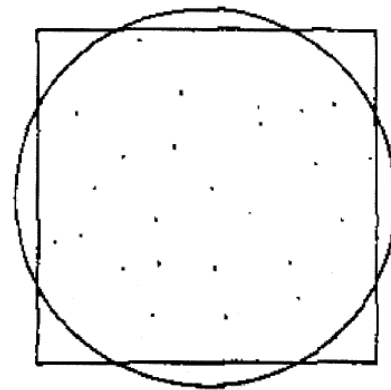
Ampliación 100X



Inclusión tipo sulfuro A2½



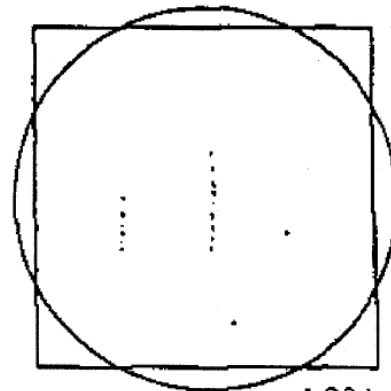
Ampliación 100X



Inclusión tipo Óxido Globular D3



Ampliación 100X



Inclusión tipo Alúmina B2

Figura 4.2: Inclusiones en varilla de 14mm de diámetro

En la varilla corrugada de 14mm de diámetro se observan inclusiones de tipo óxido globular D3 e inclusiones tipo sulfuro A2; producidas posiblemente en el proceso de refinación y vertido en el lingote. También se puede observar la presencia de inclusiones tipo alúmina B2 e inclusiones tipo silicato C2; producidas posiblemente por la mezcla de refractarios fundidos.

El tamaño, la distribución y el número de inclusiones presentes en las muestras de varillas corrugas de 12 y 14 mm de diámetro, se pueden observar que son pequeños; por lo que se puede concluir que el proceso de fabricación, refinación y laminación del acero es satisfactorio.

4.2.2. EFECTO DE LAS INCLUSIONES SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS.

Las inclusiones no metálicas juegan un papel importante sobre las propiedades mecánicas, principalmente en tres escenarios; principio de la fractura dúctil, crecimiento de la fractura dúctil y en la porosidad; y por tanto afectan de manera significativa en los resultados de las pruebas de impactos [30].

Las inclusiones no metálicas que presentan tamaños grandes también sirven como sitios de iniciación de la fatiga y pueden iniciar la fractura. Un efecto beneficioso de las inclusiones tipo sulfuro, es reducir la resistencia a la fractura, y mejorar la maquinabilidad. Por el contrario las inclusiones tipo silicato son perjudiciales para el mecanizado [30].

Las inclusiones observadas en las probetas de varilla corrugada de 12 y 14 mm de diámetro, presentan tamaños pequeños, por tanto estas inclusiones no sirven como sitios de iniciación de la fatiga y no pueden iniciar la fractura. En las muestras de varillas corrugadas de 14 mm de diámetro se observan inclusiones tipo sulfuro A2 y A2½, lo que nos indica que estas muestras presentan una reducción de la resistencia a la fractura y mejoran la maquinabilidad. Mientras que en las muestras de 12 mm de diámetro se observan inclusiones tipo silicato C1½, lo que nos indica que estas muestras presentan una disminución en la maquinabilidad.

La orientación de las inclusiones alargadas tale como las inclusiones tipo sulfuro y tipo silicato, pueden mejorar la resistencia a la fractura. Estas orientaciones se producen por trabajado en caliente (laminado en caliente). La orientación que mejor resistencia ofrece es la orientación longitudinal o paralela al eje de laminación.

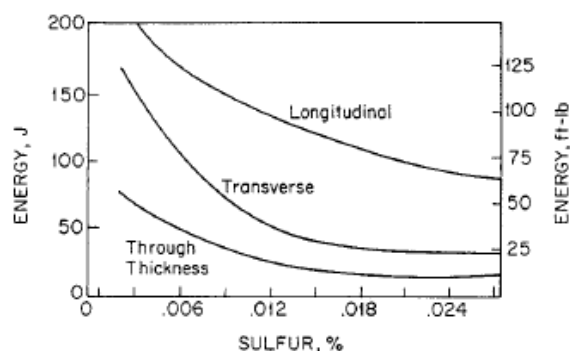
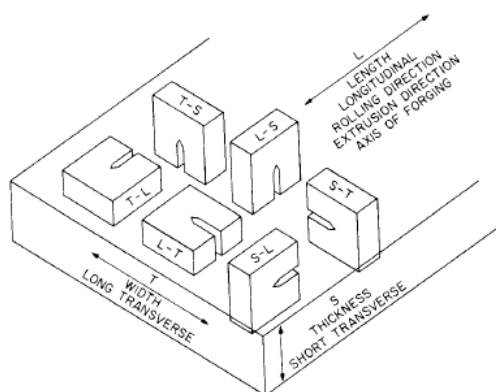


Figura 4.3: Efecto de la cantidad de azufre y la orientación sobre la resistencia al impacto.

4.2.3. ANÁLISIS DE LA DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO.

En la Tabla 4.1, se vuelve a mostrar los resultados obtenidos de la medición del tamaño de grano para varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro enfriadas a distintas velocidades de enfriamiento.

Tabla 4.1: TAMAÑOS DE GRANO PRESENTES EN VARILLAS CORRUGADAS DE 12 Y 14 mm DE DIÁMETRO ENFRIADAS A DISTINTAS VELOCIDADES

Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=12mm	Tamaño de grano ASTM	Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=14mm	Tamaño de grano ASTM
1,1287	9	0,9843	8
1,2920	9,5	1,1062	9,5
1,4204	9	-----	9
2,1368	9	1,8939	9
2,9762	9,5	2,6316	9

En color gris se marcan las varillas corrugadas de 12 y 14mm de diámetro en condiciones de suministro.

Como se puede observar el tamaño de grano varía entre las distintas velocidades de enfriamiento, esto se debe posiblemente a dos factores. Las impurezas insolubles, como el aluminio y el titanio, que forman óxidos insolubles en el acero y la rapidez de enfriamiento.

La primera causa no es aceptable, puesto que todas las muestras poseen la misma composición química y el porcentaje de aluminio y titanio es mínimo, 0,0016% y 0,0028% respectivamente.

La rapidez de enfriamiento es el factor más importante para determinar la rapidez de recristalización y, por tanto, el tamaño de grano. El enfriamiento rápido dará como resultado que se forme un gran número de núcleos y que se obtenga un tamaño de grano fino, en tanto que en el enfriamiento lento sólo se forman algunos núcleos y

tendrán la oportunidad de crecer, consumiendo el líquido antes que se puedan formar más núcleos, dándonos un tamaño de grano grueso [10].

Analizando la literatura, la misma que nos dice que a mayor velocidad de enfriamiento menor tamaño de grano, y comparándolas con los resultados que nosotros obtenemos; observamos que este principio no se da para nuestras probetas de varilla corrugada enfriadas a distintas velocidades.

Cabe mencionar que las microfotografías tomadas en las probetas de varillas corrugadas enfriadas a distintas velocidades fueron tomadas en un corte transversal en posiciones al azar. Analizando este principio de toma de fotografías al azar, nos damos cuenta que la variación del tamaño de grano se debe posiblemente a esto.

Para resolver esta interrogante, se realizó un barrido completo a lo largo de toda la sección transversal de las probetas de varilla corrugada de 12 y 14 mm de diámetro. La Figura 4.4 muestra un esquema de la sección transversal de las probetas de varilla corrugada en donde se identifican dos clases de barrido que se realizaron en las varillas, un barrido horizontal y uno vertical, con el fin de analizar completamente la sección transversal. Mientras se realizó el barrido horizontal y vertical se tomó microfotografías a una ampliación de 100x para posteriormente determinar el tamaño de grano en estas microfotografías.

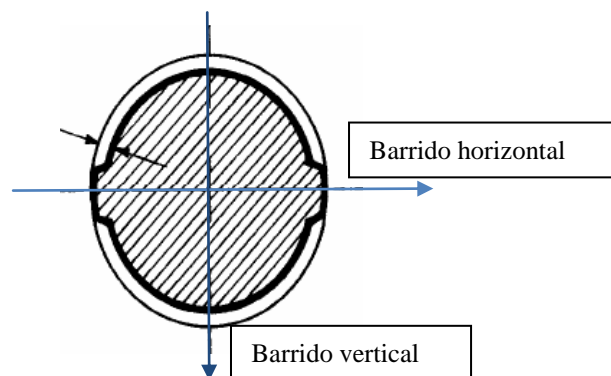


Figura 4.4: Barrido microscópico horizontal y vertical en una sección transversal de varilla corrugada.

Puesto que el diámetro de la varilla es de 12 y 14 mm, se tomó un total de 30 microfotografías por cada barrido en la varilla de 12 mm y 34 para la varilla de 14 mm; ya que el ancho de la microfotografía a 100x es de 410 μ m.

Los resultados que se obtuvieron son los siguientes:

Tabla 4.2: TAMAÑOS DE GRANOS ENCONTRADOS DESPUÉS DE REALIZAR EL BARRIDO COMPLETO EN VARILLAS CORRUGADAS DE 12 Y 14 mm DE DIÁMETRO ENFRIADAS A DISTINTAS VELOCIDADES

Distancia	Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=12mm					Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=14mm				
	1,13	1,29	1,42	2,14	2,98	0,98	1,11	---	1,89	2,63
1	9	9,5	9,5	10,5	10,5	9	9,5	9,5	10,5	10,5
2	9	9,5	9,5	10,5	10,5	9	9,5	9,5	10,5	10,5
3	9	9,5	9,5	10,5	10,5	9	9,5	9,5	10,5	10,5
4	9	9,5	9,5	10	10,5	8,5	9,5	9,5	10	10,5
5	8,5	9,2	9,2	10	10,5	8,5	9,2	9,2	10	10
6	8,5	9,2	9,2	10	10	8,5	9,2	9,2	10	10
7	8,5	9,2	9,2	10	10	8,5	9	9	10	10
8	8,5	9	9	10	10	8,5	9	9	10	10
9	8,5	9	9	10	10	8,5	9	9	10	10
10	8,5	9	9	9,5	10	8,5	9	9	9,5	10
11	8,5	9	9	9,5	10	8,5	9	9	9,5	10
12	8	9	9	9,5	9,5	8,5	9	9	9,5	10
13	8	8,5	8,5	9,5	9,5	8	8,5	8,5	9,5	9,5
14	8	8,5	8,5	9	9,5	8	8,5	8,5	9,5	9,5
15	8	8,5	8,5	9	9	8	8,5	8,5	9	9,5
16						8	8,5	8,5	9	9
17						8	8,5	8,5	9	9
Promedio	8,5	9,07	9,07	9,83	10	8,44	8,99	8,99	9,76	9,91

En la Figura 4.5 se muestra el diagrama Tamaño de grano ASTM Vs Distancia; la distancia fue tomada desde el extremo hacia el centro de la varilla.

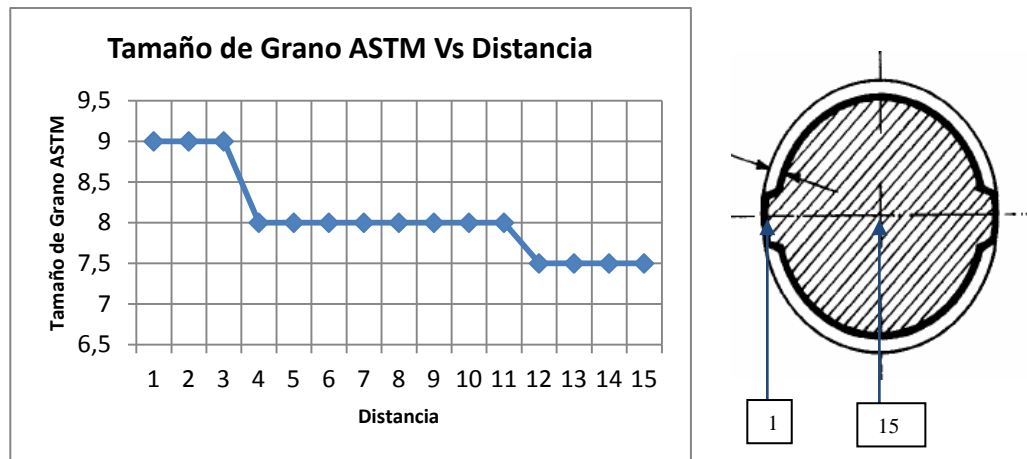


Figura 4.5: Diagrama Tamaño de Grano Vs Distancia, para una probeta de varilla corrugada de 12 mm de diámetro enfriada a 1,1287 °C/s

En la Figura 4.5 podemos observar que en el extremo de la varilla (posición 1), obtenemos un tamaño de grano ASTM 9 y en el centro de la varilla (posición 15) obtenemos un tamaño de grano ASTM 7,5. Esta diferencia de tamaño se debe a la diferencia de enfriamiento que sufrió el exterior y el centro de la varilla. El exterior se enfrió a una velocidad de 1,1287 °C/s, mientras que el centro se enfrió a una velocidad menor. Puesto que el flujo de aire enfría más rápidamente la superficie de la varilla que el centro de la misma. Esta tendencia se observa en todas las probetas enfriadas a distintas velocidades.

En velocidades de enfriamiento superiores (2,9762 °C/s y 2,63161 °C/s) esta diferencia de tamaño de grano de la superficie con el centro de la varilla es más evidente como lo muestra la Tabla 4.2. Puesto que la superficie se enfría más rápidamente que su centro.

Las Figuras 4.6 y 4.7 muestra el diagrama Tamaño de grano ASTM Vs Velocidad de enfriamiento. En estas figuras podemos observar que mientras la velocidad de enfriamiento aumenta, el tamaño de grano decrece.

Al afinar el tamaño de grano, estamos mejorando la resistencia y la tenacidad de las probetas de varilla corrugada.

