

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DESARROLLO DE PROCEDIMIENTOS PARA ENSAYOS DE MICROGRAFIA,
DUREZA, ESPECTROMETRÍA DE RAYOS X Y ANÁLISIS DE LA
MICROESTRUCTURA DE PRODUCTOS LAMINADOS PARA LA MEJORA DEL
CONTROL DE CALIDAD EN LA EMPRESA NOVACERO S.A

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

LUIS FELIPE LANAS
SEBASTIÁN PROAÑO

DIRECTOR: ING. VICTOR ANDRADE
CODIRECTOR: ING. PATRICIO QUEZADA

Sangolquí, 2011-05

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DESARROLLO DE PROCEDIMIENTOS PARA ENSAYOS DE MICROGRAFIA, DUREZA, ESPECTROMETRÍA DE RAYOS X Y ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA DE PRODUCTOS LAMINADOS PARA LA MEJORA DEL CONTROL DE CALIDAD EN LA EMPRESA NOVACERO S.A” fue realizado en su totalidad por LUIS FELIPE LANAS Y SEBASTIÁN PROAÑO, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero mecánico

Ing. Víctor Andrade

Ing. Patricio Quezada

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“DESARROLLO DE PROCEDIMIENTOS PARA ENSAYOS DE MICROGRAFIA,
DUREZA, ESPECTROMETRÍA DE RAYOS X Y ANÁLISIS DE LA
MICROESTRUCTURA DE PRODUCTOS LAMINADOS PARA LA MEJORA DEL
CONTROL DE CALIDAD EN LA EMPRESA NOVACERO S.A”

ELABORADO POR:

Luis Felipe Lanas Yáñez

Sebastián Proaño Ordoñez

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

In. Xavier Sánchez
DIRECTO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DEDICATORIA

Este proyecto es dedicado a mi familia, a mis padres que me apoyaron en todo momento y supieron darme sabiduría para poder afrontar los obstáculos que se presentan en la vida, a mis hermanas que supieron enseñarme a lo largo de mi vida y a mis abuelos que estuvieron siempre que los necesite.

Sebastian Proaño

Este proyecto se lo dedico a mis padres quienes me apoyaron siempre y supieron guiarme por el camino correcto. También se lo dedico a mis abuelos quienes son parte importante de mi vida.

Luis Felipe Lanas

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su apoyo y sus consejos para poder salir adelante durante la realización de este proyecto

A la empresa Novacero, en especial a la Ing. Adrian Pulgar y al Ing. Guillermo Miño por la predisposición y el apoyo necesario para poder realiza este proyecto

Al Ing. Víctor Andrade y al Ing. Patricio Quezada por su guía a lo largo de este proyecto para poder tener el mejor resultado posible en el mismo

Sebastián proaño

A la empresa Novacero S.A por brindarnos la oportunidad de realizar este proyecto, y apoyarnos en todo lo que fue encesarario

Al Ing. Víctor Andrade y al Ing. Patricio Quezada que con su conocimiento supieron guiarnos a lo largo de este proyecto.

A mis padres y a mis hermanos por su apoyo incodicional

Luis Felipe Lanas

INDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS	v
INDICE DE CONTENIDOS	vi
RESUMEN	xv
1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO.....	17
1.1 ANTECEDENTES.....	17
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.3 OBJETIVOS.....	19
1.3.1 General.....	19
1.3.2 Específicos	19
1.4 Justificación e importancia del proyecto.....	19
1.5 Alcance	20
2 MARCO TEÓRICO	22
2.1 Fundición con horno de arco eléctrico	22
2.1.1 Variables del proceso de fundición.....	23
2.2 LAMINACIÓN.....	31
2.2.1 Temperatura de laminación.....	32
2.2.2 Velocidad de laminación.....	33
2.3 PROPIEDADES METALÚRGICAS	34
2.3.1 Estructura de los metales y aleaciones	34
2.3.2 Estructura cristalina del hierro puro	36
2.3.3 Variedades Alotrópicas del hierro puro.....	37
2.3.4 Aleaciones hierro carbono.....	38
2.3.5 Composición de las aleaciones hierro carbono	40
2.3.6 Influencia de la composición química en aceros	42
2.3.7 Estructura micrográfica.....	43
2.3.8 Estructura macrográfica.....	44

2.3.9	Inclusiones.....	45
2.3.10	Impurezas.....	46
2.4	Propiedades mecánicas.....	48
2.4.1	Dureza.....	48
2.4.2	Esfuerzo de fluencia.....	49
2.4.3	Resistencia a la tensión.....	50
2.4.4	Módulo de elasticidad.....	51
2.4.5	Ductilidad.....	51
2.5	MÉTODOS DE ENSAYO.....	52
2.5.1	Composición química de insumos para acería.....	52
2.5.2	Micrografías.....	53
2.5.3	Ensayos Mecánicos.....	63
3	PROCESOS E IMPLEMENTACIÓN.....	65
3.1	NORMAS.....	65
3.1.1	Normas a utilizar.....	65
3.2	VERIFICACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS.....	66
3.2.1	Descripción de equipos.....	66
3.2.2	Procedimiento de Calibración de equipos.....	71
3.2.3	Procesos de Mantenimiento.....	74
3.3	ENSAYOS QUÍMICOS DE INSUMOS PARA ACERÍA Y ESCORIA.....	78
3.3.1	Procedimiento de Composición Química.....	78
3.4	ENSAYOS METALOGRAFICOS.....	79
3.4.1	Procedimiento de Micrografía.....	79
3.5	ENSAYOS MECÁNICOS.....	80
3.5.1	Procedimiento para ensayo de Dureza.....	80
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	82
4.1	VALIDACIÓN DE PROCEDIMIENTOS.....	82
4.1.1	ENSAYOS QUÍMICOS DE INSUMOS PARA ACERÍA y escoria.....	82
4.1.2	ENSAYOS de micrografía.....	83
4.1.3	ENSAYOS de dureza.....	85
4.2	DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO EN LOS PRODUCTOS DE NOVACERO.....	87

4.2.1	Varilla corrugada	87
4.2.2	Perfiles laminados	91
4.3	DETERMINACIÓN DEL NIVEL INCLUSIONARIO EN LOS PRODUCTOS DE NOVACERO	93
4.3.1	Varilla corrugada	94
4.3.2	Perfiles laminados	99
4.4	COMPARACIÓN DE PROPIEDADES QUÍMICAS, METALOGRAFÍAS Y MECÁNICAS DE LOS PRODUCTOS DE NOVACERO	103
4.4.1	Varilla corrugada	103
4.4.2	perfiles laminados.....	108
5	ANÁLISIS ECONÓMICO	112
5.1	COSTOS	112
5.1.1	Micrografías.....	112
5.1.2	Espectrómetro de RX	114
5.2	Recuperación a la Inversión.....	116
5.2.1	Micrografía.....	117
5.2.2	Espectrómetro de RX	118
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	119
6.1	CONCLUSIONES	119
6.2	RECOMENDACIONES	120
7	Bibliografía.....	121
8	Glosario	122

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Composición química de piedra caliza	24
Tabla 2.2 Composición química de fluorina	24
Tabla 2.3 Cualidades principales de los materiales refractarios	28
Tabla 2.4 Tabla de equivalencias entre dureza Vickers y esfuerzo de fluencia	49
TABLA 2.5 <i>Equivalencia de tamaño de grano ASTM con cantidad de granos por milímetro cuadrado.</i>	56
TABLA 2.6: <i>Factor de Jeffries para distintos aumentos</i>	58
Tabla 2.7: <i>Niveles de severidad para inclusiones</i>	62
Tabla 2.8 Aplicaciones de las escalas de durezas	64
Tabla 4.1 Repetitividad, exactitud e incertidumbre del EDX 720.....	82
Tabla 4.2 Repetitividad, exactitud e incertidumbre de las micrografías analizadas por el Material Plus 4.2.....	84
Tabla 4.3 Repetitividad, exactitud e incertidumbre de los ensayos de dureza del durómetro HLN-11 ^a	85
Tabla 4.4 Repetitividad, exactitud e incertidumbre de los ensayos de dureza del durómetro MH 320	86
Tabla 4.5 Resultado de tamaño de grano de VC 10	88
Tabla 4.6 Resultado de tamaño de grano de VC 16	89
Tabla 4.7 Resultado de tamaño de grano de VC 32	90
Tabla 4.8 Resultado de tamaño de grano de perfiles.....	92
Tabla 4.9 Resultado de tamaño de grano de VC	94
Tabla 4.10 Resultado de inclusiones de perfiles	99
Tabla 4.11 Datos de micrografía, carbono equivalente y ensayo de tracción de VC	103
Tabla 4.12 Resultados de relación entre tamaño de grano, Ceq y esfuerzo de fluencia.....	105
Tabla 4.13 Resultados de relación entre tamaño de grano, Ceq y esfuerzo de tracción.....	106
Tabla 4.14 Datos de micrografía, carbono equivalente y ensayo de tracción de perfiles.....	108

Tabla 4.15 Resultados de relación entre tamaño de grano, Ceq y esfuerzo de fluencia.....	109
Tabla 4.16 Resultados de relación entre tamaño de grano, Ceq y esfuerzo de tracción.....	110
Tabla 5.1 Costos de equipos de micrografía.....	112
Tabla 5.2 Costos de mano de obra	113
Tabla 5.3 Costos de infraestructura para la ampliación del laboratorio.....	113
Tabla 5.4 Costos indirectos para los ensayos de micrografía	114
Tabla 5.5 Costos totales para ensayos de micrografía	114
Tabla 5.6 Costos de la inversión inicial	115
Tabla 5.7 Costos de mano de obra de la operación del EDX 720.....	115
Tabla 5.8 Costos indirectos para los ensayos del espectrómetro EDX 720	115
Tabla 5.9 Costo Total para la implementación del espectrómetro de rayos X	116
Tabla 5.10 Cálculo de la utilidad neta anual.....	117
Tabla 5.11 VAN proyecto de micrografía	117
Tabla 5.12 TIR proyecto de micrografía.....	117
Tabla 5.13 Cálculo de la utilidad neta anual.....	118
Tabla 5.14 VAN proyecto del espectrómetro de rayos X.....	118
Tabla 5.15 TIR proyecto del espectrómetro de rayos X.....	118

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema seccional de un horno eléctrico con revestimiento tipo ácido y básico.....	23
FIGURA 2.2. Efecto del laminado sobre la microestructura.....	33
Figura 2.3 Representación de la estructura bcc.....	35
Figura 2.4 Representación estructura fcc.....	35
Figura 2.5 Curva de enfriamiento para hierro puro.....	37
Figura 2.6 Diagrama de equilibrio Hierro-Carbono.....	39
FIGURA 2.7 : Estructura micrográfica de acero de bajo carbono atacado con distintas soluciones a) Nital 2% b) Picral4% C) Barahas	54
FIGURA2.8: Ilustración del método de intersección para tamaño de grano.....	59
FIGURA 2.9: <i>Ilustración de una inclusión Tipo A Sulfuro</i>	61
Figura 2.10: <i>Ilustración de una inclusión Tipo B⁹</i>	61
Figura 2.11: <i>Ilustración de una inclusión Tipo C⁹</i>	61
Figura 2.12: <i>Ilustración de una inclusión Tipo D</i>	62
Figura 3.1: Espectrómetro de rayos X EDX 720	67
Figura 3.2 Cortadora de probetas Q-2A.....	68
Figura 3.3 Pulidora de probetas Mopao 150 ¹²	68
Figura 3.4 Embutidora de probetas XQ-2B.....	69
Figura 3.5 Banco de lijas ESM-2/50 ¹³	69
Figura 3.6 Microscopio Mikoba 413.....	70
Figura 3.7: Flujograma del procedimiento de calibración del espectrómetro de RX	72
Figura 3.8: Flujograma del procedimiento de calibración del programa de análisis de imagen	73
Figura 3.9: Flujograma del proceso de mantenimiento del espectrómetro de rayos X	74
Figura 3.10 Flujograma del proceso de mantenimiento del durómetro HLN-11A....	75
Figura 3.11 Flujograma del proceso de mantenimiento del durómetro MH 320.....	76
Figura 3.12 Flujograma del proceso de mantenimiento de los equipos de micrografía	77
Figura 3.13 Flujograma del proceso para ensayos químicos de escoria e insumos para acería.....	78

Figura 3.14 Flujograma del proceso para ensayos de micrografía	79
Figura 3.15 Flujograma del proceso para ensayos de dureza en el durómetro HLN-11A	80
Figura 3.16 Flujograma del proceso de mantenimiento del durómetro MH 320.....	81
Figura 4.1 Comparación de la repetitividad y exactitud del EDX 720.....	83
Figura 4.2 Comparación de la repetitividad y exactitud de las micrografías analizadas por el Material Plus 4.2.....	84
Figura 4.3 Comparación de la repetitividad y exactitud de los ensayos de dureza del durómetro HLN-11A	86
Figura 4.4 Comparación de la repetitividad y exactitud de los ensayos de dureza del durómetro MH 320	87
Figura 4.5 Tamaño de grano de VC 10.....	89
Figura 4.6 Tamaño de grano de VC 16.....	90
Figura 4.7 Tamaño de grano de VC 32.....	91
Figura 4.8 Tamaño de grano de perfiles	93
Figura 4.9 Inclusiones Tipo A de VC.....	96
Figura 4.10 Inclusiones Tipo B de VC.....	97
Figura 4.11 Inclusiones Tipo C de VC.....	98
Figura 4.12 Inclusiones Tipo D de VC ³⁵	98
Figura 4.13 Inclusiones Tipo A de perfiles	100
Figura 4.14 Inclusiones Tipo B de perfiles	101
Figura 4.15 Inclusiones Tipo C de perfiles	102
Figura 4.16 Inclusiones Tipo D de VC ³⁸	102
Figura 4.17 Relación entre Re y G.....	105
Figura 4.18 Relación entre Re y Ceq. ³⁹	105
Figura 4.19 Relación entre Rm y G	106
Figura 4.20 Relación entre Rm y Ceq.	107
Figura 4.21 Relación entre Re y G.....	109
Figura 4.22 Relación entre Re y Ceq.	110
Figura 4.23 Relación entre Rm y G	111
Figura 4.24 Relación entre Rm y Ceq. ⁴⁴	111

NOMENCLATURA

SIMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
G	Índice de Tamaño de Grano ASTM	
Rm	Esfuerzo Ultimo	MPa
Re	Esfuerzo de Fluencia	MPa
Ceq.	Carbono equivalente	
HRB	Dureza Rockwell C	RB
σ	Desviación Estándar	
R ²	Correlación	
E	Exactitud	%
R	Repetitividad	%
I	Incertidumbre	

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A: NORMAS ASTM.....	123
ANEXO B: MÉTODO DE MANTENIMIENTO DEL ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X.....	177
ANEXO C: MÉTODO DE CALIBRACIÓN MATERIAL PLUS.....	180
ANEXO D: MÉTODO DE MANTENIMIENTO ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X.....	185
ANEXO E: MÉTODOS DE MANTENIMIENTO DUROMETRO HLN-11A.....	195
ANEXO F: MÉTODOS DE MANTENIMIENTO DUROMETRO MH-320.....	200
ANEXO G: MÉTODOS DE MANTENIMIENTO EQUIPO DE MICROGRAFÍA.....	205
ANEXO H: PROCEDIMIENTO PARA ENSAYO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	219
ANEXO I: PROCEDIMIENTO PARA ENSAYO DE MICROGRAFÍA.....	236
ANEXO J: PROCEDIMIENTO PARA ENSAYO DE DUREZA CON EL DURÓMETRO HLN-11A.....	274
ANEXO K: PROCEDIMIENTO PARA ENSAYO DE DUREZA CON EL DURÓMETRO MH 320.....	282
ANEXO L: INFORMES DE PARA VALIDACIÓN DEL ESPECTRÓMETRO DE RX.....	290
ANEXO M: INFORMES PARA LA VALIDACIÓN DE ENSAYOS DE MICROGRAFÍA.....	292
ANEXO N: INFORMES PARA VALIDACIÓN DE ENSAYOS DE DUREZA.....	303
ANEXO Ñ: INFORMES DE MUJESTRAS DE VC.....	306
ANEXO O: INFORMES DE MUESTRAS DE PERFILES LAMINADOS.....	367

RESUMEN

En este proyecto se implementaron y realizaron los procedimientos para operación mantenimiento y calibración de un espectrómetro RX, microscopio, equipos de preparación de muestras metalográficas y durómetros portátiles. También se realizó el estudio para determinar la microestructura característica en varilla corrugada y perfiles laminados. El principal motivo para la implementación de estos análisis en NOVACERO S.A planta Lasso es el control de calidad en materia prima y producto terminado con el fin de asegurar un producto de calidad para sus clientes.

Para el espectrómetro de RX marca SHIMADZU modelo EDX 720 se realizaron los manuales de condiciones iniciales, operación, curva de calibración y mantenimiento del equipo. Se realizó la validación del equipo en base al análisis de 10 muestras metálicas calculando así su repetitividad, incertidumbre y error porcentual comparado con el análisis en un espectrómetro de emisión óptica de las mismas muestras.

Para los durómetros portátiles HLN 11A y MH 320se realizaron los manuales de operación, mantenimiento y calibración. Se realizó la validación de los equipos ensayando 10 muestras preparadas en el durómetro, del laboratorio de Ciencia de Materiales de la Escuela Politécnica del Ejército, en base a estos datos se calculó la repetitividad, incertidumbre y error porcentual del equipo arrojando resultados favorables.

Con respecto a los equipos de análisis micrográfico, Pulidora MOPAO 160, montadora de probetas XQ-2B, cortadora Q-2A, microscopio MIKOBÁ 400 y programa de análisis Material Plus 4.2 se realizaron los manuales para condiciones iniciales, preparación de muestras, observación de muestras, obtención de imágenes, manual de operación del programa, manual de calibración del programa y mantenimiento de los equipos de micrografía. También se realizó la validación del programa de análisis de imagen, para esto se analizaron 10 imágenes de manera manual por el método de intersección según la norma ASTM E 112 y de manera

automática. Con los datos obtenidos se calculó repetitividad, incertidumbre y error porcentual del programa.

Posterior a la realización de los métodos de trabajo se realizó un estudio micrográfico para determinar los indicadores estadísticos de tamaño de grano, índice de inclusiones y porcentaje de fases presentes en los productos de NOVACERO S.A. Esto fue muy importante ya que en la planta no se cuenta con datos acerca de la estructura micrográfica de sus productos. El estudio se realizó en base a una población de 105 muestras, valor que se obtuvo basado en la producción del año 2010. Dentro de la población total de muestras se dividió en 2 grupos, 45 muestras de perfiles laminados y 60 muestras de varilla corrugada. Al final del estudio se obtuvieron las desviaciones estándar, mínimos, máximos y valores promedio de los valores antes mencionados. El tamaño de grano promedio para perfiles es de 7.42 mientras que en varilla es de 5.15 para VC32, 5.6 para VC 16 y 5.35 para VC 10.

Por último se realizó un estudio de la influencia que tiene el tamaño de grano y el carbono equivalente sobre el esfuerzo de fluencia y la resistencia a la tracción del producto. Las ecuaciones obtenidas que relacionan estas variables se presentan continuación.

Varilla corrugada:

Fluencia: $Re = 11.033G + 699.46Ceq.$

Tracción: $Rm = 2.93G + 1182.71Ceq.$

Perfiles laminados:

Fluencia: $Re = 34.25G + 337.61Ceq.$

Tracción: $Rm = 30.34G + 870.591Ceq.$

CAPITULO 1

1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

1.1 ANTECEDENTES

Novacero S.A al ser una empresa líder en el mercado con certificados de calidad INEN e ISO se ve en la necesidad de realizar rigurosos controles de calidad en su producto. En los últimos años Novacero produce su propia materia prima en base a chatarra, cal y refractarios en un proceso de fundición y conformado, sin embargo no existe un control riguroso sobre los productos necesarios para fabricar la palanquilla y en si sobre la palanquilla. Aparte de esto también es necesario el control sobre el producto terminado con el fin de garantizar al cliente un producto de alta calidad. Novacero cuenta actualmente con un laboratorio de control de calidad y metrología equipado con un espectrómetro de emisión óptica para el control de la composición química del acero y una máquina de tracción de 600 KN para realizar ensayos de tracción sobre el producto terminado. Sin embargo se ha visto en la necesidad de ampliar los controles de calidad, es por esto que se va a implementar el análisis micrográfico para materia prima y producto terminado y el análisis químico para los insumos de acería y escoria. Para esto se necesita la adquisición de equipos de medición y preparación de muestras micrográficas así como un espectrómetro para análisis químico. Al ser el laboratorio de calidad el ente de control de la producción en la planta se ve en la obligación de adquirir y poner en funcionamiento los instrumentos de medición necesarios para dichos controles y para cualquier otro control de producción que se piense realizar dentro de las instalaciones

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Novacero S.A cuenta con dos ramas de producción principales, la acería para fabricación de palanquilla de acero, y los trenes de laminación 1 y 2 para la fabricación de varilla corrugada y perfiles laminados.

La acería al ser un departamento relativamente nuevo con aproximadamente un año de funcionamiento cuenta con problemas en el desgaste de refractarios debido a la basicidad. También tiene varios problemas con los insumos para la fabricación del acero ya que muchas veces no tienen el efecto que se necesita al momento que se las agrega a la colada. Es por esto que se necesita tener un control de composición química de insumos y escoria para controlar el proceso y tener un producto de mejor calidad.

El tren 1 y el tren 2 cuentan con una serie de rodillos de laminación los cuales se desgastan a medida que avanzan las campañas de producción. Actualmente ninguno de los trenes cuenta con una manera de controlar el desgaste de los rodillos. Debido a que los rodillos de laminación son de doble vaciado se puede tener un control del desgaste de los mismos mediante la medida de dureza sobre su superficie.

En producto terminado el departamento de control de calidad quiere complementar los ensayos de tracción con otro tipo de ensayos con el fin de tener seguridad de que el producto es de alta calidad. Es por esto que se ha pensado en analizar el acero a un nivel micrográfico con el fin de tener certeza que nada falle en su microestructura.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

Implantar y validar procedimientos para el análisis de dureza, espectrometría de RX micrografía en base a Normas ASTM e INEN, y mediante un análisis micrográfico de productos laminados obtener los indicadores estadísticos a fin de mejorar el control de calidad en la empresa NOVACERO S.A planta Lasso.

1.3.2 ESPECÍFICOS

- Instalar e implementar los equipos necesarios para realizar los análisis micrográficos
- Realizar los procesos de análisis de micrografía, dureza y composición química
- Validar los procesos de análisis realizados para control de calidad
- Realizar un estudio estadístico con el fin de determinar los índices de tamaño de grano, inclusiones y fases presentes en el producto terminado de NOVACERO S.A
- Realizar un estudio de la relación entre tamaño de grano composición química, tracción y fluencia del material.

1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO

Debido al aumento de la demanda de productos de acero en el Ecuador en los últimos años, la empresa NOVACERO S.A, decidió implementar un horno de fundición en su planta de Lasso para fabricar palanquilla en base a chatarra. Esta palanquilla sirve de materia prima para la producción de varilla corrugada y perfiles laminados

Para aumentar su competitividad la empresa se ha visto en la necesidad de comprobar la calidad de la materia prima y del producto terminado mediante la implementación de análisis micrográfico, garantizando a sus clientes acero de alta calidad.

Conjuntamente con el control del producto final se necesita analizar la composición química de insumos y escoria en la acería con el fin de garantizar palanquilla de alta calidad y abaratar costos. Por último se ha generado la necesidad de cuantificar la dureza en los rodillos de laminación con el fin de controlar el desgaste de los mismos.

1.5 ALCANCE

Instalación e implementación de los siguientes equipos para realizar análisis respectivos:

- Microscopio metalográfico
- Durómetro
- Espectrómetro de rayos X
- Equipo completo para preparación de muestras

Desarrollo de procedimientos para los siguientes ensayos:

- Micrografías (Palanquilla, Producto terminado)
- Análisis de dureza (Rodillos de Laminación)
- Composición química (Ferroaleaciones, Escoria, Refractarios, Cal)

Análisis Metalográfico para determinar la micro estructura característica de:

- Producto terminado:
 - Varilla corrugada de diámetros pequeños(8-12)mm, medianos(16-22)mm y grandes(25-36)mm

- Perfiles laminados:
 - Ángulo estructural
 - Platinas
 - Tees
 - Barras redondas
 - Barras cuadradas

Determinar la relación que existe entre tamaño de grano, carbono equivalente y las resistencias de tracción y fluencia para:

- Varilla corrugada
- Perfiles laminados

CAPITULO 2:

2 MARCO TEÓRICO

2.1 FUNDICIÓN CON HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

El horno de arco eléctrico es el más variable de todos los hornos para fabricar acero, no solamente puede proporcionar altas temperaturas, hasta 1.930C, sino que también puede controlarse eléctricamente con un alto grado de precisión. Debido a que no se emplea combustible alguno, no se introduce ningún tipo de impurezas por lo que el resultado es un acero más limpio.

El horno de arco eléctrico se puede cargar en su totalidad de chatarra, dependiendo de la composición química de la chatarra se agregan al horno, coque o sustitutos del carbono, o cal para bajar los niveles de azufre y carbono.

El horno de arco eléctrico funciona cuando se aplica la corriente eléctrica a los electrodos que forman un arco eléctrico que produce mucho calor generando altas temperaturas, esto genera que toda la carga dentro del horno se derrita. Una vez que toda la carga se encuentra derretida se agregan diferentes cantidades de los elementos de aleación necesarios. A todo el compuesto fundido se lo vuelve a calentar para que todos los elementos se mezclen.

En el horno de arco eléctrico se suele inyectar oxígeno para que queme el exceso de carbono y algunas impurezas, el resto de impurezas se limpian en la escoria final del acero.

Una vez que la composición química del acero cumple con los requerimientos del productor, se vierte la masa líquida en una olla de colada. Este tipo de hornos pueden producir una colada de acero en un tiempo de dos a seis horas.

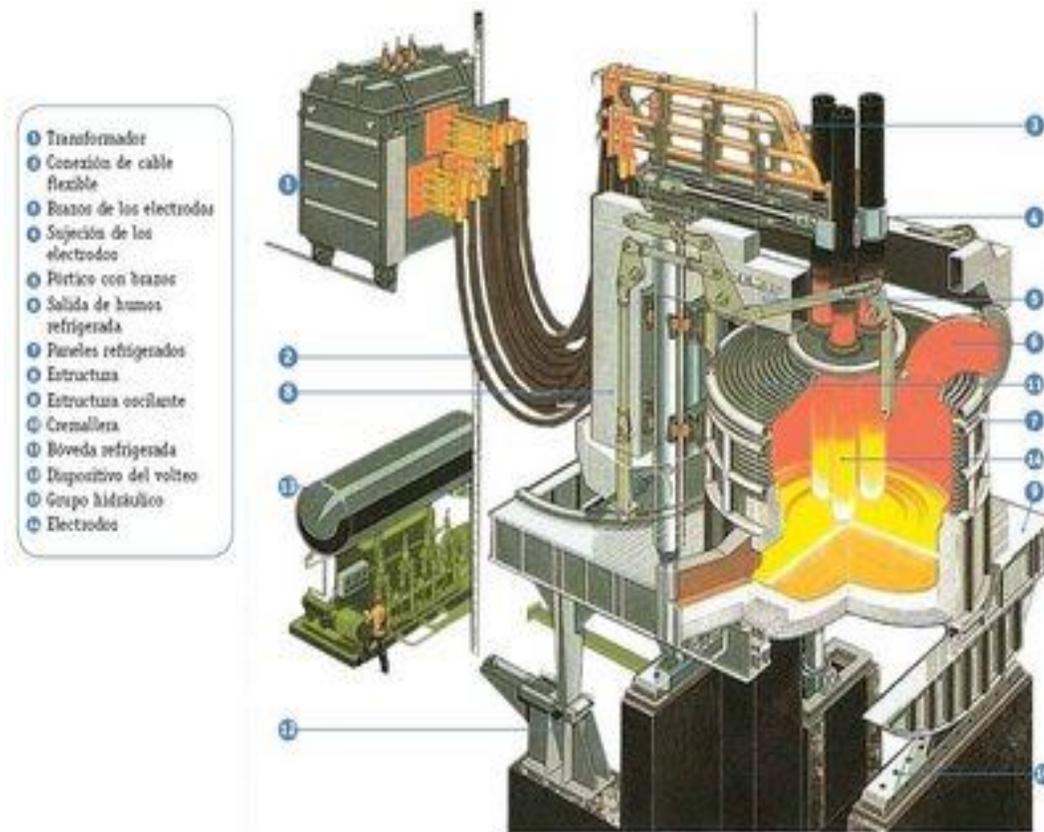


Figura 2.1 Esquema seccional de un horno eléctrico con revestimiento tipo ácido y básico¹

2.1.1 VARIABLES DEL PROCESO DE FUNDICIÓN

2.1.1.1 Fundentes.

Son materiales fundentes aquellas sustancias minerales que se añaden para disminuir la temperatura de fusión de la escoria, la eliminación de la ceniza del combustible en forma de escoria y para cambiar la viscosidad y fluidez de la escoria. Durante la fundición se emplean los siguientes fundentes: la caliza, la fluorina y la cal.

¹ Fuente: <http://elissa16.blogspot.com/2009/09/horno-de-arco-electrico.html>

2.1.1.1.1 Caliza

La piedra caliza es el fundente normal para el hierro colado. Su composición química debe estar de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 2.1 Composición química de piedra caliza

Categoría de la caliza	CaO, no menos de	SiO ₂	Precipitado insoluble	Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	O ₂
I	52	1,75	2,15	2	3,5	0,02	0,25
II	50	3,0	3,75	3	3,5	0,04	0,35
III	49	4,0	5,0	3	3,5	0,05	0,35

Fuente: Tecnología del proceso de fundición. (YUASTEPANOV 1981) pág. 272

Antes de la fusión la caliza debe ser triturada, para lograr un tamaño ideal que se encuentre entre 25-100mm, ya que los pedazos muy grandes se funden con dificultad y los pedazo pequeños son arrastrados por los gases.

2.1.1.1.2 Fluorina

La fluorina o espato de flúor ayuda a la eliminación de azufre, reduce la viscosidad y la temperatura de fusión de la escoria, y con ello acelera las reacciones químicas y aumenta la solubilidad del hierro. Se debe emplear en trozos mezclados con la piedra caliza en la proporción de 1 parte de fluorina por cada 5 partes de caliza, ya que en proporciones mayores puede afectar los materiales refractarios del recubrimiento. La fluorina se divide en 3 categorías:

Tabla 2.2 Composición química de fluorina

Categoría de la fluorina	CaF ₂	SiO ₂
I	≥ 92 %	≤ 5 %
II	≥ 82 %	≤ 20 %
III	≤ 25 %	Sin límite

Fuente: Tecnología del proceso de fundición. (YUASTEPANOV 1981) pág. 273

2.1.1.1.3 Cal

La cal (CaO) es la piedra caliza cocida para eliminar de la misma el anhídrido carbónico (CO₂) según la reacción: $\text{CaCO}_3 - \text{CO}_2 = \text{CaO}$. Se emplea en trozos no humedecidos para las operaciones de fusión en el horno eléctrico con recubrimiento de dolomita o magnesita, siempre con el objeto de formar las escorias que cubren el metal líquido y substraen sus impurezas

2.1.1.2 Refractarios

Los materiales refractarios son aquellos que soportan altas temperaturas (por lo menos 600 C) sin ablandarse excesivamente ni romperse. Por lo que son utilizados en los diferentes tipos de hornos de fundición en los lugares que se encuentran expuestos a altas temperaturas.

