



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“INFLUENCIA DE LA TORSIÓN PLÁSTICA SOBRE LA
RESISTENCIA A ESFUERZO AXIAL DEL ACERO
AISI/SAE 1018 LAMINADO EN FRÍO”**

**LEMACHE VELARDE WILLIAN OSWALDO
ILBAY YUPA LUIS FRANKLIN**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR

2015

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2012-04-24

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

WILLIAN OSWALDO LEMACHE VELARDE

Titulada:

**“INFLUENCIA DE LA TORSIÓN PLÁSTICA SOBRE LA RESISTENCIA A
ESFUERZO AXIAL DEL ACERO AISI/SAE 1018 LAMINADO EN FRÍO”**

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

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Marco Santillán G.
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Mario Pástor R.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Marco Almendáriz P.
ASESOR DE TESIS

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: WILLIAN OSWALDO LEMACHE VELARDE

TÍTULO DE LA TESIS: “INFLUENCIA DE LA TORSIÓN PLÁSTICA SOBRE LA RESISTENCIA A ESFUERZO AXIAL DEL ACERO AISI/SAE 1018 LAMINADO EN FRÍO”

Fecha de Examinación: 2015-02-13

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Marco Santillán G. PRESIDENTE DE TRIBUNAL			
Ing. Mario Pástor R. DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Marco Almendáriz P. ASESOR DE TESIS			

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

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Marco Santillán G.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2012-04-24

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

LUIS FRANKLIN ILBAY YUPA

Titulada:

**“INFLUENCIA DE LA TORSIÓN PLÁSTICA SOBRE LA RESISTENCIA A
ESFUERZO AXIAL DEL ACERO AISI/SAE 1018 LAMINADO EN FRÍO”**

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

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Marco Santillán G.
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Mario Pástor R.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Marco Almendáriz P.
ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: LUIS FRANKLIN ILBAY YUPA

TÍTULO DE LA TESIS: “INFLUENCIA DE LA TORSIÓN PLÁSTICA SOBRE LA RESISTENCIA A ESFUERZO AXIAL DEL ACERO AISI/SAE 1018 LAMINADO EN FRÍO”

Fecha de Examinación: 2015-02-13

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Marco Santillán G. PRESIDENTE DE TRIBUNAL			
Ing. Mario Pástor R. DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Marco Almendáriz P. ASESOR DE TESIS			

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

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Marco Santillán G.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

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

Willian Oswaldo Lemache Velarde

Luis Franklin Ilbay Yupa

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado al gran amor y apoyo incondicional durante toda mi vida y en especial de la carrera, gracias de todo corazón a mis padres Roció Velarde y Willian Lemache, que fueron el motor para que esta etapa de mi vida culmine con éxito, gracias Dios por tenerlos a mi lado y llenarme de bendiciones.

Willian Oswaldo Lemache Velarde

A Dios, por permitirme cumplir un éxito más en mi vida, por regalarme dos seres maravillosos como son mis padres Teresa Yupa y Luis Ilbay quienes han sido un ejemplo de superación y fuente de valentía para momentos difíciles.

Luis Franklin Ilbay Yupa

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por brindarnos el conocimiento de sus honorables docentes, y especialmente al Ing. Mario Pástor R. que guío nuestro camino en el desarrollo de esta investigación.

Este trabajo es fruto de la perseverancia, de quienes con su apoyo lograron que este éxito culmine, gracias a mi familia, a mis padres, hermanos y a mi enamorada Andrea Samaniego.

Willian Oswaldo Lemache Velarde

A mi familia y amigos quienes siempre estuvieron apoyándome en todo momento de mi vida y carrera, a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por orientarme en la adquisición de conocimientos y al Ing. Mario Pástor, Director de Tesis, por su ayuda incondicional.

Luis Franklin Ilbay Yupa

CONTENIDO

Pág.

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	Antecedentes	1
1.1.1	<i>Proyectos realizados.</i>	1
1.2	Justificación	3
1.3	Objetivos	3
1.3.1	<i>Objetivo general.</i>	3
1.3.2	<i>Objetivos específicos:</i>	3
1.4	Metodología.....	4
2.	MARCO TEÓRICO	6
2.1	Fundamentos para el endurecimiento de los metales	6
2.1.1	<i>Estructura cristalina.</i>	6
2.1.1.1	<i>Cúbica centrada en el cuerpo (BCC).</i>	6
2.1.1.2	<i>Red cúbica centrada en las caras (FCC).</i>	7
2.1.1.3	<i>Red hexagonal compacta (HC).</i>	7
2.1.2	<i>Materiales policristalinos.</i>	7
2.1.3	<i>Dislocaciones.</i>	8
2.1.3.1	<i>Dislocación de cuña.</i>	8
2.1.3.2	<i>Dislocación helicoidal.)</i>	9
2.1.3.3	<i>Dislocaciones mixtas.</i>	9
2.1.4	<i>Relación entre las dislocaciones y la deformación plástica.</i>	10
2.1.5	<i>Mejora de las propiedades mecánicas.</i>	10
2.1.6	<i>Mecanismos de endurecimiento.</i>	10
2.1.6.1	<i>Endurecimiento por disolución sólida.</i>	10
2.1.6.2	<i>Endurecimiento por deformación.</i>	10
2.1.6.3	<i>Endurecimiento por reducción del tamaño de grano.</i>	11
2.2	Elasticidad	11
2.2.1	<i>Pequeños desplazamientos.</i>	12
2.2.2	<i>Pequeñas deformaciones.</i>	12
2.2.3	<i>Comportamiento elástico y lineal del material.</i>	12
2.3	Plasticidad	13
2.3.1	<i>Ensayo de tracción Uniaxial.</i>	16
2.4	Endurecimiento por deformación plástica en frío	18
2.5	Endurecimiento anisótropo	24
2.6	Comportamiento elástico anisótropo y criterios de fluencia anisótropos	24
2.6.1	<i>Anisotropía plástica.</i>	24
2.6.2	<i>Anisotropía elástica.</i>	27

2.7	Grandes deformaciones elastoplásticas	29
3.	EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	32
3.1	Material a ensayar	34
3.1.1	<i>Justificación del tipo de acero a ensayar.</i>	34
3.1.2	<i>Acero AISI-SAE 1018 laminado en frío.</i>	35
3.1.2.1	<i>Características del acero.</i>	35
3.1.2.2	<i>Metalurgia del material.</i>	35
3.2	Caracterización de las muestras de acero previo a los ensayos.....	36
3.2.1	<i>Análisis Metalográfico.</i>	36
3.2.1.1	<i>Análisis de imagen.</i>	37
3.2.1.2	<i>Estimación aproximada del porcentaje de carbono.</i>	39
3.2.2	<i>Ensayo de tracción simple.</i>	39
3.2.2.1	<i>Dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción simple.</i>	39
3.3	Extracción de probetas para el ensayo de torsión	42
3.3.1	<i>Dimensiones de la probeta para el ensayo a torsión.</i>	42
3.4	Ensayo mecánico a torsión.....	43
3.4.1	<i>Ensayo de torsión hasta la fractura.</i>	43
3.5	Evaluación de la microestructura del acero AISI SAE 1018 laminado en frío.46	
3.5.1	<i>Medición del tamaño de grano de las muestras.</i>	65
3.5.1.1	<i>Medición del tamaño de grano vertical.</i>	67
3.5.1.2	<i>Medición del tamaño de grano horizontal.</i>	74
3.6	Micro dureza.....	80
3.7	Ensayo mecánico de tracción	85
3.7.1	<i>Análisis de las propiedades mecánicas.</i>	93
3.8	Examen fotomacrográfico de las facturas de la probeta de suministro y casos en estudio.....	97
3.8.1	<i>Análisis cuantitativo de las macrofotografías de fracturas.</i>	100
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
4.1	Conclusiones.....	102
4.2	Recomendaciones.....	103

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

LISTA DE TABLAS

Pág.

1.	Denominación de los aceros más comunes según AISI-SAE	34
2.	Propiedades mecánicas del acero AISI SAE 1018	35
3.	Dimensiones de la probeta de sección circular	39
4.	Valores de fuerza, deformación unitaria y esfuerzo	40
5.	Dimensiones de las probetas para el ensayo de torsión	42
6.	Valores de deformación angular y esfuerzo cortante que experimenta la probeta de acero AISI 1018 laminado en frío	44
7.	Codificación de las muestras para los ensayos metalográficos	46
8.	Codificación de las muestras para los ensayos metalográficos	46
9.	Tamaño de grano vertical, probeta de suministro	67
10.	Tamaño de grano vertical, probeta torsionada 70°	68
11.	Tamaño de grano vertical, probeta torsionada 270°	69
12.	Tamaño de grano vertical, probeta torsionada 540°	69
13.	Tamaño de grano vertical, probeta torsionada 1080°	70
14.	Tamaño de grano vertical, probeta torsionada 1800°	71
15.	Tamaño de grano vertical, probeta torsionada 3600°	71
16.	Tamaño de grano horizontal, probeta de suministro	74
17.	Tamaño de grano horizontal, probeta torsionada 70°	74
18.	Tamaño de grano horizontal, probeta torsionada 270°	75
19.	Tamaño de grano horizontal, probeta torsionada 540°	76
20.	Tamaño de grano horizontal, probeta torsionada 1080°	77
21.	Tamaño de grano horizontal, probeta torsionada 1800°	77
22.	Tamaño de grano horizontal, probeta torsionada 3600°	78
23.	Valores de distancia desde la superficie al centro del eje, y la durezacorrespondiente a cada ángulo de deformación.....	80
24.	Valores de fuerza, deformación unitaria y esfuerzo axial, de la probeta torsionada70°	85
25.	Valores de fuerza, deformación unitaria y esfuerzo axial, de la probeta torsionada270°	86
26.	Valores de fuerza, deformación unitaria y esfuerzo axial, de la probeta torsionada540°	87
27.	Valores de fuerza, deformación unitaria y esfuerzo axial, de la probeta torsionada1080°	88

28. Valores de fuerza, deformación unitaria y esfuerzo axial, de la probeta torsionada1800°	89
29. Valores de fuerza, deformación unitaria y esfuerzo axial, de la probeta torsionada3600°	91
30. Comparación de las propiedades mecánicas a tracción, de la probeta desuministro con cada una de las propiedades respecto a cada caso	93
31. Diámetros de los conos formados por el esfuerzo de torsión.....	100

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1. Estructura cúbica centrada en el cuerpo.....	6
2. Estructura cúbica centrada en las caras	7
3. Estructura hexagonal.....	7
4. Dislocación de cuña	8
5. Dislocación helicoidal	9
6. Dislocación mixta	9
7. Hipótesis de pequeños desplazamientos.....	12
8. Cambios de la posición atómica	14
9. Criterio de plastificación de Von Mises	15
10. Ensayo de tracción uniaxial	16
11. Idealización del comportamiento elasto-plástico perfecto	17
12. Curvas tensión-deformación idealizadas en plasticidad.....	17
13. Endurecimiento por deformación en los aceros	19
14. Deformación plástica se da a esfuerzo constante.....	20
15. Curva esfuerzo vs deformación en los metales reales.....	20
16. El endurecimiento por deformación se refleja en la curva del metal de la siguienteforma	20
17. Curva del endurecimiento por deformación en metales	21
18. Curva endurecimiento por deformación	21
19. Tipos de endurecimiento habituales	24
20. Textura inducida a una probeta de latón- α después de someterla a un ensayo detracción	25
21. Proceso de laminado donde se aprecia la formación de una textura orientada enla dirección de laminado.....	26
22. Distribuciones de los módulos de elasticidad y de rigidez a torsión	27
23. Módulo de elasticidad, módulo de rigidez a cortante y coeficiente de Poisson	28
24. Variación del Módulo de Young (GPa)	29
25. Comparativa entre los valores suministrados por las distintas medidas dedeformación	30
26. Curvas típicas obtenidas en un ensayo uniaxial para dos medidas de tensión y dedeformación	30
27. Flujograma de la metodología experimental	32
28. Sección transversal, atacado químicamente con Nital 4, visto a 100x	36
29. Sección transversal, atacado químicamente con Nital 4, visto a 200x	37
30. Sección transversal, atacado químicamente con Nital 4, visto a 500.....	37

31.	Fotomicrografía del acero AISI SAE 1018, tomada a 100X	38
32.	Pigmentación de la fase perlita, foto de acero AISI SAE 1018, tomada a 100X...	38
33.	Esquema del dimensionamiento de la probeta de sección transversal redondapara el ensayo de tracción	40
34.	Curva esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018	41
35.	Esquema de las dimensiones para los ensayos de torsión.....	42
36.	Máquina de torsión.....	43
37.	Diagrama esfuerzo cortante vs deformación angular.....	45
38.	Diagrama esfuerzo cortante vs deformación angular.....	45
39.	Micrografía de a partir del centro de 0-400 μm , atacada con nital 4%, tomada a200x	47
40.	Micrografía de a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	48
41.	Micrografía de a partir del centro de 2800-3200 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	48
42.	Micrografía de a partir del centro de 4400-4800 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x.....	49
43.	Micrografía de a partir del centro de 5850-6250 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	49
44.	Micrografía de a partir del centro de 0-400 μm , atacada con nital 4%, tomada a200x.....	50
45.	Micrografía de a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	50
46.	Micrografía de a partir del centro de 2800-3200 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	51
47.	Micrografía de a partir del centro de 4400-4800 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	51
48.	Micrografía de a partir del centro de 5850-6250 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x.....	52
49.	Micrografía de a partir del centro de 0-400 μm , atacada con nital 4%, tomada a200x	52
50.	Micrografía de a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	53
51.	Micrografía de a partir del centro de 2800-3200 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	53
52.	Micrografía de a partir del centro de 4400-4800 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	54

53. Micrografía de a partir del centro de 5850-6250 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	54
54. Micrografía de a partir del centro de 0-400 μm , atacada con nital 4%, tomada a200x	55
55. Micrografía de a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	55
56. Micrografía de a partir del centro de 2800-3200 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	56
57. Micrografía de a partir del centro de 4400-4800 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	56
58. Micrografía de a partir del centro de 5850-6250 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	57
59. Micrografía de a partir del centro de 0-400 μm , atacada con nital 4%, tomada a200x	57
60. Micrografía de a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	58
61. Micrografía de a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	58
62. Micrografía de a partir del centro de 4400-4800 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	59
63. Micrografía de a partir del centro de 5850-6250 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	59
64. Micrografía de a partir del centro de 0-400 μm , atacada con nital 4%, tomada a200x	60
65. Micrografía de a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	60
66. Micrografía de a partir del centro de 2800-3200 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	61
67. Micrografía de a partir del centro de 4400-4800 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	61
68. Micrografía de a partir del centro de 5850-6250 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	62
69. Micrografía de a partir del centro de 0-400 μm , atacada con nital 4%, tomada a200x	62
70. Micrografía de a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	63

71. Micrografía de a partir del centro de 2800-3200 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	63
72. Micrografía de a partir del centro de 4400-4800 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	64
73. Micrografía de a partir del centro de 5850-6250 μm , atacada con nital 4%, tomadaa 200x	64
74. Distancia afectada por la torsión a partir de la periferia al centro.....	65
75. Fotomicrografía a 200x del centro de la Probeta de Suministro.....	66
76. Corte longitudinal del eje de transmisión	67
77. Distribución del tamaño de grano vertical del centro al extremo de la probeta desuministro.....	68
78. Distribución del tamaño de grano vertical del centro al extremo de la probetatorsionada 70°	68
79. Distribución del tamaño de grano vertical del centro al extremo de la probetatorsionada 270°	69
80. Distribución del tamaño de grano vertical del centro al extremo de la probetatorsionada 540°	70
81. Distribución del tamaño de grano vertical del centro al extremo de la probetatorsionada 1080°	70
82. Distribución del tamaño de grano vertical del centro al extremo de la probetatorsionada 1800°	71
83. Distribución del tamaño de grano vertical del centro al extremo de la probetatorsionada 3600°	72
84. Comparación del tamaño de grano vertical, entre la probeta de suministro y loscasos de estudiado	73
85. Evolución del tamaño de grano vertical en función de la distancia de la probeta desuministro y los casos estudiados	73
86. Distribución del tamaño de grano horizontal del centro al extremo de la probeta desuministro.....	74
87. Distribución del tamaño de grano horizontal del centro al extremo de la probetatorsionada 70°	75
88. Distribución del tamaño de grano horizontal del centro al extremo de la probetatorsionada 270°	76
89. Distribución del tamaño de grano horizontal del centro al extremo de la probetatorsionada 540°	76
90. Distribución del tamaño de grano horizontal del centro al extremo de la probetatorsionada 1080°	77

91.	Distribución del tamaño de grano horizontal del centro al extremo de la probeta torsionada 1800°	78
92.	Distribución del tamaño de grano horizontal del centro al extremo de la probeta torsionada 3600°	78
93.	Comparación del tamaño de grano horizontal, entre la probeta de suministro y los casos de estudiado	79
94.	Evolución del tamaño de grano horizontal en función de la distancia de la probeta de suministro y los casos estudiados	79
95.	Diagrama de evolución de microdureza vs distancia desde el extremo al centro de la probeta de suministro	81
96.	Diagrama de evolución de microdureza vs distancia desde el extremo al centro de la Probeta_T.70°	81
97.	Diagrama de evolución de microdureza vs distancia desde el extremo al centro de la Probeta_T.270°	82
98.	Diagrama de evolución de microdureza vs distancia desde el extremo al centro de la Probeta_T.540°	82
99.	Diagrama de evolución de microdureza vs distancia desde el extremo al centro de la Probeta_T.1080°	82
100.	Diagrama de evolución de microdureza vs distancia desde el extremo al centro de la Probeta_T.1800°	83
101.	Diagrama de evolución de microdureza vs distancia desde el extremo al centro de la Probeta_T.3600°	83
102.	Evolución de microdureza de la probeta de suministro y los casos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 con respecto a la distancia desde el centro al extremo	84
103.	Evolución de microdurezas de la probeta de suministro y los casos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 linealizada con respecto a la distancia desde el centro al extremo	84
104.	Curva esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018, torsionada 70°	86
105.	Curva esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018, torsionada 270°	87
106.	Curva esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018, torsionada 540°	88
107.	Curva esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018, torsionada 1080°	89
108.	Curva esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018 axial, torsionada 1800°	90
109.	Curva esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018 axial, torsionada 3600°	92
110.	Curvas esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018, de los casos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y suministro	92
111.	Comportamiento del módulo de elasticidad en función del grado de torsión	94
112.	Comportamiento del esfuerzo de fluencia en función del grado de torsión	95
113.	Comportamiento del esfuerzo máximo en función del grado de torsión	95

114. Comportamiento del esfuerzo de rotura en función del grado de torsión	96
115. Comportamiento del porcentaje de elongación en función del grado de torsión ..	96
116. Fracturas de la probeta en estado de suministro	98
117. Fracturas de la probeta, caso 1 (Probeta_T.70°)	98
118. Fracturas de la probeta, caso 2 (Probeta_T.270°)	99
119. Fracturas de la probeta, caso 3 (Probeta_T.540°)	99
120. Fracturas de la probeta, caso 4 (Probeta_T.1080°)	99
121. Fracturas de la probeta, caso 5 (Probeta_T.1800°)	100
122. Fracturas de la probeta, caso 2 (Probeta_T.3600°)	100
123. Diagrama de evolución de diámetro del cono de fractura vs ángulo dedeformación por torsión.....	101

LISTA DE ABREVIACIONES

AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto americano del hierro y el acero)
SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotores)
INEN	Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para pruebas y Materiales)

ANEXOS

- A** NORMA ASTM E3-95.
- B** NORMA ASTM E8.
- C** TABLA DEL ENSAYO DE TRACCIÓN PROBETAS DE SUMINISTRO.
- D** TABLA DEL ENSAYO DE TORSIÓN.
- E** TABLA DE ENSAYO DE TRACCIÓN, CASOS EN ESTUDIO.
- F** NORMA ASTM E112.
- G** NORMA ASTM 384-84
- H** TABLA DE MICRODUREZAS

RESUMEN

El estudio de la influencia de la torsión plástica sobre la resistencia a esfuerzo axial del acero AISI/SAE 1018 laminado en frío, tiene como objetivo determinar las afectaciones microestructurales y de propiedades mecánicas que ocurren en el acero a causa de la deformación por torsión.

El estudio se inició con la caracterización del acero, mediante análisis metalográfico y la ejecución del ensayo de tracción. A través del ensayo de torsión se obtuvo el límite elástico, el cual fue el punto de partida para seis casos de estudio a diferentes ángulos de deformación, correspondientes a la zona plástica. Cada caso requirió de un análisis metalográfico para cuantificar la variación de forma, orientación y tamaño de grano; así mismo se complementó la experimentación con ensayos de microdureza Vickers. Por medio de ensayos de tracción se determinaron de las propiedades mecánicas de los casos. Los ensayos se rigen a las normas ASTM. Finalmente se analizaron las superficies de fractura para determinar si el comportamiento del material tiene carácter dúctil o frágil a diferentes grados de deformación.

La deformación por torsión produce cambios microestructurales de forma, orientación y disminución de tamaño de grano, mismos que evolucionan del centro a la periferia del eje. A mayor ángulo de deformación el ancho de la zona periférica afectada aumenta y a menor ángulo de deformación el ancho de la zona se reduce. Esto se debe a que el máximo esfuerzo cortante se genera en la periferia del eje, mientras en su centro el esfuerzo es nulo. Produciendo de esta manera mayor endurecimiento en la superficie. Aunque no fue posible evaluar la variación de la resistencia mecánica a lo largo del radio del eje, los resultados del ensayo de tracción mostraron que la resistencia a esfuerzo axial incrementa conforme aumenta la deformación por torsión. Sin embargo este incremento de resistencia mecánica produce una reducción significativa de la ductilidad del acero.

ABSTRACT

The study of the influence of plastic twist on resistance to axial stress of AISI / SAE 1018 cold rolled steel, it aims to determine the microstructural and mechanical property damages that occur in the steel due to torsional deformation.

The study began with the characterization of steel by metallographic analysis and implementation of the tensile test. Through trial torsional yield strength was obtained, which was the starting point for six case studies at different angles of deformation, corresponding to the plastic zone. Each case required a metallographic analysis to quantify the change in shape, orientation and grain size; Likewise experimentation Vickers microhardness testing was supplemented. Through tensile tests were determined from the mechanical properties of cases. The tests are governed ASTM standards. Finally the fracture surfaces were analyzed to determine whether the behavior of ductile or brittle material has different degrees of deformation character.

The torsional deformation occurs microstructural changes of shape, orientation and decreasing grain size, they evolve from the center to the periphery of the shaft. A deformation angle greater width of the peripheral area affected and deformation smaller angle increases the width of the zone is reduced. This is because the maximum shear stress is generated in the periphery of the shaft, while at its center the stress is zero. There by producing greater surface hardening. It was not possible to evaluate the variation of mechanical along the radius of the shaft resistance, the tensile test results showed that the resistance increases as axial force increases the torsional deformation. However this increase in mechanical strength produces a significant reduction of the ductility of the steel.



CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Antecedentes

Aspectos como las propiedades mecánicas de los aceros son debidamente estudiados mediante ensayos de simulación o experimentación en laboratorio. Los ensayos son de gran importancia, pues permiten evaluar los resultados obtenidos a condiciones reales bajo ciertos criterios.

1.1.1 Proyectos realizados. Se han desarrollado numerosos estudios sobre endurecimiento por deformación plástica, las mismas fueron desarrolladas en Belo Horizonte (Brasil, 2005), Universidad Nacional de Colombia (Colombia, 2008), Universidad de Salamanca (España, 2005) entre otras.

- Departamento de Ingeniería Metalúrgica de Materiales, Escuela de Ingeniería. Evaluación del Endurecimiento de Barras de Acero y de Latón en Ensayos de Tracción y de Torsión Cíclica (Evaluation of the Hardening of Steel and Brass Bars in Tensión and Cyclic Torsión Tests). Tesis realizada en el año 2005 por E.C.S. Corrêa, M.T.P. Aguilar y P.R. Cetlin, quienes se enfocaron en el comportamiento mecánico de muestras de acero de bajo carbono y de latón que se encontraban sometidos a esfuerzos combinados de tracción y torsión cíclica. Desarrollaron pruebas a tracción axial, torsión cíclica pura, tracción-torsión cíclica, torsión cíclica-tracción y tracción-torsión cíclica-tracción. Como resultados obtuvieron, alteraciones en la dirección de la deformación que fueron observados en las curvas tensión efectiva-deformación efectiva, a través del análisis del límite elástico y de la velocidad de endurecimiento de los metales. Estos resultados han evidenciado la influencia de la secuencia de deformación, de las características estructurales de los materiales y de la naturaleza de los esfuerzos en el endurecimiento durante la conformación de metales, a más de observarse un comportamiento transitorio/ablandamiento durante la torsión cíclica del acero pretraccionado, estos han sido asociados a cambios en la forma en la que las dislocaciones se distribuyen e interactúan entre sí. Los efectos más acentuados han sido obtenidos para las muestras de latón en comparación con las obtenidas en las muestras de acero de bajo carbono. (Evaluación del endurecimiento de barras de Acero y de laton en Ensayos de Tracción y Torsión Cíclica, 2005)

- *Universidad Nacional de Colombia, Ingeniería e Investigación.* Procedimiento para endurecer el acero 45 mediante la deformación plástica con rodillo simple. Investigación realizada en el año 2008, por Tomás Fernández Columbie, Isnel Rodríguez González, Dayanis Alcántara Borges y Esther Fernández enfocándose principalmente en el estudio del endurecimiento de un acero AISI 1045 cuando el mismo es sometido a un proceso de deformación plástica superficial con rodillo simple, también se demostró el posible endurecimiento de la capa superficial de piezas cilíndricas rotativas, reduciendo el empleo de métodos tradicionales como son el temple y revenido las cuales son consumidoras de energía. Se desarrolló el trabajo mediante técnicas de diseño experimentales evaluando el comportamiento de las variables que intervienen en el proceso permitiendo a través de un análisis microscópico establecer el estado tensional de la red cristalina. Además se utilizó el método de planificación estadística enfocándose en el número de ensayos a realizar. También se pudo destacar que los modelos plásticos y elastoplásticos, a pesar de tomar en cuenta el fenómeno de la rotura del material, no resuelven de forma general e integral el fenómeno de modelación del estado tensional-deformacional en un punto de un material específico. El análisis metalográfico consistió en la observación e identificación de las características de la estructura metalográfica en probetas de acero AISI 1045, antes de aplicar la carga y posterior a esta. El estudio tuvo como resultado, que a medida que se incrementa la fuerza, el valor de dureza va en crecimiento, confirmándose el aumento del tensionamiento de la red y el endurecimiento del material, puesto que el mismo ofrece mayor resistencia a la penetración una vez deformado plásticamente, además está condicionado por la aptitud del material para adquirir dureza por trabajo de deformación en frío. Se pudo llegar a una valoración de la influencia que ejerce el avance sobre la dureza calculándose varios estadígrafos y gráficos para cada muestra, con el fin de determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre muestras. (Procedimiento para endurecer el acero 45 mediante la deformación plástica con rodillo simple, 2008)

- *Universidad de Salamanca, Ingeniería de Materiales.* Análisis Fractográfico Cuantitativo del Comportamiento en Fractura de Aceros Perlíticos Progresivamente Trefilados, Fue desarrollada en el 2005 por J. Ayaso, B. González, J.C. Matos, D. Vergara, M. Lorenzo y J. Toribio, quienes estudiaron el comportamiento de la fractura de aceros Perlíticos progresivamente trefilados, así se pudo analizar con microscopia electrónica de barrido las diferentes fracturas que presentan las muestras a diferente grado de deformación plástica durante las distintas etapas del proceso mencionado.

Estudiaron 5 tipos de probetas, las cuales pertenecen a distintas coladas de acero perlíticos y a distintos procesos de trefilado, sucesivamente se hizo ensayos de tracción determinando la curva esfuerzo de tracción vs deformación unitaria y un análisis microscópico de los diferentes tipos de fractura que mostraban las probetas se llegó a la conclusión del aumento del límite elástico y la resistencia máxima que no es más que función de la deformación plástica acumulada. (Análisis fractográfico cuantitativo del comportamiento en fractura de aceros perlíticos progresivamente trefilados, 2005)

1.2 Justificación

La motivación principal para desarrollar la presente investigación, es la de apreciar cómo influye la deformación plástica, no por métodos tradicionales mediante rodillos, sino más bien mediante el proceso de torsión, en la resistencia a esfuerzo axial en una acero de transmisión.

Al acero AISI-SAE 1018 laminado en frío es comúnmente utilizado para fabricación de ejes de transmisión. Estos están normalmente sometidos a esfuerzo de torsión y flexión, entonces con una pre-torsión se pretende conocer las causas y evaluar las variaciones del límite de elasticidad y endurecimiento superficial. Es conocido que el esfuerzo cortante máximo se genera en la periferia del eje cambiando de esta manera sus propiedades mecánicas, mientras que en su centro se conserva las propiedades características del mismo ya que el esfuerzo es nulo. Sin embargo, las modificaciones de la microestructura del material que resisten en cambios de las propiedades mecánicas no están suficientemente identificadas por lo que se vuelve el objetivo de este estudio.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.* Analizar de qué manera influye la Torsión Plástica sobre la Resistencia a esfuerzo axial del acero AISI/SAE 1018 laminada en frío.

1.3.2 *Objetivos específicos:*

Comparar las propiedades mecánicas del Acero AISI-SAE 1018 laminada en frío, probetas de suministro con las muestras afectadas por torsión plástica a diferentes ángulos de deformación.

Analizar las microestructuras del acero AISI-SAE 1018 laminada en frío, para apreciar la variación de tamaño, forma u orientación de los granos del material torsionada de forma permanente.

Cuantificar la influencia de la torsión plástica en la resistencia a esfuerzo axial, basándonos en los resultados experimentales.

1.4 Metodología

La metodología de este trabajo se enfoca de manera cuantitativa en las actividades experimentales y ensayos de laboratorio. Para lo cual se procederá a la caracterización del acero AISI SAE 1018 laminado en frío, efectuando el análisis metalográfico y ensayo de tracción simple correspondiente, obteniendo de esta manera el porcentaje de carbono y las propiedades mecánicas respectivamente.

Posteriormente se prepararan muestras para el ensayo mecánico de torsión, hasta la fractura, para obtener de esta manera datos de torque y ángulo de deformación, con lo cual se obtendrá una gráfica esfuerzo cortante vs deformación angular, donde se apreciará el límite proporcional de la zona elástica.

Conociendo el ángulo de deformación donde se encuentra el límite elástico, se efectuarán ensayos de torsión a diferentes ángulos de deformación correspondientes a la zona plástica.