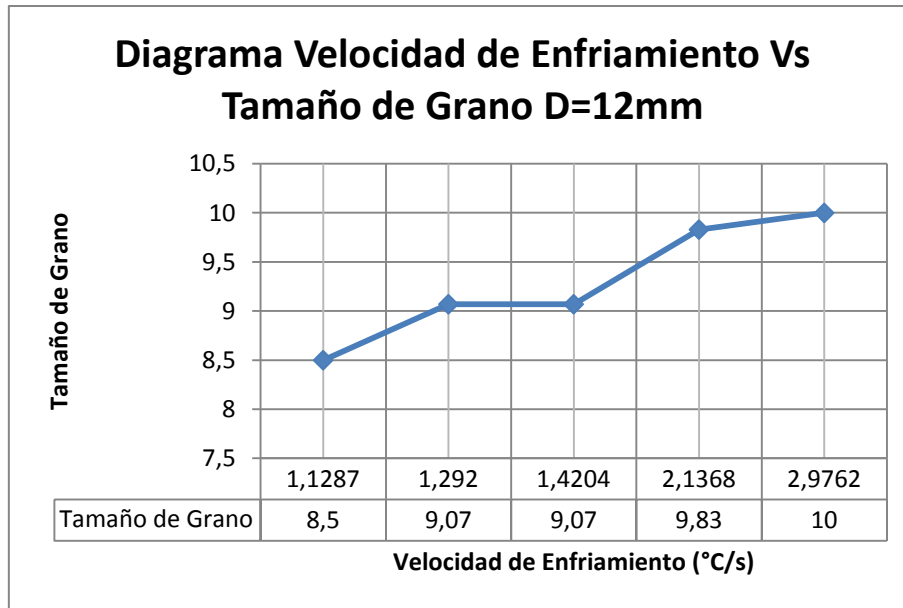


Figura 4.6: Diagrama Tamaño de Grano Vs Velocidad de Enfriamiento, para probetas de varilla corrugada de 12 mm de diámetro tratadas térmicamente

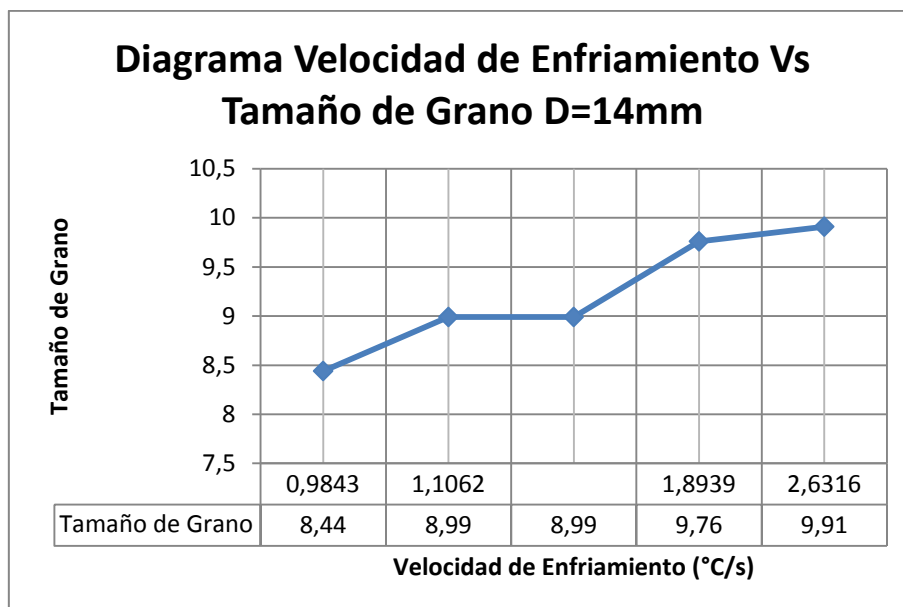


Figura 4.7: Diagrama Tamaño de Grano Vs Velocidad de Enfriamiento, para probetas de varilla corrugada de 14 mm de diámetro tratadas térmicamente

Las Figuras 4.6 y 4.7 muestran los tamaños de grano promedio para probetas de varilla corrugada de 12 y 14 mm de diámetro enfriadas a distintas velocidades, para velocidades lentas (1,1287 °C/s y 0,9843 °C/s) el tamaño de grano es de 8,5 ASTM (18,9µm) y 8,44 ASTM (19,2µm) respectivamente y para velocidades superiores

(2,9762 °C/s y 2,6316°C/s) el tamaño de grano es de 10 ASTM (11,2µm) y 9,91 ASTM (11,5µm) respectivamente.

Cabe recalcar que la medida del tamaño de grano, no es una medición de gran exactitud. Una estructura metálica es una mezcla de cristales tridimensionales de tamaños y formas variables. Aun si todos los cristales fueran idénticos en tamaño y forma, las secciones transversales de los granos de la superficie pulida mostrarían áreas variables, dependiendo de dónde el plano de la superficie cortara cada cristal individual. Por tanto, ningún campo de observación puede ser exactamente igual [10].

4.2.4. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE FASES.

La Tabla 4.3 muestra los porcentajes de fases presentes en las distintas probetas de varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro, en condiciones de suministro y tratadas térmicamente.

Tabla 4.3: PORCENTAJES DE FASES PRESENTES EN VARILLAS DE 12 Y 14 mm DE DIÁMETRO.

Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=12mm	% Ferrita	% Perlita	Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=14mm	% Ferrita	% Perlita
1,1287	56,86	43,14	0,9843	59,90	40,10
1,2920	47,06	52,94	1,1062	51,18	48,82
1,4204	41,18	58,82	-----	44,78	55,22
2,1368	26,66	73,33	1,8939	28,92	71,08
2,9762	18,04	81,96	2,6316	20	80

En color gris se marcan las varillas corrugadas de 12 y 14mm de diámetro en condiciones de suministro.

Como se observa en la Tabla 4.3, solo existen dos clases de microestructuras (fases) presentes en las varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro, estas microestructuras son *ferrita* y *perlita*. Los porcentajes de estos microconstituyentes varían de acuerdo a la velocidad de enfriamiento, esto tiene sentido, puesto que cuando

las probetas se enfrían fuera del equilibrio, el punto eutectoide se desplaza hacia la izquierda, aumentando el porcentaje de perlita. Esta diferencia también se puede observar en el diagrama de transformación a enfriamiento continuo (CCT) para el acero con un porcentaje de carbono equivalente de 0,53% (Figura 4.8), que es similar a nuestro porcentaje equivalente de carbono (0,5182%).

Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran la relación de la velocidad de enfriamiento con el porcentaje de perlita para varillas de 12 y 14 mm de diámetro.

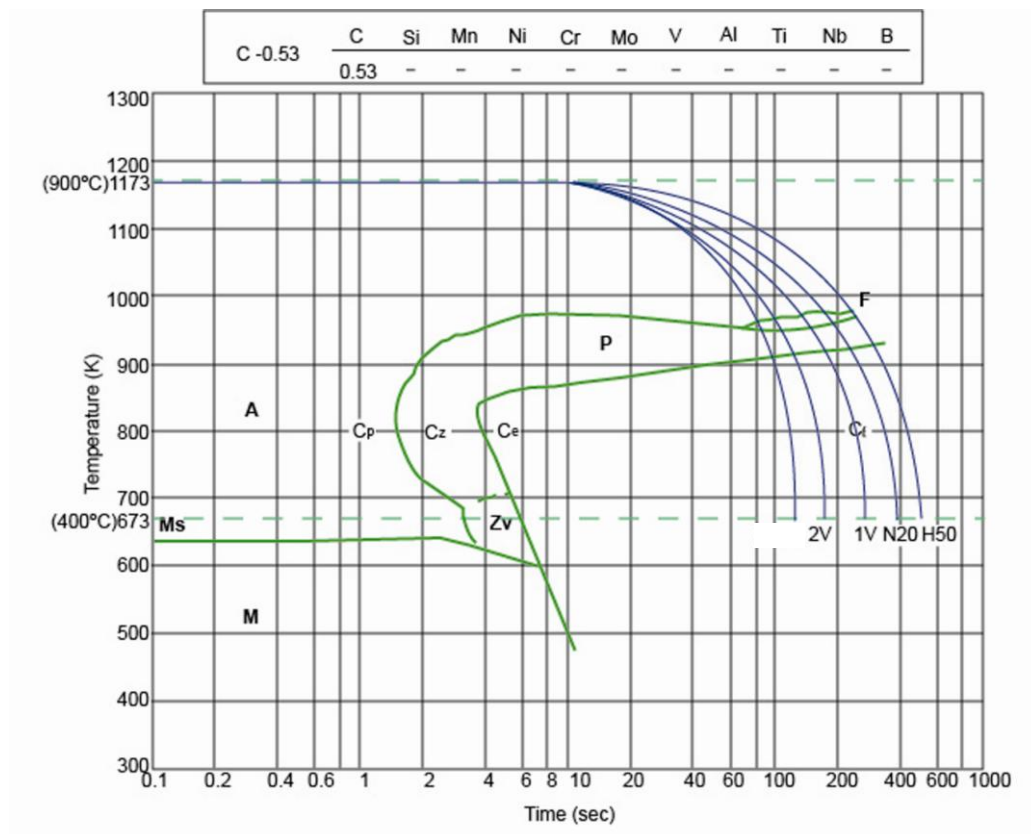


Figura 4.8: Diagrama CCT para un acero con 0,53%C (Tomada de www.mits.nims.go.jp/db_top_eng.htm) y curvas con las diferentes velocidades de enfriamiento (H50, N20, 1V, 2V)

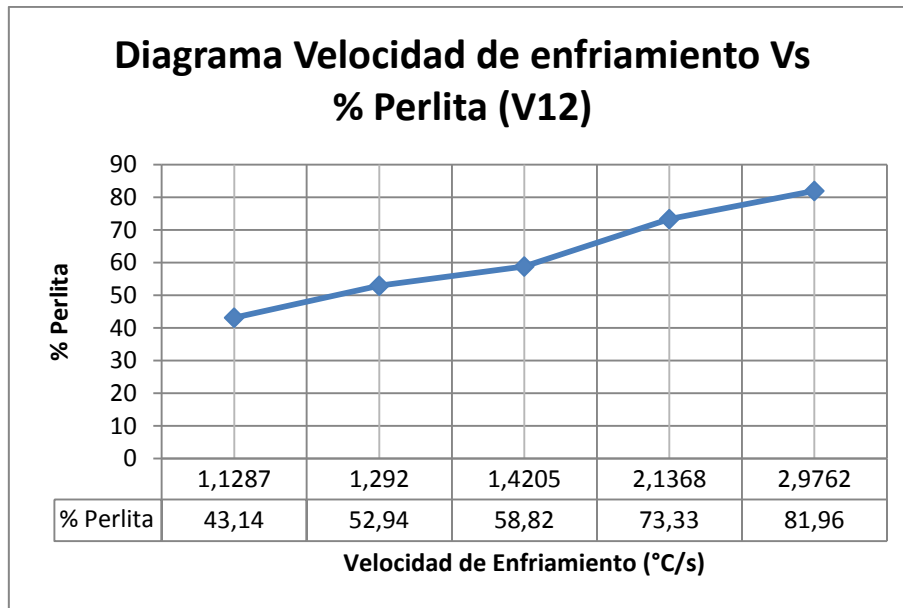


Figura 4.9: Diagrama Velocidad de enfriamiento Vs % Perlita, para probetas de varilla corrugada de 12mm de diámetro

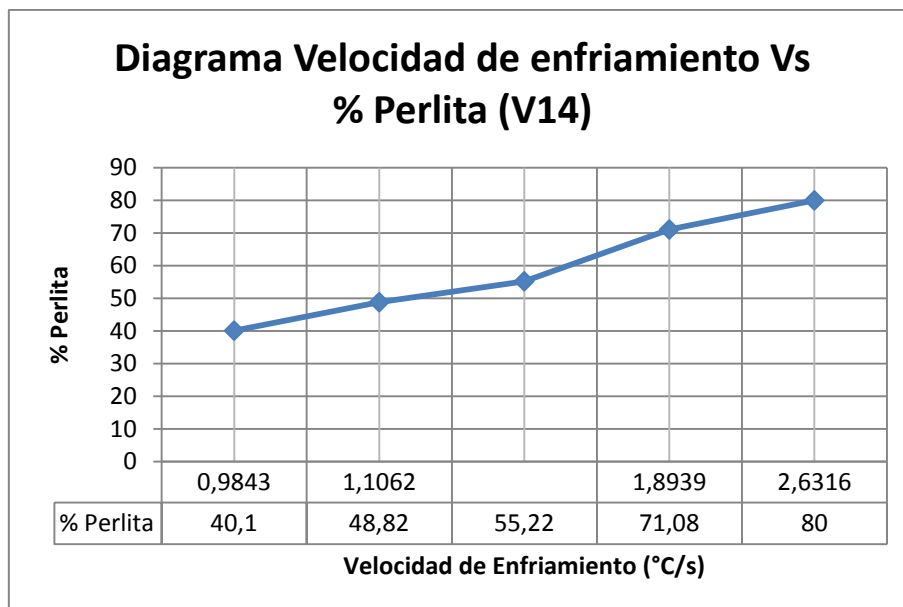


Figura 4.10: Diagrama Velocidad de enfriamiento Vs % Perlita, para probetas de varilla corrugada de 14mm de diámetro

Para determinar las morfologías de la *ferrita* y *perlita*, presentes en las probetas de varilla corrugada de 12 y 14 mm de diámetro, se realizó un barrido microscópico completo a lo largo de toda la sección transversal; como lo muestra la Figura 4.4. En el barrido se fotografió toda la sección transversal, para posteriormente determinar las morfologías presentes. Las ampliaciones a las cuales fueron tomadas las microfotografías fueron de 100x y 1000x.

Los resultados que se obtuvieron son los siguientes:

Tabla 4.4: MORFOLOGÍAS DE FERRITA Y PERLITA PRESENTES EN VARILLAS CORRUGADAS DE 12 mm DE DIÁMETRO.

	D=12 mm				
Velocidad de enfriamiento (°C/s)	1,1287	1,2920	1,4204	2,1368	2,9762
% Perlita media	12,94	22,06	25,49	40,33	47,81
% Perlita gruesa	30,20	30,88	33,33	33	34,15
% Total de perlita (%P)	43,14	52,94	58,82	73,33	81,96
% Ferrita maciza	0	0	0	1,20	1,20
% Ferrita Widmanstatten placas laterales primarias	0	0	0	0,43	0,82
% Ferrita Widmanstatten placas laterales secundarias	0	0	0	3,76	5,43
% Ferrita Alotriomórfica (equiaxial, proeutectoide, poligonal)	56,86	47,06	41,18	21,27	10,59
% Total de Ferrita (%α)	56,86	47,06	41,18	26,66	18,04

En las Tablas 4.4 y 4.5 podemos observar que se necesita velocidades de enfriamiento superiores a 1,4204 °C/s para formar morfologías de ferrita distintas a la equiaxial (ferrita maciza, ferrita Widmanstatten placas laterales primarias, ferrita Widmanstatten placas laterales secundarias). Lo que no sucede con la perlita, que a velocidades de 0,9843 °C/s, se obtiene porcentajes de perlita media.