2.1.1.2.1 Clasificación

Industrialmente los materiales refractarios se clasifican de la siguiente manera:

- a) Refractarios ácidos, cuyo componente predominante es la sílice SiO₂; la cual reacciona a altas temperaturas con la escoria o con los fundentes básicos, formando silicatos cuyo punto de fusión es inferior al punto de fusión de los dos constituyentes. Por lo que nunca se deben poner en contacto refractarios ácidos con refractarios, escoria o fundentes básicos.

- b) Refractarios básicos, en los que el componente predominante es el óxido de calcio CaO o de magnesio MgO; a temperaturas altas reaccionan con refractarios, escoria o fundentes ácidos formando silicatos de punto de fusión relativamente bajo, por lo que tampoco se deben mezclar refractarios básicos con refractarios, escoria, o fundentes ácidos.

- c) Materiales neutros, en los cuales predomina la alúmina (Al_2O_3), la silimanita (silicato anhídrido de aluminio $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$), el carborundo (carburo de silicio SiC), la cromita (Cr_2O_3) o el grafito (estado alotrópico del carbono). Se les llama neutro debido a que no reaccionan de manera sensible con ningún otro tipo de material refractario, escorias o fundentes.

2.1.1.2.2 Propiedades

Además de la refractariedad, se deben tomar en cuenta otras propiedades de los materiales como:

- La resistencia a la compresión en frío.
- La temperatura de reblandecimiento bajo la carga de 2 kg/cm^2 .
- La dilatación lineal en caliente.
- La resistencia a los cambios bruscos de temperatura.
- La resistencia a la acción de escorias y del gas.
- La conductividad térmica.

2.1.1.2.3 Formas

En fundición se emplean los materiales refractarios en diferentes formas y aspectos diversos:

- a) Refractarios aislantes de calor, se aplican para que el calor producido no se escape por razones de economía y para mantener la temperatura en la zona de trabajo. Se aplican sin que estén en contacto con las fuentes de calor. Se suelen utilizar los refractarios porosos, muy ligeros y con coeficiente de transmisión térmica muy bajo.
- Se pueden fabricar ladrillos aislantes con todos los tipos de refractarios, lo que se hace es aumentar su porosidad.

- b) Masas refractarias, se utilizan para fabricar la solera y las paredes de algunos hornos (eléctricos, de reverbero o en los cubilotes). Las masas refractarias más usadas son las de sílice (SiO_2), las de dolomita (mezcla de óxido de calcio CaO y de magnesio MgO), y en los cubilotes, las sílico-aluminosas.
- c) Ladrillos y bloques, la mayor parte de refractarios son utilizados de esta forma. Tiene la ventaja de estar sometidos a un proceso de secado rigurosamente controlado, en masas pequeñas o relativamente pequeñas y de estar cocidos uniformemente por todos sus lados a temperaturas adecuadas.

2.1.1.2.4 Cualidades principales de materiales refractarios

Tabla 2.3 Cualidades principales de los materiales refractarios

Características	Sílico-Aluminoso (a)	Sílico-Aluminoso (b)	Sílico-Aluminoso (c)	Sílico-Aluminoso (d)	Sílice	Magnesita	Cromita	Cromo-Magnesita	Sílico-Aluminoso Poroso
SiO ₂ (%)	72/80	~60	~57	~33	95/97	2/4	19	-	-
Al ₂ O ₃ (%)	15/25	~36	~41	~65	-	¼	15	-	-
MgO (%)	-	-	-	-	-	85/88	16	-	-
Cr ₂ O ₃ (%)	-	-	-	-	-	-	~42	12/36	-
Densidad (kg/dm ³)	1,85/1,95	1,85/1,95	1,85/1,95	2,35/2,45	1,85/1,95	2,7/2,9	33/34	2,85/3	0,7/1,2
Porosidad (%)	~25	~29	~25	~20	~20	~20	~18	~20	50/80
Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	200/250	150/250	200/250	600/1000	400/500	500/900	~500	~300	45/120
Resistencia a las variaciones de temperatura	Suf. buena	Suf. buena	Suf. Buena	Muy buena	Mala	Mediocre	Buena	Muy buena	-
Punto de ablandamiento bajo carga de 2kg/cm ² (C)	~1300	~1350	~1360	~1600	~1680	~1650	~1450	~1600	-
Resistencia a la acción de las escorias básicas	Mala	Mala	Mala	Buena	Mala	Buena	Buena	Buena	Normal
Resistencia a la acción de las escorias ácidas	Discreta	Discreta	Discreta	Buena	Buena	Mala	Satisfact.	Satisfact.	Contacto
Dilatación lineal a 400 C (%)	0,4/0,6	0,4/0,6	0,4/0,6	0,1/0,2	1/1,2	0,4/0,6	0,2/0,4	0,2/0,4	-
Dilatación lineal a 800 C (%)	0,6/0,8	0,6/0,8	0,6/0,8	0,6/0,8	1,2/1,4	1/1,2	0,6	0,6/0,8	-
Dilatación lineal a 1200 C (%)	0,8	0,8	0,8	~0,6	1,4/1,5	1,6	1,0	1,2/1,4	-
Dilatación lineal a 1600 C (%)	0,2/0,4	0,2/0,4	0,2/0,4	~0,8	1,2/1,4	2,2/2,4	1,2	1,7/1,8	-

Fuente: Tecnología de la Fundición (CAPELLO 1974)pág. 195

2.1.1.3 Ferroaleaciones

Las ferroaleaciones constituyen la base para la obtención del acero. Se consiguen después de someter al hierro a procesos de reducción a alta temperatura, incorporando generalmente otros metales.

En cuanto a aplicación existen dos grandes grupos de ferroaleaciones: las que se usan para desoxidación del hierro como los ferromanganesos y ferro silicios, y las que buscan aportación de otros metales para darle características específicas al acero como los ferro tungstenos, ferro vanadios, etc.

Ferroaleaciones más utilizadas:

- El ferro-silicio desoxida el hierro.
- El ferro-manganeso desulfura la fundición, perlitiza e incrementa a la tracción y la dureza.
- El ferro-cromo afina el grano, mejora la resistencia a la tracción, flexión, corrosión, desgaste entre otros.
- El cobre afina el grano dando estructura perlítica. Mejora la resistencia a la tracción y dureza.
- El ferro-molibdeno aumenta sustancialmente la resistencia a la tracción. Proporciona tenacidad, dureza elevada y una gran resistencia al desgaste.
- El níquel proporciona una fundición con gran resistencia, compacta y densa. Homogeneiza las características mecánicas en los diferentes espesores de la pieza. Mejora la maquinabilidad de las piezas fundidas.
- El carburo de calcio es un producto utilizado para desulfurar el hierro.
- El grafito y los re carburantes son agentes que se adicionan para incrementar el carbono en la fundición.

2.1.1.4 Chatarra

La chatarra ferrosa es la materia prima principal para fundiciones y siderúrgica, que al refundirlas dan lugar al nuevo acero. Un producto de acero, luego de cumplir su vida útil, puede reciclarse a pesar de su origen. El acero es el material más reciclado del mundo. Aproximadamente el 35% de acero producido en el mundo se lo obtiene del reciclaje de la chatarra.

Alrededor del 90% de producción de acero en el mundo utiliza hornos de arco eléctrico u hornos básicos de oxígeno. En las operaciones con HBO se emplea un mínimo de 20% de chatarra, mientras que los hornos de arco eléctrico funden un 100% de chatarra. La tasa de reciclaje, definida como la relación de la cantidad de chatarra efectivamente reciclada y la cantidad de chatarra producida, es de alrededor de un 80%, en una base global.

Las principales fuentes de chatarra de acero, provienen de viene de consumo obsoletos, como automóviles viejos, electrodomésticos, latas de acero, construcciones, y estructuras antiguas.

2.1.1.5 Escoria

La escoria es un subproducto de la fundición. Se puede considerar como una mezcla de óxidos metálicos, sulfuros de metal y metal puro. La escoria se utiliza como mecanismo de eliminación de residuos en la fundición, y también puede servir para ayudar a controlar la temperatura durante la fundición y minimizar la re oxidación del metal líquido.

La escoria de las acerías es diseñada para minimizar la pérdida de hierro, por lo que contiene principalmente calcio, magnesio y aluminio.

La espumación de la escoria está causada por las burbujas de gas monóxido de carbono, dióxido de carbono, vapor de agua, dióxido de azufre, oxígeno e hidrógeno en

el interior de la escoria. En un horno de arco eléctrico la espumación es vital para su funcionamiento, ya que la espuma envuelve a los arcos, protegiendo las paredes y el techo del horno del calor radiante de los arcos y transfiriendo una mayor cantidad de calor del arco a la fundición, mejorando así la eficiencia del horno.

En la producción de acero en HAE, el porcentaje de escoria representa de 3 – 5 % de la masa metálica.

Para las escorias básicas el valor de su basicidad se encuentra entre 1,2 – 2,8 y valores mayores a 2,8 es altamente básica. La basicidad se calcula por la fórmula:

$$\text{Basicidad} = (\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3). \quad 2.1$$

2.2 LAMINACIÓN

El laminado es el proceso de conformación mediante el cual se reduce el espesor del material de trabajo. Para esto se deben ejercer fuerzas de compresión mediante rodillos opuestos, los cuales giran en sentido contrario para jalar y al mismo tiempo comprimir el material. Al ser el material deformado por una fuerza que lo oprime el laminado puede considerarse como un proceso de forja continua. Este proceso se utiliza generalmente para la fabricación de tiras, láminas, placas, barras y secciones.

El proceso de laminado cuenta con una serie de pasos los cuales se los conoce como pases de laminación. Lo que se busca al tener una serie de pasos es la reducción uniforme de la sección transversal. El molino de laminación básico consiste de dos rodillos opuestos los cuales puede contar con diámetros de 0.6 a 1.4 m y pueden ser reversibles o no reversibles. En el molino no reversible los rodillos giran siempre en la misma dirección y el trabajo pasa siempre por el mismo lado. En el molino reversible la rotación de los rodillos se da en las dos direcciones permitiendo que se puedan realizar varias reducciones pasando el material por el mismo juego de rodillos. La configuración de rodillos más utilizada en la industria actualmente es la de molinos de rodillos

tándem. Esta configuración consiste en una serie de rodillos o casetas de laminación, usualmente 8 o 10, en cada uno de los pasos se realiza una reducción en el espesor o un refinamiento en la forma que va a adquirir. En cada uno de los rodillos se aumenta la velocidad de laminación.

2.2.1 TEMPERATURA DE LAMINACIÓN

El laminado puede ser realizado en frío o en caliente, esto tiene que ver directamente con el recalentamiento al que se le somete al material. Para el laminado en caliente el material debe ser calentado por sobre su temperatura de re cristalización. Esto no solo permite que el material se vuelva plástico y fácil de deformar sino que también ayuda a eliminar cualquier discontinuidad o macro inclusión producida por el proceso de fundición. La ventaja de la laminación en caliente es que el producto del proceso queda sin esfuerzos residuales y sus propiedades son isotrópicas. En lo que a estructura cristalina se refiere en el proceso de laminado en caliente el grano se vuelve más fino y equiaxial debido a que el mismo puede re cristalizarse. Las desventajas del laminado en caliente son que el producto no puede mantenerse en las tolerancias adecuadas y la superficie muestra una capa de óxido característica. En el laminado en frío la temperatura del material es elevado hasta un punto bajo de la temperatura de re cristalización. El grano del material en la laminación en frío no tiene la posibilidad de re cristalizarse por tal motivo queda distorsionado y alargado en la dirección de laminación. Cuando el material se encuentra bajo de su temperatura de re cristalización al momento de laminar el material se endurece aumentando las deformaciones y por ende la inestabilidad del material, lo cual genera una de las grandes desventajas del laminado en frío que son los esfuerzos residuales,

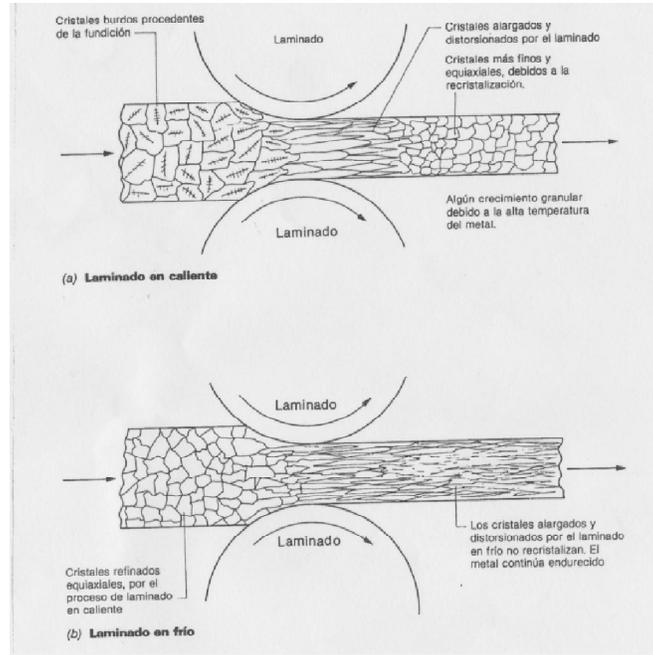


FIGURA 2.2. Efecto del laminado sobre la microestructura²

2.2.2 VELOCIDAD DE LAMINACIÓN

La velocidad del proceso de laminación es un factor muy importante a tomar en cuenta, especialmente si se va a laminar distintos metales. La velocidad de laminación tiene directa influencia sobre la deformación máxima del material ya que cada material reacciona de distinta manera a una velocidad de laminación específica, unos mostrarán mayor ductilidad mientras que otros mostraran menor ductilidad. Antes de laminar cualquier material se debe estudiar su tasa de deformación y evaluar la influencia de la misma sobre sus propiedades mecánicas. A temperatura ambiente la tasa de deformación no influye sobre la curva esfuerzo del material, sin embargo a temperaturas elevadas si existe influencia. Es por esto que si el material se desea laminar en caliente es importante contar con un estudio de tasa de deformación vs influencia sobre propiedades mecánicas.

² (Timings 1985)

2.3 PROPIEDADES METALÚRGICAS

2.3.1 ESTRUCTURA DE LOS METALES Y ALEACIONES

Casi todos los metales y aleaciones tienen una estructura cristalina de largo alcance, esto quiere decir que el arreglo entre los átomos que forman el grano o cristal es regular y repetitivo. La longitud del arreglo también es considerablemente larga con una longitud mayor a 100 nm. Si el patrón regular y repetitivo continúa a grandes longitudes se dice que el material es mono cristalino, esto quiere decir que el material está formado por un solo cristal. Si los arreglos de largo alcance cambian de orientación en el espacio, se forman varios cristales, a estos materiales se los conoce como poli cristalinos, es así que los metales se los cataloga como materiales poli cristalinos ya que cuentan con varios cristales o granos en distintas orientaciones, en cuanto a las aleaciones, tan solo algunas se las puede considerar como poli cristalinas ya que otras como el silicio muestran una estructura mono cristalina.

Para hacer el análisis de la estructura de los metales se debe tomar tan solo una unidad de la red cristalina, a este pedazo se lo conoce como celda unitaria y es precisamente la forma de esta y la distribución de los átomos en la misma la que determinará el tipo de material y a nivel macro también contribuirá con sus propiedades. La mayoría de metales a temperatura ambiente cuentan con tres tipos de estructuras cristalinas de las catorce existentes.

La primera estructura cristalina que se puede encontrar en los metales es la cúbica centrada en el cuerpo o bcc. En este tipo de estructura se cuenta con $1/8$ de átomo en cada vértice del cubo y un átomo en el centro de la celda unitaria. El factor de empaquetamiento, espacio ocupado por el átomo en la celda, para este tipo de arreglo es del 68%. Entre los metales que cuentan con este tipo de estructura están el cromo, molibdeno, vanadio y wolframio.

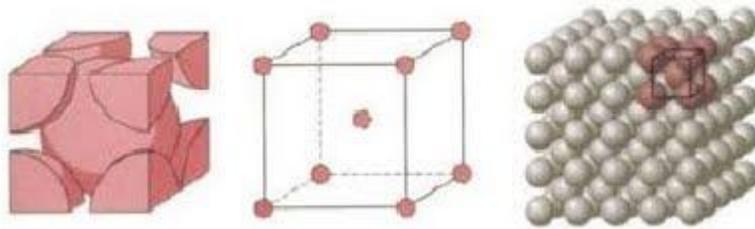
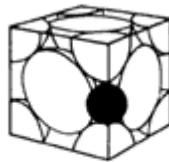


Figura 2.3 Representación de la estructura bcc³

La segunda estructura común entre los metales es la cúbica centrada en las caras, en este tipo de estructuras se cuenta con $1/8$ átomo en cada una de las esquinas del cubo y con $1/2$ de átomo en cada cara del mismo. Al tener este tipo de estructura el factor de empaquetamiento de la celda es de 74% con un total de 4 átomos ocupándola. Entre los metales que cuentan con este tipo de estructura están: aluminio, níquel, cobre, plata, platino, oro.



AUSTENITA

Figura 2.4 Representación estructura fcc⁴

La tercera estructura cristalina, es la estructura hexagonal de empaquetado compacto, este tipo de estructura es parecida a la cúbica centrada en las caras sin embargo esta difiere porque en el medio cuenta con un átomo completo y en las caras tan solo cuenta con $1/2$ de átomo. El empaquetamiento de este tipo de estructura es también de 74% aunque solo cuenta con dos átomos enteros dentro de la celda unitaria. Dentro de los metales que cuentan con esta estructura están: Berilio, Magnesio, Titanio alfa, Zinc y Zirconio.

³ Fuente: http://tecnologiasselectividad.blogspot.com/2009_09_01_archive.html

⁴ http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/080/htm/sec_6.htm

Es importante tomar en cuenta que muchos de estos metales pueden cambiar su estructura cristalina de acuerdo a las condiciones de presión y temperatura a la que este es sometido.

2.3.2 ESTRUCTURA CRISTALINA DEL HIERRO PURO

En base a lo que se expuso en el punto anterior se sabe que los metales cuentan con tres tipos de estructuras cristalinas, sin embargo el hierro puro tan solo adopta dos de estas estructuras cristalinas debido a que es un elemento polimórfico o alotrópico. Se dice que el hierro es un elemento alotrópico primero porque es un elemento puro y luego porque puede cambiar su estructura cristalina de acuerdo a la temperatura y presión a la que esté sometido. El término polimórfico se refiere a aleaciones y es mucho más general para hablar de cambios en estructura cristalina de materiales.

Debido a que el hierro puro es alotrópico y aparte de esto es un metal se sabe que puede adoptar cualquiera de las tres estructuras cristalinas de las que se habló anteriormente, sin embargo este elemento tan solo adopta dos tipos de estructuras la cúbica centrada en el cuerpo (bcc) y la cúbica centrada en las caras (fcc) . Mientras el hierro está a temperatura ambiente y hasta una temperatura de 910 C su estructura cristalina es del tipo bcc y se le conoce como hierro alfa o ferrita. Cuando este elemento es sometido a temperaturas entre 910 y 1394 C adopta una estructura cúbica centrada en las caras y se le conoce como hierro gamma o austenita. Una vez que el hierro supera esta temperatura y alcanza su punto de fusión 1539 C vuelve a adoptar la estructura cúbica centrada en el cuerpo y se le conoce como hierro delta, una vez que ha superado la temperatura de fusión la estructura cristalina se pierde ya que pasa a su estado líquido.

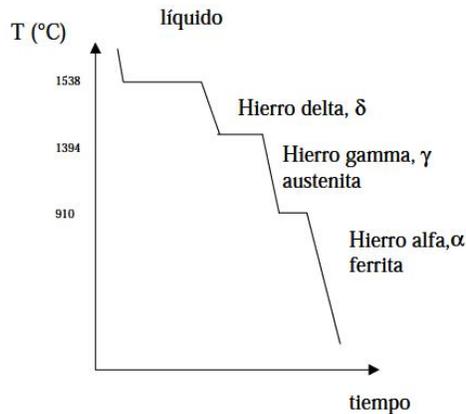


Figura 2.5 Curva de enfriamiento para hierro puro⁵

2.3.3 VARIEDADES ALOTRÓPICAS DEL HIERRO PURO

El hierro cuenta con dos diferentes variedades alotrópicas, la austenita y la ferrita α y δ . Estas tres variedades de estructuras cristalinas son soluciones sólidas de átomos intersticiales de carbono. Como se pudo ver en puntos anteriores los átomos en un cristal tienen distintos factores de empaquetamiento dejando espacios o huecos intersticiales entre ellos. Debido al tipo de ordenamiento de los átomos en la estructura cristalina se sabe que en la estructura fcc los huecos intersticiales son más grandes que en la estructura bcc, por lo tanto en una estructura fcc se puede acomodar un mayor número de átomos de carbono. Esto quiere decir también que la solubilidad de carbono en cada una de las estructuras cristalinas va a ser distinta. En base a estudios se ha podido determinar que la solubilidad máxima para la austenita es de un 2,11% de carbono mientras que para las ferritas es muy inferior, la ferrita α tiene una solubilidad de 0,77% C y la ferrita δ tiene una solubilidad de 0,09%.

Existe otro estado alotrópico para el acero y es la cementita o Fe_3C , este se da cuando la solubilidad máxima del hierro sólido se excede. En este caso el porcentaje de carbono en el hierro es del 6,67% C lo cual genera que el material se vuelva excesivamente duro y frágil.

⁵ Fuente: (Ernesto 2010) <http://www.scribd.com/doc/2252086/Tabla-de-Acero>

2.3.4 ALEACIONES HIERRO CARBONO

Las aleaciones ferrosas en su gran mayoría son aleaciones de hierro carbono, estas cuentan en su mayoría con un gran contenido de hierro, un pequeño contenido de carbono y un aún más pequeño contenido de otros minerales. Las aleaciones que son consideradas como hierro carbono son aceros al bajo carbono, aceros aleados, aceros inoxidables y los hierros fundidos. El contenido de carbono es el que en su mayoría ayuda a diferenciar entre un hierro y un acero, siendo considerados aceros todas aquellas aleaciones hierro carbono que cuentan con un porcentaje de contenido de carbono inferior al 2%, los aceros de comerciales generalmente suelen tener un contenido de carbono aproximado de 0,20% sin embargo este contenido puede cambiar de acuerdo a las características que se le quiera dar al acero. En cambio los hierros colados o hierros blancos tienen un contenido de carbono siempre superior al 2% usualmente se encuentran entre 2 a 4,3% de C. Todas las variaciones que pueden sufrir las aleaciones hierro carbono se encuentran ligadas directamente con el cambio de temperatura esto se puede analizar en el diagrama hierro carbono.

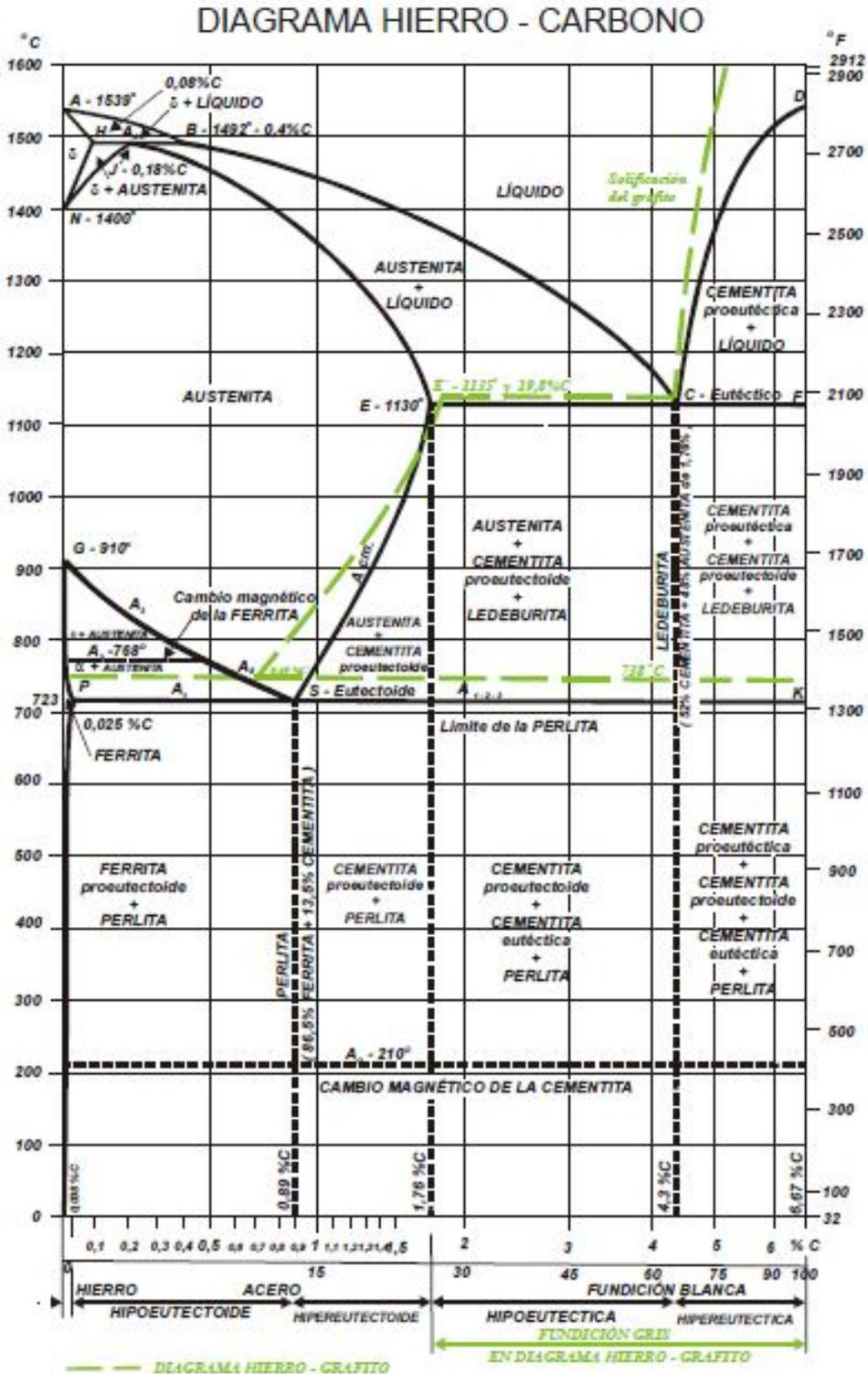


Figura 2.6 Diagrama de equilibrio Hierro-Carbono⁶

⁶ (Arcila 2010) <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2010/10/27/5-5-diagrama-hierro-carbono-puntos-criticos-y-ejemplos-de-regla-de-la-palanca/>

Como se pudo ver anteriormente la estructura cristalina del hierro cambia de acuerdo a la temperatura a la que este esté sometido. Es precisamente esta propiedad la que permite que el hierro pueda disolver más o menos cantidad de carbono. Es así que la fase austenítica del hierro la cual está sobre los 900 C es la que más carbono puede aceptar formando una estructura cristalina homogénea, sin embargo cuando esto ocurre y el hierro empieza a enfriarse el exceso de carbono contenido en la red cristalina es expulsado en dos formas como carbono puro, o como cementita. Es precisamente la presencia de cementita la que marca la diferencia entre hierro y aceros. Los aceros tienen un alto contenido de cementita (Fe_3C) esto permite que sea una aleación hierro carbono pero con un bajo contenido de carbono contenido en Fe_3C .

2.3.5 COMPOSICIÓN DE LAS ALEACIONES HIERRO CARBONO

Las aleaciones hierro carbono o el acero cuenta con una serie de componentes que ayudan a que este tenga una serie de características determinadas. La composición química de cada acero es la que nos da los porcentajes de cada componente con los que cuenta, esto puede ser determinado o por una prueba de composición química o también por la denominación del acero dado por la AISI o la SAE. Es así que a los aceros se les ha denominado con un número de acuerdo a su composición. El primer número indica el grupo al que el acero pertenece por ejemplo 1 es para un acero al carbono, 2 un acero al níquel, 3 un acero al níquel-cromo etc. El segundo número en la denominación indica el porcentaje del elemento predominante en la aleación. Por último los últimos dos o tres números indican el porcentaje de carbono que tiene la aleación, así un acero SAE 1020 es un acero al carbono con un 0.20% de carbono.

Aunque es importante conocer acerca de lo que quiere decir la denominación de los aceros también es muy importante saber para qué sirven cada uno de los elementos que se encuentran en la aleación y sus porcentajes de aceptación. Las aleaciones hierro carbono cuentan en su gran mayoría tienen a 4 elementos presentes en su composición química como son el azufre, manganeso, fósforo y silicio.

El azufre debe estar presente en las aleaciones hierro carbono en un porcentaje menor al 0,05% ya que este en presencia con el hierro forma sulfuro de hierro el cual se

concentra en los bordes de grano. Un exceso de sulfuro de hierro produce que al momento que el acero está siendo forjado o laminado se vuelva duro y fragilice rompiéndose cuando está siendo moldeado. Para lograr que el azufre salga de la aleación y evitar esto se le añade manganeso el cual en presencia del azufre forma sulfuro de manganeso, este compuesto tiende a salir en la escoria al momento de la fabricación del acero.

El manganeso está presente en las aleaciones hierro carbono entre 0,03% a 1%, este rango es el indicado como para que el manganeso forme sulfuro de manganeso y libere a la aleación del azufre, sin embargo el porcentaje de manganeso que debe tener la aleación depende directamente del porcentaje de azufre. Cuando existe un exceso de manganeso se forma carburo de manganeso el cual se asocia con el carburo de hierro en la cementita. El manganeso ayuda a la solidez de la pieza debido a que ayuda a la desoxidación del acero líquido.

El fósforo cuando se encuentra en un rango no superior al 0,04% se disuelve en ferrita aumentando ligeramente la resistencia y la dureza. Se han hecho estudios que han demostrado que en algunos tipos de acero si el fosforo se encuentra entre 0,07% al 0,12% las propiedades de corte mejoran, sin embargo si se supera este porcentaje el acero disminuye su ductilidad, lo cual aumenta la tendencia a que el acero se agriete en el conformado.

El silicio cuando se encuentra en un rango de 0,05% a 0,3% se disuelve en ferrita aumentando así la resistencia sin disminuir la ductilidad. Al igual que el manganeso este elemento en presencia de oxígeno forma dióxido de silicio desoxidando el acero líquido y ayudando a dar mayor solidez al acero

2.3.6 INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA EN ACEROS

2.3.6.1 Carbono

El Carbono es el elemento de aleación principal en los aceros al carbón debido a su efectividad y bajo costo. El carbono es el responsable de la formación de carburo de hierro y cementita el cual junto con la ferrita forma la perlita. Si se enfría bruscamente el carbono ocasiona un endurecimiento superficial del acero. El carbono es el responsable de dar dureza y subir la resistencia del acero.

2.3.6.2 Manganeso

El manganeso es un formador de austenita. Al combinarse con el azufre previene la formación de sulfuros de hierro en los bordes de grano que son muy perjudiciales durante el proceso de laminación. La principal función del manganeso es desoxidar y aumentar la dureza del acero.

2.3.6.3 Azufre

El azufre es considerado una impureza en los aceros debido a que puede ser perjudicial para algunas propiedades mecánicas del material. Sin embargo en algunos aceros se añade hasta 0,25% de azufre para aumentar la maquinabilidad. Los aceros altos en azufre son difíciles de soldar ya que son propensos a generar porosidades en la soldadura.

2.3.6.4 Fósforo

El fósforo al igual que el azufre también es considerado perjudicial ya que disminuye la ductilidad y la resistencia al impacto. Pero al igual que el azufre en algunos aceros se agrega fósforo para aumentar la maquinabilidad y la resistencia a la tensión.

