

**CORRELACIÓN IMPACTO – FATIGA: OPTIMIZACIÓN DE CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MATERIALES PARA VARILLAS DE POZO.**

**ALBAN JAIMES SUÁREZ**  
**Ingeniero Metalúrgico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA METALÚRGICA**  
**BUCARAMANGA**  
**2005.**

**CORRELACIÓN IMPACTO – FATIGA: OPTIMIZACIÓN DE CRITERIOS DE  
SELECCIÓN DE MATERIALES PARA VARILLAS DE POZO**

**ALBAN JAIMES SUÁREZ**  
Ingeniero Metalúrgico

**Trabajo de investigación desarrollado como requisito para optar al título de  
Magíster en Ingeniería Metalúrgica**

**DIRECTOR**  
**IVAN URIBE PÉREZ**  
Ingeniero Metalúrgico, MSc

**CODIRECTOR**  
**ALEXANDER MARTÍNEZ RAMÍREZ**  
Ingeniero Mecánico, MSc.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA METALÚRGICA**  
**BUCARAMANGA**  
**2005.**

## DEDICATORIA

*Dedico este importante triunfo a:*

*Mis padres Rozo Emilio Jaimes y Rosalba Suárez, por su apoyo y afecto, además por enseñarme la importancia de cumplir con nuestros compromisos.*

*A mis hermanos Henry y William, y familiares por todo.*

*A mis amigos por el apoyo ofrecido en todo momento*

*A Dios nuestro ser orientador y redentor.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ingeniero Alexander Martínez por el gran apoyo, por sus valiosos aportes suministrados durante el desarrollo de esta investigación, y principalmente por el crecimiento profesional suscitada mediante las discusiones y diferencias de criterios suscitadas al inicio y al final de este trabajo.

Al Ingeniero Rafael Gómez Bayona, por sus contribuciones técnico – científicas y confianza depositada.

Al Ingeniero Ivan Uribe, por su apoyo científico durante el trabajo.

Al Ingeniero Aníbal Serna, por su apoyo científico y humano en el desarrollo de esta investigación.

A los Ingenieros José Martín Lizcano y Alexander Pérez, por el apoyo técnico brindado en cada una de las etapas de este importante proyecto de investigación, además por la amistad ofrecida y el espíritu de trabajo en equipo con el que pude contar.

Al Ing. Carlos Javier Mateus, por su apoyo para con esta investigación, amistad y confianza ofrecida.

A la Ingeniera Maria Teresa Suárez por su colaboración y amistad

Al Ingeniero Julio Cesar Pérez.

A Julio Forero y Nestor Muegues por su colaboración y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos

A todas aquellas personas que de una u otra forma participaron y colaboraron para el desarrollo de esta muy importante investigación.

A todo el equipo de trabajo del laboratorio de Materiales, Gracias.

## RESUMEN

TITULO CORRELACIÓN IMPACTO – FATIGA: OPTIMIZACIÓN DE CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MATERIALES PARA VARILLAS DE POZO.\*

AUTOR JAIMES SUAREZ, Alban

PALABRAS CLAVES: Fatiga de larga duración, tenacidad, bonificado, tratamientos térmicos, propiedades mecánicas.

En los sistemas de bombeo mecánico, las varillas de succión se encuentran bajo la acción de esfuerzos cíclicos en tensión, lo cual genera fallas por fatiga. Durante la manipulación y operación de las varillas se generan defectos superficiales los cuales favorecen la iniciación de grietas de fatiga, reduciendo significativamente la vida de la varilla. Debido a la alta frecuencia de este tipo de falla, los altos costos involucrados y a la escasa información relacionada con el desempeño en fatiga, se realizaron pruebas de laboratorio con el fin de obtener criterios adicionales para optimizar la selección y diseño de las varillas.

En varillas de alta resistencia mecánica, seleccionadas al azar, se realizaron pruebas para determinar las curvas de fatiga sin y con defectos inducidos superficialmente, estos ensayos fueron realizados a las varillas en condición de suministro y con la aplicación de un tratamiento térmico de temple y revenido.

Los resultados permiten verificar diferencias de comportamiento entre las varillas evaluadas, se evaluó el efecto negativo de los defectos superficiales, las utilidades del ensayo de impacto y tensión con entalla para la selección de materiales para varillas de pozo, y el beneficio obtenido en el aumento en el límite de fatiga generado por la aplicación de un tratamiento de temple y revenido.

El conocimiento generado a través de este estudio le sirve al Ingeniero encargado de los pozos como herramienta para la optimización de los criterios de selección de algunas de las varillas presentes en el mercado y para establecer factores de diseño que consideren la presencia de defectos superficiales durante la operación.

\* Trabajo de investigación

\*\* Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Maestría en Ingeniería Metalúrgica, PhD Darío Yesid Peña.



## LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Distribución de sistemas de producción de crudo.	11
<b>Figura 2.</b> Sistema bombeo mecánico.	12
<b>Figura 3.</b> Falla típica de fatiga.	14
<b>Figura 4.</b> Curva S - N.	19
<b>Figura 5.</b> Efecto de la relación del rango de esfuerzos aplicados sobre el límite de fatiga.	24
<b>Figura 6.</b> Efecto del esfuerzo medio sobre el límite de fatiga.	24
<b>Figura 7.</b> Efecto de los concentradores de esfuerzos sobre el límite de fatiga.	25
<b>Figura 8.</b> Corrosión por CO <sub>2</sub>	28
<b>Figura 9.</b> Efecto de la microestructura sobre la resistencia a la propagación de grietas para aceros API N 80 4140 y 4340.	31
<b>Figura 10.</b> Diagrama de Goodman modificado.	36
<b>Figura 11.</b> Máquina electrohidráulica para ensayos de tensión y fatiga.	41
<b>Figura 12.</b> Durómetro para realizar ensayos de dureza Brinell y Vickers.	42
<b>Figura 13.</b> Equipo para realizar mediciones de microdureza Vickers.	42
<b>Figura 14.</b> Espectrómetro de emisión óptica.	43
<b>Figura 15.</b> Péndulo Charpy para el ensayo de energía de impacto sobre probetas con entalla.	43
<b>Figura 16.</b> Equipo neumático de perforación.	44
<b>Figura 17.</b> Microscopio óptica marca REICHERT – JUNG	44

<b>Figura 18.</b> Muestra acero 4330M.	46
<b>Figura 19.</b> Muestra acero 4330M normalizado y revenido.	46
<b>Figura 20.</b> Representación esquemática para medir el parámetro $\lambda$	48
<b>Figura 21.</b> Metodología para la determinación correlación impacto – fatiga.	51
<b>Figura 22.</b> Metalografía varilla F1-M1 condición normalizado y revenido según información del fabricante.	55
<b>Figura 23.</b> Curvas de microdurezas a diferentes tratamientos térmicos.	57
<b>Figura 24.</b> Metalografía varilla F2-M2 normalizado y revenido.	58
<b>Figura 25.</b> Metalografía varilla F3-M3 normalizado y revenido.	58
<b>Figura 26.</b> Curvas de durezas muestras F3-M3 a diferentes tratamientos térmicos.	60
<b>Figura 27.</b> Metalografía varilla F1-M4 normalizado y revenido	60
<b>Figura 28.</b> Microestructura por SEM de muestra F1-M1.	61
<b>Figura 29.</b> Microestructura por SEM de muestra F2-M2.	62
<b>Figura 30.</b> Microestructura por SEM de muestra F3-M3	62
<b>Figura 31.</b> Microestructura por SEM de muestra F3-M3	63
<b>Figura 32.</b> Microestructura por SEM de muestra F1-M4.	63
<b>Figura 33.</b> Tamaño de grano ferrítico.	64
<b>Figura 34.</b> Espectro composición química muestra F1-M1.	66
<b>Figura 35.</b> Espectro composición química muestra F1-M1.	67
<b>Figura 36.</b> Espectro composición química muestra F2-M2.	67
<b>Figura 37.</b> Espectro composición química muestra F3-M3.	67
<b>Figura 38.</b> Curva U muestra F1-M1.	72
<b>Figura 39.</b> Curva U muestra F2-M2.	72

<b>Figura 40.</b> Curva U muestra F3-M3.	73
<b>Figura 41.</b> Curva U muestra F1-M4.	73
<b>Figura 42.</b> Superficies de fractura para la muestra F1-M1.	76
<b>Figura 43.</b> Superficies de fractura para la muestra F2-M2.	77
<b>Figura 44.</b> Superficies de fractura para la muestra F3-M3.	78
<b>Figura 45.</b> Superficies de fractura para la muestra F1-M4.	79
<b>Figura 46.</b> Diagrama esquemático del muestreo de probetas para análisis de inclusiones.	81
<b>Figura 47.</b> Superficies de fractura de las muestras evaluadas en tenacidad al impacto atacadas con nital F1-M1.	82
<b>Figura 48.</b> Superficie de fractura tomada de la muestra F1-M1 en la sección longitudinal a la dirección de propagación de la grietas.	83
<b>Figura 49.</b> Superficie de fractura tomada de la muestra F1-M1 en la sección transversal a la dirección de propagación de la grietas.	84
<b>Figura 50.</b> Superficies de fractura de las muestras evaluadas en tenacidad al impacto atacadas con nital F2-M2.	85
<b>Figura 51.</b> Superficie de fractura tomada de la muestra F2-M2 en la sección longitudinal a la dirección de propagación de la grietas.	86
<b>Figura 52.</b> Superficie de fractura tomada de la muestra F2-M2 en la sección transversal a la dirección de propagación de la grietas.	86
<b>Figura 53.</b> Superficies de fractura tomada de la muestra F3-M3 en la sección transversal a la dirección de propagación de la grietas.	87
<b>Figura 54.</b> Superficies de fractura tomada de la muestra F3-M3 en la sección longitudinal a la dirección de propagación de la grietas.	87
<b>Figura 55.</b> Superficies de fractura tomada de la muestra F3-M3 en la sección transversal a la dirección de propagación de la grietas.	88
<b>Figura 56.</b> Probeta utilizada para realizar los ensayos de fatiga.	89
<b>Figura 57.</b> Micrografía del defecto superficial.	90

<b>Figura 58.</b> Curvas de fatiga sin defectos.	93
<b>Figura 59.</b> Curvas de fatiga con defectos.	93
<b>Figura 60.</b> Metodología de análisis de las superficies de fractura por fatiga	94
<b>Figura 61.</b> Superficie de fractura F2-M2 ( <b>440 MPa, 32239 ciclos</b> )	97
<b>Figura 62.</b> Superficie de fractura muestra F2-M2 ( <b>412.5 MPa, 156647 ciclos</b> ).	95
<b>Figura 63.</b> Superficie de fractura muestra F2-M2 ( <b>400 MPa, 149457 ciclos</b> ).	95
<b>Figura 64.</b> Superficie de fractura muestra F3-M3 ( <b>399.91 MPa, 76388 ciclos</b> ).	96
<b>Figura 65.</b> Superficie de fractura muestra F3-M3 ( <b>372.33 MPa, 223396 ciclos</b> ).	96
<b>Figura 66.</b> Superficie de fractura muestra F3-M3 ( <b>372.33 MPa, 159000 ciclos</b> ).	97
<b>Figura 67.</b> Micrografía muestra F2-M2.3.	97
<b>Figura 68.</b> Micrografía muestra F2-M2.3.	98
<b>Figura 69.</b> Micrografía muestra F2-M2.3.	98
<b>Figura 70.</b> Micrografía muestra F2-M2.4 tomada a 500 micras de la zona de inicio	99
<b>Figura 71.</b> Micrografía muestra F2-M2.4 ( <b><math>s_a = 400</math> MPa (<b>58.01 ksi</b>); <b>149457 ciclos</b>).</b>	99
<b>Figura 72.</b> Micrografía muestra F2-M2.9 tomada a 680 micras de la zona de inicio.	100
<b>Figura 73.</b> Micrografía muestra F2-M2.9 tomada en la zona de fractura final	100
<b>Figura 74.</b> Micrografía muestra <b>4.2</b> tomada a 500 micras de la zona de inicio	101

<b>Figura 75.</b> Micrografía muestra F3-M3.2 tomada en la zona de fractura final	101
<b>Figura 76.</b> Micrografía muestra F3-M3.5 tomada a 500 micras de la zona de inicio.	102
<b>Figura 77.</b> Micrografía muestra F3-M3.5 tomada en la zona de fractura final	102
<b>Figura 78.</b> Micrografía muestra F3-M3.8 tomada a 500 micras de la zona de inicio	103
<b>Figura 79.</b> Micrografía muestra F3-M3.8 tomada a 500 micras de la zona de inicio	103
<b>Figura 80.</b> Micrografía muestra F3-M3.8 tomada a 500 micras de la zona de inicio.	104
<b>Figura 81.</b> Micrografía muestra F3-M3.8 tomada en la zona de fractura final.	104
<b>Figura 82.</b> Límites de estabilidad de los aceros evaluados.	107
<b>Figura 83.</b> Porcentaje de aluminio en las muestras evaluadas.	108
<b>Figura 84.</b> Inicio de agrietamiento en una inclusión.	110
<b>Figura 85.</b> Distribución de tamaños de grano de la austenita.	111
<b>Figura 86.</b> Tamaños de grano ferrítico.	112
<b>Figura 87.</b> Resistencia mecánica en función del tamaño de grano de la austenita madre.	113
<b>Figura 88.</b> Relaciones entre propiedades mecánicas, tamaño de grano de austenita, y esfuerzo máximo	114
<b>Figura 89.</b> Curvas de fatiga con defectos, comparación de tratamientos térmicos	115
<b>Figura 90.</b> Curva de fatiga para F2-M2 con tratamiento térmico sin defectos	120
<b>Figura 91.</b> Curva de fatiga para F2-M2 con tratamiento térmico con defectos	121
<b>Figura 92.</b> Curva de fatiga sin defectos muestra F3-M3 tratadas térmicamente	121

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Número de probetas para un 95% de confiabilidad	19
<b>Tabla 2.</b> Vida a la fatiga de probetas de acero AISI 3130 ensayadas bajo esfuerzos completamente invertidos a 655 MPa	25
<b>Tabla 3.</b> Influencia de las inclusiones sobre el límite de fatiga de un acero 4340.	28
<b>Tabla 4.</b> Tratamientos térmicos típicos realizados a las varillas de succión.	31
<b>Tabla 5.</b> Matriz de experimentos.	51
<b>Tabla 6.</b> Composición química varillas.	52
<b>Tabla 7.</b> Secuencia de tratamientos térmicos realizados para F1-M1.	54
<b>Tabla 8.</b> Secuencia de tratamientos térmicos realizados para F2-M2.	57
<b>Tabla 9.</b> Inclusiones, tipo y forma.	63
<b>Tabla 10.</b> Barridos de composición química elemental.	67
<b>Tabla 11.</b> Tamaño de grano austenítico anterior.	68
<b>Tabla 12.</b> Dureza Brinell para las muestras evaluadas.	69
<b>Tabla 13.</b> Resultados propiedades mecánicas.	72
<b>Tabla 14.</b> Ensayos de tensión con entalla.	73
<b>Tabla 15.</b> Resultados obtenidos de tenacidad al impacto.	73
<b>Tabla 16.</b> Valores de tenacidad a la fractura.	78
<b>Tabla 17.</b> Ecuaciones de fatiga.	90
<b>Tabla 18.</b> Tratamientos térmicos realizados.	92
<b>Tabla 19.</b> Ensayo de tensión a la condición de templado desde 860°C durante una hora y revenido.	93
<b>Tabla 20.</b> Resultados propiedades mecánicas (ensayo de tensión).	93
<b>Tabla 21.</b> Resultados propiedades mecánicas (ensayo de tensión con entalla).	94
<b>Tabla 22.</b> Resultados obtenidos de tenacidad al impacto.	94
<b>Tabla 23.</b> Ecuaciones de fatiga.	94
<b>Tabla 24.</b> Mecanismos de falla observados. .	108
<b>Tabla 25.</b> Mecanismos de falla observados.	109
<b>Tabla 26.</b> Análisis de la composición química.	113
<b>Tabla 27.</b> Factores de entalla en fatiga.	120
<b>Tabla 28.</b> Relación entre variables estudiadas para familia 4330M.	121
<b>Tabla 29.</b> Resumen de variables.	123
<b>Tabla 30.</b> Relación entre variables estudiadas para familia 4138M.	124
<b>Tabla 31.</b> Relación entre variables estudiadas para familia 4138M.	127
<b>Tabla 32.</b> Relación entre las variables estudiadas sin y con tratamiento térmico	128

## CONTENIDOS

	pag
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO</b>	2
<b>3. ALCANCES</b>	3
<b>4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	4
<b>5. HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	6
<b>6. OBJETIVO GENERAL</b>	7
6.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS	7
<b>7. ANTECEDENTES</b>	8
<b>8. MARCO TEÓRICO</b>	11
8.1 El fenómeno de fatiga presente en la explotación de los pozos petrolíferos.	11
8.2 Fatiga de materiales	13
8.3 Curvas de fatiga	18
8.3.1 Funciones alternativas para caracterizar las curvas de fatiga	21
8.3.1.1 Funciones del tipo Basquín	21
8.3.1.2 Función propuesta para la región de bajos y altos ciclos	22
8.3.1.3 Función exponencial de esfuerzo para la predicción de la resistencia y la vida en fatiga debida al esfuerzo medio	22
8.4 Factores que afectan la vida a la fatiga	23
8.4.1 Efecto del esfuerzo medio sobre la fatiga	23
8.4.2 Efecto de los concentradores	25

8.4.3	Efecto de la rugosidad superficial	26
8.4.4	Efecto del ambiente	27
8.4.5	Efecto de los esfuerzos residuales superficiales	27
8.4.6	Efecto del tamaño del componente	28
8.4.7	Efecto del nivel de inclusiones	29
8.4.8	Efecto del tamaño de grano y la dirección del grano	30
8.4.9	Efecto de la microestructura	31
8.4.10	Efecto de los componentes individuales en la aleación de la varilla de bombeo	32
8.5	Materiales utilizados en la fabricación de varillas de succión	33
8.6	Tratamientos térmicos de aceros de alta resistencia mecánica	33
8.7	Tenacidad de los materiales	35
8.8	Diagrama de Goodman modificado	36
<b>9.</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>37</b>
<b>10.</b>	<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	<b>40</b>
10.1	Descripción de equipos utilizados e identificación del material	41
10.2	Discernimiento para determinar la interacción entre comportamiento en fatiga y el nivel de energía absorbida en un material	46
10.3	Matriz de experimentos	50
10.4	Caracterización química	53
10.5	Caracterización metalográfica fase I	54
10.5.1	Evaluación por SEM de las metalografías en condición de Normalizado y revenido Fase I	61

10.5.2	Determinación del tamaño de grano ferrítico	63
10.5.3	Análisis de inclusiones de los materiales recibidos en condiciones de normalizado y revenido.	64
10.5.4	Identificación por SEM de la composición elemental de las inclusiones presentes en las muestras recibidas	66
10.5.5	Determinación del tamaño de grano austenítico anterior	69
10.6	Caracterización mecánica fase I	71
10.6.1	Niveles de dureza	71
10.6.2	Curvas U	71
10.6.3	Ensayos de tensión	73
10.6.4	Ensayos de energía de impacto	75
10.6.4.1	Superficies de fractura de las muestras evaluadas en tenacidad al impacto	75
10.6.4.2	Cálculo de la tenacidad a la fractura utilizando la expresión de Ault – Wald – Bertolo	80
10.6.4.3	Metalografías de probetas falladas en el ensayo de energía de impacto	81
10.6.5	Evaluación del comportamiento en fatiga	89
10.6.5.1	Análisis estadístico de los resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para las muestras evaluadas	91
10.6.5.2	Superficies de fractura para la determinación del área de propagación en fatiga evaluados por SEM	94
<b>11.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>107</b>
11.1	Efecto de la composición química	107
11.2	Efecto del nivel de inclusiones	110
11.3	Efecto de la microestructura	111
11.3.1	Tamaño de grano austenita inicial	111

11.3.2	Tamaño de grano ferrítico	112
11.3.3	Efecto de las propiedades mecánicas	113
11.3.4	Efecto de la tenacidad	115
11.3.5	Efecto de los concentradores de esfuerzos	116
11.4	Desarrollo de tratamientos térmicos	117
11.5	Evaluación mecánica fase II	119
<b>12.</b>	<b>FORMULACIÓN DEL MODELO DE CORRELACIÓN</b>	<b>122</b>
12.1	Correlación entre límite de fatiga, resistencia a la entalla, tenacidad al impacto, y relación de esfuerzos en el ensayo de tensión	132
<b>13.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>134</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>136</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

La fatiga de materiales a lo largo de la evolución de la industria se ha constituido como un modo de falla con alta frecuencia de ocurrencia. En la industria de producción de crudo, principalmente en el sistema de bombeo mecánico, la fatiga de los materiales de las varillas de succión es uno de los principales modos de falla.

En cuanto al diseño y selección de materiales para los sistemas de bombeo mecánico, esto se fundamenta en las especificaciones que establece la norma API 11 B, dicha norma ubica como criterios de selección las propiedades mecánicas, y la composición química principalmente, además, dependiendo de los niveles de esfuerzo de fluencia, y esfuerzo último clasifica en varios grados (K, C, D) las varillas. Los fabricantes desarrollan sus productos atendiendo los requerimientos de las varillas, es decir, diseñan sus procesos de fabricación con el objetivo de cumplir con las especificaciones API. Desde el punto de vista conceptual la fatiga es un fenómeno que es una función del tipo de microestructura obtenido al final de cada una de las etapas desarrolladas durante el proceso de fabricación, y el tipo de microestructura determina el nivel de tenacidad al impacto.

En la presente investigación se plantea determinar una correlación entre la tenacidad al impacto y el comportamiento en fatiga de los materiales para varillas de succión, en este estudio se tomaron muestras de algunos fabricantes de varillas de succión para sistemas de bombeo mecánico. Como etapas en el desarrollo de la investigación se realizó: Primero, una caracterización de tipo químico, mecánico, y metalúrgico de materiales en condiciones de tratamiento térmico de normalizado y revenido según información suministrada por el fabricante, posteriormente se desarrollaron ensayos de tenacidad al impacto y fatiga (sin y con defectos inducidos). Segundo, se realizaron similares caracterizaciones a los materiales de las varillas, pero con una microestructura obtenida a partir de un tratamiento térmico de temple y revenido. Finalmente, se formuló el modelo de correlación entre las variables objeto de estudio.

A partir de las conclusiones y resultados obtenidos en esta investigación se determinaron criterios adicionales de selección y diseño de materiales para varillas de succión.

## 2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La industria del petróleo en Colombia, cuenta actualmente con mas de 2000 pozos productores de petróleo con sistemas de levantamiento por bombeo mecánico. El promedio de fallas por varilla corresponde a un 0.5 fallas por año por pozo, el hecho de disminuir esta frecuencia de fallas en un decimal puede representar un ahorro de US \$150000 por año, representados en disminución de producción por fallas repentinas de las varillas de succión y trabajos de mantenimiento de subsuelo (varilleo).

La mayoría de las fallas presentadas en las varillas de pozo son ocasionadas por fatiga, debido a los ciclos alternados de esfuerzos aplicados en la operación de succión del crudo. La práctica recomendada API 11BR ofrece los diagramas de Goodman modificados para varillas tipo C y K, en varillas de alta resistencia mecánica cada fabricante tiene sus propias ecuaciones que describen el diagrama de Goodman modificado, este diagrama sirve para determinar los rangos seguros de esfuerzos de trabajo en los cuales cada varilla puede funcionar. Actualmente no existe ningún tipo de información técnica que correlacione la resistencia a la fatiga con un parámetro de tenacidad en el material utilizado en la fabricación de las varillas de pozo de alta resistencia mecánica, debido a esto se hace necesario determinar una posible correlación entre la resistencia a la fatiga y la tenacidad del material, con el fin de establecer un criterio adicional de selección del material de las varillas.

Tomando como referencia la tubería de perforación, la cual es fabricada con materiales similares a los utilizados en las varillas, por norma API 5D exige un valor mínimo de tenacidad de 40 lb-pie y se suministran con un tratamiento de temple y revenido.

Además se considera que mediante la realización de un tratamiento térmico de temple y revenido a las varillas utilizadas en los campos de producción de petróleo se aumentará la tenacidad del material mediante un cambio en la microestructura obtenida mediante tratamientos térmicos de normalizado y revenido (condición de suministro) a tratamientos de temple y revenido, donde finalmente se obtiene un material con un mejor desempeño a la fatiga.

Con esta investigación se buscó entonces correlacionar la resistencia al impacto y la resistencia a la fatiga de materiales representativos, que actualmente se utilizan en los pozos productores de petróleo en Colombia, y mediante la realización de un tratamiento térmico, aumentar el desempeño a la fatiga de estos materiales, para establecer criterios adicionales de selección de materiales para las varillas de succión.

### **3. ALCANCES**

Con la realización de este proyecto de investigación:

Mediante la realización de un tratamiento térmico de temple y revenido se determinaron cambios de tipo microestructural y la influencia en cuanto a propiedades mecánicas que se generaron, especialmente se analizó el efecto del tratamiento térmico sobre la resistencia al impacto y a la fatiga de estos materiales.

Se estableció un criterio para seleccionar estos materiales basados en un parámetro de energía absorbida de impacto que corresponda con un excelente desempeño a la fatiga.

#### 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia actualmente cuenta con mas de 2000 pozos activos para producción de petróleo con sistemas de levantamiento por bombeo mecánico, en promedio presentan una frecuencia de falla igual a 0.5 fallas por año por pozo, cifra que genera perdidas económicas representadas por disminución en la producción por estas fallas repentinas y por el costo de los trabajos de mantenimiento en el subsuelo (varilleo).

El estado de esfuerzos representado en este sistema es regulado por la acción de ciclos de esfuerzos de tensión alternados de determinada amplitud, en bombeo mecánico se tienen dos operaciones básicas: La carrera descendente del sistema de varillas en la que cada varilla soporta su peso y el de las varillas unidas a ella, y en la carrera ascendente cada varilla soporta su peso, el de las varillas unidas a ella y el peso de la columna de crudo que se esta extrayendo, lo anterior implica un estado de esfuerzos de tipo alternante, en el que se presenta un esfuerzo máximo dado en la operación ascendente del sistema y un esfuerzo mínimo en la operación descendente, fenómeno mecánico llamado fatiga en tensión - tensión. La aplicación de estos ciclos de esfuerzos lleva a fallas por fatiga en los materiales de las varillas de succión, los fabricantes no suministran datos de ensayos de fatiga de estos materiales haciendo mas difícil el conocimiento del desempeño a la fatiga de estos materiales, la norma API 11B establece que los materiales que constituyen las varillas de succión deben soportar como mínimo 10 millones de ciclos de esfuerzos alternados presentes en las cargas generadas en las carreras descendente – ascendente antes de llegar a la falla, en servicio se han presentado valores de falla entre 2 y 3 millones de ciclos de aplicación de los esfuerzos, las causas de estas fallas se han debido a la acción de los esfuerzos aplicados en combinación con el CO<sub>2</sub> presente en los pozos llevando a la formación de picaduras con productos de corrosión como la siderita, iniciación de la grieta en los sitios de picado, propagación y falla del componente, además de los bajos valores que han presentado este tipo de aceros en el ensayo de energía de impacto, medido por el ensayo Charpy.

A nivel internacional la falla de las varillas de succión por fatiga, se han estudiado. En el año de 1990, Estados Unidos tenia en producción aproximadamente 420.000 pozos con levantamiento mecánico, en los que dos terceras partes de estos pozos han experimentado una falla por año, generando de dos a tres días de paradas en la producción y costos en promedio de US \$ 2500 por pozo, y US \$ 780 millones de perdidas totales por año.

Un material con una buena resistencia al impacto podría presentar un muy buen comportamiento a la fatiga, ya que si una grieta de fatiga es formada, la velocidad de crecimiento y avance sería lenta y aumentaría así la vida de estos materiales.

En materiales con buena tenacidad, la etapa de iniciación de las grietas es determinada por la composición química, microestructura, tenacidad, y tenacidad a la fractura entre otros factores influyentes. Los defectos de tipo superficial o subsuperficial, tales como: rugosidades, rectificado abusivo, estrías de maquinado, picaduras, funcionan como concentradores de esfuerzos, induciendo esfuerzos locales de altos valores en puntos críticos del componente, reduciendo el término de vida útil global a la fatiga.

Por esto, mediante la aplicación del tratamiento térmico de temple y revenido se aumentó la tenacidad al impacto (teniendo como referencia las mismas propiedades mecánicas iniciales del material en condición de suministro), induciendo un mejor comportamiento en las etapas de iniciación, crecimiento, y avance de la grieta, medidos por la ley de París.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado es posible una correlación entre la energía absorbida en impacto y la resistencia a la fatiga de estos materiales, además mediante la realización de un tratamiento térmico se podría aumentar la tenacidad de las varillas de succión, trayendo como consecuencia un aumento en el desempeño a la fatiga de estas aleaciones.

## 5. HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

- En materiales de varillas de pozo con composición química y propiedades mecánicas similares, los materiales con valores mas altos de energía de impacto CVN, tenacidad a la fractura, presentarán mayores valores de resistencia a la fatiga y mayor vida en servicio de los componentes.
- Un acero de media aleación, típico de las varillas de pozo, con un tratamiento térmico de temple y revenido presentará una mayor tenacidad al impacto y por ende a la fatiga, que el mismo material con un tratamiento de normalizado y revenido.

## **6. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una correlación entre el comportamiento en fatiga y la tenacidad al impacto de los materiales utilizados para las varillas de succión de alta resistencia mecánica empleadas en el sistema de bombeo mecánico para la producción de petróleo.

### **6.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Establecer la mejor condición del tratamiento térmico para obtener una alta tenacidad al impacto manteniendo las propiedades mecánicas similares en la condición de suministro y el tratamiento térmico propuesto. .
- Determinar las curvas de fatiga de los materiales en condiciones microestructurales de suministro y con tratamiento térmico de temple mas revenido con y sin defectos superficiales, con el fin de simular el comportamiento en fatiga de las varillas de alta resistencia mecánica.
- Formular un modelo matemático que permita evaluar el efecto de la tenacidad al impacto sobre el comportamiento a la fatiga en los materiales evaluados.

## 7. ANTECEDENTES

Waggoner y Buchheit <sup>1</sup> analizaron el desempeño y las fallas en servicio de varillas de succión usadas en las operaciones de bombeo mecánico mediante análisis por elementos finitos, y análisis metalográfico. Los análisis metalográficos en este estudio demostraron que la microestructura de los aceros de las varillas debe ser considerada para mejorar la resistencia a la fatiga de las varillas de succión.

Hendricks y Rusell <sup>2</sup>, hicieron un análisis para identificar en un pozo la causa raíz de la falla, para con esto administrar el costo efectivo por falla y buscar disminuir este tipo de fallas, realizaron un énfasis específico a los materiales de las varillas de succión. Tomaron como referencia a la necesidad de implementar una base de datos que registre un histórico de fallas para determinar tendencias de falla, y generar las respectivas acciones correctivas, esta base de datos debe contener información como: tipo de falla, ubicación, profundidad de la falla, causa raíz.

Moore<sup>3</sup> presentó ejemplos comunes de fallas presentadas en varillas de succión, explica como realizar su identificación, y a partir de esta identificación permite establecer las medidas correctivas necesarias para reducir estas fallas. Analizó que la mayoría de fallas en las varillas se presentan por fatiga en tensión, y describe el proceso de daño en fatiga desde la etapa de concentración de los esfuerzos aplicados, generación de la grieta, crecimiento y fractura final del componente.

Beilow y Smuga<sup>4</sup>, realizaron pruebas experimentales para evaluar los efectos del ambiente sobre la vida a la fatiga de las varillas de succión, demostraron que las velocidades de corrosión obtenidas a partir de ensayos electroquímicos permitiendo establecer que entre las soluciones de NaCl de 8% y 3.5% no presentaron un cambio significativo en el comportamiento a la corrosión. Finalmente, concluyeron que los resultados de los ensayos electroquímicos no se correlacionan con los experimentos de Corrosión – Fatiga desarrollados en los mismos materiales y bajo los mismos ambientes.

Hein N<sup>5</sup> y colaboradores, discutieron los principales factores que afectan la vida a la fatiga, las mejoras en la calidad del proceso de fabricación de las varillas. Además analizaron el uso de otros diagramas de esfuerzos diferentes al diagrama de Goodman para obtener vidas en servicio de las varillas de cincuenta millones de ciclos; tomaron en cuenta el desarrollo de nuevas curvas de esfuerzos permisibles para el uso en varillas.

Afirman que la teoría de la parábola de Gerber puede ser usada para la determinación de los esfuerzos permisibles si los esfuerzos aplicados máximo y mínimo son exactamente conocidos.

La norma API 11 BR <sup>6</sup> establece recomendaciones para el cuidado y manejo de las varillas de succión, grados C, K y D. En la etapa de selección de materiales hace referencia al diagrama de Godmann como herramienta útil en el diseño, ya que permite determinar los rangos de esfuerzos aplicados, también recomienda los factores ambientales, predice que si se presentan ambientes corrosivos como el H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, el ambiente debe ser correctamente inhibido, o por el contrario se presentarían fallas de estos componentes.

Recomienda evitar golpes en los extremos de las varillas, un almacenamiento en unidades de empaque, utilizar protectores en las juntas y acoples de las varillas.

La norma API 11 B <sup>7</sup> establece las especificaciones necesarias en cuanto a propiedades mecánicas, composición química, acoples, las conexiones de las varillas, y las varillas de fondo. Además establece las condiciones o controles en el diseño de las varillas de succión en cuanto a documentación, validación, verificación, y posibles cambios en el diseño.

Kohout J. y Chet S.V <sup>8</sup>, formularon una nueva curva para describir las regiones de fatiga de alto y bajo ciclaje, comparada con las curvas de Basquín para vida finita y la ecuación de Stromeyer para altos ciclos, esta nueva curva tiene muchas ventajas, entre las que se cuentan se tiene que: la nueva función permite un mejor ajuste de los resultados experimentales, y es adecuada para la extrapolación en interpolación de las curvas de fatiga en las regiones de alto y bajos ciclos.

Jang S y Sunghak L <sup>9</sup>, investigaron la relación que existe entre la microestructura y las propiedades en fatiga de aceros de alta resistencia, con 0.84% C, usados para resortes en los diafragmas de los automóviles. Las propiedades en fatiga fueron estudiadas sobre microestructura con resistencias mecánicas similares bajo condiciones iguales de dureza. Los resultados de los ensayos indicaron que el límite de fatiga de los dos aceros fue el mismo cuando la resistencia mecánica era similar, y esta disminuía con el incremento de la temperatura de revenido, es decir, que el límite de fatiga tiene una dependencia mas fuerte con respecto a la resistencia mecánica que a la dureza, y este puede ser preestimado a partir de la resistencia mecánica. Para la línea de aceros de las familias 41XX y 43XX es de esperarse que mediante el tratamiento térmico se mantenga constante las propiedades mecánicas iniciales o en determinado momento aumente la resistencia mecánica, aumente la tenacidad a la entalla, y la vida a la fatiga este en función de la tenacidad a la entalla medida en el ensayo Charpy.

Shankar M y Theodore N.<sup>10</sup>, investigaron el efecto del predaño realizado a bajos ciclos y altos esfuerzos en su desempeño a altos ciclos, en aleaciones de titanio Ti-6Al-4V. los resultados de la investigación demostraron que no existe evidencia estadísticamente significativa de que el predaño a bajos ciclos afecte el comportamiento a altos ciclos. Es decir, que en este tipo de materiales la deformación plástica a bajos ciclos no produce sitios favorables para el daño que se puede presentar a altos ciclos. A nivel de investigación este estudio puntualiza una forma de relacionar el comportamiento en fatiga a bajos ciclos con el comportamiento a altos ciclos, en resumen la resistencia a la fatiga no es afectada por un predaño a altos esfuerzos.

Bathias C. y Le Francois P.<sup>11</sup>, investigaron las causas que hacen que las curvas de fatiga no presenten una asintota horizontal, ellos demostraron que para un gran número de aleaciones, la iniciación de las grietas ocurre por encima de los diez millones de ciclos y que las diferencias de la resistencia entre un millón y mil millones de ciclos están en el rango de 50-200 MPa. Es decir que nominalmente la resistencia a la fatiga esta dada para un número dado de ciclos. En la investigación actual se plantea el estudio de los esfuerzos alternantes de fractura para diez millones de ciclos, si se quiere establecer una predicción en cuanto a la vida de los componentes para valores superiores a los diez millones de ciclos se debe generar experimentalmente datos experimentales superiores a los diez millones de ciclos.

Weiju R. y Theodore N.<sup>12</sup>, investigaron los efectos y mecanismos de fatiga a bajos ciclos sobre el límite de fatiga a altos ciclos en una superaleación Udimet 720 a una relación de esfuerzo igual a 0.1. Los límites de fatiga fueron determinados después de varias fracciones de consumo de la vida en bajos ciclos LCF, los resultados muestran que pequeñas fracciones de consumo de vida en bajos ciclos reducen significativamente el límite de fatiga a altos ciclos HCF, y esta reducción es atribuida al daño por deformación plástica inducido durante el proceso a altos esfuerzos (bajos ciclos).

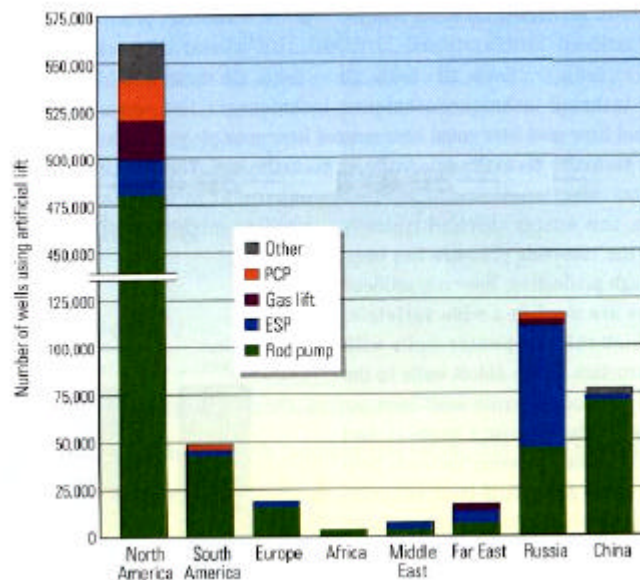
La caracterización microestructural indica que la deformación plástica reduce el límite de fatiga a altos ciclos por la activación de sistemas de deslizamiento en la estructura cristalina FCC del material, creando sitios favorables para el daño a altos ciclos y bajos esfuerzos. En la familia de aceros de media aleación y alta resistencia mecánica a ser evaluados con tratamiento térmico de temple y revenido se conoce que la estructura cristalina es la tetragonal compacta que posee un bajo numero de sistemas de deslizamiento, entonces se puede concluir que el ciclado a altos esfuerzos no producirá una activación de sistemas de deslizamiento que posteriormente serán sitios preferenciales de iniciación del daño a altos ciclos, es decir, se puede realizar un ciclado a altos esfuerzos (bajos ciclos) que induce un consumo de vida, posteriormente se realiza la evaluación del límite de fatiga a altos ciclos, pero con una disminución en el número de ciclos necesarios para la falla en la región del límite de fatiga.

## 8. MARCO TEÓRICO

### 8.1 El fenómeno de fatiga presente en la explotación de los pozos petrolíferos

El bombeo mecánico por levantamiento artificial es uno de los métodos más comunes para la producción de petróleo, a escala mundial se tienen más de 600.000 pozos activos con este tipo de sistema, en la figura 1 se puede apreciar esta distribución.

Figura 1. Distribución de sistemas de producción de crudo



Fuente: Oilfield Review 2005.