Tabla 4.5: MORFOLOGÍAS DE FERRITA Y PERLITA PRESENTES EN VARILLAS CORRUGADAS DE 14 mm DE DIÁMETRO.

	D=14 mm				
Velocidad de enfriamiento (°C/s)	0,9843	1,1062	-----	1,8939	2,6316
% Perlita media	12,03	20,34	23,93	39,10	46,67
% Perlita gruesa	28,07	28,48	31,29	31,98	33,33
% Total de perlita (%P)	40,10	48,82	55,22	71,08	80
% Ferrita maciza	0	0	0	1,22	1,22
% Ferrita Widmanstatten placas laterales primarias	0	0	0	0,45	0,85
% Ferrita Widmanstatten placas laterales secundarias	0	0	0	4,38	6,33
% Ferrita Alotriomórfica (equiaxial, proeutectoide, poligonal)	59,90	51,18	44,78	22,87	11,6
% Total de Ferrita (%α)	59,90	51,18	44,78	28,92	20

La ferrita maciza presenta tamaños de granos grandes, se produce en enfriamientos rápidos y en ausencia de carbono (aceros de ultra bajo carbono); su morfología es similar a la ferrita equiaxial [30]. Por estas descripciones y por comparación fotográfica concluimos que la ferrita presente en la zona descarburada (ausencia de carbono) para velocidades de enfriamiento de 2,1368; 1,8939; 2,9762 y 2,6316 °C/s es ferrita maciza.

La ferrita Widmanstatten placas laterales primarias y secundarias son más fáciles de observar y por ende de caracterizarlas por comparación fotográfica. La ferrita Widmanstatten placas laterales primarias crece directamente en los límites de grano de la austenita y se producen a velocidades fuera del equilibrio [30]. La ferrita Widmanstatten placas laterales secundarias crecen a partir de la ferrita equiaxial [30].

Cabe recalcar que la ferrita equiaxial recibe varios nombres, dependiendo del autor, así tenemos que algunos autores la llaman: ferrita proeutectoide, ferrita alotriomórfica y ferrita poligonal.

La Figura 4.11 muestra un diagrama esquemático de un corte transversal en varilla corrugada de acero, en la misma se puede apreciar las zonas donde se encuentran las distintas morfologías de *ferrita* y de *perlita*.

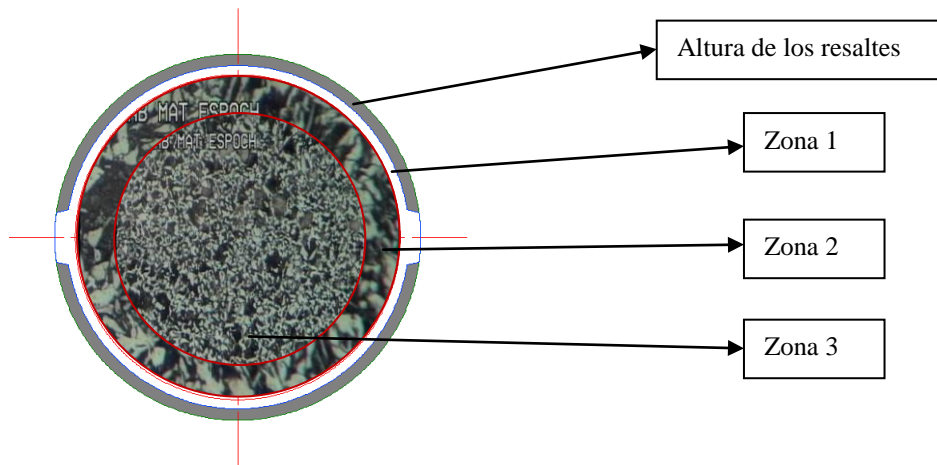


Figura 4.11: Diagrama esquemático en donde se muestran tres zonas. En estas zonas se aprecian distintas morfologías tanto para la ferrita, como para la perlita.

En la Figura 4.11, se distinguen tres zonas. La zona 1, es la parte de la probeta que fue descarburada, en esta zona se aprecia casi en su totalidad 100% ferrita; esta ferrita para enfriamientos de 1,1287; 0,9843; 1,2920; 1,1062 y 1,4204 °C/s es ferrita equiaxial y para velocidades de enfriamiento de 2,1368; 1,8939; 2,9762 y 2,6316 °C/s es ferrita maciza. El espesor de esta zona es alrededor de 0,5 mm.

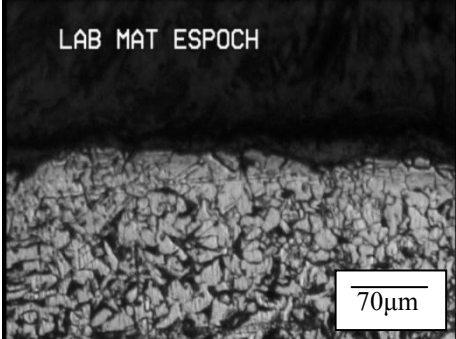



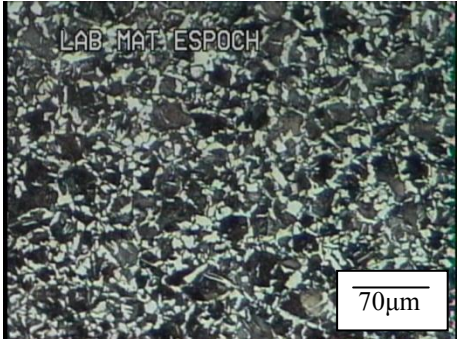
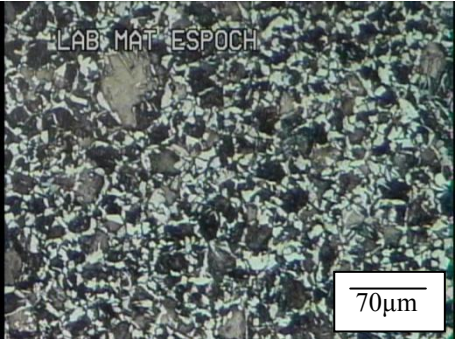
En la zona 2, encontramos ferrita Widmanstätten placas laterales primarias y secundarias para velocidades de enfriamiento de 2,1368; 1,8939; 2,9762 y 2,6316 °C/s. Para velocidades de enfriamiento inferiores a esta (1,1287; 0,9843; 1,2920; 1,1062 y 1,4204 °C/s) encontramos ferrita equiaxial. Para todas las velocidades de enfriamiento antes mencionadas en esta zona encontramos perlita media. El espesor de la zona 2 varía entre 2 y 3,6 mm dependiendo de la severidad del enfriamiento y del diámetro de la varilla.

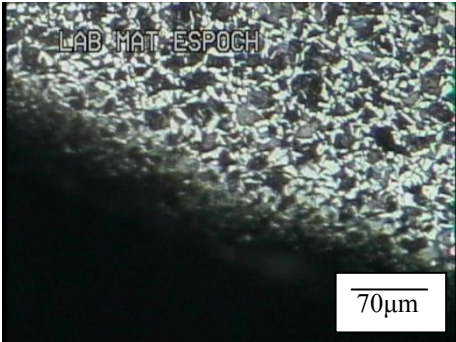

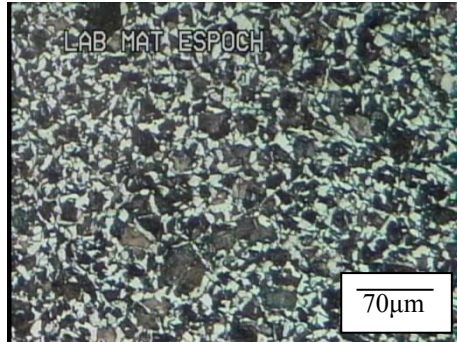

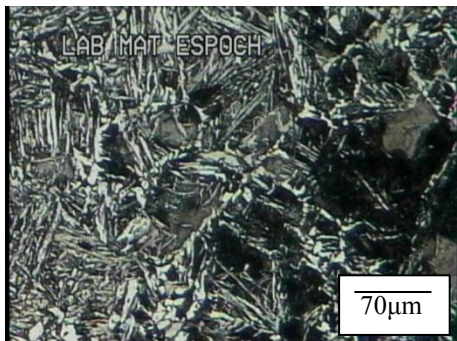
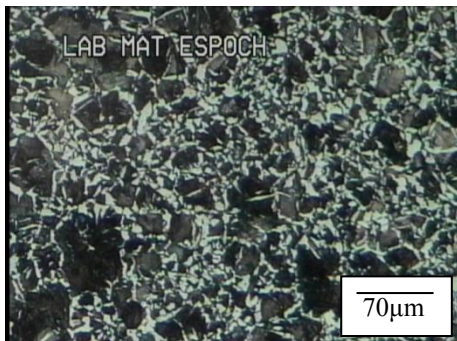
En la zona 3, encontramos para todas las velocidades de enfriamiento ferrita equiaxial y perlita gruesa.

Esta variación de morfologías se debe a que la varilla no es enfriada uniformemente; el exterior de la varilla se enfría más rápidamente que su centro.

Las fotografías más relevantes de cada zona se aprecian en las Tablas 4.6 y 4.7.

Tabla 4.6 MORFOLOGÍA DE LA FERRITA PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO EN VARILLAS CORRUGADAS DE 12 MM DE DIÁMETRO.

Velocidad de enfriamiento (°C/s)	Zona 1: 100X	Zona 2: 100X	Zona 3: 100X	Morfología de la ferrita
1,1287	 <p>LAB MAT ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>LAB MAT ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>LAB MAT ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	<p>Zona 1: Ferrita alotriomórfica Zona 2: Ferrita alotriomórfica Zona 3: Ferrita alotriomórfica</p> <p>Ferrita alotriomórfica = ferrita equiaxial</p>
1,2920	 <p>LAB MAT ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>LAB MAT ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>LAB MAT ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	<p>Zona 1: Ferrita alotriomórfica Zona 2: Ferrita alotriomórfica Zona 3: Ferrita alotriomórfica</p> <p>Ferrita alotriomórfica = ferrita equiaxial</p>

<p>1,4204</p>	 <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>Nital 2% 100X</p>	<p>Zona 1: Ferrita alotriomórfica Zona 2: Ferrita alotriomórfica Zona 3: Ferrita alotriomórfica</p> <p>Ferrita alotriomórfica = ferrita equiaxial</p>
<p>2,1368</p>	 <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>Nital 2% 100X</p>	<p>Zona 1: Ferrita maciza Zona 2: Ferrita Widmanstatten placas laterales primarias y secundarias Zona 3: Ferrita alotriomórfica</p> <p>Ferrita alotriomórfica = ferrita equiaxial</p>


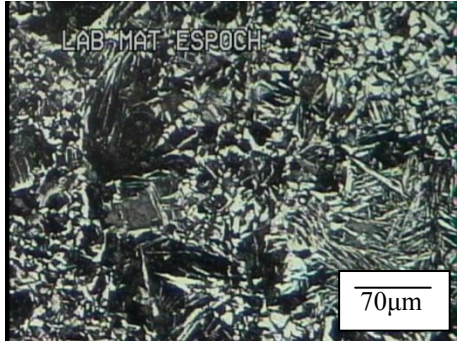
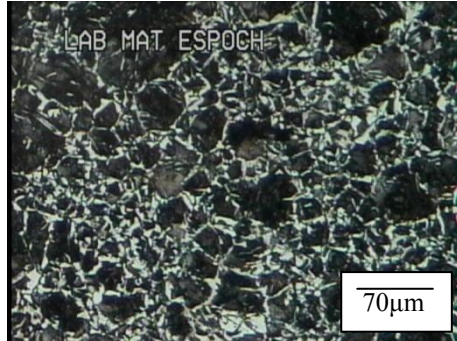
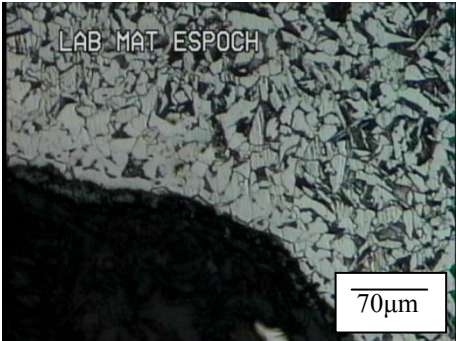
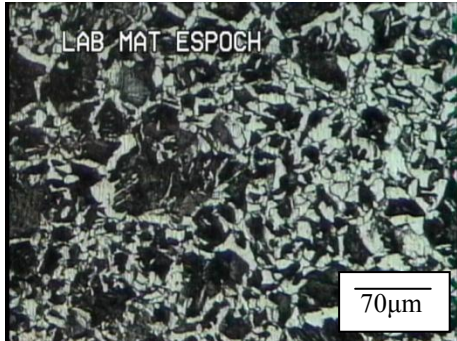
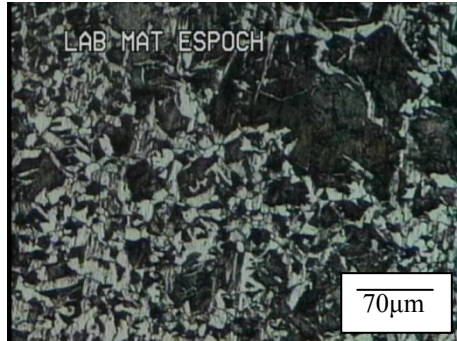