2.3.6.5 Cromo

El cromo se disuelve en la ferrita, aumentando la profundidad del endurecimiento. Evita la corrosión y aumenta la resistencia a altas temperaturas.

2.3.6.6 Aluminio

EL Aluminio es usado principalmente como desoxidante en la elaboración de acero. El Aluminio también reduce el crecimiento del grano al formar óxidos y nitruros.

2.3.7 ESTRUCTURA MICROGRÁFICA

La formación de cristales en los metales se da a medida que el material va cambiando su forma de líquido a sólido. Cuando el metal líquido ha pasado por debajo de su temperatura de congelamiento se empiezan a formar espontáneamente núcleos estables los cuales ya se han solidificado. Estos núcleos sirven de base para que otros átomos que empiezan a enfriarse se unan a ellos, evidentemente una parte de los átomos que se van a enfriar formarán otros núcleos. Es debido a esto que los cristales o granos empiezan a formarse ya que a medida que los átomos van uniéndose a los núcleos el cristal va creciendo en las tres direcciones.

A medida que el cristal va creciendo se va formando una estructura tipo árbol la cual se le conoce como dendrita. En metales puros mediante una micrografía se puede identificar la dendrita, sin embargo en el caso de los aceros y del hierro el cristal seguirá creciendo conforme va aumentando la dendrita llegará un punto en el que las separaciones entre dendritas se llenen y se obstruya el crecimiento de cada una de ellas. Cuando esto ocurre la dendrita toma la forma irregular que se conoce como grano y al espacio formado debido al choque entre dendritas se le conoce como límite o frontera de grano.

2.3.7.1 Tamaño de grano

El tamaño de grano de un acero colado o de un metal colado depende directamente de la rapidez de enfriamiento del acero, ya que la rapidez de crecimiento del grano depende de la velocidad de nucleación que exista y esta depende de la rapidez de enfriamiento. El tamaño de grano también tiene que ver con la cantidad de núcleos que se formen, así cuando hay un alto número de núcleos el tamaño de grano será muy pequeño mientras que si existe un pequeño número de núcleos el tamaño de grano será grande. Cuando existe un enfriamiento rápido se forma una gran cantidad de núcleos produciendo que los cristales no tengan mucho espacio para crecer y por ende

formando granos pequeños. Al contrario cuando existe un enfriamiento lento se forman muy pocos núcleos dejando mucho espacio para que las dendritas o cristales puedan avanzar. Los materiales con tamaño de grano fino muestran una alta tenacidad así como una dureza elevada a comparación de los materiales de grano grueso.

En los procesos de fundición industrial usualmente los moldes para la colada suelen estar fríos. Lo que genera que al momento de la colada la parte externa del metal fundido tenga un tamaño de grano fino debido al enfriamiento súbito, mientras que hacia el centro, donde hay un enfriamiento lento y controlado se generen tamaños de grano más gruesos.

2.3.8 ESTRUCTURA MACROGRÁFICA

La estructura macrográfica de los metales tiene que ver con la orientación de la fibra y con la identificación de defectos como poros, rupturas, sopladuras, inclusiones, exceso de carbono entre otras. La fibra en si se forma cuando un material es sometido a un proceso de laminación donde su longitud es aumentada y su sección transversal es disminuida. Cuando a una pieza metálica se le ataca con un químico determinado se puede notar la dirección de la fibra ya sea a simple vista u otras veces con la ayuda de un microscopio con un aumento adecuado. Las inclusiones se dan cuando en una pequeña zona el carbono o las ferroaleaciones no se han disuelto en su totalidad, esto causa que exista una superficie heterogénea donde se encuentra una discontinuidad en la fibra, algo similar ocurre en las sopladuras, pero esto se debe específicamente a la presencia de oxígeno en el proceso. Las inclusiones no solo que generan una discontinuidad si no que pueden causar que el materia falle, mucho más si estas inclusiones se encuentran de manera perpendicular a la dirección de la fibra.

Al verificar la estructura macrográfica con un ataque químico también se puede verificar si existen excesos de carbono en ciertas zonas del material. Esto se verá por la formación de una sombra o halo en la zona donde exista un exceso de carbono o también una afectación térmica.

2.3.9 INCLUSIONES

2.3.9.1 No metálicas

Las inclusiones que, principalmente se encuentran en el acero son sulfuros de manganeso y hierro, óxidos y silicatos de hierro, manganeso, silicio y aluminio. Las inclusiones mayores se ven bien con 100 aumentos, pero las más pequeñas no se pueden observar aun con los mayores aumentos.

La influencia de las inclusiones no metálicas sobre la calidad del acero tiene una gran importancia, y para penetrar en ello, el primer objetivo, evidentemente, es controlar la distribución de las inclusiones localizadas, estimar sus efectos y, en lo posible, su número por examen macro y micrográfico

Las inclusiones no metálicas están compuestas principalmente por productos de desoxidación y desulfuración. Suelen producirse en la capa superficial del fondo, en la zona de sedimentación del lingote y en la superficie superior del lingote.

A las diferentes tipos de inclusiones no metálicas se las puede clasificar de la siguiente manera:

- Por Origen:
 - Endógenas, son aquellas originadas internamente en el acero debido a la desoxidación y la precipitación de sulfuros
 - Exógenas, suelen tener mayores dimensiones que las inclusiones endógenas, por lo que son más perjudiciales. Las principales causas por las que se forman son la re oxidación del acero, la emulsificación de la escoria y el desgaste de los refractarios.

- Por Composición:
 - Óxidos, están compuestas por distintas fases de un conjunto de óxidos, como CaO, MgO, Al₂O₃, entre otros.
 - Sulfuros

- Por Tamaño
 - Micro inclusiones, son las más comunes y debido a su tamaño no suelen tener mayor influencia en las propiedades del producto final
 - Macro inclusiones, pueden generar grandes discontinuidades en el acero, las que actúan como concentradoras de esfuerzos. El tamaño crítico a partir del cual estas inclusiones afectan las propiedades depende directamente de la aplicación del producto final

2.3.9.2 Metálicas

Las inclusiones metálicas se encuentran de diferentes maneras en los aceros y afectan de diversas formas a las propiedades del mismo. Las inclusiones metálicas las podemos encontrar:

- Como carburos, son metales como el cromo, molibdeno, magnesio, wolframio, vanadio, entre otros. Estos metales combinados con el carbono forman compuestos de carburo de dureza mayor que la martensita. Estos se observan en forma de granos brillantes.
- Disueltos en ferrita, el níquel, cromo, aluminio, silicio, manganeso cromo y fósforo se pueden encontrar disueltos en la ferrita.
- Emulsionados. El cobre en porcentajes mayores al 60% y el plomo pueden encontrarse formando bolsas pequeñas, dando al acero propiedades especiales.

2.3.10 IMPUREZAS

Las impurezas son todos los elementos indeseables en la composición del acero. Se encuentran en los aceros debido a que en el proceso de fabricación el acero tiene contacto con diferentes tipos de minerales y combustibles. Las impurezas son

indeseables debido a que afectan a las propiedades del acero, es por esto que se busca eliminar o reducir su contenido.

2.3.10.1 Azufre

El azufre con el hierro forma sulfuros, que conjuntamente con la austenita, dan lugar a un eutéctico cuyo punto de fusión es bajo. Esto ocasiona que al posteriormente utilizar los lingotes para el laminado en caliente, dicho eutéctico se encuentre en estado líquido, lo que provoca el desgarramiento del material.

Para controlar el nivel de azufre se utiliza el manganeso, que al tener mayor afinidad con el azufre da lugar a que en vez de FeS se forme MnS, que tiene un alto punto de fusión y buenas propiedades plásticas. Se debe poner una concentración de Mn aproximadamente cinco veces la concentración de S para que se produzca la reacción.

Pese a que se considera al azufre como una impureza, su presencia es positiva para mejorar la maquinabilidad en los procesos de mecanizado. El límite máximo aproximado es de 0,04%.

2.3.10.2 Fósforo

El fósforo resulta perjudicial, ya sea al disolverse en la ferrita, pues disminuye la ductilidad, como también por formar FeP (Fosfuro de hierro). El fosfuro de hierro junto con la austenita y la cementita, forman un eutéctico ternario denominado esteadita, el que es sumamente frágil y tiene un punto de fusión relativamente bajo.

Aunque se considera una impureza en el acero debido a que reduce la tenacidad y la ductilidad, a veces se agrega para aumentar la resistencia a la tensión y mejorar la maquinabilidad. El límite máximo aproximado es de 0,04%.

2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas del material tienen que ver con la reacción y cambios que puede tener el mismo cuando este es sometido a un esfuerzo. Cada material reacciona de manera diferente a los distintos tipos de esfuerzo, no es lo mismo golpear un metal que golpear un pedazo de vidrio, ya que probablemente el vidrio terminará rompiéndose. Para determinar todas estas propiedades y sus reacciones se realizan distintos tipos de ensayos como son el ensayo de dureza, el ensayo de tracción entre otros.

2.4.1 DUREZA

La dureza es la capacidad de un material para resistir la penetración que se produzca por un objeto punzante sobre la superficie. Se han desarrollado diferentes tipos de ensayos con sus respectivas escalas para medir la dureza, los más utilizados son: Rockwell (HR), Brinell (HB), Vickers (HV o VHN), Shore (HS) y Leeb (HL).

En el ensayo de dureza la indentación se produce debido al proceso de deformación plástica del material. Se ha podido comprobar que la deformación llevada a cabo en el material por el ensayo es aproximadamente de un 8%, debido a esto la dureza está en función del esfuerzo de fluencia σ_y y también tiene que ver con la velocidad de endurecimiento por trabajo que está realizando el material, o la velocidad con la que la fuerza es ejercida.

Los índices de dureza son utilizados para comparar materiales, especificaciones de fabricación y tratamientos térmicos, control de calidad y para correlacionar con otras propiedades. Por ejemplo la dureza Brinell tiene una relación con la resistencia a la tensión del acero de $500 \cdot HB$

Mientras que en la dureza Vickers tenemos que se encuentra entre 0.2 a $0.3\sigma_y$ para materiales duros y $0.3\sigma_y$ para metales donde σ_y se puede expresar en MPa. A

continuación se muestra una tabla con las equivalencias de dureza y esfuerzo de fluencia para distintos materiales

Tabla 2.4 Tabla de equivalencias entre dureza Vickers y esfuerzo de fluencia

Material	VHN(kgf/mm ²)	Esfuerzo de cedencia (MN/m ²)
Diamante	8,400	54,100
Alúmina	2,000	11,300
Boro	2,500	13,400
Carburo de Tungsteno	2,100	7,000
Berilio de Zinc	1,300	7,000
Acero	210	700
Cobre Recocido	47	150
Aluminio Recocido	22	60
Plomo	6	16

Fuente: 257 Anderson

2.4.2 ESFUERZO DE FLUENCIA

En la curva esfuerzo deformación se pueden identificar tres puntos muy importantes para las características del material, estos son: el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo de tensión y el esfuerzo de rotura. Uno de los puntos más importante de esta curva es el esfuerzo de fluencia o punto de fluencia, que es el límite entre el comportamiento elástico y el comportamiento plástico del material.

Cuando a un material se le empieza a aplicar una fuerza gradual este presenta una deformación elástica, esto quiere decir que si al material se le dejaría de aplicar la fuerza volvería a su longitud inicial, no existiría ningún tipo de deformación. Si la fuerza continuaría actuando constantemente el material va a llegar a su punto de fluencia o límite elástico, en este punto el material ya no recuperará su longitud inicial si la fuerza deja de actuar. A nivel microscópico se entiende al límite de fluencia como el esfuerzo necesario para que las dislocaciones empiecen a moverse o también para que los

granos que se encuentran juntos empiecen a separarse. Existen materiales en los cuales no llegan a tener deformación plástica esto quiere decir que este se rompe en su punto de fluencia. La velocidad con la que el material llega a su límite de fluencia tiene que ver con la cantidad de vacancias que presente la microestructura del mismo.

2.4.3 RESISTENCIA A LA TENSIÓN

La resistencia a la tensión es el esfuerzo resultante de la mayor fuerza aplicada y por ello es el esfuerzo máximo que ocurre en la curva esfuerzo-deformación. En la mayoría de materiales dúctiles la deformación no es uniforme, en algún momento una región se deforma más que en otras áreas y se genera una reducción en el área transversal. A esta región localmente deformada se la conoce como garganta o estricción. La resistencia a la tensión es el esfuerzo en el que inicia la estricción.

Antes de que el material llegue a su límite de tensión este pasa por una fase intermedia en la cual el material empieza a fluir en estado estacionario y el material empieza a endurecerse debido al trabajo que está realizando. En cuanto a su micro estructura los límites de grano están deslizándose. A esta fase se le llama fluencia ya que el material supero el límite de fluencia y no recuperará su longitud inicial. Sin embargo a nivel microscópico el movimiento de los límites de grano tan solo contribuye con un 10% de la deformación total del material. A temperaturas altas la fluencia en el material se produce por la migración de vacancias y no así por el movimiento de los límites de grano y en este estado la deformación del material se le conoce como *Deformación de Herring-Nabarro* su velocidad se la calcula como:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\sigma \alpha^3 D}{2kt d^2} \quad 2.2$$

La resistencia a la tensión se utiliza principalmente para comparar el comportamiento de los materiales y para estimar otras propiedades que son difíciles de evaluar.

2.4.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad o módulo de Young es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la región elástica. Viene dada por la ley de Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad 2.3$$

El módulo está estrechamente relacionado con las fuerzas que unen los átomos en el material, por lo que las fuerzas de unión y en consecuencia el módulo de elasticidad serán mayores para metales de alto punto de fusión.

2.4.5 DUCTILIDAD

La ductilidad es el grado de deformación que un material puede soportar sin romperse. Existen dos procedimientos para medir la ductilidad. El primero consiste en medir la distancia entre las marcas hechas en la probeta del ensayo de tracción, antes y después del ensayo, luego se calcula el porcentaje de alargamiento o elongación mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Elongación} = \frac{l_f - l_o}{l_o} * 100 \quad 2.4$$

Donde l_f es la distancia entre las marcas después de romperse la probeta.

El segundo consiste en medir el cambio porcentual del área transversal en el punto de fractura, antes y después del ensayo. Se calcula mediante:

$$\text{Reducción de área} = \frac{A_o - A_f}{A_o} * 100 \quad 2.4$$

Donde A_f es el área transversal final en la fractura.

Los materiales dúctiles tiene una curva esfuerzo-deformación que llega a su punto máximo en el punto de resistencia a la tensión. En materiales frágiles, la carga máxima ocurre en el punto de falla. En materiales extremadamente frágiles, como los cerámicos, el esfuerzo de fluencia, resistencia a la tensión y el esfuerzo de ruptura son los mismos.

Para diseñadores y fabricantes es muy importante la ductilidad, ya que con un material dúctil se pueden lograr formas difíciles de maquinar sin que este se rompa y si el esfuerzo aplicado es muy alto el componente se deformara plásticamente antes de romperse.

2.5 MÉTODOS DE ENSAYO

2.5.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE INSUMOS PARA ACERÍA

2.5.1.1 Espectrómetro de Rayos X

La fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF) es una técnica que reconoce un gran número de elementos químicos (no compuestos químicos). Logra alcanzar unos límites de detección de hasta 0.002% (20 ppm).

La técnica EDXRF utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X que se genera al excitar una muestra con una fuente emisora de rayos X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Entonces, los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones: la llamada radiación X fluorescente o secundaria. Esta radiación de fluorescencia es característica para cada elemento químico. Por lo tanto, es posible identificar un elemento dentro del espectro de la muestra si se conoce la energía entre los orbitales atómicos implicados (longitud de onda). La concentración de cada elemento se detecta midiendo la intensidad de la energía asociada a cada transición de electrones. Es decir, la salida de un análisis EDXRF es un espectro que muestra la intensidad de radiación en función de la energía.

Los rayos X se producen comúnmente mediante el bombardeo con electrones de un blanco metálico dentro de un tubo al vacío. Cuando los electrones impactan en el ánodo la casi totalidad de la energía cinética es disipada como calor, pero una pequeña proporción genera fotones altamente energéticos o rayos X. La distribución energética de los fotones generados por frenado resultada ser continua, sin embargo, también se producen unas líneas espectrales características del metal que compone el ánodo. Estas líneas corresponden a transiciones o saltos de energía de los electrones dentro de las capas atómicas.

2.5.2 MICROGRAFÍAS

En lo que a ensayos metalográficos se refiere la observación y medición de la microestructura de un material es de vital importancia para poder comprender ciertas propiedades mecánicas del mismo. Sin embargo para determinar tamaño de grano e inclusiones se debe seguir una serie de pasos los cuales están estipulados en normas como la ASTM.

2.5.2.1 Tipos de ataques

El ataque químico en micrografías es de suma importancia ya que permite revelar cosas que no se pueden observar en una superficie especular. Entre lo que el ataque químico revela está el tamaño de grano, segregación, tipo, tamaño y disposición de fases. El estudio de lo mencionado anteriormente permitirá llegar a conclusiones acerca de tratamientos térmicos o esfuerzos mecánicos a los que ha sido sometido el material.

Para el ataque químico se necesita una superficie especular ya que esto permitirá que los resultados no se distorsionen. Este proceso se lo debe realizar por inmersión del material en una solución química previamente elegida. El tiempo de ataque varía de

solución a solución y también de acuerdo al material, es por esto que el tiempo de ataque lo da la experiencia.

Existen un sin número de ataques químicos los cuales en su mayoría son soluciones. Cada solución tiene una concentración determinada y es utilizada con distinto fin ya que cada ataque sirve para revelar solo ciertas cosas.

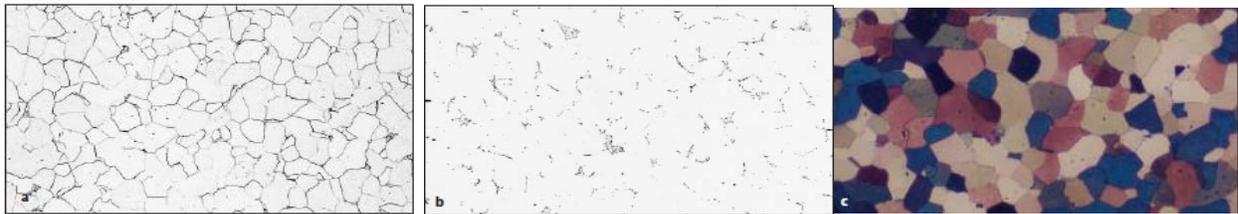


FIGURA 2.7 : Estructura micrográfica de acero de bajo carbono atacado con distintas soluciones a) Nital 2% b) Picral4% C) Barahas⁷

Para aceros los ataques más utilizados son el picral y el nital ya que estos permiten revelar las fases representativas de dicho material. El nital es una solución de alcohol metílico y ácido nítrico cuya concentración varía de 2% a 5% dependiendo del tipo de acero a atacar. El Picral es una solución de ácido pícrico y etanol cuya concentración de esta solución varía de entre 4% a 5%.

El nital quema la perlita presente en el acero revelando los bordes de grano y definiendo la perlita claramente. Esto permite revelar el tipo y tamaño de grano en el acero así como las fases de mayor contenido en el mismo. El picral quema la cementita presente en el acero permitiendo que esta se pueda visualizar en el microscopio. Sin embargo esta solución no permite definir la perlita, lo cual no permite definir el grano para un análisis posterior.

⁷ Etching 2005

2.5.2.2 Medición de tamaño de grano

El tamaño de grano es la medida promedio de una serie de tamaños de grano considerados en un área específica. Existen varios métodos para la determinación del tamaño de grano, según la norma ASTM E112 se analizarán tres métodos: el método planimétrico, intersección y comparación.

La muestra que se va a analizar debe tener una cara plana y dicha cara debe ser preparada especularmente con métodos de desbaste grueso, lija 60, y un desbaste fino que consiste de cuatro tipos de lijas 120, 240, 320, 600. El último paso de la preparación consiste del pulido, el cual puede realizarse con alúmina alfa de 1 micrón o con pasta de diamante.

Para llevar a cabo el ensayo la norma estipula que se debe tomar un área de 160 mm^2 de la superficie atacada. Luego de que se ha identificado el área se debe realizar un barrido total de la misma. En el barrido se trata de identificar un tamaño de grano representativo, esto quiere decir que se debe tomar en cuenta el tamaño y configuración de granos que más se repite. Cuando se ha identificado esto se debe enfocar en el microscopio una sección de las representativas y adquirir dicha imagen con un programa de análisis de captura de imagen.

2.5.2.2.1 Por comparación

El método de comparación es el más fácil y menos preciso de los tres métodos mencionado, sin embargo no deja de ser confiable. Este método debe ser aplicado solamente a materiales cuya microestructura se haya re cristalizado completamente.

El método consiste en comparar la imagen obtenida luego del barrido de la muestra con una serie de imágenes patrones las cuales representan los distintos tamaños de grano. Se debe escoger la imagen que mejor se ajuste a la imagen correspondiente a la muestra. En este método la medición viene expresada en un número de tamaño de grano de la ASTM el cual empieza en -3 y termina en 12, siendo el -3 el tamaño de

grano más grande y el 12 el tamaño de grano más pequeño. Cada uno de los números ASTM de tamaño de grano tiene una equivalencia en granos por milímetro cuadrado como se muestra en la tabla

TABLA 2.5 *Equivalencia de tamaño de grano ASTM con cantidad de granos por milímetro cuadrado*

Tamaños de grano		
No. ASTM	Granos/mm ²	Granos/mm ³
-3	1	0.7
-2	2	2
-1	4	5.6
0	8	16
1	16	45
2	32	128
3	64	360
4	128	1,020
5	256	2,900
6	512	8,200
7	1,024	23,000
8	2,048	65,000
9	4,096	185,000
10	8,200	520,000
11	16,400	1,500,000
12	32,800	4,200,000

Fuente: Ingeniería de manufactura (Alting 1990)

Para calcular cuántos granos existen por pulgada cuadrada basado en el número ASTM se debe utilizar la siguiente fórmula:

$$n = 2^{G-1} \tag{2.5}$$

Dónde:

n: número de granos por pulgada cuadrada

G: Numero ASTM para tamaño de grano.

Según norma el método de comparación para tamaño de grano debe realizarse con un objetivo de 100X, esto ya que las imágenes patrón se han tomado a dicho aumento. Sin embargo si se cambia el objetivo a mayor o menor aumento hay un factor de

corrección el cual se debe sumar al valor de tamaño de grano determinado. La fórmula para el factor de corrección es la siguiente:

$$Q = 6.64 \log \left(\frac{M}{M_b} \right) \quad 2.6$$

Dónde:

Q es el factor de corrección

M La magnificación a la que se vio el grano

M_b la magnificación base, usualmente 100x

En el método de comparación la precisión con la que se cuenta es de ±1 tamaño de grano.

2.5.2.2.2 Planimétrico

El método planimétrico o de intersección de Jeffries es más preciso que el de comparación. El método consiste en trazar un círculo de por lo menos 5000 mm² de área sobre la imagen del tamaño de grano. La imagen debe haber sido captada en un aumento en el cual por lo menos 50 granos aparezcan dentro del círculo. Cuando se tenga el círculo trazado y definido se debe contar el número de granos dentro del círculo, luego se debe contar aquellos granos que son intersecados por la línea del círculo.

Con el valor de granos intersecados y de granos dentro del círculo se debe aplicar la siguiente fórmula:

$$N_A = f \left(N_{\text{Inside}} + \frac{N_{\text{Intercepted}}}{2} \right) \quad 2.7$$

N_A: Número de granos por milímetro cuadrado

f: Factor de Jeffries

N_{inside}: Número de granos dentro del círculo

N_{intercepted}: Número de granos intersecados por la línea del círculo.

El factor de Jeffries es el factor de corrección para tamaño de grano de acuerdo al aumento en el que se está observando la microestructura. Este factor se lo obtiene por medio de la siguiente tabla.

TABLA 2.6: *Factor de Jeffries para distintos aumentos*

Magnification Used, M	Jeffries' Multiplier, f , to Obtain Grains/mm ²
1	0.0002
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75 ^A	1.125
100	2.0
150	4.5
200	8.0
250	12.5
300	18.0
500	50.0
750	112.5
1000	200.0

Fuente: Norma ASTM E112

La precisión del método planimétrico es muy alta, $\pm 0,25$ unidades de tamaño de grano.

2.5.2.2.3 Intersección

El método de intersección es muy simple y de alta precisión, sin embargo hay que tener mucho cuidado al momento de aplicarlo. Para este método se debe trazar una línea recta en la imagen de la microestructura del material. Existen dos posibilidades de conteo la una es contar bordes de grano y la otra es contar granos.

Si el método se aplica para intercepción de granos se debe contar los granos que han sido intersecados por la línea completamente, si la línea no intersecara a un grano completamente se lo considera como medio grano.



FIGURA2.8: Ilustración del método de intersección para tamaño de grano⁸.

Sumar el número de granos intersecados y aplicar la siguiente fórmula

$$N_L = \frac{N}{L_T} \tag{2.8}$$

Dónde:

- NI: Cantidad de granos sobre milímetro
- N: número de granos intersecados por la línea
- Lt: longitud real de la línea trazada.

Si se utilizara los bordes de grano como referencia se debe contar el número de bordes de grano intersecados por la línea trazada. Cuando se tenga el total de bordes de grano intersecado aplicar la siguiente fórmula:

$$P_L = \frac{P}{L_T} \tag{2.9}$$

Dónde:

⁸ (Vort 2005), Grain size Measurement.

Nl: Cantidad de granos sobre milímetro

P: número de borde granos intersecados por la línea

Lt: longitud real de la línea trazada.

El tamaño de grano utilizando cualquiera de las dos referencias debe ser el mismo. El método de intersección tiene la particularidad que en base al número de granos o bordes de grano intersecados se puede obtener el número de tamaño de grano ASTM, para esto se debe aplicar la siguiente fórmula.

$$G = [6.644 \log(N_L \text{ o } P_L)] - 3.288 \quad 2.10$$

La precisión de este método es de 0,25 unidades de tamaño de grano.

2.5.2.3 Medición de inclusiones

La determinación del tipo y cantidad de inclusiones es fundamental en la industria siderúrgica y de conformados. Estos agentes extraños ajenos a la estructura metálica, provenientes de la desulfuración y desoxidación del acero son en muchos casos los causantes de rupturas en producto laminado. Esto se debe a que las inclusiones no permiten que el acero se uniforme y genera concentraciones de esfuerzos alrededor de los mismos lo cual provoca que cuando el material es esforzado por una zona de alto nivel inclusionario, este falle. Es por esto que la Norma ASTM E 45 explica cómo medirlos y clasificarlos para determinar si el acero se encuentra sucio o no.

Según la Norma ASTM E45 las inclusiones pueden ser clasificadas en 4 tipos de acuerdo a su morfología y a su escala de grises. Las inclusiones que se expondrán a continuación son producto de la desoxidación del acero y de la precipitación de sulfuros durante la fase de solidificación.

Tipo A: se refiere a sulfuros y están separados de las inclusiones tipo B, C y D debido a su escala de grises. Esto porque que los óxidos reflejan mucho menos luz que los

sulfuros. Usualmente los sulfuros pueden ser cadenas alargadas como la que se muestra a continuación.

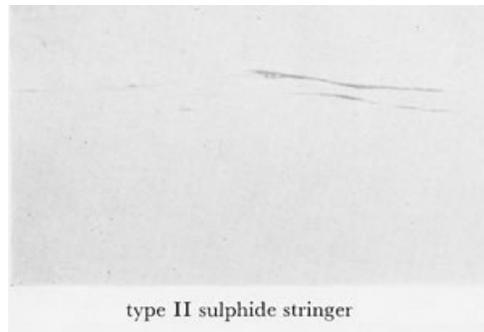


FIGURA 2.9: *Ilustración de una inclusión Tipo A Sulfuro*⁹

Las inclusiones tipo B, C y D son regularmente óxidos y son separados entre sí debido a su morfología.

Tipo B: Este tipo de inclusiones son cadenas discontinuas esto quiere decir que existen 3 o más inclusiones alargadas en el plano de laminación. Estas inclusiones tienen un desfase menor a 15 μm y una separación menor a 40 μm .



Figura 2.10: *Ilustración de una inclusión Tipo B*⁹

Tipo C: Estas inclusiones son cadenas sólidas esto quiere decir que es una inclusión alargada en el sentido de laminación.



Figura 2.11: *Ilustración de una inclusión Tipo C*⁹

⁹ propia

Tipo D: Son conocidos como óxidos globulares, estos no son alargados y tampoco forman cadenas, están dispersos a lo largo de la muestra.

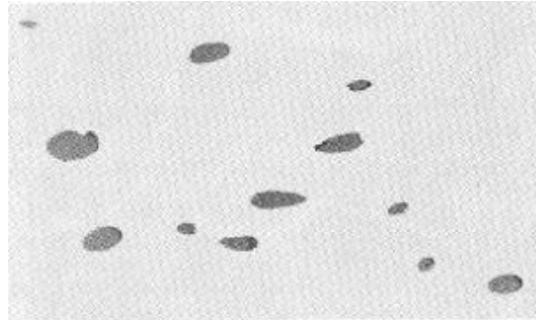


Figura 2.12: Ilustración de una inclusión Tipo D¹⁰

La exigencia de la norma es utilizar un área de 160 mm² en la cual se debe realizar un barrido completo en forma de S, a un aumento de 100x. Al momento de realizar este barrido se debe identificar las 6 áreas con mayor número de inclusiones o con las inclusiones más grandes. Luego de esto se debe clasificar las inclusiones según su severidad de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 2.7: Niveles de severidad para inclusiones

TABLE 1 Minimum for Severity Level Numbers (Methods A, D, and E)^{4,5}

Severity Level	Total Length in One Field at 100X, min, mm (in.)			Number of Inclusions in One Field, min
	Type A	Type B	Type C	
½	3.7 (0.15)	1.7 (0.07)	1.0 (0.07)	1
1	12.7 (0.50)	7.7 (0.30)	7.6 (0.30)	4
1½	26.1 (1.03)	18.4 (0.72)	17.6 (0.69)	9
2	43.6 (1.72)	34.3 (1.35)	32.0 (1.26)	16
2½	64.9 (2.56)	55.5 (2.19)	51.0 (2.01)	25
3	89.8 (3.54)	82.2 (3.24)	74.6 (2.94)	36
3½	118.1 (4.65)	114.7 (4.52)	102.9 (4.05)	49
4	149.8 (5.90)	153.0 (6.02)	135.9 (5.35)	64
4½	189.8 (7.47)	197.3 (7.77)	173.7 (6.84)	81
5	223.0 (8.78)	247.6 (9.75)	216.3 (8.52)	100

Fuente: Norma ASTM E45

¹⁰ propia

Hecho esto se debe realizar el promedio de inclusiones para las 6 imágenes tomadas en los 160 mm².

2.5.3 ENSAYOS MECÁNICOS

2.5.3.1 Dureza

2.5.3.1.1 Dureza Brinell

En el ensayo Brinell una bola de acero duro se presiona sobre la superficie del material, esta deja una marca que se mide y con eso se calcula el índice de dureza Brinell (BHN, por sus siglas en inglés Brinell hardness number) mediante la siguiente ecuación:

$$BHN = \frac{F}{(\pi/2)D\left(D - \sqrt{D^2 - D_i^2}\right)} \quad 2.11$$

Dónde F es la fuerza aplicada en kilogramos fuerza, D es el diámetro del penetrador en milímetros y D_i es el diámetro de la marca en milímetros.