Para el análisis metalográfico se observarán las probetas en el microscopio óptico a diferentes magnificaciones, sección longitudinal, donde se identificarán las fases, forma, tamaño y orientación de los granos de la probeta de suministro y las muestras extraídas de las probetas afectadas por torsión, de esta manera se observará si existe alguna variación al comparar cada micrografía desde el centro de la probeta hacia la periferia de la misma, se espera ver cambios significativos en la superficie donde se generó un máximo esfuerzo cortante producido por torsión, con respecto al centro, posteriormente se realizara ensayos de microdureza a todas las muestras, sección transversal del eje, para conseguir gráficas dureza vs distancia

Luego se someterán las probetas a sollicitaciones de esfuerzos de tracción simple hasta la fractura para lo cual se tomaran datos de carga y deformación, obteniendo de esta manera las gráficas esfuerzo axial vs deformación unitaria, con lo cual se observará como incide la torsión plástica en las propiedades mecánicas del material con respecto al eje de trasmisión en condiciones de suministro. Finalmente se efectuó un análisis fotomacrográfico de las fractura conseguidas por en el ensayo de tensión.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

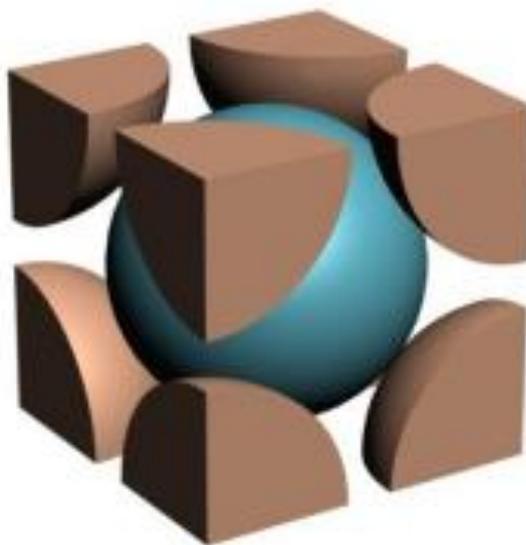
2.1 Fundamentos para el endurecimiento de los metales

2.1.1 Estructura cristalina. Los materiales sólidos se pueden clasificar según la regularidad con que se disponen los átomos en el espacio. Los átomos se ordenan formando estructuras reticulares que se extienden en las tres dimensiones: es lo que se llama una estructura cristalina. Conocer su morfología es especialmente importante, ya que algunas de las propiedades de los materiales en estado sólido dependen fuertemente de ella.

La mayoría de los metales más comunes se cristalizan formando una de las tres estructuras siguientes: cúbica centrada en las caras, cúbica centrada en el cuerpo y hexagonal compacta. (Crystallite size refinement in elemental species under mechanical processing conditions, 2005)

2.1.1.1 Cúbica centrada en el cuerpo (BCC). Los átomos se hallan dispuestos en los vértices y en el centro del cubo.

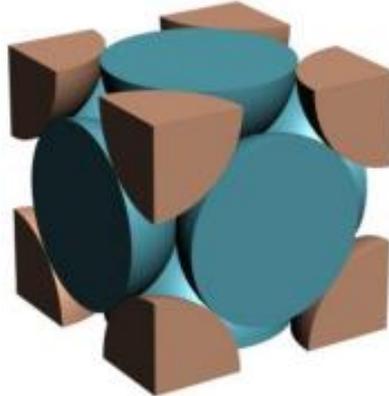
Figura 1. Estructura cúbica centrada en el cuerpo



Fuente: (AGUILAR, 2013)

2.1.1.2 Red cúbica centrada en las caras (FCC). Los átomos están dispuestos en los vértices y en los átomos de las caras del cubo.

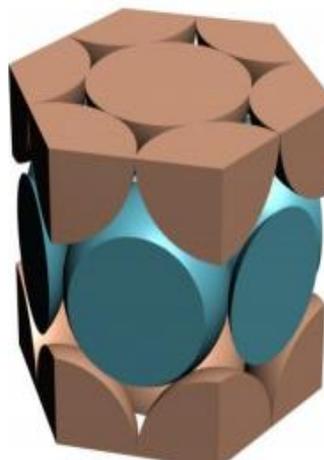
Figura 2. Estructura cúbica centrada en las caras



Fuente: (AGUILAR, 2013)

2.1.1.3 Red hexagonal compacta (HC). Los átomos se encuentran dispuestos formando prisma hexagonal, y presentan un átomo en el centro de cada base, un átomo en cada uno de los vértices del prisma y tres átomos más en un plano horizontal, interior al cristal. (Ame, 2009)

Figura 3. Estructura hexagonal



Fuente: (AGUILAR, 2013)

2.1.2 Materiales policristalinos. Pese a que los metales poseen estructuras cristalinas, es raro que se presenten como una única gran estructura monocristalina.

De hecho, la mayoría de los sólidos son un conjunto de muchos pequeños cristales o granos, consecuencia del proceso normal de solidificación, que sigue las siguientes etapas.

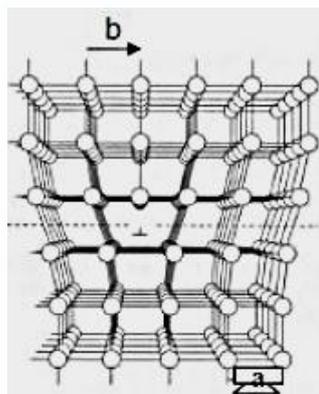
- Aparecen pequeños núcleos cristalinos en distintos lugares, con orientaciones cristalográficas al azar.
- Los núcleos forman granos pequeños que crecen al adherírseles átomos de líquido sub-enfriado.
- Los granos crecen hasta que sus extremos terminan por tocarse, interaccionando entre sí, finalizando la solidificación. En la región donde se unen dos granos, llamada límite de grano, la disposición atómica es irregular.

2.1.3 Dislocaciones. Las estructuras cristalinas no están exentas de defectos, sino todo lo contrario existen muchos tipos de imperfecciones, de carácter muy variado. Es importante conocerlas porque muchas de las propiedades de los materiales son muy sensibles a ellas. Se considera que existe un defecto cristalino cuando las irregularidades en la red tienen dimensiones del orden de un diámetro atómico.

Según su geometría las imperfecciones cristalinas se clasifican en: defectos de punto, defectos de línea e interfaciales. Los más interesantes son los defectos de línea o dislocaciones, tratados a continuación con más detalle. Una dislocación es un defecto lineal o unidimensional en torno a algunos átomos desalineados. Existen básicamente tres tipos. (CALLISTER, 1995)

2.1.3.1 Dislocación de cuña. Se trata de un semiplano de átomos de más, que ocupa una posición intermedia. Este semiplano se puede mover y ocupar la posición de cualquier otro, transformando de esta manera la estructura. La dislocación se mueve sobre un plano de deslizamiento. (CALLISTER, 1995)

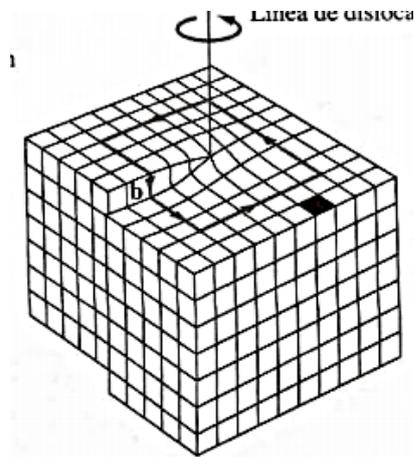
Figura 4. Dislocación de cuña



Fuente: (AGUILAR, 2013)

2.1.3.2 Dislocación helicoidal. Se forman al aplicar un esfuerzo de cizalla sobre él; la parte superior del cristal se desliza en bloque respecto a la parte inferior. (CALLISTER, 1995)

Figura 5. Dislocación helicoidal



Fuente: (AGUILAR, 2013)

2.1.3.3 Dislocaciones mixtas. Son las que aparecen con mayor frecuencia en los materiales cristalinos. Presenta componentes de dislocaciones helicoidales y de cuña. La magnitud y la dirección de las distorsiones se expresan mediante el vector de Burgers, designado por b . La naturaleza de una dislocación viene dada por las orientaciones relativas de la línea de dislocación y el vector de Burgers; en una dislocación de cuña son perpendiculares y en una de tipo helicoidal son paralelos. En una dislocación mixta no son ni perpendiculares ni paralelos. (CALLISTER, 1995)

Figura 6. Dislocación mixta



Fuente: (AGUILAR, 2013)

2.1.4 *Relación entre las dislocaciones y la deformación plástica.* Los esfuerzos aplicados a un sólido generan deslizamientos entre los planos atómicos de su estructura cristalina, transmitiéndose a cada grano. Esto genera tensiones internas entre ellos, o lo que es lo mismo, un estado tensional. Si estas tensiones internas, generalmente de cizalla, son lo suficientemente grandes como para mover átomos de su posición, se produce la deformación plástica. La existencia de dislocaciones permite el deslizamiento de planos con una menor tensión aplicada. Así pues, para obtener la misma deformación plástica es necesaria una tensión de cizalla mucho menor. Se puede hablar de una relación causa-efecto entre el movimiento de dislocaciones y la deformación plástica. (SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE COBRE SUBMICROMETRICO OBTENIDO POR MOLIENDA MECÁNICA Y, 2010)

2.1.5 *Mejora de las propiedades mecánicas.* La capacidad de un metal para deformarse plásticamente depende de la capacidad de las dislocaciones para moverse y facilitar el deslizamiento de planos. Puesto que las propiedades mecánicas de un material (dureza y resistencia) están relacionadas con la facilidad con la cual se deforma plásticamente, se puede aumentar la resistencia mecánica reduciendo la movilidad de las dislocaciones. Es decir, será necesario aplicar mayores fuerzas mecánicas para iniciar la deformación plástica.

2.1.6 *Mecanismos de endurecimiento.* Se conocen diversos mecanismos que permiten el endurecimiento de los materiales policristalinos:

2.1.6.1 *Endurecimiento por disolución sólida.* Este método se basa en introducir en los materiales átomos en forma de impurezas que se disuelven en solución sólida intersticial. Estos átomos dificultan el movimiento de las dislocaciones evitando que avancen, por tanto, endureciendo el material.

2.1.6.2 *Endurecimiento por deformación.* Se trata de un fenómeno por el cual un metal dúctil se hace más duro y resistente a medida que es deformado plásticamente. Se denomina también acritud o endurecimiento por trabajo en frío, ya que la temperatura a la que tiene lugar la deformación es mucho menor que el punto de fusión del metal. Este efecto se explica mediante la interacción repulsiva entre las dislocaciones. Al introducir nuevas dislocaciones por deformación plástica, la resistencia al movimiento de éstas se ve aumentada por la presencia de otras dislocaciones, resultando en un aumento de la acritud del metal.

2.1.6.3 Endurecimiento por reducción del tamaño de grano. Este método se basa en el hecho de que los granos contiguos poseen un límite de grano común y que las orientaciones cristalográficas de los mismos son distintas. Al llegar al límite de grano, la dislocación se detiene y para continuar la deformación se debe generar otra dislocación, lo que implica la aplicación de más energía y por tanto una mayor resistencia del material. El límite de grano actúa como una barrera al movimiento de las dislocaciones por dos razones. (SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE COBRE SUBMICROMETRICO OBTENIDO POR MOLIENDA MECÁNICA Y, 2010)

- Dado que los granos tienen orientaciones distintas, una dislocación que pasara a otro grano tendría que cambiar la dirección de su movimiento. Este efecto es más difícil cuanto mayor sea la diferencia de orientación de los granos.
- El desorden atómico dentro del límite de grano producirá una discontinuidad de los planos de deslizamiento de un grano a otro.

El hecho de que se frenen las dislocaciones provoca que para llevar a cabo una deformación sea necesario aplicar una fuerza mayor. Por tanto un material con grano fino será más duro y más resistente que un material con un grano más grueso. (PRANGNELL, 2004)

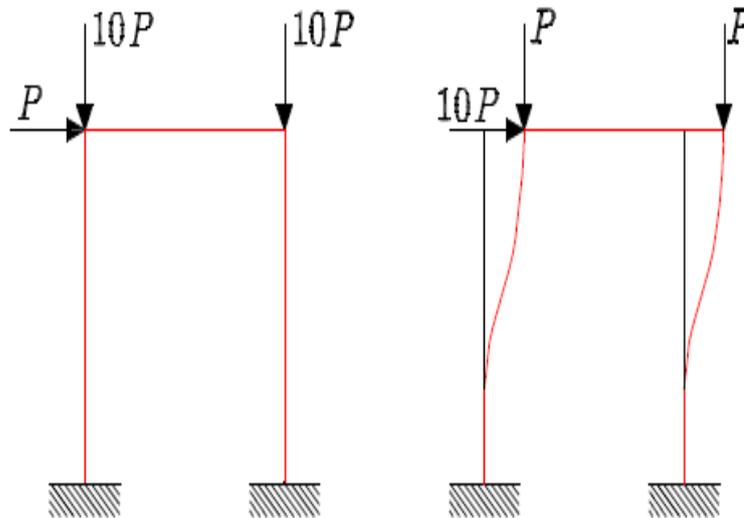
2.2 Elasticidad

La cinemática y dinámica de sólidos deformables queda definida mediante la imposición de las hipótesis básicas, dichas hipótesis dejan el campo de estudio del sólido deformable muy abierto. Una simplificación al problema general del sólido deformable consiste en plantear el comportamiento del mismo como lineal, lo que implica asumir tres hipótesis adicionales:

- Pequeños desplazamientos
- Pequeñas deformaciones
- Comportamiento elástico y lineal del material

2.2.1 Pequeños desplazamientos. La hipótesis de pequeños desplazamientos implica que los desplazamientos del sólido son tan pequeños que las ecuaciones de equilibrio pueden plantearse, sin error apreciable, en la posición inicial.

Figura 7. Hipótesis de pequeños desplazamientos



Fuente: <http://ocw.bib.upct.es>

2.2.2 Pequeñas deformaciones. Supone que las derivadas de los desplazamientos son despreciables frente a la unidad, y los productos de derivadas son despreciables frente a las propias derivadas. Esto implica que las deformaciones se expresen como combinación lineal de las derivadas primeras de los desplazamientos.

2.2.3 Comportamiento elástico y lineal del material. En todo punto de un sólido de un determinado material existe una relación entre las tensiones y las deformaciones en dicho punto al someter al sólido a un sistema cualquiera de cargas. Si el sólido recupera su forma inicial al cesar la aplicación de las cargas, se dice que el material tiene un comportamiento elástico. Si además, la relación entre tensiones y deformaciones es lineal, se dice que el material tiene un comportamiento elástico y lineal.

Las tres hipótesis anteriores son necesarias y suficientes para considerar el sólido deformable como elástico y lineal. Además de las tres hipótesis anteriores, en el estudio de la Elasticidad Lineal y de la Resistencia de Materiales, se suponen estas otras hipótesis:

- *Principio de Saint-Venant.* El Principio de Saint-Venant establece que sistemas estáticamente equivalentes producen los mismos efectos, es decir que las variables de elasticidad no cambian.
- *Material homogéneo.* Considerar el material homogéneo significa que todos los puntos del mismo son iguales a efectos de comportamiento mecánico. Matemáticamente implica que la relación de comportamiento (relación entre tensiones y deformaciones) es similar en cualquier punto del material, y por tanto es independiente de las coordenadas del punto estudiado.
- *Material isótropo.* Un material isótropo es aquél cuyo comportamiento mecánico es independiente de la dirección considerada.

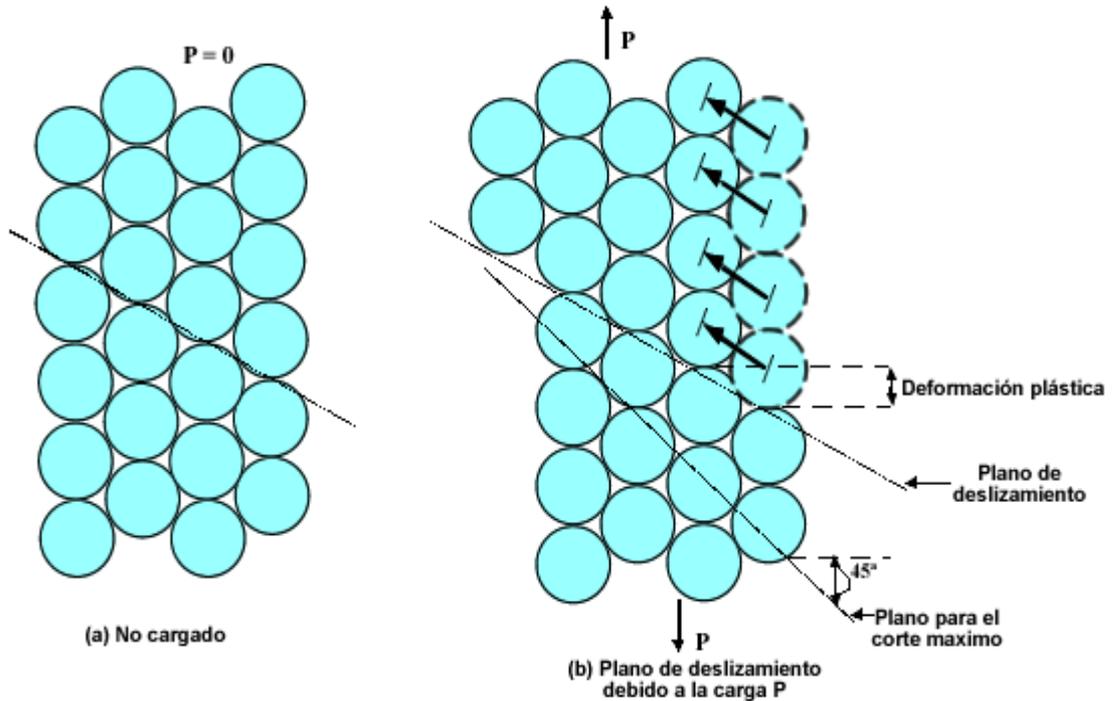
2.3 Plasticidad

Una gran cantidad de materiales y en especial la mayor parte de los metales, al sobrepasar cierto límite de carga, sufren deformaciones permanentes una vez que las cargas actuantes desaparecen. Este fenómeno se conoce como plasticidad y en el caso de los metales se produce, fundamentalmente y desde el punto de vista atómico, por la rotura de enlaces entre los átomos más próximos y la regeneración de los mismos con los nuevos vecinos; un gran número de átomos o moléculas se mueven unos respecto de otros, y al eliminar la carga, no vuelven a sus posiciones originales.

En materiales cristalinos, como los metales, la deformación plástica tiene lugar mediante un proceso denominado deslizamiento de planos preferentes de átomos sobre otros planos paralelos. En este proceso está involucrado también el movimiento de dislocaciones. (CALLISTER, 1995)

Las dislocaciones son defectos lineales o unidimensionales en torno a algunos átomos desalineados de la estructura cristalina. Las dislocaciones hacen que no sea necesario un movimiento simultáneo de todos los átomos en el plano, sino únicamente de aquellos átomos situados en la línea de dislocación, haciendo que la tensión necesaria para provocar el deslizamiento sea varios órdenes de magnitud inferior de la requerida para mover todos los átomos simultáneamente. El movimiento hace que la línea de dislocación se vaya trasladando, barriendo el plano de deslizamiento hasta que todos los átomos del mismo se hayan movido. En la Figura 8 se muestra un esquema de una dislocación de cuña y el movimiento de la misma.

Figura 8. Cambios de la posición atómica

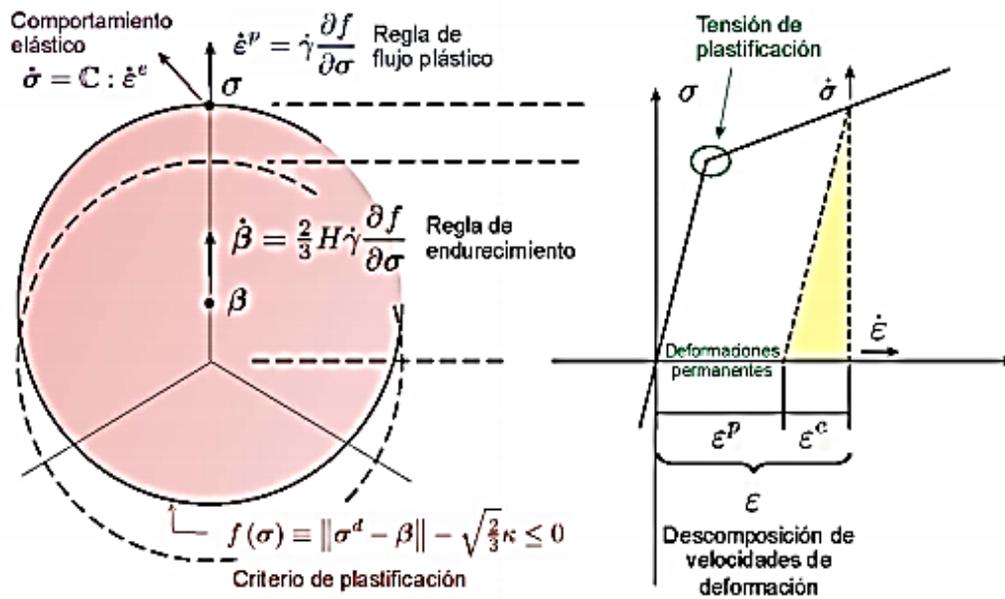


Fuente: (CALLISTER, 1995)

Experimentalmente, desde el punto de vista macroscópico o del medio continuo ('fenomenológico'), la aparición de dichas deformaciones permanentes se puede detectar en un ensayo a tracción simple. Una idealización típica de la misma como curva bi-lineal se muestra en la parte derecha (b) de la Figura 9. La tensión a partir de la cual se presentan dichas deformaciones permanentes, en el ensayo uniaxial, se denomina tensión de plastificación o tensión de fluencia (σ_y). En el caso tridimensional, dicha tensión de plastificación debe ser comparada con un valor invariante que sea función de las tensiones existentes (el denominado criterio o superficie de plastificación).

En el caso de materiales isótropos, como es bien sabido, el más usado es el criterio de plastificación de VON MISES. En la parte izquierda (a) de la Figura 9 se muestra la representación del criterio o superficie de plastificación de Von Mises en el espacio de las tensiones principales (representación de Haigh-Westergaard o en el plano π) conjuntamente con los ingredientes típicos de la teoría de plasticidad clásica (regla de flujo, regla de endurecimiento). (CALLISTER, 1995)

Figura 9. Criterio de plastificación de Von Mises



Fuente: <https://ruidera.uclm.es>

La tensión a la que se produce la plastificación del material, si se descarga y recarga nuevamente, varía a medida que se va deformando el material como resultado de un fenómeno conocido como endurecimiento.

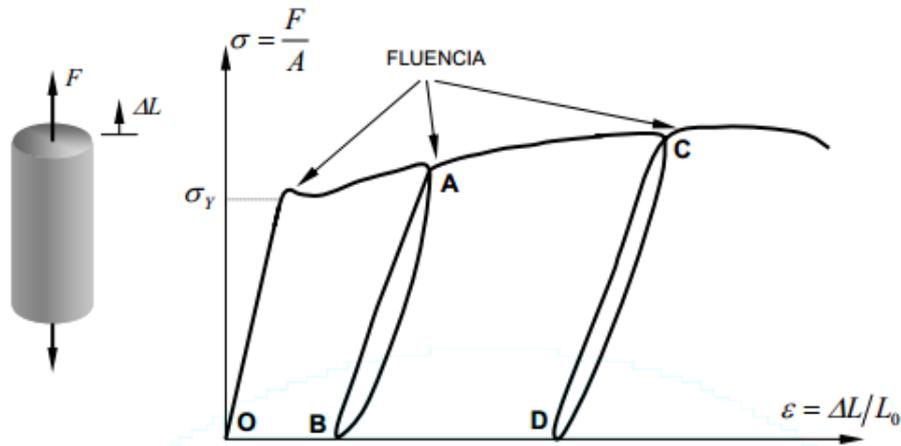
A veces también se denomina acritud, o bien endurecimiento por trabajo en frío. Desde el punto de vista cristalino, el fenómeno de endurecimiento por deformación se explica en base a las interacciones de los campos de deformación de las dislocaciones. La densidad de dislocaciones en un metal aumenta con la deformación. En consecuencia, la distancia media entre dislocaciones disminuye y, por lo tanto, las dislocaciones se posicionan mucho más juntas. El resultado neto es que el movimiento de una dislocación es limitado debido a la presencia de otras dislocaciones. A medida que la densidad de dislocaciones aumenta, la resistencia al movimiento de éstas debido a otras dislocaciones se hace más pronunciada. Así, la tensión necesaria para deformar plásticamente el metal aumenta con el endurecimiento. (CALLISTER, 1995)

Desde el punto de vista macroscópico, existen dos formas habituales de modelar el endurecimiento que no provocan cambios en la forma de la superficie teórica de plastificación: endurecimiento isótropo (únicamente varía la tensión de comparación, y por lo tanto el "tamaño" de la superficie) y endurecimiento cinemático (únicamente varía la localización de la superficie de plastificación en el espacio de tensiones principales). El segundo tipo de endurecimiento recoge el conocido como efecto

Bauschinger: si un metal deformado plásticamente por tracción, se deforma después por compresión, el límite elástico obtenido por este nuevo esfuerzo de compresión resulta menor que la tensión de plastificación en tracción. (BAUSSCHINGER, 1886)

2.3.1 Ensayo de tracción Uniaxial

Figura 10. Ensayo de tracción uniaxial



Fuente: <http://ocw.camins.upc.edu>

Una vez alcanzado el régimen elasto-plástico (es decir, después de que la tensión haya sobrepasado el valor del límite elástico σ_y), las deformaciones no son recuperables en su totalidad. En efecto, observando un ciclo de carga y descarga como el OAB indicado en la figura, observamos que la deformación existente en el punto A es igual a:

$$\varepsilon_A = (\varepsilon_A - \varepsilon_B) + \varepsilon_B \quad (1)$$

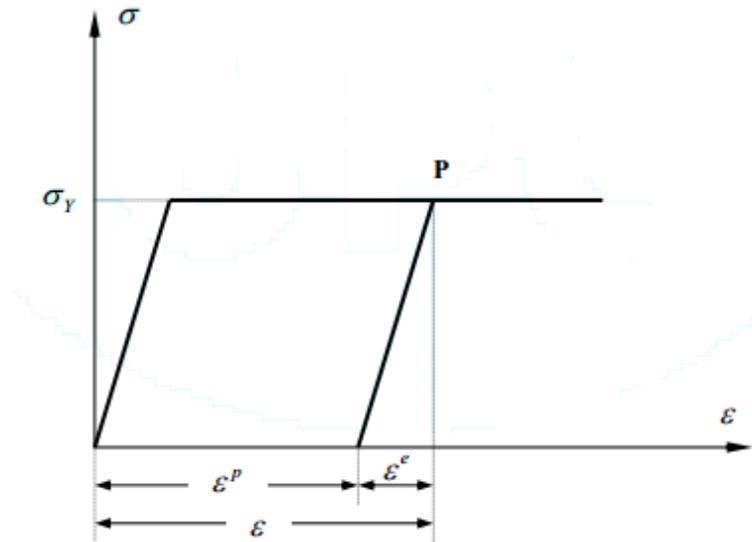
Alcanzado un cierto valor de las deformaciones, se produce rotura del material.

En la Figura 11 se puede ver que, para un punto P cualquiera en el espacio Esfuerzo vs Deformación Unitaria σ - ε , la deformación tiene dos componentes: elástica (recuperable) y plástica (no recuperable), notando entonces que:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (2)$$

Se representa un comportamiento elasto-plástico perfecto, en el cual las deformaciones crecen de manera indefinida a tensión constante igual al límite de fluencia.

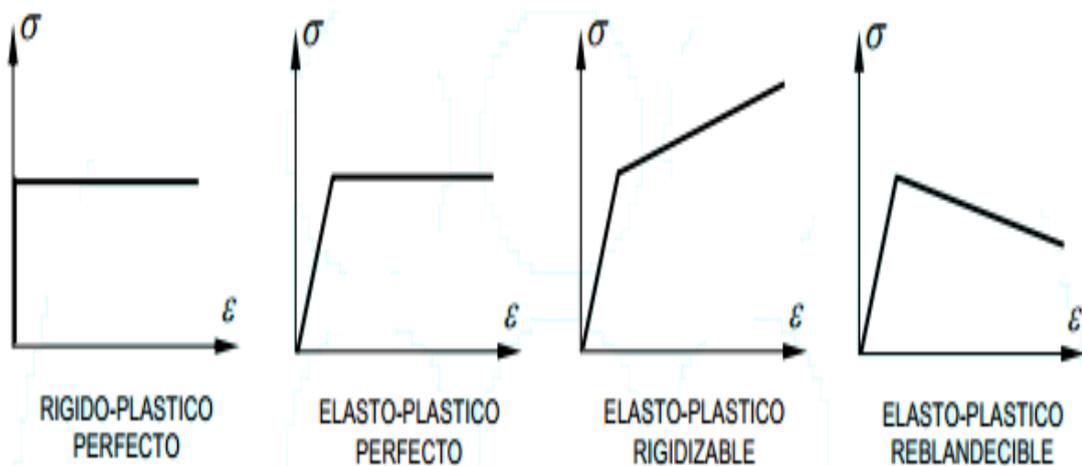
Figura 11. Idealización del comportamiento elasto-plástico perfecto



Fuente: <http://ocw.camins.upc.edu>

En el caso que la deformación elástica (recuperable) fuese cero, hablaríamos de un comportamiento rígido-plástico perfecto. Y si una vez alcanzado el límite de fluencia la tensión no se mantiene constante, sino que aumenta o disminuye con la deformación, hablaremos de comportamiento rigidizable o reblandecible, respectivamente. Todos estos casos se ilustran en la Figura 12.

Figura 12. Curvas tensión-deformación idealizadas en plasticidad



Fuente: <http://ocw.camins.upc.edu>

Generalizando los distintos tipos de comportamiento vistos en la Figura 12, tenemos:

- *Plasticidad perfecta.* La superficie de fluencia depende únicamente de las tensiones no cambia de tamaño durante el proceso de carga.

- *Plasticidad rigidizable.* La superficie de fluencia se expande (se “hincha”) durante el proceso de carga.
- *Plasticidad reblandecible.* La superficie de fluencia se contrae durante el proceso de carga.

Cuando el cuerpo se encuentra en régimen plástico (es decir, cuando se están produciendo deformaciones plásticas), el estado de tensiones siempre debe estar sobre la superficie de fluencia. (PRAT, 2006)

2.4 Endurecimiento por deformación plástica en frío

El endurecimiento por deformación plástica en frío es el fenómeno por medio del cual un metal dúctil se vuelve más duro y resistente a medida es deformado plásticamente.