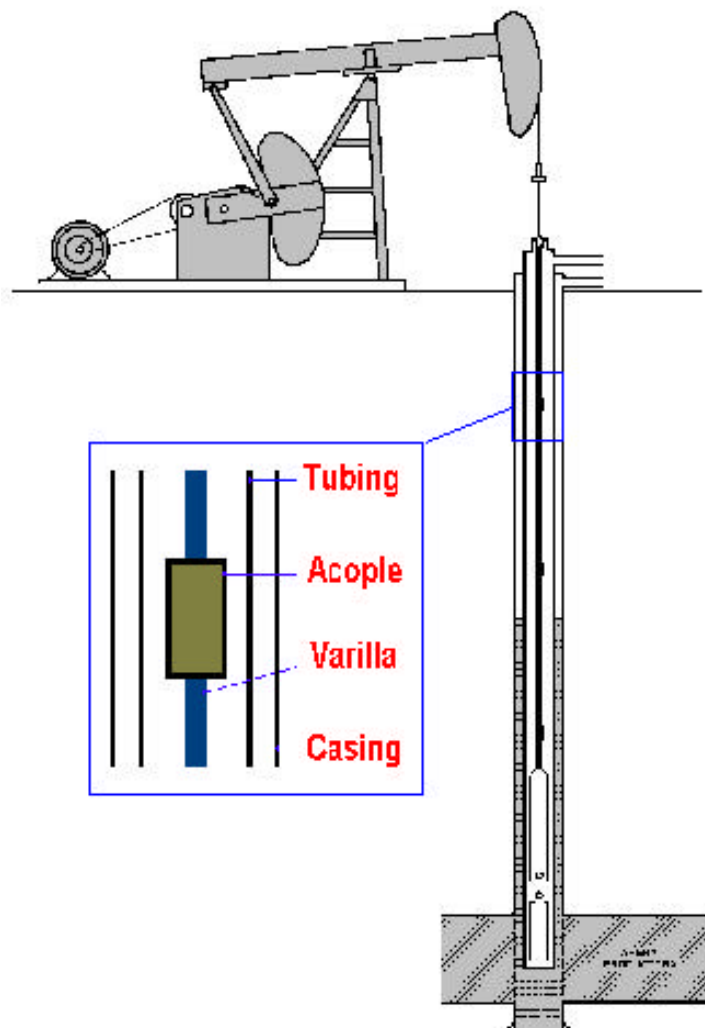
Este método consiste en la ubicación de una unidad de bombeo a escala superficial unida a otra unidad de bombeo recíprocante a nivel subsuperficial por medio de una sarta de varillas de succión. En la figura 2 se muestra una representación de este sistema de producción de crudo.

La habilidad de una varilla de succión para levantar por bombeo mecánico el fluido en un pozo depende de muchos factores. Uno de los principales es la vida a la fatiga de la varilla. La vida a la fatiga esperada está basada en el diagrama de Goodman modificado el cual se establece según la práctica recomendada API 11BR para varillas tipo C - K y para varillas de alta resistencia mecánica cada fabricante presenta sus respectivos diagramas, en este diagrama se espera como mínima vida a la fatiga los 10 millones de ciclos (2-3 años en servicio).

Una sarta de varillas de succión usada en el bombeo de pozos se considera como la unión entre la unidad de bombeo superficial, la subsuperficie, y la bomba ubicada internamente en el pozo. La sarta de varillas transmite el movimiento recíprocante generado por la unidad de bombeo para activar la bomba y levantar el fluido a la superficie. Las varillas en la sarta han sido diseñadas para resistir las cargas generadas a partir de movimientos ascendentes y descendentes.

Las cargas generadas durante la carrera ascendente consisten principalmente del peso de la sarta de varillas más la columna de fluido en el tubo de producción, y las cargas descendentes consisten del peso de la sarta de varillas. El efecto neto es que las cargas impuestas sobre las varillas fluctúan y se repiten muchas veces hasta que una falla ocurre. Las cargas de esta naturaleza son llamadas “cargas de fatiga en tensión - tensión”

Figura 2. Sistema de bombeo mecánico.



Según las especificaciones de la norma API 11 B para diseño y selección de los materiales para varillas de succión, se tienen como criterios de selección: las propiedades mecánicas, composición química, y dimensiones, estos materiales se clasifican según los grados K, C, D. Los fabricantes de las varillas presentan para sus productos el diagrama de Goodman modificado, este diagrama permite determinar las cargas máximas permisibles de trabajo.

En servicio, una gran cantidad de las fallas presentadas en las varillas de succión se debe al crecimiento y agrietamiento con el tiempo de los componentes, este agrietamiento se ha identificado que tiene su inicio en defectos superficiales tales como: picaduras inducidas por corrosión, defectos por manipulación y fabricación. Otro factor importante encontrado en los análisis de falla realizados a estos componentes es la relación directa entre el nivel de tenacidad al impacto presente en el material fallado y la vida del componente.

Para los sistemas de perforación se utilizan materiales similares a los presentes en las varillas (4138M, 4337M, 4137M), en la norma API 5 D en la sección 7, se establece como criterio mínimo de selección para los materiales de las tuberías de perforación el valor de tenacidad al impacto (47 J), además de las propiedades mecánicas. El estado de esfuerzos al que se encuentra sometidos las tuberías de perforación esta compuesto principalmente por momentos de torsión alternativos, esfuerzos de corte, los cuales también inducen fatiga en estos materiales, el criterio de tenacidad anteriormente mencionado prevé un mejor comportamiento en fatiga para los materiales que presenten niveles de tenacidad al impacto superiores a 47 Julios.

## **8.2 Fatiga de materiales** <sup>13</sup>

La fatiga en los materiales metálicos se puede definir como un fenómeno microestructural, localizado, permanente, y cíclico que sufren los componentes sometidos a cargas fluctuantes en el tiempo. La fractura de una pieza de acero por fatiga presenta un aspecto característico. Se observan en ellas dos zonas bien definidas: una de superficie mate y sedosa que constituye la fractura de fatiga propiamente dicha, y otra zona de grano cristalino mas o menos aparente o fibrosa, que forma la fractura final instantánea. Por otra parte, las regiones de la pieza cercanas a la fractura de fatiga no presentan alargamiento o deformación plástica.

Las fracturas por fatiga que se generan en servicio presentan una gran diversidad de características, pero siempre manteniendo los rasgos anteriormente indicados, y siempre se puede diferenciar claramente entre la zona de la fractura final y la zona de propagación por fatiga propiamente dicha, por lo que se establece con certeza el origen de la fractura. La zona de fractura de fatiga ocupa una fracción mas o menos grande de la sección total dependiendo del nivel de esfuerzos

aplicados y el tipo y naturaleza de los intensificadores de esfuerzo que en algunos se formen en la superficie del componente.

Si se examinan con atención el sitio de origen de la fractura de fatiga, con mucha frecuencia, se distinguen en los mismos estrías o pequeñas grietas que tienen su nacimiento en defectos de la sección o de la superficie externa. El origen de la rotura por fatiga parece residir en una fisura minúscula que va extendiéndose progresivamente hasta el instante en que no existe metal en el área remanente de la sección transversal suficiente para soportar el esfuerzo aplicado, se produce entonces la rotura súbita e instantánea por deformación plástica o por fragilidad, de acuerdo con las propiedades del metal y su sensibilidad al efecto de entalla una vez formada la fisura. En la figura 3 se observa una falla de fatiga ocurrida en una varilla de succión grado servicio especial.

Figura 3. Falla típica de fatiga.



Fuente: Análisis de falla realizado en el laboratorio de Tecnología de Materiales de ECOPETROL S.A.

El proceso de falla por fatiga puede ser dividido en cinco etapas:

1. Deformación plástica cíclica antes de la iniciación de grietas
2. Iniciación de una o más microgrietas
3. Propagación o coalescencia de microgrietas para formar una o más microgrietas
4. Propagación de una o más macrogrietas
5. Falla final

## **1. Deformación cíclica antes de la iniciación de grietas por fatiga**

Si no existen concentradores de esfuerzos, entallas, o inclusiones, pequeñas microgrietas se pueden iniciar debido a niveles suficientemente altas de deformación plástica alternante. Cuando una dislocación emerge a la superficie, un escalón de deslizamiento de un vector de Burgers es creado. Durante la carga completamente inversa sobre el mismo plano de deslizamiento, este escalón es cancelado, sin embargo, los deslizamientos ocurren sobre muchos planos, y la inversión nunca es perfecta. La acumulación de escalones de deslizamiento en una región local llevan a la formación de una rugosidad severa sobre la superficie. Por lo tanto, la resistencia a la falla por fatiga es mayor para aleaciones que no están sometidas a localización severa de la deformación plástica.

Algunas veces las características mencionadas forman las llamadas extrusiones e intrusiones sobre la superficie del material. Un mecanismo de formación de extrusiones e intrusiones fue formulado por Cottrell y Hull<sup>14</sup>. En el cual el deslizamiento secuencial sobre dos planos de deslizamiento que se interceptan se supone que ocurre. En la primera mitad del ciclo, opera primero un sistema de deslizamiento y posteriormente el otro, produciendo la morfología propia de una indentación. Alternativamente, una protrusión es formada si las dislocaciones del vector de Burgers son de signo opuesto.

Sin embargo no se cree que las intrusiones y extrusiones sean formadas exactamente por el mecanismo propuesto por Cottrell y Hull, pero este mecanismo sirve para ilustrar el tipo de proceso que está operando. Laird – Duquette<sup>15</sup> puntualizaron que los pares extrusión e intrusión son formadas cuando hay solamente un sistema de deslizamiento activo, y esto no es claro si las intrusiones y extrusiones se forman en pares<sup>16</sup>, Neumann<sup>17</sup> postuló que una intrusión o extrusión posiblemente se forme por una avalancha de dislocaciones paralelas a los planos de deslizamiento mas cercanos que contienen apilamientos de dislocaciones de signo opuesto.

## **2. Iniciación de Microgrietas**

La iniciación de grietas por fatiga ha sido observada que ocurre a lo largo de las bandas de deslizamiento, límites de grano, partículas de segunda fase.

La secuencia de eventos y modos de iniciación de grietas por fatiga ocurre así: Durante la deformación plástica cíclica, las dislocaciones pueden emerger a la superficie o apilarse en obstáculos. Si las dislocaciones continuamente emergen a la superficie en lugar de apilarse en obstáculos, entonces las bandas de deslizamiento que eventualmente llegan a ser grietas aparecen en las porciones centrales de los granos, donde el esfuerzo de fluencia es de menor magnitud. Como es de esperarse, la resistencia a la iniciación de bandas de deslizamiento

en la porción central de un grano disminuye con el aumento en el tamaño de grano.

Según Vormwald – Seeger<sup>18</sup> el tiempo para iniciar una grieta por fatiga de cierto tamaño es determinado por el crecimiento de microgrietas, por lo tanto en la investigación desarrollada por estos autores hacen importantes esfuerzos para cuantificar la etapa de iniciación de grietas por medio de la mecánica de fractura para grietas cortas o Microgrietas

Se puede asumir que la ley de crecimiento para Microgrietas esta dada por:

$$\frac{da}{dn} = C\Delta J_{eff}^m \quad (1)$$

a = tamaño de grieta

m = exponente para la velocidad de crecimiento de grietas.

donde los coeficientes de la ecuación anterior son tomados a partir de los datos de crecimiento para grietas largas y el parámetro  $\Delta J_{eff}$  puede ser calculada mediante la siguiente expresión formulada por Dowling<sup>19</sup>

$$\Delta J_{eff} = \left( 2.9 \frac{\Delta s_{eff}^2}{2E} + 2.5 \frac{\Delta s \Delta e_p}{n+1} \right) a \quad (2)$$

Donde:

$$\Delta s_{eff} = s_{max} - s_{op} \quad (3)$$

Es el rango de esfuerzos efectivo mientras la grieta esta abierta.

El  $\sigma_{op}$  puede ser calculado a partir de la formula propuesta por Newman<sup>20</sup>

$$s_{op} = (A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3) \times s_{max} \quad R \geq 0 \quad (4)$$

$$s_{op} = (A_0 + A_1 R) \times s \quad R < 0 \quad (5)$$

$$A_0 = 0.535 \cos \frac{\rho s_{max}}{2s_0} \quad (6)$$

$$A_1 = 0.344 \frac{s_{max}}{s_0} \quad (7)$$

$$A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3 \quad (8)$$

$$A_3 = 2A_0 + A_1 - 1 \quad (9)$$

Donde:

$R$  = relación de esfuerzos.

$s_0$  = esfuerzo de fluencia.

La anterior expresión representa la solución para el esfuerzo plano en grietas largas.

### **3. Propagación y Coalescencia de Microgrietas**

Una grieta por fatiga tiene cierta longitud antes de que pueda ser observada, por lo tanto, como una consecuencia de los esfuerzos cíclicos o deformaciones plásticas superiores al límite de fatiga, las microgrietas iniciales crecen o coalescen hasta que una macrogrieta pueda ser definida.

### **4. Crecimiento de Macrogrietas**

La velocidad de propagación de grietas por fatiga generalmente están en función del rango de intensidad de esfuerzos, en donde este parámetro controla la velocidad. El comportamiento en la propagación de grietas por fatiga, presenta tres fases:

Fase 1. Región umbral o cerca al umbral donde la velocidad de propagación disminuye con la disminución del rango de intensidad de esfuerzos a un valor llamado el rango de intensidad de esfuerzos umbral.

En esta región las macrogrietas no crecen a todos los valores del rango de intensidad de esfuerzos, el rango de esfuerzos umbral se toma como el valor en el cual la grieta no propaga. La velocidad de propagación incrementa a medida que se aumenta el rango de intensidad de esfuerzos y es mayor que el rango de esfuerzos umbral, llegando a la región donde la ley de París es válida.

Los valores del umbral y el comportamiento cerca al umbral se establecen para longitudes de grieta de unos pocos milímetros, pero esos valores no son válidos para grietas más pequeñas.

El cierre de la grieta es otro factor que afecta el comportamiento cerca al umbral. El concepto de cierre de grietas fue inicialmente propuesto por Elber, cuando el rango de intensidad de esfuerzos es relativamente grande, estriamiento plástico del material en la punta de la grieta impone esfuerzos de compresión en la

inversión de la carga, causando el cierre de la grieta antes que el esfuerzo en tensión llegue a ser cero.

- Fase 2. Región donde la Ley de París es válida

Fase 3. Región de alta velocidad donde la intensidad de esfuerzo máximo,  $K_{max}$  se aproxima al factor de intensidad de esfuerzos crítico para falla estática,  $K_c$ .

En general, las solicitaciones de fatiga resultan de esfuerzos combinados, los cuales se pueden clasificar como sigue:

- ✓ Solicitaciones por esfuerzos estáticos y esfuerzos variables de la misma naturaleza y de la misma dirección, por ejemplo, tracción estática y tracción variable alternada.
- ✓ Solicitaciones por esfuerzos estáticos y esfuerzos variables de naturaleza diferente, por ejemplo: Tracción estática y torsión variable alternada, torsión estática y tracción variable alternada.
- ✓ Solicitaciones por esfuerzos combinados con variables de naturaleza diferente, por ejemplo: Esfuerzos de tensión y torsión alternados en fase, y esfuerzos de tensión y torsión alternados desfasados.

De forma general se definen los siguientes parámetros que determinan el comportamiento en fatiga:

$R$  = Relación entre el máximo y el mínimo esfuerzo aplicado

$s_a$  = Esfuerzo alternante

$s_r$  = Rango de esfuerzos, es la diferencia entre el esfuerzo máximo y mínimo

$s_m$  = Esfuerzo promedio, es el promedio aritmético entre el esfuerzo máximo y mínimo.

### 8.3 Curvas de fatiga

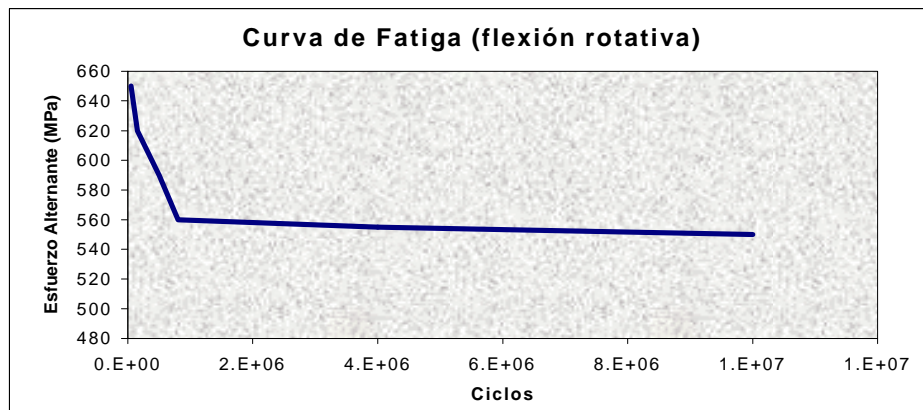
Las curvas de fatiga tienen como fin principal establecer la dependencia entre la magnitud del esfuerzo alternante aplicado a un material y determinar su dependencia con respecto al número de ciclos para la falla bajo esta condición de esfuerzo. En las curvas de fatiga se distinguen dos regiones:

- Región de bajos ciclos en la que la magnitud del esfuerzo aplicado es alto, se tienen valores de esfuerzo muy cercanos a la resistencia mecánica del acero, en esta región se tienen deformaciones plásticas y para construir esta gráfica se recomienda mantener el nivel de deformación controlada durante el ensayo.
- Región de altos ciclos en la que las deformaciones son de tipo elástico, la magnitud del esfuerzo máximo aplicado se encuentra por debajo del esfuerzo

de fluencia estático del material, en esta región se ubica el límite de fatiga para el material. Por definición el límite de fatiga representa un límite de resistencia a la fatiga que corresponde a la máxima amplitud del esfuerzo que puede aplicarse indefinidamente sin provocar la rotura. En algunas aleaciones, no se presenta un valor definido del límite de fatiga, en estos casos suele reportarse el valor del esfuerzo de falla para un determinado número de ciclos.

En la figura 4 se observa una curva típica de esfuerzo alternante – número de ciclos que se obtiene a partir de un ensayo de fatiga. Se debe tener en cuenta que estos ensayos deben mantener constante cualquiera de los siguientes parámetros: relación de esfuerzos, esfuerzo medio, esfuerzo alternante.

Figura 4. Curva S-N



Para determinar una curva de fatiga se ensaya una serie de probetas del mismo metal, bajo cargas de amplitudes  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ , anotándose para cada una de ellas el número de ciclos correspondiente para el que ha tenido lugar la rotura o si esta no se ha producido. Cada probeta está sometida a una sola carga durante toda la duración del ensayo.

Se procede siempre con cargas sucesivamente decrecientes y se determinan los números crecientes de ciclos. Si antes del número de ciclos convencional elegido (10 millones, 30 millones, o 100 millones) hay fractura de la probeta, la carga aplicada es superior al límite convencional de fatiga; si por el contrario, la probeta no se rompe, la carga aplicada es igual o inferior al límite convencional de fatiga.

La tabla 1 muestra el número de probetas necesarias para obtener un 95 % de límite de confiabilidad, a partir de esta tabla se puede concluir que a medida que se aumenta el número de probetas el nivel de dispersión en los resultados que se obtienen en fatiga disminuye considerablemente, además, se muestra el número de probetas necesarias para construir una curva de fatiga en función de los

objetivos y alcances del ensayo, estos datos se obtienen a partir de las especificaciones de la norma ASTM E 739.

Tabla 1. Número de probetas para un 95 % de confiabilidad.

<b>Amplitud del* intervalo (s =desviación estándar).</b>	<b>Limites de confiabilidad del 95 % sobre el valor (x) del esfuerzo promedio</b>	<b>Número de probetas requeridas, n</b>
0.2 $\sigma$	x $\pm$ 0.1 $\sigma$	384
0.4 $\sigma$	x $\pm$ 0.2 $\sigma$	96
0.6 $\sigma$	x $\pm$ 0.3 $\sigma$	43
0.8 $\sigma$	x $\pm$ 0.4 $\sigma$	24
1.0 $\sigma$	x $\pm$ 0.5 $\sigma$	15
1.2 $\sigma$	x $\pm$ 0.6 $\sigma$	11
1.4 $\sigma$	x $\pm$ 0.7 $\sigma$	8
1.6 $\sigma$	x $\pm$ 0.8 $\sigma$	6
1.8 $\sigma$	x $\pm$ 0.9 $\sigma$	5
2.0 $\sigma$	x $\pm$ 1.0 $\sigma$	4
<b>Tipo de ensayo**</b>		<b>Número mínimo de probetas</b>
Estudios Preliminares y exploratorios (investigación exploratoria y desarrollo de ensayos).		6 – 12
Investigación y desarrollo de ensayo de componentes y probetas.		6 – 12
Datos de diseño permisibles		12 – 24
Datos de confiabilidad		12 – 24
<b>Tipo de ensayo**</b>		<b>% Replicación</b>
Estudios Preliminares y exploratorios (investigación exploratoria y desarrollo de ensayos).		17 – 33 min
Investigación y desarrollo de ensayo de componentes y probetas.		33 – 50 min
Datos de diseño permisibles		50 – 75 min
Datos de confiabilidad		75 – 88 min
% Replicación= 100(1-(número total de niveles de esfuerzos usados en el ensayo / Número total de muestras ensayadas)).		

Fuente: \*COLLINS. J.A. Failure of Materials in Mechanical Design Analysis, Prediction, Prevention, John Wiley and Sons, p 319-340, 1981, \*\* ASTM E 739

En las dos regiones que describen la vida a la fatiga de un material, el grado de dispersión mas alto se presenta en el régimen de larga duración, debido a que la iniciación de grietas por fatiga es altamente sensible a pequeñas variaciones superficiales, y discontinuidades en el material.

A continuación se presentan algunas ecuaciones que describen las curvas de fatiga:

### **8.3.1 Funciones alternativas para caracterizar las curvas de fatiga.**

Las curvas de fatiga S - N representan la dependencia del limite de fatiga sobre el número de ciclos para la falla. Actualmente, los esfuerzos en los ensayos de fatiga (variable independiente o variable de entrada) son ajustados y el numero de ciclos para la falla son los resultados de los ensayos (variable dependiente o variable respuesta),

Desde un punto de vista, la falla por fatiga (fractura) es el resultado de la acumulación de deformación plástica, sin embargo, todos los procesos que anteceden la fractura por fatiga son demasiado complicados y por lo tanto no es posible describir las curvas de fatiga solamente usando concepciones físicas. Por otra parte, todas las propiedades de fatiga asociadas con las curvas de fatiga (limite de fatiga, pendiente de la curva de fatiga en el rango de vida finita) no son cantidades físicas estrictamente definidas, solamente son cantidades y propiedades de ingeniería.

Todas las funciones importantes para la descripción de curvas de fatiga pueden ser divididas dentro de varios grupos de acuerdo a la forma geométrica de sus gráficas.

En general, la función de Basquín representa una hipérbola con exponente general, mientras que algunas otras funciones como las de Stromeyer, Palmgren o Weibull son modificaciones o generalizaciones de la función de Basquín.

#### **8.3.1.1 Funciones del tipo Basquín <sup>8</sup>**

La validez de la función de Basquín describe la dependencia del límite de fatiga de vida finita sobre el número de ciclos

$$s(N) = aN^b \tag{10}$$

Esta puede ser extendida a la región de bajos ciclos

$$s(N) = a(N + B)^b \tag{11}$$

y a la región de altos ciclos

$$s(N) = aN^b + s_{\infty} \quad (12)$$

llamada la función de Stromeyer, donde  $s_{\infty}$  es el límite de fatiga permanente, y la función que describe tanto la región de bajos y altos ciclos, llamada la función de Palmgren:

$$s(N) = a(N + B)^b + s_{\infty} \quad (13)$$

### 8.3.1.2 Función propuesta para la región de bajos y altos ciclos<sup>8</sup>

La contribución de los autores KOHOUT y VECHET consiste en extender la función de Basquín simétricamente a la región de bajos y altos ciclos, además, reemplazar los términos  $(N)$  por  $(N+B)$  para la extensión a la región de bajos ciclos.

$$s(N) = a \left( \frac{(N+B)C}{N+C} \right)^b \quad (14)$$

La ecuación anterior representa la nueva función para la descripción de las curvas de fatiga en ambas regiones de bajos y altos ciclos.

### 8.3.1.3 Función exponencial de esfuerzo para la predicción de la resistencia y la vida en fatiga debida al esfuerzo medio<sup>21</sup>

En las condiciones de fatiga a altos ciclos (controlado por el esfuerzo) donde el parámetro controlante es la deformación elástica o el nivel de esfuerzos, la relación vida – esfuerzo puede ser descrita nuevamente por la relación de Basquín.

$$s_a = s_f' (2N_f)^b \quad (15)$$

Esta relación junto con la de Coffin son validas para valores únicos y fijos del esfuerzo medio, a continuación se muestra una serie de funciones que tienen en cuenta el valor del esfuerzo sobre el limite y la vida en fatiga de materiales.

$$s_f' = f(s_m / s_u) \quad (16)$$

$$s_f' = s_{f0}' \exp[-a(s_m / s_u)] \quad (17)$$

Donde  $s'_{f0}$  es el valor inicial de la resistencia a la fatiga para un esfuerzo medio igual a cero,  $a$  es una constante que representa la sensibilidad del material al esfuerzo medio

$$s_a = s'_{f0} \exp[-a(s_m/s_u)(2N_f)^b] \quad (18)$$

Comparando las ecuaciones anteriores se demuestra que el esfuerzo medio en tensión disminuye la resistencia a la fatiga de acuerdo a la función de carga  $H$  dada por la siguiente ecuación:

$$H = \exp[-a(s_m/s_u)] \quad (19)$$

## 8.4 Factores que afectan la vida a la fatiga

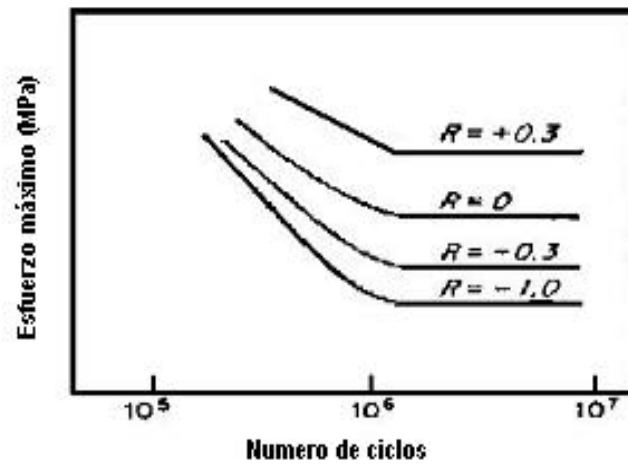
El límite de fatiga en un material puede ser obtenido de forma experimental o mediante la aproximación tradicional dividiendo el esfuerzo último sobre dos, para diseño y en servicio este valor se recalcula como el límite de fatiga efectivo o admisible teniendo en cuenta el efecto de variables como: Esfuerzo medio, acabado superficial, ambiente, concentradores de esfuerzos, confiabilidad, tamaño del componente, tamaño de grano, condiciones de tratamiento térmico, composición química, nivel de inclusiones. A continuación se mencionan los efectos que presentan diversos factores sobre el desempeño a la fatiga.

### 8.4.1 Efecto del esfuerzo medio sobre la fatiga

Las figuras 5 y 6 muestran el efecto del esfuerzo medio sobre la fatiga.

En la figura 5 se observa que a medida que  $R$  llega a ser más positivo, lo cual es equivalente a un incremento en el esfuerzo medio el límite de fatiga medido es mayor<sup>22</sup>.

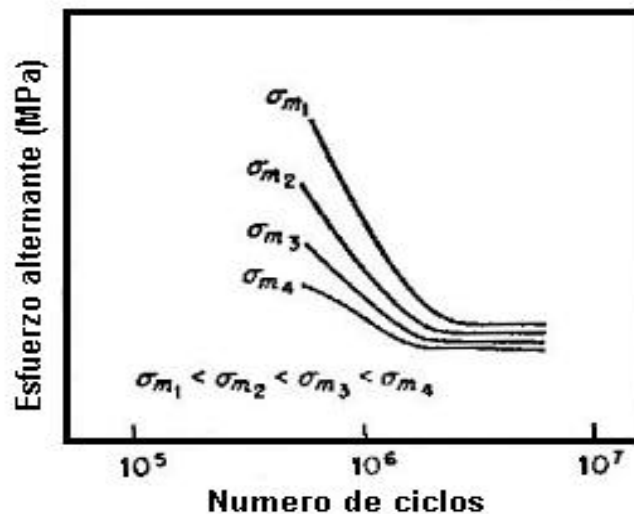
Figura 5. Efecto de la relación del rango de esfuerzos aplicados sobre el límite de fatiga.



Fuente: DIETER. G, Mechanical Metallurgy, Mc Graw Hill Book Company, pag 384, 1988.

En la figura 6 se observa que a medida que el esfuerzo medio llega a ser mas positivo los esfuerzos alternantes permisibles disminuyen<sup>23</sup>

Figura 6. Efecto del esfuerzo medio sobre el límite de fatiga.



Fuente: DIETER. G, Mechanical Metallurgy, Mc Graw Hill Book Company, pag 384-385, 1988.

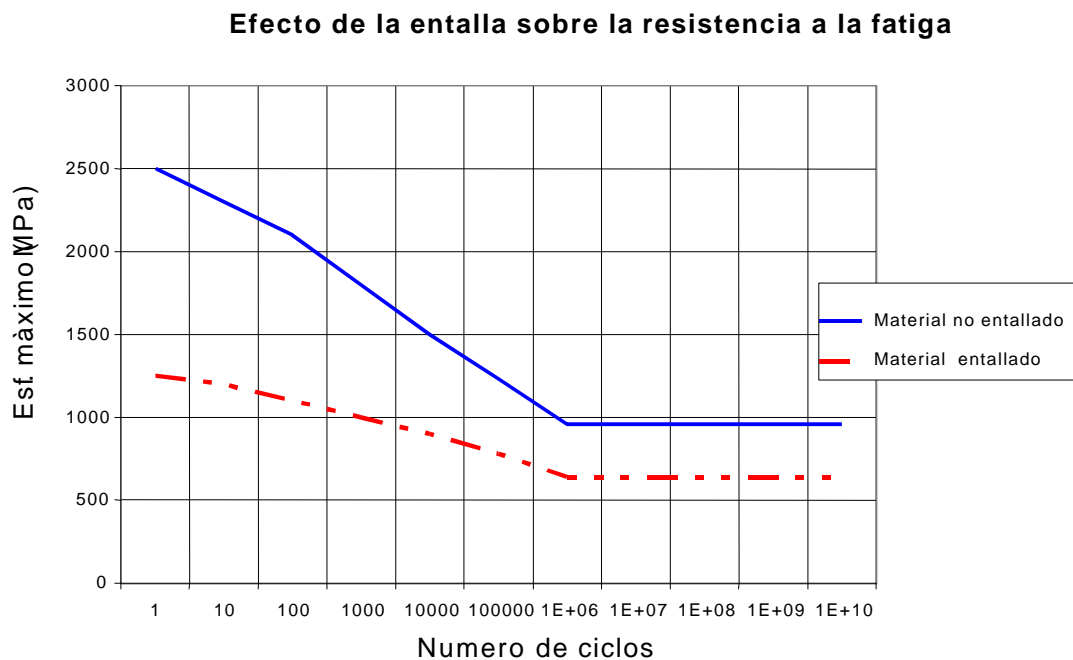
### 8.4.2 Efecto de los concentradores de esfuerzos

La resistencia al daño por fatiga es seriamente reducida por la introducción de concentradores de esfuerzos, tales como: huecos, poros, entallas, picaduras.

La presencia de una entalla en un espécimen bajo carga uniaxial introduce tres efectos: Un aumento en la concentración de esfuerzos en la raíz de la entalla, un gradiente de esfuerzos es iniciado a partir de la raíz de la entalla hacia el centro de la probeta, y un estado triaxial de esfuerzos es producido, los efectos anteriormente mencionados incrementan la tendencia a la localización de la carga y deformación y favorecen la iniciación de microgrietas a bajos niveles de esfuerzo aplicado.

La figura 7 muestra el efecto de los concentradores de esfuerzos sobre el desempeño a la fatiga.

Figura 7. Efecto de los concentradores de esfuerzos sobre el limite de fatiga.



Fuente: DIETER. G, Mechanical Metallurgy, Mc Graw Hill Book Company, pag 395, 1988.

Este efecto puede visualizarse a través de la ecuación para el calculo de la sensibilidad a la entalla.

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \tag{20}$$

Donde:

$K_f$  = Factor de entalla en fatiga

$K_t$  = Concentrador de esfuerzos en tensión

q = Sensibilidad a la entalla

$$K_f = \frac{S_{un}^e}{S_n^e} \quad (21)$$

El factor de entalla en fatiga determina la relación entre el límite de fatiga del componente sin entalla al límite de fatiga del componente entallado.

En un trabajo realizado en la agencia NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION por Stephen S.<sup>24</sup>, en esta investigación se realizaron ensayos de fatiga uniaxial para comparar la vida en fatiga de picados producidos en laboratorio, y defectos maquinados con electroerosión, los defectos realizados con electroerosión son usados para simular el efecto de la corrosión por picadura. Para una aleación de aluminio AA 7050 la entalla producida mediante electroerosión resulto en una vida en fatiga similar a la obtenida en los ensayos de las muestras que contenían “pittings” de tamaño similar.

#### 8.4.3 Efecto de la rugosidad superficial

Probetas de materiales que han sido pulidas, en las cuales las líneas de pulido han sido orientadas en la dirección del esfuerzo principal de tensión, producen los valores mas altos del límite de fatiga en los ensayos.

La tabla 2 muestra el efecto de la rugosidad superficial sobre la fatiga

Tabla 2. Vida a la fatiga de probetas de acero AISI - SAE 3130 ensayadas bajo esfuerzos completamente invertidos a 655 MPa.

Tipo de acabado superficial	Rugosidad superficial (mm)	Ciclos de vida a la fatiga
Pulido fino	0.05	234000
Pulido manual	0.13	137000
Pulido parcialmente manual	0.15	91000
Después de fabricado	2.67	24000

Fuente: DIETER. G, Mechanical Metallurgy, Mc Graw Hill Book Company, pag 384-400, 1988.

La rugosidad superficial disminuye el limite de fatiga en un material debido a que presenta dos efectos: Aumenta la probabilidad de sitios favorables en los que la deformación y la carga se puedan localizar, y además funciona como concentradores de esfuerzo.

El factor del acabado superficial que disminuye el limite de fatiga admisible cuantifica el efecto de pequeñas irregularidades características del acabado de la superficie.

Según Tupiassu et al<sup>25</sup> se tiene:

$$\text{Para una superficie pulida} \quad K_a = 1 \quad (22)$$

$$\text{Con rectificado} \quad K_a = 1.58(S_R)^{-0.085} \quad (23)$$

$$\text{Laminado en frío} \quad K_a = 4.51(S_R)^{-0.265} \quad (24)$$

$$\text{Laminado en caliente} \quad K_a = 272(S_R)^{-0.995} \quad (25)$$

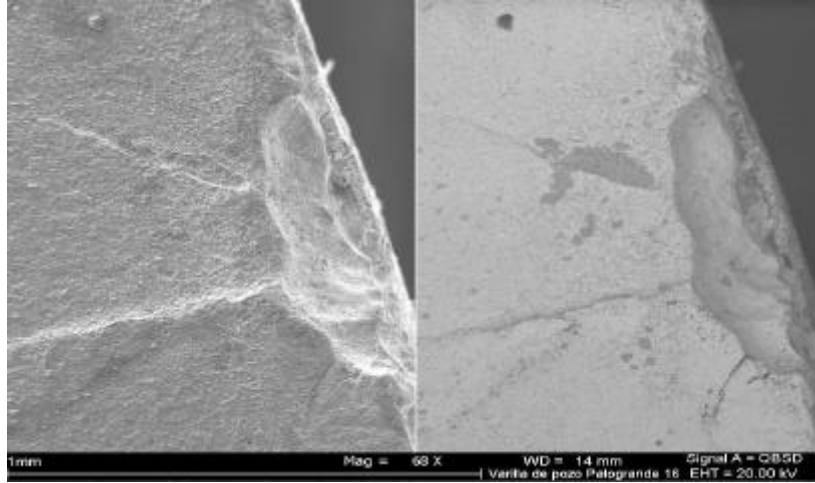
#### 8.4.4 Efecto del ambiente

El ambiente en el que un material se encuentre expuesto puede atacar en mayor o menor grado la superficie del mismo, dependiendo del nivel de resistencia a la corrosión que presente el material. Martínez<sup>26</sup> determinó que las dos formas de corrosión que se presentan en los materiales de las varillas de succión de alta resistencia mecánica en algunos de los pozos en Colombia son corrosión general y corrosión por picadura, además, se concluyo en este estudio que los bajos niveles de los elementos de aleación tales como: Cromo, Níquel, y Molibdeno presentes en los materiales de alta resistencia mecánica de las varillas de succión no presentan un efecto significativo sobre la resistencia a la corrosión de estos materiales.

En la figura 8 se muestra la zona de inicio de fatiga debida a la formación de un picado por corrosión de CO<sub>2</sub> en los pozos de producción de petróleo en Colombia. El producto de corrosión identificado es la siderita.

Las picaduras que se forman en los materiales expuestos a ambientes corrosivos por efecto de gases como el CO<sub>2</sub> tienden a formar el efecto de entalla, es decir, teniendo en cuenta que la magnitud de los esfuerzos aplicados en servicio están en los límites de rango de esfuerzos seguros, se presentan fallas de estos componentes cuando existe la presencia de estos defectos formados electroquímicamente, los tamaños de estos picados están por debajo de 1 mm.

Figura 8. Corrosión por CO<sub>2</sub>



Fuente: Microscopio electrónico de barrido SEM de una varilla de succión 4330M, ICP.

#### 8.4.5 Efecto de los esfuerzos residuales superficiales

La formación de un modelo de esfuerzos residuales en compresión sobre la superficie es uno de los métodos más efectivos de aumentar el desempeño a la fatiga, debido a que las grietas superficiales formadas son restringidas por la imposición de estos esfuerzos impidiendo la iniciación, avance y crecimiento de las grietas formadas.

#### 8.4.6 Efecto del tamaño del componente <sup>25</sup>

La siguiente expresión permite cuantificar el efecto que presenta el tamaño del componente sobre su comportamiento en fatiga cuando se tiene flexión rotativa de ejes circulares.

$$K_b = \left( \frac{d}{7.62} \right)^{-0.1133}, \quad 2 < d < 80 \text{ mm} \quad (26)$$

ó también:

$$d < 8 \text{ mm} \Rightarrow K_b = 1$$

$$8 < d < 50 \text{ mm} \Rightarrow K_b = 0.90$$

$$50 < d < 80 \text{ mm} \Rightarrow K_b = 0.80$$

$$d > 80 \text{ mm} \Rightarrow K_b = 0.75 - 0.60$$

En el caso de tracción pura se debe usar  $K_b = 1$

Como se puede observar a medida que se aumenta el diámetro de un componente el valor del factor por tamaño disminuye generando como consecuencia una disminución en el límite de fatiga efectivo para el material.

#### **8.4.7 Efecto del nivel de inclusiones**

Se ha visto que los diferentes procesos de fabricación del acero determinan el nivel de inclusiones sobre los aceros obtenidos. El proceso de obtención del acero mediante el alto horno suministra altos niveles de impurezas e inclusiones en los aceros producidos, los procesos recientemente desarrollados para la fabricación del acero como: los hornos de inducción, arco eléctrico, y al vacío suministran una mejor calidad en cuanto se refiere al nivel de impurezas, en la tabla 3 se muestra una comparación entre dos procesos de fabricación para la obtención y el valor de resistencia a la fatiga obtenida para cada proceso.

En un trabajo de investigación realizado por Atkinson<sup>27</sup> en el cual desarrollaron una estimación del tamaño de inclusión máximo en aceros limpios y la relación con las propiedades mecánicas. Entre los aportes relevantes de esta investigación se tiene el desarrollo de una nueva aproximación para el diseño para fatiga utilizando la Distribución generalizada de Pareto para predecir la forma de la distribución de tamaño de las inclusiones más grandes y la fracción volumétrica acumulativa del componente en el que los esfuerzos de fatiga locales exceden un nivel de esfuerzo particular. El nuevo método de diseño desarrollado en esta investigación permite analizar el efecto de cambios en los esfuerzos de diseño o la limpieza del acero sobre la probabilidad para la falla.

Yang<sup>28</sup> y colaboradores investigaron el comportamiento de las inclusiones sobre el comportamiento en fatiga en el régimen de super larga vida sobre aceros 42 Cr Mo. Los análisis por SEM mostraron que las grietas por fatiga inician principalmente a partir de inclusiones no metálicas para los aceros comerciales 42CrMo, y a partir del volumen superficial del material para los dos aceros evaluados con bajos niveles de inclusiones cero (inclusiones cero).

En general, el tamaño de las inclusiones puede afectar la iniciación de grietas por fatiga, en un trabajo de investigación realizado por Juvonen<sup>29</sup> en el que evaluó el efecto del nivel de inclusiones sobre el comportamiento en fatiga de diferentes condiciones de carburización en un acero AISI – SAE 8620, como conclusión relevante encontró que: el tamaño de inclusión promedio para la iniciación de grietas por fatiga tuvo un efecto sobre la relación entre el límite de fatiga y la resistencia mecánica cuando el tamaño de las inclusiones fueron mayores que 70 – 90 micras.