2.5.3.1.2 Dureza Rockwell

El ensayo de dureza Rockwell utiliza dos tipos de penetradores según se vaya a realizar el ensayo en materiales duros o suaves. Para los materiales suaves se utiliza una bola de diamante de diámetro pequeño y un cono de diamante para materiales más duros.

2.5.3.1.3 Dureza Vickers y Knoop

Los ensayos Vickers y Knoop son pruebas de micro dureza, en las que las penetraciones formadas son tan pequeñas que se necesita de un microscopio para efectuar la medición.

En la siguiente tabla se muestran la comparación entre aplicaciones de los diferentes ensayos:

Tabla 2.8 Aplicaciones de las escalas de durezas

<i>Ensayo</i>	<i>Penetrador</i>	<i>Carga</i>	<i>Aplicación</i>
Brinell	Bola de 10mm	3000 kg	Hierro fundido y acero
Brinell	Bola de 10mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell B	Bola de 1/16 plg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell D	Cono	100 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell E	Bola de 1/8 plg	100 kg	Materiales muy suaves
Rockwell F	Bola de 1/16plg	60 kg	Aluminio, materiales suaves
Vickers	Pirámide de diamante	10 kg	Materiales duros
Knoop	Pirámide de diamante	500 g	Todos los materiales

Fuente: LA ciencia e ingeniería de materiales.(ASKELAND 1987)pag116

2.5.3.1.4 Dureza Leeb

El ensayo de dureza Leeb se basa en un principio simple de energías. Lo que hace es calcular la pérdida de energía que sufre una bola de metal dura al ser propulsada contra la superficie de la pieza de prueba por medio de una fuerza resorte., cuando el cuerpo de impacto golpea la superficie se produce una deformación que se convierte en una pérdida de energía debida a la deformación plástica. La pérdida de energía se calcula midiendo las velocidades de la bola metálica justo antes del impacto e inmediatamente después. Esta relación se toma para calcular el valor de dureza Leeb mediante la siguiente ecuación:

$$HL = \frac{VR}{VA} * 1000 \quad 2.12$$

Donde VR es la velocidad de rebote y VA la velocidad de impacto.

CAPITULO 3:

3 PROCESOS E IMPLEMENTACIÓN

3.1 NORMAS

Para el desarrollo de los métodos de trabajo se utilizaron como referencia diferentes normas nacionales e internacionales para poder garantizar un proceso que lleve a buenos resultados.

3.1.1 NORMAS A UTILIZAR

Se utilizarán las normas INEN y ASTM correspondientes:

- NTE INEN 1481. Aceros. Determinación de tamaño del grano
- NTE INEN 1482. Aceros. Determinación de Inclusiones
- ASTM E0003-01 "Guide for Preparation of Metallographic Specimens"
- ASTM E0045-97R02 "Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel"
- ASTM E0112-96R04 "Test Methods for Determining Average Grain Size"
- ASTM E1122-96R02 "Practice for Obtaining JK Inclusion Ratings Using Automatic Image Analysis"
- ASTM E1382-97R04 "Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis"

Las normas antes mencionadas se encuentran en el ANEXO A del presente documento.

3.2 VERIFICACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS

3.2.1 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

3.2.1.1 Espectrómetro de Rayos X

El espectrómetro de Rayos X es un equipo que mide la composición química de elementos mediante el método de energía dispersa. Esto quiere decir que mide la energía que se dispersa cuando uno de los electrones de la muestra a analizar cambia de orbital. Este equipo puede medir los elementos desde el sodio (Na) hasta el Uranio (U) y muestras que tengan un diámetro máximo de 300mm y una altura de 150 mm.

Al momento de realizar la medición se pueden generar dos atmosferas de acuerdo a lo que se desea medir, estas son aire y vacío. La atmosfera de aire sirve para medir con exactitud metales pesados, mientras que la atmosfera de vacío sirve para medir metales livianos y pesados. Se pueden realizar hasta 16 muestras a la vez cuando se ha elegido el modo de torreta.

El tubo emisor de RX funciona con un rango de voltaje de 5Kv a 50 Kv y una corriente de 1 a 1000 μ A. Este tubo es enfriado por aire. El sensor detector de energía dispersa es un semiconductor de silicio el cual necesita ser enfriado con Nitrógeno líquido.

Para la Instalación del equipo se necesita las siguientes características:

- Temperatura: 10C-30C
- Humedad relativa: 40%-70%
- Corriente: 15 A
- Voltaje: 100v

- Dimensiones del Equipo
- Ancho: 580 mm
- Altura: 420 mm
- Profundidad: 650 mm



Figura 3.1: Espectrómetro de rayos X EDX 720¹¹

3.2.1.2 Equipos de micrografía

3.2.1.2.1 Cortadora de Probetas Q-2A

Cortadora de disco la cual cuenta con un sistema de refrigeración constante sobre la muestra. Esto permite que por el calentamiento producto del corte la microestructura de la muestra no varíe. Las especificaciones técnicas son las siguientes:

- Max diámetro de corte: 55mm
- Disco de corte: 250x2x32 mm
- Velocidad de corte: 2800 rpm
- Motor: Trifásico de 2,2 Kw
- Dimensiones: 65x50x40 cm
- Peso: 80 Kg

¹¹ Propia



Figura 3.2 Cortadora de probetas Q-2A¹²

3.2.1.2.2 Pulidora De Probetas Mopao 150

Pulidora manual de disco rotativo la cual cuenta con alimentación de agua constante para el lavado de la muestra y para humedecer el paño. Las características técnicas son las siguientes:

- Velocidad: Sistema de velocidad variable de 300 y 150 rpm
- Diámetro de disco: 200 mm
- Potencia instalada: 0.5 HP
- Motor: Trifásico 220 V



Figura 3.3 Pulidora de probetas Mopao 150¹²

¹² Propia

3.2.1.2.3 Embutidora de Probetas XQ-2B

Prensa manual para embutido de probetas con las siguientes características técnicas:

- Diámetro de la probeta: 30x15 mm
- Potencia calorífica: 650 W, 220V
- Rango de Temperatura: 100- 180 C
- Voltaje: 220V; 50 Hz
- Dimensiones: 340x270x400 mm



Figura 3.4 Embutidora de probetas XQ-2B¹³

3.2.1.2.4 Banco de lijas ESM-2/50

Banco de desbaste con cuatro estaciones de lijado. Cuenta con alimentación constante de agua para eliminar las limallas producto del desbaste, las cuales puede rayar la muestra



Figura 3.5 Banco de lijas ESM-2/50¹³

¹³ Propia

3.2.1.2.5 Microscopio Mikoba 413

Microscopio trinocular, estativo modular con las siguientes características técnicas:

- Voltaje: 85-230 V
- Lámpara: Halógena 12V/30W
- Distancia Interpupilar: 55-75 mm
- Oculares: WF10X
- Desplazamiento en X: 75 mm
- Desplazamiento en Y: 50 mm
- Objetivos: 40x; 100x; 200x; 400x; 800x
- Filtros: azul, verde, amarillo, polarizador



Figura 3.6 Microscopio Mikoba 413¹⁴

3.2.1.3 Durómetros Portátiles

3.2.1.3.1 HLN-11A

Durómetro digital portátil, cuenta con un indentador de tungsteno el cual mide la dureza en la escala leeb y realiza la conversión a otras escalas de dureza. Las características técnicas son las siguientes:

¹⁴ Propia

- Voltaje: 110V
- Escalas de dureza: HL, HV, HSD, HRC, HRB, HB
- Memoria: 10 disparos
- Posiciones de disparo: ← ↙ ↓ ↘ ↑
- Duración de la Batería: 24 horas de trabajo continuo

3.2.1.3.2 MH-320

Durómetro digital portátil, cuenta con un indentador de tungsteno el cual mide la dureza en la escala leeb y realiza la conversión a otras escalas de dureza. Las características técnicas son las siguientes:

- Voltaje: 110V
- Escalas de dureza: HL, HV, HSD, HRC, HRB, HB
- Memoria: 50 disparos
- Posiciones de disparo: ← ↙ ↓ ↘ ↑
- Duración de la Batería: 100 horas de trabajo continuo

3.2.2 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE EQUIPOS

Para los diferentes equipos que se realizó los métodos de trabajo, es de suma importancia los procedimientos de calibración, ya que para poder obtener resultados confiables en los diferentes ensayos se debe tener la certeza de que el equipo este calibrado adecuadamente.

3.2.2.1 Espectrómetro de Rayos X

En el espectrómetro de rayos X, se pueden crear diferentes curvas de calibración para varias sustancias que vayan a ser analizadas, en la figura 3.1 se observa un flujograma que resume el procedimiento realizado. El método de trabajo completo se encuentra en el ANEXO B.

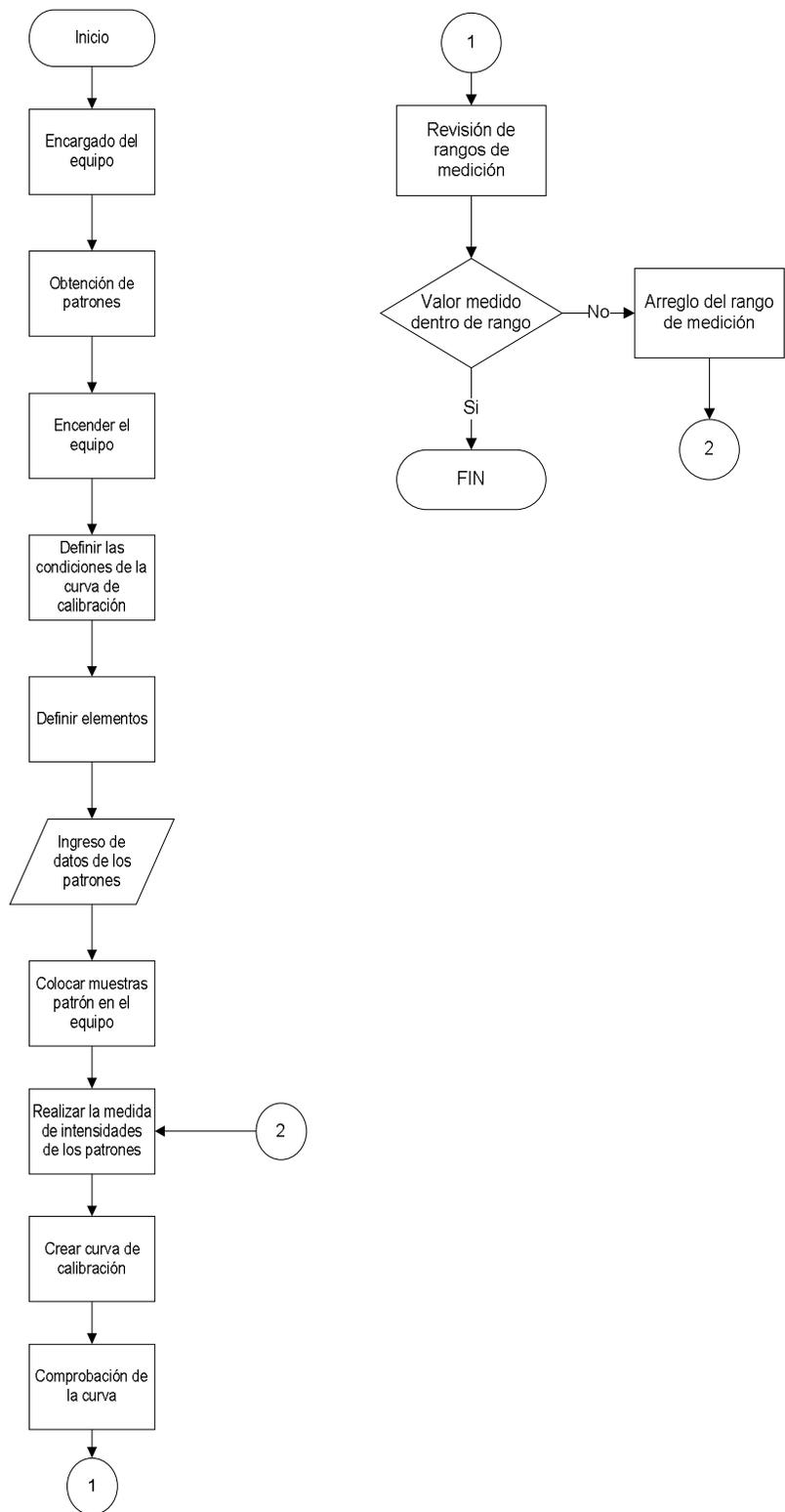


Figura 3.7: Flujograma del procedimiento de calibración del espectrómetro de RX¹⁵

¹⁵ Propia

3.2.2.2 Programa de análisis de imagen

El microscopio cuenta con una cámara digital para obtener las imágenes que se observan en el mismo. Dependiendo de la resolución a la que se toma la foto la magnificación final puede aumentar o disminuir, por lo que es importante calibrar al programa de análisis de imagen para que las mediciones finales sean confiables. En la figura 3.2 se muestra el flujograma de resumen del procedimiento de calibración que se encuentra en el ANEXO C en su totalidad

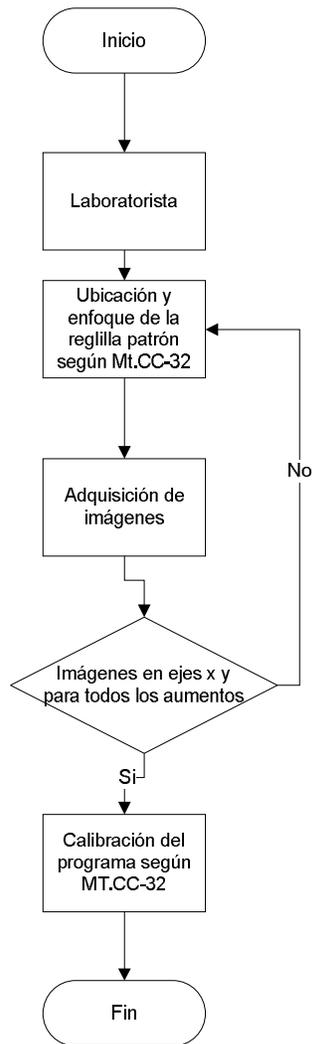


Figura 3.8: Flujograma del procedimiento de calibración del programa de análisis de imagen¹⁶

¹⁶ Propia

3.2.3 PROCESOS DE MANTENIMIENTO.

3.2.3.1 Espectrómetro de Rayos X

En el ANEXO D se encuentra el método de trabajo completo, que en la figura 3.3 se muestra en resumen.

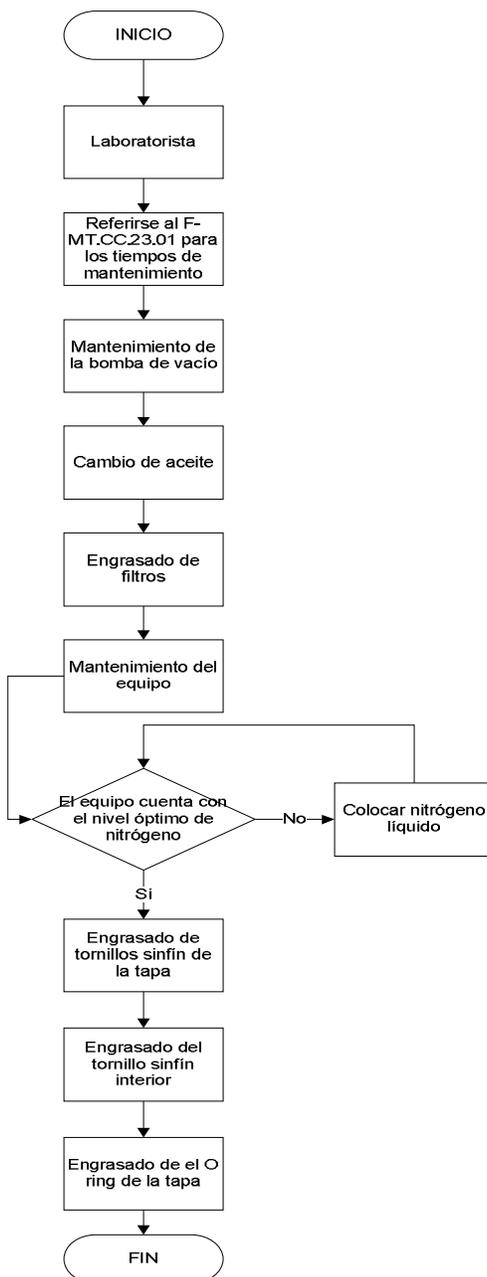


Figura 3.9: Flujograma del proceso de mantenimiento del espectrómetro de rayos X¹⁷

¹⁷ Propia

3.2.3.2 Durómetros

3.2.3.2.1 Durómetro HLN-11A

En el ANEXO E se encuentra el método de trabajo completo, que en la figura 3.4 se muestra en resumen.

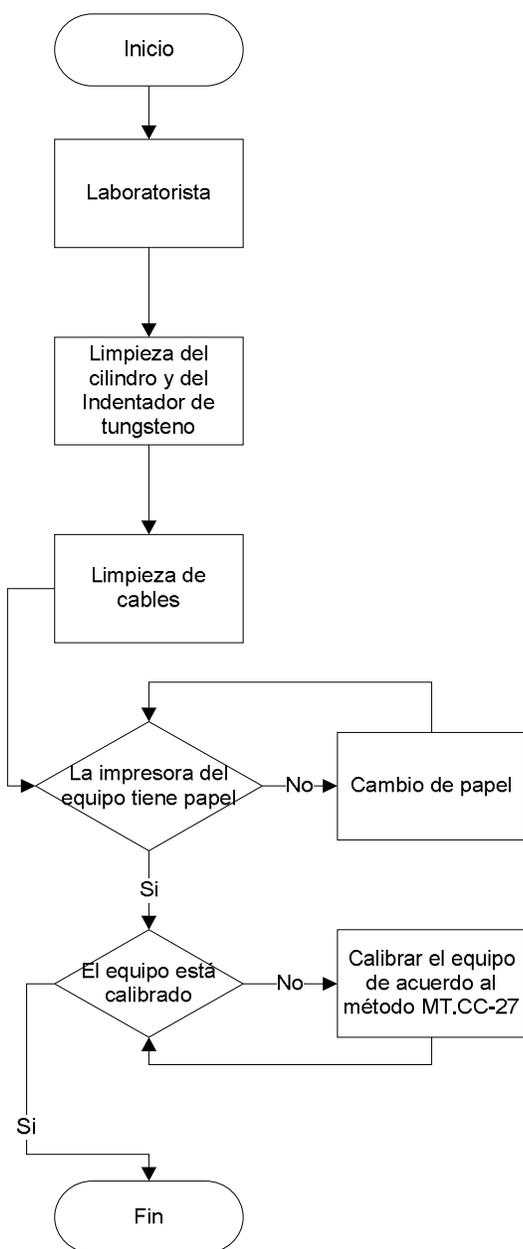


Figura 3.10 Flujograma del proceso de mantenimiento del durómetro HLN-11A¹⁸

¹⁸ Propia

3.2.3.2.2 Durómetro MH 320

En el ANEXO F se encuentra el método de trabajo completo, que en la figura 3.5 se muestra en resumen.

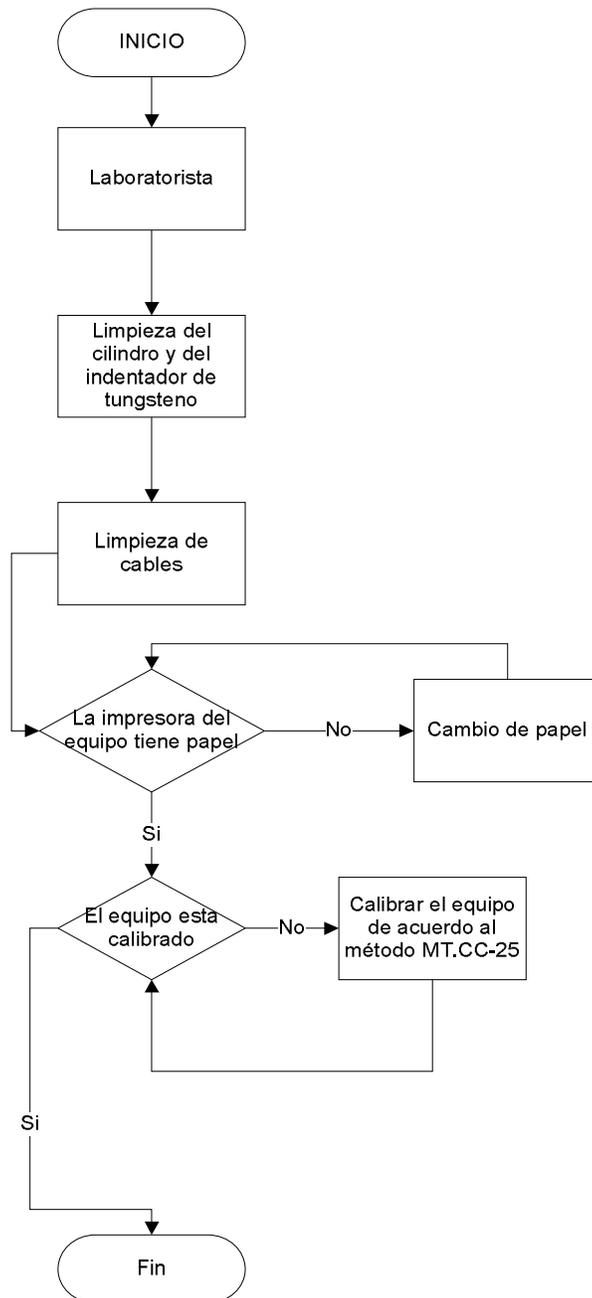


Figura 3.11 Flujograma del proceso de mantenimiento del durómetro MH 320¹⁹

¹⁹ Propia

3.2.3.3 Equipos de micrografía

En el ANEXO G se encuentra el método de trabajo completo, que en la figura 3.6 se muestra en resumen.



Figura 3.12 Flujograma del proceso de mantenimiento de los equipos de micrografía²⁰

²⁰ Propia

3.3 ENSAYOS QUÍMICOS DE INSUMOS PARA ACERÍA Y ESCORIA

3.3.1 PROCEDIMIENTO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA

En el ANEXO H se encuentra el método de trabajo completo, que en la figura 3.7 se muestra en resumen.

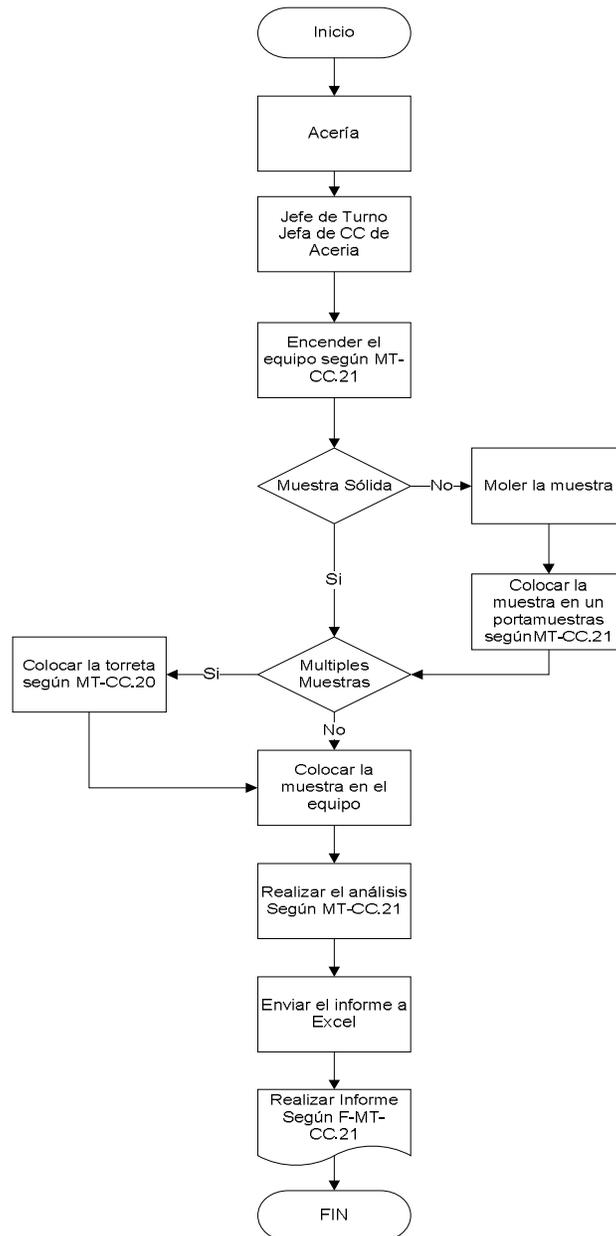


Figura 3.13 Flujograma del proceso para ensayos químicos de escoria e insumos para acería.²¹

²¹ Propia

3.4 ENSAYOS METALOGRÁFICOS

3.4.1 PROCEDIMIENTO DE MICROGRAFÍA

En el ANEXO I se encuentra el método de trabajo completo, que en la figura 3.8 se muestra en resumen.

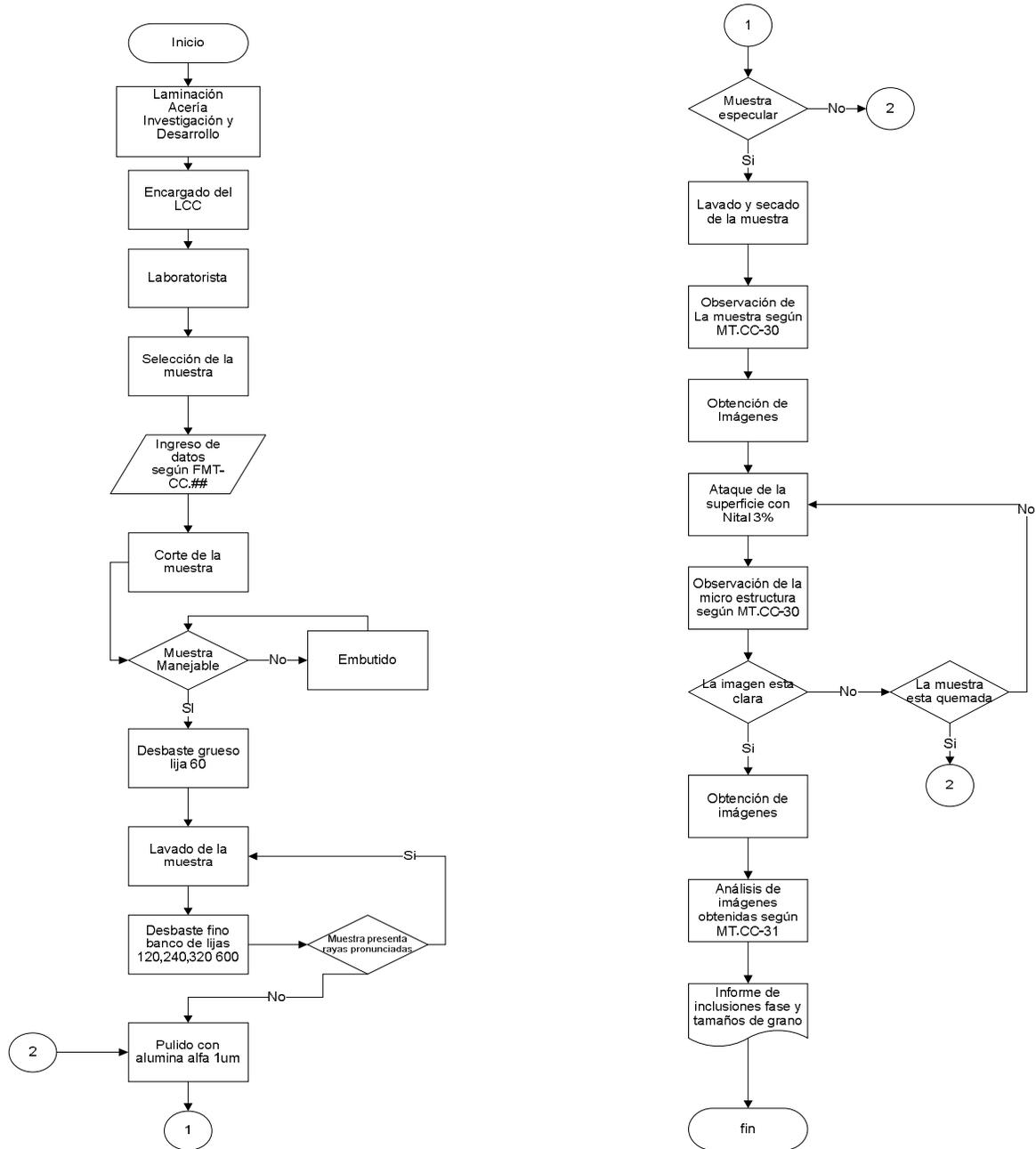


Figura 3.14 Flujograma del proceso para ensayos de micrografía²²

²² Propia

3.5 ENSAYOS MECÁNICOS

3.5.1 PROCEDIMIENTO PARA ENSAYO DE DUREZA

3.5.1.1 Durómetro HLN-11 A

En el ANEXO J se encuentra el método de trabajo completo, que en la figura 3.9 se muestra en resumen.

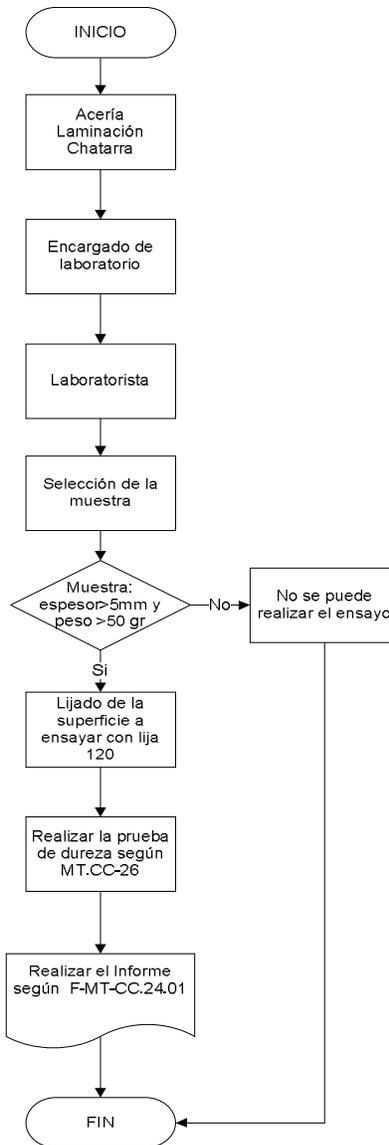


Figura 3.15 Flujograma del proceso para ensayos de dureza en el durómetro HLN-11A²³

²³ Propia

3.5.1.2 Durómetro MH 320

En el ANEXO K se encuentra el método de trabajo completo, que en la figura 3.10 se muestra en resumen.