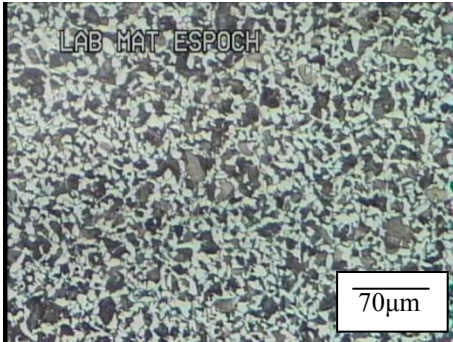
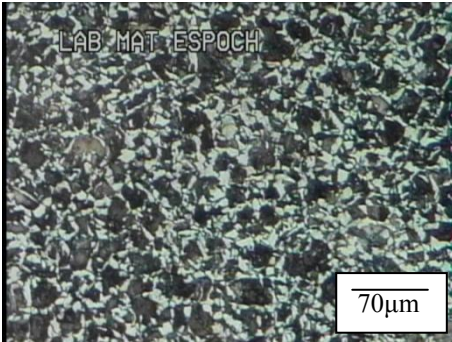
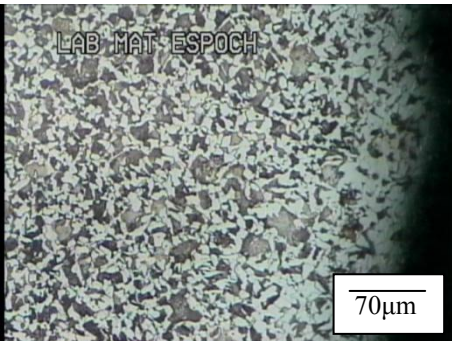
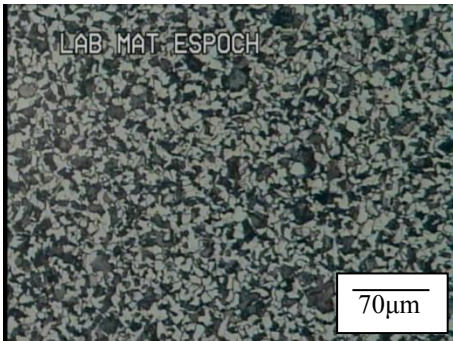
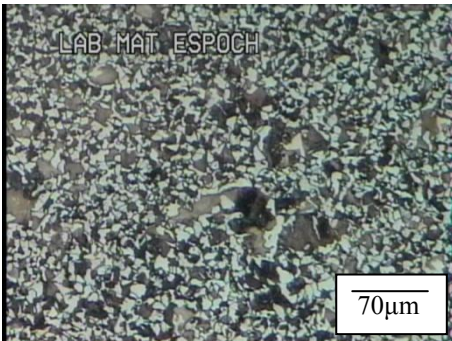
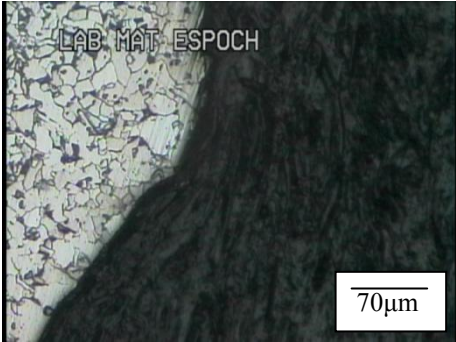
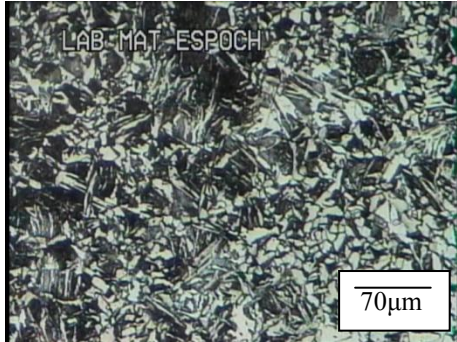
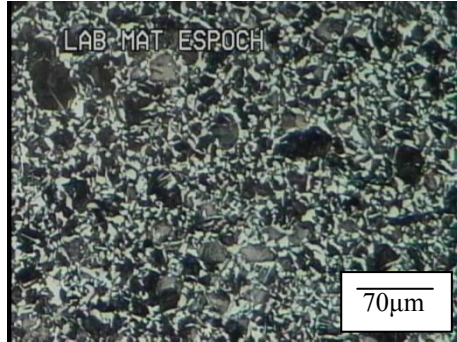

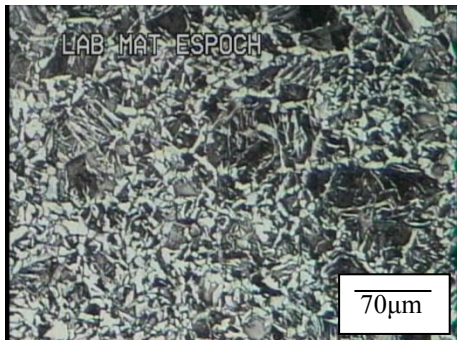
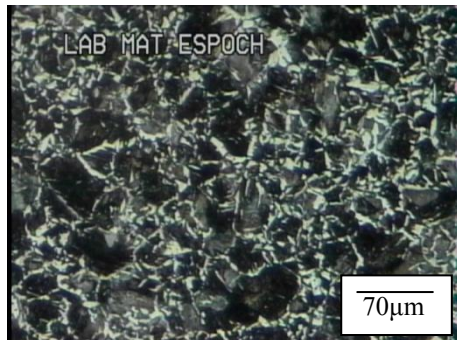
<p>2,9762</p>	 <p>LAB MAT ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>LAB MAT ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>LAB MAT ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	<p>Zona 1: Ferrita maciza Zona 2: Ferrita Widmanstatten placas laterales primarias y secundarias Zona 3: Ferrita alotriomórfica</p> <p>Ferrita alotriomórfica = ferrita equiaxial</p>
---------------	--	---	--	---

Tabla 4.7 MORFOLOGÍA DE LA FERRITA PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO EN VARILLAS CORRUGADAS DE 14 MM DE DIÁMETRO.

<p>Velocidad de enfriamiento (°C/s)</p>	<p>Zona 1: 100X</p>	<p>Zona 2: 100X</p>	<p>Zona 3: 100X</p>	<p>Morfología de la ferrita</p>
<p>0,9843</p>	 <p>LAB MAT ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>LAB MAT ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>LAB MAT ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	<p>Zona 1: Ferrita alotriomórfica Zona 2: Ferrita alotriomórfica Zona 3: Ferrita alotriomórfica</p> <p>Ferrita alotriomórfica = ferrita equiaxial</p>

<p>1,1062</p>	 <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>Nital 2% 100X</p>	<p>Zona 1: Ferrita alotriomórfica Zona 2: Ferrita alotriomórfica Zona 3: Ferrita alotriomórfica</p> <p>Ferrita alotriomórfica = ferrita equiaxial</p>
<p>-----</p>	 <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>Nital 2% 100X</p>	<p>Zona 1: Ferrita alotriomórfica Zona 2: Ferrita alotriomórfica Zona 3: Ferrita alotriomórfica</p> <p>Ferrita alotriomórfica = ferrita equiaxial</p>

<p>1,8939</p>	 <p>LAB. MAT. ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>LAB. MAT. ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>LAB. MAT. ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	<p>Zona 1: Ferrita maciza Zona 2: Ferrita Widmanstatten placas laterales primarias y secundarias Zona 3: Ferrita alotriomórfica</p> <p>Ferrita alotriomórfica = ferrita equiaxial</p>
<p>2,6316</p>	 <p>LAB. MAT. ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>LAB. MAT. ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	 <p>LAB. MAT. ESPOCH</p> <p>Nital 2% 100X</p>	<p>Zona 1: Ferrita maciza Zona 2: Ferrita Widmanstatten placas laterales primarias y secundarias Zona 3: Ferrita alotriomórfica</p> <p>Ferrita alotriomórfica = ferrita equiaxial</p>

Para caracterizar la perlita se utilizó el método de comparación fotográfica y además se realizó un ensayo de micro dureza Vickers para determinar el tipo de perlita presente en las probetas de varilla corrugada de 12 y 14 mm de diámetro en estado de suministro y tratadas térmicamente. En la Figura 4.12 se muestran las dos clases de perlita encontradas en las probetas de varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro.

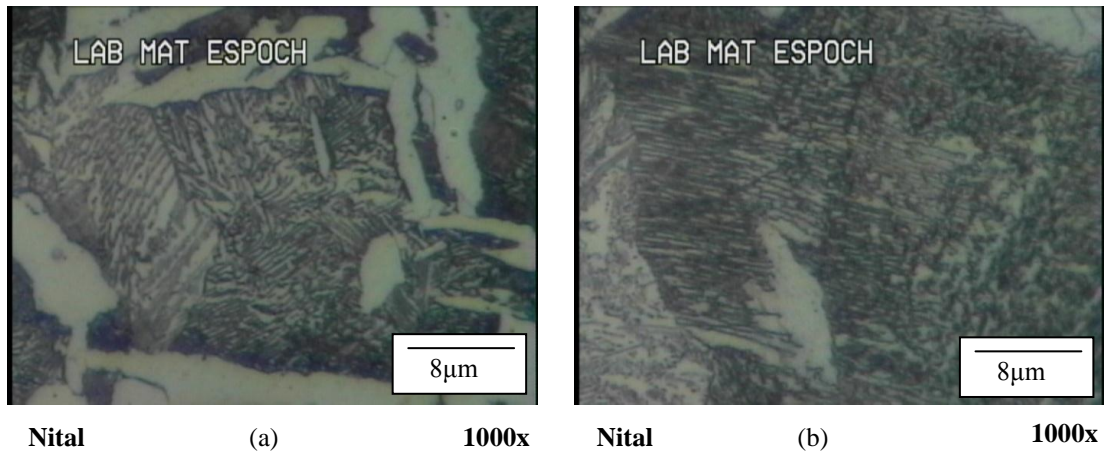


Figura 4.12: Fotografía de (a) perlita gruesa y (b) perlita media. Tomada a una ampliación de 1000x

Los resultados del ensayo de micro dureza Vickers arrojó que para la Figura 4.12 (a) corresponde una dureza de 177HV ($\approx 177\text{HB}$) y para la Figura 4.12 (b) 196HV ($\approx 196\text{HB}$). Comparando la dureza obtenida con la que presenta la perlita gruesa y la perlita fina (ver Figura 4.13), y comparando las fotografías con las que se ilustra en la Figura 4.14; podemos concluir que la perlita de la Figura 4.12 (a) es *perlita gruesa* y la de la Figura 4.12 (b) es *perlita media*.

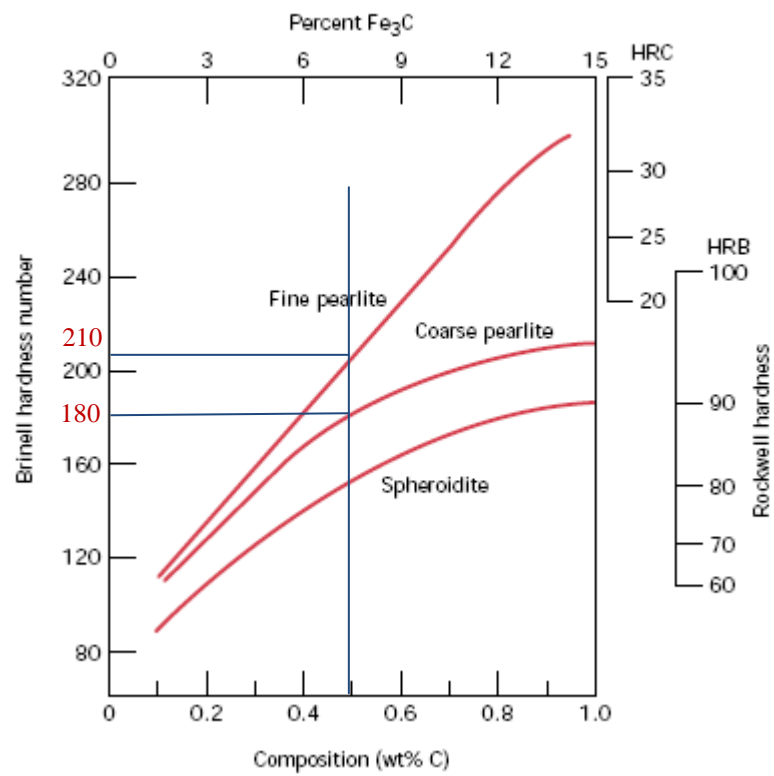


Figura 4.13: Durezas obtenidas para la perlita gruesa y perlita fina; con un contenido de carbono de 0,5% [9].

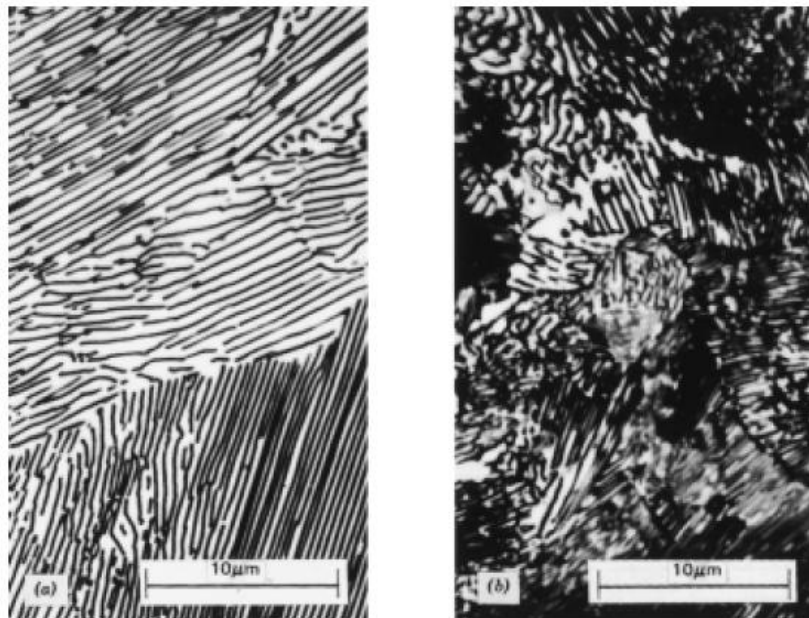


Figura 4.14: Fotografía de (a) perlita gruesa y (b) perlita fina. 3000x [9].

4.3. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS.

4.3.1. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS DE DUREZA.

Los resultados que se obtuvieron para el ensayo de dureza se muestran en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: DUREZA BRINELL OBTENIDA PARA CADA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO (VARILLAS DE 12 Y 14 mm DE DIÁMETRO)

Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=12mm	Dureza Brinell (HB)	Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=14mm	Dureza Brinell (HB)
1,1287	148,47	0,9843	145,323
1,2920	159,135	1,1062	156,667
1,4204	162,145	-----	160,46
2,1368	195,61	1,8939	194,81
2,9762	214,7	2,6316	212,94

En color gris se marcan las varillas corrugadas de 12 y 14mm de diámetro en condiciones de suministro.

El ensayo de dureza Brinell se realizó tanto en la sección transversal como en la longitudinal, los valores que se muestran en la Tabla 4.8 son valores promedios.