Tabla 3. Influencia de las inclusiones sobre el limite de fatiga de un acero 4340

	Horno eléctrico	Fundido al vacío
Limite de fatiga longitudinal, (Mpa)	800	958
Limite de fatiga transversal, (Mpa)	545	827
Dureza, Rc	27	29

Fuente: DIETER. G, Mechanical Metallurgy, Mc Graw Hill Book Company, pag 384-400, 1988. Determinado en ensayos de fatiga por flexión repetida a R=0

#### 8.4.8 Efecto del tamaño de grano y la dirección del grano

Los materiales con tamaño de grano fino exhiben propiedades de fatiga superiores a los materiales con tamaño de grano gruesos.

La dirección del flujo de grano alineados, en laminas forjadas o laminadas, relativa a la dirección de la carga tiene un efecto significativo sobre la resistencia a la fatiga, con cargas cíclicas a través de la dirección del grano generando propiedades en fatiga que son inferiores a las cargas cíclicas a lo largo de la dirección del grano (longitudinal).

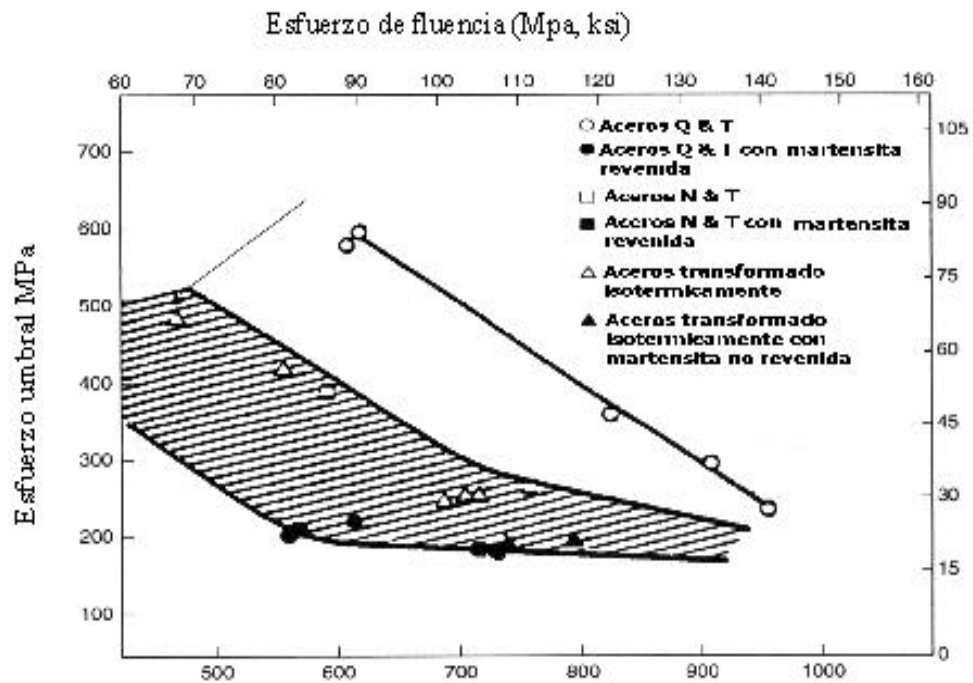
Una investigación desarrollada por Di Schino<sup>30</sup> sobre aceros inoxidables tipo 304 en la que se estudio el efecto del tamaño de grano de la austenita (1-47 micras) sobre el comportamiento en el ensayo de tensión y fatiga. Los resultados relevantes de esta investigación mostraron un fuerte mejoramiento en las propiedades en tensión y fatiga mediante el refinamiento en el tamaño de grano.

En una investigación realizada por Subramanya<sup>31</sup> en la que se evaluaron las velocidades de crecimiento de grietas por fatiga en el régimen de París para dos aceros microaleados con microestructuras de ferrita y perlita, los resultados obtenidos a partir del ensayo de velocidad de crecimiento de grietas en los que no se encontraron diferencias en cuanto a la respuesta en la región de propagación de grietas por fatiga, los dos materiales evaluados en esta investigación presentaban diferencias en cuanto al esfuerzo de fluencia del orden de 170 MPa y diferencias en cuanto al tamaño de las colonias de perlita de 7 micras, es decir que para estos aceros las propiedades mecánicas y metalúrgicas no presentaron diferencias en cuanto al desempeño en el régimen de propagación de grietas por fatiga.

#### 8.4.9 Efecto de la microestructura <sup>32</sup>

En la figura 9 se puede observar que para la familia de aceros evaluados, la microestructura de martensita revenida obtenida a partir de un tratamiento térmico de temple y revenido tiene un comportamiento en fatiga superior al de cualquier otra microestructura. La martensita revenida en los aceros aumenta el límite de fatiga debido a que es una estructura en la cual la movilidad de dislocaciones es mínima lo que produce un aumento en el nivel de carga aplicado para desplazar las dislocaciones.

Figura 9. Efecto de la microestructura sobre la resistencia a las grietas para aceros API N 80 AISI 4140 y 4340. Los datos son para probetas entalladas en flexión en una solución de 5 %NaCl – 0.5% Acido acético saturado con Sulfuro de Hidrogeno.



Fuente: LAMPMAN S, DAVIDSON G, REIDENBACH F, ASM HANDBOOK Fatigue and Fracture, Vol 19, 1996.

#### 8.4.10 Efecto de los componentes individuales en la aleación de la varilla de bombeo <sup>33, 34</sup>

Carbono: Elemento de aleación esencial en todos los aceros, proporciona mayor endurecimiento. Con el aumento del contenido de carbono en la varilla, aumenta su resistencia a la tensión, dureza, y susceptibilidad al tratamiento térmico.

Manganeso: Su adición actúa como desoxidante, aumenta la dureza, resistencia a la corrosión del acero, aumenta la resistencia a la fluencia. Es un elemento gamágeno o estabilizador de la fase austenita.

Silicio: Es muy usada en aceros sometidos a un alto grado de oxidación, tales como en refinerías, la mayoría de las varillas contienen 0.15 – 0.35 % de este elemento, es un estabilizador de la fase ferrítica. Es un elemento afinador del tamaño de grano de la ferrita, esto lo conduce retardando la transformación de la austenita en la fase de ferrita proeutectoide.

Níquel: Tiene un efecto positivo en la dureza y en la resistencia a la corrosión del acero debido a que el efecto corrosivo del sulfuro de hidrogeno y otros gases que pueden tener el crudo, se contrarrestan si la varilla tiene níquel como elemento de aleación, además es el elemento que aumenta la tenacidad del acero, aumenta el nivel de templabilidad y aumenta el límite de fatiga.

Cromo: Forma un carburo estable y contribuye grandemente en la dureza del acero, sin embargo es menos efectivo que el níquel a la resistencia corrosiva del sulfuro de hidrogeno. A niveles del 12-13% Cr, la resistencia a la corrosión por H<sub>2</sub>S es significativa.

Molibdeno: Es uno de los más poderosos elementos que contribuye en la dureza del acero, aunque no en forma igual al carbono, ayuda a mejorar la templabilidad. En pequeñas adiciones elimina la fragilidad inducida por el tratamiento térmico de revenido debido a que reacciona con el fósforo que migra a los límites de grano formando el **Mo<sub>3</sub>P** que se precipita en el interior del grano.

Vanadio: Elemento formador de carburos, se combina con el carbono para formar carburos de Vanadio muy estables a alta temperatura los cuales no permiten el crecimiento del tamaño de grano, además, son elementos afinadores del tamaño de grano de la ferrita proeutectoide en los aceros con porcentajes en carbono inferiores al 0.8%.

Titanio: Elemento formador de carburos, modifica la perlita mediante la combinación con el carbono.

Aluminio: Excelente afinador del tamaño de grano de la austenita y se utiliza como desoxidante.

## 8.5 MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE VARILLAS DE SUCCIÓN

Los materiales que comúnmente se utilizan en la fabricación de varillas de succión de alta resistencia mecánica son de la familia de aceros: 4138M, 4140, 4142, 4330M, 4337M, 4340.

## 8.6 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ACEROS DE ALTA RESISTENCIA

Los tratamientos térmicos más comunes que presentan las varillas de succión se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Tratamientos térmicos típicos realizados a las varillas de succión.

Fabricante	Clasificación AISI-SAE	Tratamiento térmico.
Fabricante A	<b>4330 M1</b>	Normalizado y revenido
Fabricante B	4330 Mod	Normalizado y revenido
Fabricante C	4142	Normalizado y revenido
Fabricante D	4138 M	Normalizado y revenido
Fabricante E	4138	Normalizado y revenido
Fabricante F	4138 M	Endurecido superficialmente
Fabricante G	3130	Templado y revenido

Fuente: Catálogos de fabricantes de varillas de succión.

Como se puede observar a partir de la tabla 4, los tratamientos térmicos que se realizan sobre los materiales de las varillas de succión son: normalizado mas revenido, y en muy pocos casos se realizan temple mas revenido (bonificado) y endurecimiento superficial. Los fabricantes F y G realizan tratamientos térmicos de endurecimiento superficial, y templado y revenido, respectivamente.

A continuación se revisan los conceptos relacionados a los tratamientos térmicos realizados sobre estas varillas.

**Austenización:** implica el calentamiento de un acero por encima de la temperatura crítica (cerca de 1340 – 1675 grados Fahrenheit dependiendo del contenido de carbono) y permitiendo un tiempo suficiente para que la estructura cristalina inicial (ferrita mas cementita) se transforme a austenita.

**Normalizado:** el normalizado consiste en un enfriamiento lento al aire a partir de la temperatura de austenización. Los aceros al carbono de media aleación considerados en esta investigación son de las familias 4130, 4138, 4330, 4140, el proceso de manufactura típico es la forja en caliente, la forja tiende a producir

agrietamiento por enfriamiento desde la temperatura de forja hasta temperatura ambiente, por esto se recomienda hacer este enfriamiento en un horno, o en un medio aislante apropiado.

Los fabricantes de varillas de succión para pozos de producción con sistema de bombeo mecánico y levantamiento artificial, realizan a sus productos tratamientos térmicos de normalizado y revenido, principalmente por la facilidad que presentan estos dos procesos, representada en el medio de enfriamiento, tendencia a la distorsión y agrietamiento. En los tratamientos térmicos de normalizado y revenido se emplea como medio de enfriamiento el aire, estos medios de enfriamiento en este tipo de aceros producen estructuras ferríticas, perlíticas y con agregados de carburos, que presentan las propiedades mecánicas requeridas en las especificaciones de la norma API 11 B, facilitando el proceso de fabricación.

El temple y revenido de esta familia de aceros produce microestructuras tales como: martensita-ferrita, martensita-ferrita-agregados de carburos, martensita-bainita-ferrita, que presentan excelentes combinaciones de propiedades mecánicas. Cabe notar que estos aceros pueden presentar problemas de agrietamiento, y distorsión debido a su composición química y a la presencia de elementos endurecedores como el cromo y el molibdeno, por tal razón, en este tipo de aceros se debe tener un control muy riguroso en la etapa de enfriamiento para que no se presenten fenómenos de distorsión y agrietamiento.

Una alternativa de solución a los problemas que se pueden presentar en el tratamiento térmico de los aceros a estudiar es la realización de un Martempering, que consiste en austenizar el acero, enfriar rápidamente a una temperatura por encima del punto de inicio de la transformación martensítica,  $M_s$ , y regular la velocidad de enfriamiento en este punto de manera que el paso por la transformación martensítica sea lento, obteniéndose así una martensita mas homogénea, con una menor tendencia a la distorsión y al agrietamiento.

Temple: el temple consiste en un rápido enfriamiento, usualmente en agua o aceite, para producir una estructura martensítica dura. En el estado después del temple, la martensita es demasiado dura y frágil para ser usada, por lo tanto, siempre después del temple se debe realizar un revenido para alcanzar la tenacidad requerida en el material de perforación.

Revenido: el revenido es un recalentamiento del acero para aliviar los esfuerzos internos, ablanda el material e incrementar su tenacidad.

En general, los aceros de alta resistencia son tratados térmicamente utilizando equipos y técnicas similares a las que se emplean para el tratamiento térmico de aceros para construcción. Estos aceros pueden ser templados y revenidos a durezas específicas, pero para aplicaciones críticas es necesario estirar los materiales para asegurar una combinación adecuada de resistencia y ductilidad.

Para asegurar que se ha alcanzado una resistencia a la fractura frágil se deben realizar ensayos de tenacidad a la fractura y ensayo de impacto Charpy.

Para la familia de aceros 4130, 4140, 4340, 6150, antes de hacer el proceso de maquinado se tiene como practica usual normalizar a 870 – 925 °C, y revenir a 150 – 650 °C.

## 8.7 TENACIDAD DE LOS MATERIALES

A continuación se muestran algunas ecuaciones utilizadas para la determinación de la tenacidad a la fractura en función de propiedades medidas a partir de ensayos de energía absorbida, tensión con entalla. Para la presente investigación es importante correlacionar los valores medidos en el ensayo Charpy y tensión con entalla para determinar diferencias en cuanto a los parámetros de tenacidad calculados y de esta forma establecer alguna relación con el comportamiento en fatiga de estos materiales.

### Ecuación de Barson – Rolfe<sup>35</sup>

Las ecuaciones 27 y 28 son expresiones formuladas para la determinación del valor de tenacidad a la fractura en función de los valores obtenidos a partir del ensayo de energía absorbida:

$$\left(\frac{K_{IC}}{s_y}\right)^2 = 1.37 \left(\frac{CVN}{s_y}\right) - 0.045 \quad (27)$$

$$K_{IC} = (0.64.E(GPa) * CVN(J))^{0.5} \quad (28)$$

$s_y$  = esfuerzo de fluencia estático del material.

CVN = Charpy V Notch, valor de la energía absorbida en un ensayo de impacto.

### Factor de intensificación del esfuerzo<sup>36</sup>

La ecuación 29 muestra una expresión para la determinación del factor de intensificación de esfuerzos cuando se tiene una geometría similar a la que se presenta en un ensayo de tensión con entalla. Esta ecuación se aplica entonces para un eje circular de diámetro 2w con una entalla circunferencial externa de profundidad a, con una precisión del 1%.

$$K_t = \frac{P\sqrt{pa}}{p(w-a)^2} \frac{\sqrt{s}}{2} \left[ 1 + \frac{s}{2} + \frac{3s^2}{8} - 0.363s^3 + 0.731s^4 \right] \quad (29)$$

$$s = 1 - a/w$$

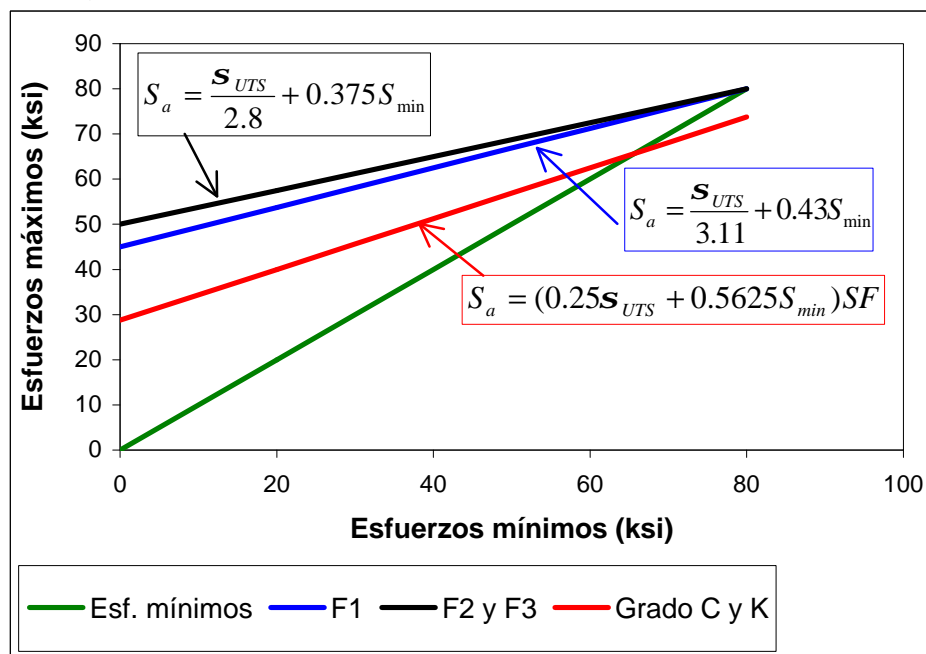
$K_t$  = Factor de intensificación de esfuerzos para una geometría similar a la presente en una probeta para ensayo de tensión con entalla.

$P$  = carga aplicada

## 8.8 DIAGRAMA DE GOODMAN MODIFICADO

En la figura 10 se muestra el diagrama de Goodman modificado para uno de los fabricantes de varillas, en este diagrama la resistencia mecánica se divide por el valor de 2, este valor representa el factor de seguridad aplicado con el fin de disminuir el rango de esfuerzos de trabajo y aumentar la confiabilidad de la operación de estas varillas.

Figura 10. Diagrama de Goodman modificado.



Fuente: Catálogos de fabricantes de varillas.

## 9. METODOLOGIA

La metodología utilizada para el desarrollo de la presente investigación se desarrolló en varias etapas, cada etapa le apunto al cumplimiento del objetivo general y específicos planteados en la investigación.

Para el desarrollo de la investigación se recibieron 5 varillas las que pertenecen a 3 fabricantes, de estas varillas se tenían 4 tipos de varillas de resistencia mecánica, por motivos de confidencialidad de los resultados en esta investigación se identificaron las varillas como F1-M1, F2-M2, F3-M3, F1-M4, F2-M2 TR, la identificación F1, F2, F3 corresponde a los tres fabricantes de las varillas evaluados, y la identificación M1, M2, M3, M4 corresponde a los diferentes grados de varillas ofrecidos por los fabricantes y estudiados en la presente investigación, el sufijo TR hace referencia a la varilla evaluada en la condición de tratamiento térmico de temple y revenido.

A continuación se explican cada una de las etapas desarrolladas en la presente investigación.

### Etapa 1. Revisión Bibliográfica

Como objetivo se requería obtener información con respecto a algunas investigaciones desarrolladas similares a la investigación actual que aportaran criterios para el desarrollo de la presente investigación. En esta etapa se desarrollaron las siguiente actividades:

- Búsqueda de información relacionada con este tema de investigación, en las bibliotecas de la UIS y del ICP.
- Bases de datos SPE, Compendex index; Petroleum Abstracts, Elsevier.
- Se busco información en portales de investigación en internet publicaciones realizadas y relacionadas con la falla por fatiga de estos materiales.

### Etapa 2. Caracterización química

En esta etapa de la investigación se cumplieron con los objetivos:

Determinación de las composiciones químicas de los materiales obtenidos para ensayo y comparar estas composiciones con las que reportan los fabricantes.

A partir de las composiciones químicas obtenidas se clasificaron los materiales de acuerdo con la norma AISI – SAE.

- Determinación de la composición química elemental de las muestras obtenidas para ensayo mediante espectrómetro de emisión óptica – EEO.
- Clasificación de los materiales de acuerdo a su composición química con la norma para designación de aceros AISI – SAE.

### Etapa 3. Caracterización metalográfica

Esta fase tiene como objetivo analizar la microestructura de estos materiales, para determinar la influencia de la microestructura sobre el comportamiento a la fatiga y los valores de las propiedades mecánicas obtenidos, especialmente analizar la correlación entre la microestructura y tenacidad de los materiales evaluados, las precipitaciones y distribuciones de carburos.

Se realizaron las siguientes actividades:

- Determinación mediante microscopio óptico del tipo de microestructura de estos materiales, se determinaron las siguientes características microestructurales: Tamaño de grano austenítico anterior, microconstituyentes presentes, nivel de inclusiones e impurezas. En esta actividad se presentaron inconvenientes relacionados con la determinación del tipo de microestructura debido a la similitud existente entre las microestructuras de estos materiales y las obtenidas a partir de tratamientos térmicos de bonificado, se necesito también desarrollar esta determinación mediante la microscopía de barrido electrónico.

Etapa 4. Caracterización mecánica de las varillas utilizadas en los campos de producción con materiales en condiciones de suministro (normalizado y revenido).

En esta fase de la investigación se realizaron ensayos de dureza, tensión, tensión con entalla, energía absorbida y ensayos de fatiga de corta y larga duración (sin y con defectos superficiales), adicionalmente se evaluó la superficie de fractura de las muestras falladas en algunas de las evaluaciones mecánicas desarrolladas con el fin de identificar algunos mecanismos de falla.

Etapa 5. Determinación de las condiciones del tratamiento térmico de temple y revenido.

En esta etapa después de haber caracterizado química, mecánica y microestructuralmente las varillas que comúnmente se utilizan como varillas de succión en los campos de producción de petróleo, se realizaron tratamientos térmicos de temple y revenido a cada una de las muestras de ensayo, con el objetivo de modificar la microestructura interna inicial, por una microestructura de martensita revenida con mejores valores de tenacidad y energía de impacto, y como consecuencia de esto un mejor desempeño a la fatiga. A estas muestras tratadas térmicamente se les determinaron las propiedades mecánicas. Cabe notar que solamente se evaluó una en condiciones de tratamiento térmico de temple y revenido.

Se llevaron a cabo las actividades:

- Selección de los parámetros del tratamiento térmico iniciales de temple mas revenido a los materiales
- Afinar las condiciones de medio de enfriamiento, temperatura de austenización, tiempo de sostenimiento, temperatura de revenido, tiempo de revenido, tipo de atmósfera, que permita obtener valores adecuados tanto en energía de impacto y comportamiento en fatiga.
- Caracterización metalográfica de las muestras tratadas térmicamente.
- Determinación de niveles de dureza a las muestras tratadas térmicamente.

Etapa 6. Evaluación de las propiedades mecánicas de la muestra tratada térmicamente.

Se determinaron las propiedades mecánicas de una de las varillas recibidas

Etapa 7. Análisis de resultados y conclusiones

Finalmente después de obtener los resultados necesarios en esta investigación se procedió a la realización de su respectivo análisis para finalmente formular las conclusiones de la investigación, determinar los resultados obtenidos y compararlos con las hipótesis inicialmente planteadas.

En esta etapa de la investigación se desarrollo un análisis entre las variables que afectan el comportamiento en fatiga, con el fin de observar posibles relaciones, identificar algún tipo de comportamiento especial, y como facilidad para realizar el análisis entre los resultados obtenidos.

## 10. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En esta sección se describen las etapas relacionadas con la obtención de datos experimentales los cuales están planteados en las etapas de metodología anteriormente descrita. Se mencionan consideraciones teóricas con sus respectivos análisis.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada una de las secciones de este capítulo:

- Sección 10.1: se hace una descripción y registro fotográfico de los equipos utilizados en la presente investigación, además se hace una identificación inicial de los materiales utilizados en la investigación.
- Sección 10.2: Se hace mención a un análisis teórico inicial acerca de la interrelación de las diferentes variables y propiedades que se estudian en la investigación, este discernimiento teórico es propio del autor de este trabajo.
- Sección 10.3: se muestra la matriz de experimentos que se desarrolló para cada muestra a evaluar.
- Sección 10.4: se muestran los resultados de composición química.
- Sección 10.5: se muestran las metalografías que se desarrollaron para identificar el tipo de microestructura presente, se determinó el tipo y forma de inclusiones, mediante SEM se determina la composición elemental de las inclusiones encontradas en las muestras, se realizó la determinación del tamaño de grano ferrítico y austenítico anterior en las muestras.
- Sección 10.6: determinación de las propiedades mecánicas de los materiales recibidos en condición de suministro, es decir, con tratamiento térmico de normalizado y revenido, estos ensayos fueron desarrollados bajo las especificaciones y lineamientos de la norma ASTM A 370. Se inicia con la presentación de los datos de dureza de las muestras, posteriormente se determinan las curvas U, los datos del ensayo de tensión, ensayo de tensión con entalla, energía absorbida, y finalmente los ensayos de fatiga. Adicionalmente se realizaron los cálculos del valor de tenacidad a la fractura en función de diferentes expresiones obtenidas a partir de la revisión bibliográfica realizada.
- Sección 10.7: se presentan los datos de dureza obtenidos a partir de las condiciones de los tratamientos térmicos de temple y revenido realizados en las muestras con el fin de aumentar el nivel de tenacidad al impacto, se muestran las metalografías obtenidas a partir de la condición fijada de tratamiento térmico de temple y revenido, para esta condición se muestran los resultados de un ensayo de tensión realizado a tres de las muestras para realizar un seguimiento sobre las propiedades mecánicas obtenidas a

partir del ensayo de tensión debido a que se desarrollo este tratamiento para mantener las propiedades en rango de valores similares a los valores obtenidos en la condición de suministro.

- Sección 10.8: en esta sección se muestran los resultados de las evaluaciones mecánicas realizadas sobre las muestras tratadas térmicamente.

### 10.1 Descripción de equipos utilizados e identificación del material

Para realizar los ensayos se utilizaron los siguientes equipos:

- **Ensayo de tensión y fatiga**

**Material Test System**, maquina electrohidraulica con capacidad de 100 KN (10 toneladas). (Ver figura 11)

Figura 11. Maquina electrohidraulica para ensayos de tensión y fatiga.



- **Ensayo de dureza y microdurezas**

Durómetros marca **GNEHM HORGEN** para dureza Vickers, Brinell y Rockwell (Ver figura 12)

Figura 12. Durómetro para realizar ensayos de dureza Brinell y Vickers



- Microdurometro marca **SHIMADZU HMV 2000** (ver figura 13)

Figura 13. Equipo para realizar mediciones de microdureza Vickers.



- **Composición química**

**Espectrómetro de emisión óptica marca BAIRD (ver figura 14)**

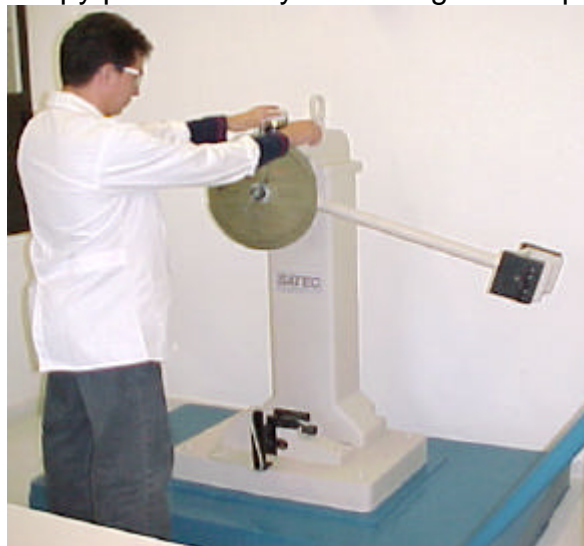
Figura 14. Espectrómetro de emisión óptica.



- **Energía absorbida**

**Péndulo Charpy marca SATEC Systems, Inc, Model S11D3, Serial 1712 (ver figura 15)**

Figura 15. Péndulo Charpy para el ensayo de energía de impacto.



- **Equipo neumático de perforación**

Equipo para realizar la medición de esfuerzos residuales mediante el método del agujero ciego (ver figura 16 a y b).

Figura 16. Equipo neumático de perforación.

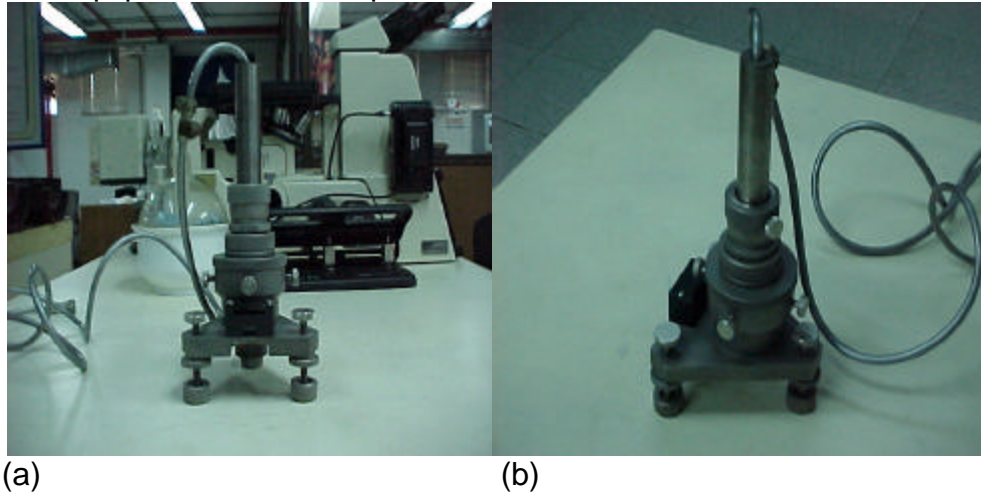


Figura 17. Microscopio óptico Marca REICHERT – JUNG MeFe34.



A continuación se presentan los resultados de las caracterizaciones desarrolladas en las instalaciones del laboratorio de Tecnología de Materiales, ICP.

Se establece a continuación a los materiales recibidos como designación y codificación interna:

F1- M1	Muestra M1 (varillas $\frac{3}{4}$ " ) que corresponde al fabricante F1
F2-M2	Muestra M2 (varillas $\frac{7}{8}$ " ) que corresponde al fabricante F2
F3-M3	Muestra M3 (varillas 1" ) que corresponde al fabricante F3.
F1-M4	Muestra M4 (varillas 1" ) que corresponde al fabricante F1.

Para desarrollar la investigación se recibieron varillas de 3 fabricantes, a partir de estas varillas se cortaron muestras para desarrollar las caracterización químicas, metalográficas, mecánicas, tratamientos térmicos y ensayos de fatiga.

## 10.2 Discernimiento para determinar la interacción entre comportamiento en fatiga y el nivel de energía absorbida en un material.

La familia de aceros evaluados en la presente investigación, los cuales presentan en su composición química, carbono entre 0.3 –0.4 % C con elementos de aleación tipo **Cr, Ni, Mo**, los cuales suministran principalmente propiedades de templabilidad, resistencia mecánica, dureza, tenacidad, y resistencia a la corrosión.

A continuación se desarrolla una formulación teórica con el fin de establecer una interrelación entre parámetros microestructurales, y determinar una relación entre los valores obtenidos en los ensayos de energía absorbida y fatiga.

En general estos aceros presentan como fases la ferrita proeutectoide y perlita, pero con morfologías diferentes a las presentes comúnmente en un proceso de enfriamiento lento, el cual se obtiene en un tratamiento térmico de recocido, debido a esto, los microconstituyentes que pueden ser observados con microscopio óptico no son claramente diferenciables de los tradicionales (ferrita y perlita). En las figuras 18 y 19 se puede observar esta diferencia en un acero 4330M con tratamientos térmicos de recocido y normalizado – revenido a 650°C.

Figura 18. Muestra acero 4330 M con tratamiento de recocido, 500 aumentos. Microestructura compuesta por granos de ferrita y perlita laminar.

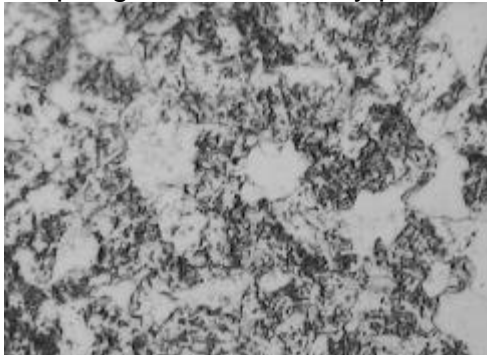
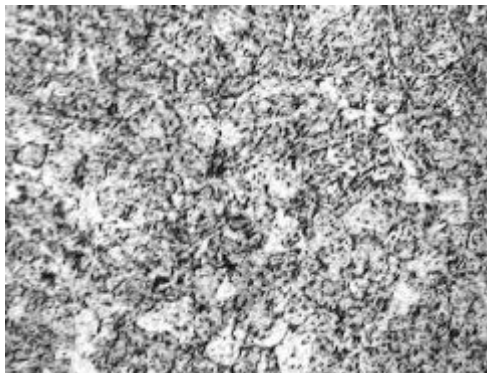


Figura 19. Muestra acero 4330 M normalizado y revenido a 650°C durante 30 minutos, 500 aumentos.



## **Efecto de la velocidad de enfriamiento sobre la tenacidad al impacto.**

La velocidad de enfriamiento la cual esta determinada por el tipo de tratamiento térmico, determina el tamaño de grano ferrítico y la distribución, tamaño y morfología de los carburos tipo cementita formados en el material. Durante el proceso de transformación de la austenita en perlita, y ferrita se genera una gama de posibilidades de nucleación y crecimiento de granos, la cual a su vez determina la morfología de la microestructura y tamaño de los núcleos de ferrita y perlita formados.

Un recocido presenta una velocidad de enfriamiento inferior a la de un normalizado, lo cual va a determinar una transformación de la austenita en granos de perlita y ferrita de diferente morfología, y el tamaño de grano de la ferrita y perlita es mayor, comparado con un tratamiento de normalizado debido a que el recocido permite en el proceso de transformación el tiempo necesario para que suceda un proceso de difusión.

Por otra parte, el tratamiento térmico de temple y revenido (bonificado) consiste en un rápido enfriamiento del material desde su punto monofásico de austenita (860°C) hasta la temperatura ambiente, seguido de un calentamiento a una temperatura por debajo del punto de transformación eutectoide con el fin de aumentar la ductilidad y tenacidad del material, la microestructura obtenida consiste de una matriz martensítica con una precipitación de finos carburos en el material, esto significa una microestructura con agujas de ferrita sobresaturada en carbono de un tamaño inferior al presente en los tratamientos de recocido y normalizado. El objetivo principal del revenido es permitir la salida del carbono que se encuentra saturado en la estructura cristalina tetragonal compacta, obteniendo una estructura con propiedades mecánicas optimas.

Las dos fases que presentan los aceros principalmente son la ferrita y la cementita, la ferrita es una fase blanda, dúctil y tenaz, la cementita es una fase dura y frágil la cual suministra propiedades de dureza y resistencia mecánica al acero. Se puede concluir que una microestructura obtenida mediante un tratamiento de recocido presenta mayor tenacidad al impacto que una estructura normalizada principalmente por el efecto que suministra la ferrita como fase blanda para absorber la energía dada por una carga dinámica y la cementita que funciona como barrera para la transmisión de la energía transferida en un proceso de impacto. A su vez la microestructura obtenida mediante un tratamiento de temple y revenido presenta una alta capacidad para absorber energía en un impacto debido a la configuración interna de la ferrita y la cementita conservando sus propiedades mecánicas similares a las de un normalizado. Finalmente, la respuesta que un material presenta en un ensayo de energía absorbida va a depender de:

- Tipo de tratamiento térmico

- Morfología de las fases presentes
- Forma y distribución de los carburos
- Resistencia mecánica

En la presente investigación se dispone de materiales con características similares de resistencia mecánica, y composición química, donde la diferencias se tienen en:

La composición química (adición de microaleantes), elementos afinadores del tamaño de grano austenítico anterior, tamaño de grano ferrítico, las condiciones específicas del tratamiento térmico realizado a cada material (principalmente, temperatura, tiempo de austenización, tiempo y temperatura de revenido), donde a partir de dichas condiciones se obtiene la morfología de las fases presentes y el tipo, forma de los carburos obtenidos.

A continuación se formula un parámetro para cuantificar el tamaño de la fase ferrita, responsable de la tenacidad al impacto.

$$I = \frac{L}{N} \quad (30)$$

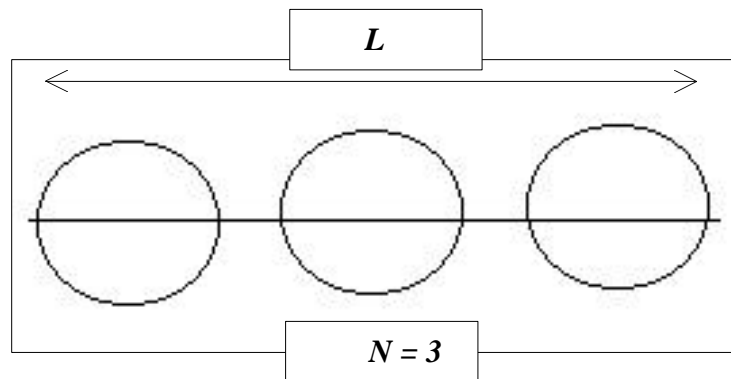
Donde:

$L$  = Longitud de una línea trazada sobre el material

$N$  = Número de granos ferríticos cruzados por la línea.

En la figura 20 se ilustra la forma de realizar la medición de este parámetro

Figura 20. Representación esquemática para medir el parámetro  $I$



Debido a lo anteriormente expuesto se hace necesario proponer un parámetro de análisis microestructural que permita obtener un índice de cuantificación de la morfología de las fases en el material estudiado.

En una serie de mediciones realizadas a un mismo material con diferentes tratamientos térmicos  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ , a medida que  $\lambda$  disminuye la microestructura obtenida tiende a ser mas fina y las formaciones ferríticas serán de menor tamaño comparadas con valores mas grandes obtenidos para  $\lambda$ . Se puede concluir que para un tratamiento térmico de recocido el valor de  $\lambda$  será mayor que el obtenido en un normalizado:

$$I_{\text{Re cocido}} > I_{\text{Normalizado}}$$

### **Efecto del tamaño de grano ferrítico $\lambda$ sobre el valor de la energía absorbida**

Una medida de la morfología y tamaño de la fase ferrítica en un acero es el valor del parámetro  $\lambda$  que indica la magnitud del tamaño de grano ferrítico.

A medida que este parámetro aumenta la morfología de la fase blanda es mas gruesa, y esta es una función del valor de energía absorbido por el material, a continuación se formula una expresión para el nivel de energía absorbido para un material.

$$CVN = I^n \quad (31)$$

Donde el exponente (n) es una función de la forma, tamaño, naturaleza y distribución de los carburos presentes en el acero.

Es decir, el valor de energía absorbida en un material va a depender del tamaño de grano y morfología de la ferrita, y el tamaño, morfología y distribución de los carburos presentes en el material.

En una investigación realizada por Sangho, donde determinaron los efectos de los elementos de aleación sobre la tenacidad a la fractura en la región de transición de aceros de baja aleación concluyeron que la adición de molibdeno y níquel junto con la disminución del porcentaje de carbono promueven la formación de finos carburos tipo  $M_2C$  y la disminución de gruesos carburos tipo cementita, debido a esto, la resistencia a la fluencia, mecánica, y la tenacidad a la fractura en la región de transición fue considerablemente mejorada sin afectar la ductilidad del material.

## Interacción Impacto - Fatiga

La formulación de un posible mecanismo que permita correlacionar el ensayo de energía de impacto con la descripción fenomenológica del ensayo de fatiga debe tener en cuenta varios factores, básicamente se debe proveer de criterios para buscar una interrelación entre microestructura, composición química, propiedades mecánicas y determinar el grado de correlación entre variables.

Para un mismo material, con similares propiedades mecánicas las que pueden ser obtenidas mediante tratamientos térmicos de normalizado – revenido ó temple – revenido, donde la principal diferencia radica en la microestructura obtenida, específicamente en el tamaño, morfología, y distribución de las fases ferrita y carburos, se prevé una relación favorable entre el nivel de energía absorbida y el comportamiento en fatiga. En la familia de aceros evaluados, en condiciones de normalizado – revenido, y temple mas revenido, se obtienen microestructuras respectivamente compuestas por ferrita, carburos y perlita muy fina en el caso del normalizado más revenido y microestructuras del tipo martensita revenida en el bonificado. Se presume entonces desde el punto de vista de la microestructura y la tenacidad que la martensita revenida presenta un límite de fatiga superior al obtenido en la combinación de microestructura de ferrita y carburos obtenida en tratamientos térmicos de normalizado y revenido.

Finalmente, en esta investigación para cada material se evalúo la interacción impacto – fatiga, evaluando las propiedades de tenacidad al impacto con el comportamiento en fatiga para varios tratamientos térmicos, entonces donde se obtengan microestructuras finas con los valores mas altos de tenacidad se obtendrán correspondiente valores mas altos del límite de fatiga.