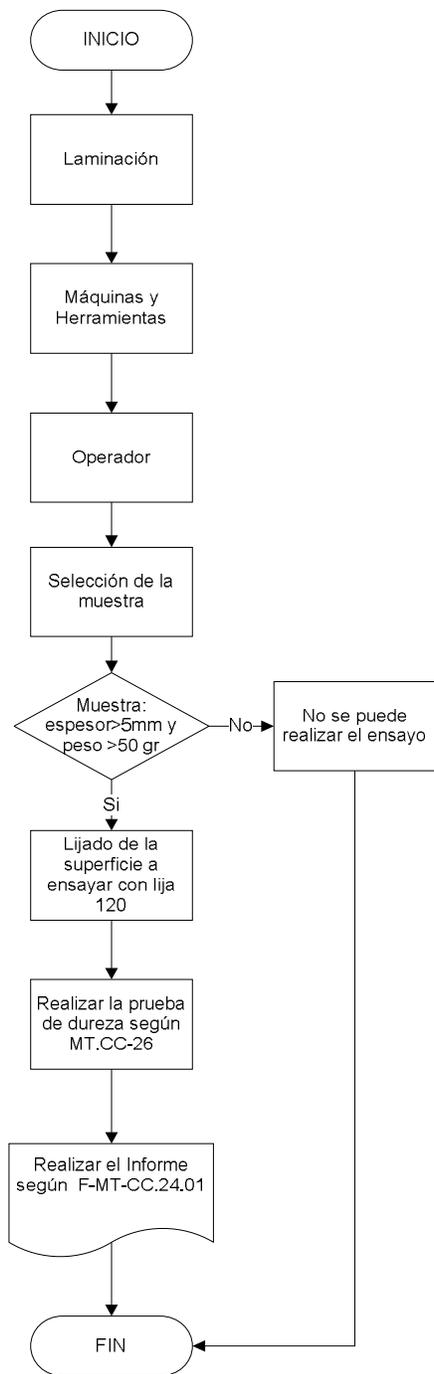


Figura 3.16 Flujograma del proceso de mantenimiento del durómetro MH 320²⁴

²⁴ Propia

CAPITULO 4:

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 VALIDACIÓN DE PROCEDIMIENTOS

4.1.1 ENSAYOS QUÍMICOS DE INSUMOS PARA ACERÍA Y ESCORIA

Para validar el método de ensayo del espectrómetro de rayos X se utilizaron 10 muestras de acero, en las que se realizó el análisis para medir su contenido de Fe, los resultados fueron comparados con los arrojados por el espectrómetro de emisión óptica de Novacero que se encuentra debidamente calibrado y certificado. Se realizaron 3 ensayos sobre cada muestra en el espectrómetro de rayos X.

Los informes de los ensayos se encuentran en el ANEXO L, y los resultados se muestran a continuación.

Tabla 4.1 Repetitividad, exactitud e incertidumbre del EDX 720

Hierro								
Muestra	L1	L2	L3	Promedio	Lnom	Repetitividad %	Exactitud %	Incertidumbre
1	97.571	97.631	97.715	97.639	98.670	0.147	-1.045	0.042
2	97.900	97.889	97.912	97.900	98.730	0.023	-0.840	0.007
3	97.912	97.944	97.921	97.926	98.370	0.033	-0.452	0.010
4	97.966	97.946	97.972	97.961	98.490	0.027	-0.537	0.008
5	97.981	98.037	97.995	98.004	98.380	0.057	-0.382	0.017
6	97.865	97.847	97.862	97.858	97.190	0.018	0.687	0.006
7	97.753	97.697	97.721	97.724	97.140	0.057	0.601	0.016
8	97.903	97.912	97.927	97.914	97.940	0.025	-0.027	0.007
9	97.253	97.194	97.239	97.229	97.930	0.061	-0.716	0.018
10	97.957	98.005	97.970	97.977	97.940	0.049	0.038	0.014

Fuente: Propia

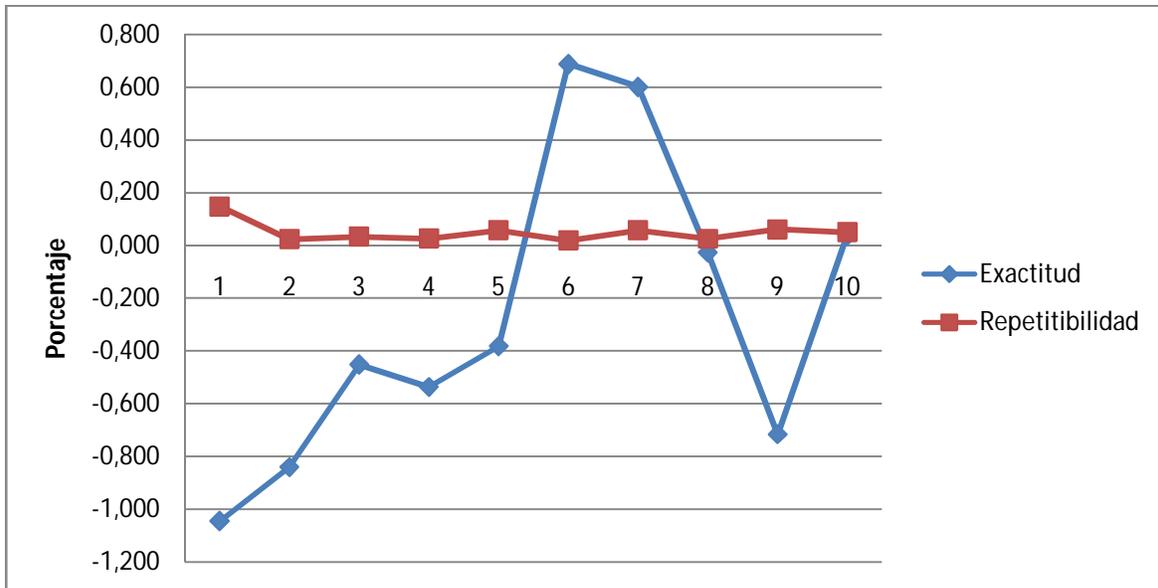


Figura 4.1 Comparación de la repetitividad y exactitud del EDX 720²⁵

4.1.2 ENSAYOS DE MICROGRAFÍA

Para validar el método de ensayo de micrografía se utilizaron 10 muestras de diferentes productos de la empresa y se analizaron por 3 formas diferentes en el programa de análisis de imágenes “Material Plus 4.2”. Estos resultados fueron comparados con los resultados de una medición de tamaño de grano por intersección realizado manualmente de las mismas fotografías que analizó el programa.

Los informes de estos ensayos se encuentran en el ANEXO M

²⁵ Propia

Tabla 4.2 Repetitividad, exactitud e incertidumbre de las micrografías analizadas por el Material Plus 4.2

Muestra	Producto	Valor Nominal	L1	L2	L3	Promedio	Repetitividad	Exactitud	Incertidumbre
Mi38.1.100X	VC 32	5	5	6	5	5.333	18.750	-6.667	0.333
Mi78.1.100X	VC 16	5	5	6	5	5.333	18.750	-6.667	0.333
Mi86.1.100X	VC 16	5	5	6	5	5.333	18.750	-6.667	0.333
Mi96.1.100x	VC 16	5	5	6	5	5.333	18.750	-6.667	0.333
Mi113.1.100X	VC 10	6	6	7	6	6.333	15.789	-5.556	0.333
Mi51.1.200X	PL65X6	7	7	8	7	7.333	13.636	-4.762	0.333
Mi52.1.200X	PL65X6	7	7	8	7	7.333	13.636	-4.762	0.333
Mi54.1.200X	PL65X6	8	7	8	7	7.333	13.636	8.333	0.333
Mi55.1.200X	PL65X6	7	7	8	7	7.333	13.636	-4.762	0.333
Mi57.1.200X	BR 18	7	7	8	7	7.333	13.636	-4.762	0.333

Fuente: Propia

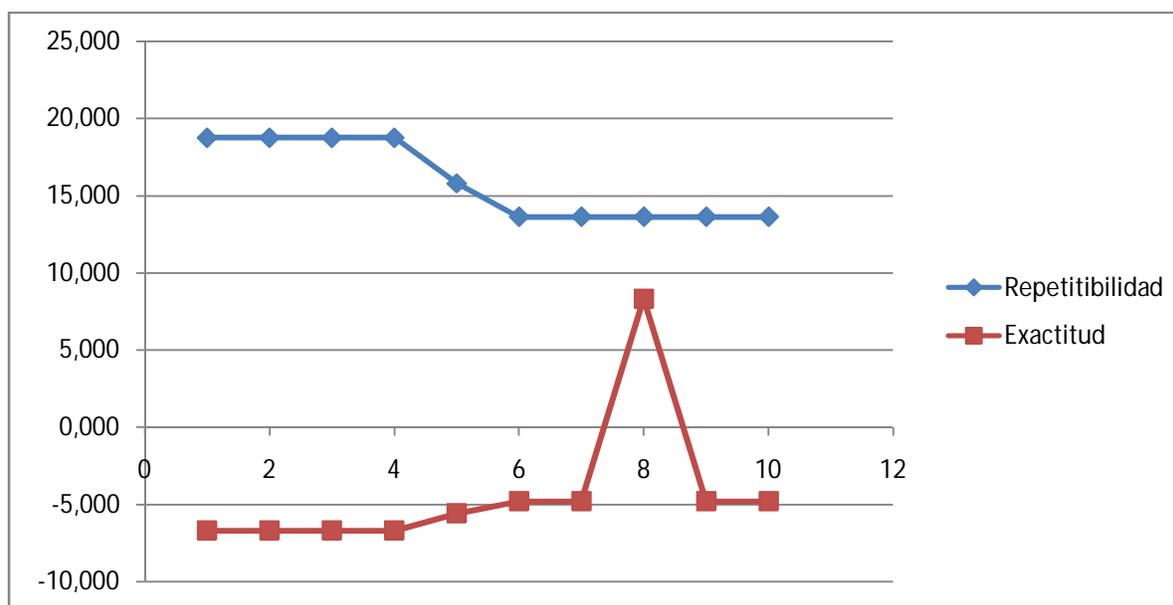


Figura 4.2 Comparación de la repetitividad y exactitud de las micrografías analizadas por el Material Plus 4.2²⁶

²⁶ Propia

4.1.3 ENSAYOS DE DUREZA

Para validar los métodos de ensayo de dureza se utilizaron 10 muestras de acero ASTM A 615 Gr60, en las que se realizaron 5 mediciones en cada una con los dos durómetros que existen en la empresa y los resultados fueron posteriormente comparados con resultados de las mismas muestras tomados en el durómetro de pedestal del laboratorio de ciencia de materiales de la ESPE.

El informe de los ensayos se encuentra en el ANEXO N y los resultados se muestran a continuación.

Tabla 4.3 Repetitividad, exactitud e incertidumbre de los ensayos de dureza del durómetro HLN-11^a

HLN - 11A										
Muestra	Valor Nominal	L1	L2	L3	L4	L5	Promedio	Repetitividad	Exactitud	Incertidumbre
1	94.4	88	89.3	88.9	88.4	87.5	88.42	2.036	6.335	0.318
2	94	88.7	89.3	91.3	90.2	90.5	90	2.889	4.255	0.456
3	91.4	86.4	88.4	89.1	87.3	89.5	88.14	3.517	3.567	0.573
4	94.4	88.4	86.2	88.2	91.8	89.1	88.74	6.311	5.996	0.904
5	95.6	87.8	88	87.5	83.1	87.8	86.84	5.643	9.163	0.938
6	93	86.4	89.3	87.1	86.8	86.8	87.28	3.323	6.151	0.517
7	94.2	89.5	86.9	89.5	86.8	90.4	88.62	4.062	5.924	0.741
8	94.8	86	85.5	87.7	91.1	88	87.66	6.388	7.532	0.984
9	93.4	89.5	86.2	90.4	84	86.6	87.34	7.328	6.488	1.163
10	95	88.7	87.3	85.3	90	90.2	88.3	5.549	7.053	0.913

Fuente: Propia

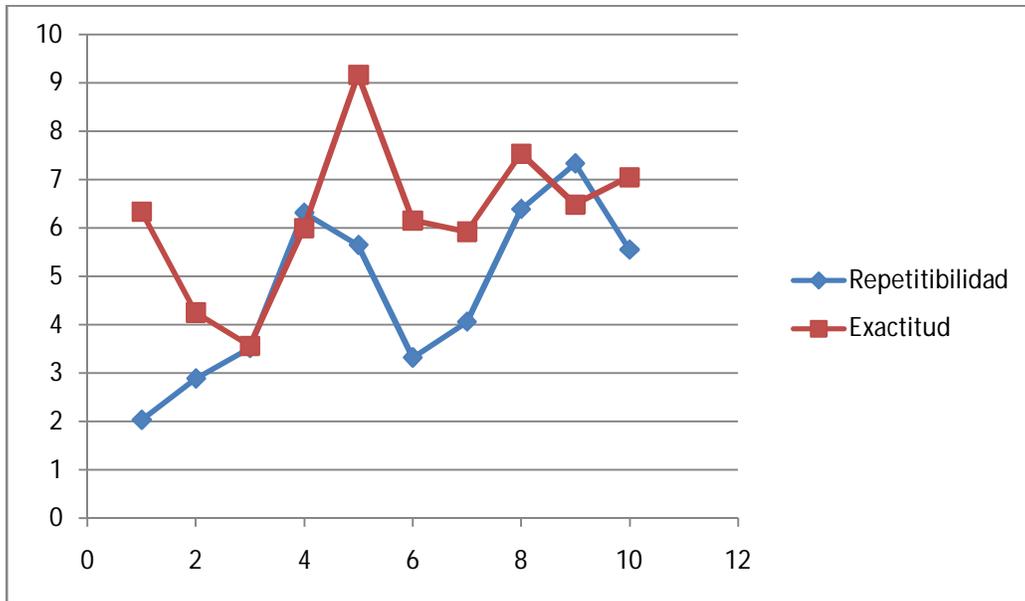


Figura 4.3 Comparación de la repetitividad y exactitud de los ensayos de dureza del durómetro HLN-11A²⁷

Tabla 4.4 Repetitividad, exactitud e incertidumbre de los ensayos de dureza del durómetro MH 320

MH 320										
Muestra	Valor Nominal	L1	L2	L3	L4	L5	Promedio	Repetitividad	Exactitud	Incertidumbre
1	94.4	90.7	90.9	90.1	90.6	90.1	90.48	0.884	4.153	0.162
2	94	88	90.8	86.3	90.1	91	89.24	5.267	5.064	0.907
3	91.4	89.4	87.9	88.6	89.5	90.6	89.2	3.027	2.407	0.455
4	94.4	90	92.8	90.3	88.7	90.8	90.52	4.529	4.110	0.667
5	95.6	88.4	81.8	86.7	88.8	87.9	86.72	8.072	9.289	1.280
6	93	92	90.5	88.6	88	90.2	89.86	4.451	3.376	0.712
7	94.2	88.2	86.4	91.3	90	90	89.18	5.495	5.329	0.852
8	94.8	88	84.2	88.5	89	84.1	86.76	5.648	8.481	1.077
9	93.4	91.1	86.5	87.3	88.2	89.2	88.46	5.200	5.289	0.799
10	95	88.8	88.3	88.8	87.3	88.4	88.32	1.698	7.032	0.275

Fuente: Propia

²⁷ Propia

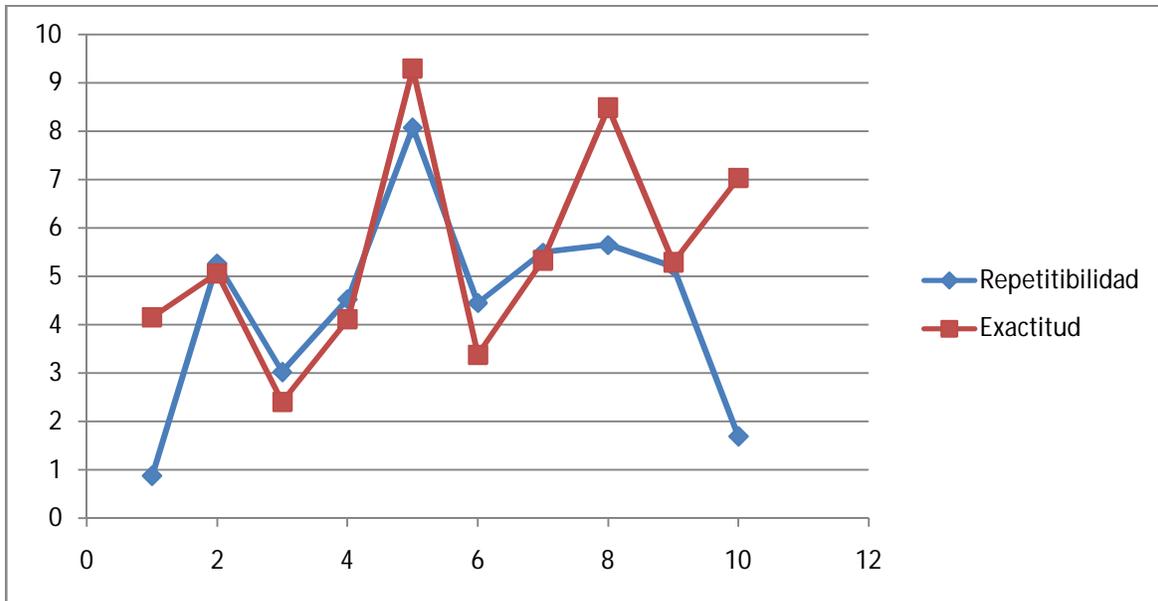


Figura 4.4 Comparación de la repetitividad y exactitud de los ensayos de dureza del durómetro MH 320²⁸

4.2 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO EN LOS PRODUCTOS DE NOVACERO

4.2.1 VARILLA CORRUGADA

Para obtener el tamaño de grano ASTM promedio se eligieron 20 muestras aleatorias de VC 10, VC 16 y VC 32 respectivamente. Los informes de todas las muestras se encuentran en el ANEXO Ñ y los resultados finales se muestran a continuación.

²⁸ Propia

4.2.1.1 VC 10

Tabla 4.5 Resultado de tamaño de grano de VC 10

Nº	PRODUCTO	IDENTIF.	IDENTIF. TRACCIÓN	COLADA (Nº)	LOTE/PROD	GRANO (ASTM)	%PERLITA	%FERRITA	Ceq.
97	VC 10	Mi0097	2125	2199	BAJOS	5	60.742	39.258	0.562
98	VC 10	Mi0098	2164	2252	BAJOS	5	63.177	36.823	0.586
99	VC 10	Mi0099	2133	2210	BAJOS	5	60.067	39.933	0.565
100	VC 10	Mi0100	2147	2195	BAJOS	5	64.430	35.570	0.590
101	VC 10	Mi0101	2157	2208	BAJOS	6	63.409	36.591	0.570
102	VC 10	Mi0102	2150	2242	BAJOS	5	62.766	37.234	0.583
103	VC 10	Mi0103	2144	2196	BAJOS	5	60.736	39.264	0.582
104	VC 10	Mi0104	2129	2239	BAJOS	5	60.724	39.276	0.574
105	VC 10	Mi0105	2141	2246	BAJOS	6	60.919	39.081	0.564
106	VC 10	Mi0106	2153	2248	BAJOS	6	60.377	39.623	0.567
107	VC 10	Mi0107	2158	2207	BAJOS	5	67.435	32.565	0.574
108	VC 10	Mi0108	2142	2248	BAJOS	5	62.610	37.390	0.560
109	VC 10	Mi0109	2101	2051	BAJOS	6	68.110	31.890	0.576
110	VC 10	Mi0110	2168	2247	BAJOS	5	59.316	40.684	0.560
111	VC 10	Mi0111	2165	2250	BAJOS	6	62.550	37.450	0.567
112	VC 10	Mi0112	2162	2203	BAJOS	5	56.918	43.082	0.554
113	VC 10	Mi0113	2187	2264	BAJOS	6	59.271	40.729	0.570
114	VC 10	Mi0114	2108	2220	BAJOS	5	61.671	38.329	0.567
115	VC 10	Mi0115	2185	2227	BAJOS	6	60.302	39.698	0.567
116	VC 10	Mi0116	2143	2197	BAJOS	5	65.082	34.918	0.561
PROMEDIO						5.35	62.031	37.969	0.570
DES. EST						0.489	2.741	2.741	0.009
LES						6.818	70.25	46.19	0.598
LEI						3.882	53.81	29.75	0.542
MAX						6	68.110	43.082	0.590
MIN						5	56.918	31.890	0.554

Fuente: Propia

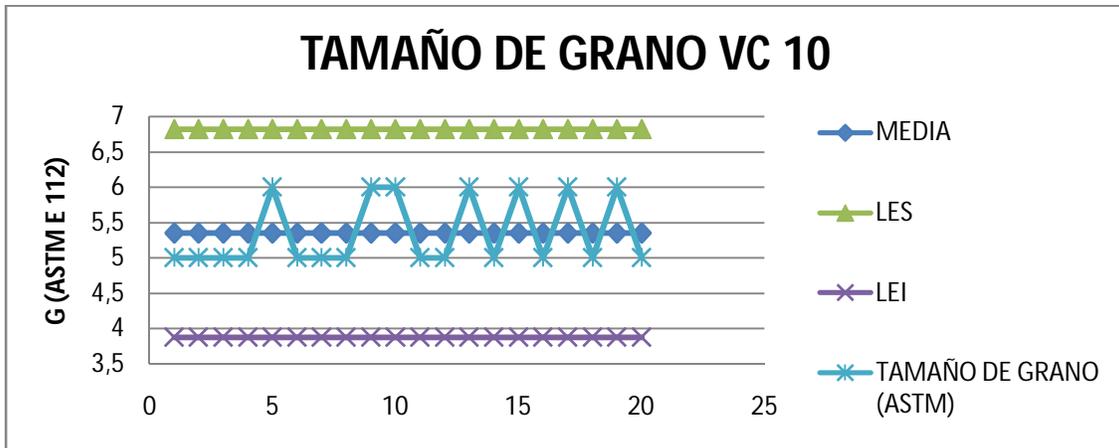


Figura 4.5 Tamaño de grano de VC 10²⁹

4.2.1.2 VC 16

Tabla 4.6 Resultado de tamaño de grano de VC 16

Nº	PRODUCTO	IDENTIF.	IDENTIF. TRACCIÓN	COLADA (Nº)	LOTE/PROD	GRANO (ASTM)	PERLITA	FERRITA	Ceq.
76	VC16	Mi0076	729	1752	MEDIOS	6	60.574	39.426	0.568
77	VC16	Mi0077	730	1752	MEDIOS	5	65.019	34.981	0.564
78	VC16	Mi0078	609	1397	MEDIOS	7	70.756	29.244	0.551
79	VC16	Mi0079	623	1386	MEDIOS	7	62.644	37.356	0.600
80	VC16	Mi0080	620	1387	MEDIOS	5	68.425	31.575	0.559
81	VC16	Mi0081	607	1400	MEDIOS	5	65.049	34.951	0.580
82	VC16	Mi0082	605	1400	MEDIOS	6	63.809	36.191	0.567
83	VC16	Mi0083	610	1397	MEDIOS	7	65.180	34.820	0.583
84	VC16	Mi0084	611	1396	MEDIOS	5	67.147	32.853	0.583
85	VC16	Mi0085	635	1404	MEDIOS	5	61.740	38.260	0.582
86	VC16	Mi0086	602	1401	MEDIOS	5	67.002	32.998	0.576
88	VC16	Mi0088	632	1405	MEDIOS	5	62.257	37.743	0.584
89	VC16	Mi0089	613	1396	MEDIOS	5	62.305	37.695	0.585
90	VC16	Mi0090	625	1386	MEDIOS	7	67.391	32.609	0.567
91	VC16	Mi0091	604	1401	MEDIOS	6	65.329	34.671	0.581
92	VC16	Mi0092	618	1391	MEDIOS	5	63.225	36.775	0.553
93	VC16	Mi0093	599	1402	MEDIOS	5	63.831	36.169	0.555
94	VC16	Mi0094	615	1394	MEDIOS	5	65.866	34.134	0.584
95	VC16	Mi0095	641	1390	BAJOS	5	66.708	33.292	0.524
96	VC16	Mi0096	642	1390	BAJOS	6	66.186	33.814	0.563
					PROMEDIO	5.6	65.022	34.978	0.570
					DES. EST	0.821	2.522	2.522	0.017
					LES	8.062	72.59	42.545	0.6212
					LEI	3.138	57.455	27.41	0.5197
					MAX	7	70.756	39.426	0.600

Fuente: Propia

²⁹ Propia

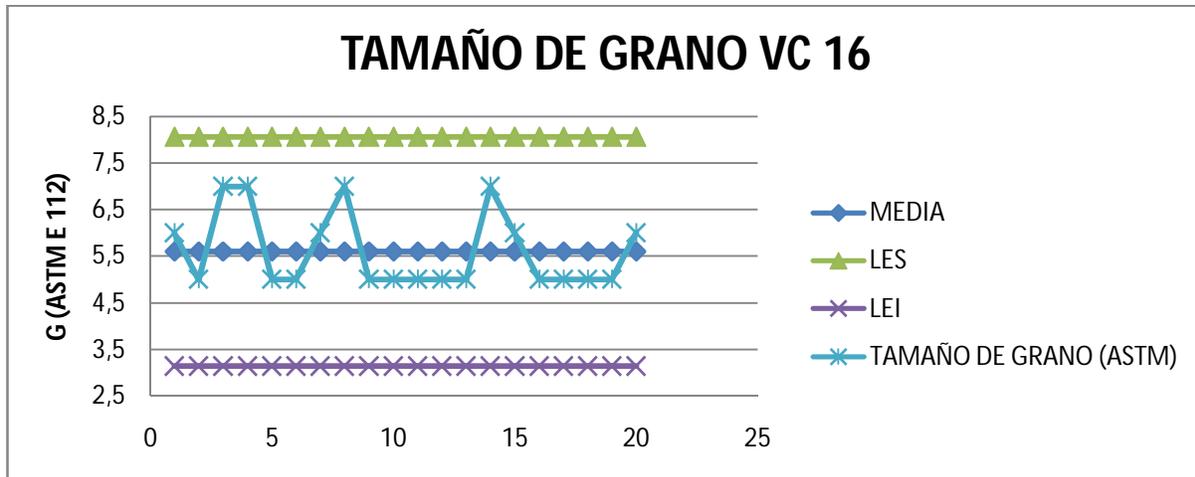


Figura 4.6 Tamaño de grano de VC 16³⁰

4.2.1.3 VC 32

Tabla 4.7 Resultado de tamaño de grano de VC 32

Nº	PRODUCTO	IDENTIF.	IDENTIF. TRACCIÓN N	COLADA (Nº)	LOTE/PROD	GRANO (ASTM)	%PERLITA	%FERRITA	Ceq.
4	VC 32	Mi0004	74	4298	LA009219-1	5	56.675	43.325	0.587
7	VC 32	Mi0007	91	82841.1	LA002904	6	62.567	37.433	0.577
8	VC 32	Mi0008	0091-R1	82841.3	LA002904	4	64.949	35.051	0.588
23	VC 32	Mi0023	0091-R1	82841.3	LA002904	4	62.812	37.188	0.588
24	VC 32	Mi0024	91	82841.1	LA002904	5	77.803	22.197	0.577
25	VC 32	Mi0025	93	82841.4	LA002904	5	77.803	22.197	0.591
32	VC32	MI0032	71	314358	LA002919-1	5	69.092	30.908	0.493
33	VC32	MI0033	72	314391	LA002919-1	6	61.750	38.250	0.525
34	VC32	Mi0034	73	314352	LA002919-1	5	70.168	29.832	0.506
35	VC32	Mi0035	87	100520	ALTOS	5	68.566	31.434	0.612
36	VC32	Mi0036	88	100443	ALTOS	4	73.156	26.844	0.591
37	VC32	Mi0037	89	100315	ALTOS	5	66.314	33.686	0.579
38	VC32	Mi0038	90	8398	LA002969-1	5	62.280	37.720	0.477
39	VC32	Mi0039	84	100429	ALTOS	6	55.237	44.763	0.562
40	VC32	Mi0040	83	100408	ALTOS	5	78.452	21.548	0.622
41	VC32	Mi0041	79	100677	ALTOS	6	65.486	34.514	0.581
42	VC32	Mi0042	81	100660	ALTOS	6	60.328	39.672	0.600
43	VC32	Mi0043	82	656	ALTOS	5	76.858	23.142	0.635
44	VC32	Mi0044	85	100429	ALTOS	5	73.619	26.381	0.596
45	VC32	Mi0045	86	100439	ALTOS	6	61.750	38.250	0.583
					PROMEDIO	5.15	67.283	32.717	0.573
					DES. EST	0.67	7.144	7.144	0.042
					LES	7.16	88.716	54.15	0.6987
					LEI	3.14	45.851	11.28	0.4481
					MAX	6	78.452	44.763	0.635
					MIN	4	55.237	21.548	0.477

Fuente: Propia

³⁰ Propia

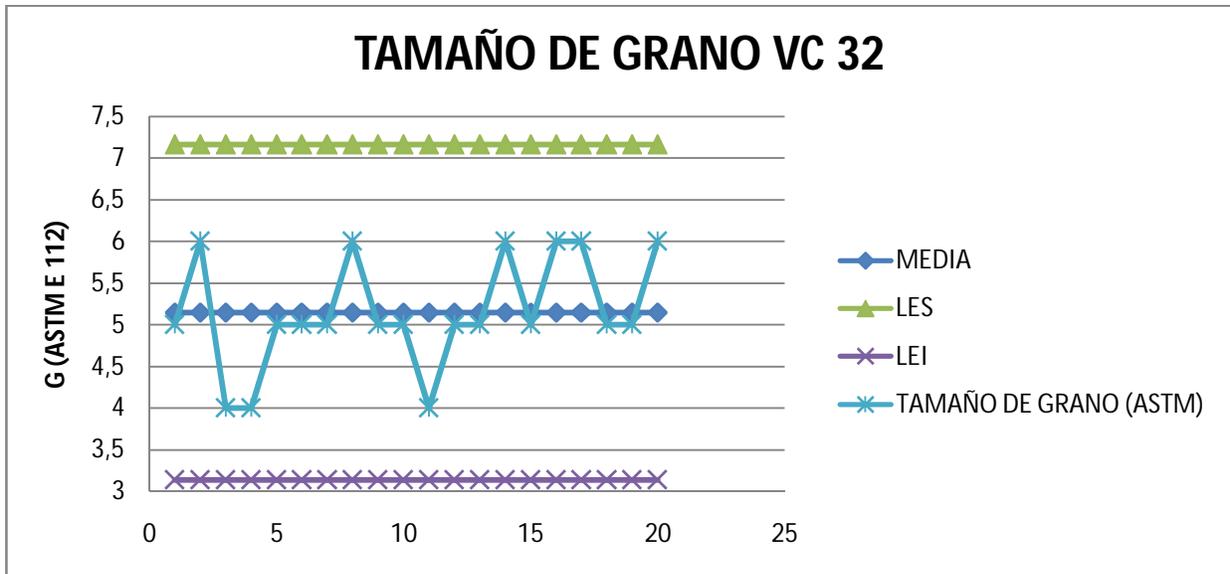


Figura 4.7 Tamaño de grano de VC 32³¹

4.2.2 PERFILES LAMINADOS

Para obtener el tamaño de grano ASTM promedio se eligieron 45 muestras aleatorias de los diferentes perfiles que se fabrican en la empresa repartidos de la siguiente manera: 5 platina de 19x3mm, 5 platina de 25x3mm, 5 platina de 65x6mm, 5 ángulo de 30x3mm, 5 ángulo de 50x4mm, 5 tee de 25x3mm, 5 barra redonda de 12mm, 5 barra redonda de 18mm y 5 barra cuadrada de 15mm. Los informes de todas las muestras se encuentran en el ANEXO O y los resultados finales se muestran a continuación.