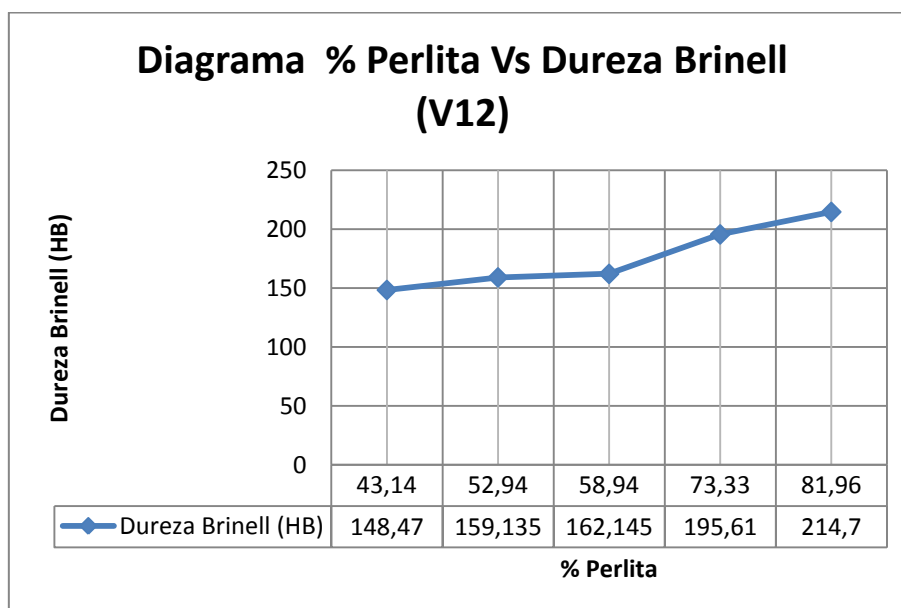


Figura 4.15: Diagrama % Perlita Vs Dureza Brinell para varillas corrugadas de 12 mm de diámetro tratadas térmicamente

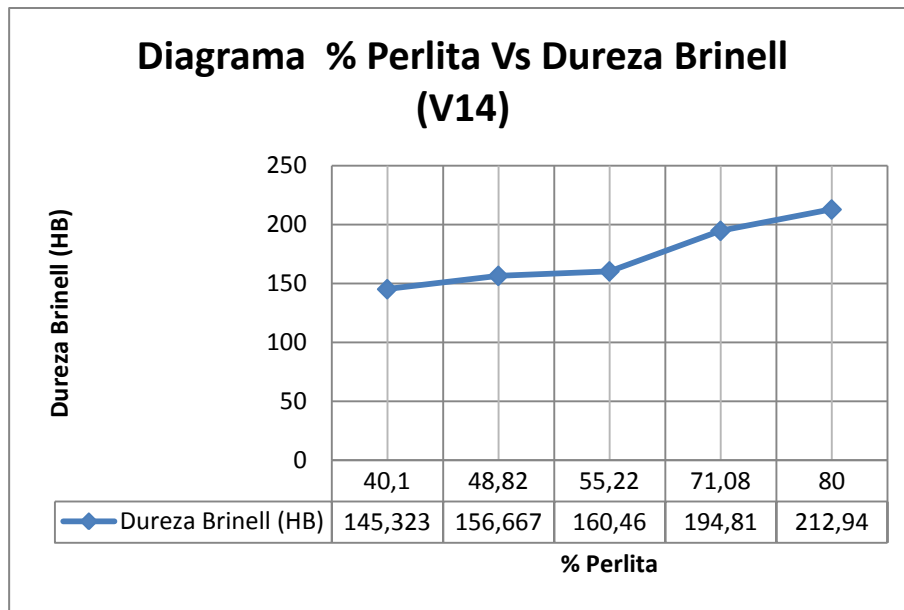


Figura 4.16: Diagrama % Perlita Vs Dureza Brinell para varillas corrugadas de 14 mm de diámetro tratadas térmicamente

En las Figuras 4.15 y 4.16 se muestran los diagramas %Perlita Vs Dureza Brinell para probetas de 12 y 14 mm de diámetro. En estas figuras se observa que la mayor dureza poseen las probetas que tienen un porcentaje de perlita de 81,96% para varillas de 12 mm de diámetro y 80% para varillas de 14 mm de diámetro; estas durezas corresponden a 214,7 HB y 212,94 HB respectivamente. Estos porcentajes de perlita se obtuvieron bajo velocidades de enfriamiento de 2,9762 y 2,6316 °C/s para varillas de 12 y 14 mm de diámetro respectivamente; estas velocidades de enfriamiento son las más altas realizadas en este estudio.

A continuación se presenta una comparación entre la dureza calculada y la dureza teórica. La dureza teórica se la obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$HB = \frac{(\%P)(210) + (\%\alpha)(90)}{100} \quad (4.1)$$

Donde:

(%P): porcentaje de perlita

(210): dureza Brinell de la perlita fina obtenida en la Figura 4.13.

(%α): porcentaje de ferrita

(90): dureza Brinell de la ferrita

Tabla 4.9: DUREZA BRINELL CALCULADA Y TEÓRICA OBTENIDA PARA DISTINTAS VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO

Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=12mm	Dureza Brinell Calculada (HB)	Dureza Brinell Teórica (HB)	Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=14mm	Dureza Brinell Calculada (HB)	Dureza Brinell Teórica (HB)
1,1287	148,47	146,082	0,9843	145,323	142,13
1,2920	159,135	158,822	1,1062	156,667	153,466
1,4204	162,145	166,466	-----	160,46	161,786
2,1368	195,61	185,32	1,8939	194,81	182,404
2,9762	214,7	196,548	2,6316	212,94	194

En la Tabla 4.9 se observa que las durezas calculadas y teóricas para velocidades de enfriamiento de 1,1287; 1,2920; 1,4204; 0,9843 y 1,1062 °C/s son similares, ya que la dureza se la realizó a 2 mm de la superficie como lo muestra la Figura 4.17 y a esta distancia la perlita que se observa es perlita media.

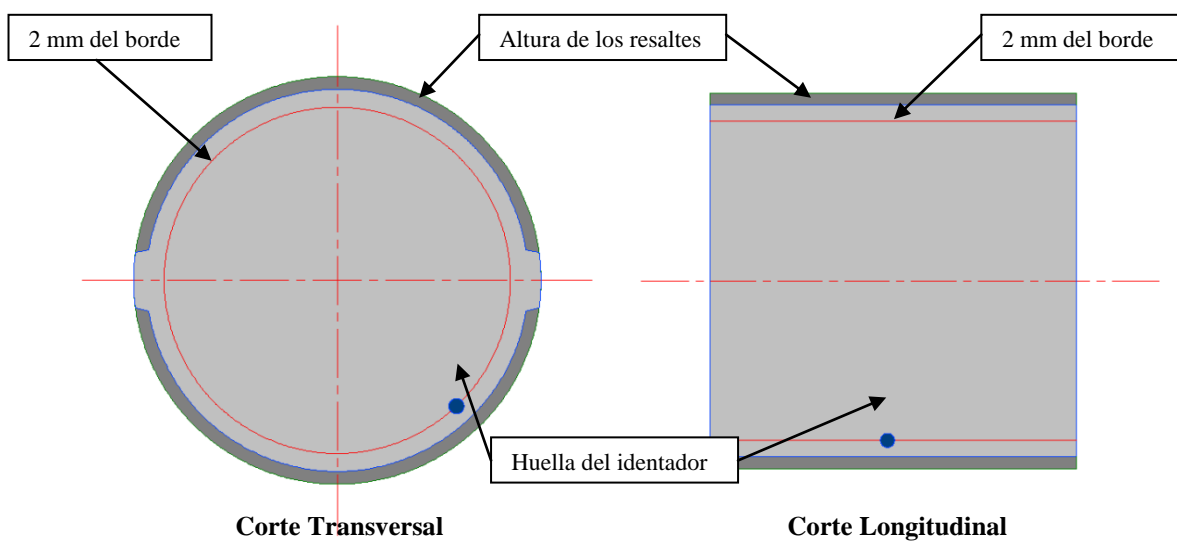


Figura 4.17: Esquema de la posición de la huella para el ensayo de dureza Brinell.

Para velocidades de enfriamiento de 2,1368; 2,9762; 1,8939 y 2,6316 °C/s la dureza calculada y la teórica no son iguales; esto se debe a la presencia de ferrita Widmanstatten placas laterales primarias y secundarias.

La ferrita Widmanstatten placas laterales primarias y secundarias presenta una baja resistencia a la tracción , baja tenacidad y alta dureza [30].

4.3.2. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN.

Los valores obtenidos para el ensayo de tracción se indicaron en el Capítulo III, literal 3.5.2.3. En las Figuras 4.18 y 4.19 se representan los valores obtenidos para en ensayo de tracción.

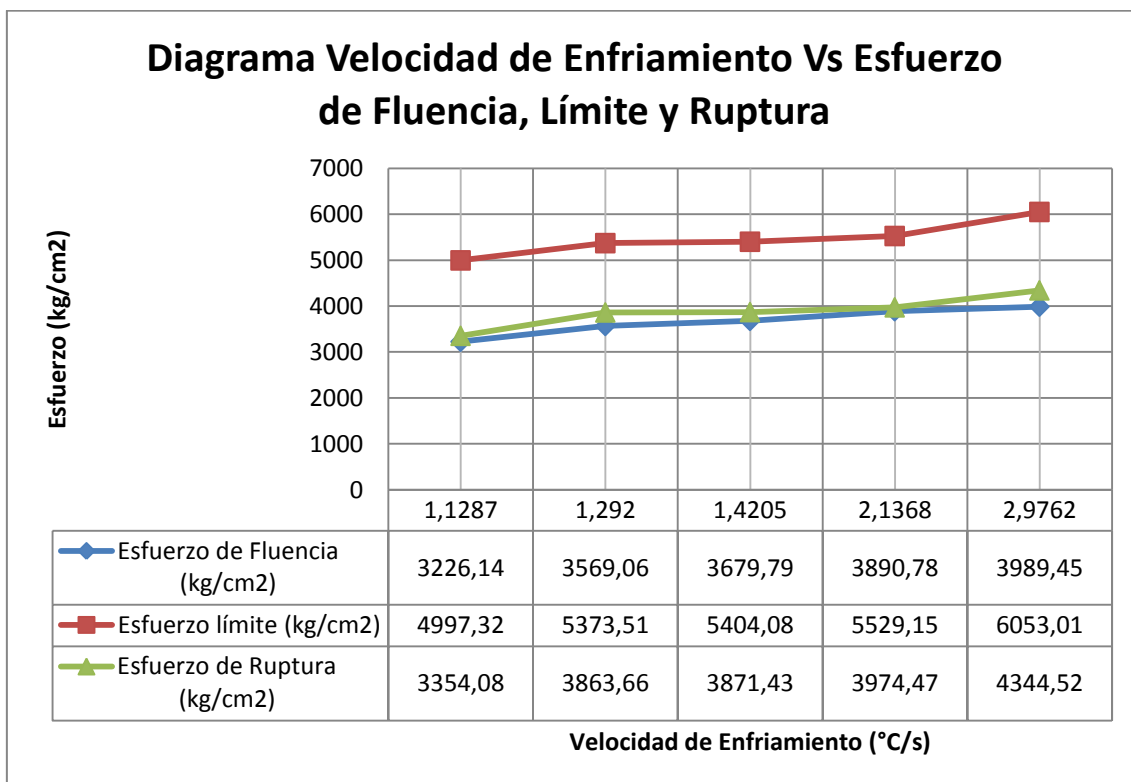


Figura 4.18: Diagrama Velocidad de Enfriamiento Vs Esfuerzo de Fluencia, Límite y Ruptura para varillas corrugadas de 12 mm de diámetro tratadas térmicamente

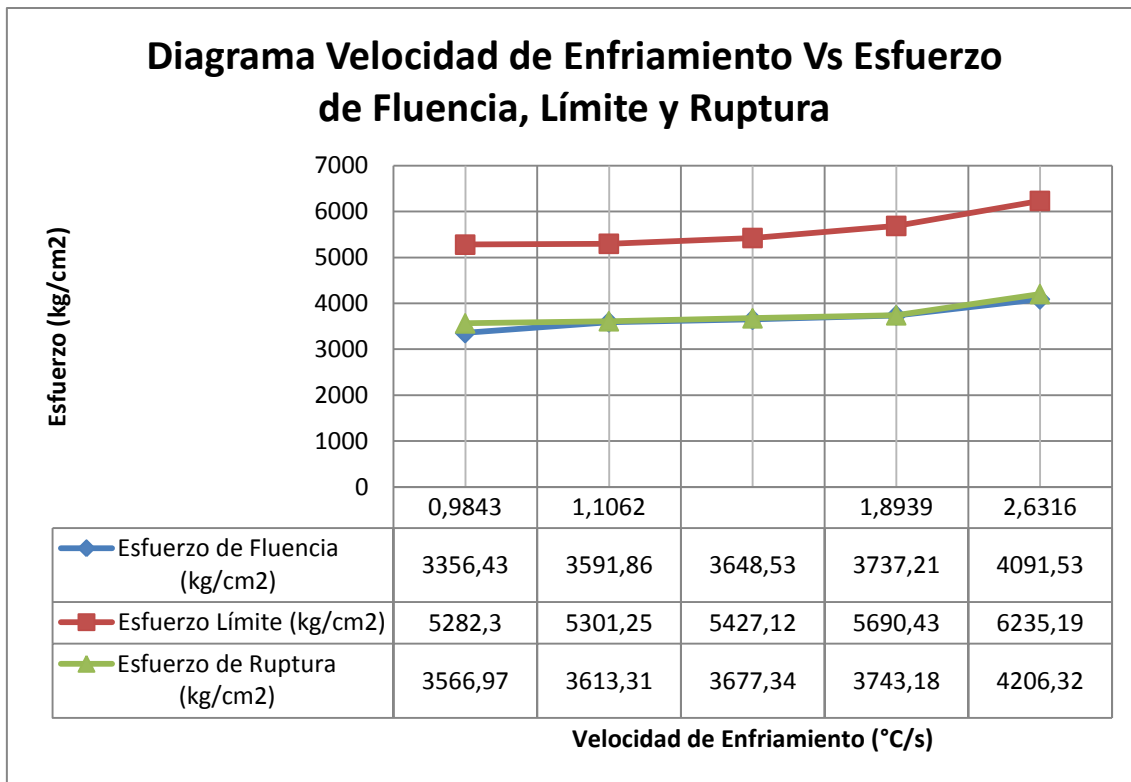


Figura 4.19: Diagrama Velocidad de Enfriamiento Vs Esfuerzo de Fluencia, Límite y Ruptura para varillas corrugadas de 14 mm de diámetro tratadas térmicamente

En las Figuras 4.18 y 4.19, se puede observar que para las varillas 12-2V y 14-2V con velocidades de enfriamiento de 2,9762°C/s y 2,6316°C/s respectivamente, se obtiene las mejores propiedades mecánicas, tanto para esfuerzos de fluencia, límite y ruptura.