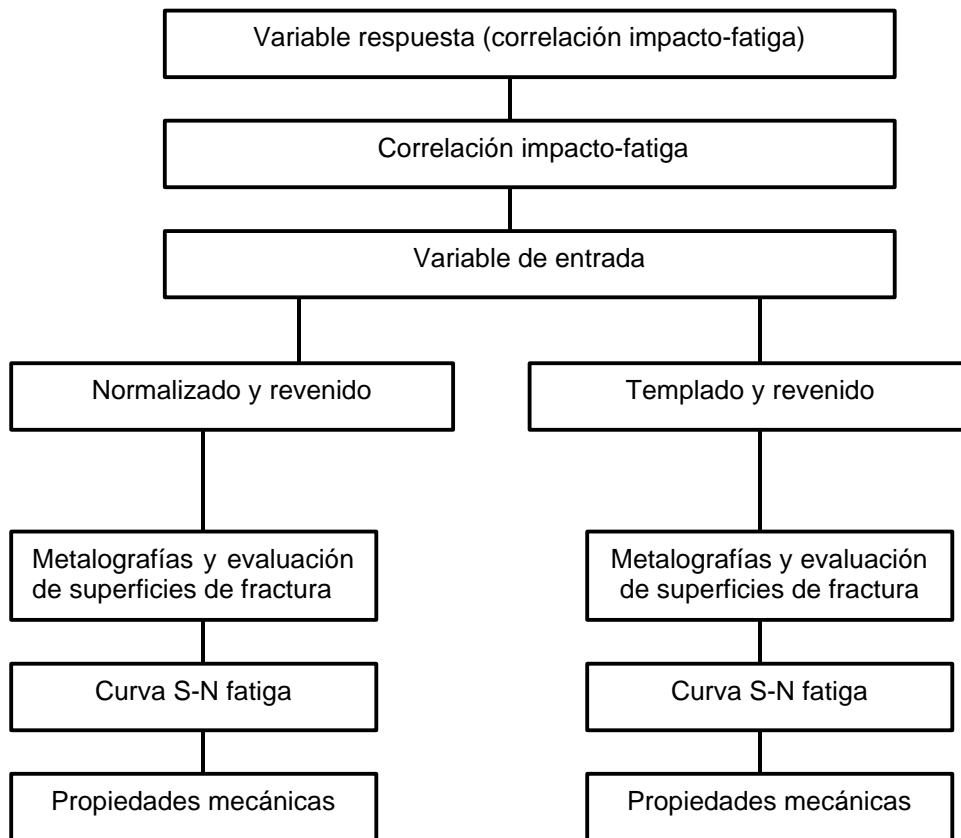
### 10.3 Matriz de experimentos

Para la elaboración de la matriz de experimentos se tuvieron en cuenta los objetivos finales de la investigación, se desarrollaron los ensayos bajo las especificaciones de la norma internacional ASTM. El trabajo fue desarrollado en dos fases, en cada fase se realizaron ensayos cuyo propósito fue caracterizar el material desde el punto de vista *metalográfico* (microestructura, inclusiones), *mecánico* (esfuerzo de fluencia, esfuerzo último, porcentaje de elongación, exponente de endurecimiento por deformación, dureza y curvas U, ensayo de tensión con entalla, ensayo de impacto), *químico* (determinar los elementos de aleación presentes en cada material), *Superficies de fractura* (determinar rasgos principales en las superficies de fractura que permitan inferir algunos criterios para interrelacionar el valor de la tenacidad al impacto con el límite de fatiga), *desempeño en fatiga* (curvas esfuerzo alternante en función del número de ciclos). Cada fase fue clasificada en función del tratamiento térmico presente en el

material, la fase I se presenta como la condición de suministro del material, según información suministrada por los fabricantes estos materiales se fabrican con tratamientos térmicos de normalizado y revenido, y en la fase II se realiza en el laboratorio de Corrosión a alta temperatura un tratamiento térmico de temple y revenido con el fin de mejorar el comportamiento tanto en tenacidad como en fatiga.

En el siguiente diagrama se puede visualizar el diseño para realizar la matriz de experimentos

Figura 21. Metodología para determinación correlación impacto-fatiga



En la tabla 5 se muestra la matriz de experimentos que se desarrolló en la presente investigación para cada muestra evaluada. Esta matriz de experimentos tiene como fin determinar una correlación entre la energía de impacto y el comportamiento en fatiga.

Tabla 5. Matriz de experimentos

	<b>Ensayos realizados</b>							
	<b>Tipo de ensayo</b>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Normalizado y revenido	1	1	2	2	3	2	8	8
Templado y revenido		1	2	2	3	2	8	8
	<b>Número de pruebas por ensayo</b>							

### Descripción de ensayos

1. Ensayo de composición química
2. Ensayo de dureza
3. Ensayo de tensión
4. Ensayo de tensión con entalla
5. Ensayo de energía de impacto
6. Caracterización metalografica
7. Ensayo de fatiga
8. Ensayo de fatiga con defectos.

## 10.4 Caracterización química

La composición química se determinó por la técnica de espectroscopia de emisión óptica, este ensayo se desarrolló bajo las especificaciones de la norma ASTM E 415 – 99 a <sup>37</sup>. A continuación se presentan los rangos de composición química que presentan los materiales de las varillas a evaluar.

Tabla 6. Composición química varillas.

<b>Fabricante/ Elemento</b>	<b>F1- M1</b>	<b>F2-M2</b>	<b>F3-M3</b>	<b>F1-M4</b>
<b>C</b>	0.341	0.318	0.405	0.410
<b>Mn</b>	0.833	0.848	1.065	1.256
<b>P</b>	0.013	0.007	0.006	0.008
<b>S</b>	0.006	0.030	0.008	0.012
<b>Si</b>	0.210	0.230	0.273	0.288
<b>Cu</b>	0.260	0.270	0.311	0.143
<b>Ni</b>	2.047	1.922	0.067	0.000
<b>Cr</b>	0.940	0.877	0.594	0.722
<b>V</b>	0.064	0.097	0.095	0.059
<b>Mo</b>	0.248	0.236	0.255	0.309
<b>Ti</b>	0.002	0.001	0.002	0.004
<b>Al</b>	0.042	0.005	0.003	0.027
<b>Nb</b>	0.008	0.007	0.006	0.045
<b>Fe</b>	Balance	Balance	Balance	Balance
<b>AISI-SAE</b>	<b>4330M</b>	<b>4330M</b>	<b>4138M</b>	<b>4138M</b>

Los materiales a evaluar en su composición química son clasificados según la designación AISI –SAE como aceros 4138M y 4330M.

La letra M en la clasificación de estos aceros significa la adición de microaleantes con el fin de optimizar las propiedades mecánicas del material mediante un afinamiento en el tamaño de grano, es decir, incrementan las propiedades mecánicas sin pérdidas considerables de tenacidad.

## **10.5 Caracterización metalográfica fase I**

Para realizar el análisis metalográfico se tomaron de cada muestra para estudio una probeta orientada en sentido transversal, estas fueron preparadas siguiendo el procedimiento de la norma ASTM E 3.

Las probetas fueron atacadas con una solución de nital al 2% según las especificaciones de la norma ASTM E 407.

La microestructura que presentan estos materiales es determinada en función de la composición química, el proceso de fabricación, las condiciones del tratamiento térmico posterior al proceso de forja en caliente, por esto, para lograr caracterizar la microestructura de los materiales con tratamientos térmicos de normalizado y revenido según la información suministrada por el fabricante, se realizó una secuencia de tratamientos térmicos con el fin de sensar la microestructura en función de la velocidad de enfriamiento y la dureza obtenida en la sección transversal de cada muestra tratada.

A continuación se muestra para cada material la secuencia de tratamientos térmicos generada. Se inicia con tratamientos de recocido, normalizado (enfriamiento al aire), normalizado y posterior revenido a temperatura de 232°C durante 15 minutos, normalizado y posterior revenido a temperatura de 650°C durante 30 minutos, temple en agua desde una temperatura de 860°C, y finalmente, temple en aceite desde 860°C seguido de un revenido durante una hora a 650°C.

## **Metalografías Muestra F1-M1**

En la tabla 7 se muestra la secuencia de tratamientos térmicos realizados con el fin de determinar la microestructura de las varillas.

En las metalografías contenidas en la tabla 7 se puede observar el efecto que tiene la velocidad de enfriamiento sobre la morfología, tamaño y distribución que tienen las fases obtenidas a temperatura ambiente. A medida que la velocidad de enfriamiento es menor la microestructura presenta como microconstituyentes las fases ferrita proeutectoide y perlita con granos bien definidos. La muestra normalizada y revenida a 232°C presenta un endurecimiento secundario promovido por la formación de carburos duros y frágiles en los límites de grano de la austenita madre, las muestras recocidas presentan valores de dureza muy similares a los obtenidos en las muestras normalizadas, normalizadas y revenidas a 650°C.

Las muestras obtenidas en la condición inicial, es decir, con tratamiento térmico de normalizado y revenido, presentan una microestructura compuesta por ferrita, perlita, y carburos agrupados. En la figura 22 se muestra la micrografía correspondiente a la muestra F1-M1 recibida en condición de suministro.

Figura 22. Metalografía varilla F1-M1 condición normalizado y revenido según información del fabricante (fase I) 500 aumentos

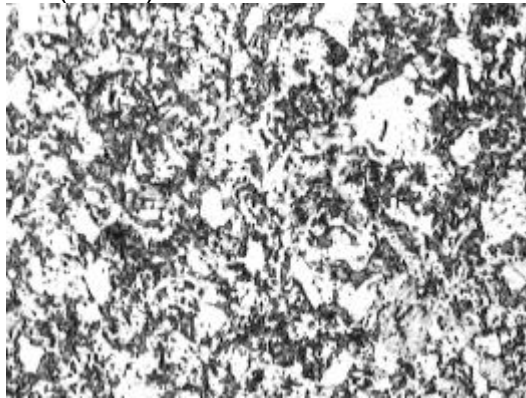
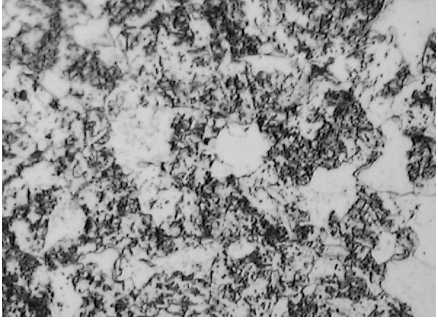
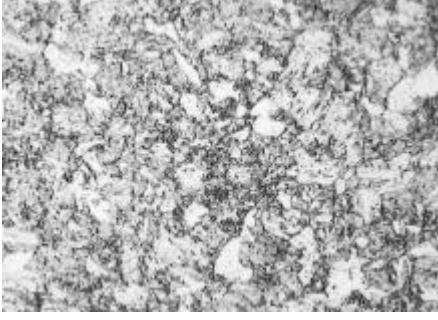
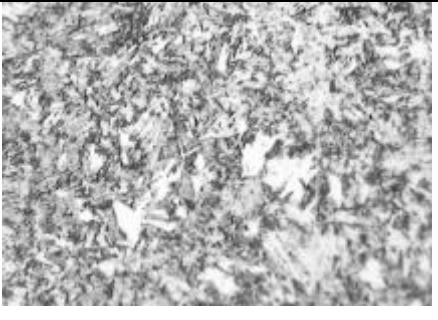
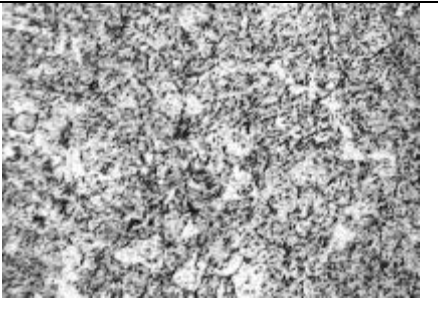
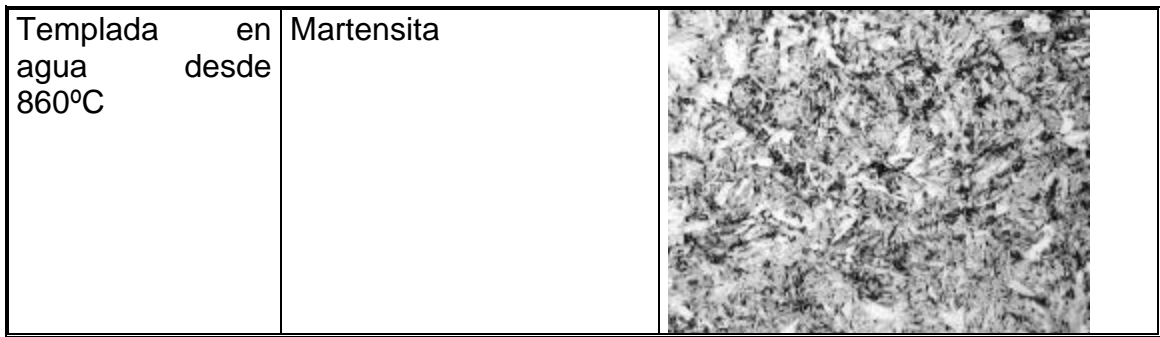


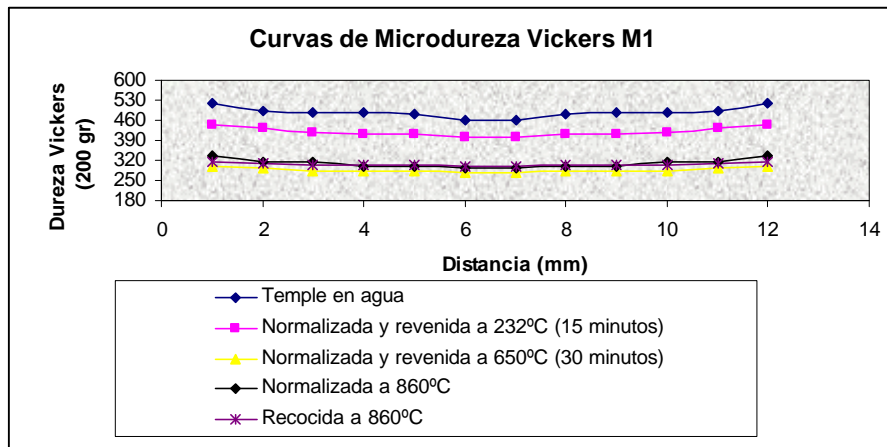
Tabla 7. Secuencia de tratamientos térmicos realizados para F1-M1.

Condiciones de tratamiento	Microestructura	Micrografía
Recocido desde una temperatura de 860°C. 500 aumentos	La muestra presenta una microestructura compuesta por granos de ferrita proeutectoide y perlita gruesa	
Normalizada desde una temperatura de 860°C 500 aumentos	La muestra presenta una microestructura compuesta por granos de ferrita, y finos carburos dispersos.	
Normalizada y revenido a 232°C 500 aumentos	La muestra presenta una microestructura compuesta por ferrita con formación acicular y finos carburos dispersos.	
Normalizada y revenido a 650°C 500 aumentos	La muestra presenta una microestructura compuesta por ferrita, y finos carburos	



En la figura 23 se muestran los perfiles de dureza obtenidos en la secuencia de caracterización metalografica desarrollada.

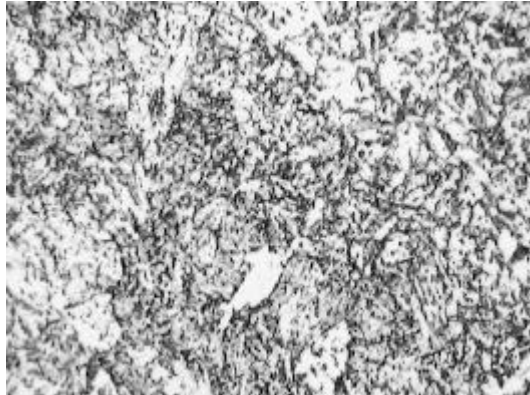
Figura 23. Curvas de microdurezas a diferentes tratamientos térmicos.



### Metalografias muestra F2-M2

En la figura 24 se muestra la metalografía correspondiente a esta muestra en condición de suministro. El material presenta en su sección transversal una microestructura compuesta por ferrita, perlita, y carburos finos dispersos.

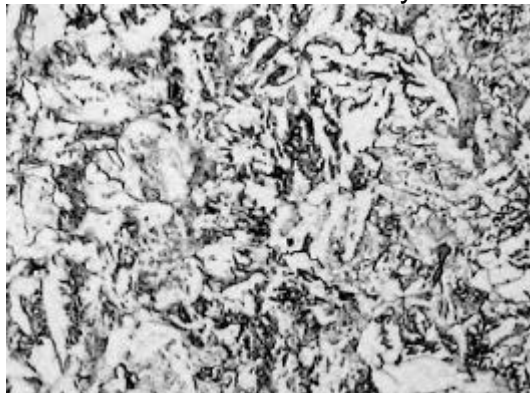
Figura 24. Metalografía varilla F2-M2 Normalizado y revenido según información del fabricante. 500 aumentos.



### **Metalografías muestra F3-M3**

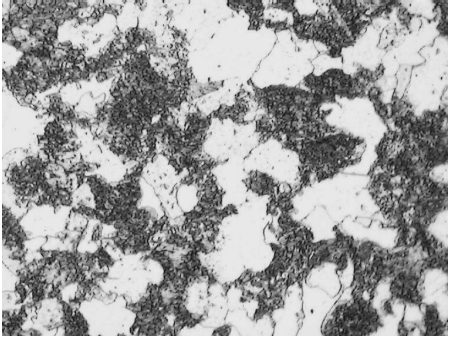
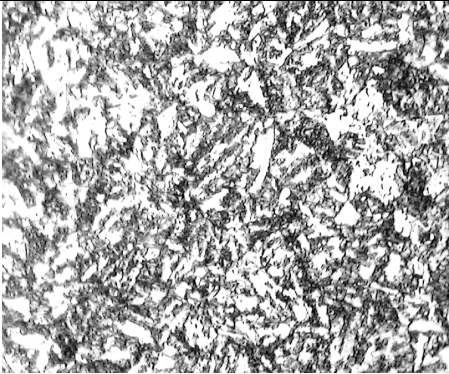


En la figura 25 se muestra la metalografía correspondiente a la muestra F3-M3 en condición de suministro. El material presentó en su sección transversal ferrita, carburos y agregados de perlita.

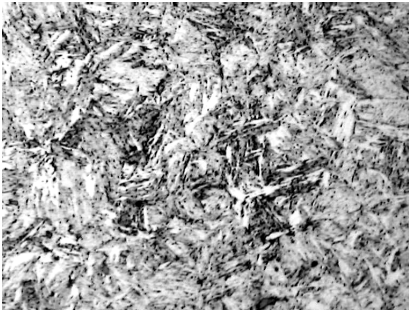
Figura 25. Metalografía varilla F3-M3 normalizada y revenida. 500 aumentos



En la tabla 8 se muestra la secuencia de tratamientos térmicos desarrollados para la determinación del tipo de microestructura.

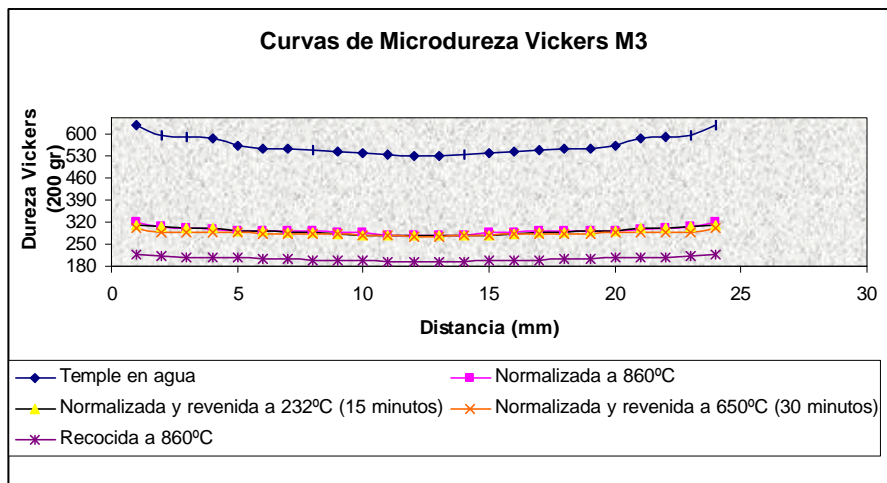
Tabla 8. Secuencia de tratamientos térmicos realizados para F2-M2.

<b>Condiciones de tratamiento</b>	<b>Microestructura</b>	<b>Micrografía</b>
Recocido desde una temperatura de 860°C. 500 aumentos	El material presenta en su sección transversal una microestructura compuesta por granos de ferrita, y perlita.	
Normalizada desde una temperatura de 860°C 500 aumentos	El material presenta en su sección transversal una microestructura compuesta por ferrita acicular, y carburos.	
Normalizada y revenido a 232°C 500 aumentos	El material presenta en su sección transversal una microestructura compuesta por ferrita acicular, y carburos.	
Normalizada y revenido a 650°C durante 30 minutos 500 aumentos	El material presenta en su sección transversal una microestructura compuesta por ferrita acicular, y carburos.	

Templada en agua desde 860°C	El material presenta en su sección transversal una microestructura compuesta por martensita y carburos.	
------------------------------	---	--

En la figura 26 se muestran los perfiles de dureza obtenidos.

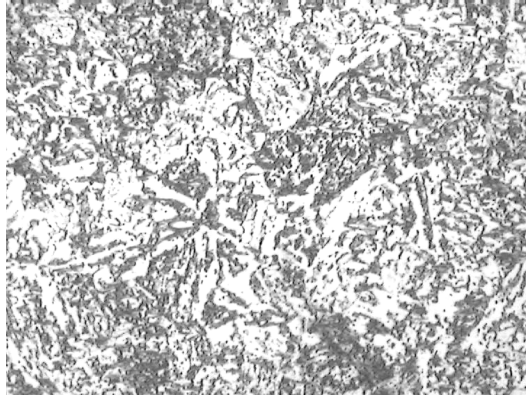
Figura 26. Curvas de dureza muestras F3-M3 a diferentes tratamientos térmicos.



### Metalografías Muestra F1-M4

En la figura 27 se muestra la metalografía obtenida en la condición de suministro. La microestructura esta compuesta por granos de ferrita, perlita, y carburos.

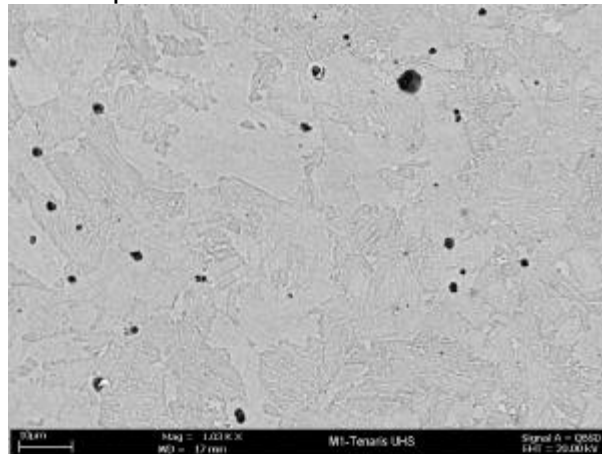
Figura 27. Metalografía varilla F1-M4 normalizada y revenida. 500 aumentos



### 10.5.1 Evaluación por SEM de las metalografías en condición de normalizado y revenido Fase I.

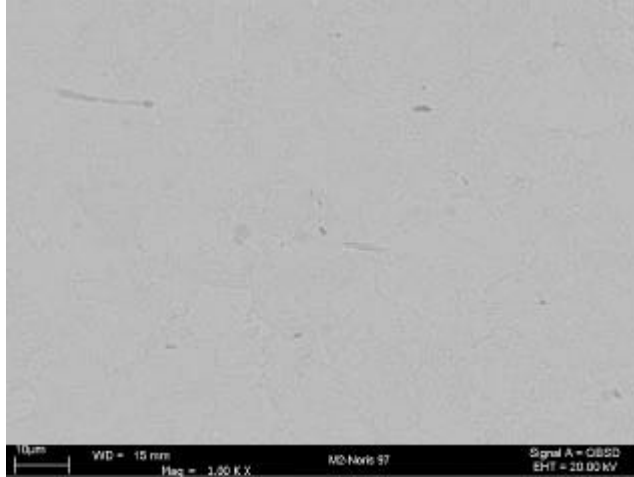
A continuación se muestran las microestructuras presentes en las muestras M1, M2, M3, M4 en condición de tratamiento térmico de normalizado y revenido (condición de suministro) según información suministrada por el fabricante.

Figura 28. Microestructura por SEM de muestra F1-M1.



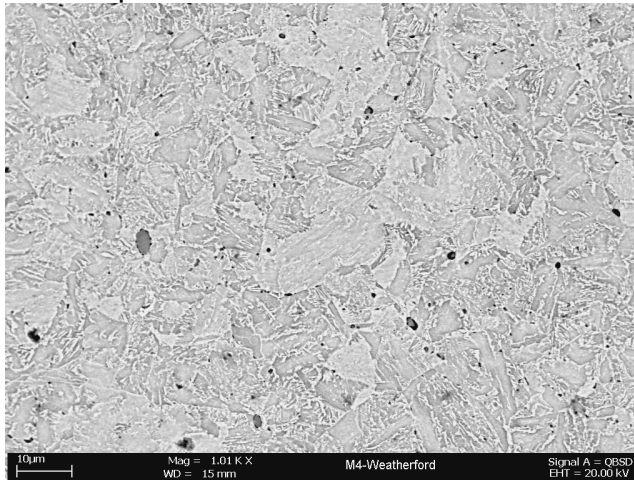
La microestructura a 1000 aumentos presenta ferrita, formaciones de perlita y carburos.

Figura 29. Microestructura por SEM de muestra F2-M2.



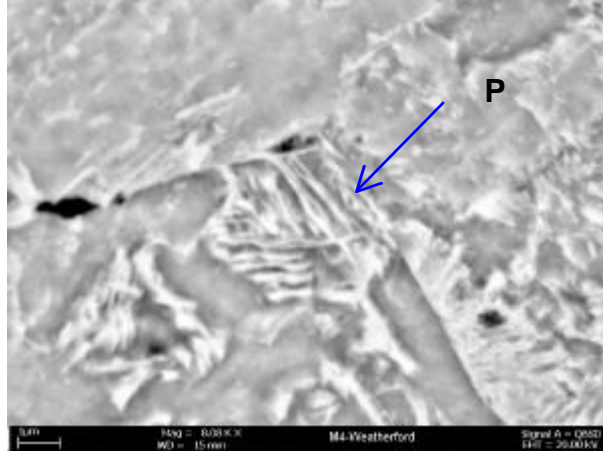
La microestructura a 1000 aumentos presenta ferrita, formaciones de perlita y carburos.

Figura 30. Microestructura por SEM de muestra F3-M3.



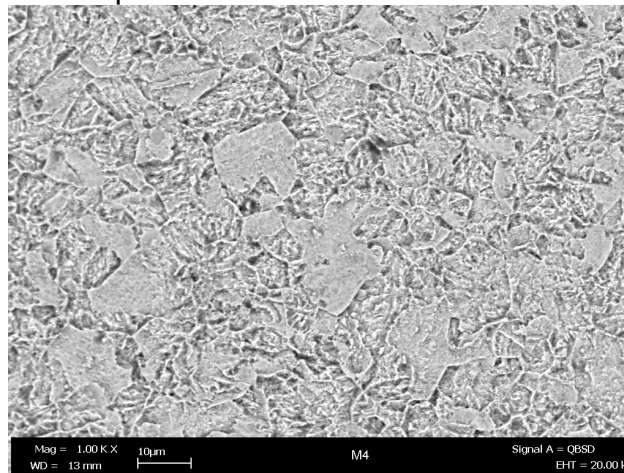
La microestructura a 1000 aumentos presenta ferrita, formaciones de perlita y carburos.

Figura 31. Microestructura por SEM de muestra F3-M3.



La microestructura a 8000 aumentos presenta una morfología tipo perlita.

Figura 32. Microestructura por SEM de muestra F1-M4.



La microestructura por SEM de la muestra presenta como fases la ferrita, perlita y carburos. La fase de ferrita presenta granos definidos del orden de 20 micras.

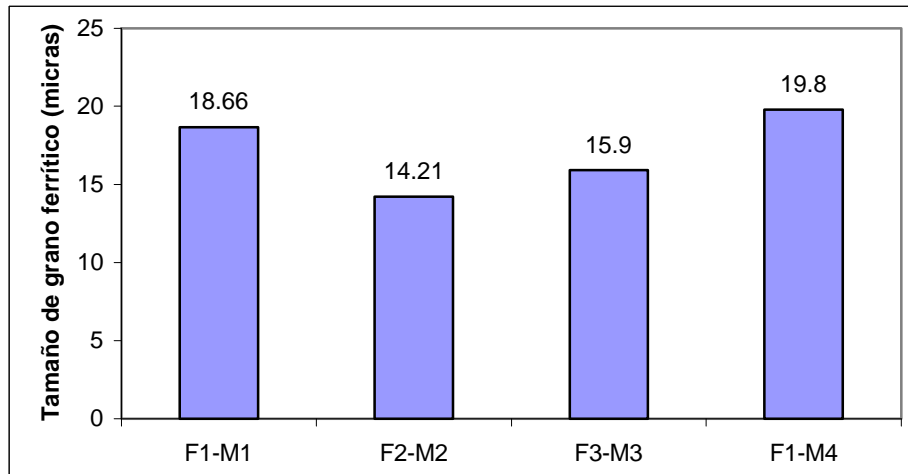
### 10.5.2 Determinación del tamaño de grano ferrítico

En la figura 33 se muestran los datos obtenidos para el cálculo del tamaño de grano ferrítico en las muestras recibidas, en condiciones de tratamiento térmico de normalizado y revenido. Debido a la estructura fina presente en la fase ferrítica de las muestras evaluadas se hizo necesario determinar el tamaño de grano mediante microscopía de barrido electrónico.

Estas mediciones se realizaron en el laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido del Instituto Colombiano del Petróleo, ICP.

En estas muestras se observó en su microestructura como fases: mezclas de ferrita, perlita y carburos.

Figura 33. Tamaño de grano ferrítico.



### 10.5.3 Análisis de inclusiones de los materiales recibidos en condiciones normalizado y revenido

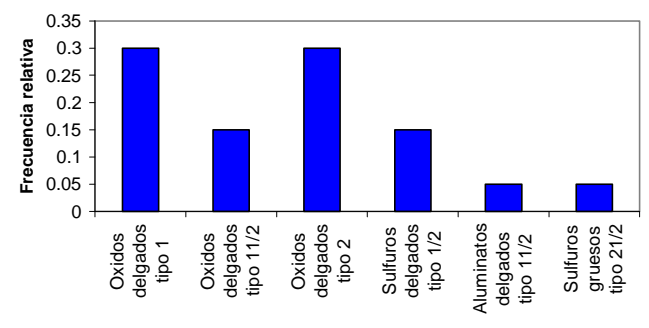

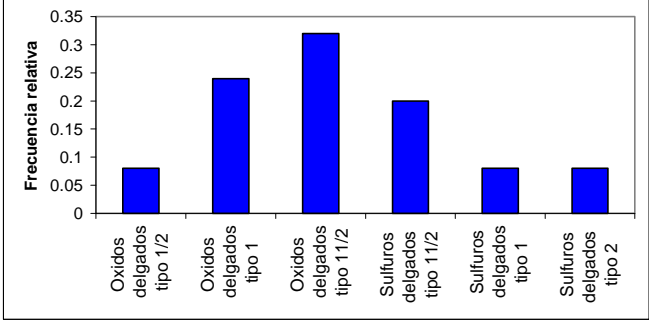

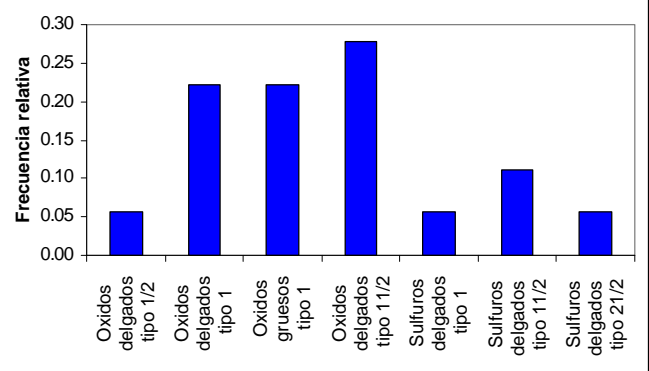

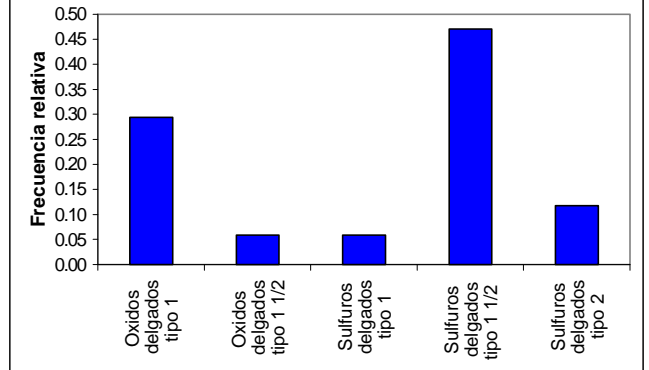

El análisis de inclusiones fue desarrollado a partir de las especificaciones de la norma ASTM E 45.

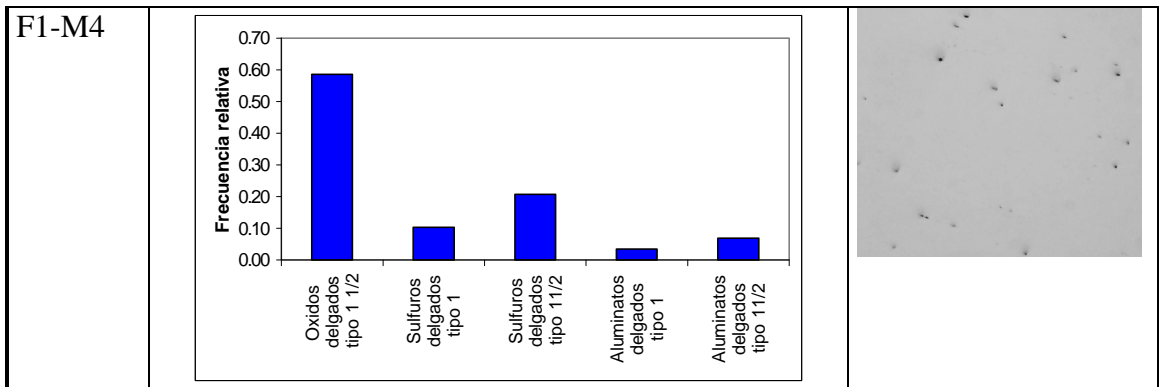
Se tomaron muestras a 4 mm de la superficie exterior de cada varilla. El objetivo final e este muestreo es determinar los tipos, formas, serie y clasificación que se tienen en cada una de las muestras evaluadas.

Él muestreo se realizó lo mas cercano a la superficie exterior de la varilla con el fin de determinar los tipos, tamaños y formas de las inclusiones que posiblemente funcionen como sitios de iniciación de las microgrietas por fatiga.

En la tabla 9 se muestran los resultados obtenidos junto con el registro de las inclusiones tomadas a 100 aumentos sin ataque químico.

Tabla 9. Inclusiones tipo, forma.

Muestra	Tipo de inclusiones	Micrografia																
F1-M1	 <table border="1" data-bbox="456 321 1101 646"> <caption>Data for F1-M1 Bar Chart</caption> <thead> <tr> <th>Tipo de inclusiones</th> <th>Frecuencia relativa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Oxidos delgados tipo 1</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>Oxidos delgados tipo 1 1/2</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>Oxidos delgados tipo 2</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>Sulfuros delgados tipo 1/2</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>Aluminatos delgados tipo 1 1/2</td> <td>0.05</td> </tr> <tr> <td>Sulfuros gruesos tipo 2 1/2</td> <td>0.05</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de inclusiones	Frecuencia relativa	Oxidos delgados tipo 1	0.30	Oxidos delgados tipo 1 1/2	0.15	Oxidos delgados tipo 2	0.30	Sulfuros delgados tipo 1/2	0.15	Aluminatos delgados tipo 1 1/2	0.05	Sulfuros gruesos tipo 2 1/2	0.05			
Tipo de inclusiones	Frecuencia relativa																	
Oxidos delgados tipo 1	0.30																	
Oxidos delgados tipo 1 1/2	0.15																	
Oxidos delgados tipo 2	0.30																	
Sulfuros delgados tipo 1/2	0.15																	
Aluminatos delgados tipo 1 1/2	0.05																	
Sulfuros gruesos tipo 2 1/2	0.05																	
F2-M2	 <table border="1" data-bbox="456 678 1101 1003"> <caption>Data for F2-M2 Bar Chart</caption> <thead> <tr> <th>Tipo de inclusiones</th> <th>Frecuencia relativa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Oxidos delgados tipo 1/2</td> <td>0.08</td> </tr> <tr> <td>Oxidos delgados tipo 1</td> <td>0.24</td> </tr> <tr> <td>Oxidos delgados tipo 1 1/2</td> <td>0.32</td> </tr> <tr> <td>Sulfuros delgados tipo 1 1/2</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>Sulfuros delgados tipo 1</td> <td>0.08</td> </tr> <tr> <td>Sulfuros delgados tipo 2</td> <td>0.08</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de inclusiones	Frecuencia relativa	Oxidos delgados tipo 1/2	0.08	Oxidos delgados tipo 1	0.24	Oxidos delgados tipo 1 1/2	0.32	Sulfuros delgados tipo 1 1/2	0.20	Sulfuros delgados tipo 1	0.08	Sulfuros delgados tipo 2	0.08			
Tipo de inclusiones	Frecuencia relativa																	
Oxidos delgados tipo 1/2	0.08																	
Oxidos delgados tipo 1	0.24																	
Oxidos delgados tipo 1 1/2	0.32																	
Sulfuros delgados tipo 1 1/2	0.20																	
Sulfuros delgados tipo 1	0.08																	
Sulfuros delgados tipo 2	0.08																	
F2-M2N	 <table border="1" data-bbox="456 1035 1101 1402"> <caption>Data for F2-M2N Bar Chart</caption> <thead> <tr> <th>Tipo de inclusiones</th> <th>Frecuencia relativa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Oxidos delgados tipo 1/2</td> <td>0.05</td> </tr> <tr> <td>Oxidos delgados tipo 1</td> <td>0.22</td> </tr> <tr> <td>Oxidos gruesos tipo 1</td> <td>0.22</td> </tr> <tr> <td>Oxidos delgados tipo 1 1/2</td> <td>0.28</td> </tr> <tr> <td>Sulfuros delgados tipo 1</td> <td>0.05</td> </tr> <tr> <td>Sulfuros delgados tipo 1 1/2</td> <td>0.11</td> </tr> <tr> <td>Sulfuros delgados tipo 2 1/2</td> <td>0.05</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de inclusiones	Frecuencia relativa	Oxidos delgados tipo 1/2	0.05	Oxidos delgados tipo 1	0.22	Oxidos gruesos tipo 1	0.22	Oxidos delgados tipo 1 1/2	0.28	Sulfuros delgados tipo 1	0.05	Sulfuros delgados tipo 1 1/2	0.11	Sulfuros delgados tipo 2 1/2	0.05	
Tipo de inclusiones	Frecuencia relativa																	
Oxidos delgados tipo 1/2	0.05																	
Oxidos delgados tipo 1	0.22																	
Oxidos gruesos tipo 1	0.22																	
Oxidos delgados tipo 1 1/2	0.28																	
Sulfuros delgados tipo 1	0.05																	
Sulfuros delgados tipo 1 1/2	0.11																	
Sulfuros delgados tipo 2 1/2	0.05																	
F3-M3	 <table border="1" data-bbox="456 1434 1101 1801"> <caption>Data for F3-M3 Bar Chart</caption> <thead> <tr> <th>Tipo de inclusiones</th> <th>Frecuencia relativa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Oxidos delgados tipo 1</td> <td>0.29</td> </tr> <tr> <td>Oxidos delgados tipo 1 1/2</td> <td>0.06</td> </tr> <tr> <td>Sulfuros delgados tipo 1</td> <td>0.06</td> </tr> <tr> <td>Sulfuros delgados tipo 1 1/2</td> <td>0.47</td> </tr> <tr> <td>Sulfuros delgados tipo 2</td> <td>0.12</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de inclusiones	Frecuencia relativa	Oxidos delgados tipo 1	0.29	Oxidos delgados tipo 1 1/2	0.06	Sulfuros delgados tipo 1	0.06	Sulfuros delgados tipo 1 1/2	0.47	Sulfuros delgados tipo 2	0.12					
Tipo de inclusiones	Frecuencia relativa																	
Oxidos delgados tipo 1	0.29																	
Oxidos delgados tipo 1 1/2	0.06																	
Sulfuros delgados tipo 1	0.06																	
Sulfuros delgados tipo 1 1/2	0.47																	
Sulfuros delgados tipo 2	0.12																	



#### 10.5.4. Identificación por SEM de la composición elemental de las Inclusiones presentes en las muestras recibidas

A continuación se describe a escala microscópica los diferentes tipos de inclusiones presentes en las muestras con su respectiva evaluación de composición química elemental, el espectro de elementos obtenidos en cada evaluación determina un parámetro para establecer el tipo de inclusión o impureza obtenida, pero no se puede obtener el tipo de compuesto químico, sin embargo, a partir de esta evaluación se puede predecir una posible fórmula relacionada al compuesto químico determinado.