Generalmente a este fenómeno también se le llama trabajo en frío, debido a que la deformación se da a una temperatura “fría” relativa a la temperatura de fusión absoluta del metal. (UCA, 2011)

Esta variación se ha medido en función del porcentaje de trabajo en frío, el cual se define de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de trabajo en frío} = \frac{A_0 - A_d}{A_0} \times 100 \quad (3)$$

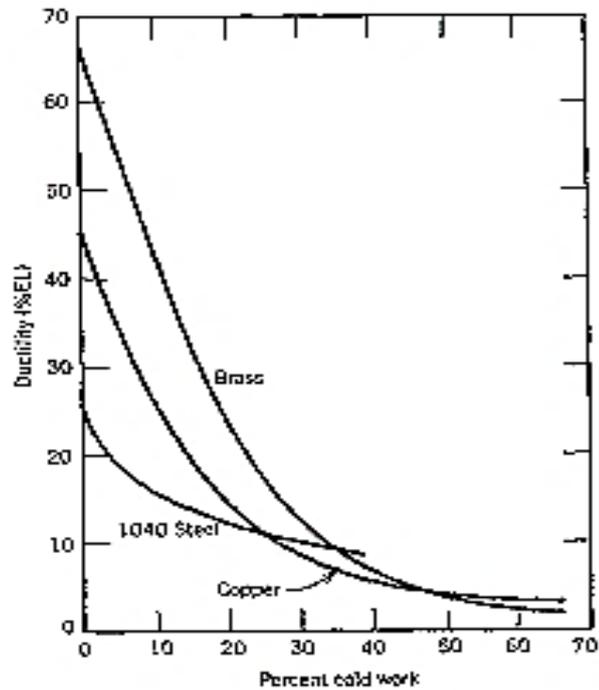
Dónde:

A_0 = Es el área transversal del material antes de la deformación

A_d = Es el área transversal del material después de ser deformado

Note que la resistencia del material aumenta al aumentar el porcentaje de trabajo en frío, sin embargo la ductilidad (la deformación del material analizada va en decrecimiento esto hace que el material tome características frágiles), tal como se muestra en el siguiente gráfico.

Figura 13. Endurecimiento por deformación en los aceros



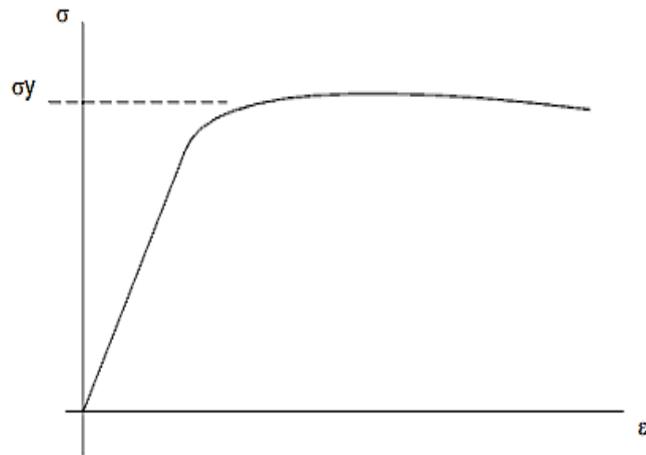
Fuente: file:///C:/Users/User/Downloads/endurecimiento%20por%20deformacion

El fenómeno de endurecimiento por deformación se explica así:

- El metal posee dislocaciones en su estructura cristalina.
- Cuando se aplica una fuerza sobre el material, las dislocaciones se desplazan causando la deformación plástica.
- Al moverse las dislocaciones, aumentan en número.
- Al haber más dislocaciones en la estructura del metal, se estorban entre sí, haciendo más difícil su movimiento.
- Al ser más difícil que las dislocaciones se muevan, se requiere de una fuerza mayor para mantenerlas en movimiento. Se dice entonces que el material se ha endurecido.

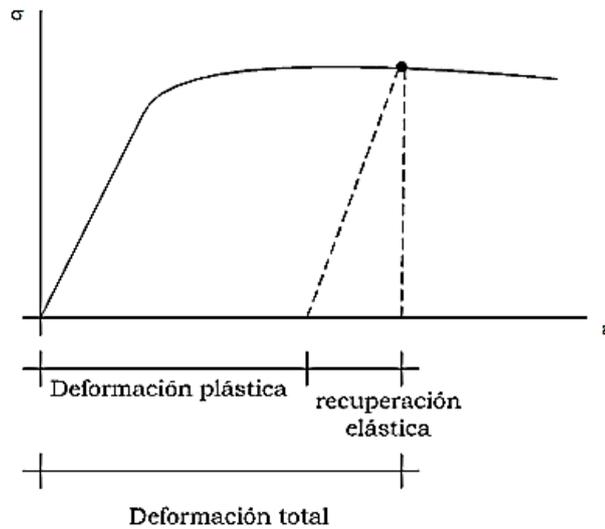
Este fenómeno se refleja en la Curva Esfuerzo de Tracción vs Deformación Unitaria del material. Un material perfectamente plástico tiene una zona plástica horizontal, tal como se ilustra a continuación en la Figura 14.

Figura 14. Deformación plástica se da a esfuerzo constante



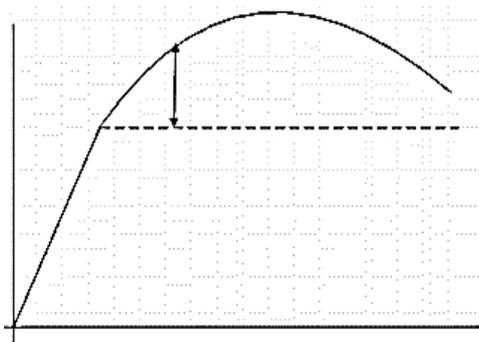
Fuente: file:///C:/Users/User/Downloads/endurecimiento%20por%20deformacion

Figura 15. Curva esfuerzo vs deformación en los metales reales



Fuente: file:///C:/Users/User/Downloads/endurecimiento%20por%20deformacion

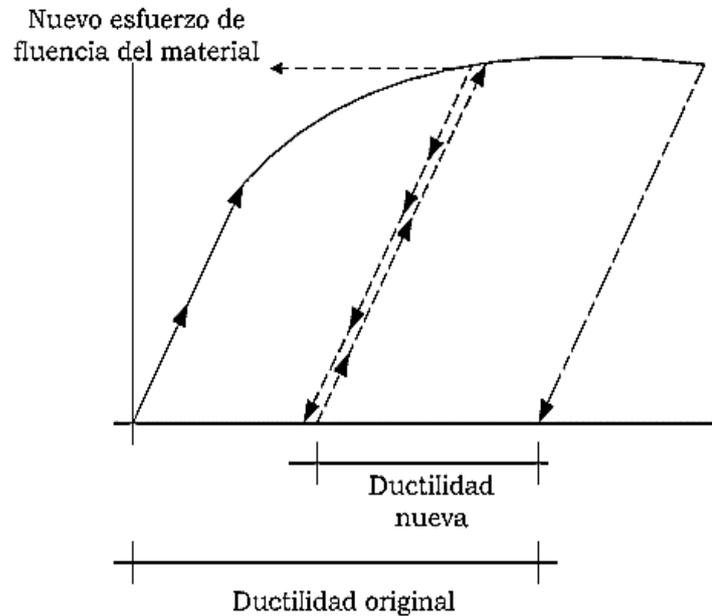
Figura 16. El endurecimiento por deformación se refleja en la curva del metal de la siguiente forma



Fuente: file:///C:/Users/User/Downloads/endurecimiento%20por%20deformacion

Se puede apreciar que los materiales reales se desvían del comportamiento teórico y la desviación se debe al incremento de dislocaciones en la estructura del material.

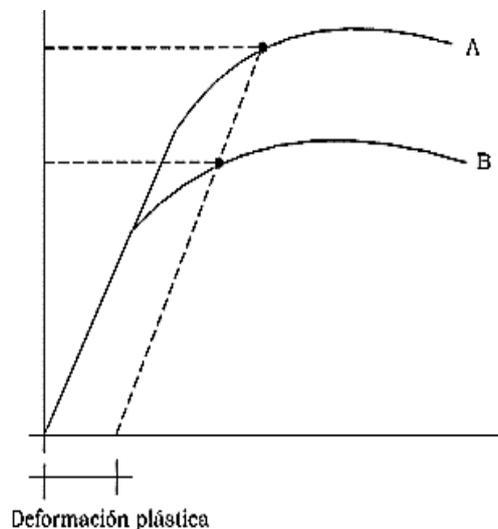
Figura 17. Curva del endurecimiento por deformación en metales



Fuente: file:///C:/Users/User/Downloads/endurecimiento%20por%20deformacion

Distintos metales tienen diferente capacidad para endurecerse cuando se deforman plásticamente. Esa habilidad de endurecerse se mide con el coeficiente de endurecimiento por deformación (n). Entre mayor es n para un metal, más se endurece al ser deformado plásticamente.

Figura 18. Curva endurecimiento por deformación



Fuente: file:///C:/Users/User/Downloads/endurecimiento%20por%20deformacion

La misma deformación produce un endurecimiento diferente. El material A se endurece más que el B.

Para que el endurecimiento del metal se mantenga, es necesario que las dislocaciones que fueron creadas durante la deformación se mantengan en la estructura del metal. La estructura cristalina del metal tiene un número normal de dislocaciones. La deformación plástica ha causado que haya más dislocaciones que ese número normal, por lo que la estructura cristalina tenderá a hacer desaparecer a las dislocaciones extras creadas por la deformación.

Si se aumenta la temperatura del material hasta el grado que se permita la difusión atómica, las dislocaciones extras desaparecerán del material, haciendo que éste recupere las propiedades mecánicas que tenía antes de ser deformado. Sabemos que la difusión se activa a una temperatura mayor que 0.4 veces la temperatura de fusión del material en grados absolutos.

El trabajo en frío no solo causa un aumento de las dislocaciones en la estructura del metal, sino que también causa la deformación de sus granos. La combinación de los granos deformados con el aumento de dislocaciones causa esfuerzos residuales dentro del material. Los esfuerzos residuales no son más que zonas de tensión o compresión que existen dentro del material sin que sean generadas por fuerzas externas. Los esfuerzos residuales pueden causar el debilitamiento del material, haciendo que falle a esfuerzos aplicados menores a su resistencia nominal.

El aumento de las dislocaciones y la deformación de los granos de la estructura cristalina pueden causar cambios en las propiedades eléctricas y la resistencia a la corrosión del metal. Todos los cambios asociados a la deformación plástica en frío pueden ser revertidos utilizando el tratamiento térmico apropiado. La restauración de las propiedades a los valores previos a la deformación se logra a partir de dos procesos diferentes que ocurren a temperatura elevada.

- *Recuperación.* Durante la recuperación, alguna de la energía interna guardada en la deformación de la estructura cristalina es liberada a causa del movimiento de las dislocaciones (las cuales se mueven sin esfuerzos externos aplicados) como resultado de la difusión atómica. Existe alguna reducción en el número de dislocaciones y la configuración de éstas cambia de modo que poseen bajas energías de deformación. Además, algunas propiedades físicas como la

conductividad eléctrica y térmica se recuperan a los valores previos a la deformación. (UCA, 2011)

- *Recristalización.* Aun cuando la recuperación ha sido completada, los granos de la estructura cristalina todavía se encuentran en un estado de elevada energía de deformación. La recristalización es la formación de un nuevo conjunto de granos libres de deformación con baja densidad de dislocaciones y característicos de la condición previa al trabajo en frío. La fuerza que produce esta nueva estructura de granos es la diferencia en la energía interna entre el material deformado y no deformado. Los granos nuevos se forman de un núcleo pequeño y crecen hasta que reemplazan completamente a los granos deformados originales, proceso que requiere difusión de corto alcance. Durante la recristalización, las propiedades mecánicas que fueron cambiadas como resultado del trabajo en frío son restauradas a sus valores previos a la deformación plástica, es decir, el metal se vuelve más suave, más débil y más dúctil. Sin embargo podemos notar que la recristalización es un proceso cuya extensión depende tanto del tiempo como de la temperatura a la que son expuestos el material.

El grado o fracción de recristalización aumenta con el tiempo al que el material está expuesto a la temperatura elevada. La recristalización de una aleación metálica en particular algunas veces se especifica en términos de la temperatura de recristalización, la cual se define como la temperatura a la cual el proceso de recristalización finaliza en una hora. Generalmente la temperatura de recristalización se encuentra entre un tercio y la mitad de la temperatura de fusión absoluta del metal o aleación, y depende de varios factores incluidos la cantidad de trabajo en frío y la pureza de la aleación. La recristalización ocurre más rápido en los metales puros que en las aleaciones, por lo tanto, al alear un metal se incrementa su temperatura de recristalización. Las operaciones de deformación plástica pueden realizarse a temperaturas por encima de la temperatura de recristalización en un proceso llamado trabajo en caliente. El material permanece relativamente suave y dúctil durante la deformación y por lo tanto pueden lograrse deformaciones plásticas grandes. (UCA, 2011)

- *Crecimiento del grano.* Después que la recristalización se ha completado, los granos libres de deformación continuarán creciendo si el metal se mantiene a la temperatura elevada. Este fenómeno es llamado crecimiento del grano. El fenómeno del crecimiento del grano ocurre debido a que a medida el grano crece, disminuye el

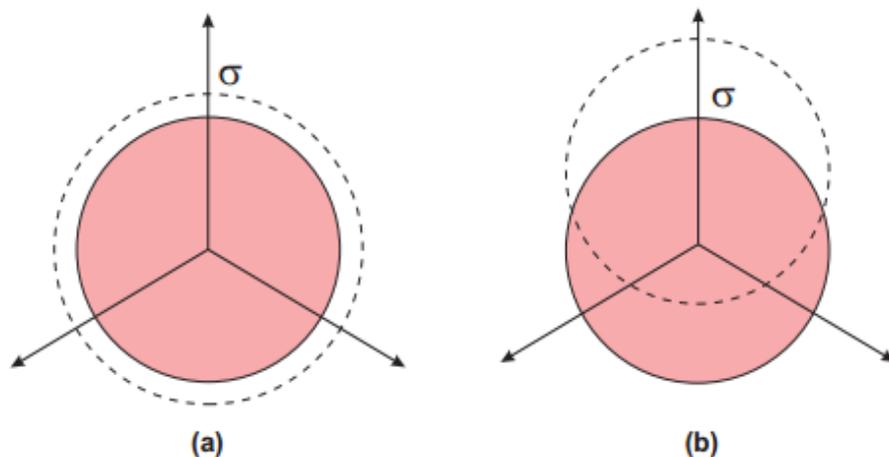
área total de las fronteras de los granos, disminuyendo por tanto la energía total almacenada en el material. (UCA, 2011)

2.5 Endurecimiento anisótropo

El comportamiento plástico de la mayor parte de materiales, durante procesos cíclicos de carga y descarga multiaxiales, muestran que la Curva esfuerzo de Tensión vs Deformación Unitaria no es lineal al mismo instante de tiempo por lo que las reglas clásicas de endurecimiento isótropo, cinemático o endurecimiento mixto son a menudo insuficientes. (Elastoplasticidad anisótropa de metales, 1926)

Estas reglas de endurecimiento isótropo anteriores pueden predecir el comportamiento plástico monotónico uniaxial, con esto restringiría el uso de la curva monotónica esfuerzo de tensión vs deformación bilineales. El comportamiento cíclico de carga y descarga es deseable, ya que es una buena aproximación del comportamiento cíclico real de numerosos metales. (Elastoplasticidad anisótropa de metales, 1926)

Figura 19. Tipos de endurecimiento habituales



Fuente: <https://ruidera.uclm.es>

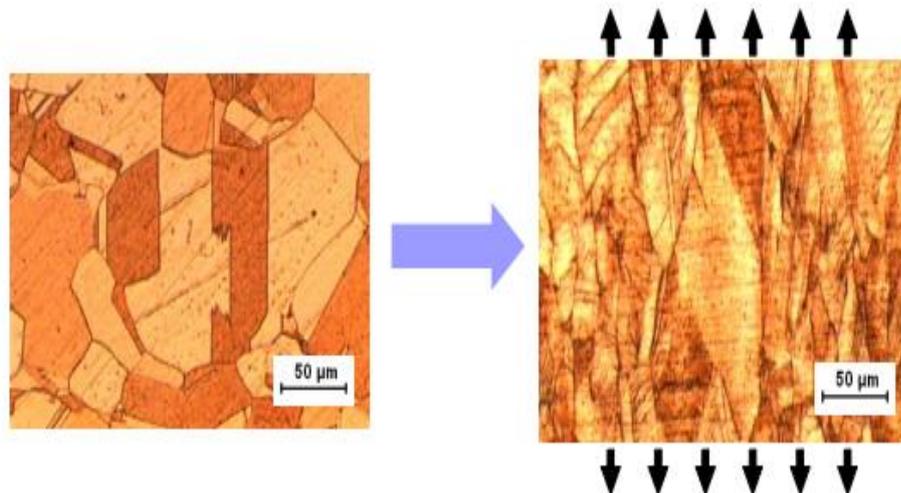
2.6 Comportamiento elástico anisótropo y criterios de fluencia anisótropos

2.6.1 Anisotropía plástica. Es un efecto diferente, que se encuentra también presente en los metales deformados según direcciones preferentes, dándose cambios en la forma de la superficie de plastificación; esto es, la tensión de plastificación varía con la dirección en la que se ensaya el material a diferencia de materiales isótropos.

Este comportamiento anisótropo es común en metales laminados en frío (con fuertes deformaciones plásticas previas), pero también se presenta en materiales deformados considerablemente en cualquier proceso que actúe según unas direcciones preferentes determinadas. Cuando las propiedades del material varían según la dirección en la que se ensaya el mismo se dice que el material es anisótropo.

Desde el punto de vista microestructural, la anisotropía en metales se produce por la forma y orientación de los granos, así como de la orientación de las correspondientes estructuras cristalinas. La extensión y magnitud de los efectos anisótopos en materiales cristalinos son función de la simetría de la estructura cristalina. En la mayoría de los materiales policristalinos sin deformación previa, las orientaciones cristalográficas de los granos individuales son totalmente al azar, teniendo en cuenta que se encuentran dispersas unas con otras, en estas circunstancias, aunque cada grano sea anisótropo, el material compuesto por un conjunto de granos, se comporta de forma isótropa.

Figura 20. Textura inducida a una probeta de latón- α después de someterla a un ensayo de tracción

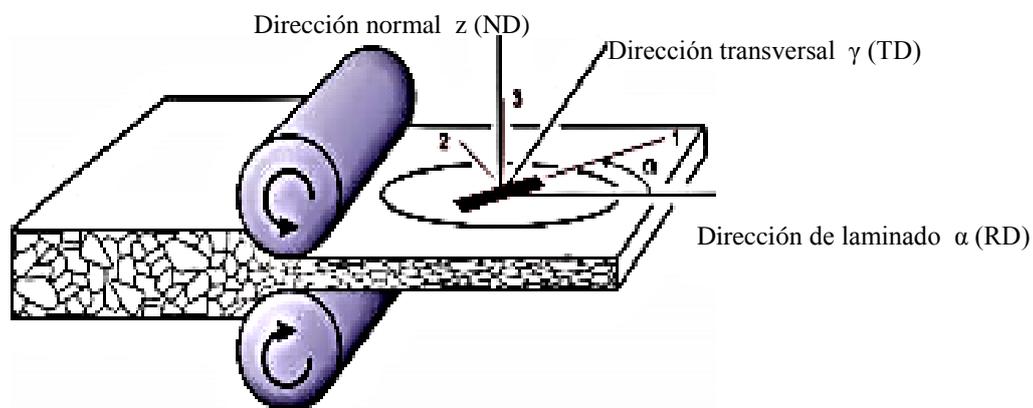


Fuente: (Elastoplasticidad anisótropa de metales, 1926)

En un metal policristalino isótropo, las deformaciones plásticas provocan dislocaciones en las estructuras cristalinas de los granos según unos planos y direcciones preferentes en función de las direcciones de carga del material. Estas dislocaciones provocan asimismo la deformación y reorientación de los granos de formas determinadas, de modo que aparecen unas direcciones preferentes en la microestructura, lo que se denomina habitualmente como textura. Podemos notar

macroscópicamente en la Figura 20 que el material que es completamente isótropo luego de haberle deformado según una dirección preferente muestra una textura inducida por la deformación plástica. Esta textura del material provoca que la mayor parte de las propiedades de éste, especialmente las mecánicas, varíen con la dirección en la que se realiza el ensayo. Una de las propiedades mecánicas que presenta una variación importante, y ampliamente conocida, es la tensión de plastificación. Se debe tener muy en cuenta la diferencia entre las tensiones de plastificación en dos direcciones distintas, este puede alcanzar valores muy superiores al 10%. Los tratamientos térmicos que producen la recristalización, pueden mejorar o empeorar la situación, ya que a veces con la combinación de recristalizaciones y tratamientos mecánicos se produce un direccionamiento de la estructura cristalina que hace que el resultado se parezca más a una estructura monocristalina. (Elastoplasticidad anisótropa de metales, 1926)

Figura 21. Proceso de laminado donde se aprecia la formación de una textura orientada en la dirección de laminado



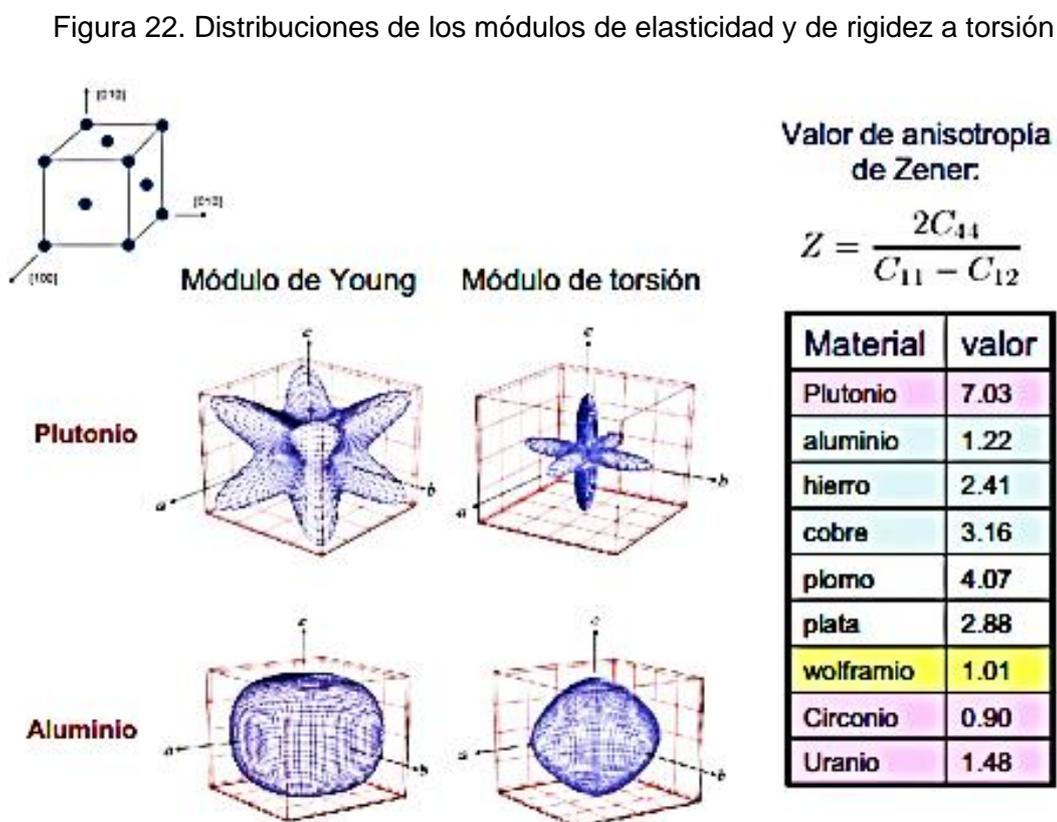
Fuente: (Elastoplasticidad anisótropa de metales, 1926)

La variación de la tensión de plastificación con la dirección del ensayo es una forma fenomenológica de representar la superficie de plastificación del material anisótropo. La Figura 21 muestra el esquema de un proceso de laminado, donde se representa la aparición de una textura orientada en la dirección de laminado (RD).

El estudio y cuantificación de la anisotropía plástica presente en los materiales es de gran importancia en procesos de conformado de metales, tales como laminado,

estampado, extrusión o embutición, ya que son procesos de fabricación direccionales y pueden dar lugar a defectos en el producto terminado. (SARACIBAR, 2008)

2.6.2 Anisotropía elástica. Es otro tipo de anisotropía que se presenta en la mayor parte de los materiales y se observa particularmente en materiales policristalinos sabiendo que tienen la propia anisotropía elástica de los cristales. En la Figura 22 se muestran las distribuciones de los módulos de elasticidad y de rigidez a torsión de dos materiales (Plutonio y Aluminio) ordenados según una estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC). En la Tabla figuran valores típicos de anisotropía para diversos materiales medidos según el valor de anisotropía. (SARACIBAR, 2008)

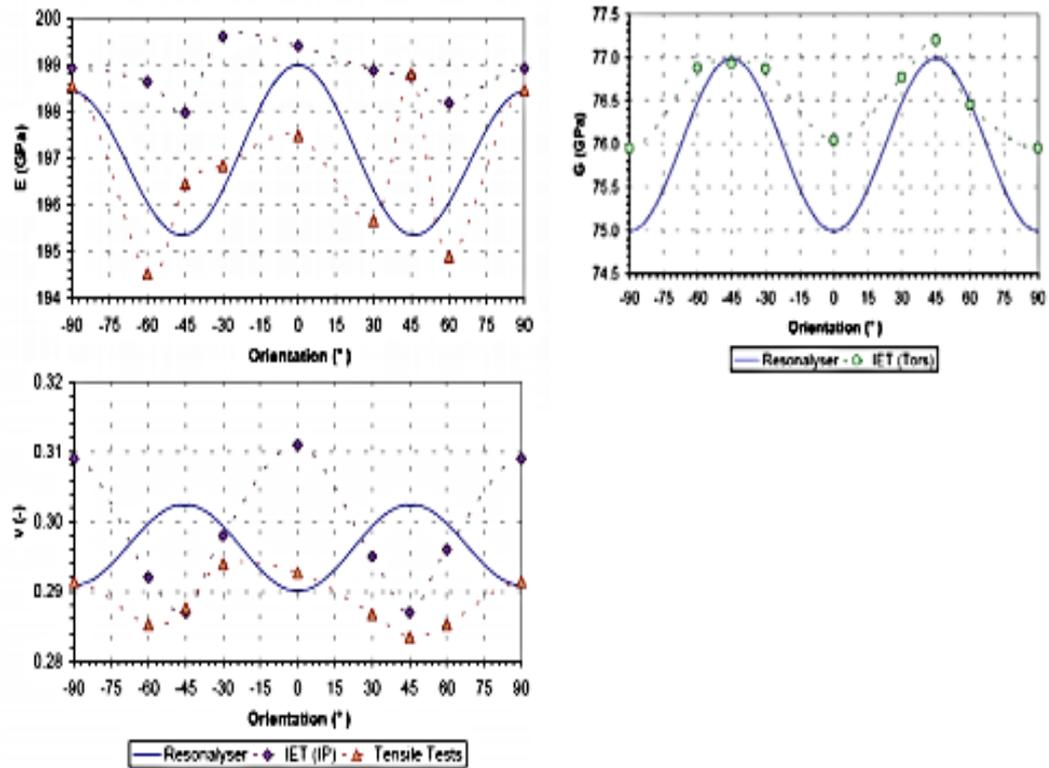


Fuente: (SARACIBAR, 2008)

Desde el punto de los medios continuos, en chapas laminadas la anisotropía elástica implica diferentes constantes elásticas aparentes en diferentes direcciones. Se puede notar en la Figura 23 precisamente la variación de dichas constantes elásticas aparentes con la orientación de la probeta de ensayo respecto a la dirección de laminado. En las Figura 23 se muestran los valores aparentes de las propiedades mecánicas como son: el módulo de elasticidad, módulo de rigidez a cortante y coeficiente de Poisson en un acero inoxidable en función de la orientación. Los valores

fueron obtenidos por tres métodos distintos: un analizador de resonancias, test de impulsos y ensayos a tracción. (PRAT, 2006)

Figura 23. Módulo de elasticidad, módulo de rigidez a cortante y coeficiente de Poisson



Fuente: (PRAT, 2006)

La anisotropía elástica es de importancia en materiales compuestos como son los polímeros pero totalmente despreciables en los metales, ya que son relevantes no solo cuantitativamente sino cualitativamente por su aparente influencia en el comportamiento plástico. Se le debe dar mucha importancia al momento del análisis de esta anisotropía ya que las direcciones preferentes o planos de simetría de las propiedades elásticas coinciden con la anisotropía plástica, esto nos da a notar que ambas anisotropías están relacionadas específicamente con la forma y orientación media de los granos, para expresar los estados de deformación elástica equivalente.

La anisotropía elástica enfocada en algunos metales da a conocer la variación del módulo de Young con respecto a la dirección de laminado para chapas de cobre laminadas en frío. En la Figura 23 se observa que la variación entre el valor máximo y

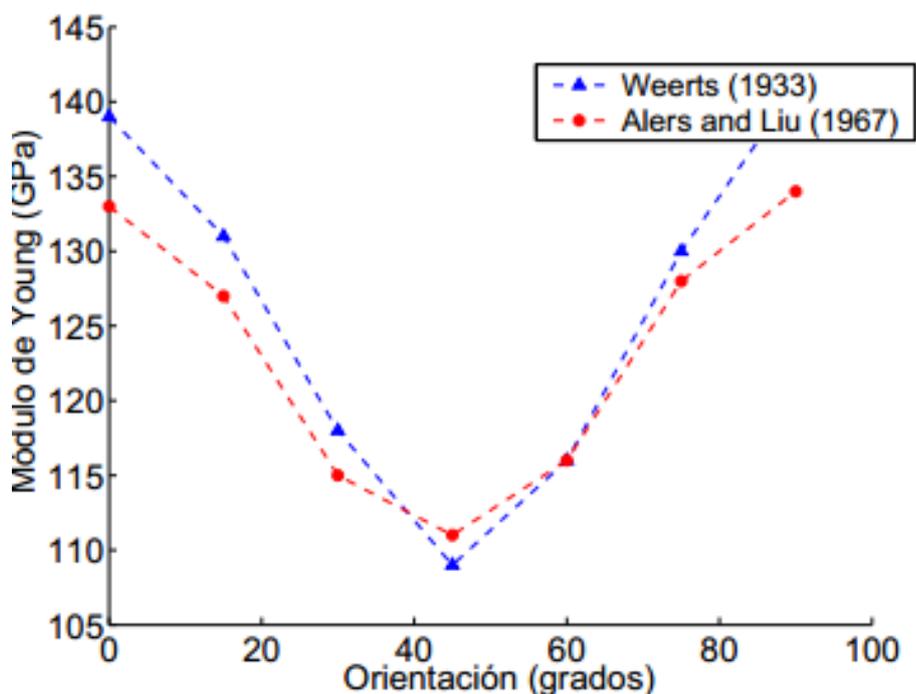
mínimo del módulo de Young está en torno a un 20%, que es una variación que puede llegar a ser del mismo orden que la variación de la anisotropía plástica.