Esta mayor resistencia se debe a la mayor presencia de perlita; como se mencionó en el literal 4.2.4 “Determinación del porcentaje de fases”; estos porcentajes de perlita corresponden a 81,96% y 80% para enfriamientos de 2,9762°C/s y 2,6316°C/s respectivamente.

A continuación se presenta una comparación entre el esfuerzo límite o resistencia última a la tracción calculada y el esfuerzo límite o resistencia última a la tracción teórica. La resistencia última a la tracción teórica se la obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$S_{ut} = \frac{(\%P)(120000) + (\%\alpha)(40000)}{100} \quad (4.2)$$

Donde:

(%P): porcentaje de perlita

(120000): Resistencia última a la tracción en lb/pulg² de la perlita [10].

(%α): porcentaje de ferrita

(40000): Resistencia última a la tracción en lb/pulg² de la ferrita [10].

Tabla 4.10: RESISTENCIA ÚLTIMA A LA TRACCIÓN CALCULADA Y TEÓRICA OBTENIDA PARA DISTINTAS VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO

Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=12mm	Sut Calculado (kg/cm²)	Sut Teórico (kg/cm²)	Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=14mm	Sut Calculado (kg/cm²)	Sut Teórico (kg/cm²)
1,1287	4997,32	5238,71	0,9843	5282,30	5067,73
1,2920	5373,51	5789,92	1,1062	5301,25	5558,19
1,4204	5404,08	6120,64	-----	5427,12	5918,16
2,1368	5529,15	6936,48	1,8939	5690,43	6810,21
2,9762	6053,01	7422,17	2,6316	6235,19	7311,96

La diferencia entre el Sut calculado y el Sut teórico que muestra la Tabla 4.10 se debe a la presencia de perlita media y ferrita Widmanstätten placas laterales primarias y secundarias; como se determinó en el literal 4.2.4 “Determinación del porcentaje de fases”. La ecuación 4.2 utiliza la resistencia última a la tracción de la perlita gruesa y ferrita proeutectoide, microconstituyentes obtenidos en el recocido.

La perlita media presenta una estructura más fina que la perlita gruesa; Las placas de cementita más próximas entre sí tienden a endurecer la ferrita, aumentando así la dureza de la perlita; la resistencia a la tracción y la tenacidad disminuyen [30].

La ferrita Widmanstätten placas laterales primarias y secundarias presenta una baja resistencia a la tracción, baja tenacidad y alta dureza [30].

4.4. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS.

4.4.1. ANÁLISIS DEL ENSAYO DE DOBLADO.

En los análisis de doblado se estudió por una parte la carga máxima que se requiere para realizar el doblado en probetas que fueron tratadas térmicamente; como también se analizó con la ayuda de ensayos no destructivos – líquidos penetrantes la presencia de fisuras y grietas en el lado exterior del doblado. Las normas ecuatorianas NTE INEN 0102:2003-3R y NTE INEN 2167:2003-1R, utilizadas para el ensayo de doblado; recomiendan que no deben presentar agrietamiento en el lado exterior del doblado.






A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron para probetas de 12 y 14 mm de diámetro tratadas térmicamente.







Tabla 4.11: RESULTADOS DEL ENSAYO DE DOBLADO PARA PROBETAS DE 12 Y 14 mm DE DIÁMETRO.






Identificación	Velocidad de enfriamiento (°C/s)	Carga Máxima (kgf)
12-H50	1,1287	962,50
12-N20	1,2920	1225
12-1V	2,1368	1035
12-2V	2,9762	1002,5
14-H50	0,9843	1685
14-N20	1,1062	2050
14-1V	1,8939	1740
14-2V	2,6316	1707,5

A continuación se presentan los resultados del ensayo de líquidos penetrantes para observar la presencia de fisuras y grietas.

Tabla 4.12: RESULTADOS DEL ENSAYO DE LÍQUIDOS PENETRANTES

Identificación	Imágenes	Observación
12-H50 01 (12HC01)		Sin fisuras y grietas
12-H50 02 (12HC02)		Sin fisuras y grietas
14-H50 01 (14HC01)		Sin fisuras y grietas
14-H50 02 (14HC02)		Sin fisuras y grietas
12-H20 01 (12N01)		Sin fisuras y grietas

12-N20 02 (12N02)	 A photograph of a pink, twisted ring-shaped object placed on a metal ruler. The ruler shows markings from 7 to 16. The object is positioned between the 8 and 15 marks.	Sin fisuras y grietas
14-N20 01 (14N01)	 A photograph of a pink, twisted ring-shaped object placed on a metal ruler. The ruler shows markings from 8 to 18. The object is positioned between the 10 and 17 marks.	Sin fisuras y grietas
14-N20 02 (14N02)	 A photograph of a pink, twisted ring-shaped object placed on a metal ruler. The ruler shows markings from 7 to 18. The object is positioned between the 10 and 17 marks.	Sin fisuras y grietas
12-1V 01 (12AF01)	 A photograph of a pink, twisted ring-shaped object placed on a metal ruler. The ruler shows markings from 4 to 15. The object is positioned between the 5 and 12 marks.	Sin fisuras y grietas
12-1V 02 (12AF02)	 A photograph of a pink, twisted ring-shaped object placed on a metal ruler. The ruler shows markings from 7 to 15. The object is positioned between the 8 and 14 marks.	Sin fisuras y grietas
14-1V 01 (14AF01)	 A photograph of a pink, twisted ring-shaped object placed on a metal ruler. The ruler shows markings from 5 to 18. The object is positioned between the 8 and 15 marks.	Sin fisuras y grietas

<p>14-1V 02 (14AF02)</p>		<p>Sin fisuras y grietas</p>
<p>12-2V 01 (12NSF01)</p>		<p>Sin fisuras y grietas</p>
<p>12-2V 02 (12NSF02)</p>		<p>Sin fisuras y grietas</p>
<p>14-2V 01 (14NSF01)</p>		<p>Sin fisuras y grietas</p>
<p>14-2V 02 (14NSF02)</p>		<p>Sin fisuras y grietas</p>

Se puede observar en la Tabla 4.12 que no existen fisuras en el lado exterior del dobles de ninguna de las probetas enfriadas a diferentes velocidades de enfriamiento. Por lo cual se puede concluir que las muestras cumplen satisfactoriamente los requerimientos que impone las normas ecuatorianas NTE INEN 0102:2003-3R y NTE INEN 2167:2003-1R.

4.4.2. ANÁLISIS DEL ENSAYO DE IMPACTO.

El ensayo de impacto fue realizado según norma ASTM E23, en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la ESPOCH, el equipo utilizado fue: Pendulo Charpy – CEAST: para probetas tratadas térmicamente de 12 mm de diámetro y Péndulo Charpy – ESPOCH – INGENIERÍA MECÁNICA (Capacidad de Energía de la máquina E=335,4 Joule ó 34,22 kg-m): para probetas tratadas térmicamente de 14 mm de diámetro.

Las probetas de 12 mm de diámetro fueron maquinadas a tamaño estándar, (40x6x4) mm y ranuradas a 2 mm de profundidad a un ángulo de 45°, mientras que las probetas de 14 mm de diámetro fueron maquinadas a tamaño estándar, (55x10x10), con las mismas características de ranurado que las anteriores.

Los resultados que se obtuvieron se muestran a continuación.

Tabla 4.13: RESULTADOS DEL ENSAYO DE IMPACTO

Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=12mm	Energía absorbida Tenacidad relativa (J)	Velocidad de enfriamiento (°C/s) D=14mm	Energía absorbida Tenacidad relativa (J)
1,1287	20,23	0,9843	65
1,2920	21,07	1,1062	67,2
1,4204	20,50	-----	65,4
2,1368	18,77	1,8939	62,2
2,9762	18,57	2,6316	60,2

En color gris se marcan las varillas corrugadas de 12 y 14mm de diámetro en condiciones de suministro.

De la descripción de la prueba, es obvio que la prueba de impacto no da la tenacidad verdadera, sino su comportamiento en función de una muesca en particular; sin embargo, los resultados son útiles para propósitos de *comparación*.

Los valores de energía determinados en este ensayo son comparaciones cualitativas sobre una probeta seleccionada y no puede convertirse en cifras de energía que sirvan para cálculos de diseño de ingeniería.

El comportamiento de la ranura indicado en un ensayo individual es aplicable solamente al tamaño de la probeta, la geometría de la ranura, y las condiciones de ensayo involucradas, y no puede aplicarse a otros tamaños de probetas y otras condiciones. Puesto que el tamaño de las probetas maquinadas son diferentes para varillas de 12 mm de diámetro y de 14 mm de diámetro como se mencionó anteriormente, *no* se pueden comparar los resultados cualitativos de las probetas de 12 mm de diámetro con las probetas de 14 mm de diámetro; y además se utilizan equipos diferentes [24].

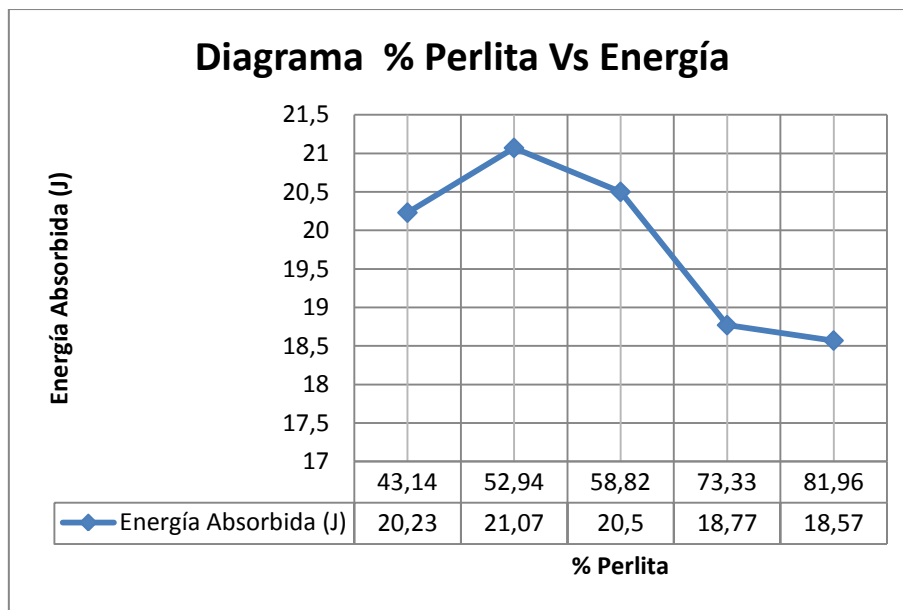


Figura 4.20: Diagrama % Perlita Vs Energía Absorbida (J), para varillas corrugadas de 12 mm de diámetro tratadas térmicamente

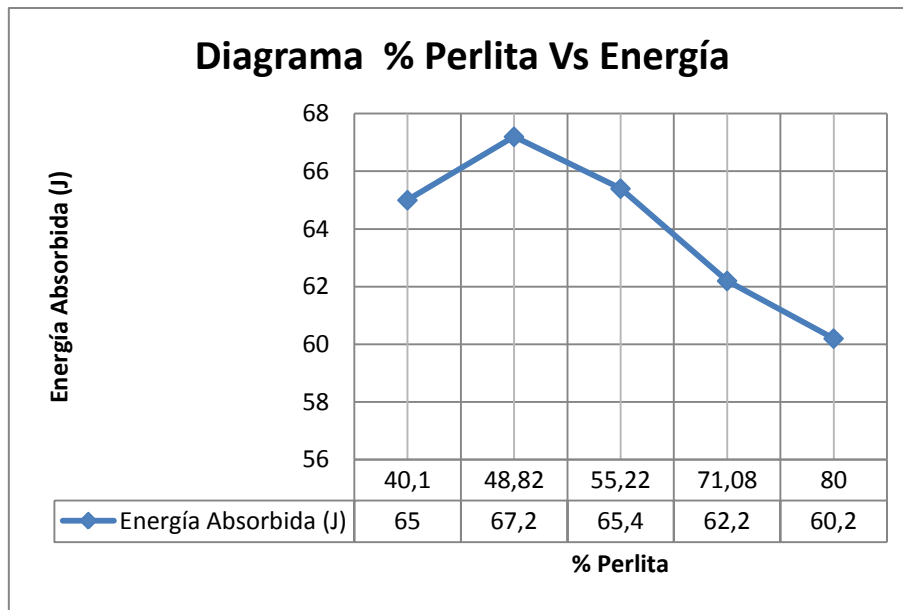


Figura 4.21: Diagrama % Perlita Vs Energía Absorbida (J), para varillas corrugadas de 14 mm de diámetro tratadas térmicamente

Como se observó en el literal 4.2.4 “Determinación del porcentaje de fases”, al aumentar la velocidad de enfriamiento aumenta el porcentaje de perlita y por consecuencia disminuye la resistencia al impacto como se observa en las Figuras 4.20 y 4.21, puesto que la perlita posee características de baja resistencia al impacto [9].

Para porcentajes de perlita de 43,14% y 40,1% correspondientes a velocidades de enfriamiento de 1,1287 y 0,9843 °C/s respectivamente observamos que la resistencia al impacto es menor en comparación a la velocidad de enfriamiento más próxima (1,2920 y 1,1062 °C/s). Esto no tiene sentido, puesto que al disminuir la velocidad de enfriamiento debe aumentar la resistencia al impacto; pero esto no se observa en estos enfriamientos. Esta disminución en la resistencia al impacto se debe al tamaño grande de grano que presentan estos enfriamientos. Como se observó en el literal 4.2.3 “Análisis de la determinación del tamaño de grano”. Obteniendo tamaños de grano en el interior de la varilla de 8 ASTM.

A pesar que el porcentaje de perlita es menor en comparación a los otros enfriamientos, la presencia de tamaños de grano grande (8 ASTM) hace que las probetas enfriadas a estas velocidades presenten una resistencia al impacto menor a la esperada.

4.5. ESTABLECER LA RELACIÓN MICROESTRUCTURAS – PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA VARILLA.

De los análisis que se obtuvieron en los literales anteriores, se establece una relación entre microestructuras y propiedades mecánicas, con el objetivo de observar cual de las diferentes velocidades de enfriamiento presentan mejores propiedades.

Una de las propiedades mecánicas más utilizadas en el diseño estructural es la resistencia a la tracción, específicamente el límite de fluencia (S_y) y el límite de ruptura o resistencia última a la tracción (S_{ut}).