³¹ Propia

Tabla 4.8 Resultado de tamaño de grano de perfiles

Nº	PRODUCTO	IDENTIF.	IDENTIF. TRACCIÓN	COLADA (Nº)	LOTE/PROD	GRANO (ASTM)	PERLITA	FERRITA	Ceq.
14	PL19X3	Mi0014	1712	16360	LA002965	9	38.889	61.111	0.282
15	PL19X3	Mi0015	1713	16366	LA002965	8	39.501	60.499	0.271
16	PL19X3	Mi0016	1717	16368	LA002965	9	38.263	61.271	0.300
17	PL19X3	Mi0017	1719	16369	LA002965	9	38.826	61.174	0.301
18	PL19X3	Mi0018	1720	16358	LA002965	8	38.881	61.119	0.296
27	PL25X3	Mi0027	1344	71299	LA002963	7	38.395	61.605	0.278
28	PL25X3	Mi0028	1351	71364	LA002963	7	39.645	60.355	0.319
29	PL25X3	Mi0029	1346	71296	LA002963	8	39.845	60.155	0.271
30	PL25X3	Mi0030	1350	71298	LA002963	8	38.125	61.875	0.318
31	PL25X3	Mi0031	1224	71368	LA002963	8	38.098	61.902	0.323
51	PL65X6	Mi0051	1587	16773	LA002968	7	38.331	61.669	0.283
52	PL65X6	Mi0052	1586	16780	LA002968	7	39.662	60.338	0.227
53	PL65X6	Mi0053	1576	16771	LA002968	7	38.653	61.347	0.286
54	PL65X6	Mi0054	1588	16781	LA002968	7	38.146	61.854	0.279
55	PL65X6	Mi0055	1782	703	LANOVACERO	7	39.051	60.949	0.254
117	BC15	Mi0117	2479	22159	LA002991	7	40.282	59.718	0.253
118	BC15	Mi0118	2477	22193	LA002991	7	38.922	61.078	0.323
119	BC15	Mi0119	2476	22167	LA002991	7	39.878	60.122	0.329
120	BC15	Mi0120	2478	22136	LA002991	7	38.562	61.438	0.280
121	BC15	Mi0121	2480	22237	LA002991	7	39.544	60.456	0.303
9	AL30X3	Mi0009	2320	008C0	LA002977	8	37.680	62.320	0.300
10	AL30X3	Mi0010	2327	7M000	LA002977	8	37.081	62.919	0.297
11	AL30X3	Mi0011	2330	87000	LA002977	8	38.587	61.413	0.288
12	AL30X3	Mi0012	2335	83000	LA002977	7	37.321	62.679	0.297
13	AL30X3	Mi0013	2345	79A000	LA002977	7	38.753	61.247	0.300
56	AL50X4	Mi0056	2420	78000	LA002977	7	39.458	60.542	0.296
62	AL50X4	Mi0062	2417	73000	LA002977	7	39.397	60.603	0.292
63	AL50X4	Mi0063	2415	1837	LANOVACERO	7	39.051	60.949	0.297
64	AL50X4	Mi0064	2414	1837	LANOVACERO	7	38.519	61.481	0.276
65	AL50X4	Mi0065	2413	7T000	LA002977	7	39.268	60.732	0.289
66	TEE25X3	Mi0066	1395	71368	LA002963	7	39.898	60.102	0.299
67	TEE25X3	Mi0067	1392	71366	LA002963	8	39.300	60.700	0.204
68	TEE25X3	Mi0068	1394	71365	LA002963	9	41.549	58.451	0.267
69	TEE25X3	Mi0069	1397	71367	LA002963	8	37.842	62.158	0.285
70	TEE25X3	Mi0070	1389	71364	LA002963	8	39.764	60.236	0.304
57	BR 18	Mi0057	1758	18752	LA002972	7	39.165	60.835	0.310
58	BR 18	Mi0058	1410	71363	LA002963	7	39.765	60.235	0.321
59	BR 18	Mi0059	1760	654	LANOVACERO	7	41.401	58.599	0.286
60	BR 18	Mi0060	1663	16372	LA002965	7	40.511	59.489	0.270
61	BR 18	Mi0061	1662	16368	LA002965	7	39.452	60.548	0.273
71	BR 12	Mi0071	1599	3766	LA002970	7	39.378	60.622	0.298
72	BR 12	Mi0072	1605	3772	LA002970	7	39.111	60.889	0.292
73	BR 12	Mi0073	1604	3772	LA002970	7	38.398	61.602	0.293
74	BR 12	Mi0074	1606	3772	LA002970	7	38.017	61.983	0.295
75	BR 12	Mi0075	1601	3777	LA002970	7	41.509	58.491	0.295
					PROMEDIO	7.422	39.104	60.886	0.289
					DESV. EST	0.657	0.991	0.984	0.024
					LES	9.392	42.076	63.839	0.360
					LEI	5.452	36.131	57.933	0.218
					MAX	9.000	41.549	62.919	0.329
					MIN	7.000	37.081	58.451	0.204

Fuente: Propia

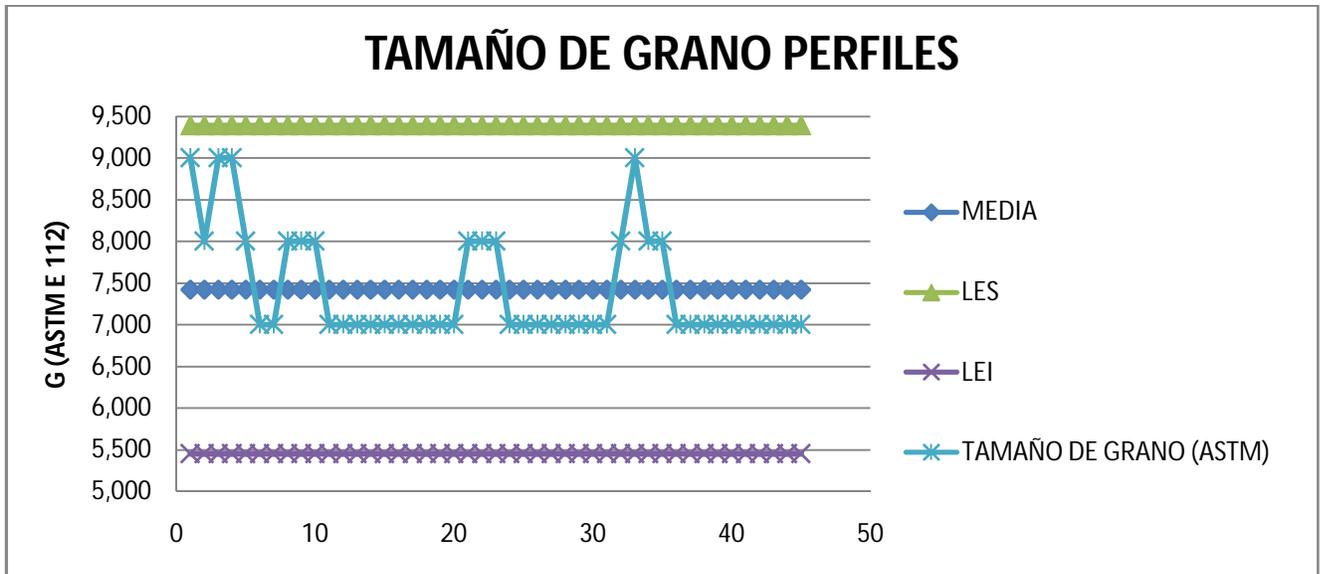


Figura 4.8 Tamaño de grano de perfiles³²

4.3 DETERMINACIÓN DEL NIVEL INCLUSIONARIO EN LOS PRODUCTOS DE NOVACERO

Para el nivel inclusionario se utilizaron las mismas muestras que para tamaño de grano tanto en varilla corrugada como en perfiles laminados.

³² Propia

4.3.1 VARILLA CORRUGADA

Tabla 4.9 Resultado de tamaño de grano de VC

N°	RODUCT	IDENTIF.	IDENTIF. TRACCIÓN	COLADA (N°)	LOTE/PROD	PERLITA	FERRITA	INCLUSIONES (ASTM)							
								A FINA	A GRUESA	B FINA	B GRUESA	C FINA	C GRUESA	D FINA	D GRUESA
4	VC 32	Mi0004	74	4298	LA009219-1	56.675	43.325	0.000	0.000	1.167	1.083	0.000	2.500	0.000	1.417
7	VC 32	Mi0007	91	82841.1	LA002904	62.567	37.433	0.000	0.000	1.500	1.000	0.000	2.000	0.000	3.500
8	VC 32	Mi0008	0091-R1	82841.3	LA002904	64.949	35.051	0.000	0.000	1.500	1.500	0.000	2.000	0.000	3.000
23	VC 32	Mi0023	0091-R1	82841.3	LA002904	62.812	37.188	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	3.500	0.000	3.000
24	VC 32	Mi0024	91	82841.1	LA002904	77.803	22.197	0.000	0.000	1.500	1.500	0.000	2.000	0.000	2.500
25	VC 32	Mi0025	93	82841.4	LA002904	77.803	22.197	0.000	0.000	2.000	1.000	0.000	3.000	0.000	3.000
32	VC32	Mi0032	71	314358	LA002919-1	69.092	30.908	0.000	0.000	0.917	1.000	0.000	1.583	0.000	0.833
33	VC32	Mi0033	72	314391	LA002919-1	61.750	38.250	0.000	0.000	1.750	1.167	0.000	1.750	0.000	1.333
34	VC32	Mi0034	73	314352	LA002919-1	70.168	29.832	0.000	0.000	1.000	0.417	0.000	1.583	0.000	0.667
35	VC32	Mi0035	87	100520	ALTOS	68.566	31.434	0.000	0.000	0.917	0.750	0.000	1.667	0.000	1.333
36	VC32	Mi0036	88	100443	ALTOS	73.156	26.844	0.000	0.000	0.333	0.250	0.000	0.750	0.000	0.500
37	VC32	Mi0037	89	100315	ALTOS	66.314	33.686	0.000	0.000	1.600	1.500	0.000	3.100	0.000	0.900
38	VC32	Mi0038	90	8398	LA002969-1	62.280	37.720	0.000	0.000	0.583	0.667	0.000	1.250	0.000	0.750
39	VC32	Mi0039	84	100429	ALTOS	55.237	44.763	0.000	0.000	1.500	1.417	0.000	1.833	0.000	1.667
40	VC32	Mi0040	83	100408	ALTOS	78.452	21.548	0.000	0.000	1.083	1.000	0.000	1.000	0.000	0.750
41	VC32	Mi0041	79	100677	ALTOS	65.486	34.514	0.000	0.000	1.500	1.083	0.000	1.917	0.000	1.583
42	VC32	Mi0042	81	100660	ALTOS	60.328	39.672	0.250	0.167	1.000	0.833	0.000	1.333	0.000	1.250
43	VC32	Mi0043	82	656	ALTOS	76.858	23.142	0.250	0.083	1.333	1.250	0.000	1.167	0.000	1.417
44	VC32	Mi0044	85	100429	ALTOS	73.619	26.381	0.000	0.000	1.333	1.833	0.000	1.500	0.000	2.250
45	VC32	Mi0045	86	100439	ALTOS	61.750	38.250	0.000	0.000	1.400	1.700	0.000	3.200	0.000	1.600
76	VC16	Mi0076	729	1752	MEDIOS	60.574	39.426	0.250	0.083	1.000	0.750	0.000	0.667	0.000	1.333
77	VC16	Mi0077	730	1752	MEDIOS	65.019	34.981	0.000	0.000	1.083	1.000	0.000	0.583	0.000	1.583
78	VC16	Mi0078	609	1397	MEDIOS	70.756	29.244	0.333	0.167	0.917	1.667	0.000	2.333	0.000	2.500
79	VC16	Mi0079	623	1386	MEDIOS	62.644	37.356	0.000	0.000	0.917	0.750	0.000	1.167	0.000	1.167
80	VC16	Mi0080	620	1387	MEDIOS	68.425	31.575	0.333	0.167	0.750	1.167	0.000	1.333	0.000	1.500
81	VC16	Mi0081	607	1400	MEDIOS	65.049	34.951	0.000	0.000	0.917	0.500	0.000	1.583	0.000	0.917
82	VC16	Mi0082	605	1400	MEDIOS	63.809	36.191	0.000	0.000	1.250	1.333	0.000	0.667	0.000	2.167
83	VC16	Mi0083	610	1397	MEDIOS	65.180	34.820	0.000	0.000	0.917	0.750	0.000	0.833	0.000	1.667
84	VC16	Mi0084	611	1396	MEDIOS	67.147	32.853	0.000	0.000	1.333	0.917	0.000	1.000	0.000	2.250
85	VC16	Mi0085	635	1404	MEDIOS	61.740	38.260	0.000	0.000	1.250	1.917	0.000	1.750	0.000	2.833
86	VC16	Mi0086	602	1401	MEDIOS	67.002	32.998	0.000	0.000	1.333	1.083	0.000	0.917	0.000	2.667
88	VC16	Mi0088	632	1405	MEDIOS	62.257	37.743	0.417	0.250	1.833	1.500	0.000	1.417	0.000	2.167
89	VC16	Mi0089	613	1396	MEDIOS	62.305	37.695	0.417	0.167	1.000	1.167	0.000	1.583	0.000	1.917
90	VC16	Mi0090	625	1386	MEDIOS	67.391	32.609	0.000	0.000	1.667	1.583	0.000	2.083	0.000	1.833
91	VC16	Mi0091	604	1401	MEDIOS	65.329	34.671	0.000	0.000	1.167	1.083	0.000	0.833	0.000	2.500
92	VC16	Mi0092	618	1391	MEDIOS	63.225	36.775	0.000	0.000	1.417	1.500	0.000	1.333	0.000	2.917
93	VC16	Mi0093	599	1402	MEDIOS	63.831	36.169	0.000	0.000	1.333	1.000	0.000	0.917	0.000	2.167
94	VC16	Mi0094	615	1394	MEDIOS	65.866	34.134	0.000	0.000	1.333	1.583	0.000	2.083	0.000	1.667
95	VC16	Mi0095	641	1390	BAJOS	66.708	33.292	0.000	0.000	1.000	1.083	0.000	1.833	0.000	1.250
96	VC16	Mi0096	642	1390	BAJOS	66.186	33.814	0.250	0.083	1.333	0.917	0.000	1.083	0.000	2.417
97	VC 10	Mi0097	2125	2199	BAJOS	60.742	39.258	0.000	0.000	1.167	1.000	0.000	0.750	0.000	2.083
98	VC 10	Mi0098	2164	2252	BAJOS	63.177	36.823	0.250	0.083	1.083	1.583	0.000	0.917	0.000	2.417

Fuente: Propia

Tabla 4.9 Resultado de tamaño de grano de VC (Continuación)

N°	RODUCT	IDENTIF.	IDENTIF. TRACCIÓN	COLADA (N°)	LOTE/PROD	PERLITA	FERRITA	INCLUSIONES (ASTM)							
								A FINA	A GRUESA	B FINA	B GRUESA	C FINA	C GRUESA	D FINA	D GRUESA
99	VC 10	Mi0099	2133	2210	BAJOS	60.067	39.933	0.000	0.000	1.250	1.000	0.000	1.083	0.000	2.000
100	VC 10	Mi0100	2147	2195	BAJOS	64.430	35.570	0.000	0.000	1.000	1.333	0.000	0.167	0.000	2.250
101	VC 10	Mi0101	2157	2208	BAJOS	63.409	36.591	0.333	0.083	1.583	0.833	0.000	1.000	0.000	2.750
102	VC 10	Mi0102	2150	2242	BAJOS	62.766	37.234	0.000	0.000	1.333	1.500	0.000	1.250	0.000	1.833
103	VC 10	Mi0103	2144	2196	BAJOS	60.736	39.264	0.417	0.583	1.417	0.917	0.000	1.583	0.000	2.000
104	VC 10	Mi0104	2129	2239	BAJOS	60.724	39.276	0.000	0.000	1.583	1.667	0.000	1.667	0.000	1.750
105	VC 10	Mi0105	2141	2246	BAJOS	60.919	39.081	0.000	0.000	0.917	1.000	0.000	1.667	0.000	1.667
106	VC 10	Mi0106	2153	2248	BAJOS	60.377	39.623	0.000	0.000	1.083	1.833	0.000	1.250	0.000	2.833
107	VC 10	Mi0107	2158	2207	BAJOS	67.435	32.565	0.000	0.000	1.083	0.917	0.000	0.917	0.000	1.250
108	VC 10	Mi0108	2142	2248	BAJOS	62.610	37.390	0.000	0.000	1.417	1.750	0.000	1.667	0.000	2.667
109	VC 10	Mi0109	2101	2051	BAJOS	68.110	31.890	0.000	0.000	1.083	0.833	0.000	0.833	0.000	1.917
110	VC 10	Mi0110	2168	2247	BAJOS	59.316	40.684	0.000	0.000	1.083	1.500	0.000	2.417	0.000	2.250
111	VC 10	Mi0111	2165	2250	BAJOS	62.550	37.450	0.000	0.000	1.250	0.833	0.000	1.083	0.000	1.750
112	VC 10	Mi0112	2162	2203	BAJOS	56.918	43.082	0.000	0.000	1.250	1.000	0.000	1.333	0.000	1.250
113	VC 10	Mi0113	2187	2264	BAJOS	59.271	40.729	0.000	0.000	1.250	1.000	0.000	1.333	0.000	1.250
114	VC 10	Mi0114	2108	2220	BAJOS	61.671	38.329	0.000	0.000	1.417	1.500	0.000	0.750	0.000	2.083
115	VC 10	Mi0115	2185	2227	BAJOS	60.302	39.698	0.250	0.000	0.750	0.417	0.000	1.083	0.000	1.750
116	VC 10	Mi0116	2143	2197	BAJOS	65.082	34.918	0.000	0.000	1.250	1.000	0.000	0.500	0.000	2.000
					PROMEDIO	64.779	35.221	0.063	0.032	1.215	1.144	0.000	1.465	0.000	1.874
					DESV. EST	5.061	5.061	0.130	0.091	0.300	0.380	0.000	0.685	0.000	0.680
					LES	79.961	50.403	0.452	0.305	2.116	2.284	0.000	3.518	0.000	3.914
					LEI	49.597	20.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
					MAX	78.452	44.763	0.417	0.583	2.000	1.917	0.000	3.500	0.000	3.500
					MIN	55.237	21.548	0.000	0.000	0.333	0.250	0.000	0.167	0.000	0.500

Fuente: Propia

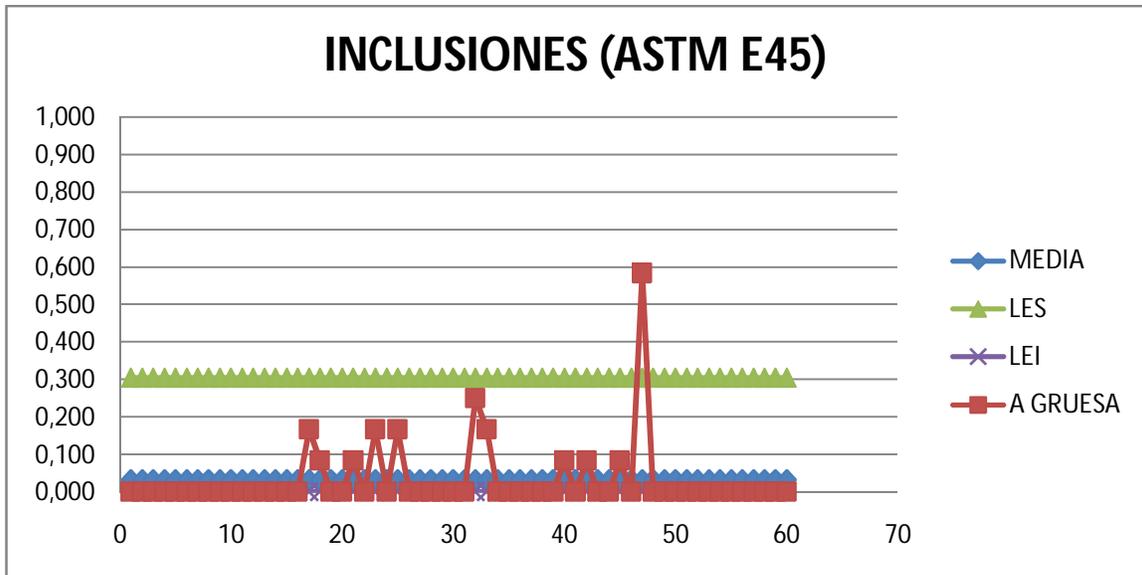
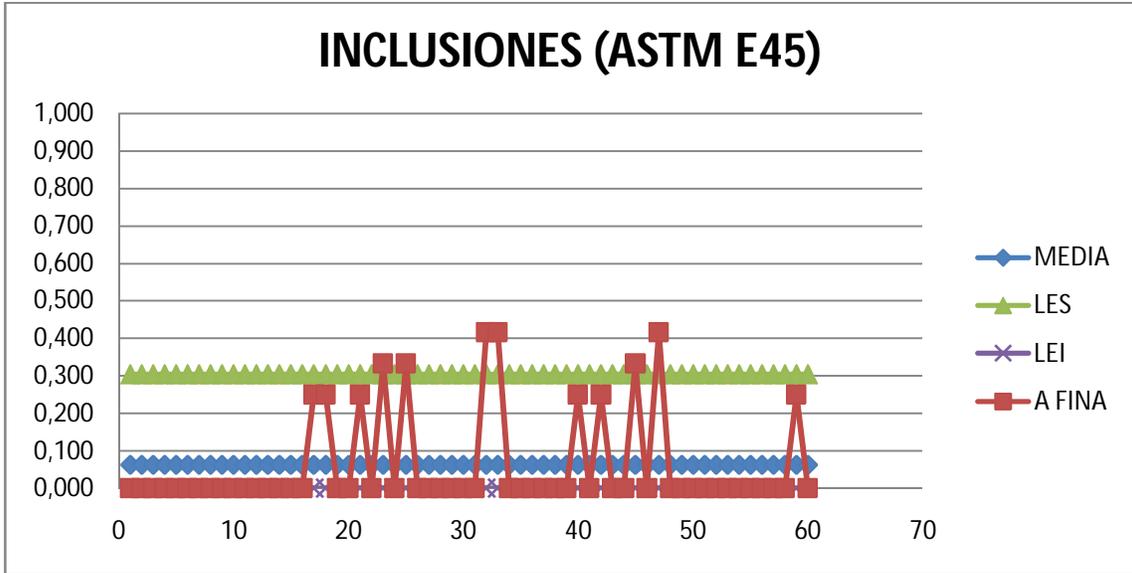


Figura 4.9 Inclusiones Tipo A de VC³³

³³ Propia

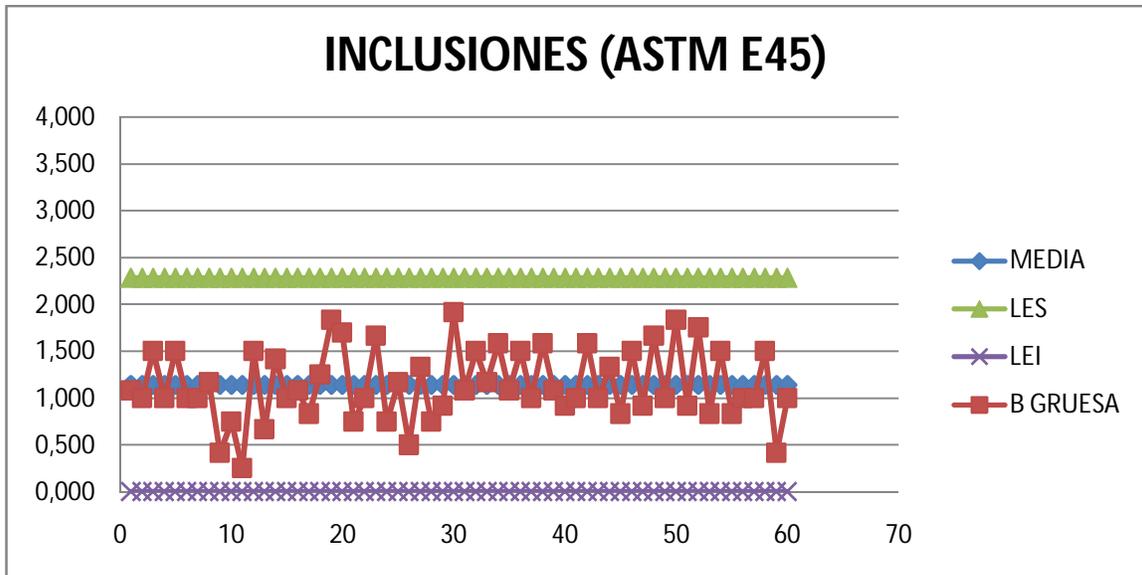
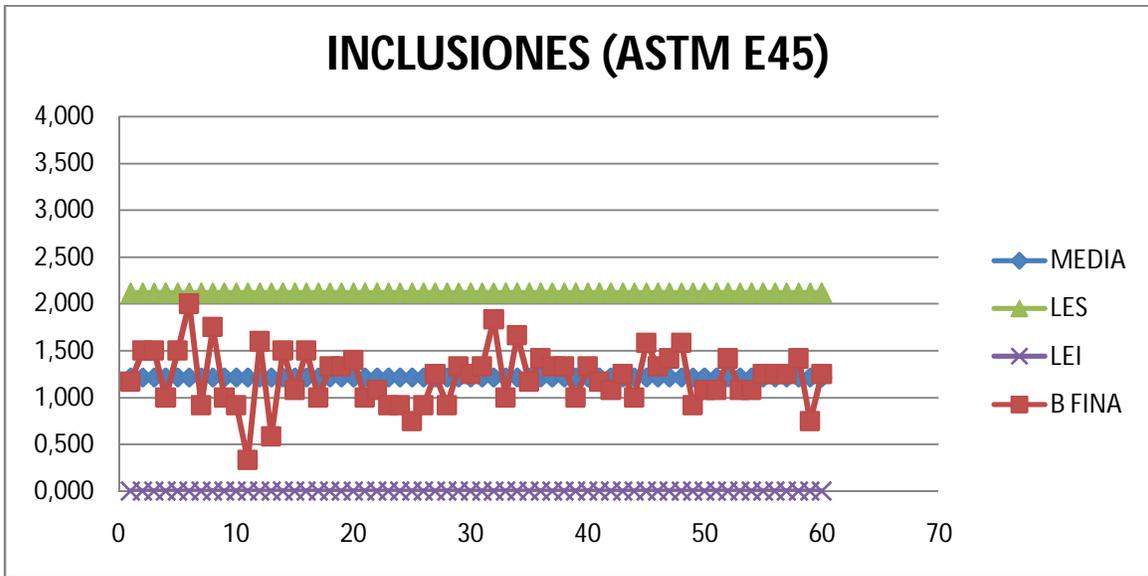