Existen también estudios de la influencia de la temperatura y del porcentaje de elementos aleantes en la evolución de la anisotropía elástica, donde queda nuevamente de manifiesto la importancia de la variación del módulo (SARACIBAR, 2008)

2.7 Grandes deformaciones elastoplásticas

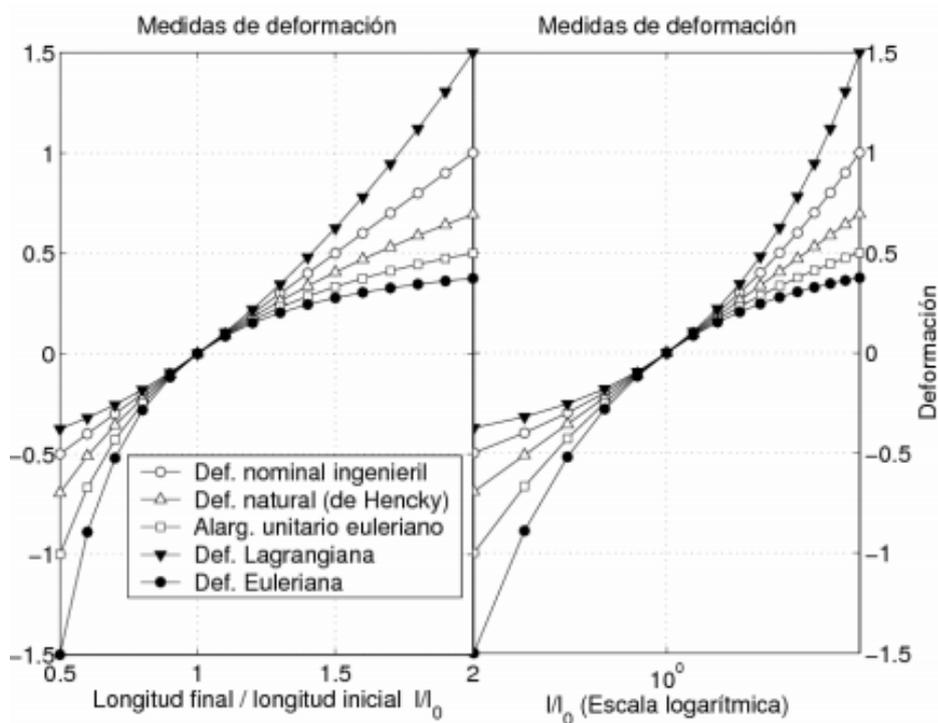
En los experimentos formulados la medida de deformación más habitual sobre todo en pequeñas deformaciones es la ingenieril, pero la más intuitiva es la logarítmica denominada deformación natural o de Hencky, ya que si encogemos en el ensayo de tracción simple una barra a la mitad de su longitud obtenemos la misma deformación en valor absoluto que si la alargamos al doble de su longitud, nótese en la gráfica que para la multitud de medidas de deformación, también existen diferentes relaciones entre ellas. Lo intuitivo es dividir la fuerza por el área real (tensión de Cauchy), pero lo habitual es dividirla por el área inicial (tensión nominal o de Piola-Kirchhoff), ya que es la conocida de antemano.

Figura 24. Variación del Módulo de Young (GPa)



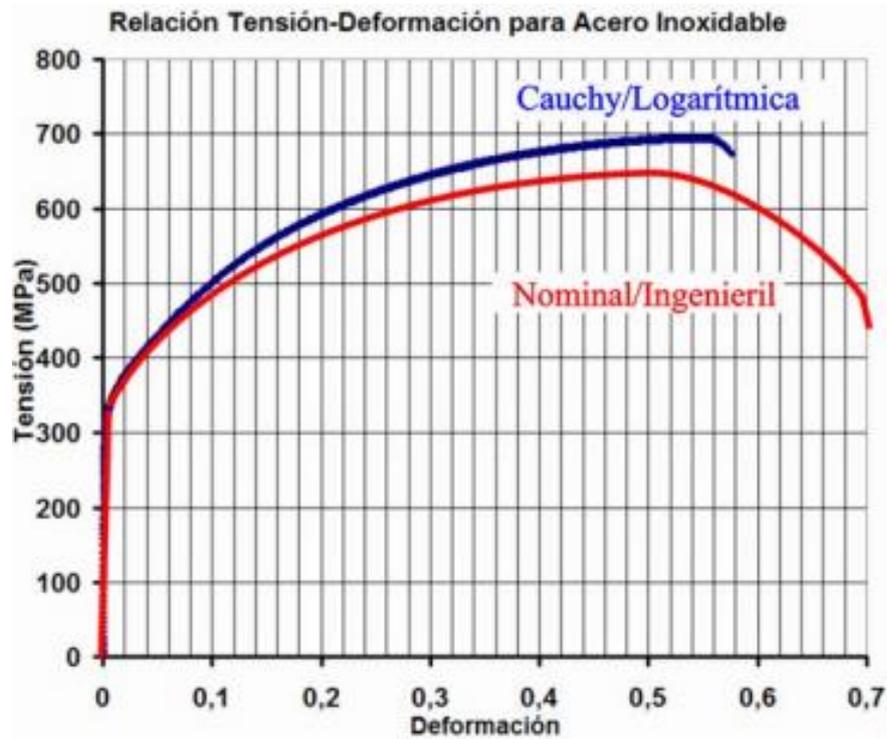
Fuente: (TORRANO, 2011)

Figura 25. Comparativa entre los valores suministrados por las distintas medidas de deformación



Fuente: Weerts en 1933 y por Alers y Liu en 1967

Figura 26. Curvas típicas obtenidas en un ensayo uniaxial para dos medidas de tensión y de deformación



Fuente: (TORRANO, et al., 2011)

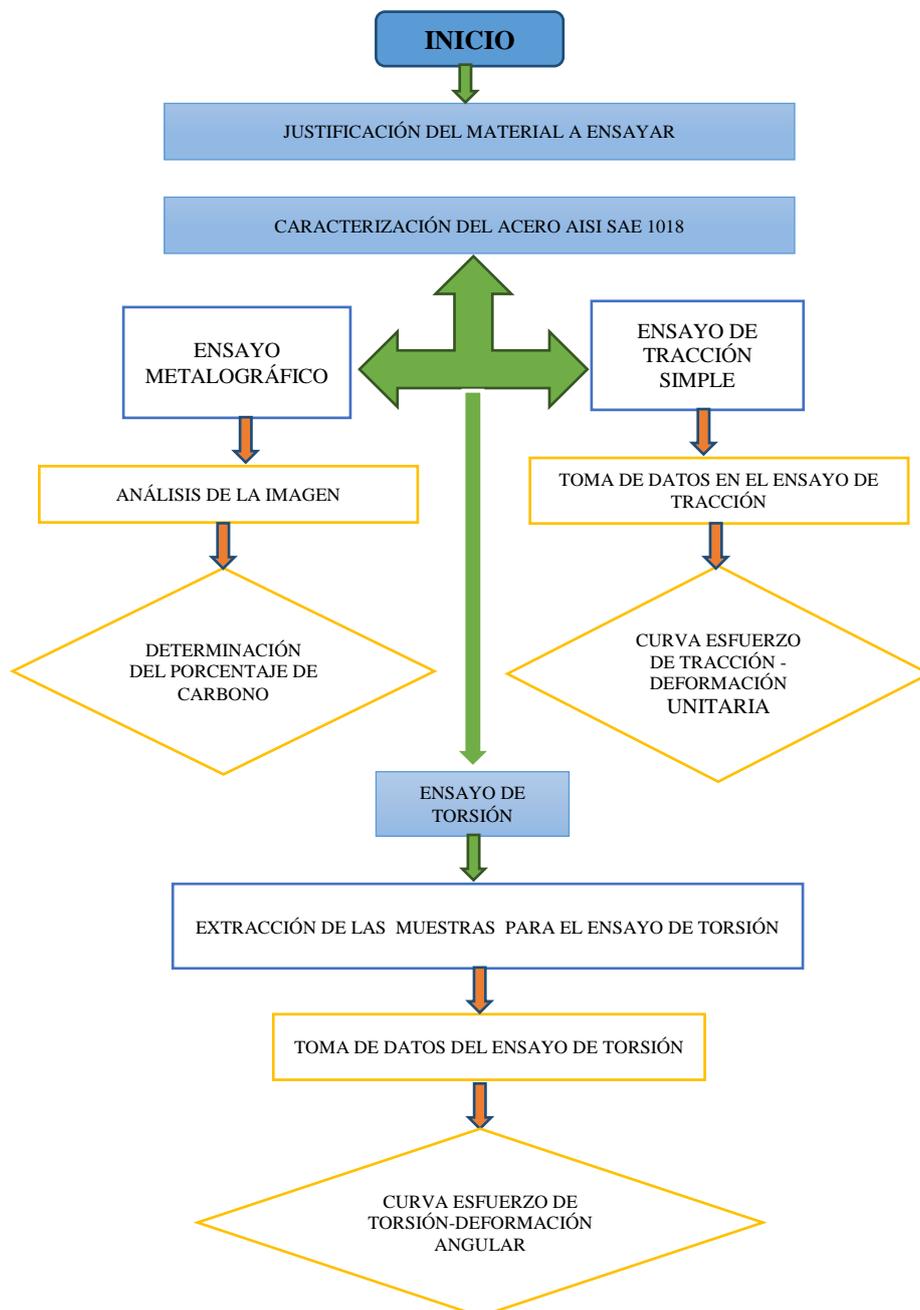
Este fenómeno de inestabilidad aparece debido a que las deformaciones plásticas son isocóricas (conservan el volumen), por lo que un alargamiento en una dirección implica una reducción equivalente de sección. Superado cierto nivel de tensiones, este fenómeno se localiza en una parte pequeña de la probeta, y para reproducirlo en cálculos es necesario tener en cuenta la hipótesis de grandes deformaciones.

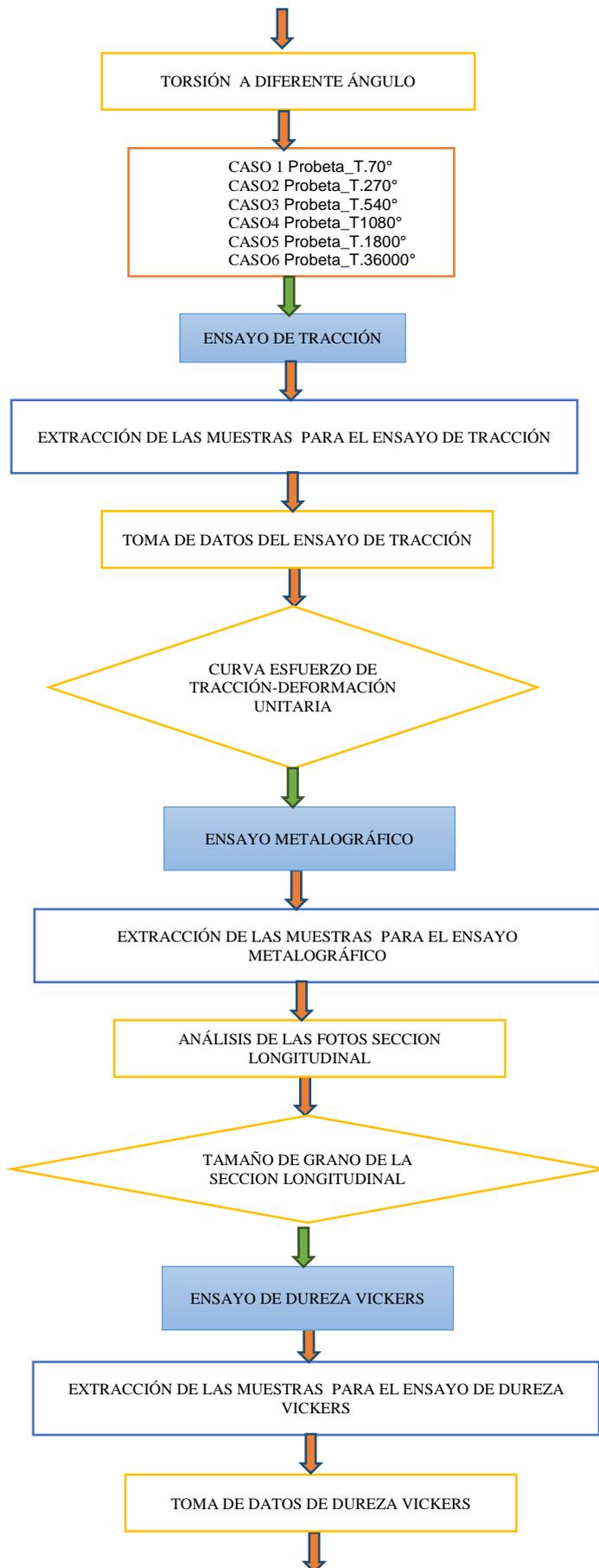
CAPÍTULO III

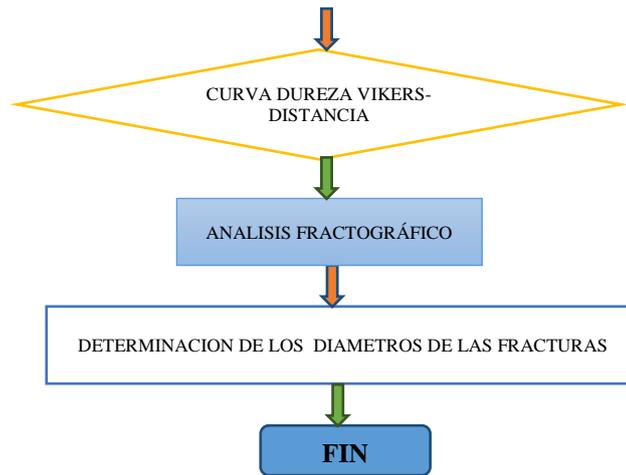
3. EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las actividades para el desarrollo de la investigación, titulada “Influencia de la Torsión Plástica sobre la Resistencia a Esfuerzo Axial en un acero AISI SAE 1018 laminado en frío”, se efectuarán de forma ordenada de acuerdo al flujograma de la Figura 27.

Figura 27. Flujograma de la metodología experimental







Fuente: Autores

3.1 Material a ensayar

Se pretende ensayar un acero que se use ampliamente en el país, para justificar el estudio, así como también se prefiere un material que haya sido anteriormente estudiado en este ámbito para futuras comparaciones de resultados.

Debido a la factibilidad y disponibilidad de conseguir los especímenes se decidió emplear un acero de bajo carbono AISI-SAE 1018 laminado en frío de sección circular, las mismas se obtuvieron de un eje de transmisión con un diámetro promedio de 12.5 mm.

3.1.1 *Justificación del tipo de acero a ensayar.* Los aceros mayormente usados en el país para aplicaciones de ejes son los que se describen en la Tabla 1, dependiendo de la resistencia necesaria en el diseño se los secciona, para este estudio se utilizara el acero AISI SAE 1018.

Tabla 1. Denominación de los aceros más comunes según AISI-SAE

Denominación AISI SAE
1018
1042
1045
4140
4337

Fuente: Norma AISI-SAE

3.1.2 Acero AISI-SAE 1018 laminado en frío. Este tipo de acero de transmisión es empleado con alta frecuencia en la industria para la elaboración de ejes de mediana resistencia. La facilidad de obtención en el mercado y su precio conveniente hacen que este material sea considerado en los diseños que impliquen componentes sometidos a esfuerzos ya sean estáticos o dinámicos dentro del campo del diseño.

No se encuentran resultados de investigaciones anteriores en cuanto a endurecimiento por esfuerzos de torsión, seguidos de sollicitaciones a tracción aunque se tienen valores independientes de resistencia a torsión y tracción en condiciones estándares que serán utilizados como referencia, además de información sobre endurecimiento del material por el proceso de laminado por rodillos.

3.1.2.1 Características del acero. El acero AISI-SAE 1018 laminado en frío es un acero de bajo-medio carbono, el cual posee una buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Se presenta en condición de calibrado (acabado en frío). Las propiedades mecánicas indicadas en la Norma técnica del proveedor son:

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero AISI SAE 1018

Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	Esfuerzo último (MPa)	% Elongación En 50mm
304	500-696	440	20

Fuente: Anexo B

3.1.2.2 Metalurgia del material. Previamente en la fábrica, el acero es laminado en caliente; luego de ser enfriadas las barras, éstas son decapadas en húmedo y sometidas a un trabajo en frío de estirado para ser calibradas a su dimensión y tolerancia final. Estas barras se caracterizan por su alta exactitud dimensional, buena calidad superficial. El alto contenido de manganeso incrementa la dureza y la resistencia y puede ser tratado térmicamente, aunque poseen una relativa baja resistencia a la rotura por fatiga y al desgaste. Este hecho ha llevado a estudios para mejorar las características mecánicas con el fin de impartir mejores propiedades incrementando la resistencia a la fractura.

3.2 Caracterización de las muestras de acero previo a los ensayos

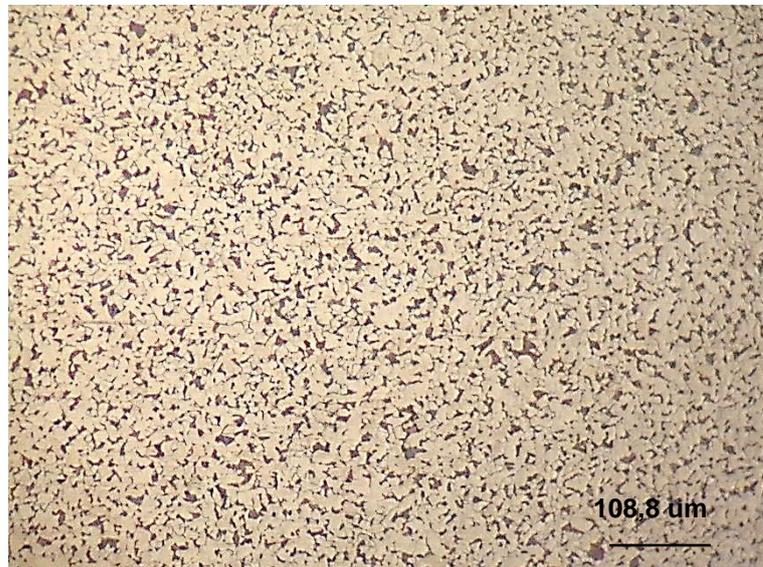
Los resultados de los distintos ensayos se los analizará estadísticamente, todo en cuanto se refiere al material de las probetas juega un papel muy importante, por lo que es de suma importancia que las muestras posean las características especificadas por el fabricante.

3.2.1 Análisis Metalográfico. Para preparar una superficie a ser analizada y poder caracterizar el material se debe seguir las especificaciones dadas en la norma ASTM E3-95.

Con la superficie pulida, se procede atacar químicamente con el reactivo Nital al 4%, que se compone de cuatro partes de ácido nítrico por cada cien partes de alcohol, dejando actuar el reactivo por diez segundos aproximadamente, para después observar y tomar fotografías de la microestructura a diferentes aumentos y así poderla comparar con los posters de referencia.

A continuación se presentan algunas imágenes del material sección transversal tomadas a 100X, 200X y 500X.

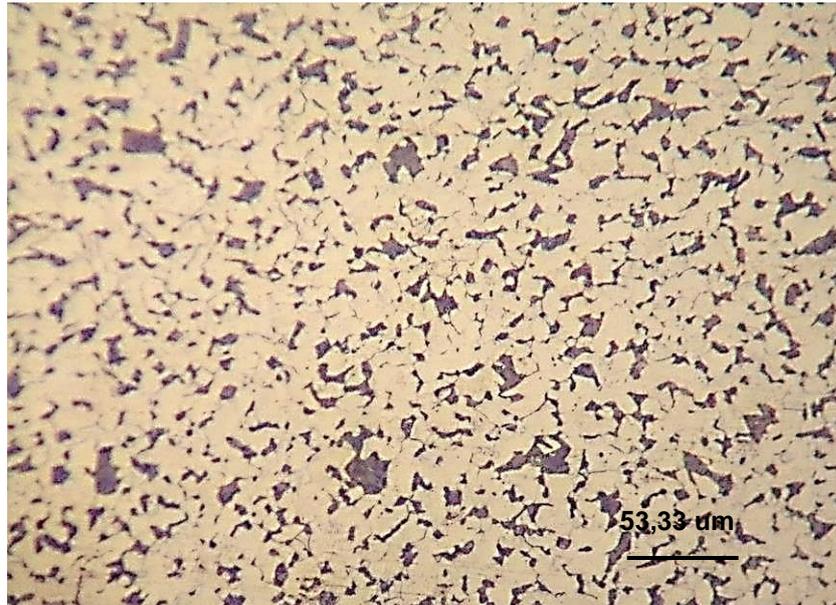
Figura 28. Sección transversal, atacado químicamente con Nital 4, visto a 100x



Fuente: Autores

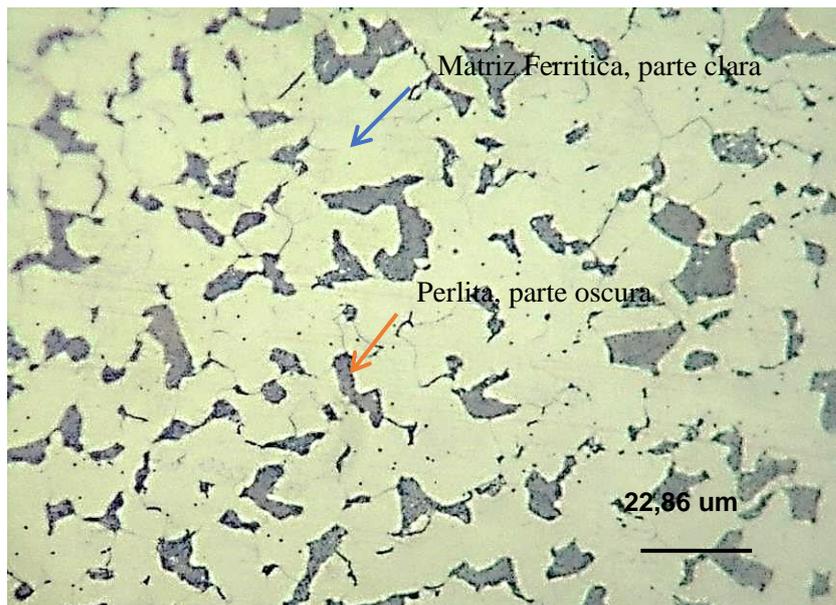
Como se observa la Figura 28, los granos se encuentran en una orientación equiaxial, teniendo la forma de granos circulares, dispuestos al azar, típica de la sección transversal.

Figura 29. Sección transversal, atacado químicamente con Nital 4, visto a 200x



Fuente: Autores

Figura 30. Sección transversal, atacado químicamente con Nital 4, visto a 500



Fuente: Autores

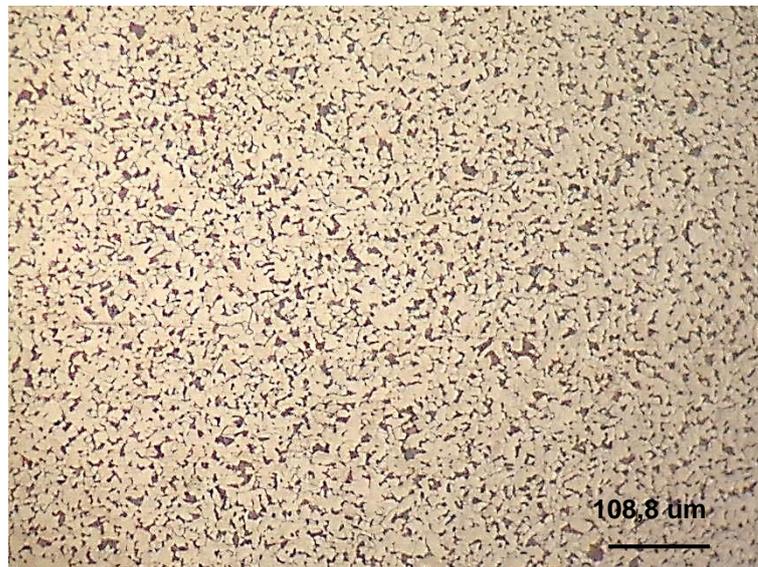
La microestructura que se observa corresponde a un acero de bajo contenido de carbono (hipoeutectoide), la misma presenta perlita en una matriz ferrítica. Las imágenes corroboran para afirmar que el material corresponde al acero AISI 1018 laminado en frío, como referencia se usó el ASM Metals HandBook volumen 9.

3.2.1.1 Análisis de imagen. Para el análisis de imagen es necesario estimar los porcentajes de los microconstituyentes que se encuentran en el acero, con el fin de

poder conocer el porcentaje de carbono presente, para lo cual se utilizó el programa computacional ScopePhoto.

Para analizar el porcentaje de fases de la aleación se tomó fotografías a 100 aumentos, con un área de análisis de aproximada de 0.5 milímetros cuadrados.

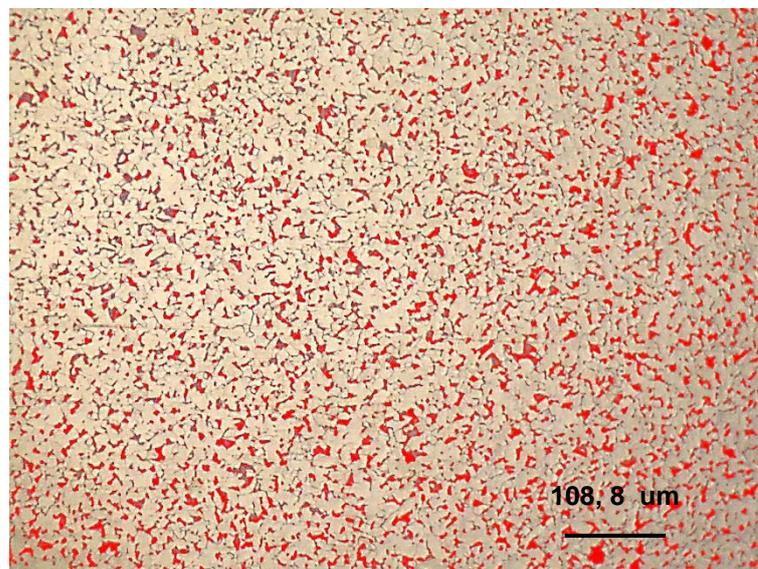
Figura 31. Fotomicrografía del acero AISI SAE 1018, tomada a 100X



Fuente: Autores

Se puede observar en la Figura 32, la pigmentación rojiza realizada en el programa ScopePhoto para la identificación de las respectivas fases.

Figura 32. Pigmentación de la fase perlita, foto de acero AISI SAE 1018, tomada a 100X



Fuente: ScopePhoto Software

Mediante análisis de porcentajes de las fases se obtuvo un porcentaje de ferrita (α) = 75,78% y perlita (p) = 24,22%.

3.2.1.2 Estimación aproximada del porcentaje de carbono. Para obtener un valor aproximado del porcentaje de carbono del acero AISI SAE 1018 laminado en frío, se utiliza la regla de la palanca.

$$\alpha = 75,78\%$$

$$p = 24,22\%$$

$$\alpha = 0,7578 = \frac{0,8 - x}{0,8 - 0,008} \rightarrow x = 0,1998 \%$$

Dónde:

x = Porcentaje de carbono a estimar

El porcentaje de carbono es aproximadamente 0,2%, lo cual es consistente con el correspondiente al acero AISI /SAE 1018.

3.2.2 Ensayo de tracción simple. Este ensayo consiste en someter una muestra o probeta del material, de sección uniforme y conocida, a una fuerza de tracción que va aumentando progresivamente. En forma simultánea se van tomando los correspondientes alargamientos de la probeta hasta llegar a la fractura del material.

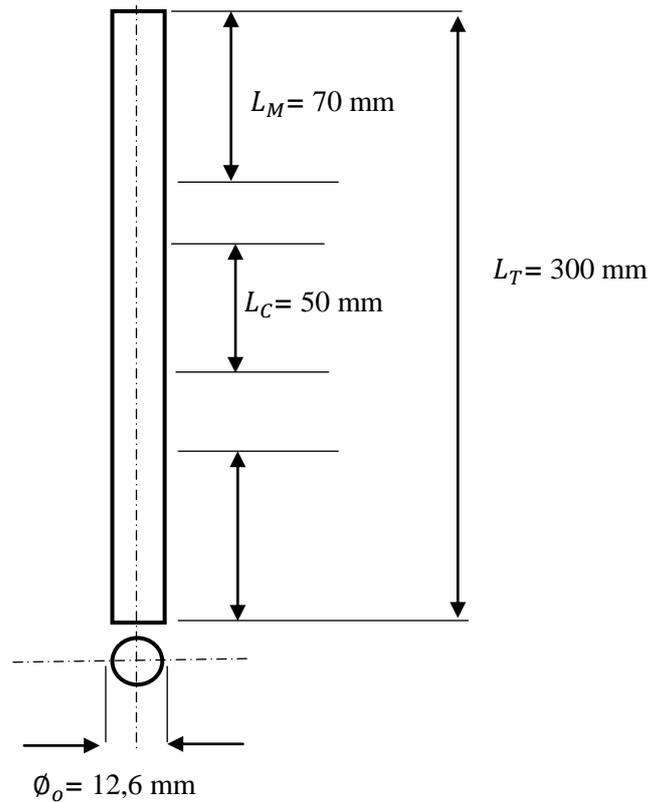
3.2.2.1 Dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción simple. Las probetas de acero AISI-SAE 1018 de sección circular deben cumplir especificaciones de acuerdo a la Norma ASTM E8M, o NTE INEN 0109 (2009) (Spanish): Ensayo de tracción para materiales metálicos a temperatura ambiente, los datos para el ensayo se visualizan en la Figura 33 y en la Tabla 3, que indican las especificaciones de dimensionamiento. (Ver Anexo B)

Tabla 3. Dimensiones de la probeta de sección circular

Muestra	Diámetro = ϕ (mm)	Longitud Total = L_t (mm)	Longitud de Agarre = L_m (mm)	Longitud Calibrada = L_c (mm)	Sección transversal = A (m^2)
1018 Redondo	12.6	300	70	50	158,76

Fuente: Norma ASTM E8M o NTE INEN 0109 (2009)

Figura 33. Esquema del dimensionamiento de la probeta de sección transversal redonda para el ensayo de tracción



Fuente: Autor

Los valores de deformación se tomaron para cada 100 kg de carga, sin embargo en la Tabla 4 solo se muestran valores para cada 400 kg.