#### Muestra F1-M1

En las figuras 34 – 37 se resumen los espectros elementales obtenidos para la muestras

Figura 34. Espectro composición química muestra F1-M1.

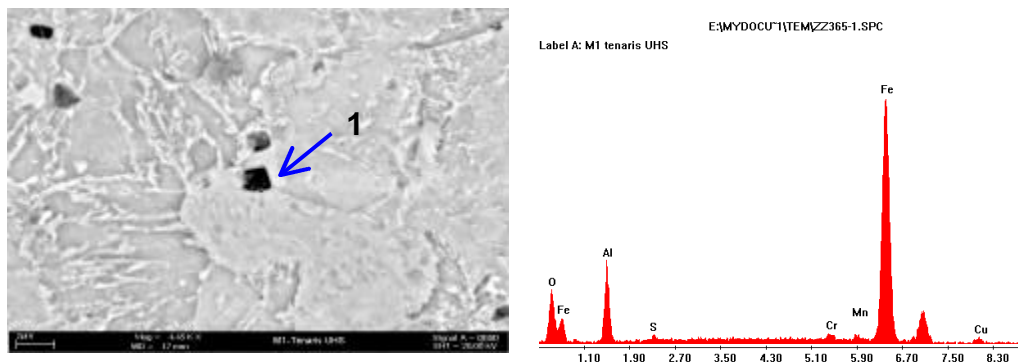
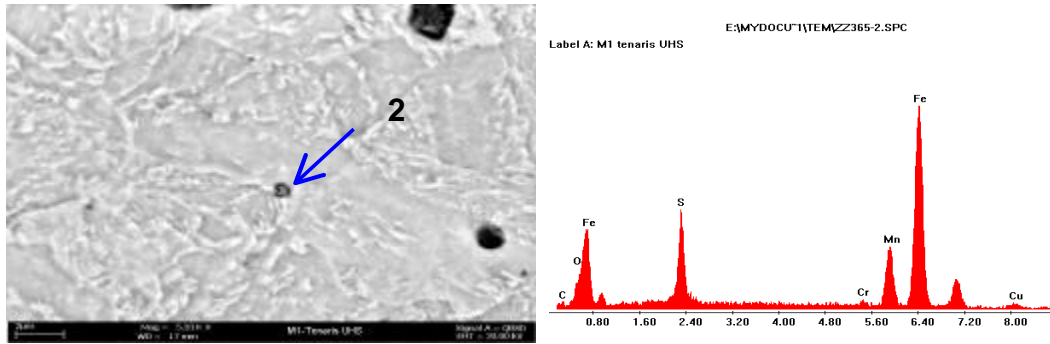


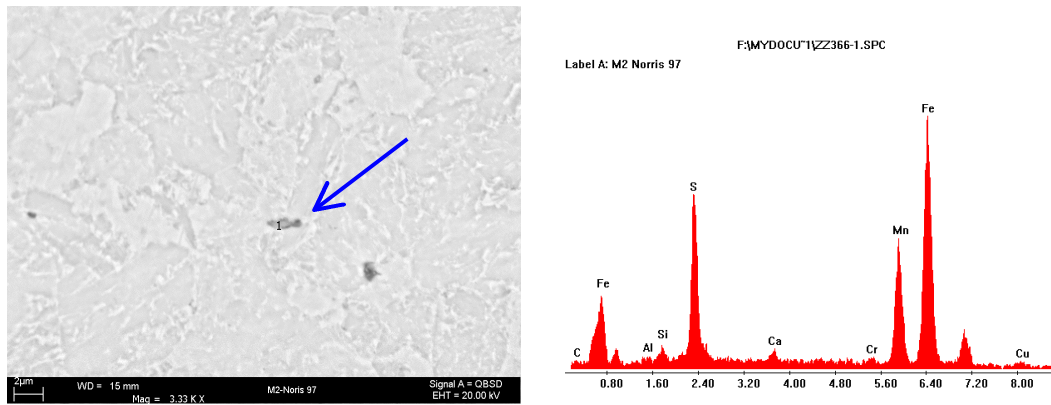
Figura 35. Espectro composición química muestra F1-M1.



Las inclusiones según su composición química elemental evaluadas son principalmente óxidos de aluminio y sulfuros de manganeso.

### Muestra F2-M2

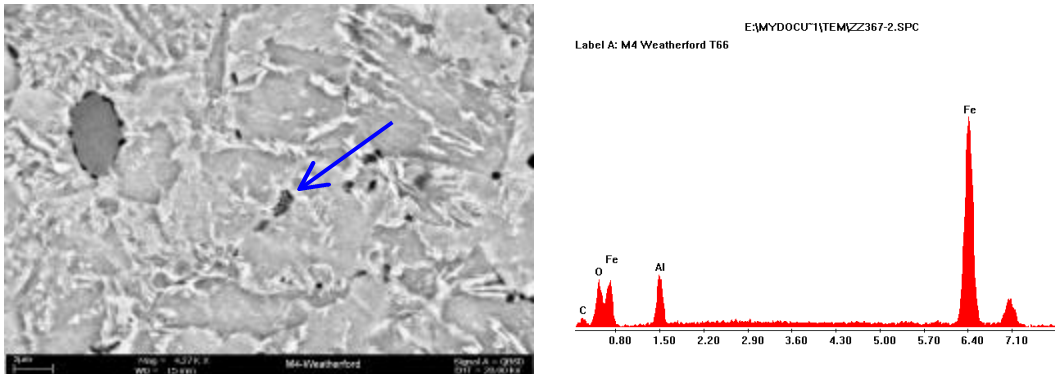
Figura 36. Espectro composición química muestra F2-M2.



La inclusión presenta una composición elemental típica para un sulfuro de manganeso.

### Muestra F3-M3

Figura 37. Espectro composición química muestra F3-M3.



Las inclusiones presentes son óxidos de hierro, aluminio y sulfuros de manganeso.

En la tabla 10 se resumen los diferentes barridos de composición química realizados sobre cada muestra, anotando la posible naturaleza del tipo de compuesto químico.

Las inclusiones según su composición química elemental evaluadas son principalmente óxidos de aluminio, hierro y sulfuros de manganeso.

Tabla 10. Barridos de composición química elemental.

Naturaleza de la evaluación	%C	%Fe	%Mn	%Cu	%Cr	%Ni	%S	%O	%Al	Análisis
<b>Muestra F1-M1</b>										
Barrido gral	2.73	94.76	1.85		0.65					Composición material
Puntual		18.46	28	37.1	7		67	34.33	8.15	Oxidos de aluminio, hierro, y sulfuros de manganeso
Puntual	4.47	56.89	14.18	2.83	0.88		9.48	11.28		Oxidos de hierro, y sulfuros de manganeso
<b>Muestra F2-M2</b>										
Barrido gral	4.54	91.72	1.03		0.8	1.91				Composición material
Puntual	3.72	52.98	22.28	2.33	0.87		14.73		0.72	Sulfuros de manganeso
Puntual	4.42	79.15	1.45	2.63	1.88			10.55	2.63	Oxidos de hierro y aluminio
<b>Muestra F3-M3</b>										
Barrido gral	11.85	85.95	1.35		0.85					Composición material
Puntual	6.34	66.23	16.80				10.63			Sulfuros de manganeso
Puntual	4.63	71.05						15.53	9.06	Oxidos de hierro y aluminio.

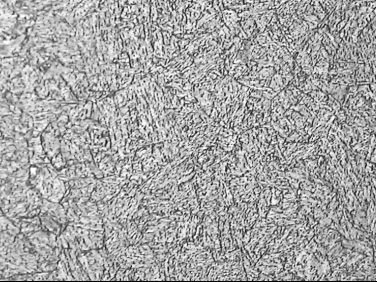
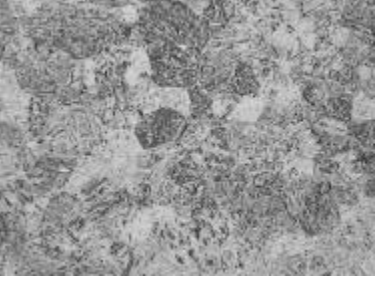
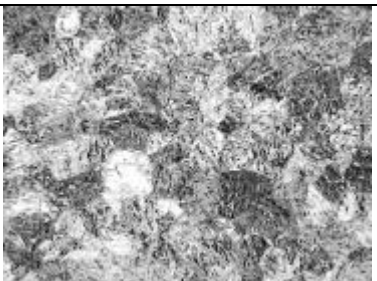
### 10.5.5 Determinación del tamaño de grano austenítico anterior.

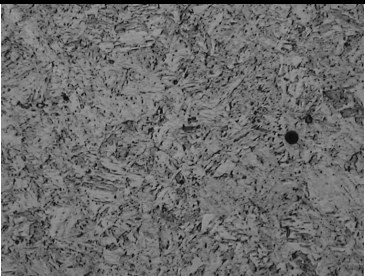
Otro rasgo microestructural para analizar es la determinación del tamaño de grano austenítico anterior. A continuación se muestran los tamaños de granos de la austenita madre obtenidos junto con su clasificación según la norma ASTM E112.

Se puede decir a partir de los datos obtenidos que a medida que se disminuye este tamaño de grano el nivel de propiedades mecánicas tiende a aumentar, esto se visualiza en los resultados obtenidos en la evaluación mecánica de la siguiente sección.

En la tabla 11 se muestran estos resultados del tamaño de grano de la austenita madre.

Tabla 11. Tamaños de grano austenítico anterior.

Condiciones de tratamiento	Tamaño de grano ASTM E 112 (96- R04).	Micrografía
Tomado con un temple en aceite desde 860°C y revenido durante 15 minutos a 400°C	TGAA = 8 $\phi_p = 22.5 \mu\text{m}$	
Tomado con un temple en aceite desde 860°C y revenido durante 15 minutos a 400°C	TGAA = 4-6 (Mayor concentración en 5). $\phi_p = 63.5 \mu\text{m}$	
Tomado con un temple en aceite desde 860°C y revenido durante 15 minutos a 400°C	TGAA = 4-6 (Mayor concentración en 5). $\phi_p = 63.5 \mu\text{m}$	

<p>Tomado con un temple en aceite desde 860°C y revenido durante 30 minutos a 450°C</p>	<p>TGAA = 7 <math>\phi_p = 31.8 \mu\text{m}</math></p>	
---	--	---

## 10.6 Caracterización mecánica fase I.

A continuación se muestra los datos obtenidos a partir de las evaluaciones mecánicas realizadas a las muestras en condición de suministro, es decir, los materiales evaluados en los ensayos tienen tratamientos de normalizado y revenido. Estos ensayos fueron realizados bajo las especificaciones de la norma ASTM A 370-02<sup>38</sup>

### 10.6.1 Niveles de dureza

A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir del ensayo de dureza realizado a las muestras recibidas. Este ensayo se desarrolla bajo las especificaciones de la norma ASTM E 10 – 01<sup>39</sup>. En la tabla 12 se muestran los resultados obtenidos a partir de los ensayos de dureza.

Tabla 12. Dureza Brinell para las muestras evaluadas.

Dureza/Muestra	F1-M1	F2-M2	F3-M3	F1-M4
Promedio HBN	335.6	310.2	287	316
Desviación standard	4.77	3.63	2.82	7.27

### 10.6.2 Curvas U

Para trazar las curvas para los materiales en condición de normalizado y revenido se tomaron 4 indentaciones de dureza Vickers siguiendo las especificaciones de la norma ASTM E 92 – 92<sup>40</sup>. En las figuras 38 a 41 se muestran las curvas “ U “ para los materiales evaluados, correspondientes a aceros grado AISI – SAE 4330 modificado y 4138 modificado.

Los valores obtenidos en los ensayos de dureza a las muestras evaluadas permiten establecer que las propiedades mecánicas del material en su sección transversal son considerablemente constantes y los valores obtenidos a partir del ensayo de tensión pueden ser tomados como representativos del material a evaluar.

Figura 38. Curva U muestra F1-M1.

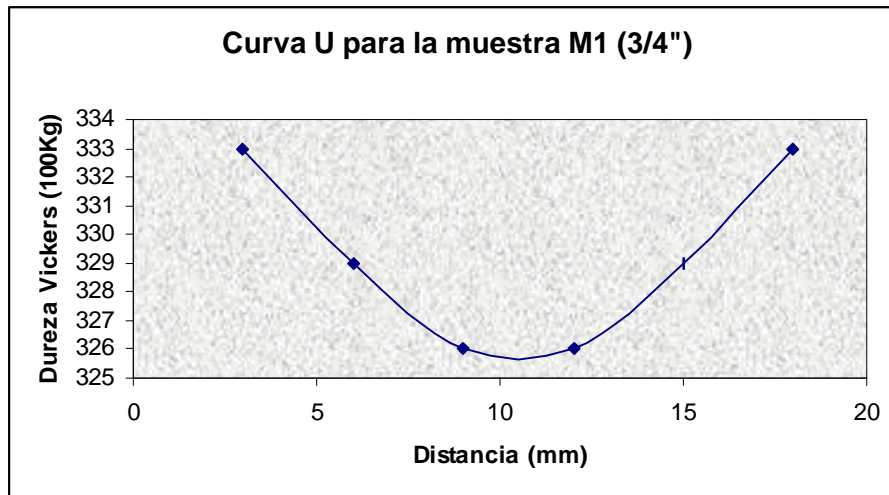


Figura 39. Curva U muestra F2-M2.

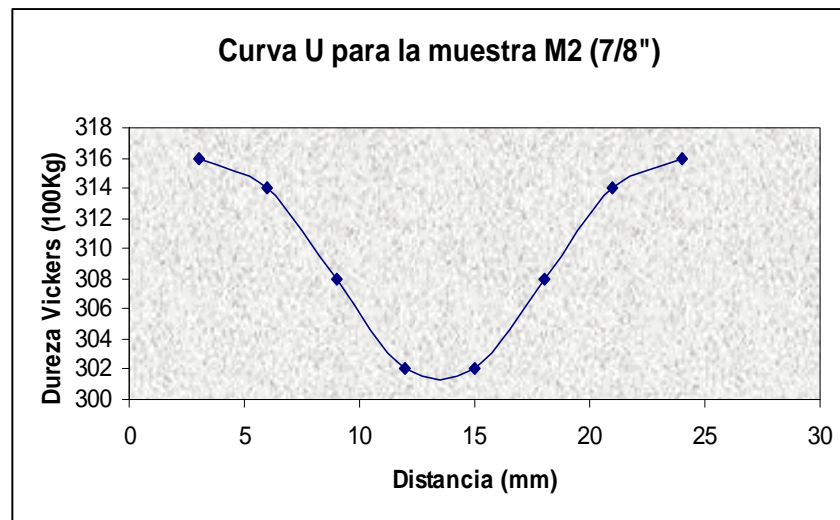


Figura 40. Curva U muestra F3-M3.

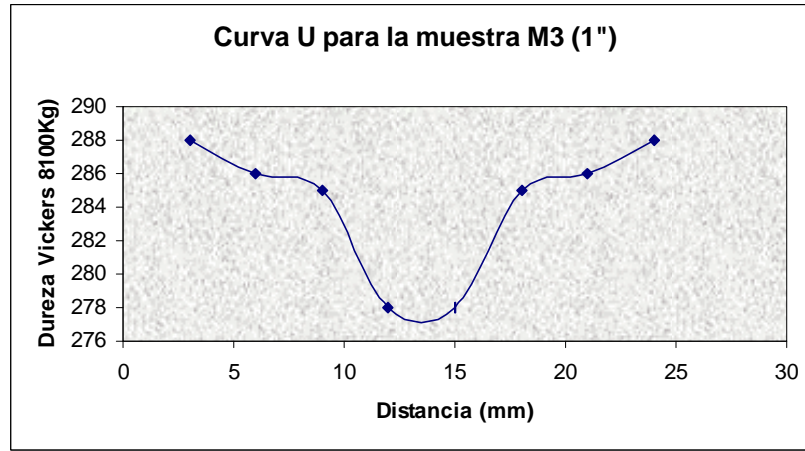
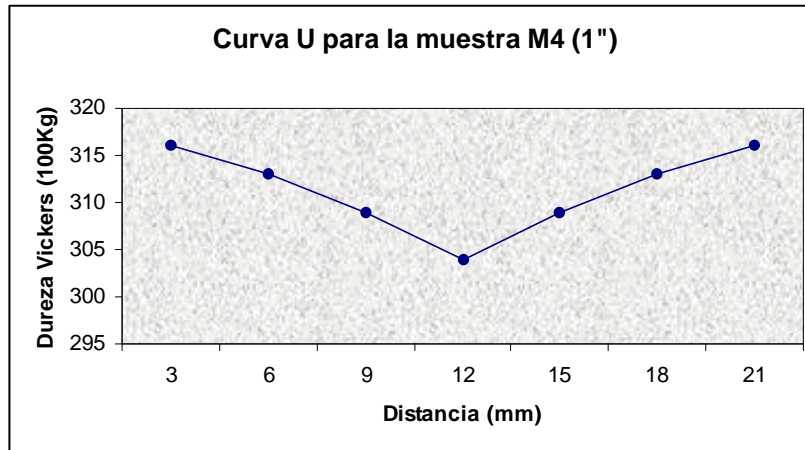


Figura 41. Curva U muestra F1-M4.



### 10.6.3 Ensayos de tensión

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de tensión realizados a los materiales recibidos, con tratamientos térmicos de normalizado y revenido según información suministrada por el fabricante. Este ensayo de tensión fue desarrollado bajo las especificaciones de la norma ASTM A370- 02, E 8 – 01<sup>41</sup>.

Tabla 13. Resultados propiedades mecánicas (ensayo de tensión).

Muestra	UTS		Ys		% e (50 mm)	n
	(Mpa)	(ksi)	(Mpa)	(ksi)		
F1-M1.1	1060.91	153.83	929.75	134.81	15.20	0.0100
F1-M1.2	1067.96	154.85	928.67	134.66	20.60	0.0099
F2-M2.1	971.47	140.86	820.65	118.99	16.60	0.0121
F2-M2.2	981.11	142.26	830.68	120.45	16.80	0.0086
F3-M3.1	918.80	133.23	724.53	105.06	15.16	0.0123
F3-M3.2	915.32	132.72	721.25	104.58	14.26	0.0123
F1-M4.1	1015.75	147.28	826.09	119.78	15.22	0.0154
<b>F1-M4.2</b>	1023.05	148.34	837.47	121.43	15.00	0.0156

Las propiedades mecánicas obtenidas para todas las muestras exceptuando la muestra F3-M3 cumplen con las especificaciones establecidas por los fabricantes, para la muestra F3-M3 las propiedades mecánicas de resistencia a la fluencia y resistencia mecánica están alrededor de 10 ksi por debajo de las especificaciones dadas por el fabricante de este tipo de varillas. Los resultados obtenidos en el ensayo de tensión están de acuerdo con las durezas obtenidas para cada material, es decir, las durezas obtenidas para cada muestra presentan una correspondencia con los datos del ensayo de tensión.

A continuación se muestran los resultados del ensayo de tensión con entalla, este ensayo se determina bajos las especificaciones de la norma ASTM E 602.

Tabla 14. Ensayo de tensión con entalla.

Muestra	Ys	s <sub>s</sub>	s <sub>s</sub> / Ys	NSR
	(MPa)	(MPa)	NSR	Promedio
F1-M1.1	929.75	1613.85	1.74	1.71
F1-M1.2	928.67	1565.20	1.69	
F2-M2.1	820.65	1566.02	1.91	1.90
F2-M2.2	830.68	1576.86	1.90	
F3-M3.1	724.53	1370.92	1.89	1.89
F3-M3.2	721.25	1356.72	1.88	
F1-M4.1	826.09	1468.51	1.78	1.71
F1-M4.2	837.47	1372.35	1.64	

NSR = Relación entre resistencia a la entalla y esfuerzo de fluencia.

$\sigma_s$  = resistencia a la entalla.

#### 10.6.4 Ensayos de energía de impacto.

Los ensayos de energía de impacto fueron desarrollados bajo las especificaciones de la norma ASTM E 23 – 01 <sup>42</sup>.

En la tabla 15 se muestran los resultados obtenidos para la energía absorbida realizados a temperatura ambiente.

Tabla 15. Resultados obtenidos de tenacidad al impacto.

<b>Muestra</b>	<b>CVN (lb ft)</b>	<b>CVN (Julios)</b>	<b>CVN (lb ft) promedio</b>	<b>CVN (Julios) promedio</b>
F1-M1 (3/4")	21.70	29.5	20.10	27.33
	20.23	27.5		
	18.39	25		
F2-M2 (7/8")	29.79	40.5	28.69	39
	28.32	38.5		
	27.95	38.0		
F3-M3 (1")	16.18	22	14.83	20.16
	13.24	18		
	15.08	20.5		
F1-M4 (1")	11.03	15	12.63	17.17
	13.24	18		
	13.61	18.5		

##### 10.6.4.1 Superficies de fractura de las muestras evaluadas en tenacidad al impacto, ensayo para determinar la energía de impacto, realizado según las especificaciones de la norma ASTM E 23- 01.

A continuación se muestran las superficies de fractura de cada una de las muestras evaluadas mediante el ensayo de energía de impacto.

Cada una de las superficies de fractura permite determinar el nivel de respuesta frágil o dúctil para cada material.

Figura 42. Superficies de fracturas para la muestra F1-M1



(a). Grupo de muestras evaluadas

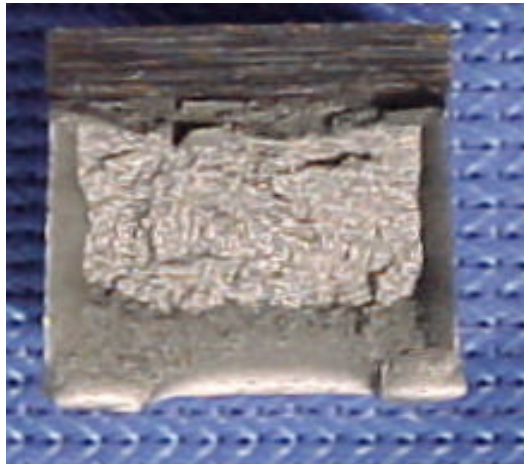


(b). Probeta con (20%) de fractura por corte.

Figura 43. Superficies de fracturas para la muestra F2-M2

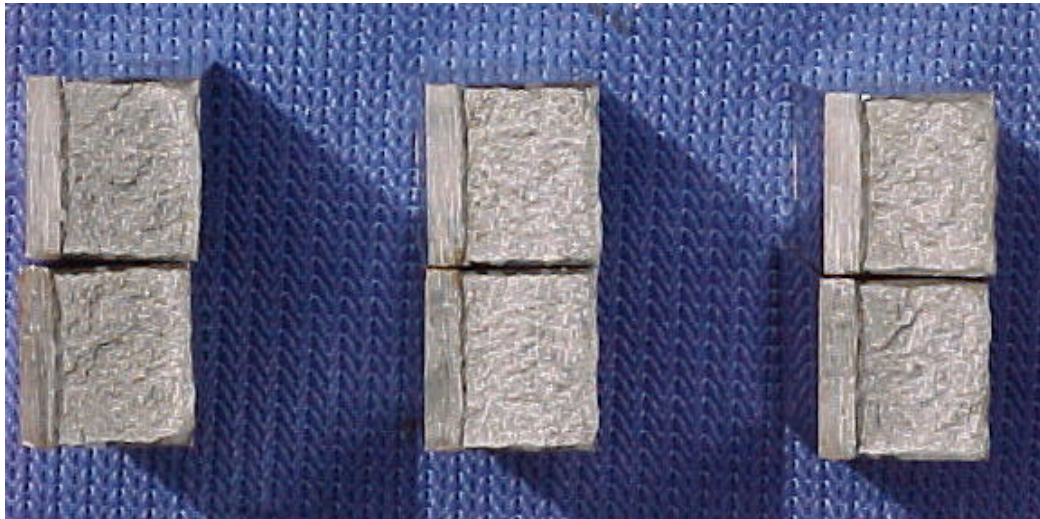


(a). Grupo de muestras evaluadas

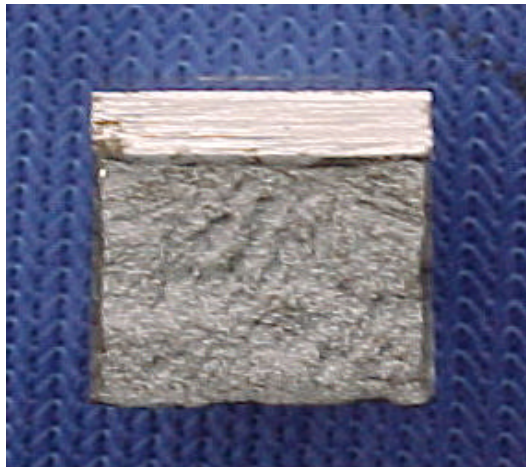


(b). Probeta con (40%) de fractura por corte.

Figura 44. Superficies de fracturas para la muestra F3-M3

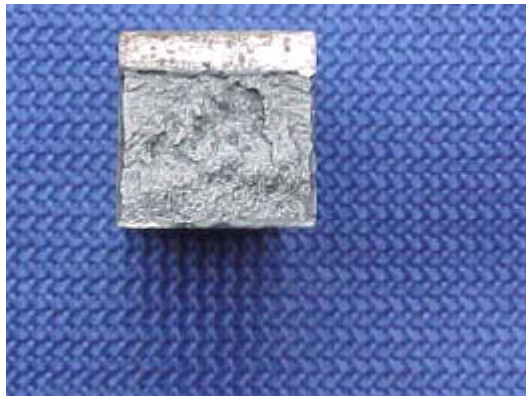


(a). Grupo de muestras evaluadas



(b). Probeta con (10%) de fractura por corte.

Figura 45. Superficies de fracturas para la muestra F1-M4



(b). Probeta con (7%) de fractura por corte.

Los valores obtenidos del porcentaje de fractura por corte están en función del nivel de tenacidad al impacto obtenido en las muestras. Para la muestra M2 (40%) se obtuvo el porcentaje de fractura por corte mas alto, seguido de la muestra M1 (20%), M3 (10%) y M4 (7%).

### 10.6.4.2 Cálculo de la tenacidad a la fractura utilizando la expresión de AULT-WALD-BERTOLO

En la tabla 16 se muestra los resultados obtenidos a partir de la expresión de Ault-Wald-Bertolo la que relaciona el valor de energía absorbida, el esfuerzo de fluencia del material, y permite determinar un estimativo de la tenacidad a la fractura en el material.

Tabla 16. Valores de tenacidad a la fractura

Muestra	Ys		CVN	K <sub>IC</sub>	
	MPa	Ksi	lbft	ksi Öin	Mpam <sup>1/2</sup>
F1-M1	928.76	134.7	20.10	53.79	59.10
F2-M2	820.50	119.0	28.69	63.56	69.83
F3-M3	721.90	104.7	14.83	40.42	44.41
F1-M4	831.60	120.61	12.63	37.84	41.57

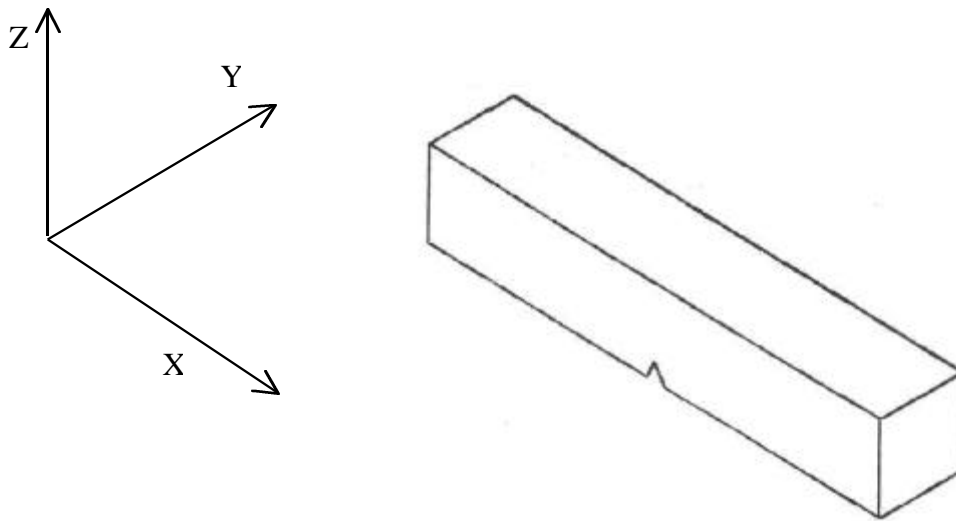
$$\left(\frac{K_{IC}}{s_y}\right)^2 = 1.37 \left(\frac{CVN}{s_y}\right)^{-0.045} \quad (30)$$

Los valores obtenidos para el calculo de la tenacidad a la fractura en orden descendente son: F2-M2, F1-M1, F3-M3 y F1-M4. A partir de la expresión de Ault-Wald-Bertolo se obtiene el efecto que presenta el valor del CVN sobre la tenacidad a la fractura. La ecuación 30 permite establecer como parametro diferenciador de tenacidad a la fractura el valor de tenacidad al impacto obtenido.

### 10.6.4.3 Metalografías probetas falladas en el ensayo de energía de Impacto.

A continuación se muestran las metalografías tomadas a las probetas evaluadas según la norma ASTM E 23-01.

Figura 46. Diagrama esquemático del muestreo de probetas para análisis de inclusiones.

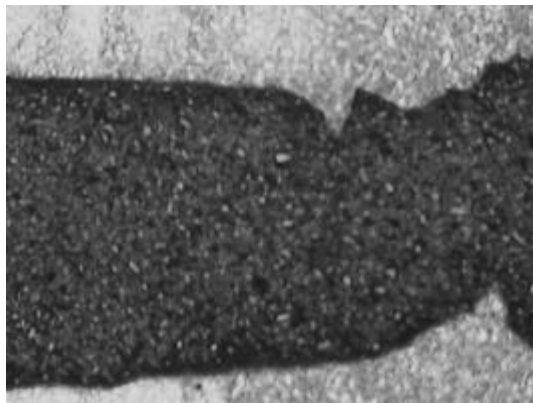


Se tomaron dos muestras a cada una de las probetas fracturadas, como se indica:

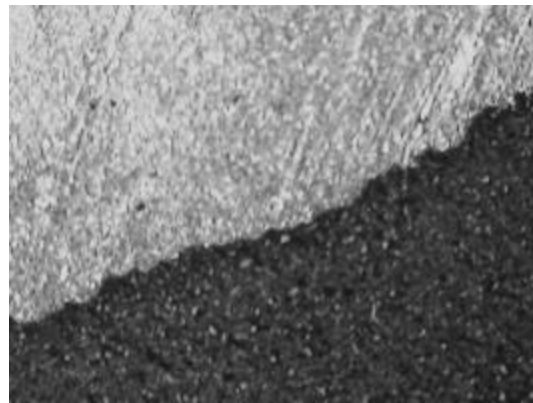
El corte en la dirección de propagación de la grieta se toma a partir de la figura 46 en la dirección YZ.

El corte en la dirección perpendicular a la propagación de la grieta se toma a partir de la figura 46 en la dirección XZ.

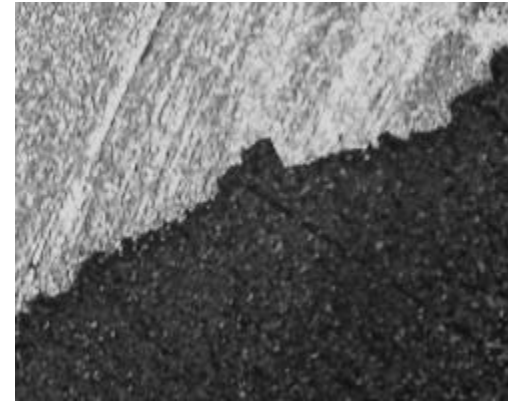
Figura 47. Superficies de fractura de las muestras evaluadas en tenacidad al impacto atacadas con nital. F1-M1



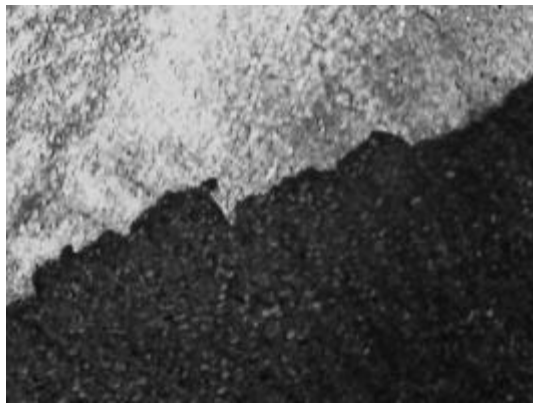
(a)



(b)



(c)

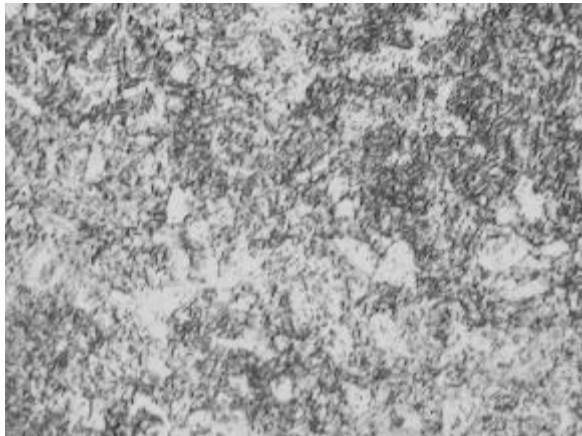
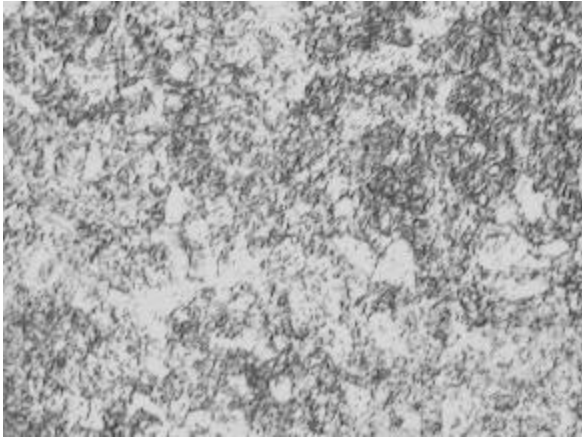


(d)



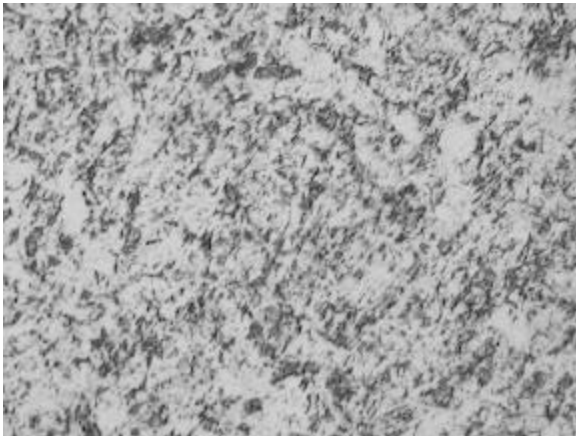
(e)

Figura 48. Superficie de fractura tomada de la muestra F1-M1 en la sección longitudinal a la dirección de propagación de la grieta en el ensayo de impacto a 500 aumentos y atacada con nital al 2 %



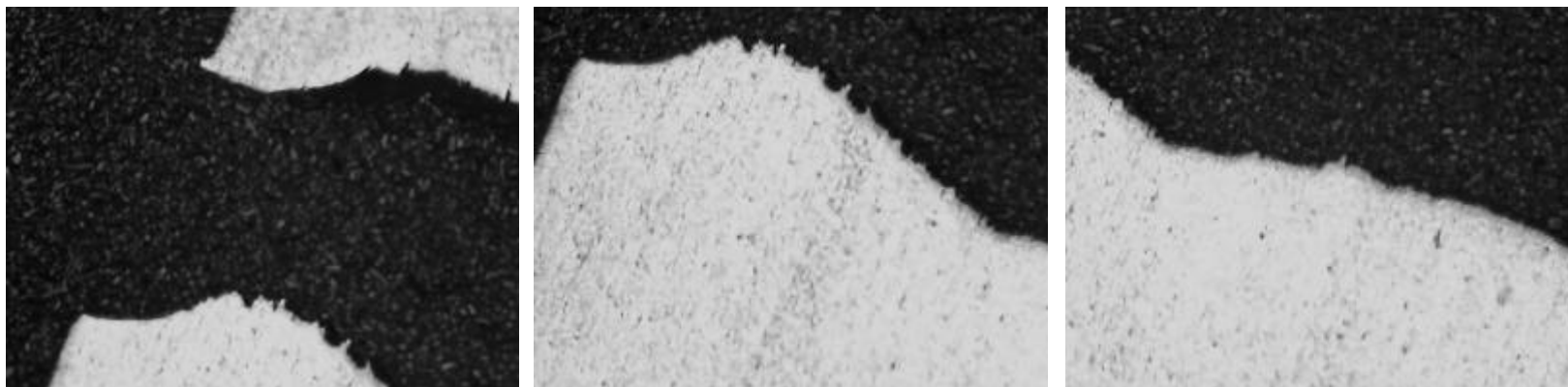
La microestructura esta compuesta por granos de ferrita, carburos y perlita.