Figura 4.10 Inclusiones Tipo B de VC³⁴

³⁴ Propia

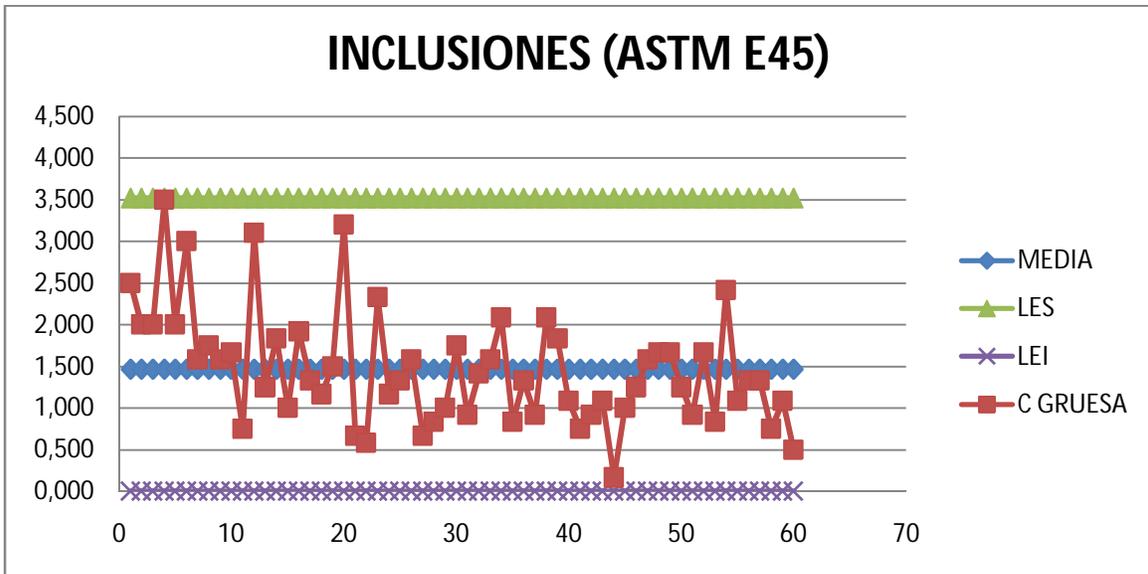


Figura 4.11 Inclusiones Tipo C de VC³⁵

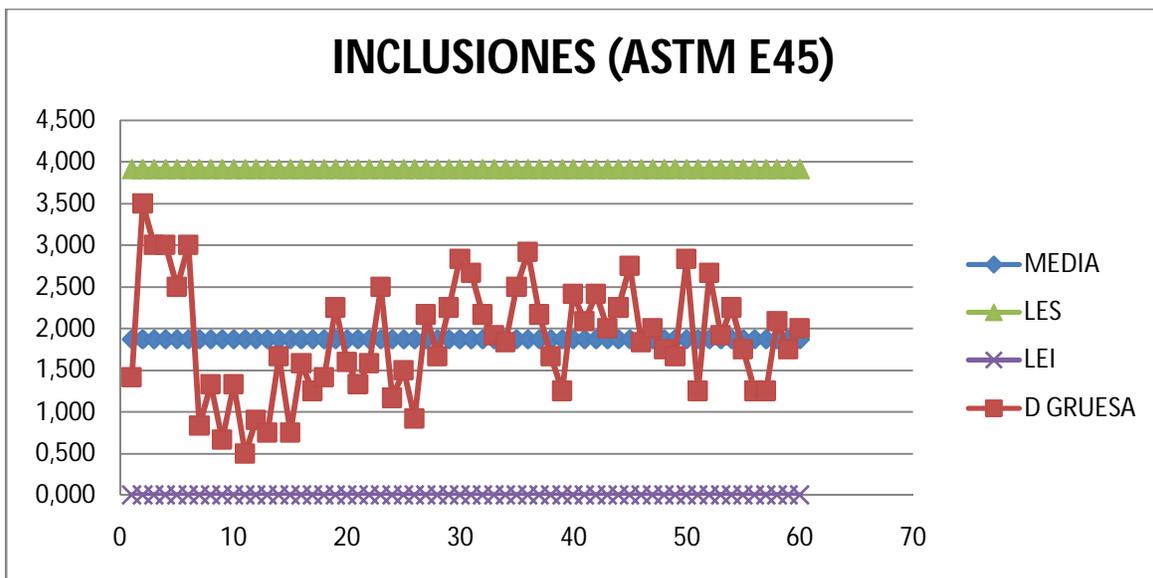


Figura 4.12 Inclusiones Tipo D de VC³⁵

³⁵ Propia

4.3.2 PERFILES LAMINADOS

Tabla 4.10 Resultado de inclusiones de perfiles

N°	PRODUCTO	IDENTIF.	IDENTIF. TRACCIÓN	COLADA (N°)	LOTE/PROD	INCLUSIONES (ASTM)							
						A FINA	A GRUESA	B FINA	B GRUESA	C FINA	C GRUESA	D FINA	D GRUESA
14	PL19X3	Mi0014	1712	16360	LA002965	0.000	0.000	1.417	1.083	0.000	0.667	0.000	2.000
15	PL19X3	Mi0015	1713	16366	LA002965	0.000	0.000	1.167	1.250	0.000	0.917	0.000	2.750
16	PL19X3	Mi0016	1717	16368	LA002965	0.250	0.167	1.000	0.833	0.000	1.333	0.000	1.250
17	PL19X3	Mi0017	1719	16369	LA002965	0.000	0.000	1.417	1.000	0.000	2.167	0.000	1.917
18	PL19X3	Mi0018	1720	16358	LA002965	0.000	0.000	1.250	1.250	0.000	1.000	0.000	1.750
27	PL25X3	Mi0027	1344	71299	LA002963	0.000	0.000	0.500	1.000	0.000	0.000	0.000	0.500
28	PL25X3	Mi0028	1351	71364	LA002963	0.000	0.000	0.500	0.500	0.000	0.000	0.000	0.500
29	PL25X3	Mi0029	1346	71296	LA002963	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.500
30	PL25X3	Mi0030	1350	71298	LA002963	0.000	0.000	0.667	0.917	0.000	2.417	0.000	1.250
31	PL25X3	Mi0031	1224	71368	LA002963	0.000	0.000	0.500	0.200	0.000	1.000	0.000	0.700
51	PL65X6	Mi0051	1587	16773	LA002968	0.000	0.000	1.400	1.400	0.000	0.800	0.000	2.100
52	PL65X6	Mi0052	1586	16780	LA002968	0.000	0.000	1.000	1.167	0.000	1.833	0.000	2.083
53	PL65X6	Mi0053	1576	16771	LA002968	0.000	0.000	0.917	1.583	0.000	1.167	0.000	2.583
54	PL65X6	Mi0054	1588	16781	LA002968	0.000	0.000	0.917	1.000	0.000	0.750	0.000	1.417
55	PL65X6	Mi0055	1782	703	LANOVACERO	0.000	0.000	1.333	1.333	0.000	0.583	0.000	2.167
117	BC15	Mi0117	2479	22159	LA002991	0.000	0.000	1.167	1.250	0.000	0.000	0.000	2.500
118	BC15	Mi0118	2477	22193	LA002991	0.000	0.000	1.417	1.333	0.000	0.750	0.000	2.583
119	BC15	Mi0119	2476	22167	LA002991	0.000	0.000	1.417	1.000	0.000	0.333	0.000	2.000
120	BC15	Mi0120	2478	22136	LA002991	0.000	0.000	0.917	1.000	0.000	0.917	0.000	1.833
121	BC15	Mi0121	2480	22237	LA002991	0.000	0.000	0.917	1.250	0.000	0.750	0.000	2.083
9	AL30X3	Mi0009	2320	008C0	LA002977	0.000	0.000	1.167	1.417	0.000	2.833	0.000	1.500
10	AL30X3	Mi0010	2327	7M000	LA002977	0.000	0.000	1.333	0.833	0.000	1.333	0.000	0.917
11	AL30X3	Mi0011	2330	87000	LA002977	0.000	0.000	1.250	1.000	0.000	1.083	0.000	1.500
12	AL30X3	Mi0012	2335	83000	LA002977	0.000	0.000	1.000	0.750	0.000	1.000	0.000	1.083
13	AL30X3	Mi0013	2345	79A000	LA002977	0.000	0.000	1.083	0.750	0.000	0.833	0.000	1.667
56	AL50X4	Mi0056	2420	78000	LA002977	0.000	0.000	1.000	0.750	0.000	1.500	0.000	1.750
62	AL50X4	Mi0062	2417	73000	LA002977	0.000	0.000	0.500	0.417	0.000	0.917	0.000	1.000
63	AL50X4	Mi0063	2415	1837	LANOVACERO	0.000	0.000	0.583	0.500	0.000	0.750	0.000	1.000
64	AL50X4	Mi0064	2414	1837	LANOVACERO	0.000	0.000	1.000	1.833	0.000	1.250	0.000	3.750
65	AL50X4	Mi0065	2413	7T000	LA002977	0.000	0.000	0.750	0.500	0.000	1.000	0.000	1.250
66	TEE25X3	Mi0066	1395	71368	LA002963	0.000	0.000	1.083	1.583	0.000	0.833	0.000	3.417
67	TEE25X3	Mi0067	1392	71366	LA002963	0.000	0.000	0.750	1.000	0.000	1.167	0.000	1.917
68	TEE25X3	Mi0068	1394	71365	LA002963	0.000	0.000	0.833	1.000	0.000	1.417	0.000	1.833
69	TEE25X3	Mi0069	1397	71367	LA002963	0.167	0.167	0.833	1.667	0.000	3.000	0.000	3.167
70	TEE25X3	Mi0070	1389	71364	LA002963	0.000	0.000	0.750	0.500	0.000	1.750	0.000	1.250
57	BR 18	Mi0057	1758	18752	LA002972	0.000	0.000	1.333	1.083	0.000	1.167	0.000	2.000
58	BR 18	Mi0058	1410	71363	LA002963	0.000	0.000	1.083	1.333	0.000	0.667	0.000	2.333
59	BR 18	Mi0059	1760	654	LANOVACERO	0.000	0.000	1.083	1.083	0.000	2.250	0.000	1.583
60	BR 18	Mi0060	1663	16372	LA002965	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.750	0.000	2.583
61	BR 18	Mi0061	1662	16368	LA002965	0.167	0.083	1.167	1.000	0.000	1.083	0.000	1.583
71	BR 12	Mi0071	1599	3766	LA002970	0.333	0.000	1.083	1.167	0.000	1.667	0.000	2.000
72	BR 12	Mi0072	1605	3772	LA002970	0.250	0.083	1.500	1.500	0.000	1.167	0.000	2.167
73	BR 12	Mi0073	1604	3772	LA002970	0.000	0.000	0.833	0.583	0.000	0.833	0.000	1.000
74	BR 12	Mi0074	1606	3772	LA002970	0.000	0.000	0.833	0.750	0.000	0.917	0.000	1.167
75	BR 12	Mi0075	1601	3777	LA002970	0.000	0.000	0.750	0.750	0.000	0.917	0.000	1.500
					PROMEDIO	0.026	0.011	1.009	1.024	0.000	1.099	0.000	1.764
					DES. EST	0.077	0.038	0.277	0.356	0.000	0.669	0.000	0.740
					LES	0.257	0.125	1.840	2.091	0.000	3.106	0.000	3.984
					LEI	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
					MAX	0.333	0.167	1.500	1.833	0.000	3.000	0.000	3.750
					MIN	0.000	0.000	0.500	0.200	0.000	0.000	0.000	0.500

Fuente: Propia

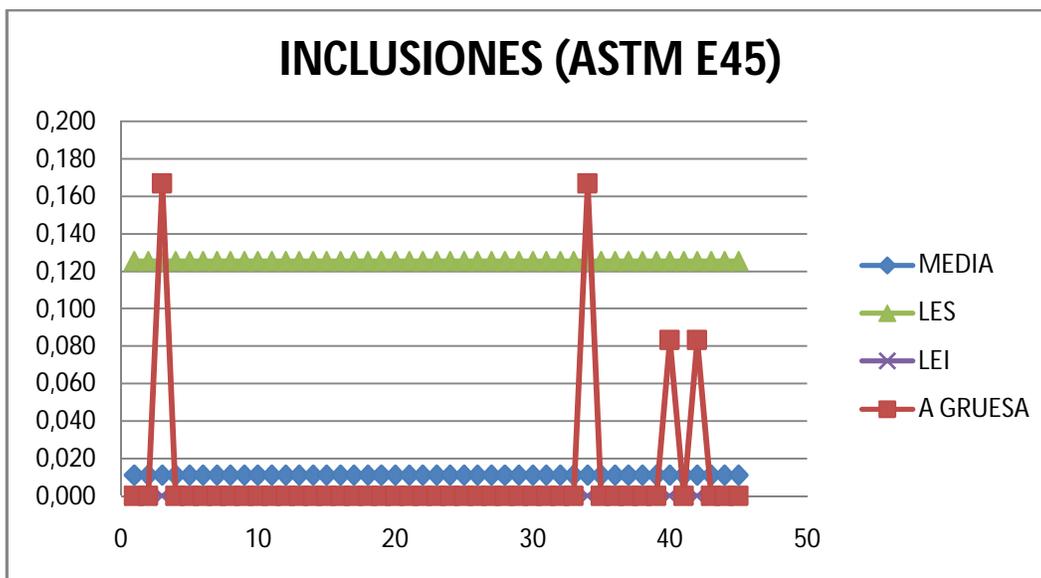
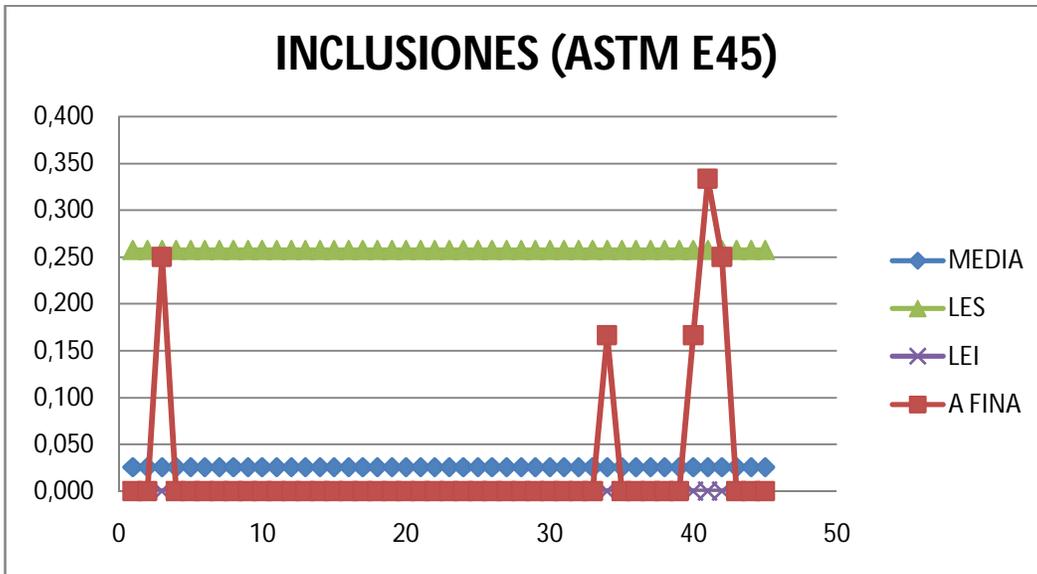


Figura 4.13 Inclusiones Tipo A de perfiles³⁶

³⁶ Propia

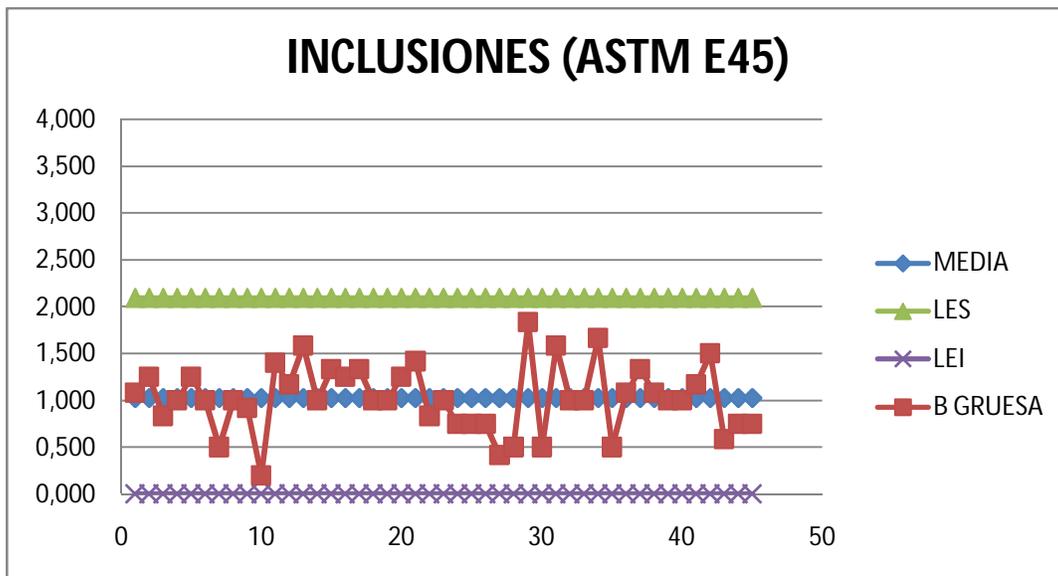
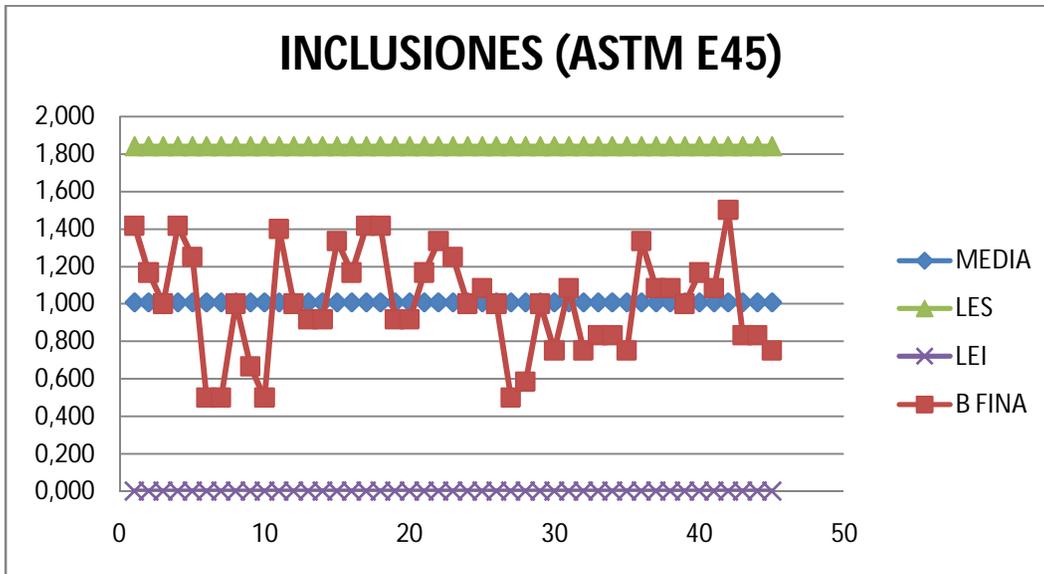


Figura 4.14 Inclusiones Tipo B de perfiles³⁷

³⁷ Propia

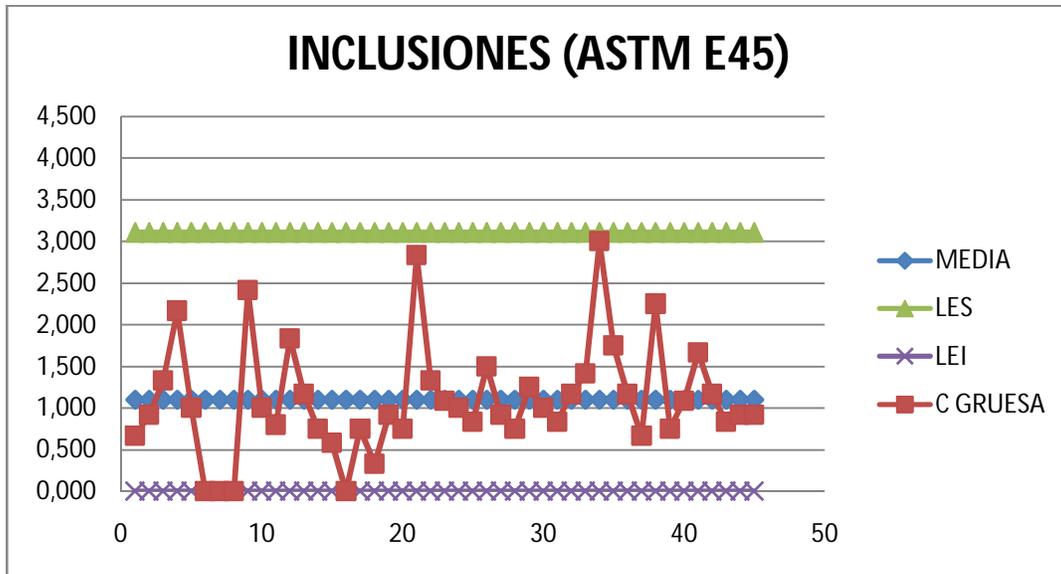


Figura 4.15 Inclusiones Tipo C de perfiles³⁸

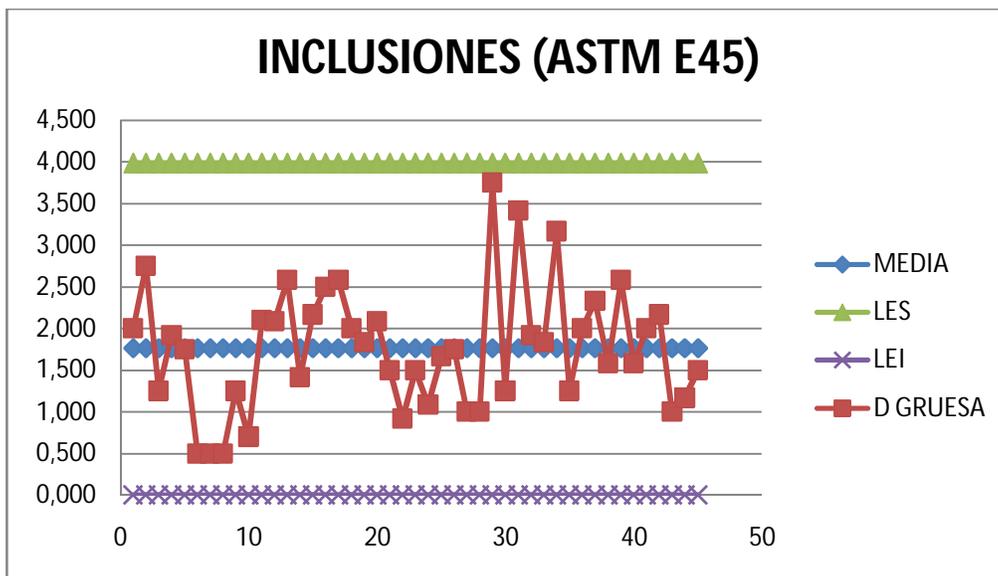


Figura 4.16 Inclusiones Tipo D de VC³⁸

³⁸ Propia

4.4 COMPARACIÓN DE PROPIEDADES QUÍMICAS, METALGRÁFICAS Y MECÁNICAS DE LOS PRODUCTOS DE NOVACERO

Con los datos obtenidos se calculó una relación lineal múltiple entre el tamaño de grano y el carbono equivalente para obtener la resistencia a la fluencia y la resistencia a la tracción.

4.4.1 VARILLA CORRUGADA

Tabla 4.11 Datos de micrografía, carbono equivalente y ensayo de tracción de VC

Nº	PRODUCTO	IDENTIF.	IDENTIF. TRACCIÓN	COLADA (Nº)	LOTE/PROD	GRANO (ASTM)	Ceq.	Alargamiento	Re	Rm
7	VC 32	Mi0007	91	82841.1	LA002904	6	0.577	21.540	433.400	705.330
23	VC 32	Mi0023	0091-R1	82841.3	LA002904	4	0.588	21.540	433.390	705.310
24	VC 32	Mi0024	91	82841.1	LA002904	5	0.577	21.540	433.400	705.330
25	VC 32	Mi0025	93	82841.4	LA002904	5	0.591	20.360	440.830	751.900
35	VC32	Mi0035	87	100520	ALTOS	5	0.612	14.090	462.450	730.320
36	VC32	Mi0036	88	100443	ALTOS	4	0.591	18.270	454.510	731.060
37	VC32	Mi0037	89	100315	ALTOS	5	0.579	16.930	461.020	726.070
39	VC32	Mi0039	84	100429	ALTOS	6	0.562	16.110	449.920	712.070
40	VC32	Mi0040	83	100408	ALTOS	5	0.622	16.240	472.980	753.000
41	VC32	Mi0041	79	100677	ALTOS	6	0.581	18.770	455.070	701.180
42	VC32	Mi0042	81	100660	ALTOS	6	0.600	18.690	466.220	732.300
43	VC32	Mi0043	82	656	ALTOS	5	0.635	18.750	466.540	742.190
44	VC32	Mi0044	85	100429	ALTOS	5	0.596	16.760	446.670	713.160
45	VC32	Mi0045	86	100439	ALTOS	6	0.583	16.930	454.790	719.700
76	VC16	Mi0076	729	1752	MEDIOS	6	0.568	17.340	467.630	683.880
77	VC16	Mi0077	730	1752	MEDIOS	5	0.564	17.710	481.830	694.350
78	VC16	Mi0078	609	1397	MEDIOS	7	0.551	24.540	485.650	706.010
79	VC16	Mi0079	623	1386	MEDIOS	7	0.600	23.780	465.600	713.170
80	VC16	Mi0080	620	1387	MEDIOS	5	0.559	18.090	462.560	702.870
81	VC16	Mi0081	607	1400	MEDIOS	5	0.580	20.600	467.160	708.630
82	VC16	Mi0082	605	1400	MEDIOS	6	0.567	22.030	477.020	689.920
83	VC16	Mi0083	610	1397	MEDIOS	7	0.583	18.350	474.790	705.630
84	VC16	Mi0084	611	1396	MEDIOS	5	0.583	24.460	476.550	694.580
85	VC16	Mi0085	635	1404	MEDIOS	5	0.582	18.190	477.860	713.600
86	VC16	Mi0086	602	1401	MEDIOS	5	0.576	24.290	476.700	704.620
88	VC16	Mi0088	632	1405	MEDIOS	5	0.584	19.690	484.900	726.170
89	VC16	Mi0089	613	1396	MEDIOS	5	0.585	25.650	471.180	689.170
90	VC16	Mi0090	625	1386	MEDIOS	7	0.567	22.880	485.360	697.320

Fuente: Propia

Tabla 4.11 Datos de micrografía, carbono equivalente y ensayo de tracción de VC
(Continuación)

Nº	PRODUCTO	IDENTIF.	IDENTIF. TRACCIÓN	COLADA (Nº)	LOTE/PROD	GRANOS (ASTM)	Ceq.	Alargamiento	Re	Rm
91	VC16	Mi0091	604	1401	MEDIOS	6	0.581	25.830	469.120	707.650
92	VC16	Mi0092	618	1391	MEDIOS	5	0.553	23.750	473.380	694.660
93	VC16	Mi0093	599	1402	MEDIOS	5	0.555	23.870	477.970	722.880
94	VC16	Mi0094	615	1394	MEDIOS	5	0.584	19.360	481.530	716.670
95	VC16	Mi0095	641	1390	BAJOS	5	0.524	22.330	455.600	680.190
96	VC16	Mi0096	642	1390	BAJOS	6	0.563	21.840	458.120	679.040
97	VC 10	Mi0097	2125	2199	BAJOS	5	0.562	25.720	460.070	667.830
98	VC 10	Mi0098	2164	2252	BAJOS	5	0.586	20.500	452.280	679.210
99	VC 10	Mi0099	2133	2210	BAJOS	5	0.565	18.660	459.620	674.910
100	VC 10	Mi0100	2147	2195	BAJOS	5	0.590	25.200	475.080	689.180
101	VC 10	Mi0101	2157	2208	BAJOS	6	0.570	26.800	460.700	680.940
102	VC 10	Mi0102	2150	2242	BAJOS	5	0.583	25.620	464.620	682.740
103	VC 10	Mi0103	2144	2196	BAJOS	5	0.582	25.940	449.510	667.450
104	VC 10	Mi0104	2129	2239	BAJOS	5	0.574	24.600	470.540	669.810
105	VC 10	Mi0105	2141	2246	BAJOS	6	0.564	30.480	463.680	681.380
106	VC 10	Mi0106	2153	2248	BAJOS	6	0.567	22.240	459.740	664.300
107	VC 10	Mi0107	2158	2207	BAJOS	5	0.574	20.100	462.740	684.730
108	VC 10	Mi0108	2142	2248	BAJOS	5	0.560	32.500	460.820	680.530
109	VC 10	Mi0109	2101	2051	BAJOS	6	0.576	28.120	462.920	670.980
110	VC 10	Mi0110	2168	2247	BAJOS	5	0.560	18.640	446.270	657.180
111	VC 10	Mi0111	2165	2250	BAJOS	6	0.567	26.120	457.100	665.740
112	VC 10	Mi0112	2162	2203	BAJOS	5	0.554	28.100	441.420	659.970
113	VC 10	Mi0113	2187	2264	BAJOS	6	0.570	26.700	467.900	681.180
114	VC 10	Mi0114	2108	2220	BAJOS	5	0.567	24.120	464.110	678.980
115	VC 10	Mi0115	2185	2227	BAJOS	6	0.567	19.340	458.850	670.260
116	VC 10	Mi0116	2143	2197	BAJOS	5	0.561	18.040	456.690	685.310

Fuente: Propia

Los resultados de la regresión lineal múltiple para el esfuerzo de fluencia son los siguientes:

$$Re = 11.033G + 699.46Ceq.$$

4.1

Tabla 4.12 Resultados de relación entre tamaño de grano, Ceq y esfuerzo de fluencia.

Coeficiente		Regresión Estadística	
G (Tamaño de grano ASTM E 112)	11.03291164	R Multiple	0.999290805
Ceq.	699.4613767	R cuadrada	0.998582112
		R cuadrada ajustada	0.979324076
		Error estándar	17.76918177
		Observaciones	54

Fuente: Propia

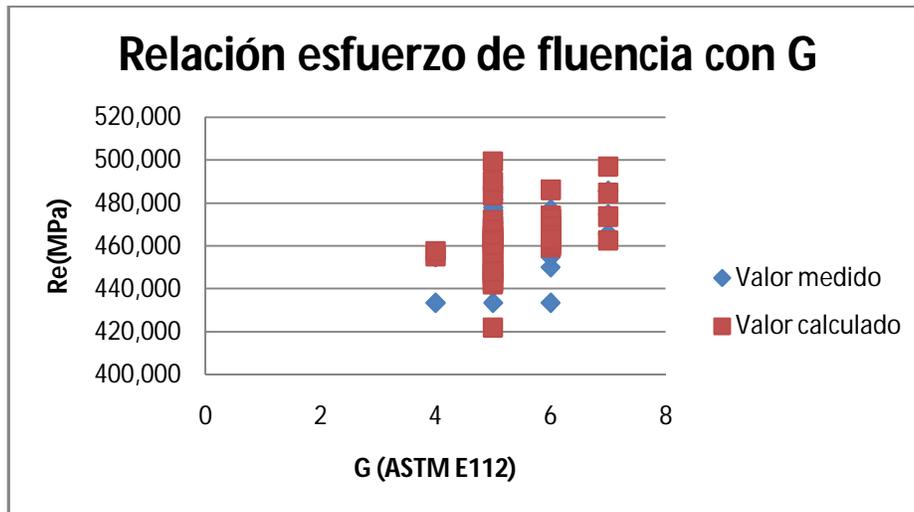


Figura 4.17 Relación entre Re y G³⁹

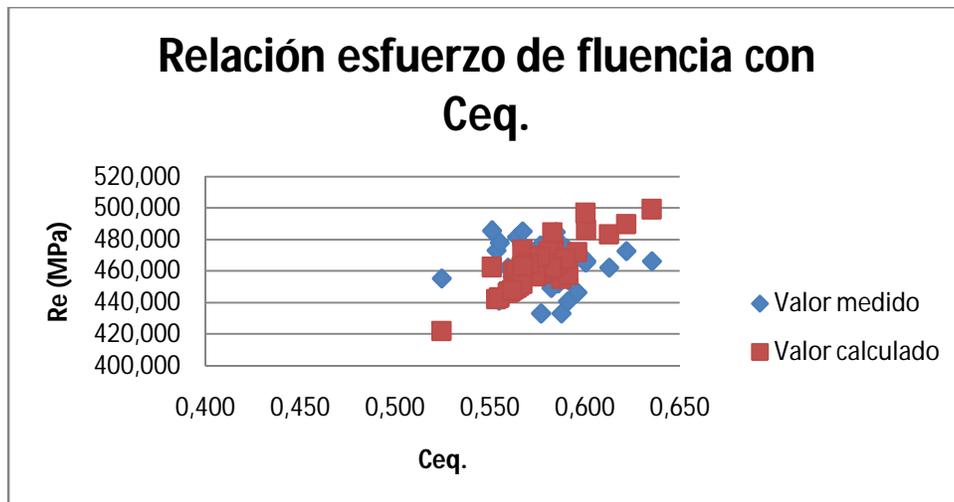


Figura 4.18 Relación entre Re y Ceq.³⁹

³⁹ Propia

Los resultados de la regresión lineal múltiple para el esfuerzo de tracción son los siguientes:

$$Rm = 2.93G + 1182.71Ceq.$$

4.2

Tabla 4.13 Resultados de relación entre tamaño de grano, Ceq y esfuerzo de tracción.