Tabla 4. Valores de fuerza, deformación unitaria y esfuerzo

$F(kg)$	ε	$\sigma(\frac{kg}{cm^2})$	$\sigma(MPa)$
400	0,00014	315,772	30,98
800	0,00030	631,543	61,95
1200	0,00047	947,315	92,93
1600	0,00065	1263,087	123,91
2000	0,00079	1578,859	154,89
2400	0,00094	1894,630	185,86
2800	0,00109	2210,402	216,84
3200	0,00124	2526,174	247,82
3600	0,00139	2841,946	278,79
4000	0,00152	3157,717	309,77
4400	0,00168	3473,489	340,75
4800	0,00183	3789,261	371,73
5200	0,00197	4105,033	402,70
5600	0,00214	4420,804	433,68

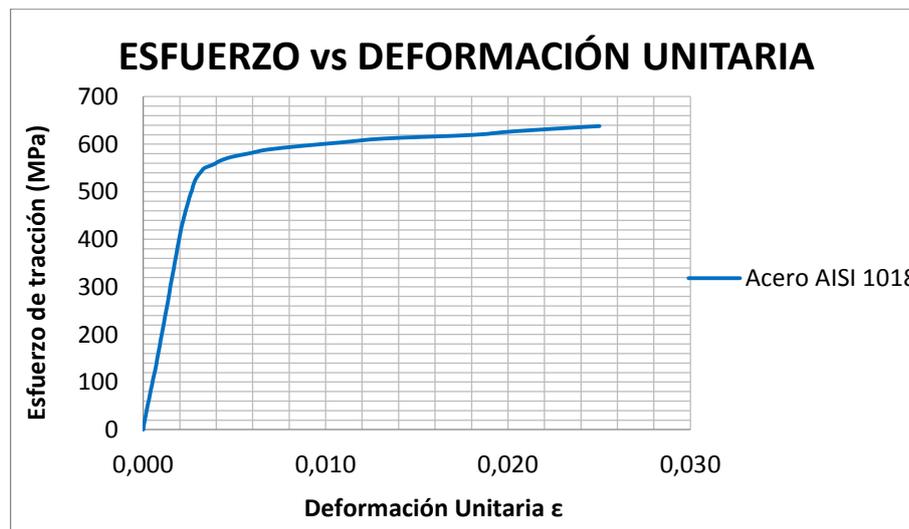
6000	0,00236	4736,576	464,66
6400	0,00259	5052,348	495,64
6800	0,00287	5368,120	526,61
7200	0,00385	5683,891	557,59
7600	0,00679	5999,663	588,57
8000	0,01806	6315,435	619,54
8100	0,02038	6394,378	627,29
8240	0,02501	6504,898	638,13
5485		4330,020	424,77

Fuente: Autores

No se presenta el dato de deformación unitaria para el punto de ruptura, ya que el material es dúctil, razón por la cual el deformímetro tuvo que ser desinstalado antes de producir la falla.

Como se observa en la Figura 34, la probeta inicialmente presenta una deformación proporcional, frente a incrementos de carga hasta un esfuerzo de 319,07 kg/cm², se diferencian la zona elástica y lo plástica. En la zona elástica donde la curva es lineal se tiene una pendiente conocida como módulo de elasticidad $E = 198060,52 \text{ kg/cm}^2$, el material ensayado llega a un esfuerzo de 638,13 kg/cm² el mismo que se considera esfuerzo máximo.

Figura 34. Curva esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018



Fuente: Autor

Las propiedades mecánicas y metalográficas conseguidas experimentalmente son valores aproximados, a los que indica las especificaciones del acero AISI SAE 1018,

por ende el material a ser utilizado para la investigación si corresponde al requerido para el estudio.

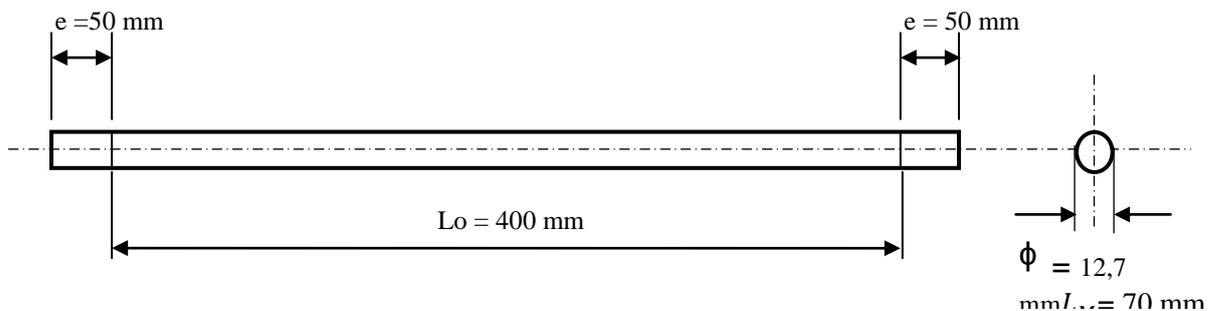
3.3 Extracción de probetas para el ensayo de torsión

Caracterizado como acero de transmisión AISI SAE 1018 laminado en frío, se procede a extraer las muestras para el ensayo de torsión. Las medidas se encuentran establecidas por la TINIUS OLSEN (TORSION TESTING MACHINES). (Ver Anexo C)

Para un mejor acabado en las muestras se realiza las operaciones de corte y refrentado, con la finalidad de conseguir medidas precisas para la realización del ensayo. Se requiere de doce probetas, dos por cada evento a experimentar.

3.3.1 Dimensiones de la probeta para el ensayo a torsión. El ensayo de torsión sobre probetas de acero u otros materiales de diámetro mayores a 10 mm no se encuentran estandarizados por ninguna Norma, por lo que se acoto anteriormente solo se rigen al fabricante. En caso de la “TINIUS OLSEN TESTING MACHINE”, los datos para ensayo de torsión se visualizan en la Figura 35 que muestran las especificaciones de dimensionamiento.

Figura 35. Esquema de las dimensiones para los ensayos de torsión



Fuente: Autor

Tabla 5. Dimensiones de las probetas para el ensayo de torsión

Muestra	Diámetro ϕ (mm)	Longitud probeta L (mm)	Longitud de torsión L_o (mm)	Longitud mordazas e (mm)
1018 Redondo	8-38	400-450	300	50

Fuente: Autores

Las probetas deben tener las especificaciones de la tabla anterior.

3.4 Ensayo mecánico a torsión

Las probetas a ensayar son doce, las mismas que fueron extraídas del eje de transmisión acero AISI SAE 1018 laminado en frío.

El ensayo de torsión se realizó en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

El equipo usado es:

Descripción: Máquina de ensayos de torsión 10000 kg.cm

Marca: TINIUS OLSEN

Modelo: RT-3C

Conexión Eléctrica: 220 Volts, 60 Ciclos, 3 Fases

Serie: 123643

Figura 36. Máquina de torsión



Fuente: Autores

Se establece una velocidad de rotación del mandril móvil de 60°/min, se realiza las lecturas y toma de datos del ensayo.

3.4.1 *Ensayo de torsión hasta la fractura.* Primero se efectuó el ensayo de torsión hasta llegar a la fractura, el mismo que es de suma importancia para conocer las propiedades mecánicas mediante la gráfica esfuerzo-deformación angular, entre estas

propiedades a conseguir, la que es de prioridad para esta investigación es a que ángulo de deformación se presenta el límite elástico. Posteriormente se realizó deformaciones por torsión, superiores a dicho punto.

Se registran los datos promedio de torque, el ángulo de giro, el esfuerzo cortante y la deformación, para cada 10° de ángulo de giro, sin embargo en la Tabla 6 únicamente se muestran valores para cada 200°.

Tabla 6. Valores de deformación angular y esfuerzo cortante que experimenta la probeta de acero AISI 1018 laminado en frío

Θ (° Grados)	τ (kg/cm ²)	τ (MPa)
200	2122,260	208,19
400	2161,420	212,04
600	2155,329	211,44
800	2153,712	211,28
1000	2157,815	211,68
1200	2169,501	212,83
1400	2181,933	214,05
1600	2194,489	215,28
1800	2208,164	216,62
2000	2225,196	218,29
2200	2238,623	219,61
2400	2254,536	221,17
2600	2266,968	222,39
2800	2279,648	223,63
3000	2292,329	224,88
3200	2305,382	226,16
3400	2317,193	227,32
3600	2331,218	228,69

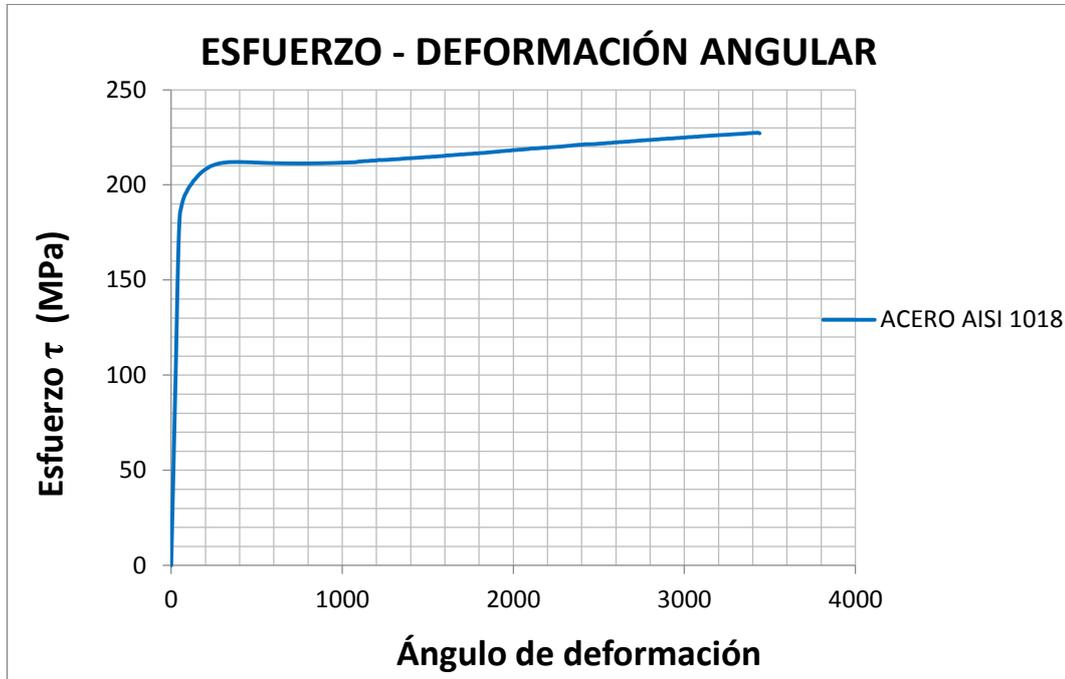
Fuente: Autores

La Figura 37 muestra la curva esfuerzo cortante-deformación angular del acero AISI SAE 1018 laminado en frío, mostrando también el comportamiento típico de un material dúctil en el ensayo de torsión.

El punto de interés es el límite elástico el cual se encuentra a 50° de la deformación angular, para una mejor apreciación se tiene la Figura 38, donde se grafican los datos

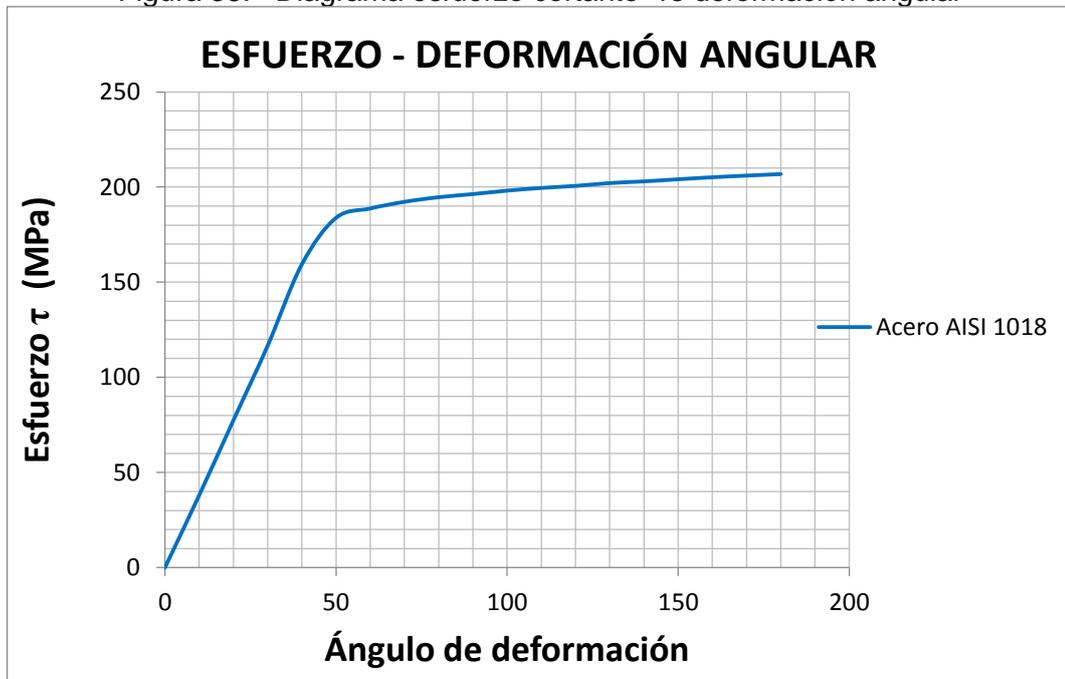
referentes a la zona elástica y de fluencia. Este dato nos sirve de referencia para los siguientes eventos.

Figura 37. Diagrama esfuerzo cortante vs deformación angular



Fuente: Autores

Figura 38. Diagrama esfuerzo cortante vs deformación angular



Fuente: Autores

Se realizará seis casos, cada experimentación estará interviniendo la torsión plástica, a diferentes ángulos de deformación. Los casos quedan codificados como muestra la Tabla 7.

Tabla 7. Codificación de las muestras para los ensayos metalográficos

Muestra	Ángulo de deformación por torsión	Codificación
Probeta de Suministro	0°	Probeta_Suministro
Caso 1	70°	Probeta_T.70°
Caso 2	270°	Probeta_T.270°
Caso 3	540°	Probeta_T.540°
Caso 4	1080°	Probeta_T.1080°
Caso 5	1800°	Probeta_T.1800°
Caso 6	3600°	Probeta_T.3600°

Fuente: Autores

3.5 Evaluación de la microestructura del acero AISI SAE 1018 laminado en frío

Para estudiar los cambios microestructurales producidos con los ensayos de torsión se realizó una evaluación preliminar del material de suministro en base al cual se efectuará las comparaciones.

El número de muestras para el desarrollar del análisis metalográfico esta codificado de acuerdo a la Tabla 8.

Tabla 8. Codificación de las muestras para los ensayos metalográficos

Muestra	Ángulo de deformación por torsión.	Codificación
Probeta de Suministro	0°	Suministro_M
Caso 1	70°	T.70°_M
Caso 2	270°	T.270°_M
Caso 3	540°	T.540°_M
Caso 4	1080°	T.1080°_M
Caso 5	1800°	T.1800°_M
Caso 6	3600°	T.3600°_M

Fuente: Autores

El análisis del comportamiento de la microestructura, se realiza en la sección longitudinal del eje, como es de conocimiento el ensayo de torsión genera un esfuerzo cortante, el cual es máximo en la periferia y nulo en el centro, por lo que se procede a tomar fotografías desde el centro hasta el extremo con una variación de distancia aproximadamente de 1560 μm .

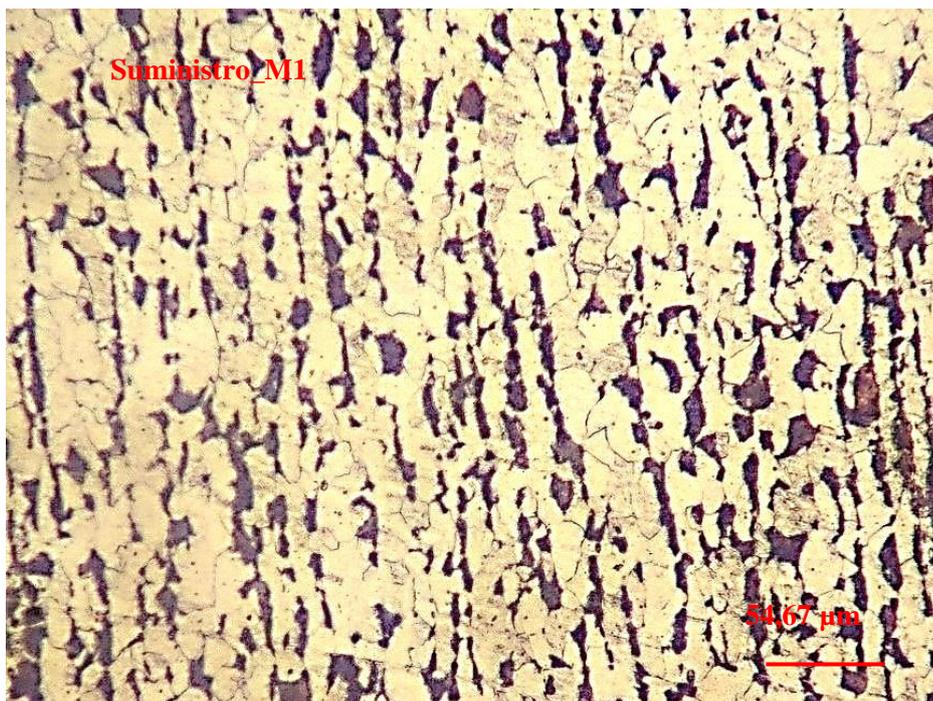
Los ensayos metalográficos, fueron realizados en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Para el ensayo metalográfico, todo el proceso experimental se rige a la norma ASME E3-95. Las probetas una vez conseguidas la apariencia de espejo mediante el procedimiento de pulido, se proceden a atacar con nital 4% durante diez segundos aproximadamente, detener el ataque y tomar fotografías a 200X.

A continuación se indican las micrografías que muestran los cambios más significativos, notándose principalmente cambios en la orientación, forma y tamaño de grano en relación con la distancia.

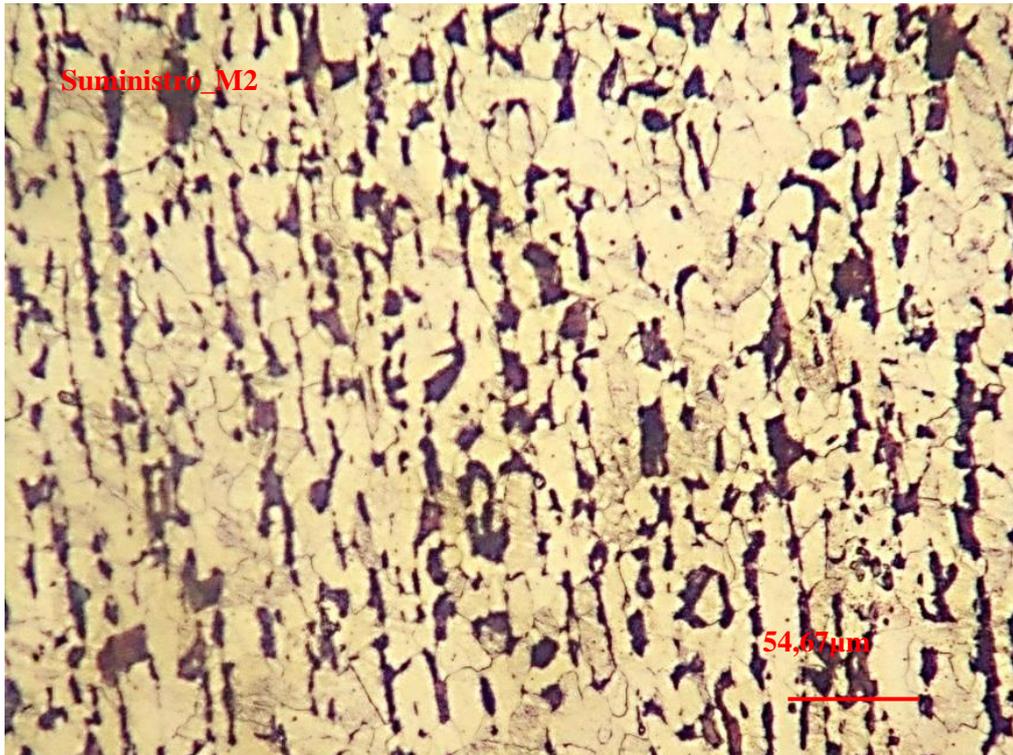
Probeta de suministro (Suministro_M)

Figura 39. Micrografía a partir del centro de 0-400 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



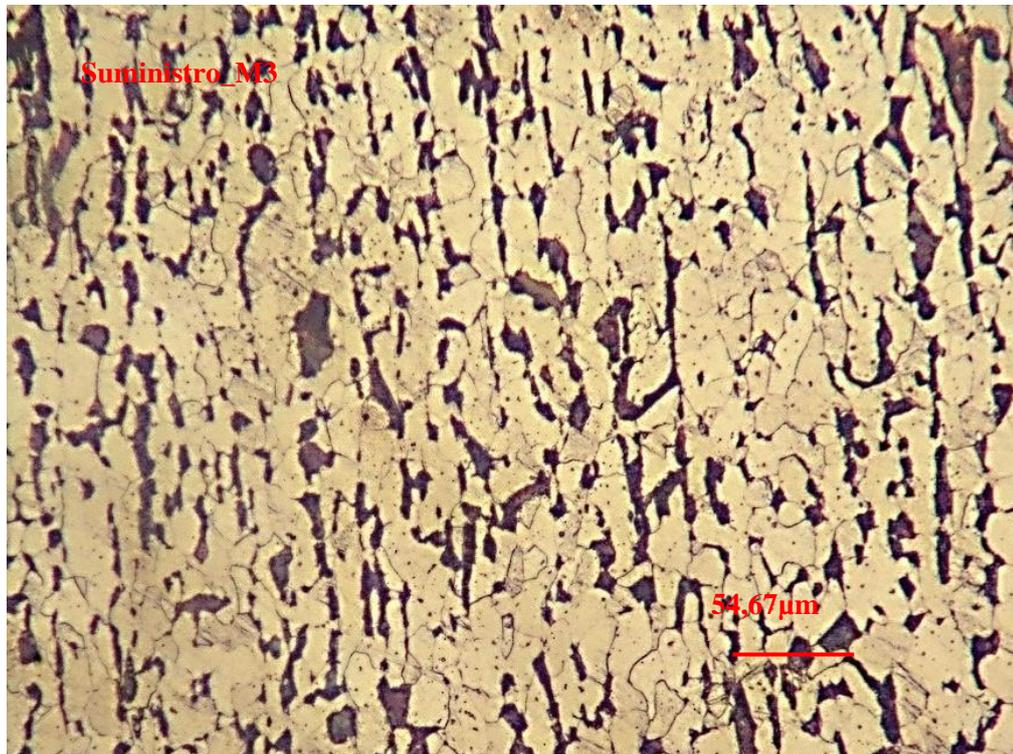
Fuente: Autores

Figura 40. Micrografía a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



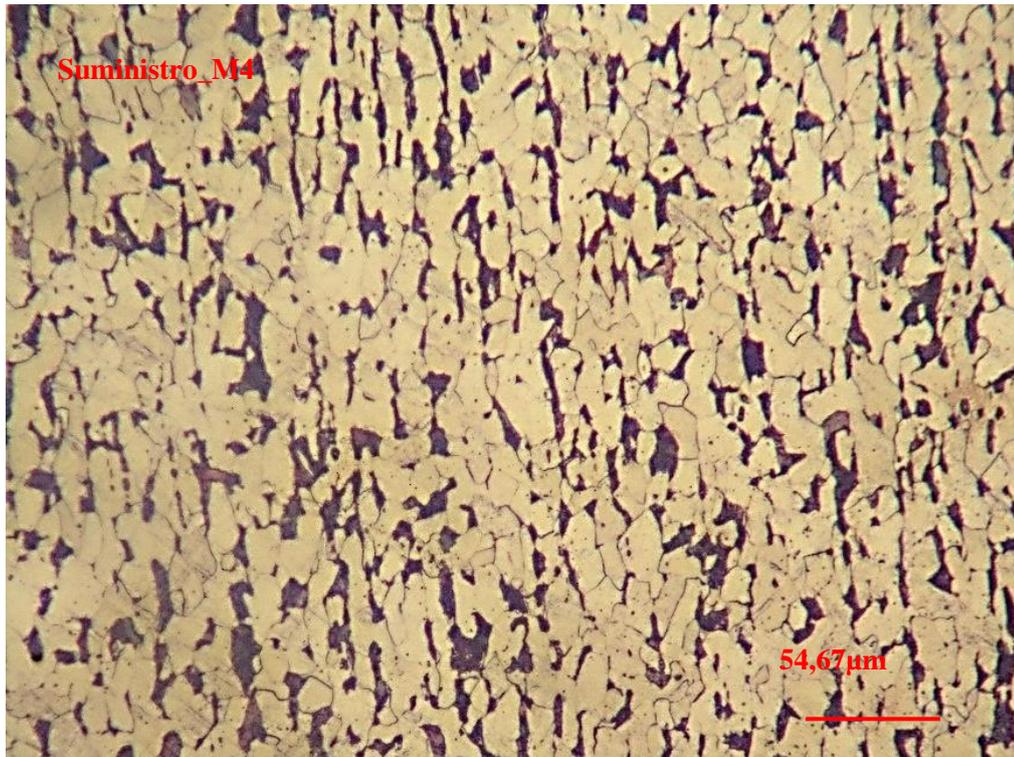
Fuente: Autores

Figura 41. Micrografía a partir del centro de 2800-3200 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



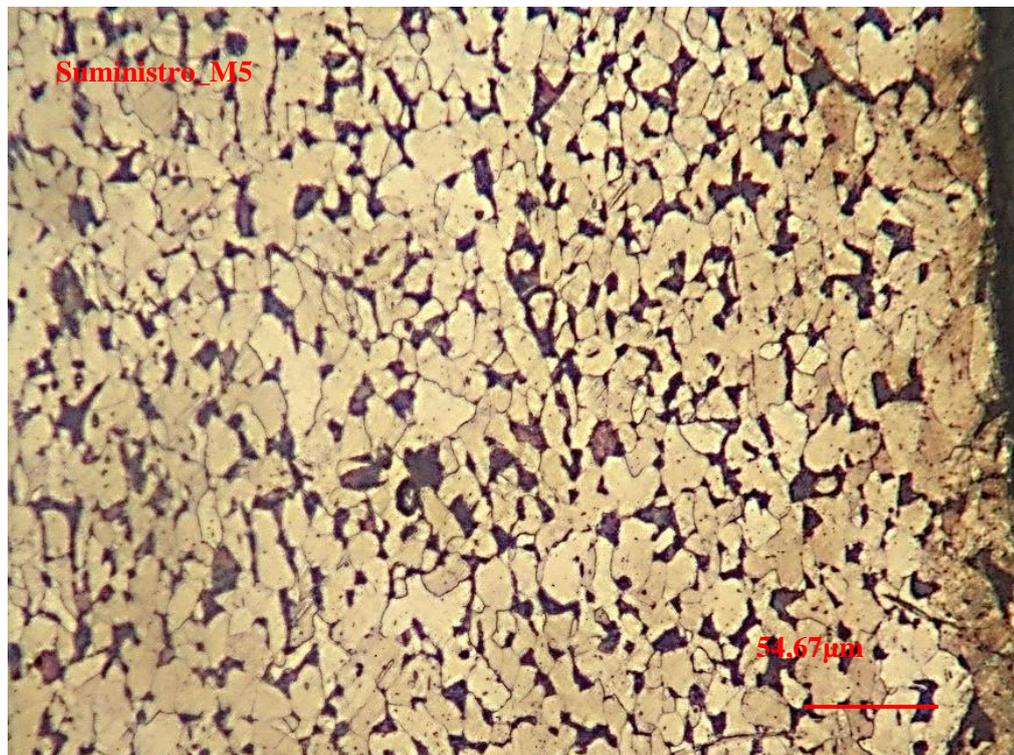
Fuente: Autores

Figura 42. Micrografía a partir del centro de 4400-4800 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



Fuente: Autores

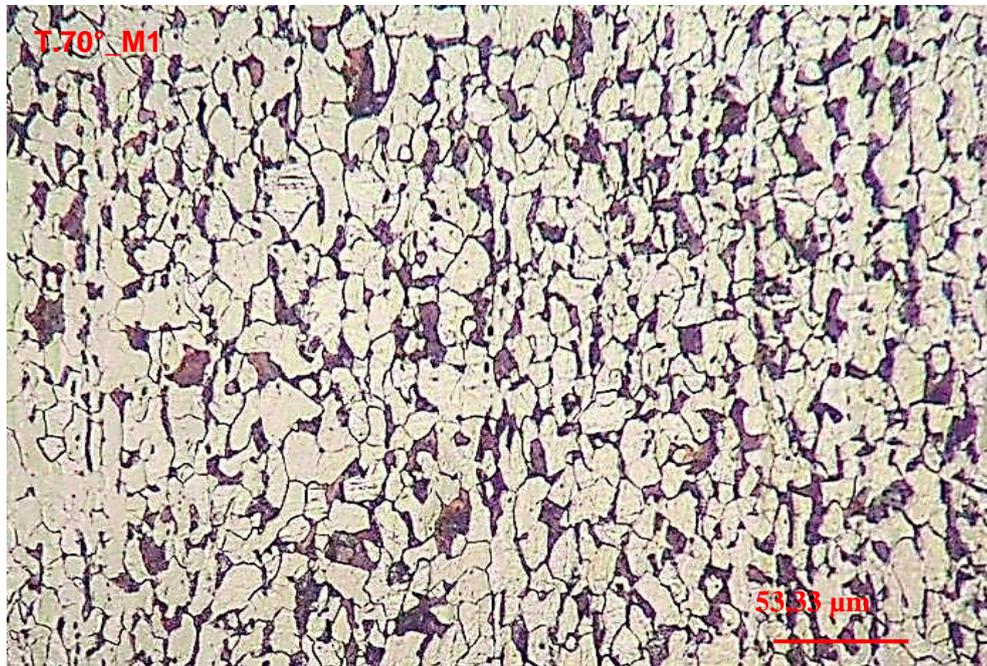
Figura 43. Micrografía a partir del centro de 5850-6250 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



Fuente: Autores

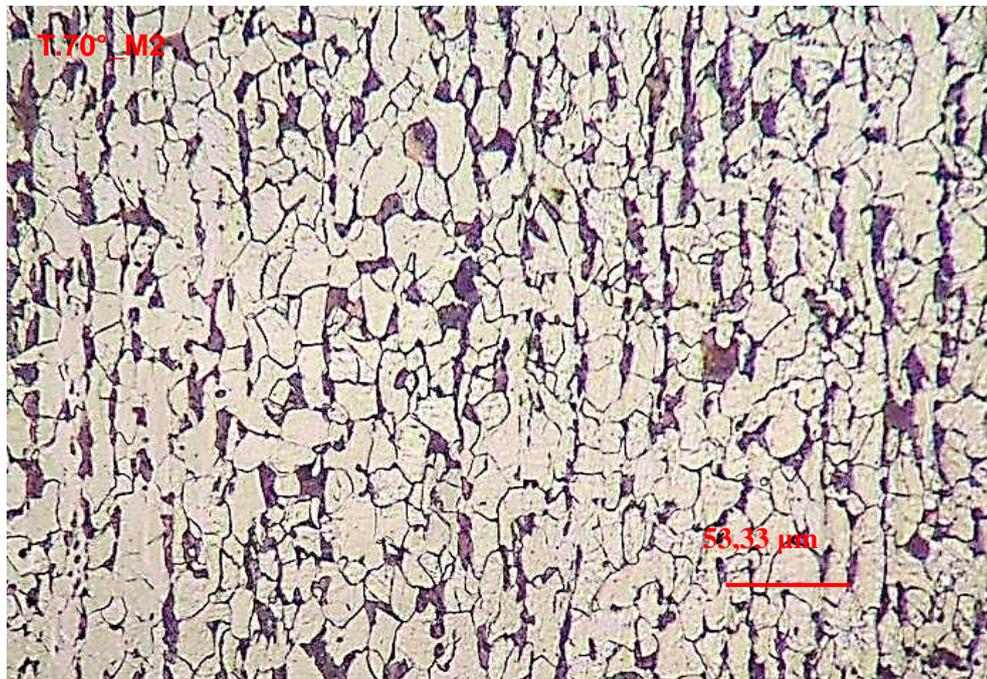
Caso 1 (T.70°_M)