Figura 49. Superficie de fractura tomada de la muestra F1-M1 en la sección transversal a la dirección de propagación de la grieta en el ensayo de impacto a 500 aumentos y atacada con nital al 2 %



La microestructura esta compuesta por granos de ferrita, carburos y perlita

Figura 50. Superficies de fractura (longitudinal) de la muestra F2-M2 tomada a 25 aumentos y atacada con nital al 2%



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)

Figura 51. Superficie de fractura tomada de la muestra F2-M2 en la sección longitudinal a la dirección de propagación de la grieta en el ensayo de impacto a 500 aumentos y atacada con nital al 2 %  
La microestructura esta compuesto por granos de ferrita, carburos y perlita

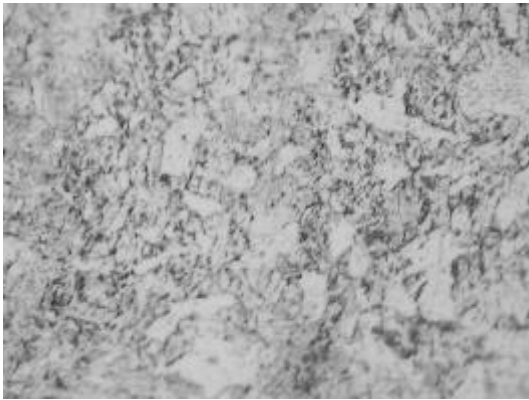
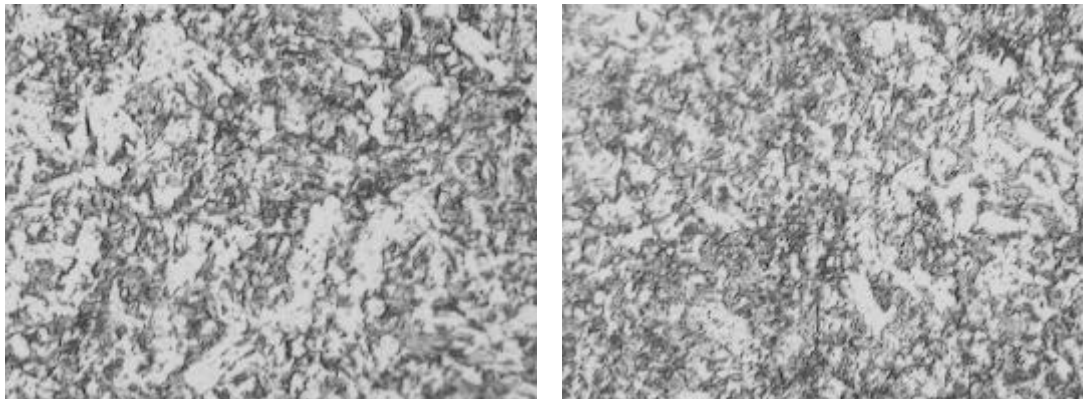


Figura 52. Superficie de fractura tomada de la muestra F2-M2 en la sección transversal a la dirección de propagación de la grieta en el ensayo de impacto a 500 aumentos y atacada con nital al 2 %



La microestructura esta compuesto por granos de ferrita en zonas alargadas, carburos y perlita

Figura 53. Superficies de fractura (longitudinal) de la muestra F3-M3 tomada a 25 aumentos y atacada con nital al 2%

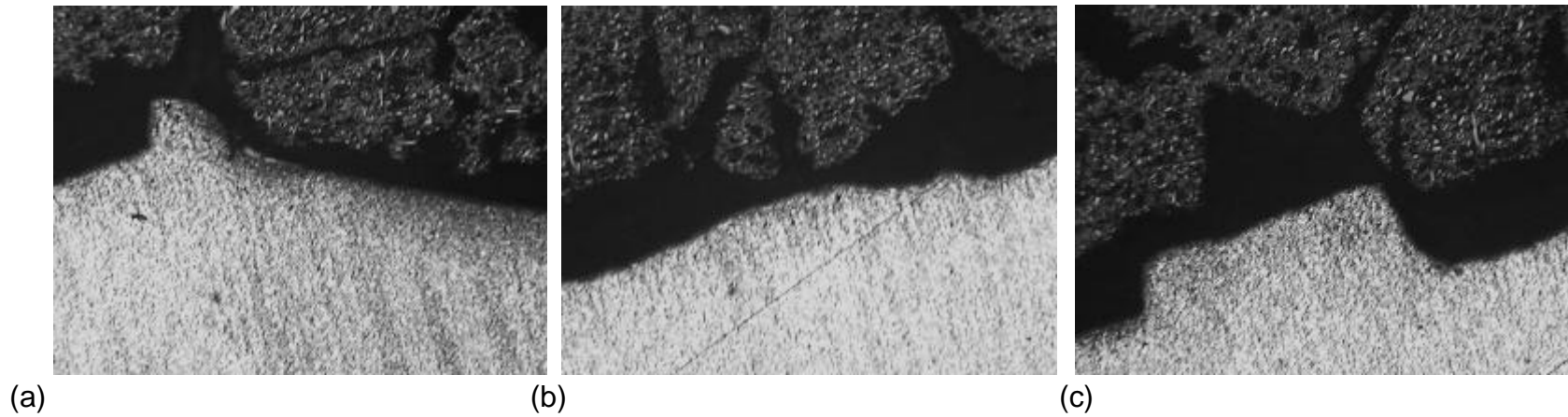
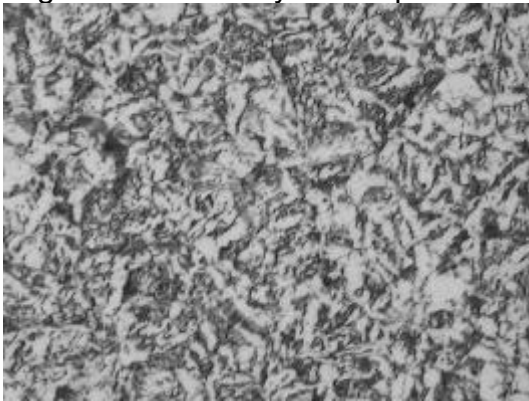
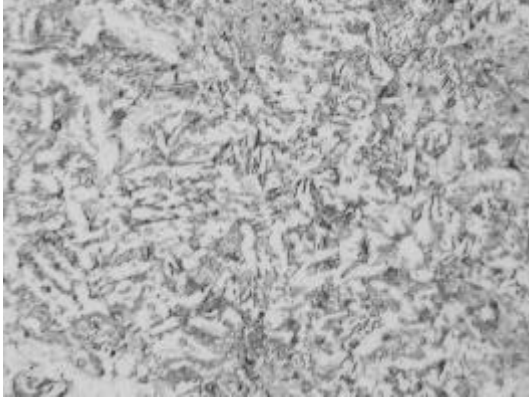


Figura 54. Superficie de fractura tomada de la muestra F3-M3 en la sección longitudinal a la dirección de propagación de la grieta en el ensayo de impacto a 500 aumentos y atacada con nital al 2 %



La microestructura esta compuesto por granos de ferrita en forma acicular, carburos y perlita

Figura 55. Superficie de fractura tomada de la muestra F3-M3 en la sección transversal a la dirección de propagación de la grieta en el ensayo de impacto a 500 aumentos y atacada con nital al 2 %



La microestructura esta compuesto por granos de ferrita en forma acicular, carburos y perlita.

### 10.6.5 Evaluación del comportamiento en fatiga.

Los ensayos de fatiga fueron realizados siguiendo las especificaciones de las normas ASTM E 466, E 468, E 739.

Para la determinación de las condiciones del ensayo se tuvieron en cuenta los factores asociados a la operación. A partir de históricos de algunos pozos se ha visto que la relación de esfuerzos de operación tienen valores muy cercanos a cero, este factor se tuvo en cuenta para seleccionar como variable fija para la determinación de todas las curvas de fatiga una relación de esfuerzos igual a cero.

Finalmente como condiciones del ensayo se tienen:

Frecuencia del ensayo = 60 Hz

Diámetro sección transversal =  $5 \pm 0.013$  mm

Longitud de ensayo = 10 mm

Relación de esfuerzos = 0

Tratamiento térmico = normalizado y revenido (según especificaciones suministradas por el fabricante).

Para las curvas de fatiga en presencia de defectos se tiene:

Profundidad del defecto = 499 micras.

Diámetro del defecto = 1099 micras.

En las figuras 56 y 57 se muestran la probeta para realizar los ensayos de fatiga y un registro del defecto realizados sobre las probetas para los ensayos de fatiga.

Figura 56. Probeta utilizada para realizar los ensayos de fatiga.

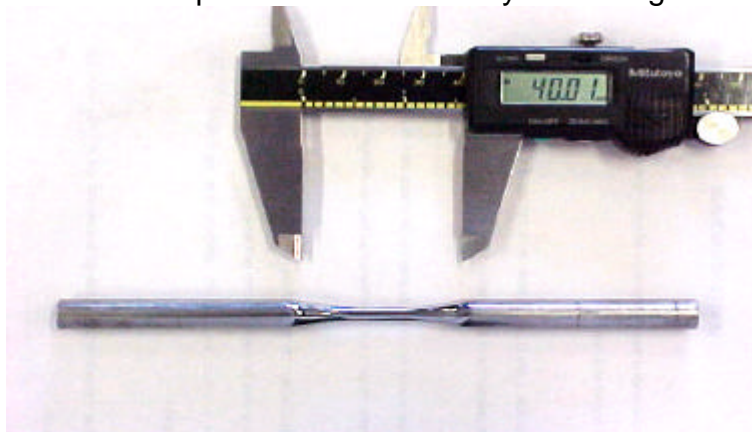
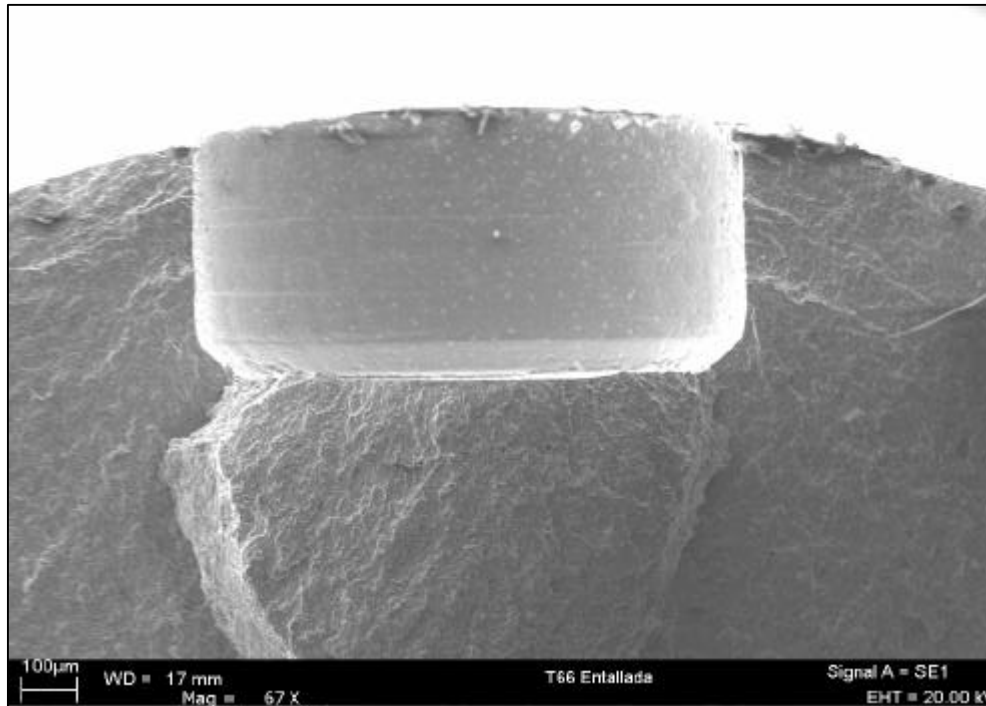


Figura 57. Micrografía del defecto superficial tomada en microscopia de barrido electrónico, 67 aumentos.



Las curvas de fatiga presentan generalmente dos regiones, una de bajos ciclos altos esfuerzos y la otra de larga duración bajos esfuerzos, a continuación se muestra una metodología para la obtención de las ecuaciones que describen la región de bajo ciclaje, seguidamente se muestran todas las ecuaciones obtenidas para la región de bajo ciclaje y alto ciclaje, para la región de alto ciclaje se tiene la ecuación de Basquín.

### 10.6.5.1 Análisis estadístico de los resultados obtenidos en el ensayo de fatiga para las muestras evaluadas.

La norma ASTM E739 ofrece los lineamientos necesarios para el manejo estadístico de los resultados del ensayo de fatiga uniaxial.

La forma de la ecuación que se asume que describe correctamente la fatiga del material evaluado es de la forma:

$$Y = A + BX \quad (31)$$

Donde:

Y = logaritmo ciclos.

X = esfuerzo alternante aplicado.

Las expresiones para el calculo de los estimadores de la máxima probabilidad de los coeficientes A y B en la ecuación 31 son:

$$\hat{A} = \bar{Y} - \hat{B} \bar{X} \quad (32)$$

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \quad (33)$$

A partir de las ecuaciones 32 y 33 se obtienen los valores de los coeficientes A y B de cada uno de los valores que se obtiene en el ensayo. La ecuación 34 sirve para determinar la Varianza de los resultados analizados.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{k - 2} \quad (34)$$

En la tabla 17 se muestran las ecuaciones de fatiga obtenidas para la región de bajo ciclaje en la condición de suministro para las muestras evaluadas en condición superficial sin y con defectos, adicionalmente se indican los valores del límite de fatiga determinado con un 50% de probabilidad siguiendo una distribución normal.

Tabla 17. Ecuaciones de fatiga.

Muestra	Ecuación para bajo ciclaje	<b>s</b>	Límite de fatiga (MPa)	<b>s</b>
F1-M1	$\log(N) = 25.76 - 0.043 S$	0.448	441.28	23.88
F2-M2	$\log(N) = 10.6 - 0.0129 S$	4.33	402.50	4.33
F3-M3	$\log(N) = 13.35 - 0.0215 S$	0.189	358.54	13.79
F1-M4	$\log(N) = 12.55 - 0.0168 S$	0.447	382.67	4.88
F1-M1*	$\log(N) = 7.387 - 0.0084 S$	0.366	236.73	7.96
F2-M2*	$\log(N) = 4.579 - 0.0032 S$	2.243	212.02	17.06
F3-M3*	$\log(N) = 12.16 - 0.0315 S$	2.181	187.03	10.67
F1-M4*	$\log(N) = 6.547 - 0.0033 S$	0.259	225.81	18.13
$\sigma$ = Desviación estándar				

\* Indica que los valores fueron obtenidos en la condición superficial con presencia de defectos.

En las figuras 58 y 59 se muestran las curvas de fatiga obtenidas para las muestras evaluadas sin y con defectos superficiales. Las flechas indican los puntos en los cuales no se presentó fractura, es decir las condiciones de esfuerzo correspondientes a vida infinita en el ensayo. Como criterio de suspensión de la prueba se tomo como 5 millones de ciclos de aplicación de cargas, por la experiencia adquirida en los primeros ensayos realizados, se determinó que después de que el material supera los 3 millones de ciclos la muestra no falla a ciclos posteriores.

Figura 58. Curvas de fatiga sin defectos.

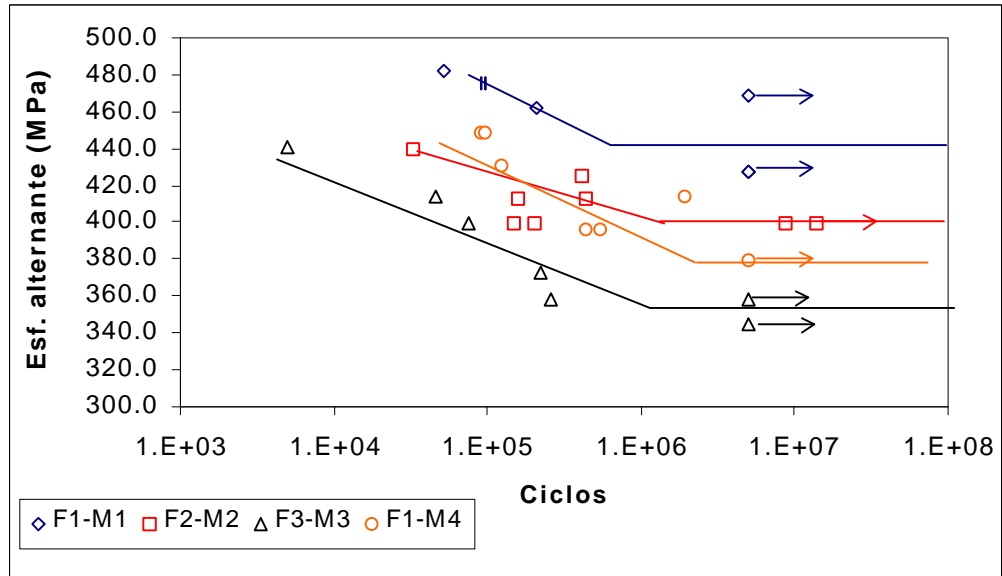
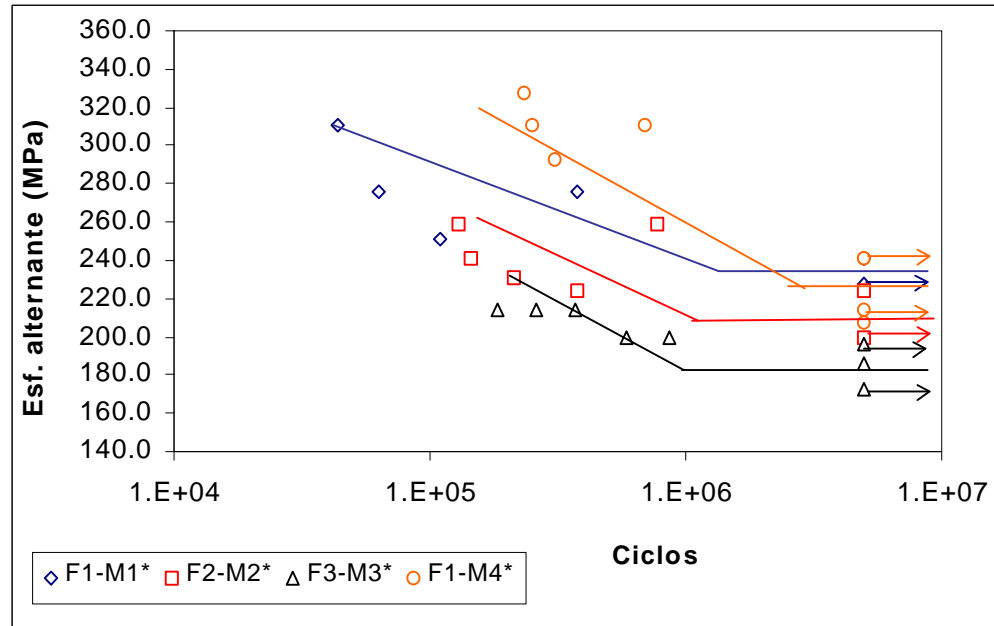


Figura 59. Curvas de fatiga con defectos.



### 10.6.5.2 Superficies de fractura para la determinación del área de propagación en fatiga evaluados por microscopio estereográfico y SEM.

En las siguientes figuras se muestran algunas de las superficies de fractura analizadas en los ensayos de fatiga.

El análisis de las probetas fracturadas en el ensayo de fatiga se inicia desde una escala macroscópica mediante el registro fotográfico utilizando el microscopio estereográfico seguido del análisis microscópico de barrido electrónico.

En la figura 60 se muestra la metodología utilizada en el análisis de las superficies de fractura

Figura 60. Metodología de análisis de las superficies de fractura por fatiga.

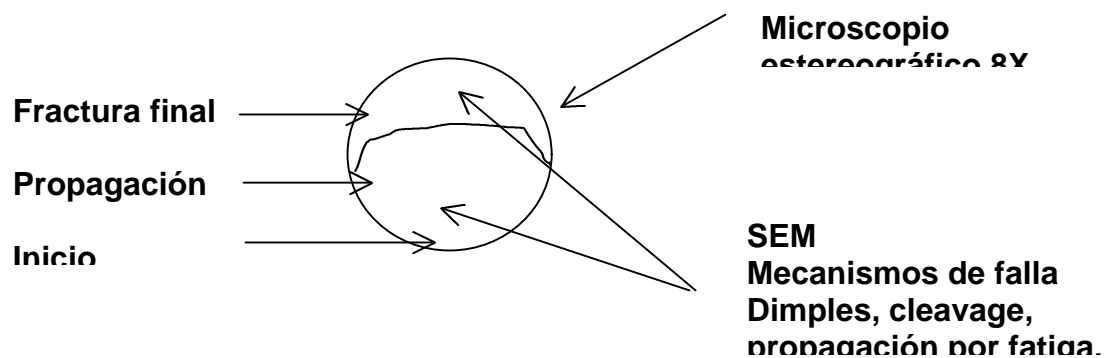


Figura 61. Superficie de fractura F2-M2 (440 MPa, 32239 ciclos)

Las regiones superiores muestran la región de propagación por fatiga.

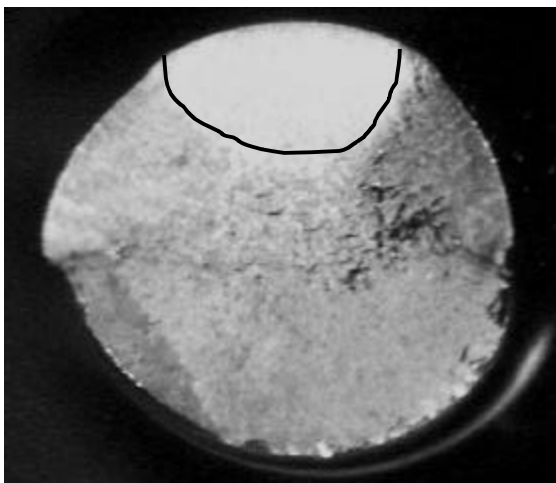
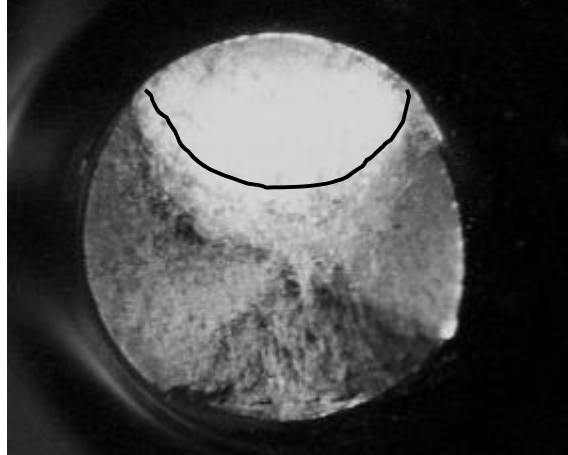
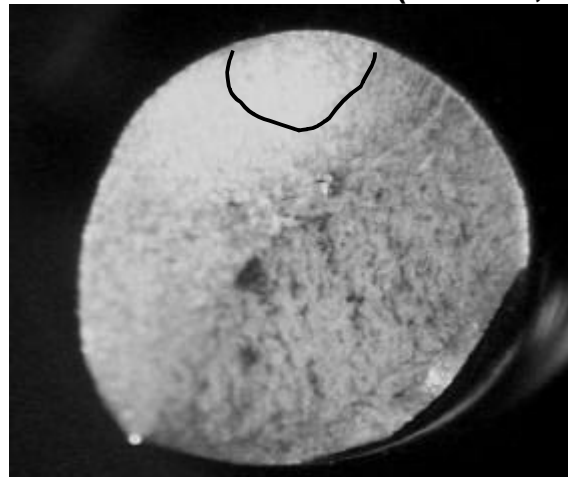


Figura 62. Superficie de fractura muestra F2-M2 (**412.5 MPa, 156647 ciclos**).



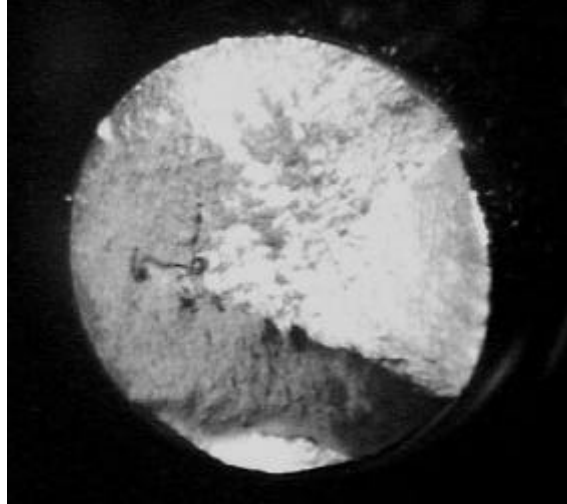
Las regiones superiores muestran la región de propagación por fatiga

Figura 63. Superficie de fractura muestra F2-M2 (**400 MPa, 149457 ciclos**).



Las regiones superiores muestran la región de propagación por fatiga

Figura 64. Superficie de fractura muestra F3-M3 (**399.91 MPa, 76388 ciclos**)



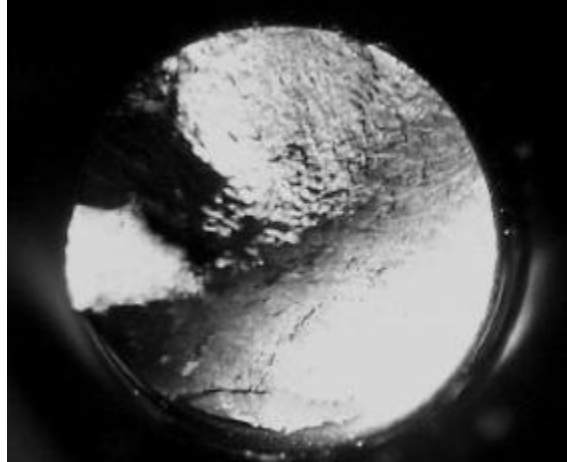
La región superior de la figura muestra la región correspondiente a la propagación por fatiga, comparada con la muestra M2 el área de propagación es considerablemente menor que el presentado en la muestra M2 para condiciones similares de esfuerzo alternante aplicado.

Figura 65. Superficie de fractura muestra F3-M3 (**372.33 MPa, 223396 ciclos**)



Presenta un área de propagación por fatiga considerablemente inferior a la presente en la muestra F2-M2

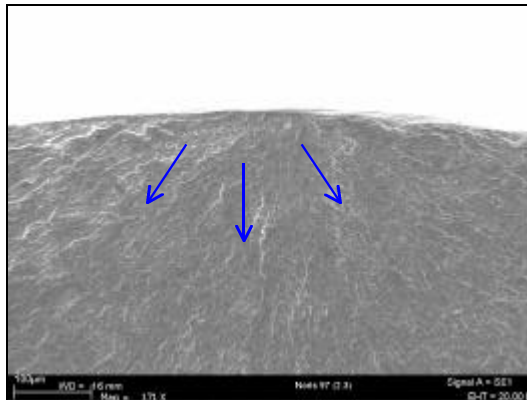
Figura 66. Superficie de fractura muestra F3-M3 (372.33 MPa, 159000 ciclos)



Presenta un área de propagación por fatiga considerablemente inferior a la presente en la muestra M2

A continuación se presentan las micrografías tomadas a partir de microscopia de barrido electrónico SEM.

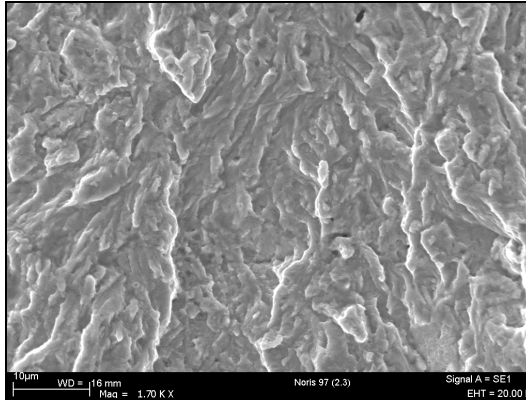
Figura 67. Micrografía muestra F2-M2.3  
( $s_a = 412.5$  MPa (59.82 ksi); 435908 ciclos)  
170 aumentos



Se observan las líneas de propagación de las grietas por fatiga.

Figura 68. Micrografía muestra F2-M2.3

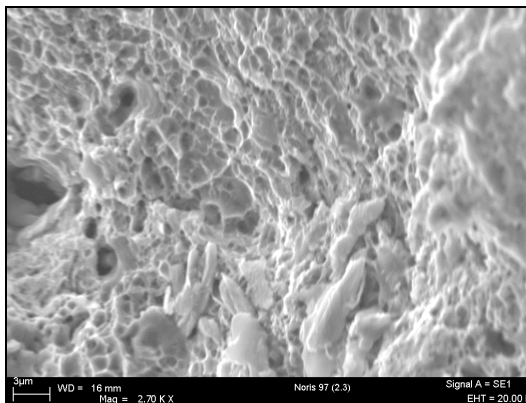
**( $s_a = 412.5 \text{ MPa (59.82 ksi)}$ ; 435908 ciclos)** tomada a 230 micras de la zona de inicio. 1700 aumentos



La propagación por fatiga es predominantemente dúctil, la zona de propagación por fatiga tiene un valor aproximado de 2000 micras.

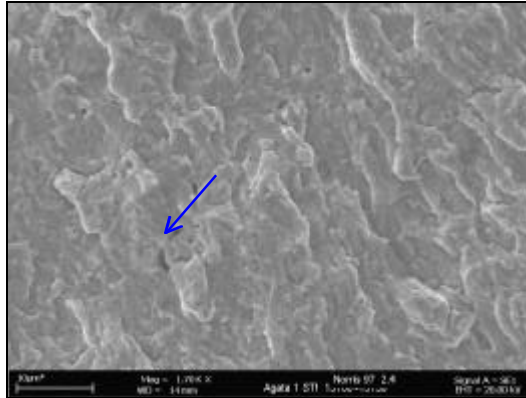
Figura 69. Micrografía muestra F2-M2.3

**( $s_a = 412.5 \text{ MPa (59.82 ksi)}$ ; 435908 ciclos)** Tomada a 3435 micras de la zona de inicio, zona de fractura final. 2700 aumentos



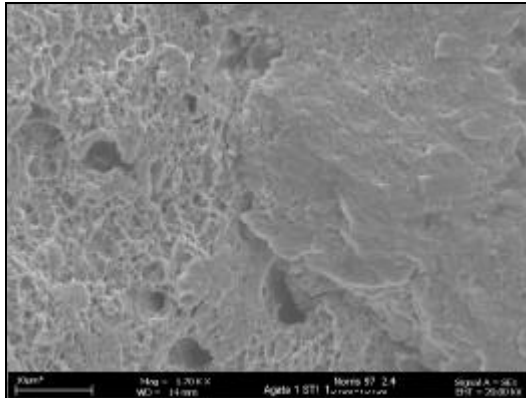
El mecanismo de falla en la zona de fractura final es coalescencia de microcavidades, los diámetros de los hoyuelos formados presentan en promedio un tamaño similar.

Figura 70. Micrografía muestra F2-M2.4 tomada a 500 micras de la zona de inicio ( $s_a = 400$  MPa (58.01 ksi); 149457 ciclos) 1700 aumentos



La propagación por fatiga es tipo dúctil, la flecha muestra una microgrieta formada. La zona de propagación por fatiga tiene un valor promedio aproximado de 1266 micras.

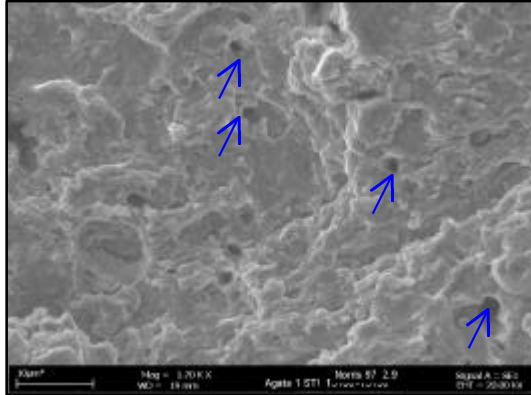
Figura 71. Micrografía muestra F2-M2.4 ( $s_a = 400$  MPa (58.01 ksi); 149457 ciclos) 1700 aumentos



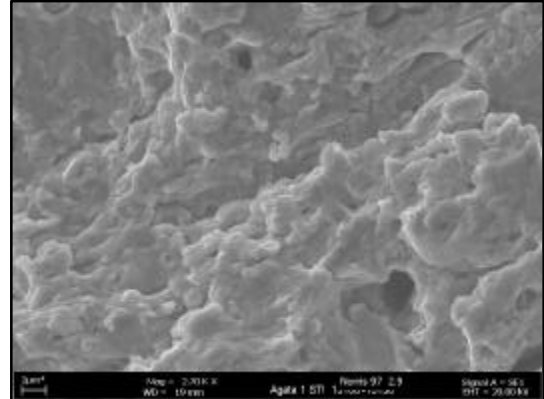
Micrografía tomada en la región de transición entre la propagación por fatiga y la fractura final, la zona de fractura final presenta como mecanismo de falla la coalescencia de microcavidades.

Figura 72. Micrografía muestra F2-M2.9 tomada a 680 micras de la zona de inicio. ( $s_a = 440$  MPa (63.81 ksi); 32239 ciclos).

1700 aumentos



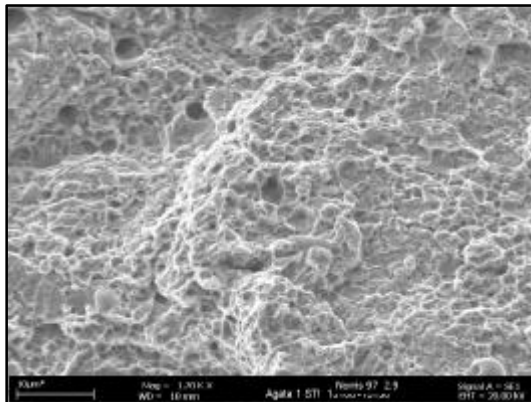
2700 aumentos



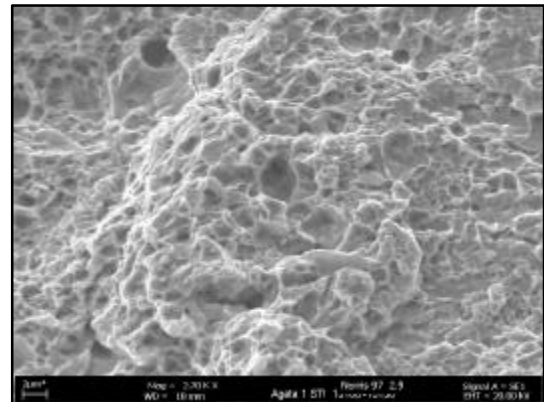
Esta zona presenta mecanismos de falla compuestos por la presencia de hoyuelos (flechas de color azul), y la región de propagación por fatiga. La zona de propagación por fatiga tiene un valor promedio aproximado de 1289 micras.

Figura 73. Micrografía muestra F2-M2.9 tomada en la zona de fractura final ( $s_a = 440$  MPa (63.81 ksi); 32239 ciclos)

1700 aumentos



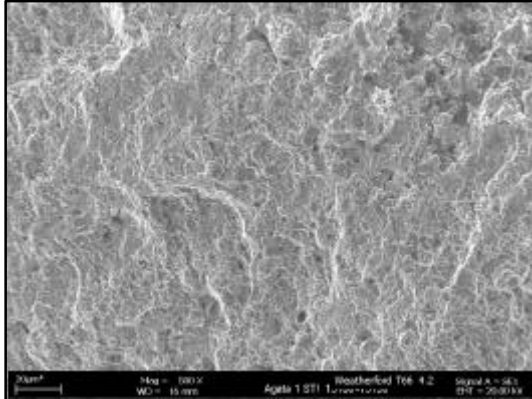
2700 aumentos



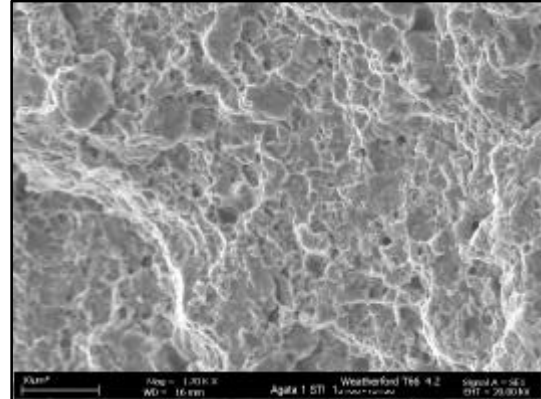
La zona de fractura final presenta como mecanismo de falla la coalescencia de microcavidades.

Figura 74. Micrografía muestra 4.2 tomada a 500 micras de la zona de inicio ( $s_a = 413.7 \text{ MPa}$  (60 ksi); 46255 ciclos)

500 aumentos



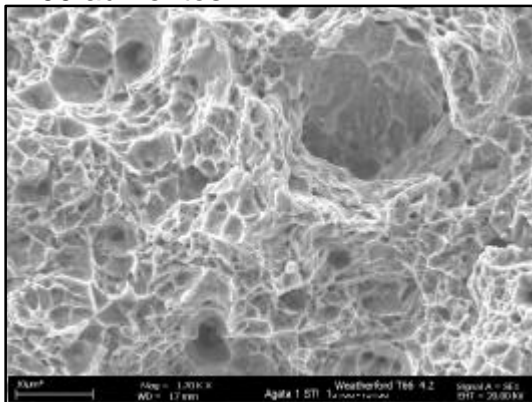
1700 aumentos



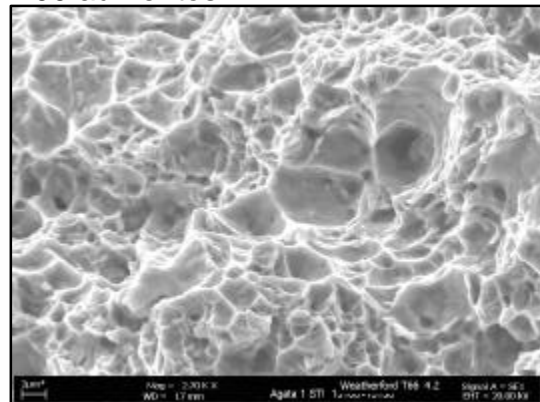
Se observa la propagación de grietas por fatiga, combinada con la formación de microcavidades. La zona de propagación por fatiga tiene un valor promedio aproximado de 615.2 micras

Figura 75. Micrografía muestra F3-M3.2 tomada en la zona de fractura final ( $s_a = 413.7 \text{ MPa}$  (60 ksi); 46255 ciclos)

1700 aumentos



2700 aumentos

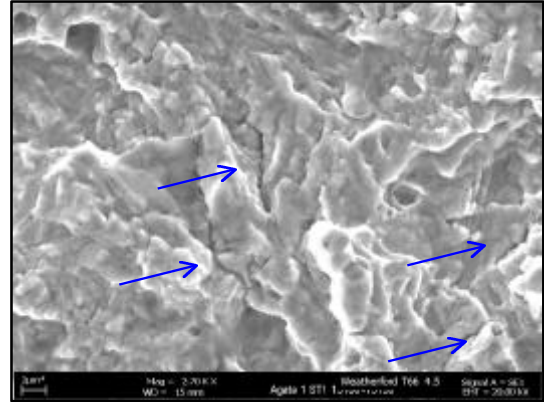
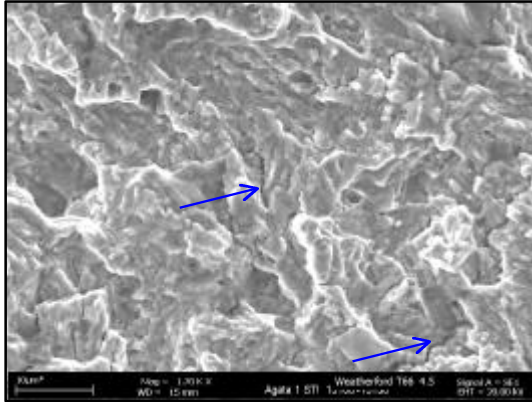


La zona de fractura final presenta coalescencia de microcavidades típica de una fractura dúctil.

Figura 76. Micrografía muestra F3-M3.5 tomada a 500 micras de la zona de inicio. ( $s_a = 372.33$  MPa (54 ksi); 223396 ciclos)

1700 aumentos

2700 aumentos

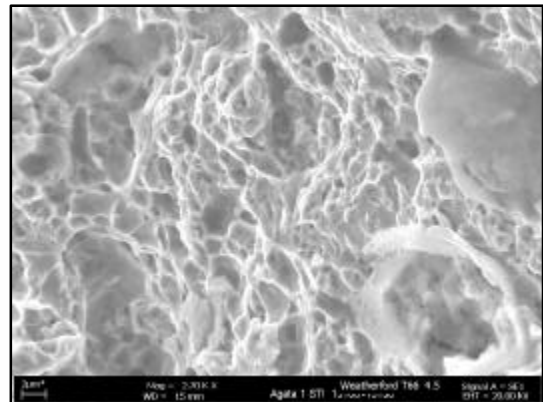
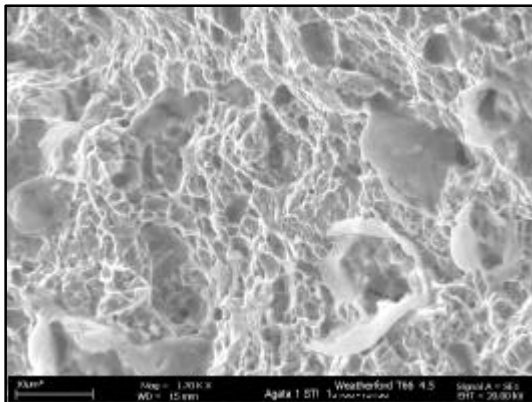


La propagación por fatiga es tipo dúctil, las flechas azules muestran algunas microgrietas formadas, en la zona evaluada se encontraron 14 microgrietas. La zona de propagación por fatiga tiene un valor promedio aproximado de 1168.7 micras.

Figura 77. Micrografía muestra F3-M3.5 tomada en la zona de fractura final ( $s_a = 372.33$  MPa (54 ksi); 223396 ciclos)

1700 aumentos

2700 aumentos



La zona de fractura final presenta coalescencia de microcavidades típica de una fractura dúctil.