Vale recordar que el hormigón armado (o estructural), también conocido como concreto reforzado es una mezcla de cemento, grava, arena y *acero de refuerzo*; combinando las propiedades mecánicas del concreto y del acero, creada para atender las sollicitaciones de compresión y tracción respectivamente, debido a que el hormigón sin refuerzo no puede soportar altas cargas de tracción, lo que el acero hace con facilidad [29].

El acero utilizado en estructuras (barras y cables) es un material apto para resistir sollicitaciones traccionantes, lo que lo convierte en el componente ideal para combinarse técnicamente con el hormigón simple, con el que conforma el hormigón armado y el hormigón preesforzado [29].

Como se observa las propiedades más relevantes para varillas corrugadas de acero utilizadas como refuerzos en el hormigón armado, es la resistencia a la tracción. Por este motivo se realiza a continuación una relación entre las microestructuras obtenidas en los diferentes ensayos térmicos con la resistencia a la tracción.

Tabla 4.14: RELACIÓN ENTRE LAS MICROESTRUCTURAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN VARILLAS DE 12 mm DE DIÁMETRO

Velocidad de enfriamiento (°C/s)	% Ferrita				% Perlita		Esfuerzo de cedencia o fluencia (kg/cm ²)	Esfuerzo límite o máximo (kg/cm ²)	Esfuerzo de ruptura (kg/cm ²)
1,1287	56,86				43,14		3226,14	4997,32	3354,08
	% α_M	% α_{Wp}	% α_{Ws}	% α_e	%P _M	%P _G			
	0	0	0	56,86	12,94	30,20			
1,2920	47,06				52,94		3569,06	5373,51	3863,66
	% α_M	% α_{Wp}	% α_{Ws}	% α_e	%P _M	%P _G			
	0	0	0	47,06	22,06	30,88			
1,4205	41,18				58,82		3679,79	5404,08	3871,43
	% α_M	% α_{Wp}	% α_{Ws}	% α_e	%P _M	%P _G			
	0	0	0	41,18	25,49	33,33			
2,1368	26,66				73,33		3890,78	5529,15	3974,47
	% α_M	% α_{Wp}	% α_{Ws}	% α_e	%P _M	%P _G			
	1,20	0,43	3,76	21,27	40,33	33			
2,9762	18,04				81,96		3989,45	6053,01	4344,52
	% α_M	% α_{Wp}	% α_{Ws}	% α_e	%P _M	%P _G			
	1,20	0,82	5,43	10,59	47,81	34,15			

Tabla 4.15: RELACIÓN ENTRE LAS MICROESTRUCTURAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN VARILLAS DE 14 mm DE DIÁMETRO

Velocidad de enfriamiento (°C/s)	% Ferrita				% Perlita		Esfuerzo de cedencia o fluencia (kg/cm ²)	Esfuerzo límite o máximo (kg/cm ²)	Esfuerzo de ruptura (kg/cm ²)
0,9843	59,90				40,10		3356,43	5282,30	3566,97
	% α_M	% α_{Wp}	% α_{Ws}	% α_e	%P _M	%P _G			
	0	0	0	59,90	12,03	28,07			
1,1062	51,18				48,82		3591,86	5301,25	3613,31
	% α_M	% α_{Wp}	% α_{Ws}	% α_e	%P _M	%P _G			
	0	0	0	51,18	20,34	28,48			
-----	44,78				55,22		3648,53	5427,12	3677,34
	% α_M	% α_{Wp}	% α_{Ws}	% α_e	%P _M	%P _G			
	0	0	0	4,78	23,93	31,29			
1,8939	28,92				71,08		3737,21	5690,43	3743,18
	% α_M	% α_{Wp}	% α_{Ws}	% α_e	%P _M	%P _G			
	1,22	0,45	4,38	22,87	39,10	31,98			
2,6316	20,00				80,00		4091,53	6235,19	4206,32
	% α_M	% α_{Wp}	% α_{Ws}	% α_e	%P _M	%P _G			
	1,22	0,85	6,33	11,6	46,67	33,33			

Como se observa en las Tablas 4.14 y 4.15, las mejores propiedades mecánicas, esfuerzo de cedencia o fluencia, esfuerzo límite o máximo y esfuerzo de ruptura; presentan aquellas varillas enfriadas bajo una corriente de aire proveniente de dos venteroles, como se mencionó en el Capítulo 3, literal 3.2.2.2.

Las varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro que fueron enfriadas en estas condiciones (velocidad de enfriamiento de 2,9762 °C/s para varillas de 12 mm de diámetro y 2,6316°C/s para varillas de 14 mm de diámetro) presentan microestructuras de ferrita maciza, ferrita Widmanstatten placas laterales primarias, ferrita Widmanstatten placas laterales secundarias, ferrita equiaxial (alotriomórfica), perlita gruesa y perlita media.

A pesar de la presencia de ferrita maciza, ferrita Widmanstatten placas laterales primarias y secundarias que presentan características de baja resistencia a la tracción, al igual que la perlita media [30]; las probetas que fueron enfriadas a estas velocidades presentan mejores propiedades mecánicas de tracción que las probetas que fueron enfriadas a una velocidad menor. Esta mejor resistencia se debe al aumento del porcentaje de perlita presente en estas probetas.

4.6. ANALIZAR QUE MICROESTRUCTURA PRESENTA PROPIEDADES ÓPTIMAS.

En las Figuras 4.22 y 4.23, se muestra el diagrama % perlita Vs Esfuerzo de fluencia, límite y ruptura para varillas de 12 y 14 mm de diámetro respectivamente.

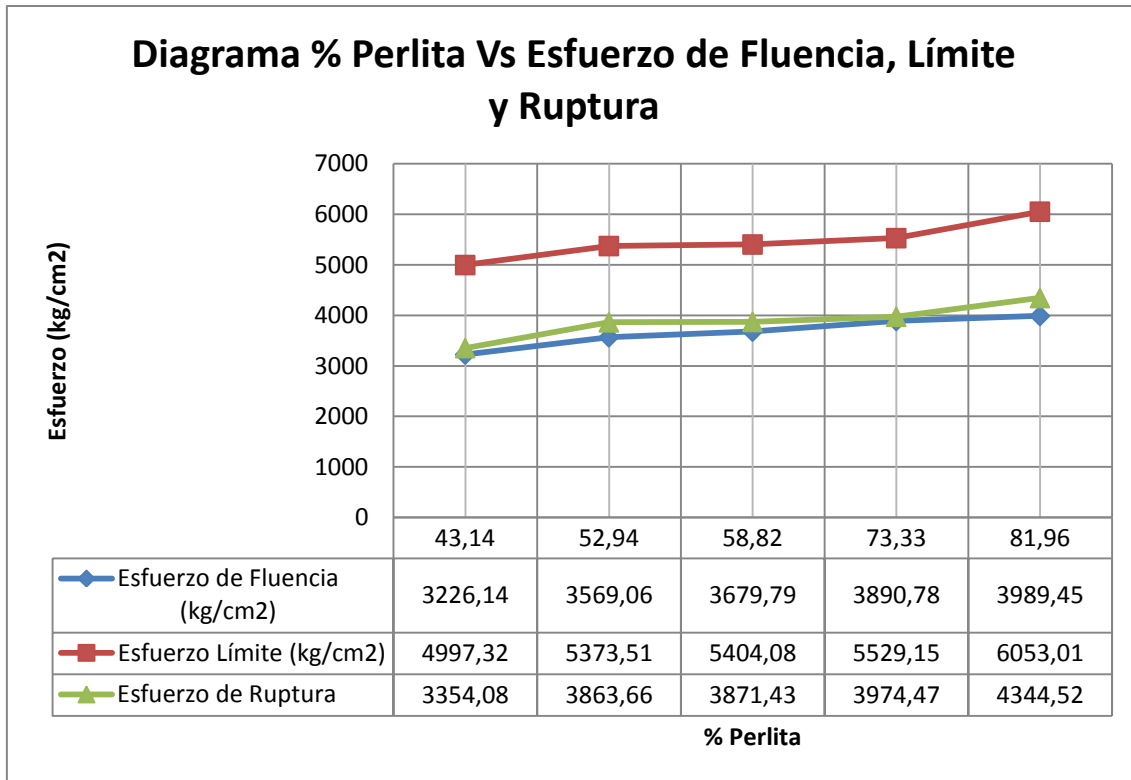


Figura 4.22: Diagrama % Perlita Vs Esfuerzo de Fluencia, Límite y Ruptura para varillas corrugadas de 12 mm de diámetro

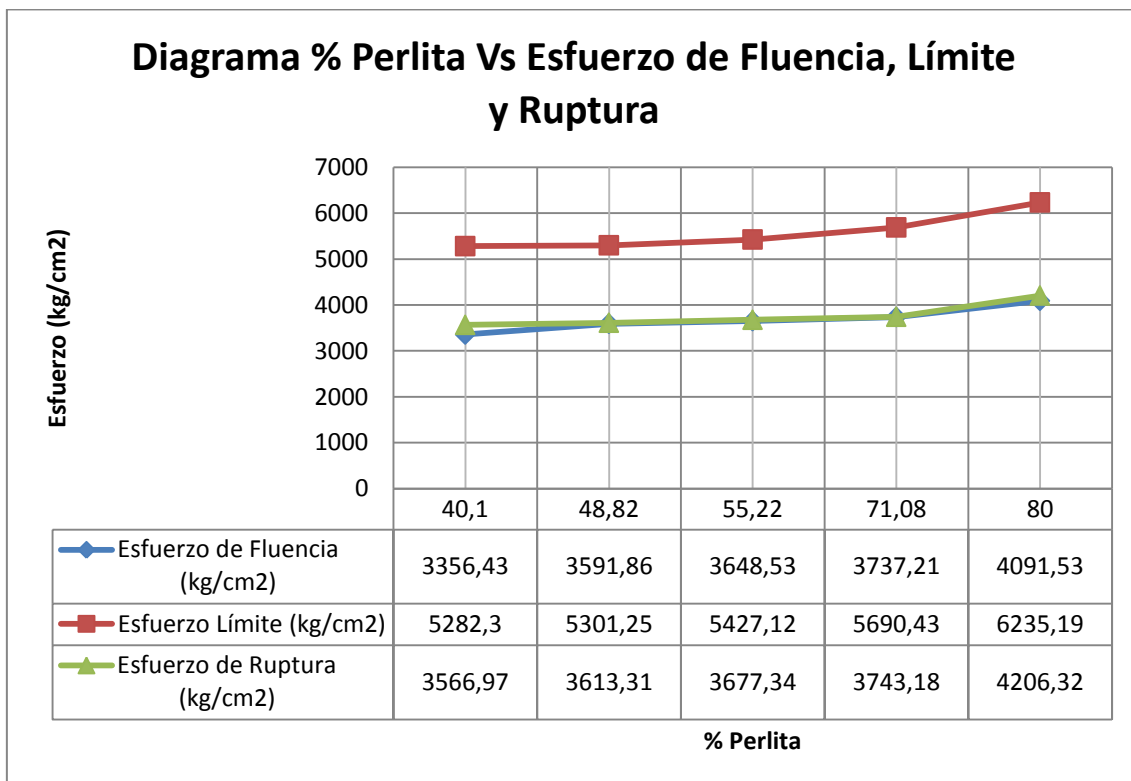


Figura 4.23: Diagrama % Perlita Vs Esfuerzo de Fluencia, Límite y Ruptura para varillas corrugadas de 14 mm de diámetro

En el Anexo 2 y 3 se presentan las curvas Esfuerzo – Deformación para cada porcentaje de perlita.

Las figuras 4.22 y 4.23 muestran la relación que existe entre las microestructuras (perlita y ferrita) presentes en varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro tratadas térmicamente y las propiedades mecánicas de tracción. Estas figuras muestran de una manera más gráfica las mejores propiedades que presentan las varillas enfriadas a una velocidad de 2,9762 °C/s para varillas de 12 mm de diámetro y de 2,6316 °C/s para varillas de 14 mm de diámetro; con porcentajes de perlita del 81,96% y 80% respectivamente.

Comparando las probetas enfriadas a estas velocidades (2,9762 y 2,6316 °C/s) con aquellas provenientes de fábrica a las cuales no se las realizó ningún tratamiento térmico, los resultados que se obtienen son los siguientes.

Tabla 4.16: COMPARACIÓN ENTRE PROBETAS 12-Fa, 14-Fa Y 12-2V, 14-2V.

	12-Fa	12-2V	Diferencia (%)	14-Fa	14-2V	Diferencia (%)
Esfuerzo de Fluencia (kg/cm²)	3679,79	3989,45	7,76	3648,53	4091,53	10,83
Esfuerzo Límite (kg/cm²)	5404,08	6053,01	10,72	5427,12	6235,19	12,96
Esfuerzo de Ruptura (kg/cm²)	3871,43	4344,52	10,89	3677,34	4206,32	12,58
Velocidad de Enfriamiento (°C/s)	1,4205	2,9762	52,27	-----	2,6316	-----

Como se puede observar en la Tabla 4.16 las probetas 12-2V y 14-2V presentan una mejora del 7,76% y 10,38% respectivamente para el esfuerzo de fluencia; 10,72% y 12,96% respectivamente para el esfuerzo límite; 10,89% y 12,58% respectivamente para el esfuerzo de ruptura.

Esto se logra únicamente con una mayor velocidad de enfriamiento (diferentes porcentajes de microconstituyentes), sin alterar la composición química. A pesar que al enfriar a mayor velocidad obtenemos microestructuras que presentan características de baja resistencia a la tracción, baja resistencia al impacto y mayor dureza (ferrita maciza,

ferrita Widmanstätten placas laterales primarias y secundarias y perlita media); el afinamiento de grano y el aumento del % de perlita contrarrestan estas propiedades.