Figura 44. Micrografía a partir del centro de 0-400 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



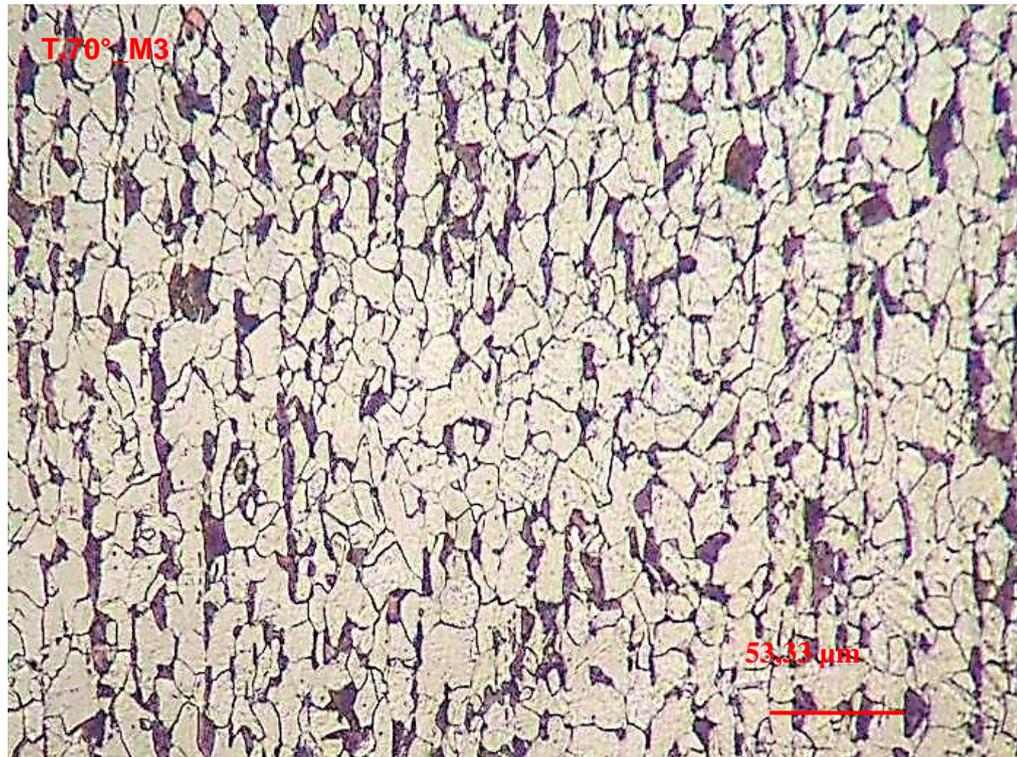
Fuente: Autores

Figura 45. Micrografía de a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



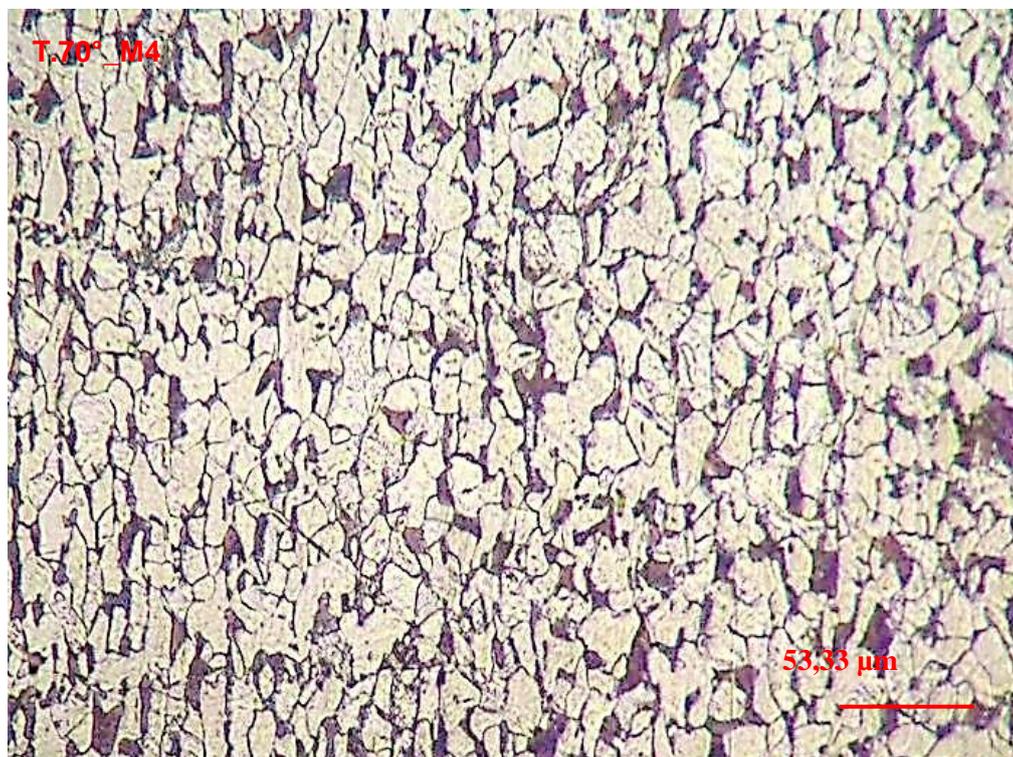
Fuente: Autores

Figura 46. Micrografía a partir del centro de 2800-3200 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



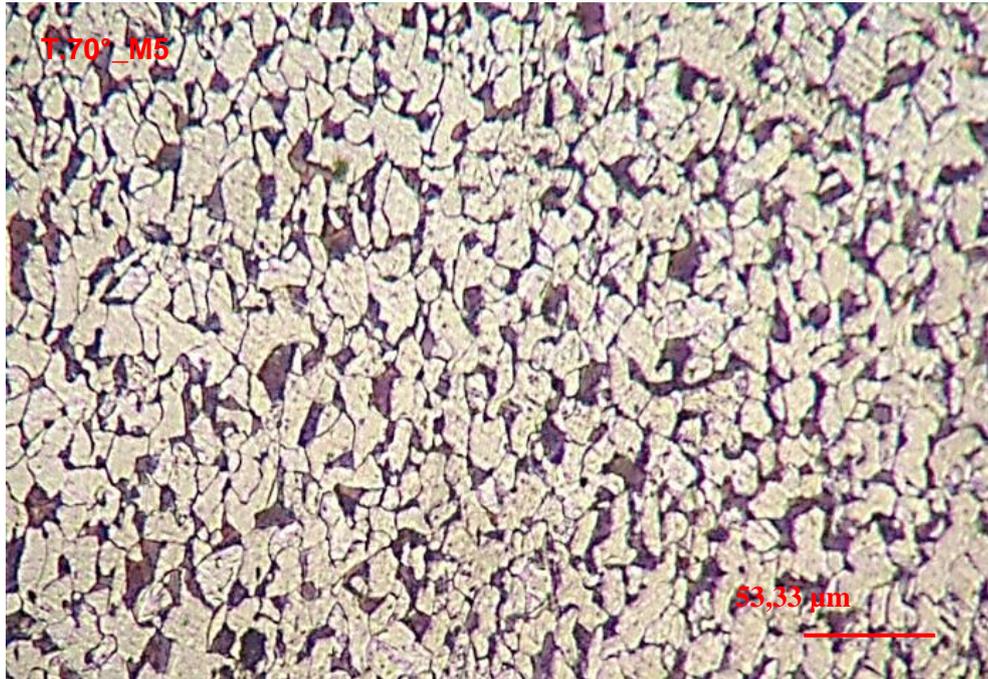
Fuente: Autor

Figura 47. Micrografía a partir del centro de 4400-4800 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



Fuente: Autores

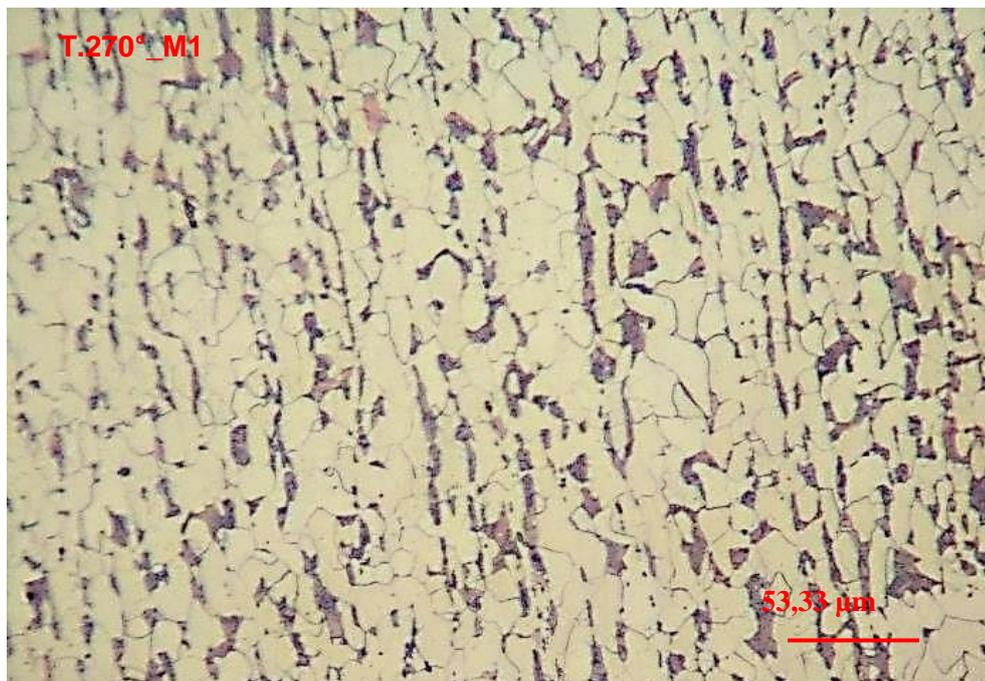
Figura 48. Micrografía a partir del centro de 5850-6250 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



Fuente: Autores

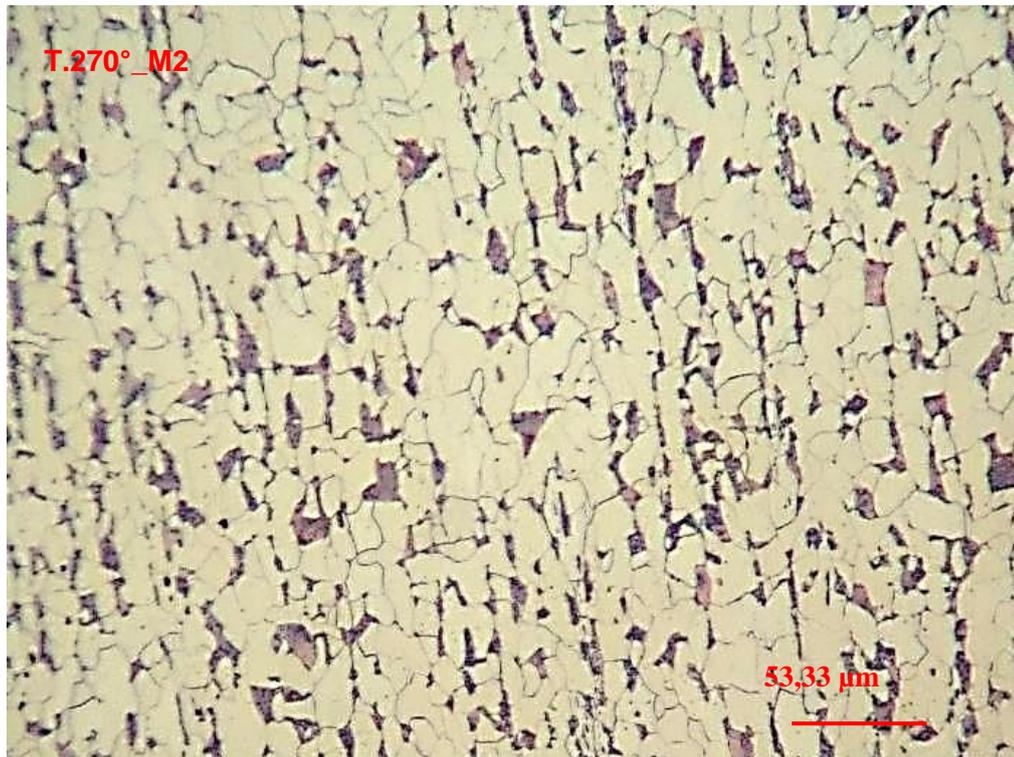
Caso 2 (T.270°_M)

Figura 49. Micrografía a partir del centro de 0-400 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



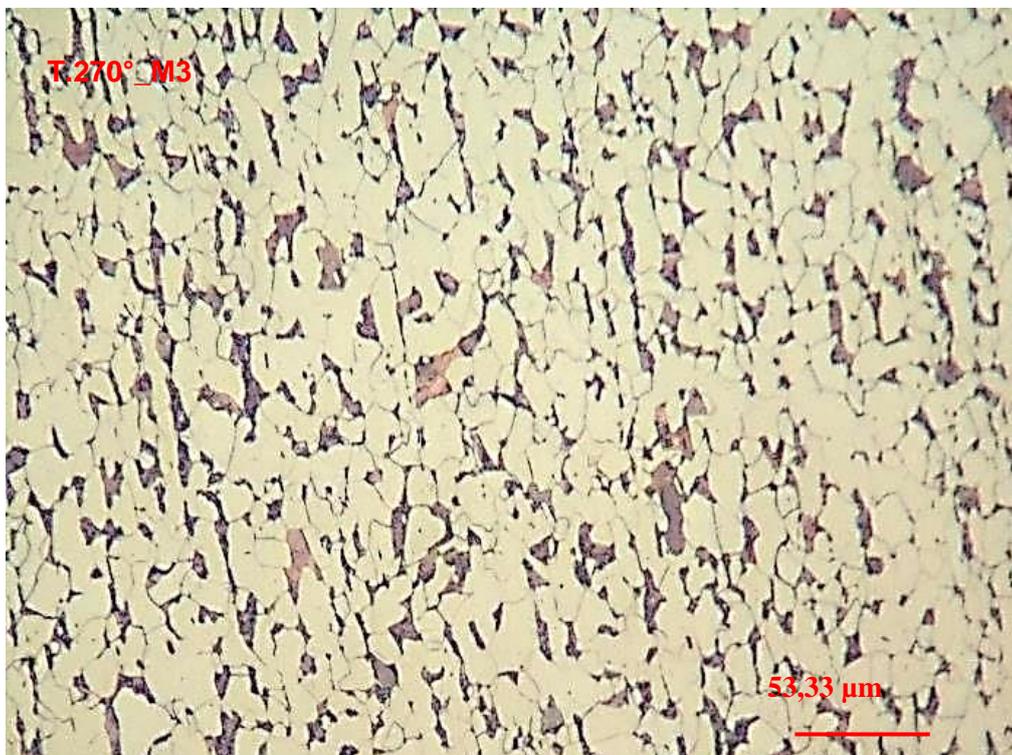
Fuente: Autores

Figura 50. Micrografía a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



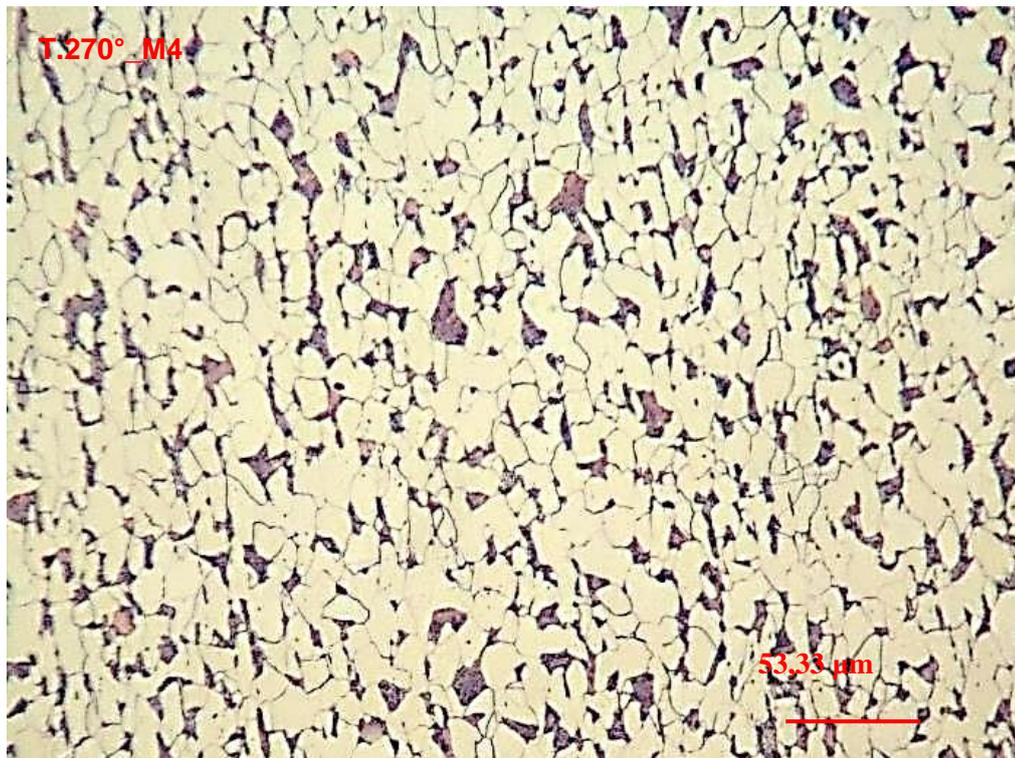
Fuente: Autores

Figura 51. Micrografía a partir del centro de 2800-3200 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



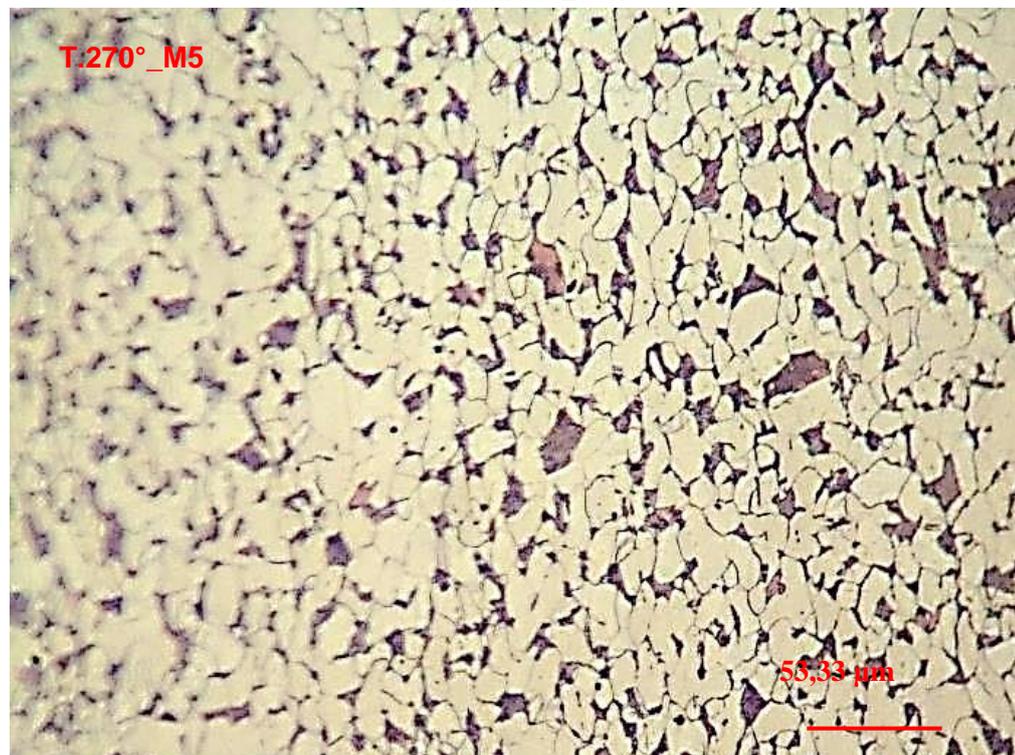
Fuente: Autores

Figura 52. Micrografía a partir del centro de 4400-4800 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



Fuente: Autores

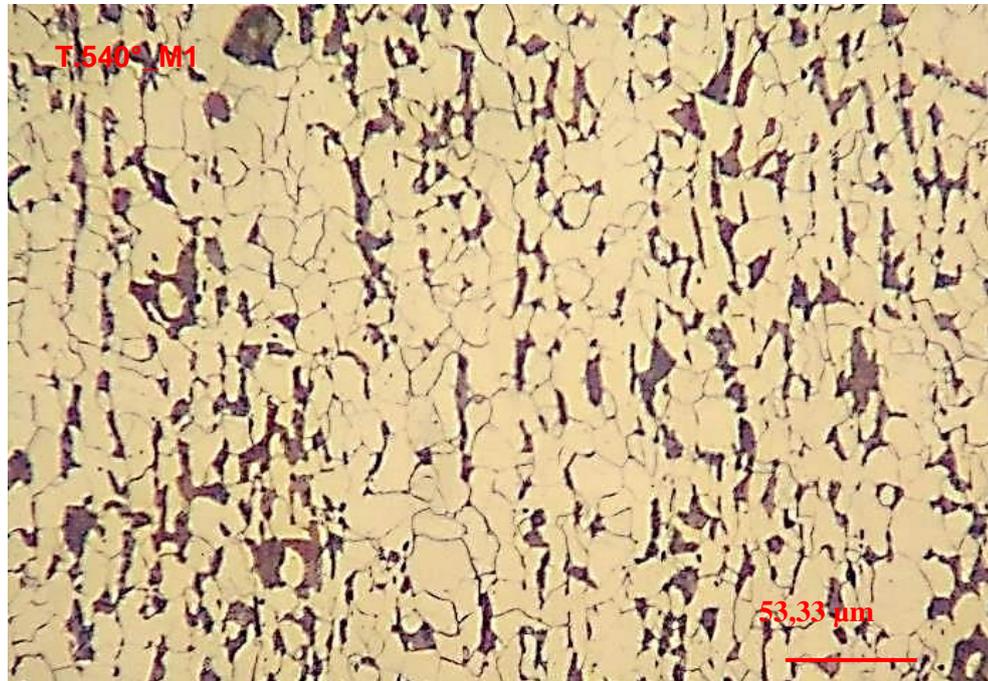
Figura 53. Micrografía a partir del centro de 5850-6250 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



Fuente: Autores

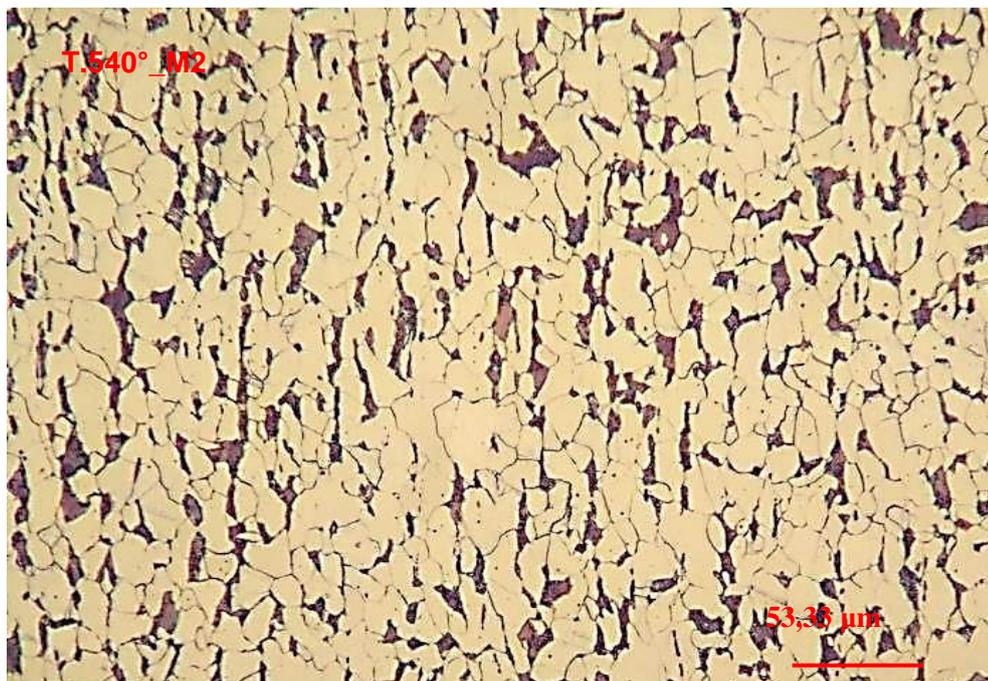
Caso 3 (T.540°_M)

Figura 54. Micrografía a partir del centro de 0-400 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



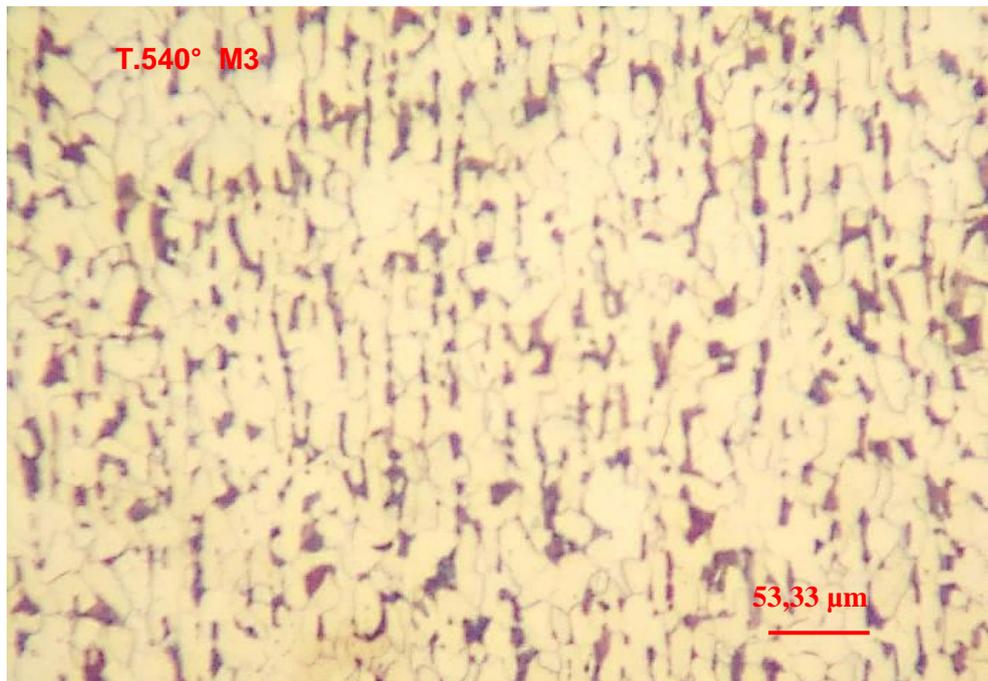
Fuente: Autores

Figura 55. Micrografía a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



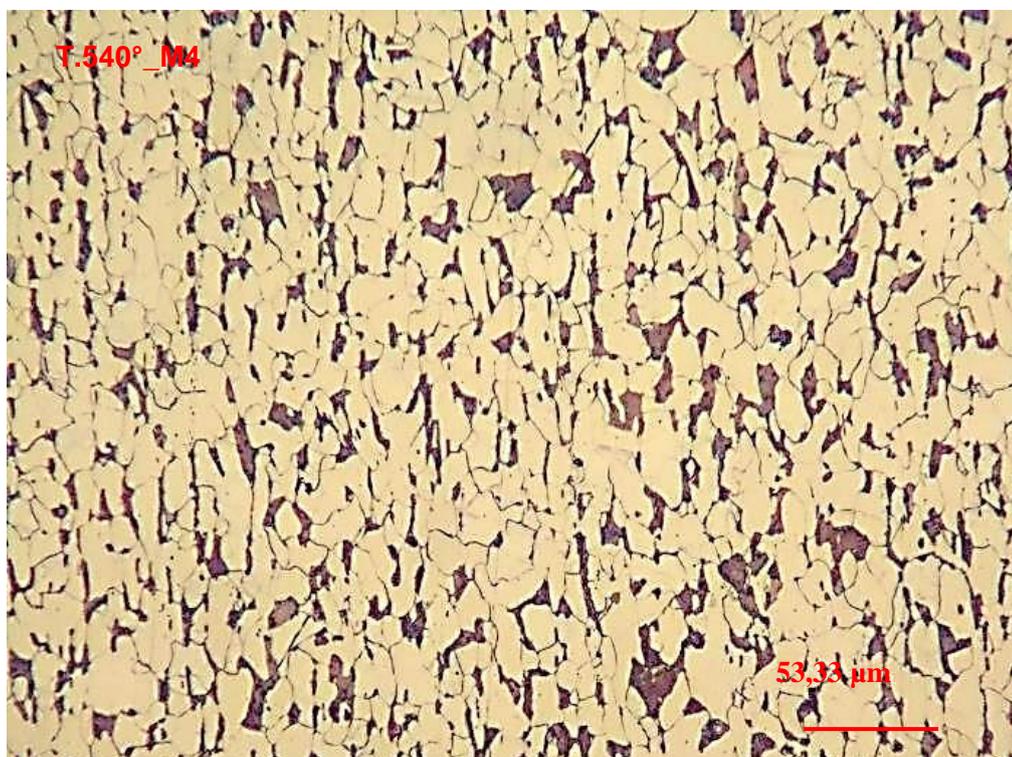
Fuente: Autores

Figura 56. Micrografía a partir del centro de 2800-3200 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



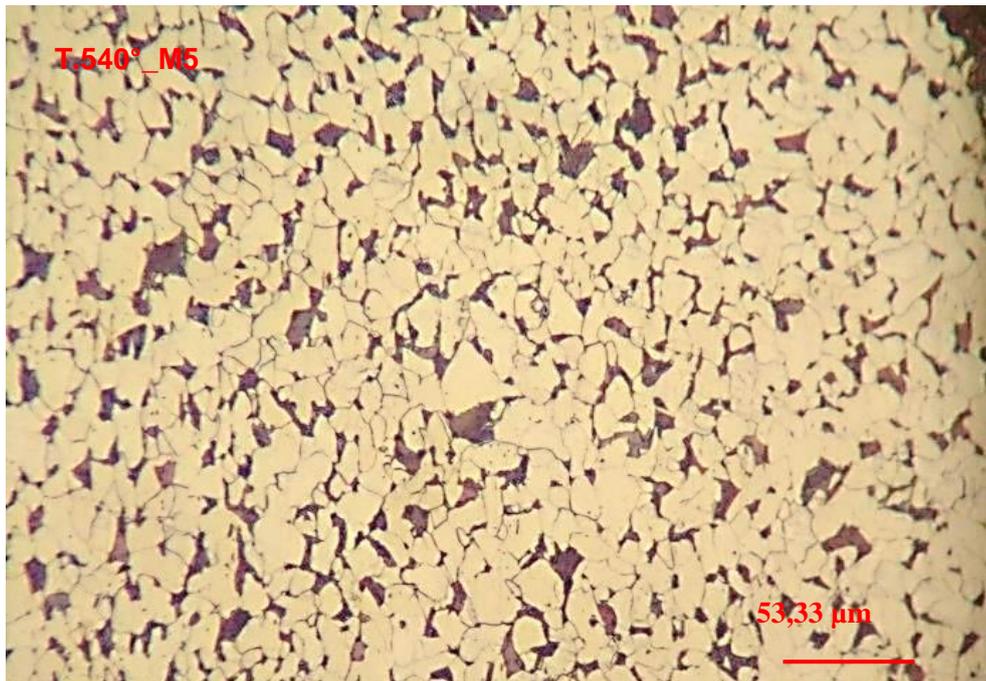
Fuente: Autores

Figura 57. Micrografía a partir del centro de 4400-4800 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