Figura 78. Micrografía muestra F3-M3.8 tomada a 500 micras de la zona de inicio.  
**( $s_a = 358.54$  MPa (52 ksi); 260030 ciclos)**  
67 aumentos

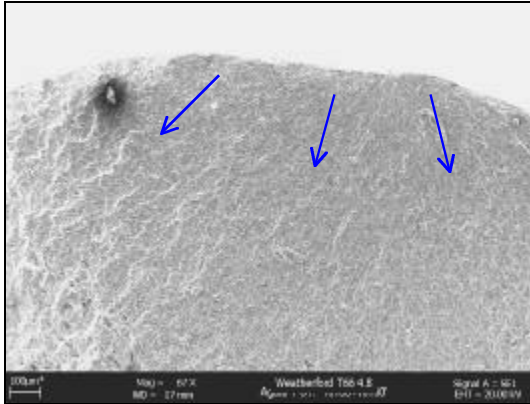
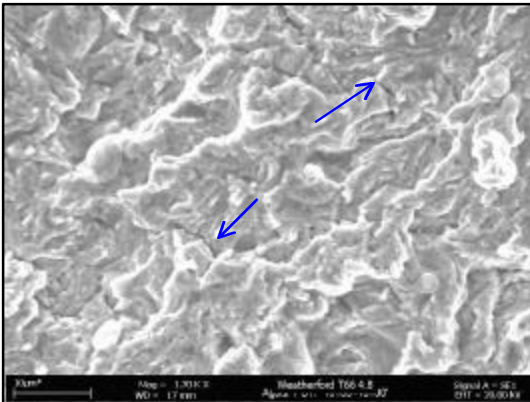
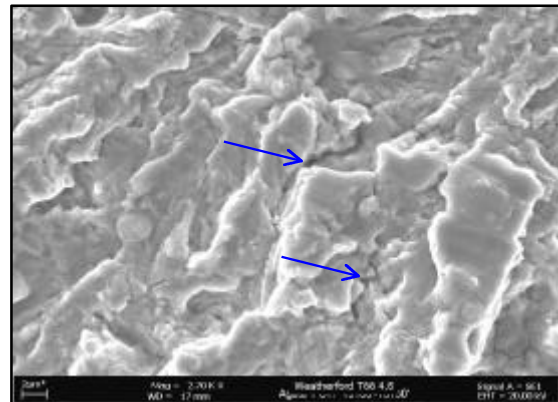


Figura 79. Micrografía muestra F3-M3.8 tomada a 500 micras de la zona de inicio.  
**( $s_a = 358.54$  MPa (52 ksi); 260030 ciclos)**  
1700 aumentos



2700 aumentos

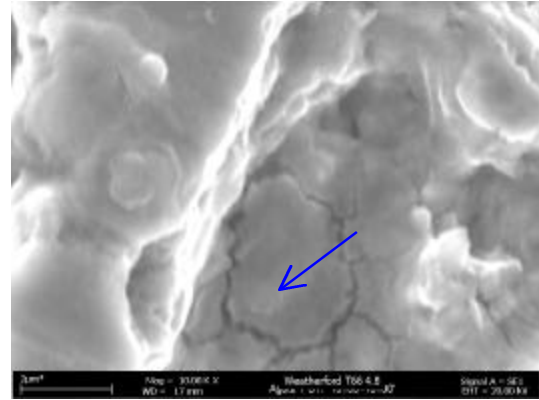
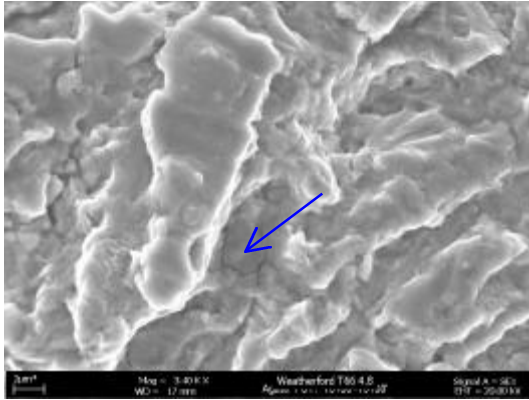


La propagación por fatiga es tipo dúctil, las flechas azules muestran algunas microgrietas formadas, en la zona evaluada se encontraron 5 microgrietas. La zona de propagación por fatiga tiene un valor promedio aproximado de 1350 micras.

Figura 80. Micrografía muestra F3-M3.8 tomada a 500 micras de la zona de inicio.  
**( $s_a = 358.54$  MPa (52 ksi); 260030 ciclos)**

3400 aumentos

10000 aumentos

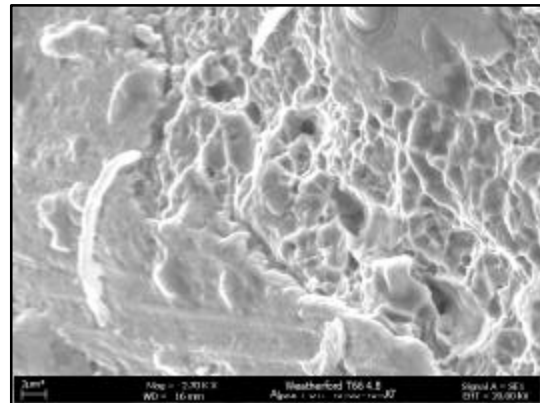
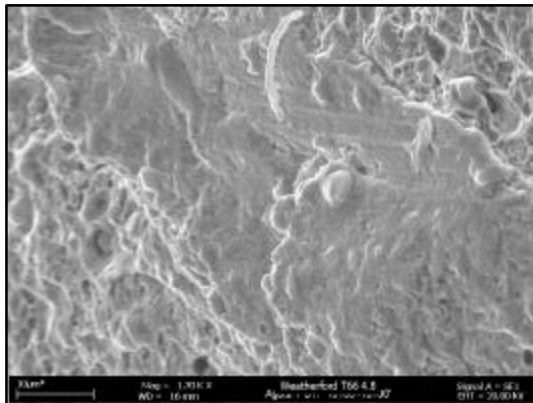


En la zona de propagación se observa posiblemente un mecanismo de agrietamiento intergranular ó coalescencia de microgrietas.

Figura 81. Micrografía muestra F3-M3.8 tomada en la zona de fractura final  
**( $s_a = 358.54$  MPa (52 ksi); 260030 ciclos)**

1700 aumentos

2700 aumentos



Se observa en la zona de fractura final la coalescencia de microcavidades típica de una fractura dúctil.

En la tabla 24 se muestran los mecanismos de falla observados en las muestras del material **F2-M2** evaluadas en el ensayo de fatiga.

Tabla 24. Mecanismos de falla observados

<b>Nº</b>	<b>X</b>	<b>Longitud de propagación por fatiga (micras)</b>	<b>Mecanismo de falla</b>	<b>Esfuerzo alternante Mpa (ksi)</b>	<b>Ciclos</b>
F2-M2.3	1700	2000	Propagación dúctil de grietas por fatiga	412.5 (59.82)	435908
F2-M2.3	2700		Coalescencia de microcavidades	412.5 (59.82)	435908
F2-M2.4	1700	1266	La propagación por fatiga es tipo dúctil, se evidencia una microgrieta formada	400 (58.01)	149457
F2-M2.4	1700		Región de transición entre la propagación por fatiga y la fractura final, la zona de fractura final presenta como mecanismo de falla la coalescencia de microcavidades	400 (58.01)	149457
F2-M2.9	1700	1289	Se tiene la presencia de hoyuelos y la región de propagación por fatiga	440 (63.81)	32239
F2-M2.9	1700		Coalescencia de microcavidades	440 (63.81)	32239

En la tabla 25 se muestran los mecanismos de falla observados en las muestras del material **F3-M3** evaluadas en el ensayo de fatiga.

Tabla 25. Mecanismos de falla observados

<b>Nº</b>	<b>X</b>	<b>Longitud de propagación por fatiga (micras)</b>	<b>Mecanismo de falla</b>	<b>Esfuerzo alternante Mpa (ksi)</b>	<b>Ciclos</b>
F3-M3.2	1700	615.2	Propagación de grietas por fatiga, combinada con la formación de microcavidades	413.7 (60)	46255
F3-M3.2	1700		Coalescencia de microcavidades	413.7 (60)	46255
F3-M3.5	1700	1168.7	La propagación por fatiga es tipo dúctil, en la zona evaluada se encontraron 14 microgrietas	372.33 (54)	223396
F3-M3.5	1700		Coalescencia de microcavidades	372.33 (54)	223396
F3-M3.8	1700	1350	La propagación por fatiga es tipo dúctil, en la zona evaluada se encontraron 5 microgrietas.	358.54 (52)	260030
F3-M3.8	10000	1350	En la zona de propagación se observa posiblemente un mecanismo de agrietamiento intergranular ó coalescencia de microgrietas.	358.54 (52)	260030

## 11. ANALISIS DE RESULTADOS

En esta sección se analizan los diferentes factores medidos en la presente investigación, con el propósito de observar la forma en que estos parámetros afectan la tenacidad, el comportamiento en fatiga, y prever una posible sinergia entre el nivel de tenacidad y el desempeño en fatiga.

### 11.1 Efecto de la composición química

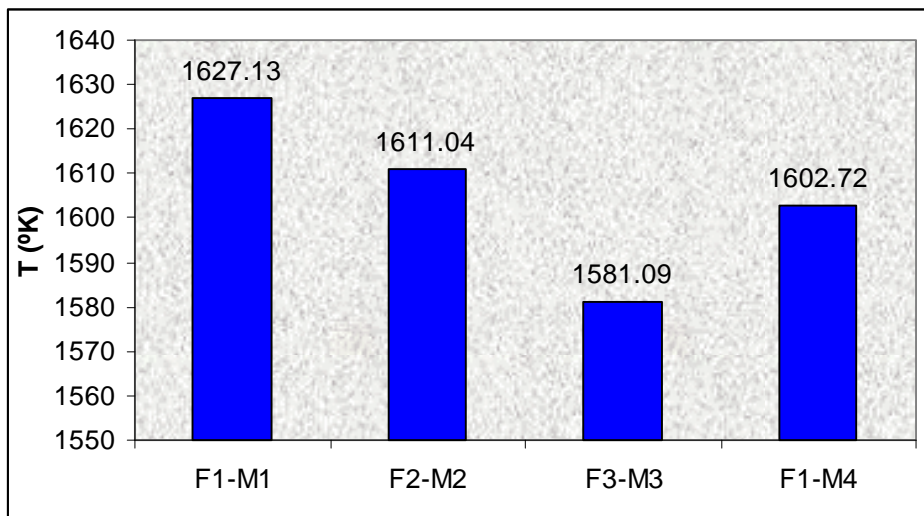
Los cuatro materiales evaluados pertenecen a las familias de los aceros AISI-SAE 4330 M y 4138M. En estos aceros cabe notar que presentan adiciones de microaleantes, principalmente Vanadio, Titanio, Niobio, Silicio, estos elementos modifican la microestructura formada mediante un mecanismo de combinación con el carbono, formación de carburos, y modificación de las estructuras de ferrita y perlita presentes en estos aceros cuando son fabricados bajo tratamientos de normalizado y revenido. A continuación se muestra una ecuación que tiene en cuenta los límites de estabilidad de los carburos de Vanadio como el producto de solubilidad en función de la temperatura.

Ecuación de Turkdogan<sup>43</sup>

$$VC_{0.75} \text{ en austenita} = \log[\%V] \times \log[\%C]^{0.75} = -\frac{6560}{T} + 4.45 \quad (35)$$

En la figura 82 se muestran los resultados para la máxima temperatura de estabilidad termodinámica obtenida a partir de la expresión de Turkdogan en función de la composición química de los materiales evaluados:

Figura 82. Límites de estabilidad de los aceros evaluados.

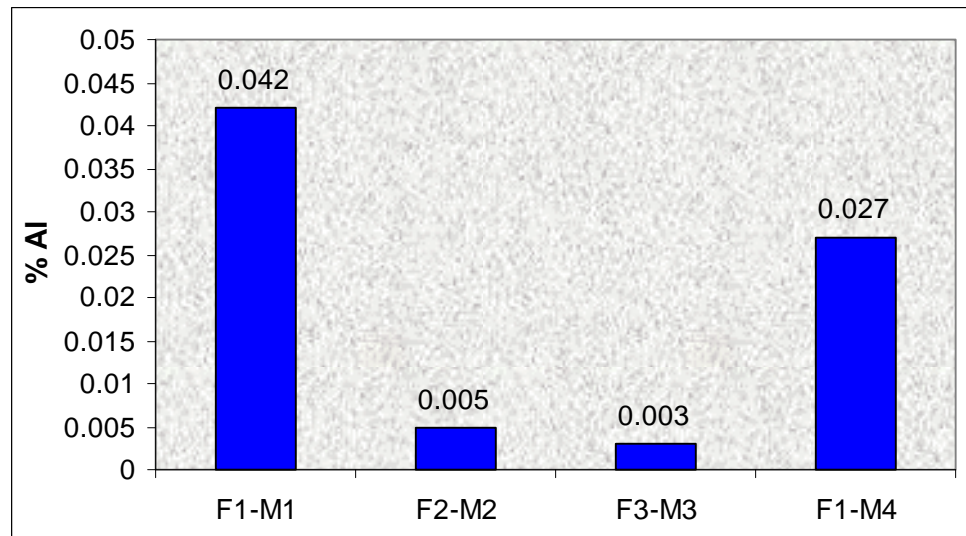


De la figura anterior se observa que se presentan diferencias con respecto a la máxima temperatura en la cual los carburos de Vanadio son estables, desde un punto de vista conceptual mayores niveles de temperaturas representan beneficios en cuanto al afinamiento del tamaño de grano de la austenita madre.

En los procesos de solidificación los carburos de Vanadio, Nitruros de Vanadio funcionan como barreras para las etapas de crecimiento de los granos formados, debido a esto el tamaño de grano de la austenita madre tiende a disminuir cuando se mantienen niveles mas altos de temperaturas de estabilidad.

El aluminio es otro elemento de aleación que tiende a afinar el tamaño de grano de la austenita madre mediante un mecanismo similar al anteriormente expuesto. En la figura 83 se muestra el porcentaje de aluminio presente en los aceros estudiados.

Figura 83. Porcentaje de aluminio en las muestras evaluadas.



De la figura anterior se observa que las muestras F1-M1 y F1-M4 presentan los mas alto niveles de aluminio presentes en los aceros evaluados. El comportamiento mecánico se ve afectado favorablemente cuando se tiende a disminuir el tamaño de grano de la austenita madre, este efecto a su vez se ve seriamente afectado por el nivel de aluminio presente en el material, el tipo y cantidad de microaleantes que tienden a afinar el tamaño de grano.

En la tabla 26 se muestran algunos de los elementos de aleación que afectan tanto el comportamiento en fatiga como el nivel de tenacidad.

Tabla 26. Análisis de la composición química.

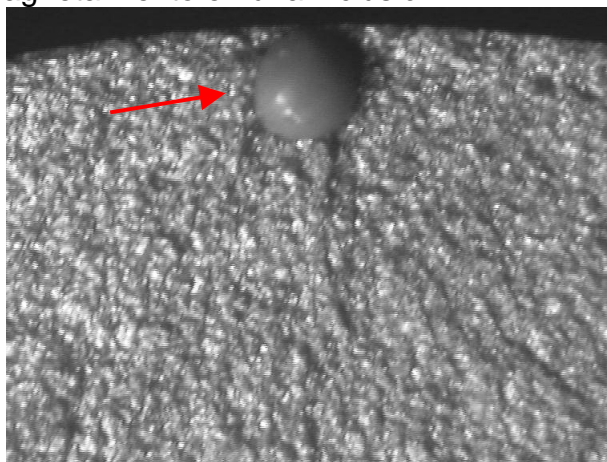
<b>Fabricante / Elemento</b>	<b>F1- M1</b>	<b>F2-M2</b>	<b>F3-M3</b>	<b>F1-M4</b>	<b>Efectos</b>
<b>Si</b>	0.210	0.230	0.273	0.288	Retarda la transformación de la austenita en ferrita permitiendo un afinamiento en el tamaño de grano ferrítico. Efecto favorable sobre tenacidad y fatiga.
<b>Ni</b>	2.047	1.922	0.067	0.000	Aumenta el nivel de templabilidad y el nivel de tenacidad. Efecto favorable sobre tenacidad y fatiga.
<b>Cr</b>	0.940	0.877	0.594	0.722	Incrementa el nivel de templabilidad, dureza, resistencia mecánica. Efecto favorable sobre fatiga. Modificador de la microestructura.
<b>V</b>	0.064	0.097	0.095	0.059	Afinador del tamaño de grano de la ferrita y de la austenita madre. Efecto favorable sobre tenacidad y fatiga.
<b>Mo</b>	0.248	0.236	0.255	0.309	Incrementa el nivel de templabilidad, dureza, resistencia mecánica. Efecto favorable sobre fatiga. Modificador de la microestructura
<b>Ti</b>	0.002	0.001	0.002	0.004	Modificador de la microestructura, Efecto favorable

					sobre tenacidad y fatiga.
<b>Al</b>	0.042	0.005	0.003	0.027	Afinador del tamaño de grano de la austenita madre, Efecto favorable sobre fatiga.
<b>Nb</b>	0.008	0.007	0.006	0.045	Modificador de la microestructura, Efecto favorable sobre tenacidad y fatiga.
<b>AISI-SAE</b>	<b>4330M</b>	<b>4330M</b>	<b>4138M</b>	<b>4138M</b>	

## 11.2 Efecto del nivel de inclusiones

Las inclusiones tienen un efecto adverso sobre el comportamiento en fatiga, debido a que estas funcionan como sitios favorables para la iniciación del agrietamiento por fatiga. En los materiales evaluados se identificaron como sitios de iniciación de grietas por fatiga el volumen de material superficie. Sin embargo una varilla presentó en los sitios de iniciación de grietas por fatiga inclusiones que pudieron ser detectadas a través del microscopio estereográfico. En la figura 84 se observa como sitio de iniciación una inclusión redondeada.

Figura 84. Inicio de agrietamiento en una inclusión.



En las muestras F1-M1, F2-M2, F3-M3, F1-M4 de la fase I (normalizado y revenido) no se evidenció como sitios de iniciación de grietas este tipo de inclusiones, este factor se presenta en la muestra F2-M2 en la fase II (temple y revenido) afectando considerablemente el resultado de los ensayos de fatiga.

A partir del análisis de inclusiones realizados se puede establecer como criterio para clasificar el riesgo de iniciación del agrietamiento el siguiente:

Inclusiones de la serie delgada hasta tipo 2 no funcionan como sitios favorables para la iniciación del agrietamiento por fatiga. La serie gruesa superior a la clasificación tipo 1 afecta el comportamiento en fatiga promoviendo la iniciación de grietas por fatiga.

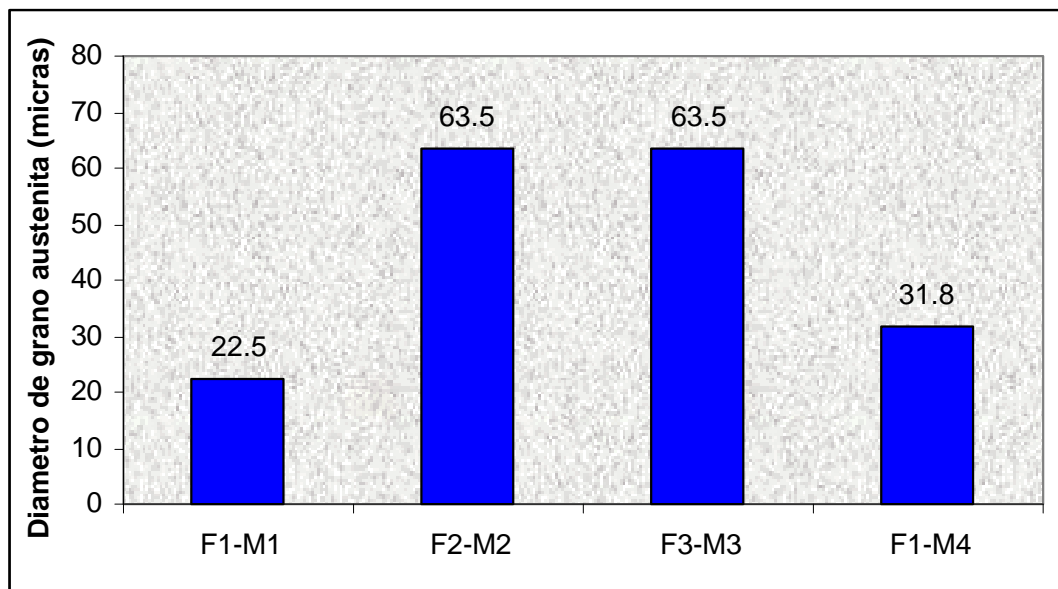
### 11.3 Efecto de la microestructura

A partir de los microestructura se pueden definir los siguientes rasgos microestructurales para materiales normalizados y revenidos:

#### 11.3.1 Tamaño de grano de la austenita madre.

En la figura 85 se muestra una distribución de los tamaños de granos de la austenita madre obtenida para las muestras evaluadas. Se puede observar que las muestras F1-M1 y F1-M4 presentan los niveles más bajos indicando un afinamiento del tamaño de grano mas pronunciado en estos materiales. Las muestras F2-M2 y F3-M3 presentan similares valores del tamaño de grano. Los resultados obtenidos reflejan el efecto de los elementos de aleación sobre el afinamiento del tamaño de grano, principalmente estas muestras presentan los niveles mas altos del porcentaje de aluminio y altas temperaturas de solubilidad de los carburos de Vanadio.

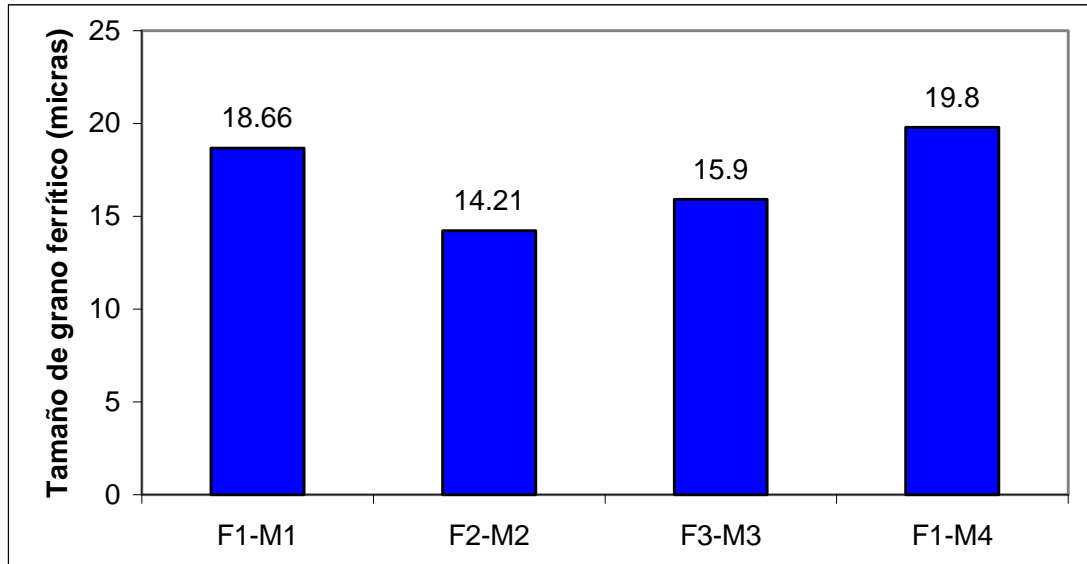
Figura 85. Distribución de tamaños de grano de la austenita.



### 11.3.2 Tamaño de grano ferrítico

En la figura 86 se muestra el perfil de tamaño de grano ferrítico obtenido en las muestras evaluadas.

Figura 86. Tamaños de grano ferrítico.



La muestra F2-M2 presenta el menor tamaño de grano ferrítico (14.21 micras) de las muestras evaluadas este valor presenta una relación inversa con respecto al nivel de tenacidad. Debido a que se tienen dos familias de aceros diferentes es conveniente analizar por familia el efecto del tamaño de grano ferrítico sobre el nivel de tenacidad.

Las muestras F1-M1 y F2-M2 ambas pertenecen a la familia de aceros AISI SAE 4330M, en la muestra F2-M2 se tiene el menor tamaño de grano ferrítico generando un aumento en el nivel de tenacidad (39J). Este mismo caso se presenta para las muestras F3-M3 y F1-M4 (4138M) en estos materiales F3-M3 presenta el menor tamaño de grano ferrítico aumentando el nivel de tenacidad (20.16J).

En estos materiales se presentan rasgos microestructurales que afectan el comportamiento en fatiga así:

- Tamaño de grano ferrítico pequeño: favorece la tenacidad un afinamiento en el tamaño de grano.
- Afino del tamaño de grano de la austenita madre, aumenta las propiedades de resistencia mecánica y el comportamiento en fatiga.

Las ecuaciones 36 y 37 muestran la relación existente entre el tamaño de grano ferrítico para las dos familias de aceros evaluados, 4330 M y 4138M respectivamente.

$$CVN = -2.6225I + 76.265 \quad (36)$$

$$CVN = -0.7667I + 32.35 \quad (37)$$

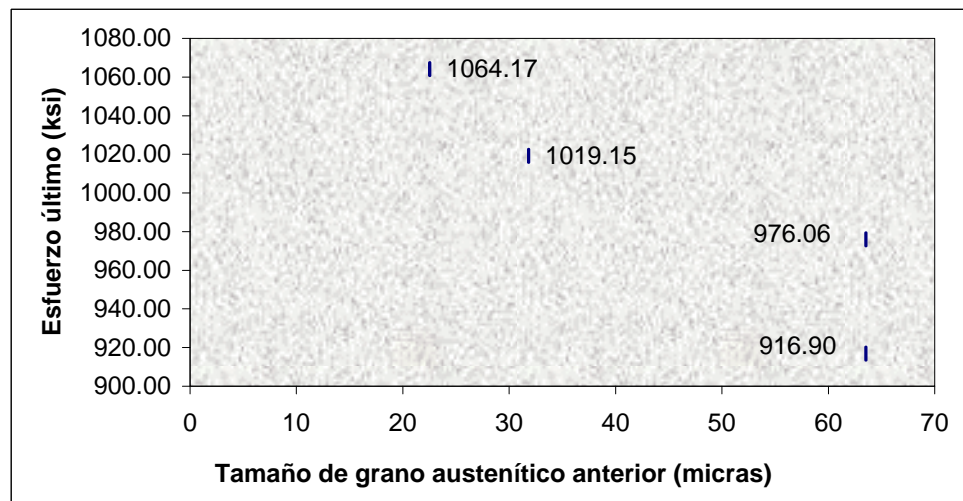
### 11.3.3 Efecto de las propiedades mecánicas

Para las muestras en condición de normalizado y revenido las propiedades mecánicas determinadas mediante el ensayo de tensión se relacionan directamente con el valor del límite de fatiga determinado para cada muestra.

El nivel de propiedades mecánicas determinadas para los materiales esta en relación inversa con el tamaño de grano austenítico anterior, es decir, a medida que se disminuye el tamaño de grano de la austenita madre se tiene un aumento en las propiedades mecánicas, principalmente, el esfuerzo de fluencia y la resistencia mecánica.

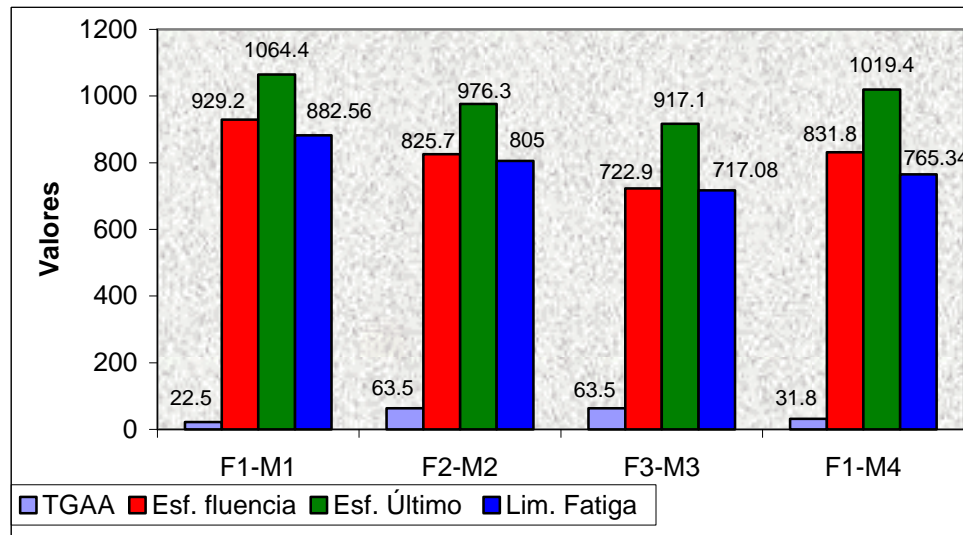
En la figura 87 se muestra la dependencia existente entre el tamaño de grano y las propiedades mecánicas.

Figura 87. Resistencia mecánica en función del tamaño de grano de la austenita madre.



En la figura 88 se muestra una figura que resume las propiedades mecánicas determinadas (esfuerzo de fluencia, esfuerzo último), el tamaño de grano austenítico inicial, y la componente del esfuerzo máximo correspondiente al límite de fatiga de los materiales evaluados.

Figura 88. Relaciones entre propiedades mecánicas, tamaño de grano de austenita, y esfuerzo máximo.



De la figura anterior se observa un comportamiento similar para las dos familias de aceros evaluados, a medida que se disminuye el tamaño de grano de la austenita inicial, se aumentan las propiedades mecánicas medidas en el ensayo de tensión, y el límite de fatiga del material. Lo anterior indica que los factores que afectan predominantemente el comportamiento mecánico y en fatiga son las propiedades que tienden a aumentar la resistencia del material en materiales en estado de normalizado y revenido.

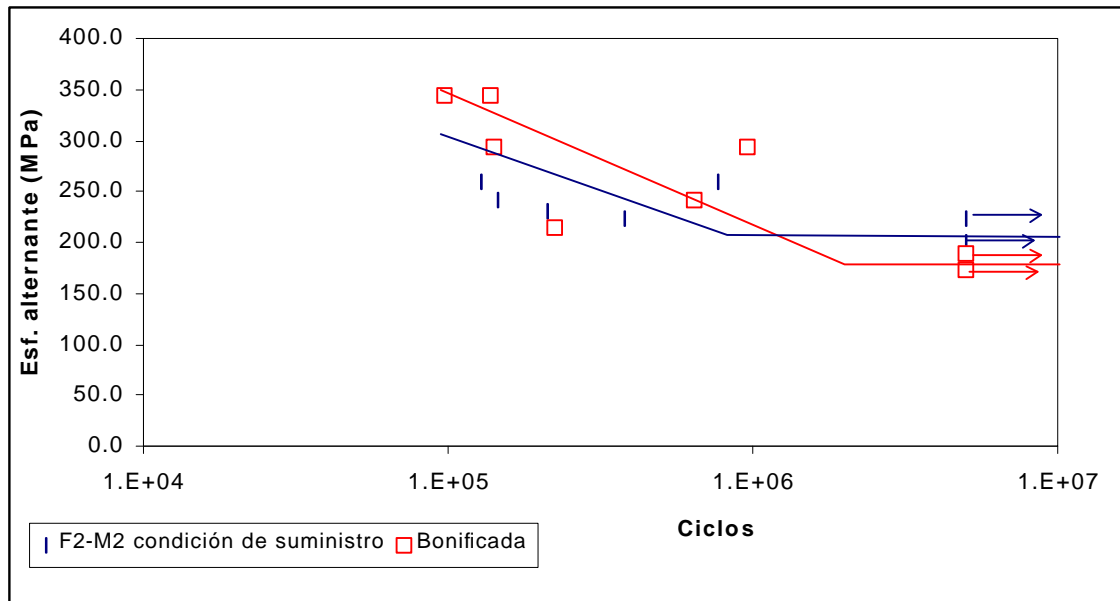
### 11.3.4 Efecto de la tenacidad

A partir de los ensayos de energía absorbida realizados sobre las muestras en condición de suministro se encontró:

Las muestras anteriormente evaluadas presentan en orden descendente de la muestra F2-M2 (39 J) a la muestra F1-M4 (17.17 J) el valor de energía absorbida. Desde el punto de vista mecánico, un material que presente una resistencia mecánica inferior tiende a aumentar su tenacidad. En las muestras evaluadas, las muestras F1-M1 y F2-M2 pertenecen a la misma composición química (4330M), sin embargo, el valor de CVN es inferior para la muestra M1, La anterior respuesta obtenida se debe posiblemente al nivel de resistencia mecánica presente, la metalografía, distribución, tamaño y morfología de las fases presentes, el mismo caso se presenta con las muestras F3-M3 y F1-M4.

El efecto de la tenacidad sobre el comportamiento en fatiga se va a analizar comparando las curvas de fatiga obtenidas para la muestra F2-M2 con defectos superficiales y en la condición de suministro y con tratamiento térmico de temple y revenido. En la figura 89 se muestran las curvas de fatiga obtenidas.

Figura 89. Curvas de fatiga con defectos, comparación de tratamientos térmicos.



A partir de la anterior figura se puede observar que no hay efecto del nivel de tenacidad sobre el desempeño en fatiga.

### 11.3.5 Efecto de los concentradores de esfuerzos.

Un defecto superficial en un material expuesto tiende a localizar la deformación y carga aplicada, este genera una disminución en el rango de esfuerzos de trabajo del componente y por ende del limite de fatiga, en la tabla 27 se muestran los factores de entalla en fatiga determinados experimentalmente.

Tabla 27. Factores de entalla en fatiga.

<b>Fabricante/ Muestra</b>	<b>AISI</b>	<b>K<sub>f</sub></b>
F1-M1	4330M	1.86
F2-M2	4330M	1.89
F3-M3	4138M	1.88
F1-M4	4138M	1.70
F2-M2 TR	4330M	1.52

De las evaluaciones realizadas, la muestra F2-M2 con tratamiento térmico de temple y revenido presenta el valor mas bajo del factor de entalla, esto conduce a una menor sensibilidad a la presencia de defectos, este comportamiento posiblemente se deba a un efecto de la microestructura y el nivel de tenacidad que presenta esta muestra.

#### 11.4 Desarrollo de tratamientos térmicos

En esta sección se presentan los resultados de los tratamientos térmicos realizados a los materiales de las varillas a evaluar.

Esta fase de la investigación tiene como objetivos:

Determinar las condiciones de temperatura de austenización, tiempo de sostenimiento, temperatura y tiempo de revenido para obtener propiedades mecánicas similares a las que presentan estos materiales en la condición de normalizado y revenido. En la tabla 18 se muestra el resumen de las condiciones de tratamiento térmico desarrollados. A una de las condiciones de tiempo y temperatura de revenido se le desarrollo un ensayo de tensión con el fin de monitorear el comportamiento de las propiedades mecánicas con el valor de dureza obtenidos después de que el material se encuentra bonificado, los resultados de este ensayo se muestran en la tabla 19.

Tabla 18. Tratamientos térmicos realizados.

<b>Muestra</b>	<b>Diámetro (plg)</b>	<b>Temp. Revenido (°C)</b>	<b>Tiempo Revenido (horas)</b>	<b>DUREZA (Brinell)</b>	<b>Desviación estándar</b>
M1	0.75	550	1	377.3	15.01
M1	0.75	625	1	348	16.46
M1	0.75	630	1	316	7.23
M1	0.75	650	1	314.5	7.76
M2	0.875	640	1	332	5.85
M2	0.875	650	1.2	308.25	2.75
M2	0.875	650	1	313	2.88
M2	0.875	650	1	322	4.96
M3	1.0000	450	1	421	4.75
M3	1.0000	650	1	316.25	5.00
M3	1.0000	650	1	340.5	5.50
M3	1.0000	650	1.5	307.75	5.85
M3	1.0000	650	1.5	317.75	2.21
M4	1.000	650	1	327.8	8.16

Tabla 19. Ensayo de tensión a la condición de templado desde 860°C durante una hora de sostenimiento y posterior revenido para las muestras: M1 (630°C, 0.9 hr), M2 (650°C, 1.2hr), M3 (650°C, 1.5 hr).

Muestra Nº	UTS		Ys		% e (50 mm)	T (°C)
	(MPa)	(ksi)	(MPa)	(ksi)		
M1	1072.26	155.48	1000.75	145.11	18.12	23
M2	997.15	144.59	925.28	134.17	17.80	23
M3	961.89	139.47	831.	120.51	16.94	23

Finalmente las condiciones que se desarrollaron para el tratamiento térmico a las muestras de materiales son:

Temperatura de austenización: Se lleva a una temperatura de 860°C se mantiene durante 1 hora a esta temperatura, el calentamiento de la muestra se hace junto con la elevación de temperatura del horno. Enfriamiento en aceite hasta temperatura ambiente y posterior revenido durante 1 hora para todas las muestras a 650°C.

## 11.5 Evaluación mecánica fase II

En esta etapa de la investigación se desarrollaron ensayos de tensión, tensión con entalla, energía absorbida, a una de las muestras recibidas y se evaluó el desempeño en fatiga de la misma con un tratamiento térmico de temple y revenido propuesto en la presente investigación. En las tablas 20 – 22 se muestran los resultados de las evaluaciones mecánicas realizadas a los materiales en esta fase.

Tabla 20. Resultados propiedades mecánicas (ensayo de tensión).

Muestra	UTS		Ys		% e (50 mm)
	(Mpa)	(ksi)	(Mpa)	(ksi)	
F2-M2.1	980.87	142.25	906.60	131.48	16.28
F2-M2.2	1015.07	147.21	941.40	136.53	16.34
F3-M3.1	990.7	143.68	878.9	127.47	14.40
F3-M3.2	975.93	141.54	880.82	127.74	16.00

Tabla 21. Resultados propiedades mecánicas (ensayo de tensión con entalla).

Muestra	Ys	s <sub>s</sub>	s <sub>s</sub> / Ys	NSR
	(MPa)	(MPa)	NSR	Promedio
F2-M2.1	906.60	1565.11	1.72	1.68
F2-M2.2	941.40	1531.27	1.63	
F3-M3.1	878.9	1440.43	1.64	1.70
F3-M3.2	880.82	1555.55	1.76	

Tabla 22. Resultados obtenidos de tenacidad al impacto.

Muestra	CVN (lb ft)	CVN (Julios)	CVN (lb ft) promedio	CVN (Julios) promedio
F1-M1	82.35	112	80.39	109.33
	81.99	111.5		
	76.84	104.5		
F2-M2	80.88	110	83.82	114
	84.56	115		
	86.03	117		
F3-M3	72.06	98	69.98	95.17
	68.38	93		
	69.49	94.5		

En la tabla 23 se muestra las ecuaciones obtenidas para la muestra F2-M2 evaluada en fatiga sin y con defectos con un tratamiento térmico de temple y revenido.

Tabla 23. Ecuaciones de fatiga

Muestra	Ecuación para bajo ciclaje	s	Límite de fatiga (MPa)	s
F2-M2	$\log(N) = 7.744 - 0.0062 S$	0.39	275.80	0.00
F2-M2*	$\log(N) = 6.453 - 0.0036 S$	0.39	180.99	12.19
F3-M3	$\log(N) = 14.450 - 0.0222 S$	0.50	442.43	19.90

\* Indica que los valores fueron obtenidos en la condición superficial con presencia de defectos.

En las figuras 90 – 92 se muestran las curvas de fatiga obtenidas sin y con defectos respectivamente con tratamiento térmico de temple y revenido.

Figura 90. Curva de fatiga para F2-M2 con tratamiento térmico sin defectos.

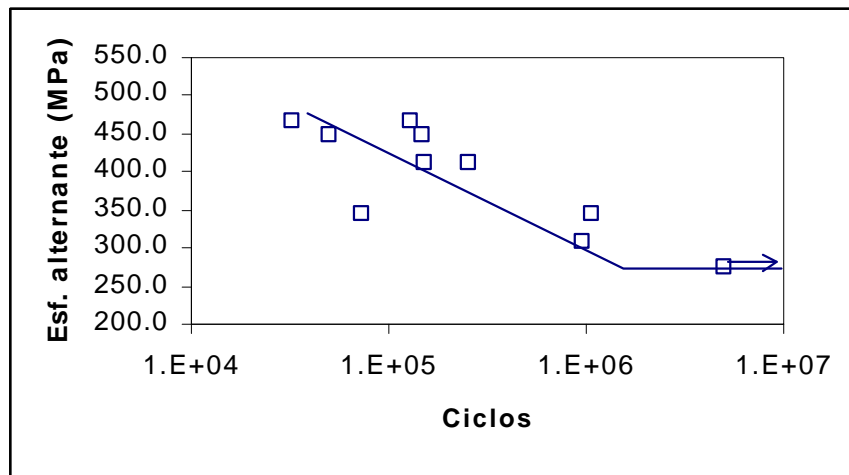


Figura 91. Curva de fatiga para F2-M2 con tratamiento térmico con defectos.

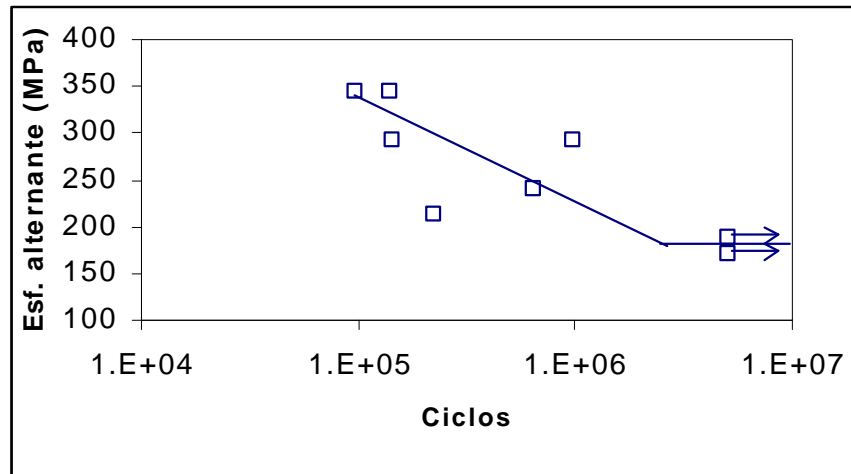
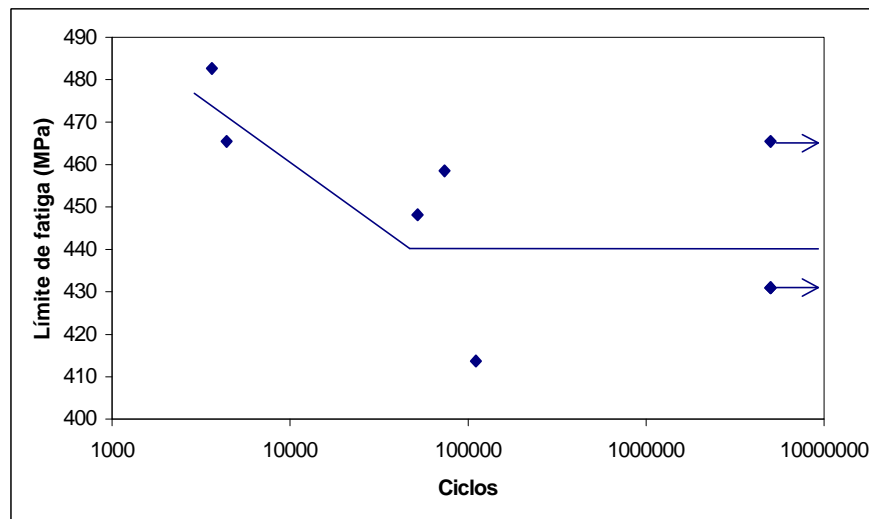


Figura 92. Curva de fatiga sin defectos muestra F3-M3 tratadas térmicamente.