El tamaño de grano, la dureza, y la resistencia al impacto para este enfriamiento (2,9762 y 2,6316 °C/s) se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 4.17: VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO, TAMAÑO DE GRANO, % PERLITA, DUREZA, RESISTENCIA AL IMPACTO Y ESFUERZO DE FLUENCIA PARA VARILLAS DE 12mm DE DIÁMETRO

Velocidad de enfriamiento (°C/s)	Tamaño de grano ASTM	% Perlita	Dureza (HB)	Energía (J)	Esfuerzo de fluencia Sy (kg/cm²)
1,1287	8,5	43,14	148,47	20,23	3226,14
1,2920	9,07	52,94	159,135	21,07	3569,06
1,4204	9,07	58,82	162,145	20,50	3679,79
2,1368	9,83	73,33	195,61	18,77	3890,78
2,9762	10	81,96	214,7	18,57	3989,45

Tabla 4.13: VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO, TAMAÑO DE GRANO, % PERLITA, DUREZA, RESISTENCIA AL IMPACTO Y ESFUERZO DE FLUENCIA PARA VARILLAS DE 14mm DE DIÁMETRO

Velocidad de enfriamiento (°C/s)	Tamaño de grano ASTM	% Perlita	Dureza (HB)	Energía (J)	Esfuerzo de fluencia Sy (kg/cm²)
0,9843	8,44	40,10	145,323	65	3356,43
1,1062	8,99	48,82	156,667	67,2	3591,86
-----	8,99	55,22	160,46	65,4	3648,53
1,8939	9,76	71,08	194,81	62,2	3737,21
2,6316	9,91	80	212,94	60,2	4091,53

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. CONCLUSIONES.

- Se determinó satisfactoriamente la relación que existe entre las microestructuras presentes en las varillas de acero y sus propiedades mecánicas.
- El tamaño, la distribución y el número de inclusiones presentes en las muestras de varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro, son pequeños; por lo que se puede concluir que el proceso de fabricación, refinación y laminación del acero es satisfactorio.
- El tamaño de grano que se pudo obtener de las muestras de varillas corrugadas de 12 y 14 mm de diámetro sometidas a diferentes velocidades de enfriamiento, muestran un tamaño de grano fino. El tamaño varía entre 8,5 ASTM a 10 ASTM, para el rango de enfriamiento usado en este estudio.
- Las microestructuras que se obtuvieron de las probetas de varillas, sometidas a diferentes velocidades de enfriamiento fueron ferrita y perlita. Las morfologías de estos dos microconstituyentes variaron de acuerdo a las velocidades de enfriamiento a las cuales fueron expuestas. La morfología de la perlita es, de perlita media para una región más próxima a la superficie y de perlita gruesa para una región ubicada en el centro de la varilla. Mientras que la morfología de la ferrita cambió a razón de la velocidad de enfriamiento. Para velocidades lentas presentó una morfología equiaxial (Ferrita Alotriomórfica) y para velocidades superiores presentó una morfología mixta; irregular (Ferrita Widmanstätten placas laterales primarias y secundarias), para una región más próxima a la superficie y equiaxial (Ferrita Alotriomórfica), para una región ubicada en el centro de la varilla.

- El incremento de la velocidad de enfriamiento, produce un incremento del porcentaje de perlita, aumentando del 43,14% al 81,96% para varillas de 12 mm de diámetro y del 40,10% al 80% para varillas de 14 mm de diámetro.
- La relación que se obtuvo entre la dureza y la velocidad de enfriamiento fue directamente proporcional; mientras aumenta la velocidad de enfriamiento, aumenta la dureza Brinell en las muestras de varillas corrugadas.
- Los resultados del ensayo de doblado fueron satisfactorios, puesto que todas las muestras enfriadas a distintas velocidades de enfriamiento pasaron los requerimientos que las normas ecuatorianas NTE INEN 0102:2003-3R y NTE INEN 2167:2003-1R exigen (Las muestras luego del ensayo de doblado no deben presentar fisuras o grietas en el lado exterior del doblez).
- La relación que se obtuvo entre la resistencia al impacto y la velocidad de enfriamiento fue inversamente proporcional; mientras aumenta la velocidad de enfriamiento disminuye la resistencia al impacto en las muestras de varillas corrugadas.
- Las mejores propiedades mecánicas que se obtuvieron fueron para aquellas probetas de varillas corrugadas que fueron enfriadas a una velocidad de 2,9762°C/s para varillas de 12 mm de diámetro y 2,6316°C/s para varillas de 14 mm de diámetro.
- Para varillas 12-2V y 14-2V con velocidades de enfriamiento antes mencionadas se obtuvo una mejora (en comparación con aquellas varillas en condiciones de suministro) del 10,96% en las propiedades mecánicas de tracción.
- Las probetas de varilla corrugada que fueron enfriadas a una velocidad de 2,9762°C/s para varillas de 12mm de diámetro y 2,6316°C/s para varillas de 14mm de diámetro; presentan microestructuras de perlita gruesa, perlita media, ferrita maciza, ferrita Widmanstätten placas laterales primarias y secundarias, y ferrita alotriomórfica (ferrita proeutectoide).

5.2. RECOMENDACIONES.

- Los resultados que se obtuvieron en este estudio, sólo son válidos para varillas corrugadas de 12 y 14mm de diámetro, porcentaje de carbono del 0,3% y porcentaje de carbono equivalente del 0,56%. Para otros porcentajes de carbono y otros diámetros de varillas corrugadas; no se asegura que los resultados sean los mismos.
- Realizar una nueva investigación en varillas corrugadas de 12 y 14mm de diámetro expuestas a velocidades de enfriamiento inferiores a las presentadas en este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Hormigón Armado.** Wikipedia. http://es.wikipedia.org/wiki/Hormig%C3%B3n_armado. [consulta: 2009-6-8].
- [2] **Varilla Corrugada DA-42.** Aceros Nacionales. <http://www.ansa.com.mx/Productos/VarillaCorrugadaDa42.asp>. [consulta: 2009-6-8].
- [3] **Los 5 edificios más grandes de la Tierra.** lareserva.com. http://www.lareserva.com/home/los_5_edificios_mas_altos. [consulta: 2009-6-8].
- [4] **Normas Técnicas Ecuatorianas.** INEN 102:2003-3R y INEN 2167:2003-1R. Archivo pdf.
- [5] **Acero.** Wikipedia. <http://es.wikipedia.org/wiki/Acero>. [consulta: 2010-12-15].
- [6] **VASSAUX,** Tapia Gustavo Alverto. Rentabilidad en el negocio de varilla de construcción en Guatemala. Tesis. Universidad Francisco Marroquín. 1999.
- [7] **Hierro y Acero.** Monografías. <http://html.monografias.com/hierro-y-acero1.html>. [consulta: 2010-12-15].
- [8] **GAMBOA,** Rivera Hamilton Israel y Quispe Pulluquitín Néstor Efraín. Elaboración de Procedimientos y Métodos para el Control de la Producción de los Aceros Producidos en Novacero S.A. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2009.
- [9] **CALLISTER,** William. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Traducido del inglés por Perú Molera Solá y Marc J. Anglada Gomila. 3a. Ed. Barcelona. Editorial Reverté. 2007. pp. 97-98, 281-285, 285-290, 304, 320, 323-325.
- [10] **AVNER,** Sidney. Introducción a la Metalurgia Física. Traducido del inglés por José Luis Estrada Haen. 2a. Ed. México. Editorial McGraw-Hill. 1988. pp. 102-105, 111-112, 252, 237-238, 257-259, 112-115, 40, 51-55.
- [11] **Aleaciones de Fierro.** Nuevas Investigaciones. <http://rodolfonovakovic.blogspot.com/2006/03/aleaciones-de-fierro.html>. [Consulta: 2010-1-6].

- [12] **Tratamientos Térmicos del Acero.** Scribd. <http://www.scribd.com/doc/41335665/Tratamientos-termicos-del-acero>. [Consulta: 2011-2-2].
- [13] **Ferrita.** <http://www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/ferrita.html>. [Consulta: 2010-12-15].
- [14] **TIERRA,** Cunachi Diego Fernando y Londo Tene Paulo César. Desarrollo Tecnológico para la Fundición en Troquel de las Aleaciones de Aluminio ASTM 355 y ASTM 40E. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2010.
- [15] **ASTM E 3.** ASTM Committee. Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. 3ra. Ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995. pp. 1-8.
- [16] **ESPINOSA,** Constantino. Evolución de las Inclusiones no Metálicas en el Proceso de Elaboración del Acero. Universidad de Buenos Aires. 2005.
- [17] **ASTM E 45-97.** ASTM Committee. Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. 2da. Ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1997. pp. 1-15.
- [18] **ASTM E 112.** ASTM Committee. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 3ra. Ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1996. pp. 1-24.
- [19] **Dureza Brinell.** Wikipedia. http://es.wikipedia.org/wiki/Dureza_Brinell. [Consulta: 2011-1-10].
- [20] **ASTM E 10.** ASTM Committee. Standard Test Methods for Brinell Hardness of Metallic Materials. 3ra. Ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995. pp. 1-9.
- [21] **ASTM E 8.** ASTM Committee. Standard Methods of Tension of Metallic Materials. 2da. Ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1997. p. 14.
- [22] **Líquidos Penetrantes.** A unit of knowledge. <http://knol.google.com/k/liquidos-penetrantes#>. [Consulta: 2009-3-25].

- [23] **ASTM E 165.** ASTM Committee. Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination. 2da. Ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995. pp. 1-20.
- [24] **ASTM E 23.** ASTM Committee. Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. 3ra. Ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995. pp. 1-25.
- [25] **Varilla de Construcción.** Novacero. <http://www.novacero.com/ws/novacero/novacero.nsf/paginast/E58F3AEFAA0442418825715E000049CC?OpenDocument>. [consulta: 2011-03-17]
- [26] **Aleaciones Hierro - Carbono.** Austenita. <http://www.utp.edu.co/~publio17/aceros.htm#austenita> [consulta: 2011-03-25]
- [27] **VALENCIA,** Asdrúbal. Tecnología del tratamiento térmico de los metales. 2a. Ed. Colombia. Editorial Universidad de Antioquia. 1992. p. 47.
- [28] **BHADESHIA,** H.K.D.H. and Honeycombe R.W.K. Steels – Microstructure and Properties. 3a. Ed. Oxford. Editorial Elsevier. 2006. p. 42.
- [29] **WINTER,** G y Nilson A. Proyecto de Estructuras de Hormigón. Editorial Reverté.
- [30] **KRAUSS,** George. Steels Processing Structure and Performance. 1a. Ed. Ohio. Editorial ASM International. 2005. pp. 157-159.

BIBLIOGRAFÍA

NORMAS, Técnicas Ecuatorianas. INEN 102:2003-3R y INEN 2167:2003-1R. Archivo pdf.

VASSAUX, Tapia Gustavo Alverto. Rentabilidad en el negocio de varilla de construcción en Guatemala. Tesis. Universidad Francisco Marroquín. 1999.

GAMBOA, Rivera Hamilton Israel, Quispe Pulluquitín Néstor Efraín. Elaboración de Procedimientos y Métodos para el Control de la Producción de los Aceros Producidos en Novacero S.A. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2009.

CALLISTER, William. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Traducido del inglés por Peré Molera Solá y Marc J. Anglada Gomila. 3a. Ed. Barcelona. Editorial Reverté. 2007.

AVNER, Sydney. Introducción a la Metalurgia Física. Traducido del inglés por José Luis Estrada Haen. 2a. Ed. México. Editorial McGraw-Hill. 1988.

TIERRA, Cunachi Diego Fernando y Londo Tene Paulo César. Desarrollo Tecnológico para la Fundición en Troquel de las Aleaciones de Aluminio ASTM 355 y ASTM 40E. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2010.

ASTM E 3. ASTM Committee. Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. 3ra. Ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995.

ESPINOSA, Constantino. Evolución de las Inclusiones no Metálicas en el Proceso de Elaboración del Acero. Universidad de Buenos Aires. 2005.

ASTM E 45-97. ASTM Committee. Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. 2da. Ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1997.

ASTM E 112. ASTM Committee. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 3ra. Ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1996.

ASTM E 10. ASTM Committee. Standard Test Methods for Brinell Hardness of Metallic Materials. 3ra. Ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995.

- ASTM E 8.** ASTM Committee. Standard Methods of Tension of Metallic Materials. 2da. Ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1997.
- ASTM E 165.** ASTM Committee. Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination. 2da. Ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995.
- ASTM E 23.** ASTM Committee. Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. 3ra. Ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995.
- VALENCIA,** Asdrúbal. Tecnología del tratamiento térmico de los metales. 2a. Ed. Colombia. Editorial Universidad de Antioquia. 1992.
- BHADESHIA,** H.K.D.H. and Honeycombe R.W.K. Steels – Microstructure and Properties. 3a. Ed. Oxford. Editorial Elsevier. 2006.
- WINTER,** G. y Nilson A. Proyecto de Estructuras de Hormigón. Editorial Reverté.
- LASHERAS.** Materiales Industriales. 1ra Ed. Barcelona. Editorial Cedel. 1981.
- ASM.** Metals Handbook. Metallography and Microstructures. Volume 9. Nueva York. 2004.
- DAYLE,** Lawrence. Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros. 3ra Ed. México. Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana. 1988.
- SCHMID,** Kalpakjian. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 4ta Ed. México. Editorial Pearson Educacion. 2002.
- KAZANAS,** H.C., Glenn E. Baker, Thomas G. Gregor. Procesos Físicos de Manufactura. 1ra Ed. México. Editorial Mc. Graw-Hill. 1988.
- KRAUSS,** George. Steels Processing Structure and Performance. 1a. Ed. Ohio. Editorial ASM International. 2005.
- SAMUELS,** Leonard. Light Microscopy of Carbon Steels. 1a Ed. Editorial ASM International. 2003.

LINKOGRAFÍA

Hormigón Armado

<http://es.wikipedia.org/wiki/Hormig%C3%B3narmado>.

2009-6-8.

Varilla Corrugada DA-42

<http://www.ansa.com.mx/Productos/VarillaCorrugadaDa42.asp>

2009-6-8.

Los 5 edificios más grandes de la Tierra

http://www.lareserva.com/home/los_5_edificios_mas_altos

2009-6-8.

Acero

<http://es.wikipedia.org/wiki/Acero>

2010-12-15.

Hierro y Acero

http://html.monografias.com/hierro-y-acero_1.html.

2010-12-15.

Aleaciones de Fierro

<http://rodolfonovakovic.blogspot.com/2006/03/aleaciones-de-fierro.html>.

2010-1-6.

Tratamientos Térmicos del Acero

<http://www.scribd.com/doc/41335665/Tratamientos-termicos-del-acero>.

2011-2-2.

Ferrita.

<http://www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/ferrita.html>.

2010-12-15.

Dureza Brinell

http://es.wikipedia.org/wiki/Dureza_Brinell

2011-1-10.

Líquidos Penetrantes

<http://knol.google.com/k/liquidos-penetrantes#>.

2009-3-25.

Varilla de Construcción

<http://www.novacero.com/ws/novacero/novacero.nsf/paginast/E58F3AEFAA0442418825715E000049CC?OpenDocument>

2011-03-17.

Aleaciones Hierro – Carbono

<http://www.utp.edu.co/~publio17/aceros.htm#austenita>

2011-03-25.