Fuente: Autores

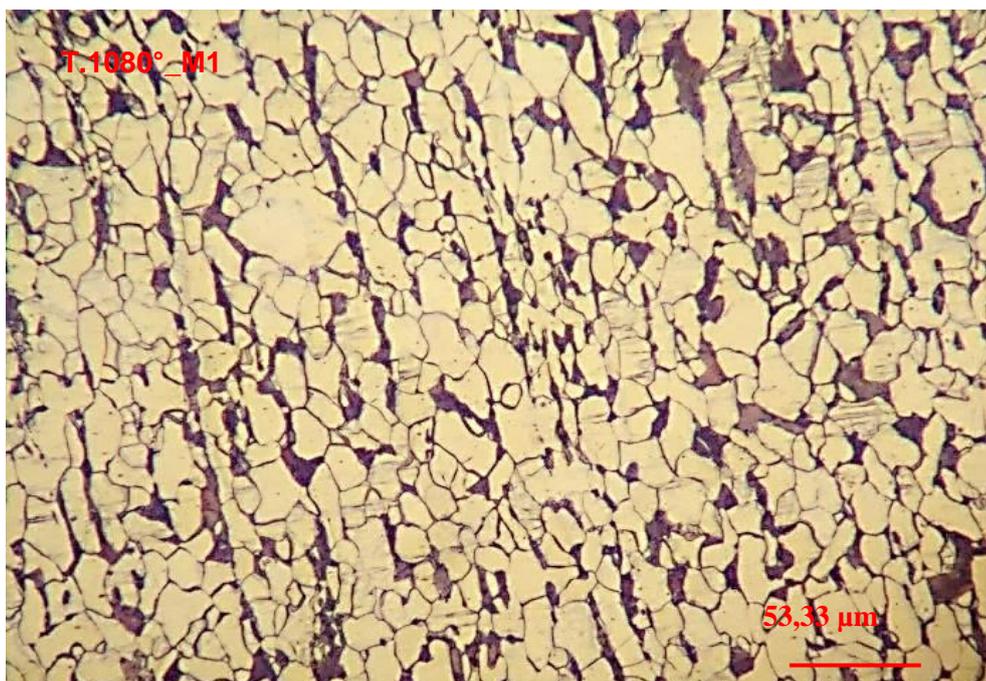
Figura 58. Micrografía a partir del centro de 5850-6250 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



Fuente: Autores

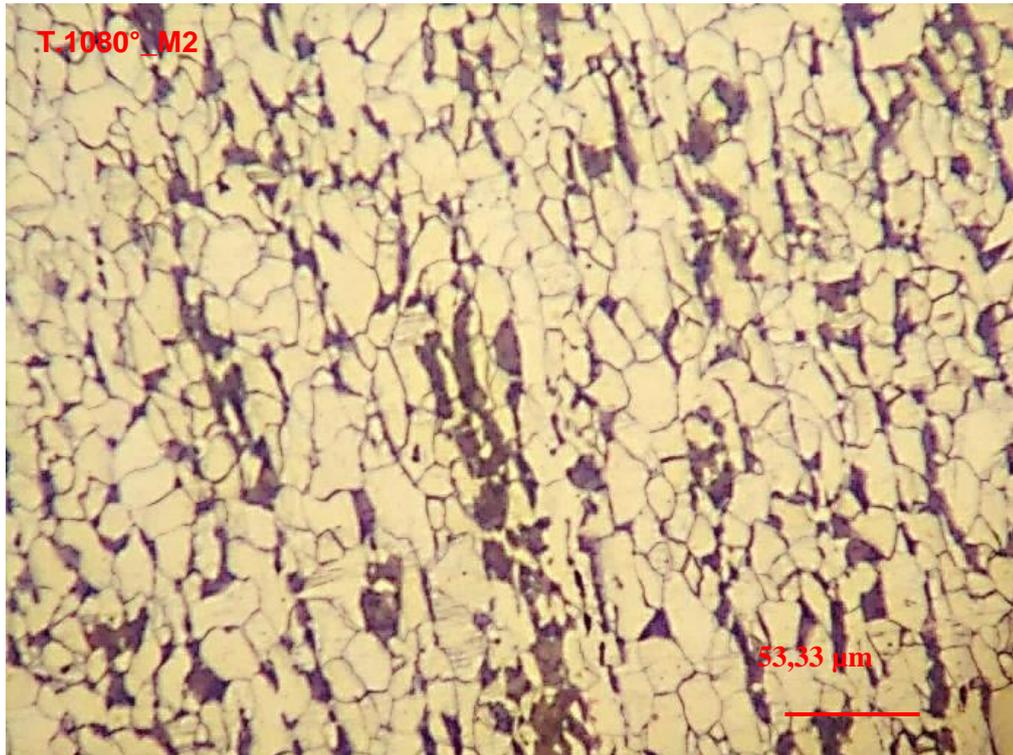
Caso 4 (T.1080°_M)

Figura 59. Micrografía a partir del centro de 0-400 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



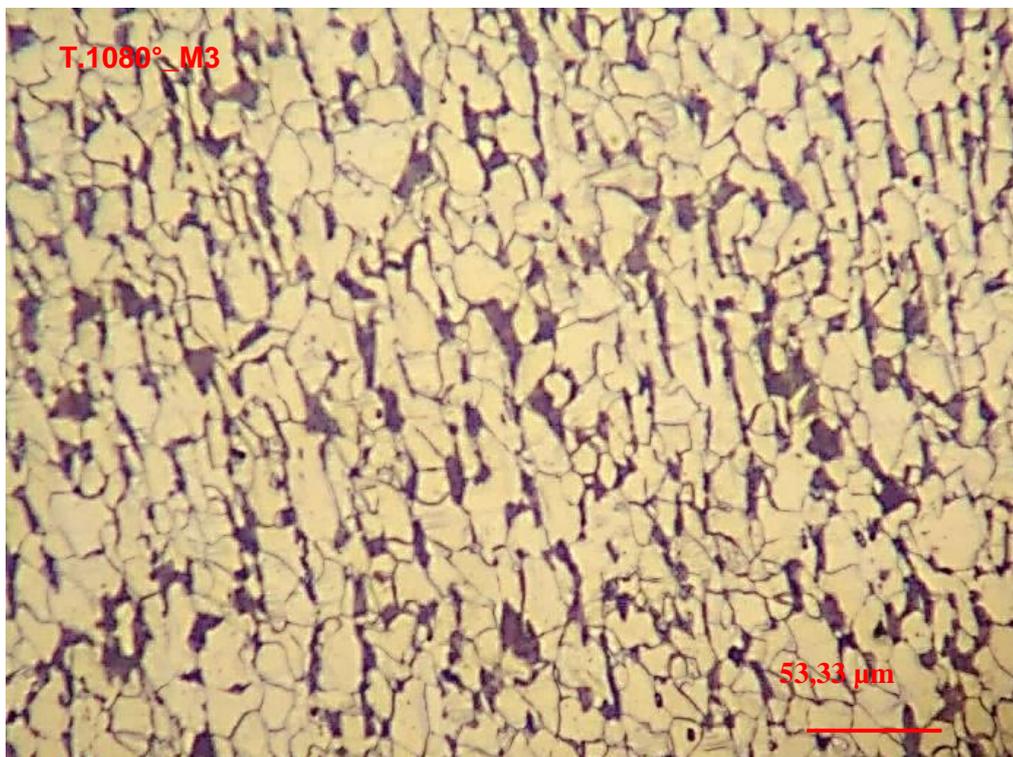
Fuente: Autores

Figura 60. Micrografía a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%,
tomada a 200x



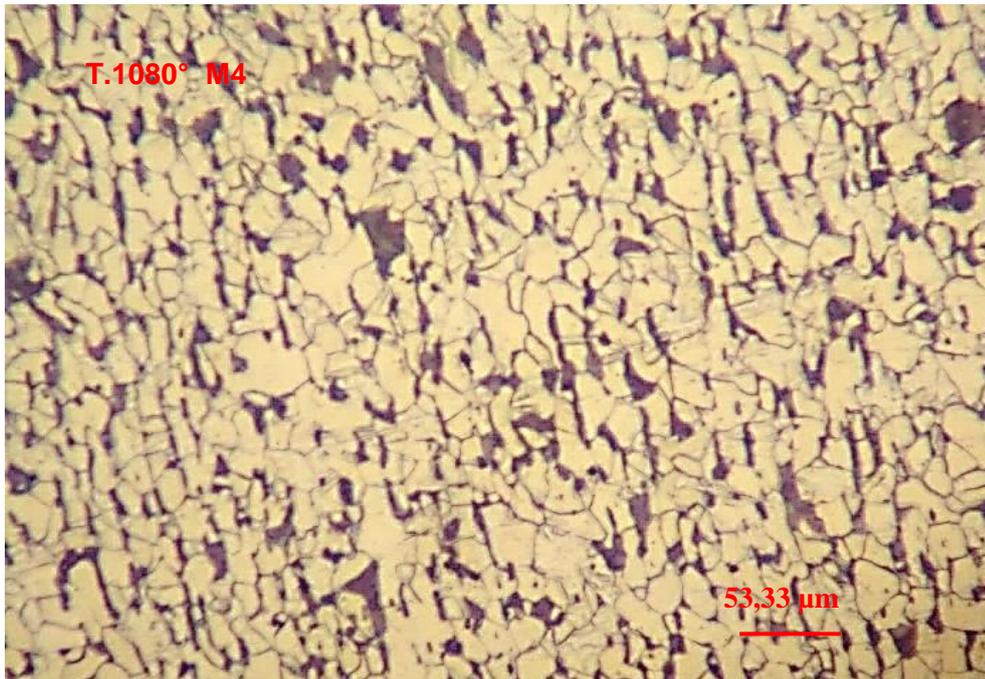
Fuente: Autores

Figura 61. Micrografía a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%,
tomada a 200x



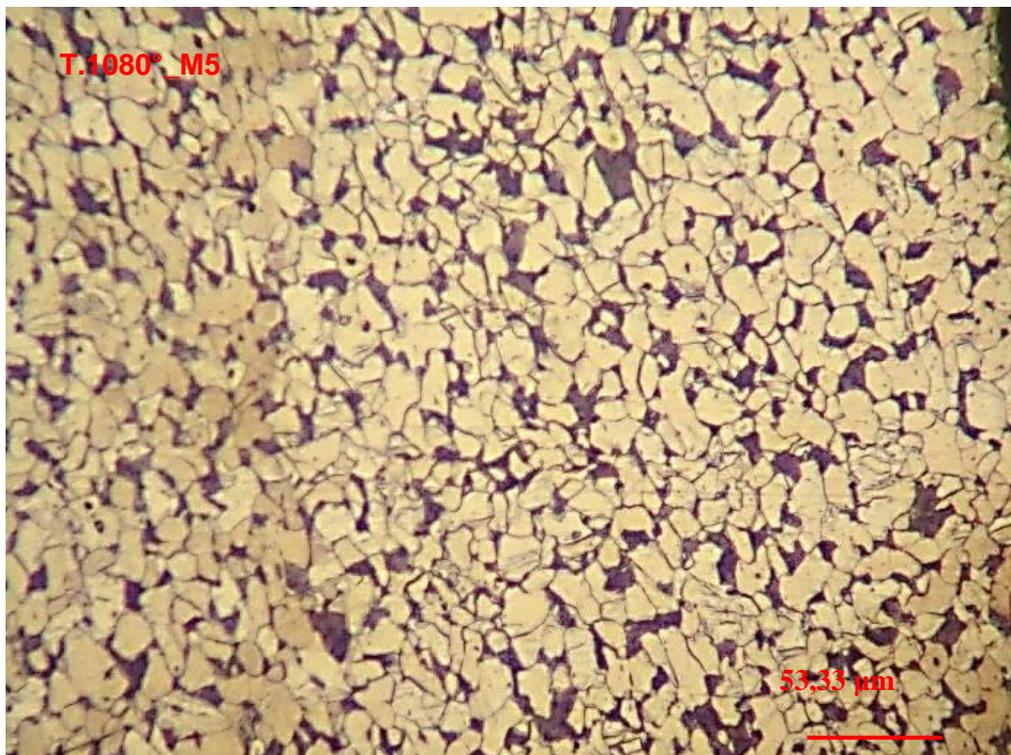
Fuente: Autores

Figura 62. Micrografía a partir del centro de 4400-4800 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



Fuente: Autores

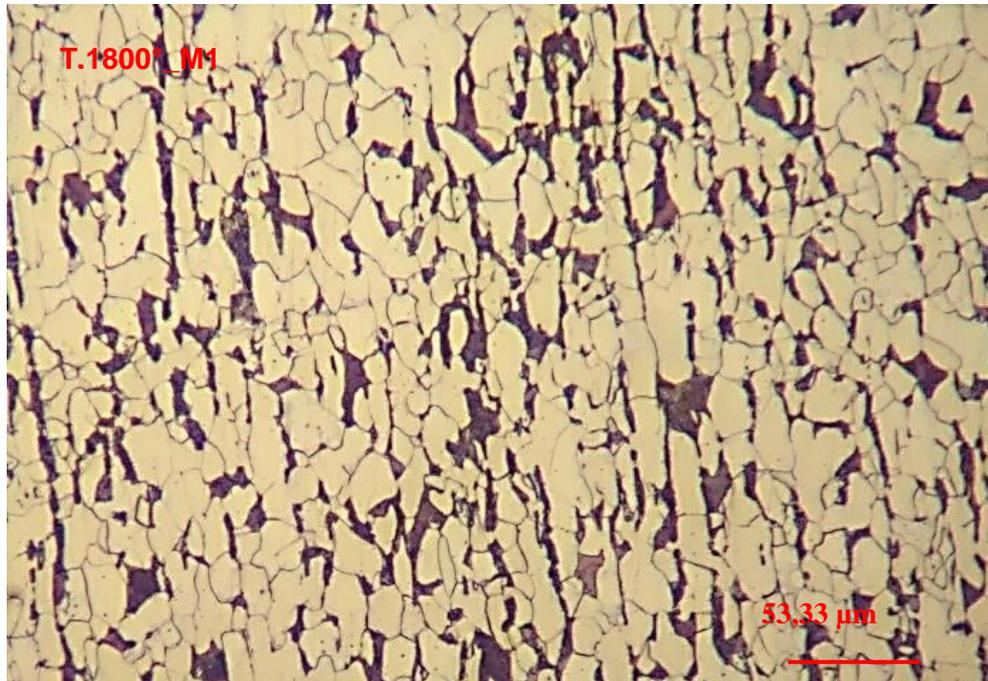
Figura 63. Micrografía a partir del centro de 5850-6250 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



Fuente: Autores

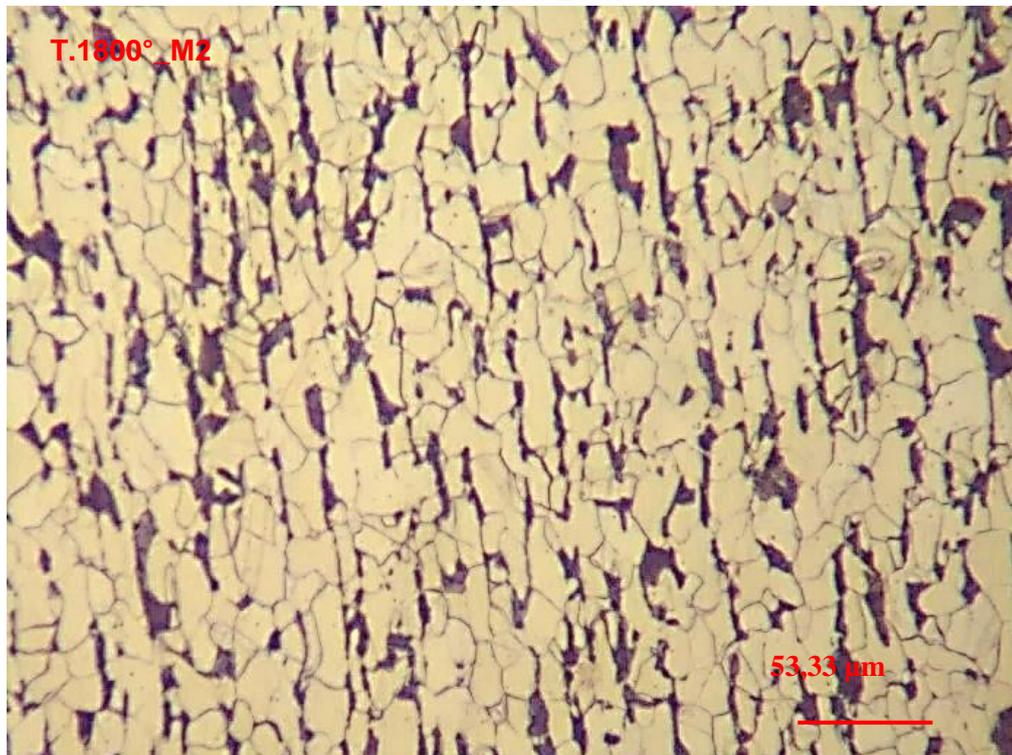
Caso 5 (T.1800°_M)

Figura 64. Micrografía a partir del centro de 0-400 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



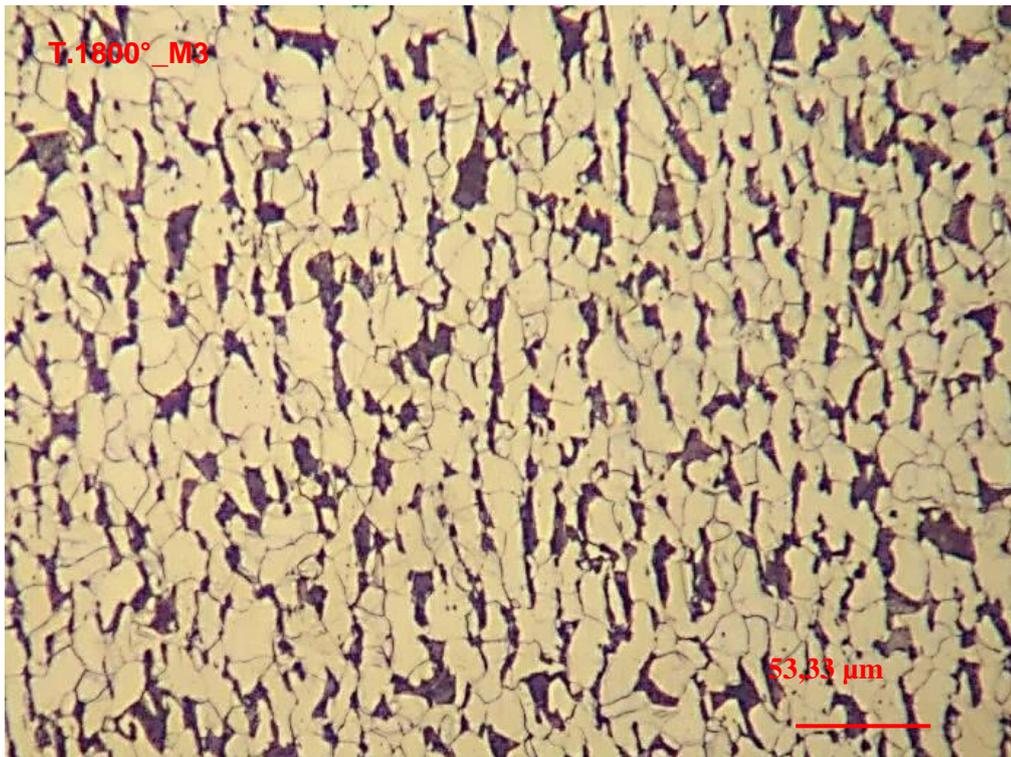
Fuente: Autores

Figura 65. Micrografía a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



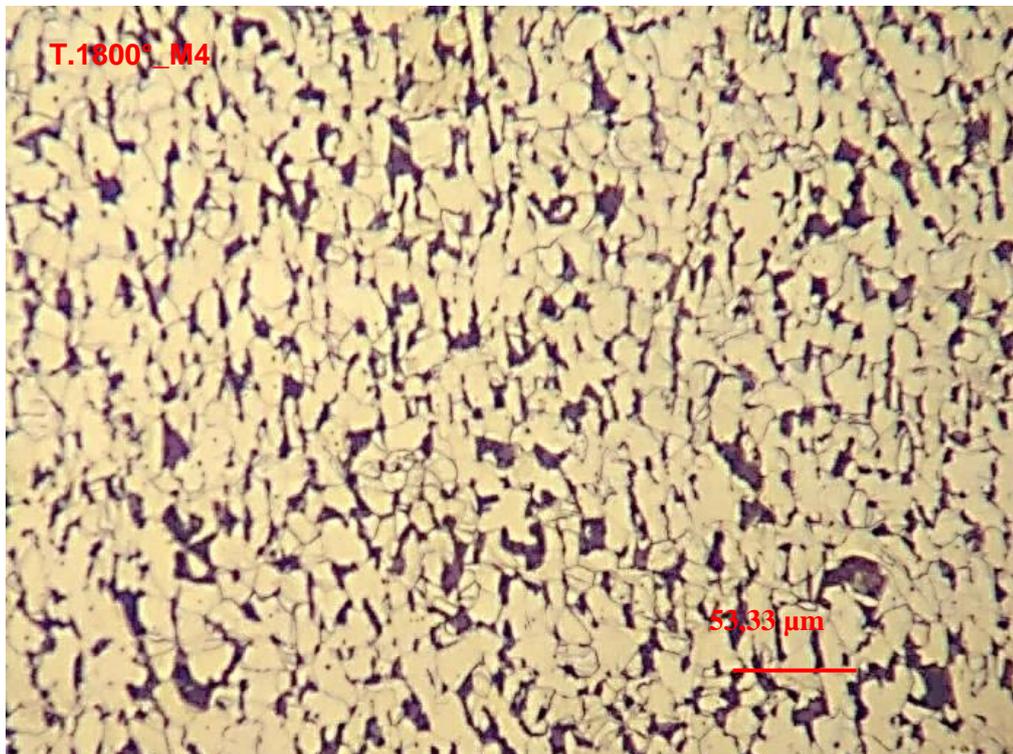
Fuente: Autores

Figura 66. Micrografía a partir del centro de 2800-3200 μm , atacada con nital 4%,
tomada a 200x



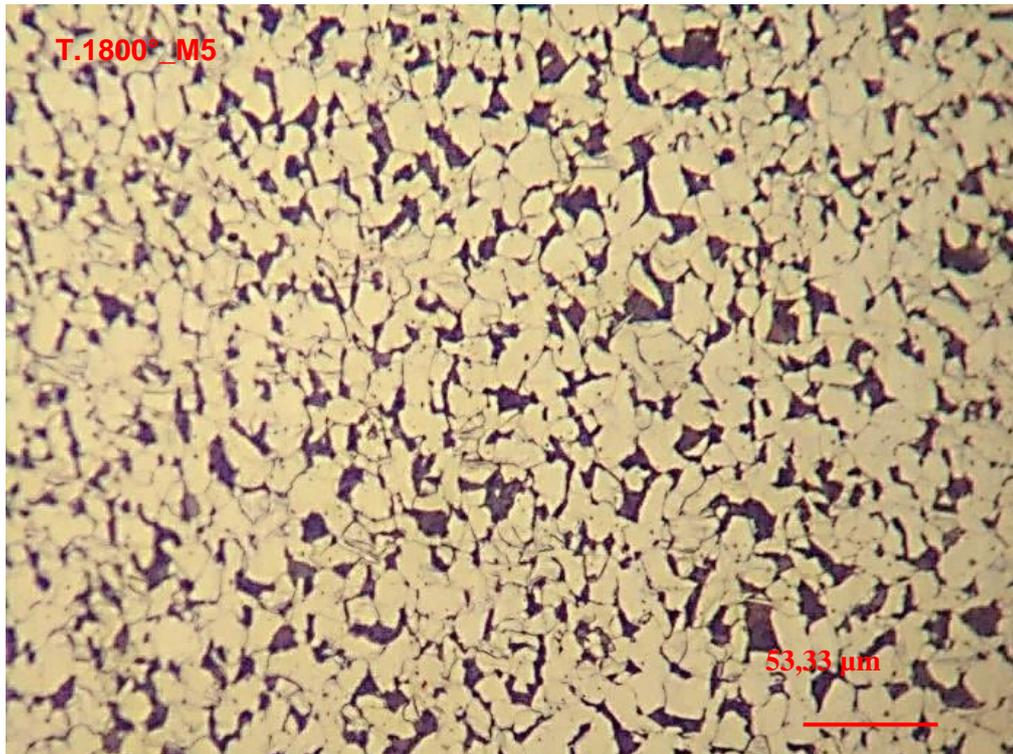
Fuente: Autores

Figura 67. Micrografía a partir del centro de 4400-4800 μm , atacada con nital 4%,
tomada a 200x



Fuente: Autores

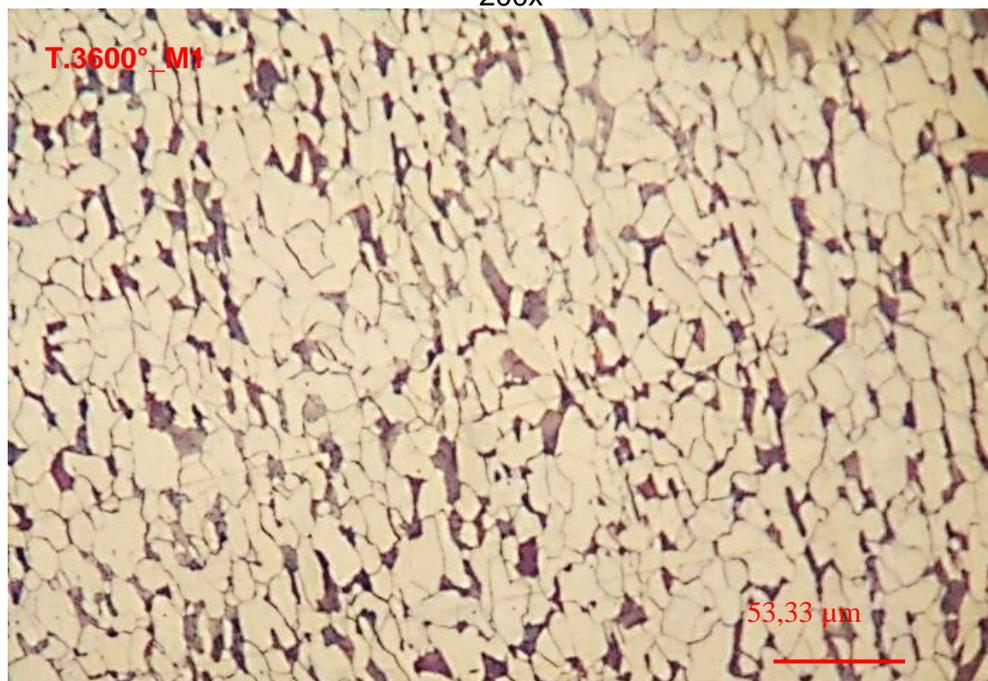
Figura 68. Micrografía a partir del centro de 5850-6250 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



Fuente: Autores

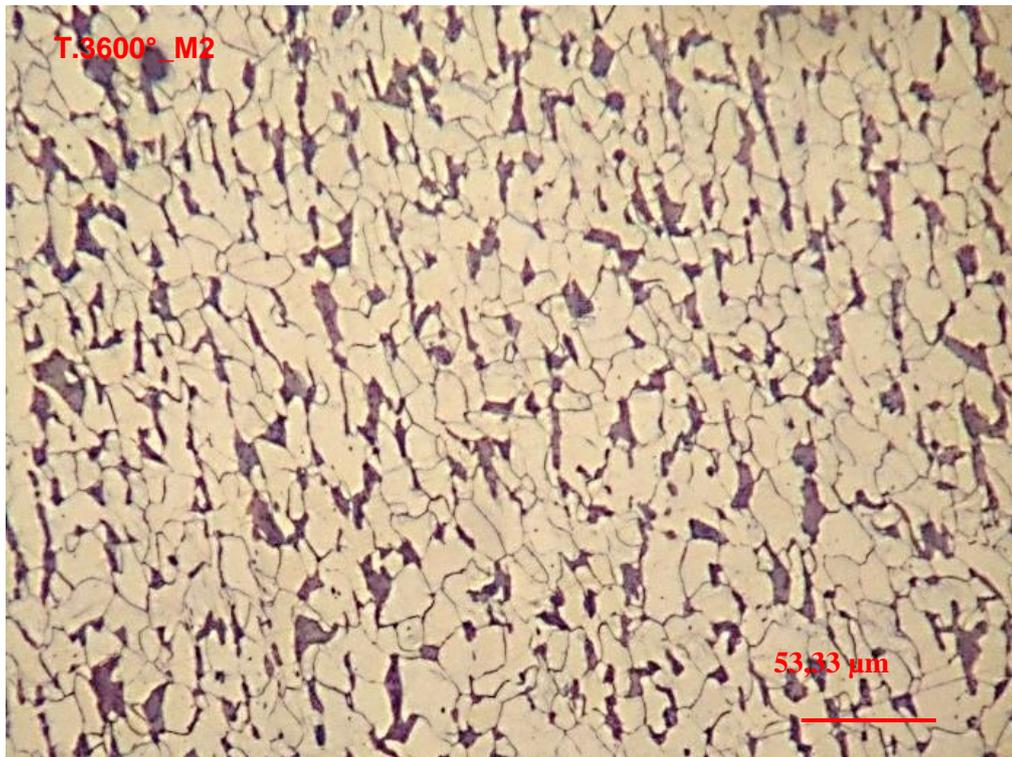
Caso 6 (T.3600°_M)

Figura 69. Micrografía a partir del centro de 0-400 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