## 12. FORMULACIÓN DEL MODELO DE CORRELACIÓN

Para el proceso de formulación del modelo de correlación se analizaron las relaciones existentes entre las variables que afectan el comportamiento en fatiga, a partir de estas se establece cuales son las variables que afectan en mayor grado el comportamiento en fatiga y posteriormente comparar estos resultados con el significado físico.

Inicialmente se analizan en dos grupos los materiales recibidos, en el grupo I se tienen las muestras F1-M1 y F2-M2 pertenecientes a familias 4330M, y para el grupo II se tienen las muestras F3-M3 y F1-M4 que pertenecen a la familia de aceros 4138 M. Después de la determinación de algún nivel de relación entre las variables se pasa a analizar los resultados obtenidos en la fase II de la investigación, es decir se realiza un análisis similar pero teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las muestras con tratamiento térmico de temple y revenido.

A continuación se muestran las ecuaciones diferenciales de primer orden que responden al análisis realizado.

$$\frac{d(\mathbf{s}_e)}{d(\mathbf{HBN})} = a(\mathbf{HBN})^b \quad (35)$$

$$\frac{d(\mathbf{s}_e)}{d(\mathbf{s}_o)} = c(\mathbf{s}_o)^d \quad (36)$$

$$\frac{d(\mathbf{s}_e)}{d(\mathbf{s}_u)} = e(\mathbf{s}_u)^f \quad (37)$$

$$\frac{d(\mathbf{s}_e)}{d(\mathbf{R})} = g(\mathbf{R})^h \quad (38)$$

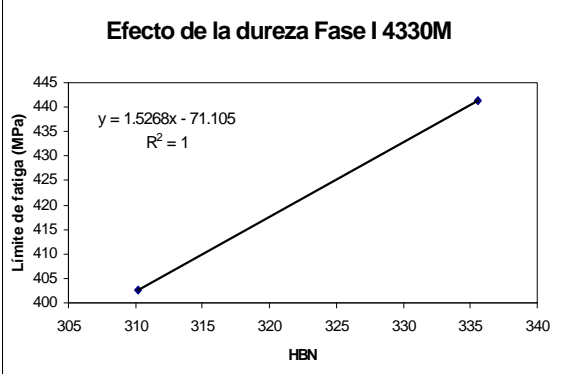
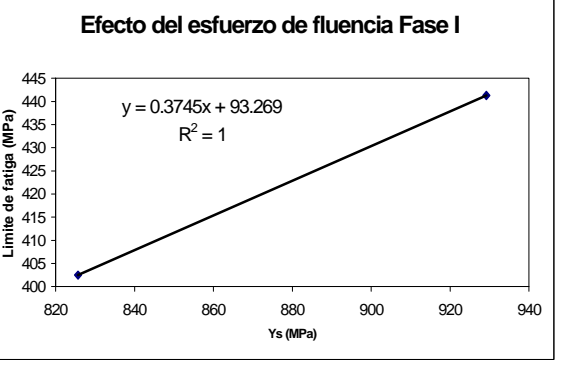
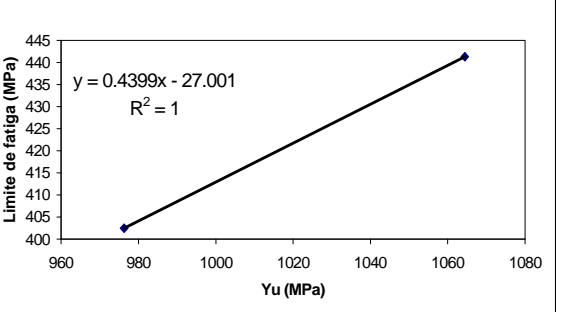
$$\frac{d(\mathbf{s}_e)}{d(\mathbf{s}_s)} = i(\mathbf{s}_s)^j \quad (39)$$

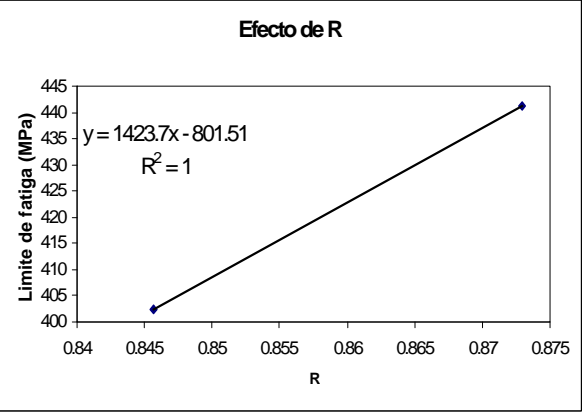
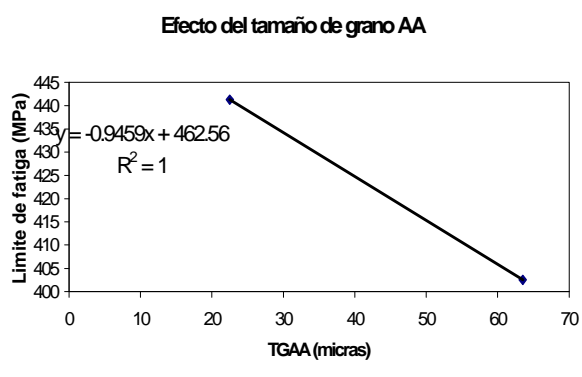
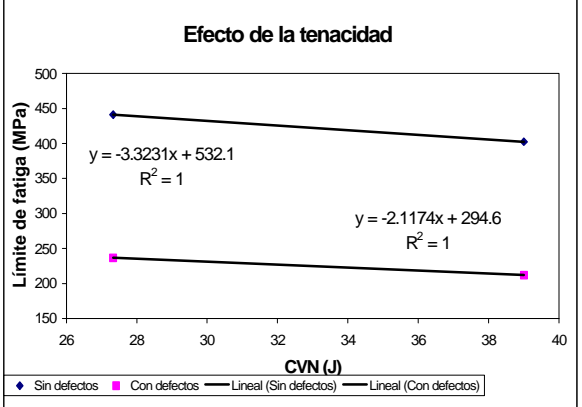
$$\frac{d(\mathbf{s}_e)}{d(\mathbf{TGAA})} = k\left(\frac{1}{\mathbf{TGAA}}\right)^l \quad (40)$$

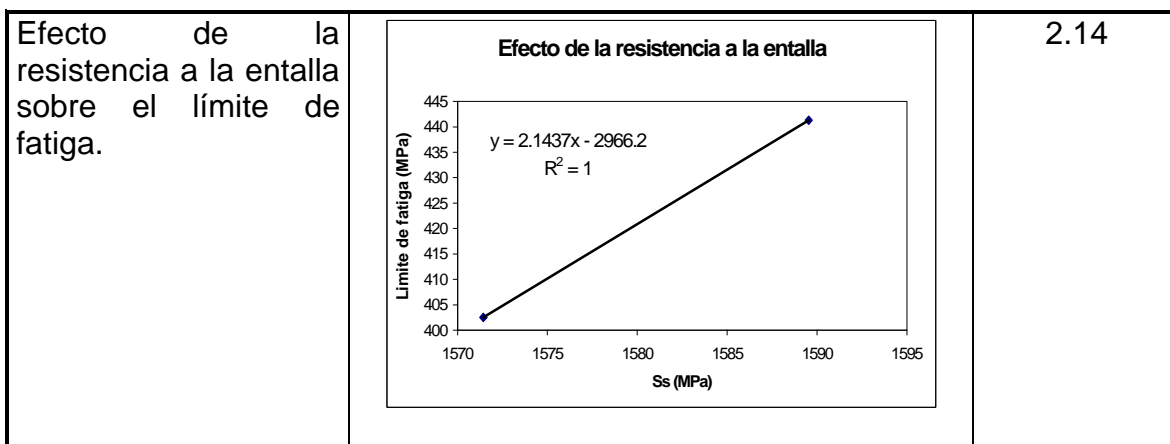
Las anteriores ecuaciones tienen como función determinar el efecto que tienen cada una de las variables involucradas sobre el límite de fatiga que se define como variable respuesta.

En la tabla 28 se muestran los resultados obtenidos a partir de la presente evaluación, el valor de la pendiente obtenida en cada relación representa desde el punto de vista físico el grado de efecto que tiene la variable independiente sobre la variable dependiente.

Tabla 28. Relación entre variables estudiadas para familia 4330M

Variables estudiadas	Gráfica	Valor de la pendiente
Efecto de la dureza sobre el límite de fatiga.	 <p><b>Efecto de la dureza Fase I 4330M</b></p> <p><math>y = 1.5268x - 71.105</math> <math>R^2 = 1</math></p>	1.53
Efecto del esfuerzo de fluencia sobre el límite de fatiga.	 <p><b>Efecto del esfuerzo de fluencia Fase I</b></p> <p><math>y = 0.3745x + 93.269</math> <math>R^2 = 1</math></p>	0.37
Efecto del esfuerzo último sobre el límite de fatiga.	 <p><b>Efecto de la resistencia mecánica</b></p> <p><math>y = 0.4399x - 27.001</math> <math>R^2 = 1</math></p>	0.44

<p>Efecto del valor de <math>R</math> sobre el límite de fatiga.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Efecto de R</b></p> 	<p>1423.7</p>
<p>Efecto del tamaño de grano de la austenita madre sobre el límite de fatiga.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Efecto del tamaño de grano AA</b></p> 	<p>-0.95</p>
<p>Efecto de la tenacidad al impacto sobre el límite de fatiga.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Efecto de la tenacidad</b></p> 	<p>Sin defectos, la pendiente es -3.32.</p> <p>Con defectos, la pendientes es -2.11.</p>



De la tabla 28 se observa que la mayoría de las variables afecta positivamente el comportamiento en fatiga, sin embargo, un aumento en el nivel de tenacidad tiende a disminuir el comportamiento en fatiga, en la tabla 29 se muestra un resumen de las pendientes obtenidas con un ordenamiento descendente.

Tabla 29. Resumen de variables.

<b>Variables estudiadas</b>	<b>Valor de la pendiente</b>
Efecto del valor de $R$ sobre el límite de fatiga.	1423.7
Efecto de la resistencia a la entalla sobre el límite de fatiga.	2.14
Efecto de la dureza sobre el límite de fatiga.	1.53
Efecto del esfuerzo último sobre el límite de fatiga.	0.44
Efecto del esfuerzo de fluencia sobre el límite de fatiga.	0.37
Efecto del tamaño de grano de la austenita madre sobre el límite de fatiga.	-0.95
Efecto de la tenacidad al impacto sobre el límite de fatiga.	<p style="text-align: center;">Sin defectos, la pendiente es -3.32.</p> <p style="text-align: center;">Con defectos, la pendientes es -2.11.</p>

A partir de la tabla 29 se observa que en general las propiedades mecánicas que tiendan a aumentar la dureza, resistencia mecánica, relación R, presentan un efecto favorable sobre la fatiga. El valor de la resistencia a la entalla presenta un mayor efecto que el que presentan las propiedades de esfuerzo de fluencia y ultimo, dureza. A partir del análisis anterior se puede concluir que las siguientes propiedades mecánicas van a ser tenidas en cuenta para ser incluidas en el modelo de correlación final de la investigación:

1. Resistencia a la entalla.
2. Relación de propiedades mecánicas ( R).
3. Tenacidad al impacto.

Teniendo en cuenta la hipótesis de la presente investigación, inicialmente se formula la siguiente ecuación:

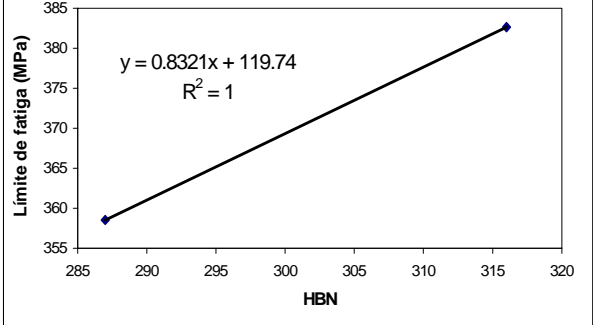
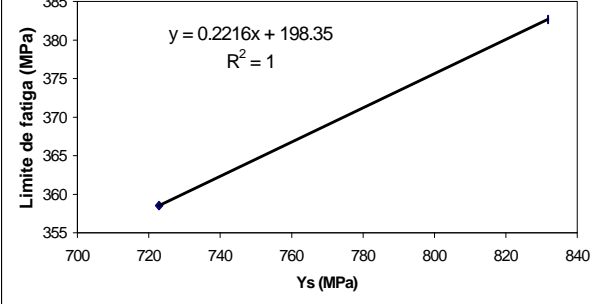
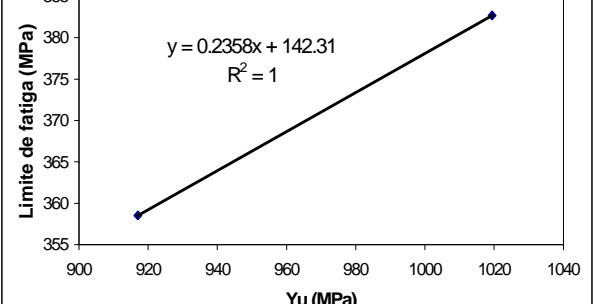
$$\frac{d(\mathbf{s}_e)}{d(CVN)} = f(CVN). \quad (41)$$

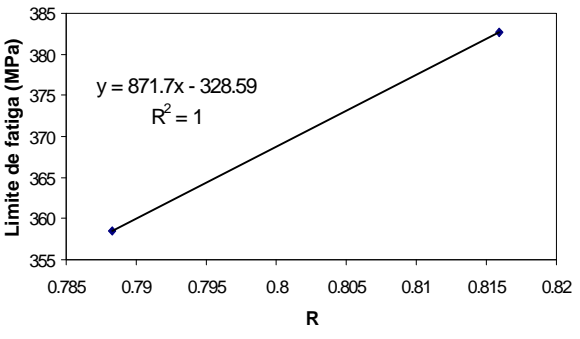
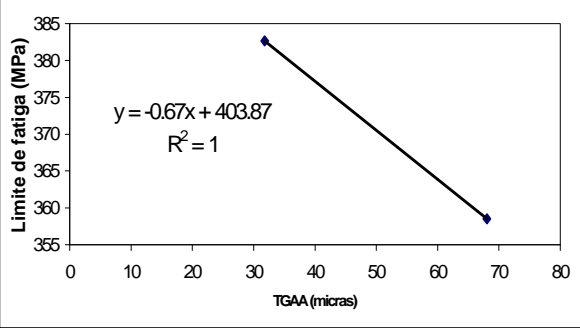
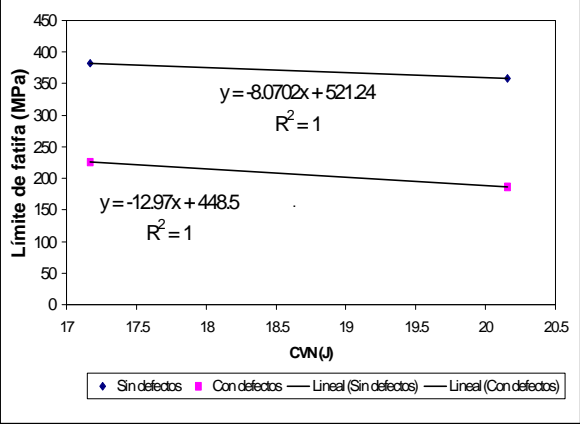
A partir de los resultados obtenidos anteriormente se prevé que la ecuación diferencial (41) no modela correctamente el efecto que se presenta entre la tenacidad al impacto y el comportamiento en fatiga, entonces, se formula la siguiente expresión que se espera que modele el comportamiento en fatiga:

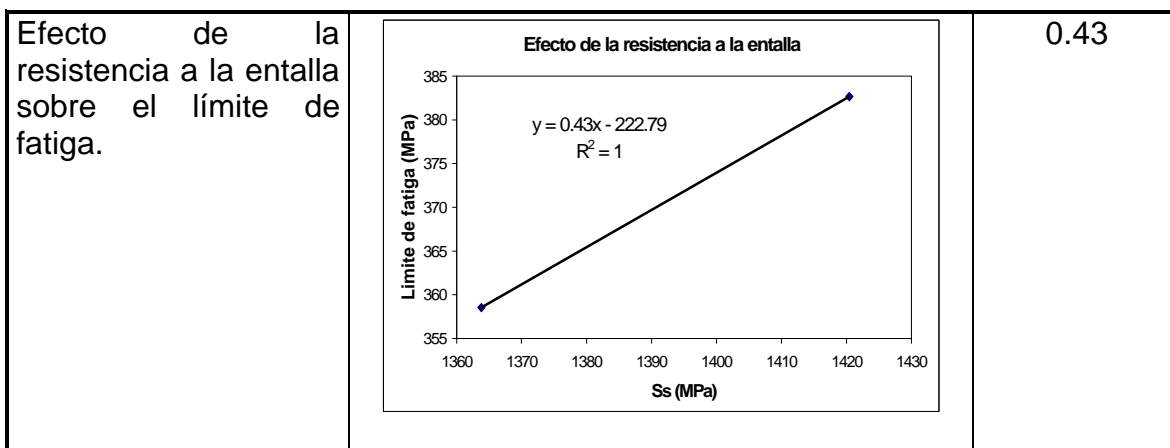
$$d(\mathbf{s}_e) = \frac{\partial(\mathbf{s}_e)}{\partial(CVN)} d(CVN) + \frac{\partial(\mathbf{s}_e)}{\partial(\mathbf{s}_s)} d(\mathbf{s}_s) + \frac{\partial(\mathbf{s}_e)}{\partial(R)} d(R) \quad (42)$$

En la tabla 30 se muestran los resultados obtenidos para la familia de aceros 4138 M en la fase I.

Tabla 30. Relación entre variables estudiadas para familia 4138M.

Variables estudiadas	Gráfica	Valor de la pendiente
Efecto de la dureza sobre el límite de fatiga.	<p style="text-align: center;"><b>Efecto de la dureza 4138M</b></p>  <p style="text-align: center;"><math>y = 0.8321x + 119.74</math> <math>R^2 = 1</math></p>	0.83
Efecto del esfuerzo de fluencia sobre el límite de fatiga.	<p style="text-align: center;"><b>Efecto del esfuerzo de fluencia</b></p>  <p style="text-align: center;"><math>y = 0.2216x + 198.35</math> <math>R^2 = 1</math></p>	0.22
Efecto del esfuerzo último sobre el límite de fatiga.	<p style="text-align: center;"><b>Efecto de la resistencia mecánica</b></p>  <p style="text-align: center;"><math>y = 0.2358x + 142.31</math> <math>R^2 = 1</math></p>	0.24

<p>Efecto del valor de <math>R</math> sobre el límite de fatiga.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Efecto de R</b></p>  <p style="text-align: center;"><math>y = 871.7x - 328.59</math> <math>R^2 = 1</math></p>	<p style="text-align: center;">871.7</p>
<p>Efecto del tamaño de grano de la austenita madre sobre el límite de fatiga.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Efecto del tamaño de grano AA</b></p>  <p style="text-align: center;"><math>y = -0.67x + 403.87</math> <math>R^2 = 1</math></p>	<p style="text-align: center;">-0.67</p>
<p>Efecto de la tenacidad al impacto sobre el límite de fatiga.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Efecto de la tenacidad</b></p>  <p style="text-align: center;"><math>y = -8.0702x + 521.24</math> <math>R^2 = 1</math></p> <p style="text-align: center;"><math>y = -12.97x + 448.5</math> <math>R^2 = 1</math></p> <p style="text-align: center;">◆ Sin defectos    ■ Con defectos    — Lineal (Sin defectos)    — Lineal (Con defectos)</p>	<p>Sin defectos, la pendiente es <math>-8.07</math></p> <p>Con defectos, la pendiente es <math>-12.97</math></p>



En la tabla 31 se muestra un resumen de los valores obtenidos.

Tabla 31. Relación entre variables estudiadas para familia 4138M.

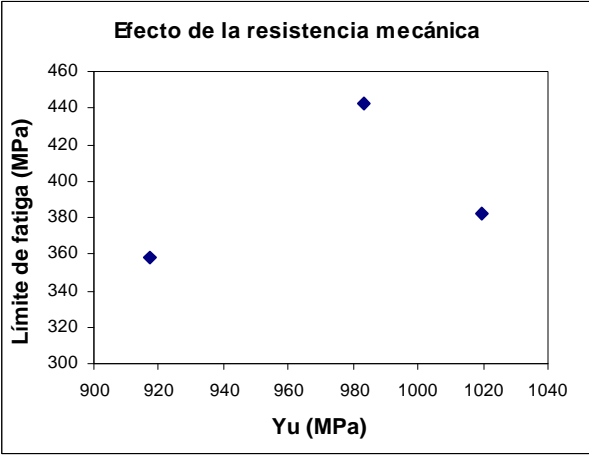
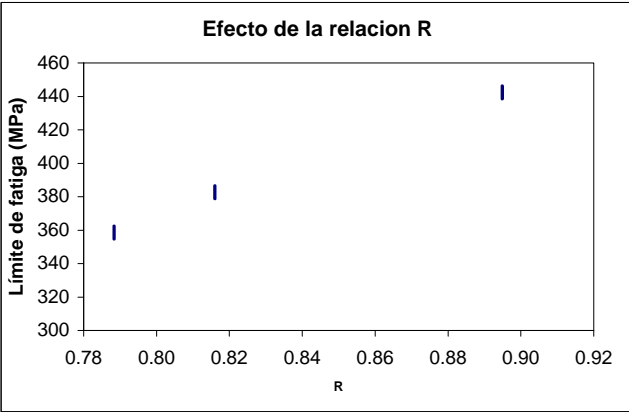
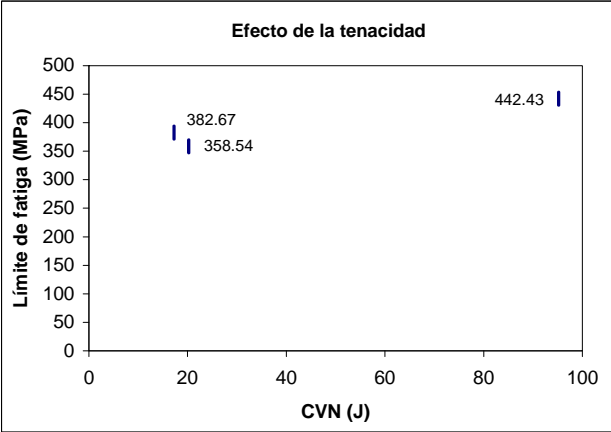
<b>Variables estudiadas</b>	<b>Valor de la pendiente</b>
Efecto del valor de $R$ sobre el límite de fatiga.	871.7
Efecto de la dureza sobre el límite de fatiga.	0.83
Efecto de la resistencia a la entalla sobre el límite de fatiga.	0.43
Efecto del esfuerzo último sobre el límite de fatiga.	0.24
Efecto del esfuerzo de fluencia sobre el límite de fatiga.	0.22
Efecto del tamaño de grano de la austenita madre sobre el límite de fatiga.	-0.67
Efecto de la tenacidad al impacto sobre el límite de fatiga.	<p style="text-align: center;">Sin defectos, la pendiente es <math>-8.07</math></p> <p style="text-align: center;">Con defectos, la pendientes es <math>-12.97</math></p>

A continuación se procede a realizar un análisis similar para estudiar los efectos del tratamiento térmico de temple y revenido. Las muestras tratadas térmicamente fueron F2-M2 Y F3-M3, la muestra F2-M2 no se tuvo en cuenta para el análisis por que la varilla a partir de la cual se hizo el muestreo para fabricar las probetas para el ensayo de fatiga presentaba la presencia de macroinclusiones alterando los resultados de los ensayos de fatiga.

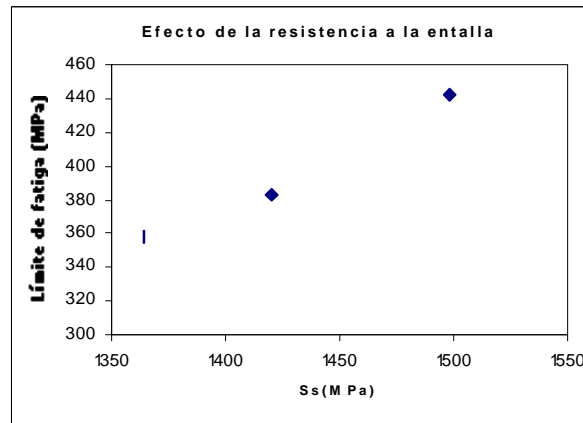
En las tabla 32 se muestra los resultados de este análisis.

Tabla 32. Relación entre las variables estudiadas sin y con tratamiento térmico.

Variables estudiadas	Gráfica
Efecto de la dureza sobre el límite de fatiga.	<p>Este gráfico de dispersión muestra la relación entre la dureza (HBN) y el límite de fatiga (MPa). El eje horizontal (X) representa la dureza (HBN) con marcas en 280, 290, 300, 310 y 320. El eje vertical (Y) representa el límite de fatiga (MPa) con marcas en 250, 300, 350, 400, 450 y 500. Se muestran dos puntos de datos: el primero está ubicado a una dureza de aproximadamente 285 HBN y un límite de fatiga de 355 MPa; el segundo punto está a una dureza de aproximadamente 315 HBN y un límite de fatiga de 440 MPa.</p>
Efecto del esfuerzo de fluencia sobre el límite de fatiga.	<p>Este gráfico de dispersión muestra la relación entre el esfuerzo de fluencia (Ys en MPa) y el límite de fatiga (MPa). El eje horizontal (X) representa el esfuerzo de fluencia (Ys en MPa) con marcas en 600, 650, 700, 750, 800, 850 y 900. El eje vertical (Y) representa el límite de fatiga (MPa) con marcas en 300, 320, 340, 360, 380, 400, 420, 440 y 460. Se muestran tres puntos de datos: el primero está a un esfuerzo de fluencia de aproximadamente 720 MPa y un límite de fatiga de 360 MPa; el segundo punto está a un esfuerzo de fluencia de aproximadamente 830 MPa y un límite de fatiga de 385 MPa; el tercer punto está a un esfuerzo de fluencia de aproximadamente 880 MPa y un límite de fatiga de 445 MPa.</p>

<p>Efecto del esfuerzo último sobre el límite de fatiga.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Efecto de la resistencia mecánica</b></p>  <table border="1"> <caption>Data for Efecto de la resistencia mecánica</caption> <thead> <tr> <th>Yu (MPa)</th> <th>Límite de fatiga (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>915</td> <td>358</td> </tr> <tr> <td>985</td> <td>440</td> </tr> <tr> <td>1020</td> <td>382</td> </tr> </tbody> </table>	Yu (MPa)	Límite de fatiga (MPa)	915	358	985	440	1020	382
Yu (MPa)	Límite de fatiga (MPa)								
915	358								
985	440								
1020	382								
<p>Efecto del valor de <math>R</math> sobre el límite de fatiga.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Efecto de la relacion R</b></p>  <table border="1"> <caption>Data for Efecto de la relacion R</caption> <thead> <tr> <th>R</th> <th>Límite de fatiga (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.79</td> <td>358</td> </tr> <tr> <td>0.815</td> <td>382</td> </tr> <tr> <td>0.895</td> <td>440</td> </tr> </tbody> </table>	R	Límite de fatiga (MPa)	0.79	358	0.815	382	0.895	440
R	Límite de fatiga (MPa)								
0.79	358								
0.815	382								
0.895	440								
<p>Efecto de la tenacidad al impacto sobre el límite de fatiga.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Efecto de la tenacidad</b></p>  <table border="1"> <caption>Data for Efecto de la tenacidad</caption> <thead> <tr> <th>CVN (J)</th> <th>Límite de fatiga (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>18</td> <td>382.67</td> </tr> <tr> <td>22</td> <td>358.54</td> </tr> <tr> <td>85</td> <td>442.43</td> </tr> </tbody> </table>	CVN (J)	Límite de fatiga (MPa)	18	382.67	22	358.54	85	442.43
CVN (J)	Límite de fatiga (MPa)								
18	382.67								
22	358.54								
85	442.43								

Efecto de la resistencia a la entalla sobre el límite de fatiga.



Se observó un aumento en el límite de fatiga cuando se realiza el tratamiento térmico de temple y revenido, esto puede ser evidenciado en las gráficas de los efectos que presenta la dureza, esfuerzo de fluencia, esfuerzo ultimo, tenacidad sobre el límite de fatiga obtenido en las muestras bonificadas.

A partir de los datos anteriores se formulan varios modelos de correlación entre el límite de fatiga, tenacidad y resistencia a la entalla de estos materiales.

### 12.1 Correlación entre Limite de fatiga, resistencia a la entalla, tenacidad al impacto, y relación de esfuerzos en el ensayo de tensión.

Las siguientes correlaciones obtenidas presentan como parámetros estadísticos:

- Error promedio absoluto = 0
- Error estándar de estimación = 0
- Residuales = 0

### Correlación entre Limite de fatiga, resistencia a la entalla y tenacidad al impacto.

$$s_e = -252.77 + 0.325(CVN) + 0.443s_s \quad (43)$$

**Correlación entre Limite de fatiga, resistencia a la entalla y relación de esfuerzos en el ensayo de tensión.**

$$s_e = -284.93 + 923.973(R) - 0.063s_s \quad (44)$$

**Correlación entre Limite de fatiga, relación de esfuerzos en el ensayo de tensión y tenacidad al impacto.**

$$s_e = -280.90 + 808.39(R) + 0.04(CVN) \quad (45)$$

### 13. CONCLUSIONES

1. No existe una correlación directa entre la tenacidad al impacto y el comportamiento en fatiga de los materiales estudiados en la presente investigación.
2. Se desarrollaron varias correlaciones entre el límite de fatiga, tenacidad al impacto, relación de esfuerzos mecánicos, y la resistencia a la entalla de los materiales evaluados.
3. Los criterios adicionales que aumentan el límite de fatiga determinados en la presente investigación fueron:  
  
Resistencia a la entalla.  
Relación entre el esfuerzo de fluencia y la resistencia mecánica.  
Tenacidad al impacto.
4. Los parámetros microestructurales de tamaño de grano ferrítico y austenítico anterior obtenidos a partir de la caracterización metalográfica en las muestras en condición de suministro determinan las propiedades de tenacidad al impacto y fatiga de las muestras evaluadas.
5. Los aceros de la familia 4330 M son superiores en resistencia a la fatiga comparados con los de la familia 4138M. Este comportamiento concuerda con lo comúnmente conocido en la literatura.
6. El uso de aceros modificados incrementa las propiedades mecánicas, la tenacidad y la resistencia a la fatiga, debido al afinamiento del tamaño de grano ferrítico y del grano austenítico anterior.
7. Las propiedades mecánicas de esfuerzo de fluencia y último afectan favorablemente el límite de fatiga del material. En los ensayos realizados el esfuerzo último determina el nivel donde se ubica el límite de fatiga, y el esfuerzo de fluencia determina la posición de la componente del máximo esfuerzo alternante correspondiente al límite de fatiga.
8. Los materiales evaluados presentan niveles similares de sensibilidad a la entalla. Los valores de tenacidad que presentan aportan muy poco en mejorar su desempeño a la fatiga ante la presencia de grietas.

9. Entre las varillas F2-M2 (4330M) y F1-M4 (4138M) se presento un resultado interesante, la varilla F1-M4 presenta propiedades mecánicas superiores a F2-M2 sin embargo, el limite de fatiga de F2-M2 fue superior a F1-M4, esto indica que la composición química y el nivel de tenacidad al impacto presentado en F2-M2 tuvo un efecto favorable en cuanto al desempeño en fatiga de larga duración.
10. Las muestras evaluadas en condición de suministro presentan niveles similares de sensibilidad a la entalla, medida en función del parámetro de factor de entalla.
11. El nivel de tenacidad al impacto presenta un efecto favorable sobre el límite de fatiga cuando se tienen las muestras con tratamiento térmico.
12. En los materiales estudiados a medida que se aumenta el parámetro de resistencia a la entalla se incrementa el límite de fatiga.
13. Se verifico la validez de la hipótesis planteada en la presente investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. WAGGONER J.R, and BUCHHEIT G. Analysis of Sucker Rod and Sinkerbar Failures, Sandia National Laboratories, EU, Marzo 1993
2. HENDRICKS CLAYTON and STEVENS RUSELL, Root Cause Failure Analysis is Essential for Failure Frequency Reduction in Wells With Artificial Lift, 1991.
3. MOORE KEITH, Stop Sucker Rod Failures To Save Money, Norris Sucker Rods, Petroleum Engineer International, 1981.
4. BELLOW, D.g., SMUGA-OTTO, I. "Corrosion-Fatigue of Oil Field Sucker Rods", Paper presented at 1991 Canadian Region Western Conference, Advances in Control, Saskatoon, Saakatchewan, February 19-21. P. 388-394.
5. HEIN. N.W Jr, HERMANSON. D.E, A New Look at Sucker Rod Fatigue Life, Society of Petroleum Engineers Inc, 1993.
6. API 11BR "Recommended Practice for Care and Handling of Sucker Rods", American Petroleum Institute, Washington, 1989.
7. API 11B American Petroleum Institute, Twenty Sixth Edition, January, Washington, 1998.
8. KOHOUT. J, y CHET. S.V, A new function for fatigue curves characterization and its multiple merits, International Journal of Fatigue 23, pag 175-183, January 2001.
9. JANG-CHUL SHIN and SUNGHAK LEE, Correlation of microstructure and fatigue properties of two high-strength spring steels, International Journal of Fatigue 21, pag 571-579, 22 January 1999.
10. SHANKAR MALL y NICHOLAS THEODORE, Effect of predamage from low cycle fatigue on high cycle fatigue strength of Ti-6Al-4V, International Journal of Fatigue 25, pag 1109-1116, 2003.
11. BATHIAS C y L. DROUILLAC, How and why the fatigue S-N curve does not approach a horizontal asymptote, International Journal of Fatigue 23, pag S143-S151, 2001.
12. WEIJU REN y NICHOLAS THEODORE, Effects and mechanisms of low cycle fatigue and plastic deformation on subsequent high cycle fatigue limit in nickel-base superalloy Udimet 720, Materials Science and Engineering A332 (2002) 236-248, 13 July 2001.
13. CAZAUD. R, La Fatiga de los Metales, Editorial Aguilar, Madrid, 1957.
14. COTTRELL A.H, HULL D, Proc. R. Soc (London) A 242, pag 211, 1957.
15. LAIRD C, DUQUETTE D.J, Mechanisms of Fatigue Crack Nucleation, Corrosion Fatigue, National Association of Corrosion Engineers, pag 88.
16. LUKAS P, KLESNIL M. Phys Status Solidi, Vol 27, 1968, Pag 545.

17. NEUMANN P. Acta Metallurgical, Vol 17, 1969, pag 1219.
18. VORMWALD M, SEEGER T, Crack Initiation Life Predictions Based on Elastic-Plastic Fracture Mechanics of Short Cracks, 1998.
19. DOWLING N.E, J Integral Estimations for Cracks in Infinite Bodies, submitted to Eng. Frac. Mech. 1998.
20. NEWWMAN J.C, International Journal of Fracture, Vol 24, R131-R135, 1984.
21. KWOFIE S. An exponential stress function for predicting fatigue strength and life due to mean stresses, Department of Materials Science and Engineering, Institute of Mining and Mineral Engineering, University of Science and Technology, Kumasi, Ghana, International Journal of Fatigue 23 (2001) 829–836
22. COLLINS. J.A. Failure of Materials in Mechanical Design Analysis, Prediction, Prevention, John Wiley and Sons, 1981.
23. DIETER. G, Mechanical Metallurgy, Mc Graw Hill Book Company, 1988.
24. SMITH S, NEWMAN J, PIASCIK R, Simulation of Fatigue Crack Initiation at Corrosion Pits With EDM Notches, NASA, March 2003.
25. TUPIASSU. J, MEGGIOLARO M, FADIGA sob Cargas Reais de servico, 2002.
26. MARTÍNEZ, A, VILLARREAL. J, MATEUS. M, AFANADOR. C. Evaluación del comportamiento de varillas de alta resistencia de sistemas de bombeo mecánico en ambientes corrosivos por CO<sub>2</sub>, X Congreso Colombiano del Petróleo, 2003
27. ATKINSON H, ANDERSON C, Estimation of the Maximum Inclusion in Clean Steels and the Relationship with Mechanical Properties, Dept. of Mechanical Engineering, University of Sheffield, 2003..
28. YANG Z, ZHANG J.M, The fatigue behaviors of zero-inclusion and commercial 42CrMo steels in the super-long fatigue life regime, Acta Materialia 52 5235–5241, (2004).
29. JUVONEN PEKKO, Effects of non – metallic inclusions on fatigue properties of Calcium Treated Steels, Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology to be presented with due permission for public examination and debate in Micronova (Large seminar room) at Helsinki University of Technology (Espoo, Finland) on the 10th of December, 2004.
30. DI SCHINO, KENNY J.M, Grain size dependence of the fatigue behaviour of a ultrafine – grained AISI 304 stainless steel, Materials Letters 57 (2003) 3182–3185.
31. SUBRAMANYA V, PADMANABHAN K, JAEGER G, On the fatigue crack growth behaviour of two ferrite–pearlite microalloyed steels, materials Letters 46 (2000) 185 – 188
32. LAMPMAN S, DAVIDSON G, REIDENBACH F, ASM HANDBOOK Fatigue and Fracture, Vol 19, 1996.
33. COLLAZOS, R.D, AYALA G. Optimización del Diseño de Varillas en la GAM, ECOPETROL GAM, 1996.
32. T.H HILL Associates Inc, Attributes of Drill String Components, Section C

33. VALENCIA Asdrúbal, Tecnología del Tratamiento térmico de los metales, ediciones Previas, Universidad de Antioquia, 1986.
34. SUNGHO K, SUNGHAK L, YOUNG R, HU-CHUL L, SUNG – JOON, HONG J, Effects of Alloying Elements on Fracture Toughness in the Transition Temperature Region of Base Metals and Simulated Heat – Affected Zones of Mn – Mo – Ni Low Alloy Steels, METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, Vol 35 A, July 2004.
35. BARSON J.M, ROLFE S.T, Fracture and fatigue Control in Structures, Prentice - Hall, 1987.
36. TADA H, IRWIN G, The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research 1985.
37. Norma ASTM E 415 – 99 a, STANDARD TEST METHOD FOR OPTICAL EMISSION VACUUM SPECTROMETRIC ANALYSIS OF CARBON AND LOW ALLOY STEEL, 1999.
38. Norma ASTM A 370 - 02, STANDARD TEST METHOD FOR MECHANICAL TESTING OF STEEL PRODUCTS, 2002.
39. Norma ASTM E 10 - 01, STANDARD TEST METHOD FOR BRINELL HARDNESS OF METALLIC MATERIALS, 2001.
40. Norma ASTM E 92 - 92, STANDARD TEST METHOD FOR VICKERS HARDNESS OF METALLIC MATERIALS, 1992.
41. Norma ASTM E 8 - 01, STANDARD TEST METHOD FOR TENSION TESTING OF METALLIC MATERIALS, 2001.
42. Norma ASTM E 23 – 02 a, STANDARD TEST METHOD FOR NOTCHED BAR IMPACT TESTING OF METALLIC MATERIALS, 2002.
43. OLLILAINEN V, KASPRAK W, HOLAPA L, The effect of silicon, vanadium and nitrogen on the microstructure and hardness of air cooled medium carbon low alloy steels, Journal of Materials Processing Technology (2003), 405-412.