	Coeficiente	Regresión Estadística	
G (Tamaño de grano ASTM E 112)	2.9291509	R Múltiple	0.9996112
Ceq.	1182.7105	R cuadrada	0.9992225
		R cuadrada ajustada	0.9799768
		Error estándar	19.823737
		Observaciones	54

Fuente: Propia

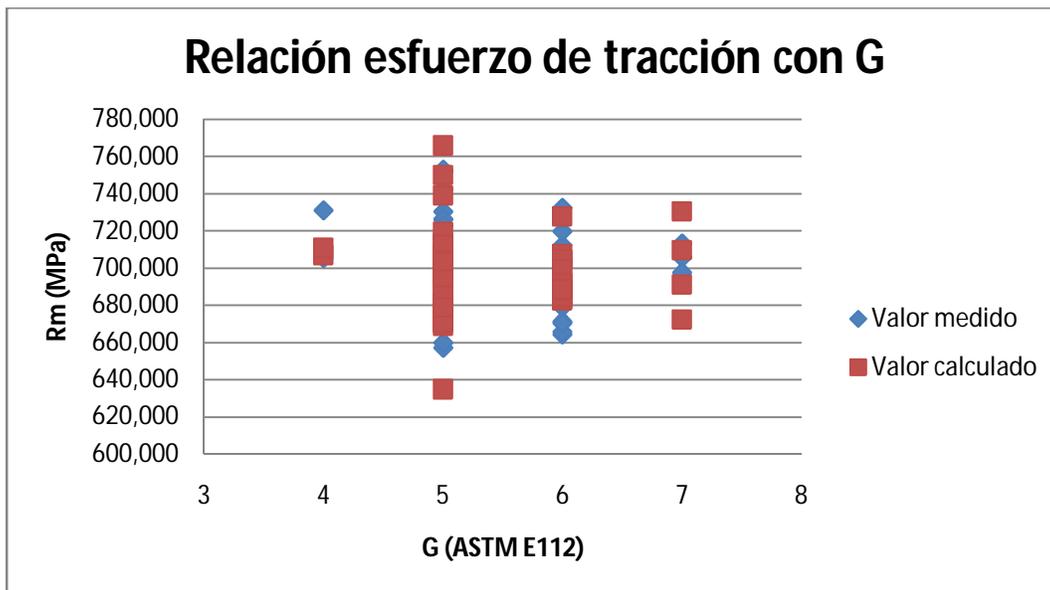


Figura 4.19 Relación entre Rm y G⁴⁰

⁴⁰ Propia

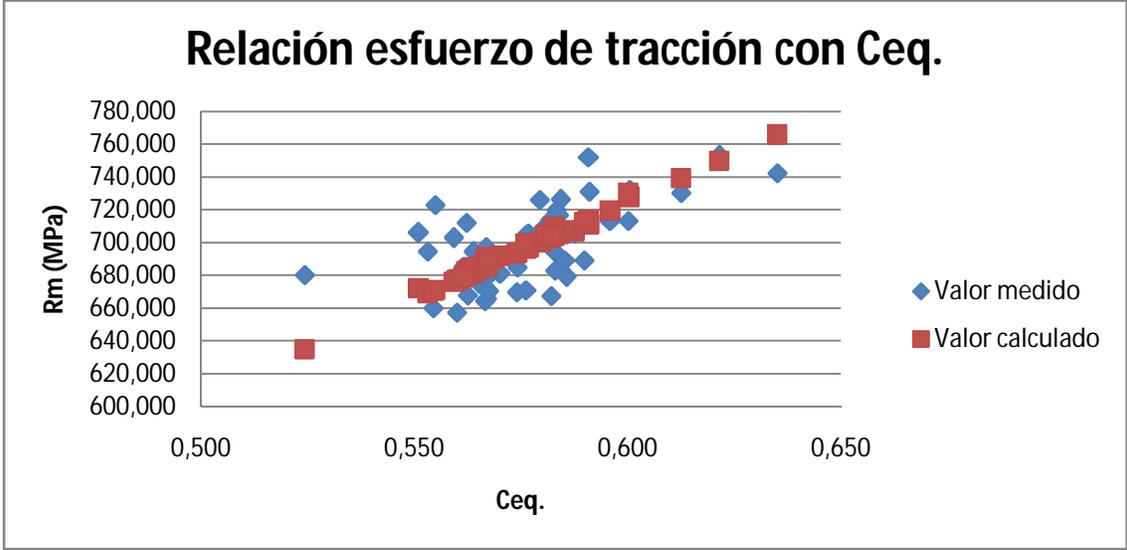


Figura 4.20 Relación entre Rm y Ceq.⁴¹

⁴¹ Propia

4.4.2 PERFILES LAMINADOS

Tabla 4.14 Datos de micrografía, carbono equivalente y ensayo de tracción de perfiles

Nº	PRODUCTO	IDENTIF.	IDENTIF. TRACCIÓN	COLADA (Nº)	LOTE/PROD	GRANULOMETRÍA (ASTM)	Ceq.	Alargamiento	Re	Rm
14	PL19X3	Mi0014	1712	16360	LA002965	9	0.282	29.800	390.370	477.120
15	PL19X3	Mi0015	1713	16366	LA002965	8	0.271	31.800	377.470	458.620
16	PL19X3	Mi0016	1717	16368	LA002965	9	0.300	27.450	408.290	494.490
17	PL19X3	Mi0017	1719	16369	LA002965	9	0.301	23.150	422.860	496.750
18	PL19X3	Mi0018	1720	16358	LA002965	8	0.296	30.700	386.960	495.300
27	PL25X3	Mi0027	1344	71299	LA002963	7	0.278	32.190	366.580	501.000
28	PL25X3	Mi0028	1351	71364	LA002963	7	0.319	26.720	382.650	511.550
29	PL25X3	Mi0029	1346	71296	LA002963	8	0.271	32.720	358.190	480.470
30	PL25X3	Mi0030	1350	71298	LA002963	8	0.318	29.210	377.960	509.170
31	PL25X3	Mi0031	1224	71368	LA002963	8	0.323	30.340	383.540	503.550
51	PL65X6	Mi0051	1587	16773	LA002968	7	0.283	34.260	327.350	473.520
52	PL65X6	Mi0052	1586	16780	LA002968	7	0.227	42.240	330.470	470.190
53	PL65X6	Mi0053	1576	16771	LA002968	7	0.286	48.530	337.970	465.040
54	PL65X6	Mi0054	1588	16781	LA002968	7	0.279	41.800	331.660	463.590
55	PL65X6	Mi0055	1782	703	LANOVACERO	7	0.254	42.910	340.400	475.940
117	BC15	Mi0117	2479	22159	LA002991	7	0.253	30.060	325.110	458.050
118	BC15	Mi0118	2477	22193	LA002991	7	0.323	28.050	338.740	485.600
119	BC15	Mi0119	2476	22167	LA002991	7	0.329	27.410	355.050	485.530
120	BC15	Mi0120	2478	22136	LA002991	7	0.280	29.890	319.410	442.220
121	BC15	Mi0121	2480	22237	LA002991	7	0.303	28.650	317.360	452.880
9	AL30X3	Mi0009	2320	008C0	LA002977	8	0.300	34.920	330.750	461.020
10	AL30X3	Mi0010	2327	7M000	LA002977	8	0.297	30.390	325.520	464.380
11	AL30X3	Mi0011	2330	87000	LA002977	8	0.288	28.630	318.880	457.300
12	AL30X3	Mi0012	2335	83000	LA002977	7	0.297	29.750	320.160	466.430
13	AL30X3	Mi0013	2345	79A000	LA002977	7	0.300	34.980	343.260	487.470
56	AL50X4	Mi0056	2420	78000	LA002977	7	0.296	44.470	329.330	469.890
62	AL50X4	Mi0062	2417	73000	LA002977	7	0.292	45.660	305.650	440.430
63	AL50X4	Mi0063	2415	1837	LANOVACERO	7	0.297	33.300	336.220	472.970
64	AL50X4	Mi0064	2414	1837	LANOVACERO	7	0.276	43.560	328.480	468.920
65	AL50X4	Mi0065	2413	7T000	LA002977	7	0.289	51.460	286.380	418.380
66	TEE25X3	Mi0066	1395	71368	LA002963	7	0.299	32.640	389.440	503.960
67	TEE25X3	Mi0067	1392	71366	LA002963	8	0.204	28.580	391.630	481.570
68	TEE25X3	Mi0068	1394	71365	LA002963	9	0.267	28.690	362.290	491.500
69	TEE25X3	Mi0069	1397	71367	LA002963	8	0.285	24.640	404.780	507.490
70	TEE25X3	Mi0070	1389	71364	LA002963	8	0.304	21.640	401.920	510.400
57	BR 18	Mi0057	1758	18752	LA002972	7	0.310	37.380	348.960	476.400
58	BR 18	Mi0058	1410	71363	LA002963	7	0.321	36.500	350.730	479.230
59	BR 18	Mi0059	1760	654	LANOVACERO	7	0.286	33.610	341.530	464.730
60	BR 18	Mi0060	1663	16372	LA002965	7	0.270	39.370	328.250	461.940
61	BR 18	Mi0061	1662	16368	LA002965	7	0.273	34.680	333.830	465.950
71	BR 12	Mi0071	1599	3766	LA002970	7	0.298	37.300	347.660	480.110
72	BR 12	Mi0072	1605	3772	LA002970	7	0.292	36.870	369.410	494.870
73	BR 12	Mi0073	1604	3772	LA002970	7	0.293	34.970	362.330	491.160
74	BR 12	Mi0074	1606	3772	LA002970	7	0.295	35.550	353.140	490.010
75	BR 12	Mi0075	1601	3777	LA002970	7	0.295	30.800	354.910	493.900

Fuente: Propia

Los resultados de la regresión lineal múltiple para el esfuerzo de fluencia son los siguientes:

$$Re = 34.25G + 337.61Ceq.$$

4.3

Tabla 4.15 Resultados de relación entre tamaño de grano, Ceq y esfuerzo de fluencia.

<i>Coeficiente</i>		<i>Regresión Estadística</i>	
G (Tamaño de grano ASTM E 112)	34.253665	R Multiple	0.9977033
Ceq.	337.61427	R cuadrada	0.9954119
		R cuadrada ajustada	0.9720494
		Error estándar	24.484956
		Observaciones	45

Fuente: Propia

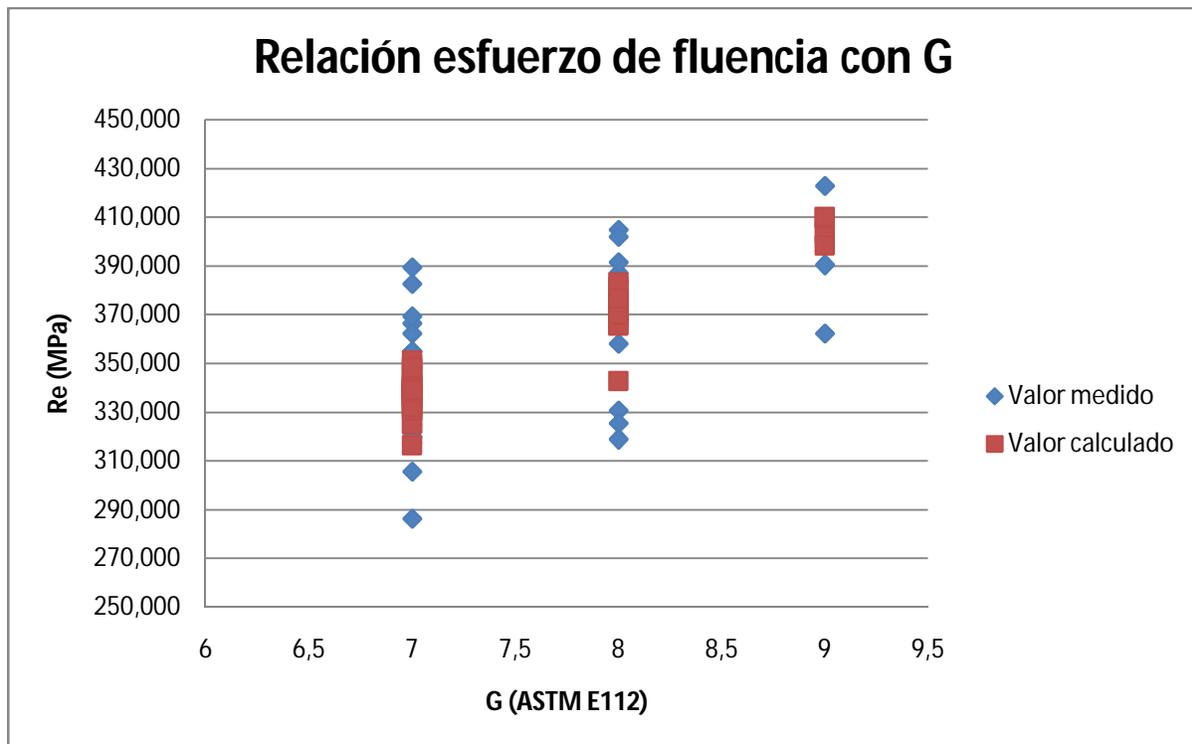


Figura 4.21 Relación entre Re y G⁴²

⁴² Propia

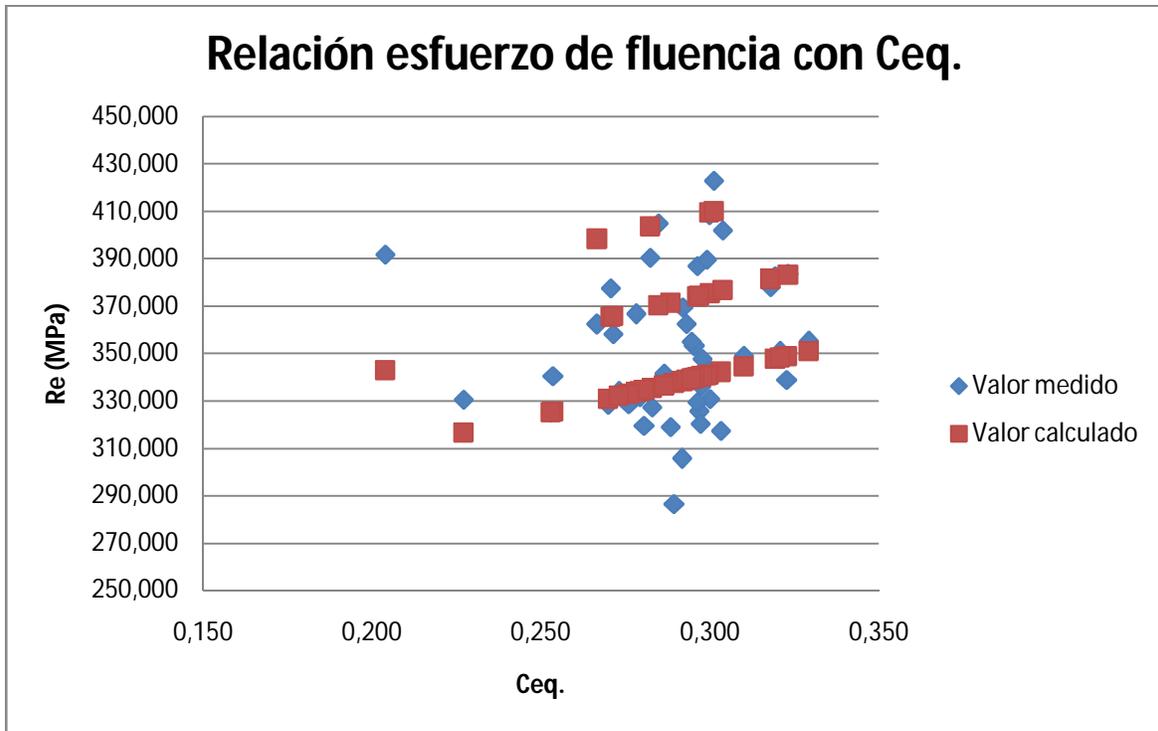


Figura 4.22 Relación entre Re y Ceq.⁴³

Los resultados de la regresión lineal múltiple para el esfuerzo de tracción son los siguientes:

$$Rm = 30.34G + 870.591Ceq.$$

4.4

Tabla 4.16 Resultados de relación entre tamaño de grano, Ceq y esfuerzo de tracción.

		Coeficiente	Regresión Estadística	
G (Tamaño de grano ASTM E 112)		30.33562	R Múltiple	0.99844804
Ceq.		870.591748	R cuadrada	0.99689849
			R cuadrada ajustada	0.97357055
			Error estándar	27.2448214
			Observaciones	45

Fuente: Propia

⁴³ Propia

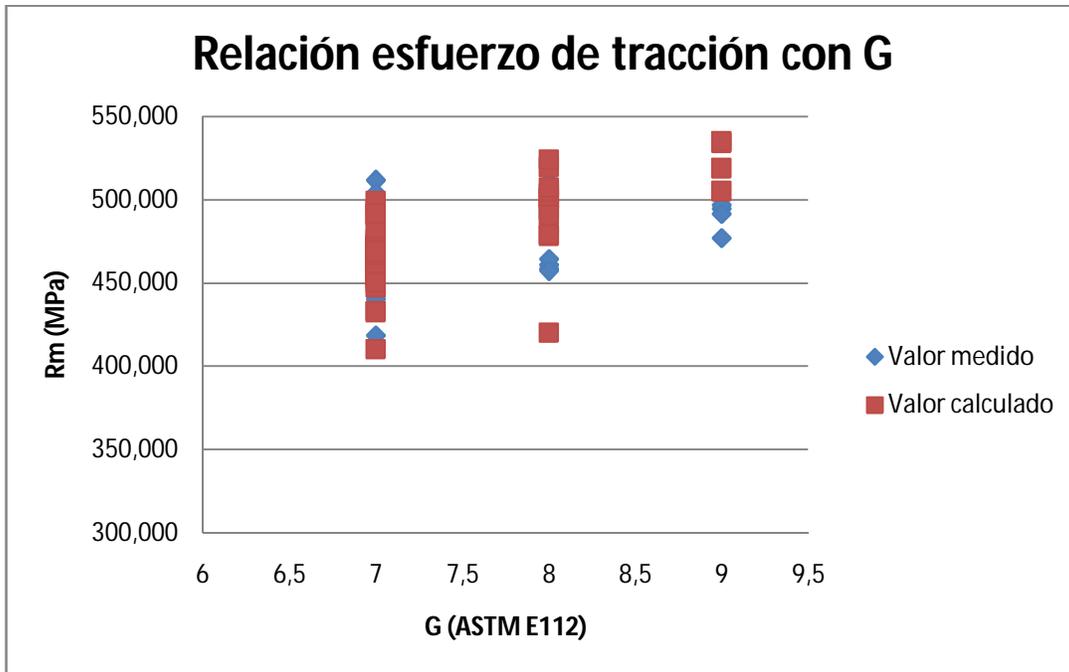


Figura 4.23 Relación entre Rm y G⁴⁴

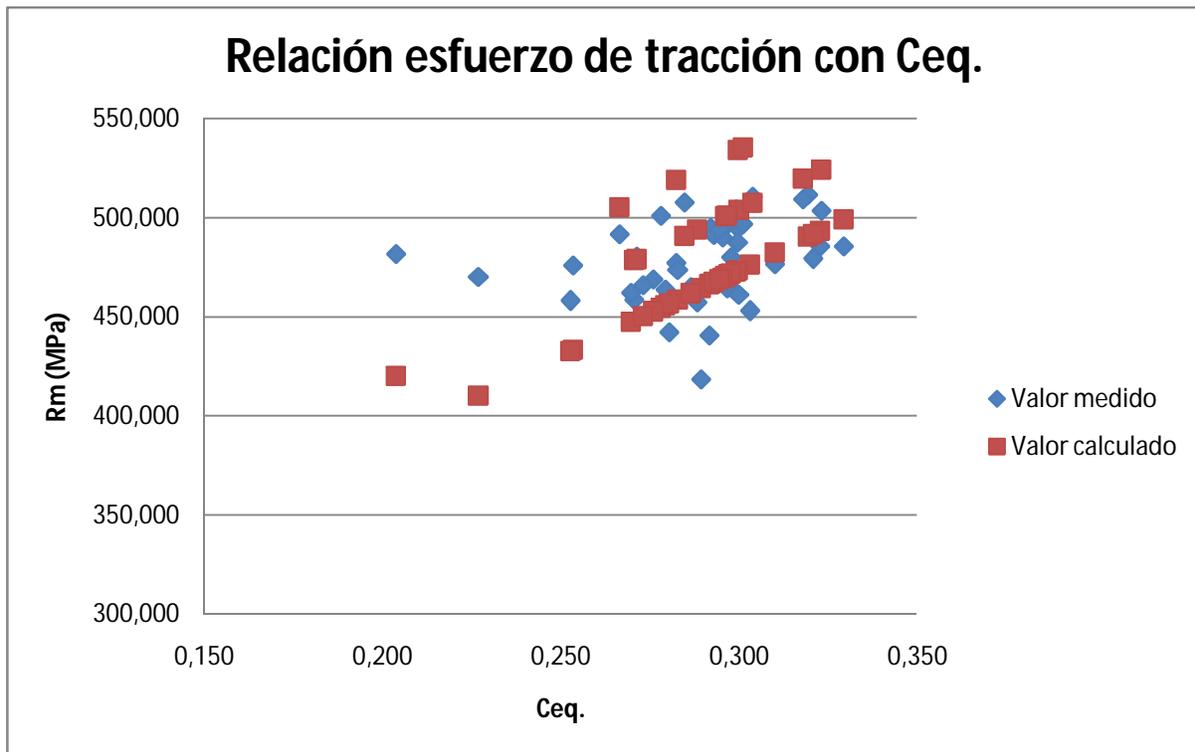


Figura 4.24 Relación entre Rm y Ceq.⁴⁴

⁴⁴ Propia

CAPITULO 5:

5 ANÁLISIS ECONÓMICO

En el presente capítulo se realiza una descripción de los costos para la implementación de micrografías y del espectrómetro de RX. En base a los costos obtenidos se realizará el análisis de la recuperación de la inversión para los procesos implementados.

5.1 COSTOS

5.1.1 MICROGRAFÍAS

5.1.1.1 Costos Directos

Los costos directos son los que influyen directamente en el proceso de análisis micrográfico. Estos costos se dividen en tres tipos:

5.1.1.1.1 Costo de equipos

Los equipos son todos aquellos elementos que se adquirieron y que son necesarios para la preparación de muestras y para el análisis micrográfico de las mismas.

Tabla 5.1 Costos de equipos de micrografía

Item	COSTO	Cantidad
Programa Material Plus 4,2	1950	1
Cámara digital	1100	1
Objetivo 800x	250	1
Microscopio	2950	1
Cortadora	1420	1
Banco de desbaste	350	1
Pulidora	2200	1
Montadora	1985	1
Discos de corte	160	20
Soportes de felpa	24	12
Alumina Alfa	475,2	6,366 lb
Bakelita	450	20LBS
Total	13314,2	

Fuente: Propia

5.1.1.1.2 Costos de mano de obra

El costo de mano de obra se refiere al valor que va a cobrar la persona encargada de la preparación análisis y reporte de las muestras.

Tabla 5.2 Costos de mano de obra

Costo Mano de Obra

Item	Costo	Tiempo	Total
Sueldo	264	12	3168

Fuente: Propia

5.1.1.1.3 Costos de Infraestructura

El costo de infraestructura se refiere a la ampliación que se realizó en el laboratorio de control de calidad con el fin de ubicar todos los equipos de preparación de muestras. Para esto la empresa Novacero utiliza subcontratistas los cuales facturan el valor total de la obra sin el desglose de los ítems utilizados en la construcción.

Tabla 5.3 Costos de infraestructura para la ampliación del laboratorio

Costo De Infraestructura

ITEM	Costo	Cantidad	Total
Ampliación Laboratorio	3000	1	3000

Fuente: Propia

5.1.1.2 Costos Indirectos

Son todos aquellos costos que no son parte del proceso pero que sin embargo se utilizan para llevarlo acabo.

Tabla 5.4 Costos indirectos para los ensayos de micrografía

Costos Indirectos

Agua	20
Electricidad	67,704
Telefono	20
Internet	20
Vehiculo	100
Combustible	600
Alimentación	420
Imprevisto	100
Total	1347,704

Fuente: Propia

Tabla 5.5 Costos totales para ensayos de micrografía

ITEM	Subtotal
Costo de Equipos	13314,2
Costo de mano de obra	3168
Costo de Infraestructura	3000
Costos Indirectos	1347,704
Total	20829,904

Fuente: Propia

5.1.2 ESPECTRÓMETRO DE RX

5.1.2.1 Costos Directos

5.1.2.1.1 Inversión Inicial

En este costo se encuentra el valor del equipo así como el valor del nitrógeno líquido el cual es necesario para que pueda funcionar. También se encuentra el valor de las instalaciones eléctricas necesarias para que el equipo funcione.

Tabla 5.6 Costos de la inversión inicial

Inversión Inicial

ITEM	Costo	Cantidad
Espectrómetro EDX 720	112000	1
Conexiones	100	1
Nitrógeno líquido	22	1
TOTAL	112122	

Fuente: Propia

5.1.2.1.2 Mano de Obra

En el costo de mano de obra se encuentra el sueldo que va a percibir el operador del equipo.

Tabla 5.7 Costos de mano de obra de la operación del EDX 720

Costo Mano de Obra

Item	Costo	Tiempo	Total
Sueldo	600	12	7200

Fuente: Propia

5.1.2.2 Costos Indirectos

Son todos aquellos costos que no son parte del proceso pero que sin embargo se utilizan para llevarlo acabo.

Tabla 5.8 Costos indirectos para los ensayos del espectrómetro EDX 720

Costos Indirectos

Electricidad	67,704
Telefono	20
Internet	20
Vehiculo	100
Combustible	600
Alimentación	420
Imprevisto	100
Total	1327,704

Fuente: Propia

Tabla 5.9 Costo Total para la implementación del espectrómetro de rayos X

ITEM	Subtotal
Inversión Inicial	112122
Costo mano de obra	7200
Costos indirectos	1327,704
Total	120649,704

Fuente: Propia

5.2 RECUPERACIÓN A LA INVERSIÓN

En base a los costos de cada uno de los procesos a implementar se calculará el TIR y el VAN.

La inversión inicial se considera como el costo total de la implementación menos los costos indirectos.

La nomenclatura para las tablas es la siguiente:

- n: Periodo en años
- io: inversión inicial
- bn: beneficio neto del flujo del periodo
- i: tasa de descuento
- fdc: flujo de caja

5.2.1 MICROGRAFÍA

Tabla 5.10 Cálculo de la utilidad neta anual

Total de Muestras Anual	600
Costo anual de las muestras	5624,904
Valor de la muestra	40
Utilidad anual	18375,096

Fuente: Propia

Para el cálculo del VAN se consideró una inflación del 10% y un periodo de 3 años

Tabla 5.11 VAN proyecto de micrografía

Cálculo del VAN				
n	0	1	2	3
io	16314			
bn		18375,096	20212,6056	22233,8662
i	20%	20%	20%	20%
(1+i)n	1	1,2	1,44	1,728
fcd		13595	14036,5317	12866,8207
VAN	24184,3524			

Fuente: Propia

El VAN es mayor a la inversión inicial por lo que el proyecto es viable, la inversión se recuperará aproximadamente en 1 año

Tabla 5.12 TIR proyecto de micrografía

Cálculo del TIR				
n	0	1	2	3
io	16314			
fcd	-16314	13595	14036,5317	12866,8207
TIR	65%			

Fuente: Propia

Como se puede ver la tasa interna de retorno es del 65% y es mayor a la tasa de descuento del 20% asumida por lo que el proyecto es viable

5.2.2 ESPECTRÓMETRO DE RX

Tabla 5.13 Cálculo de la utilidad neta anual

Total de Muestras Anual	1095
Costo Anual de Muestras	10028,104
Valor de Muestra	100
Utilidad Anual	99471,896

Fuente: Propia

Para el cálculo del VAN se consideró una inflación del 10% y un periodo de 3 años

Tabla 5.14 VAN proyecto del espectrómetro de rayos X

Calculo del VAN				
n	0	1	2	3
io	112122			
bn		99471,896	109419,086	120360,994
i	20%	20%	20%	20%
(1+i)n	1	1,2	1,44	1,728
fcd		93435	75985,4761	69653,3531
VAN	126951,829			

Fuente: Propia

El VAN es mayor a la inversión inicial por lo que el proyecto es viable, la inversión se recuperará aproximadamente en 3 años

Tabla 5.15 TIR proyecto del espectrómetro de rayos X

Calculo del TIR				
n	0	1	2	3
io	112122			
fcd	-112122	93435	75985,4761	69653,3531
TIR	54%			

Fuente: Propia

Como se puede ver la tasa interna de retorno es del 54% y es mayor a la tasa de descuento del 20% asumida por lo que el proyecto es viable

CAPITULO 6:

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- La VC 32 cuenta con un grano más grande que las varillas de 10 y 16mm de diámetro, sus índices ASTM para tamaño de grano son 5.15, 5.35 y 5.6 respectivamente. Esto se debe a que la varilla de 32 tiene sección mayor que las otras dos por lo que tarda más tiempo en enfriarse permitiendo así que el grano crezca.
- Existen casos en el muestreo en el que se presentan ligeras variaciones en los límites de tracción y de fluencia al tener el mismo número de tamaño de grano y carbonos equivalentes similares. Esto se debería a elementos como el cromo, azufre y fósforo que se encuentran presente en el acero pero no se lo considera para el cálculo del carbono equivalente.
- Utilizando el análisis de micrografía implementado en la planta se realizó el control del número de inclusiones promedio presentes en la palanquilla de acero. En base a los resultados obtenidos se decidió realizar cambios en el tamaño del tundish. El resultado de este cambio fue la disminución del número de inclusiones en la palanquilla de acero.
- En base al estudio de tamaño de grano realizado la empresa decidió mantener un control sobre la temperatura de calentamiento de palanquilla con el fin de disminuir el tamaño de grano y mejorar las características mecánicas, especialmente en varillas con diámetros altos.
- Las ecuaciones obtenidas para la relación entre tamaño de grano, carbono equivalente fluencia y tracción servirán como herramienta de comprobación de la calidad del producto en caso de que una de las variables se encuentre fuera de los límites de control permisibles.
- La relación obtenida entre tamaño de grano, carbono equivalente, fluencia y tracción, ayudará a la empresa identificar los parámetros que pueden estar

fallando en su proceso de laminado, con el fin de mejorar el control de calidad de los productos terminados.

6.2 RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio variando las condiciones de calentamiento de la palanquilla previa la laminación, para encontrar el nivel óptimo de calentamiento y ver como se afecta su micro estructura para diferentes diámetros de varilla.
- Validar las ecuaciones obtenidas para la relación entre carbono equivalente, tamaño de grano fluencia y tracción, con el fin de determinar si son aplicables a todos los productos de Novacero y a los rangos de carbono equivalente correspondientes.
- Determinar cuáles son los elementos de aleación que más afectan a las propiedades mecánicas del producto, variando el contenido de los mismos en la palanquilla de acero. Esto con el fin de mantener un control sobre ellos para obtener un producto de alta calidad.
- Realizar un estudio comparativo de tamaño de grano y composición química con empresas que utilicen el mismo proceso de fabricación de Novacero, con el fin de determinar si los índices de tamaño de grano son similares.
- Mediante un estudio posterior se podría obtener las variables del proceso de laminado que afectan mayoritariamente al tamaño de grano, con el fin de controlarlas y obtener mejores propiedades mecánicas en el producto terminado.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Alting, Leo. *Ingeniería de Manufactura*. Mexico D.F: Alfa Omega, 1990.
- Arcila, Luisa Fernanda. *Diagrama Hierro Carbono*. 10 27, 2010. <http://blog.utp.edi.co/metalografía/2010/10/27/5-5diagrama-hierro-carbono-puntos-criticos-y-ejemplos-de-regla-de-la-palanca/> (accessed 10 18, 2011).
- ASKELAND, Donald. *La Ciencia e ingeniería de los materiales*. México D.F: Grupo Editorial Iberoamérica, 1987.
- *Ingeniería Industrial, Problemas, Preguntas y Respuestas*. 9 30, 2009. http://tecnologiasselectividad.blogspot.com/2009_09_01_archive.html (accessed 4 10, 2011).
- CAPELLO, Edoardo. *Tecnología de la fundición*. Barcelona: Gustavo Gili, 1974.
- ECHEVERRIA, Ricardo. *Defectología*. Universidad Nacional de Comahue, Facultad de Ingeniería - Laboratorio de Ensayos no Destructivos, Tomada de: http://fain.uncoma.edu.ar/materias/ensayos_no_destructivos/Catedra_END/3-Defectologia/Defectologia.pdf , 2002.
- Ernesto, Milleiro. *Scribd.com*. 3 12, 2010. <http://www.scribd.com/doc/2252086/Tabla-de-Acero> (accessed 1 10, 2011).
- ESPINOSA, Constantino. *EVOLUCION DE LAS INCLUSIONES NO METALICAS EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL ACERO*. Buenos Aires: FACULTAD DE INGENIERIA - UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES, Tomada de: www.fudetec.com.ar/preprint/Tesis%20Espinosa.pdf, 2005.
- Martinez, Lorenzo. *Aceros.*, http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/080/htm/sec_6.htm (accessed 4 10, 2011).
- SMITH, William, and Javad HASHEMI. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México D.F: McGraw - Hill Interamericana, 2004.
- Timings, R.L. *tecnología de la fabricación*. New York: Longman inc, 1985.

- Vort, George. F Vander. "Garin size Measurement." *Measurement of Grain size*. Lake Bluff: Bueheler Ltda, 2005. 92.
- YUASTEPANOV, Nditov. *Tecnología del proceso de fundición*. Moscu: Mir, 1981.

8 GLOSARIO

- *Fundentes*: sustancias minerales que se añaden para disminuir la temperatura de fusión de la escoria.
- *Refractarios*: Los materiales refractarios son aquellos que soportan altas temperaturas sin ablandarse excesivamente ni romperse.
- *Basicidad*: Propiedad de una sustancia química para comportarse como base.
- *Rodillos tándem*: serie de rodillos o casetas de laminación.
- *Alotrópico*: Elementos con una misma composición química pero de diferente forma.
- *Dendrita*: Prolongaciones ramificadas muy cortas.
- *Inclusiones*: Sustancia atrapada dentro del acero.
- *Perlita*: microestructura del acero formada por capas de cementita y hierro α .
- *Ferrita*: Estructura molecular del acero con distribución BCC.