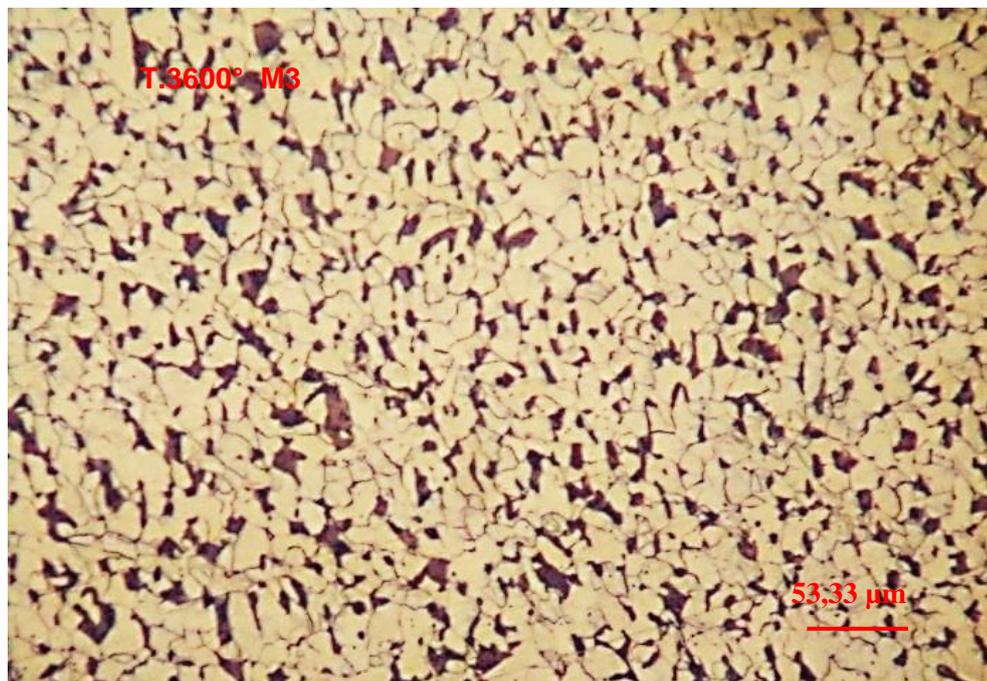
Fuente: Autores

Figura 70. Micrografía a partir del centro de 1200-1600 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



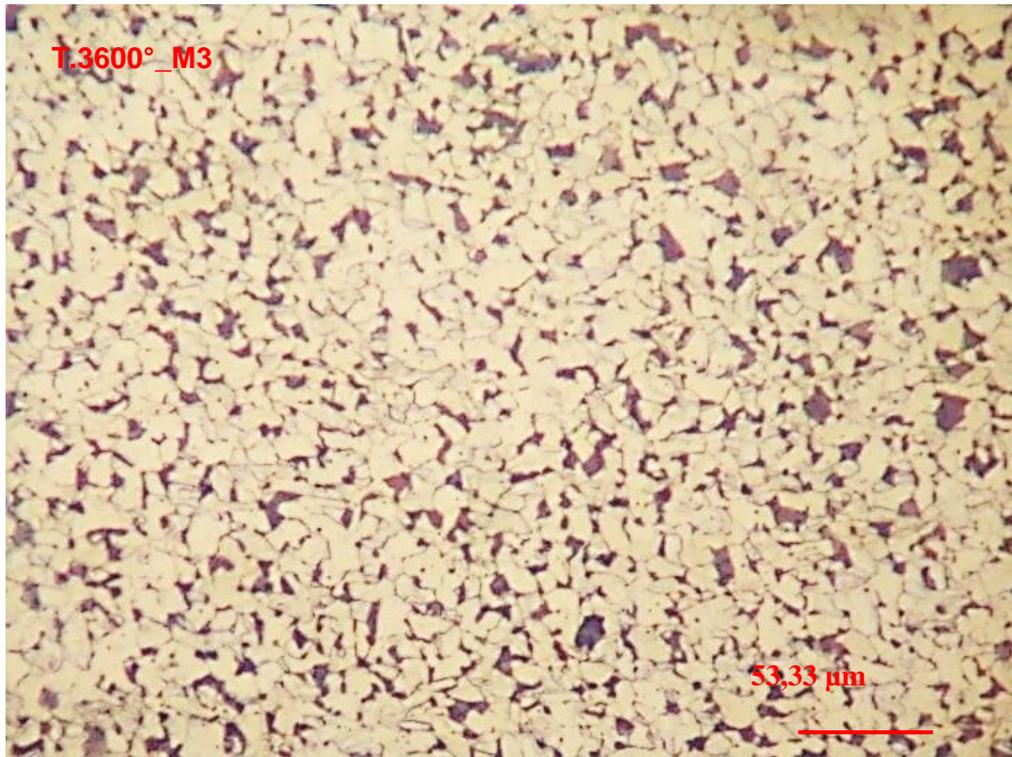
Fuente: Autores

Figura 71. Micrografía a partir del centro de 2800-3200 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



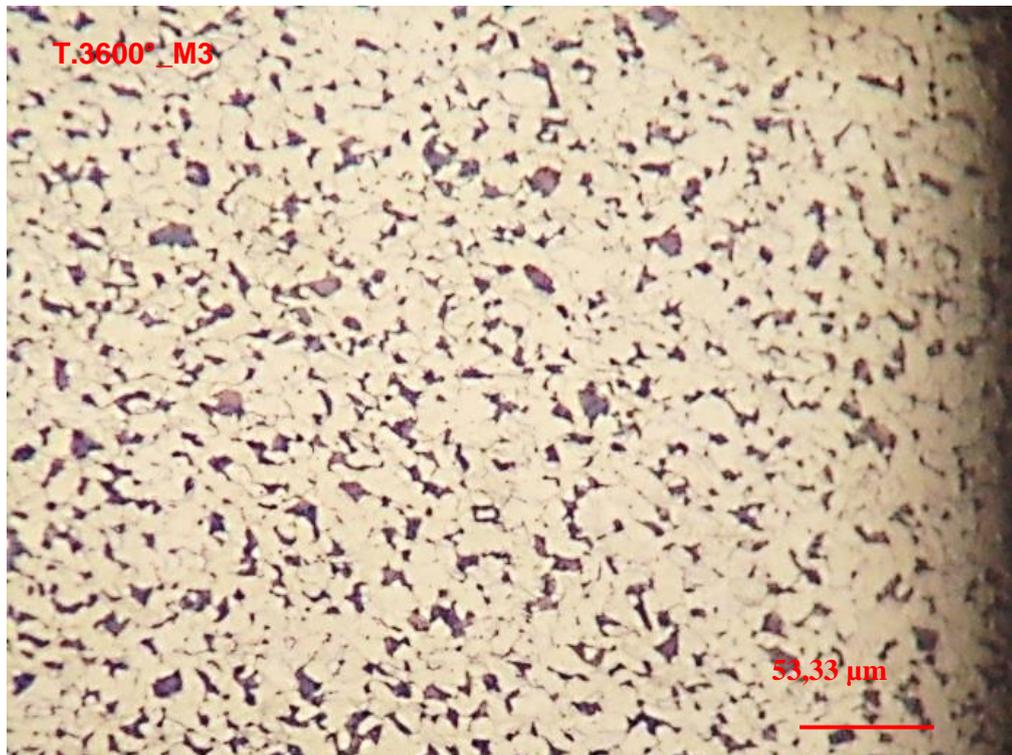
Fuente: Autores

Figura 72. Micrografía a partir del centro de 4400-4800 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x



Fuente: Autores

Figura 73. Micrografía a partir del centro de 5850-6250 μm , atacada con nital 4%, tomada a 200x

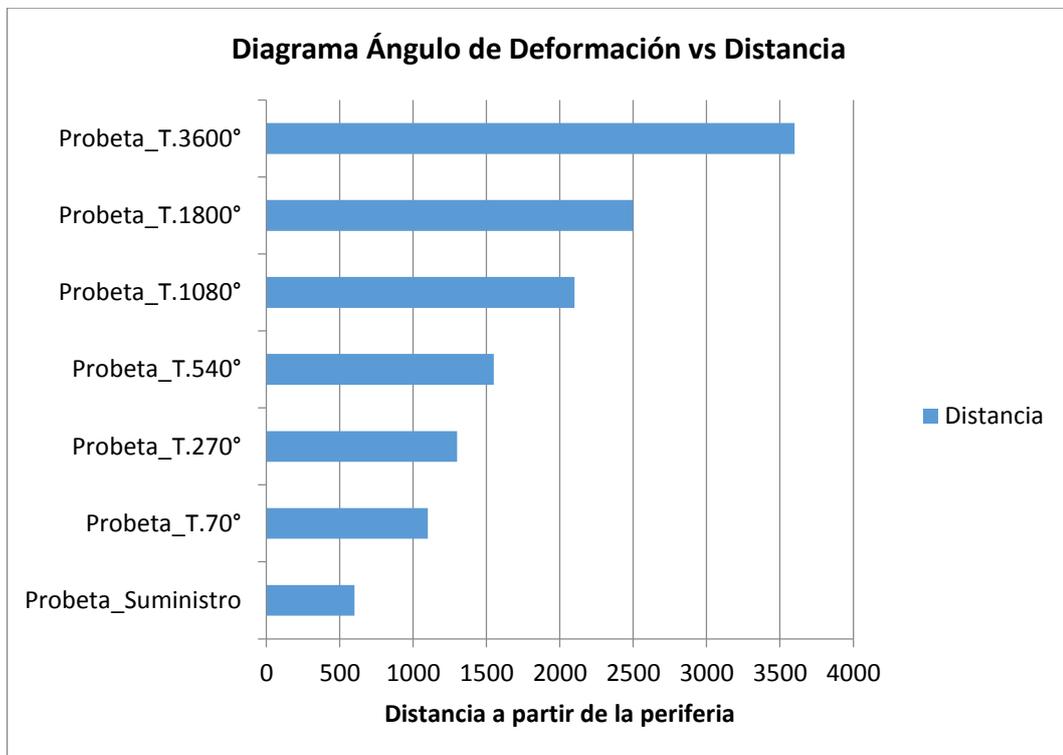


Fuente: Autores

Por simple apreciación se nota los cambios de la forma y orientación de grano. Del centro al extremo la probeta de suministro, los granos presentan una forma alargada, en dirección longitudinal, pero al comparar con las probetas influenciadas por torsión existen diferencias especialmente con las fotos tomadas en la periferia y su cercanía, donde el grano es equiaxial. También se podría decir que el tamaño de grano disminuye.

Para cuantificar como incide el ángulo de deformación por torsión plástica en la variación de orientación y forma del grano, se procedió a medir la distancia a partir de la periferia hasta donde el grano es equiaxial relativamente y realizar un diagrama comparativo con los casos en estudio.

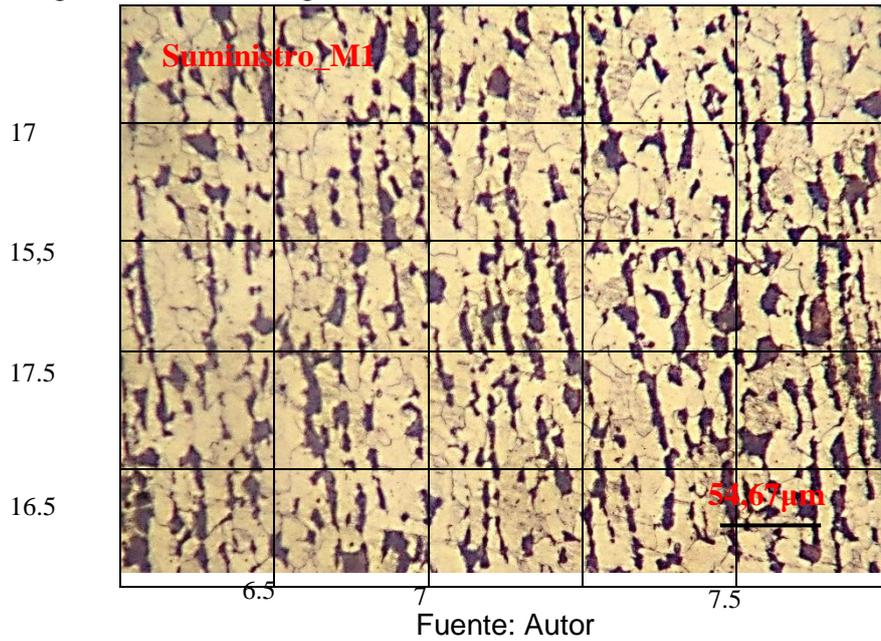
Figura 74. Distancia afectada por la torsión a partir de la periferia al centro



Fuente: Autores

3.5.1 Medición del tamaño de grano de las muestras. La medición de tamaño de grano se realiza según la Norma ASTM E112. Por el método de intersección utilizado la metodología de Heyn, que consta de cuatro líneas rectas tanto horizontales como verticales. Las fotos tomadas a 200x, de suministro y de cada caso experimental son medidas el tamaño de grano y cuyos valores se encuentran en la Tabla 16. Para la obtención de estos resultados se describe el proceso a continuación.

Figura 75. Fotomicrografía a 200x del centro de la Probeta de Suministro



Tamaño de grano vertical

$$T_{GV} = 10 - 6.6439 \log \left(\frac{E_V}{10} \right)$$

$$E_V = \frac{L}{\# \text{granos promedio}}$$

$$E_V = \frac{307.5}{7.13} = 43.16$$

$$T_{GV} = 10 - 6.6439 \log \left(\frac{43.16}{10} \right) = 5.78 \quad (5)$$

Tamaño de grano horizontal

$$T_{GH} = 10 - 6.6439 \log \left(\frac{E_H}{10} \right)$$

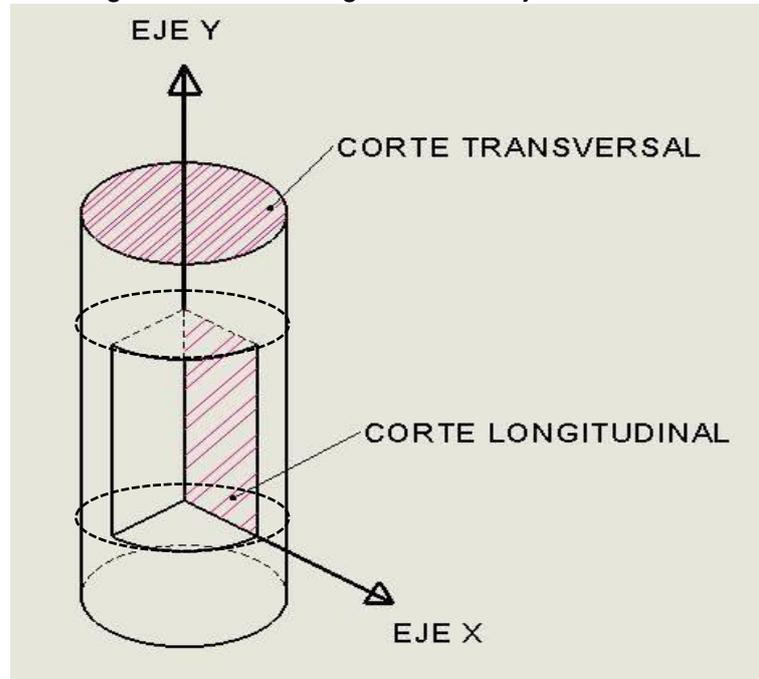
$$E_H = \frac{L}{\# \text{granos promedio}}$$

$$E_H = \frac{410}{16.63} = 24.66$$

$$T_{GH} = 10 - 6.6439 \log \left(\frac{24.66}{10} \right) = 7.90$$

En la Figura 76 se observa el corte longitudinal del eje de transmisión, en base al cual se realiza el análisis del tamaño de grano, con respecto al eje y, se considerara tamaño de grano vertical, en cambio con el eje se analizara como “tamaño de grano horizontal”

Figura 76. Corte longitudinal del eje de transmisión



Fuente: Autores

3.5.1.1 Medición del tamaño de grano vertical. A continuación se muestran en las tablas el tamaño de grano vertical según la ASTM y la longitud en micrómetros, desde el centro (0 μm), hasta la periferia (6250 μm), con una variación de distancia de 1560 μm .

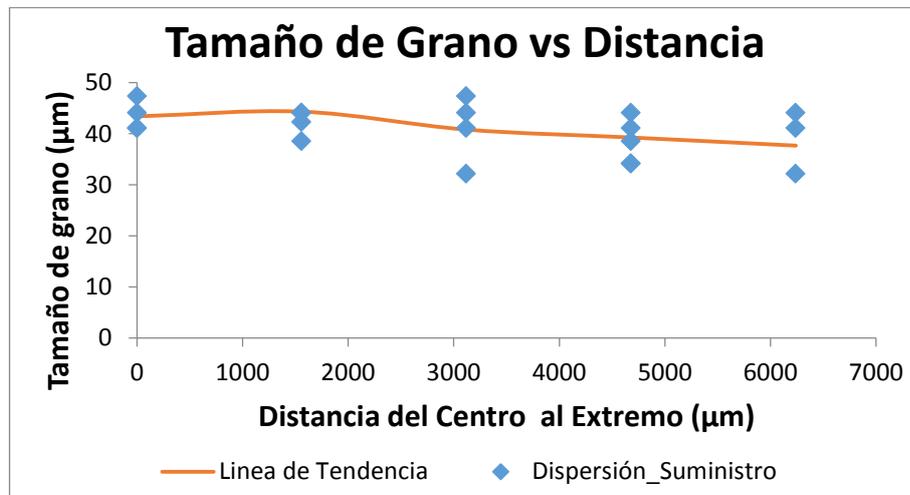
Suministro

Tabla 9. Tamaño de grano vertical, probeta de suministro

Barrido (μm)	Tamaño de grano ASTM	Tamaño de grano (μm)
Centro 0	5,775	43,409
1560	5,714	44,335
3130	5,946	40,817
4690	6,0570	39,270
Extremo 6250	6,180	37,683

Fuente: Autores

Figura 77. Distribución del tamaño de grano vertical del centro al extremo de la probeta de suministro



Fuente: Autores

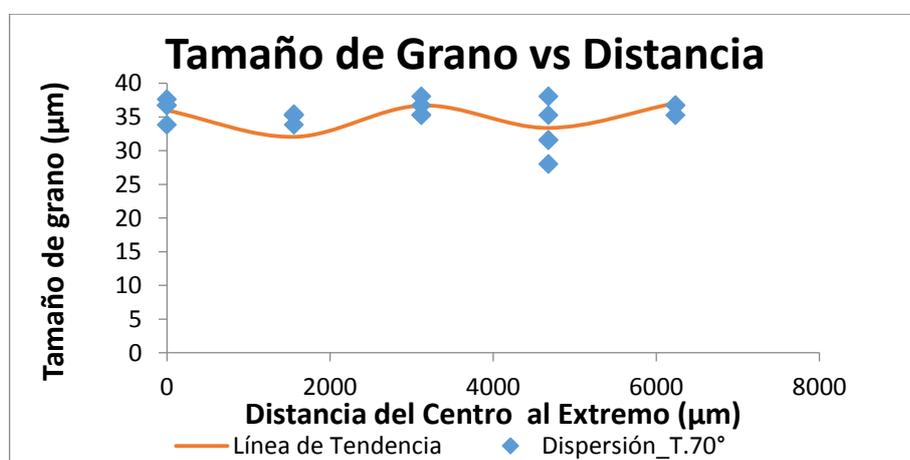
Caso 1. (Probeta_T.70°)

Tabla 10. Tamaño de grano vertical, probeta torsionada 70°

Barrido (µm)	Tamaño de Grano ASTM	Tamaño de Grano (µm)
Centro 0	6,54	35,98
1560	6,56	32,05
3130	6,83	36,70
4690	7,17	33,37
Extremo 6250	6,87	37,08

Fuente: Autores

Figura 78. Distribución del tamaño de grano vertical del centro al extremo de la probeta torsionada 70°



Fuente: Autores

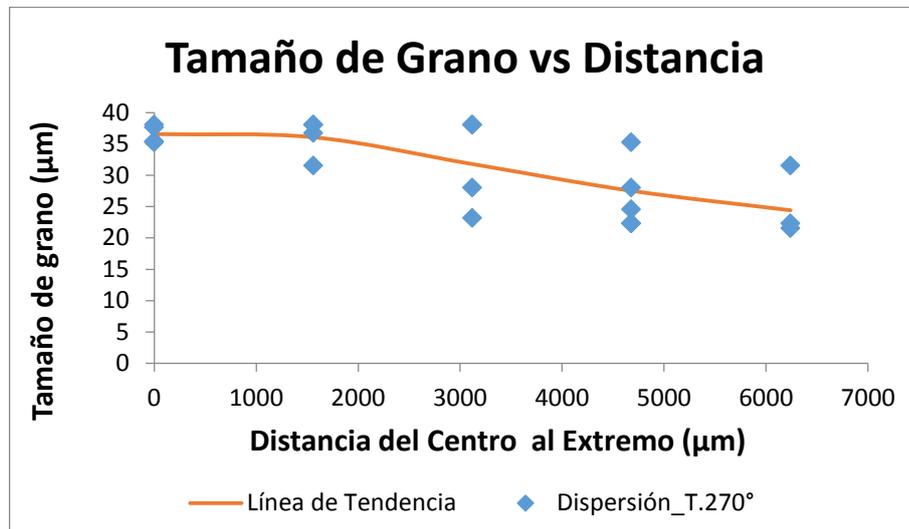
Caso 2. (Probeta_T.270°)

Tabla 11. Tamaño de grano vertical, probeta torsionada 270°

Barrido (μm)	Tamaño de grano ASTM	Tamaño de grano (μm)
Centro 0	6,61	36,57
1560	6,94	36,07
3130	7,17	31,79
4690	7,17	27,52
Extremo 6250	7,55	24,42

Fuente: Autor

Figura 79. Distribución del tamaño de grano vertical del centro al extremo de la probeta torsionada 270°



Fuente: Autores

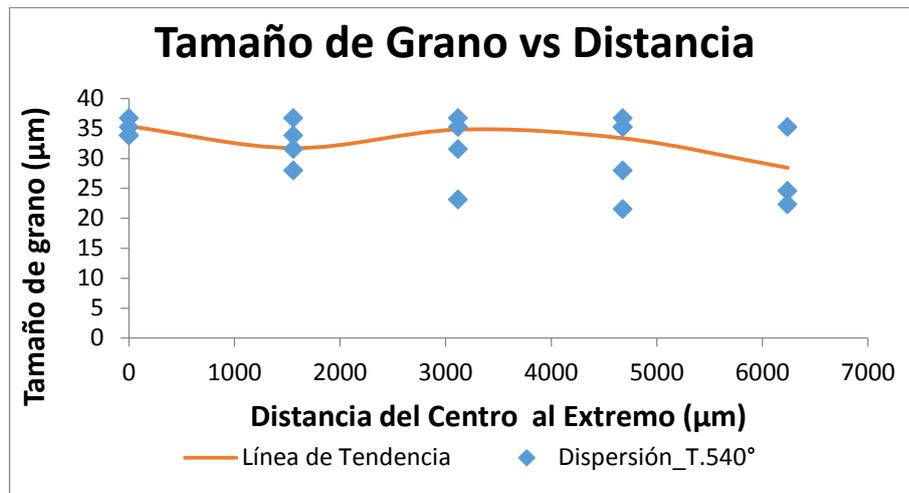
Caso 3. (Probeta_T.540°)

Tabla 12. Tamaño de grano vertical, probeta torsionada 540°

Barrido (μm)	Tamaño de grano ASTM	Tamaño de grano (μm)
Centro 0	6,69	35,39
1560	6,94	31,74
3130	7,12	34,82
4690	7,17	33,37
Extremo 6250	7,34	28,44

Fuente: Autores

Figura 80. Distribución del tamaño de grano vertical del centro al extremo de la probeta torsionada 540°



Fuente: Autores

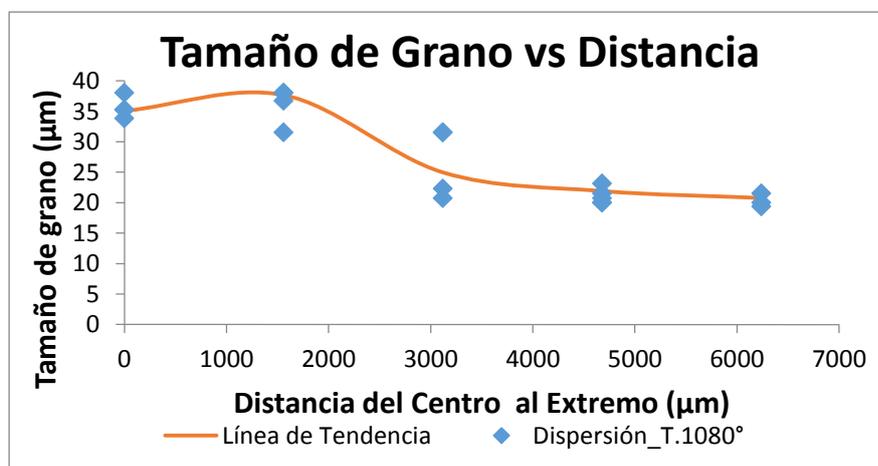
Caso 4. (Probeta_T.1080°)

Tabla 13. Tamaño de grano vertical, probeta torsionada 1080°

Barrido (μm)	Tamaño de grano ASTM	Tamaño de grano (μm)
Centro 0	6,76	35,04
1560	6,93	37,64
3130	7,46	24,96
4690	7,75	21,90
Extremo 6250	7,9	20,76

Fuente: Autores

Figura 81. Distribución del tamaño de grano vertical del centro al extremo de la probeta torsionada 1080°



Fuente: Autores

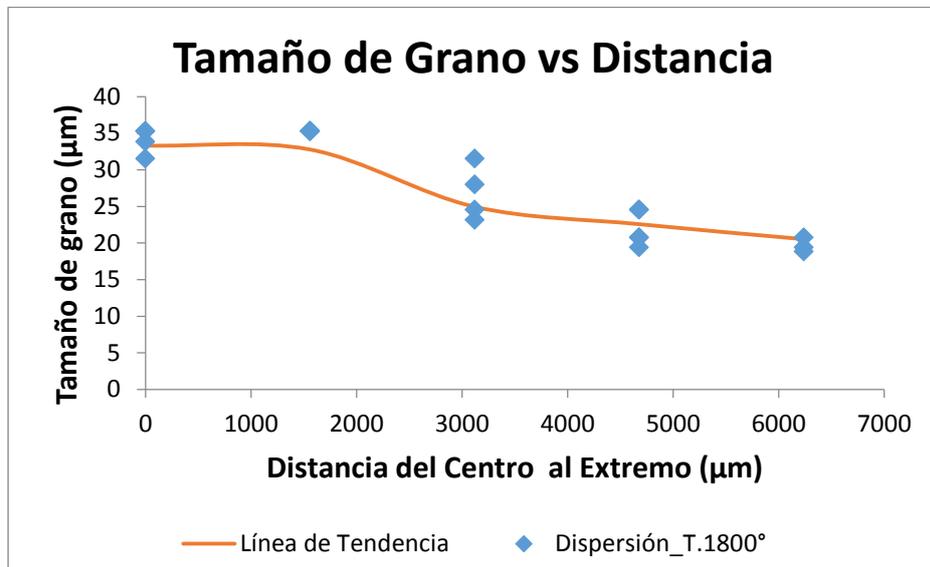
Caso 5. (Probeta_T.1800°)

Tabla 14. Tamaño de grano vertical, probeta torsionada 1800°

Barrido (μm)	Tamaño de grano ASTM	Tamaño de grano (μm)
Centro 0	6,79	33,33
1560	7.19	32,79
3130	7.46	24,96
4690	7.66	22,58
Extremo 6250	7.93	20,53

Fuente: Autores

Figura 82. Distribución del tamaño de grano vertical del centro al extremo de la probeta torsionada 1800°



Fuente: Autores

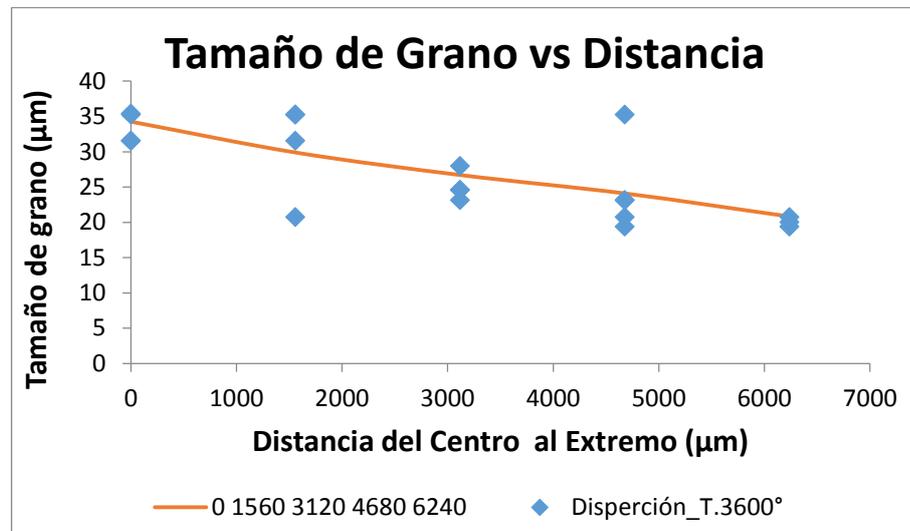
Caso 6. (Probeta_T.3600°)

Tabla 15. Tamaño de grano vertical, probeta torsionada 3600°

Barrido (μm)	Tamaño de grano ASTM	Tamaño de grano (μm)
Centro 0	6,57	34,26
1560	7,29	29,89
3130	7,4	26,7
4690	7,49	24,09
Extremo 6250	8,7	20,82

Fuente: Autores

Figura 83. Distribución del tamaño de grano vertical del centro al extremo de la probeta torsionada 3600°



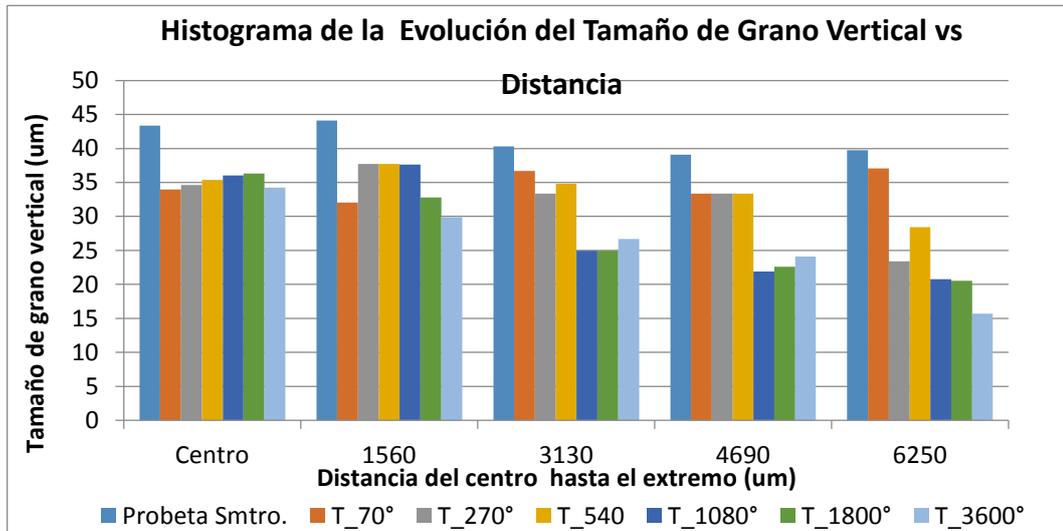
En las Figuras de tamaño de grano vertical, en cada caso de deformación plástica, se observan diferencias al comparar con el material de suministro. Se puede ver que el tamaño de grano a una deformación angular de 70° la variación no es representativa, mientras a medida que aumenta el grado de torsión varía la orientación de los granos que se encuentran en sentido longitudinal a una orientación al azar, además la forma de los granos cambia de una morfología alargada a una redonda características típicas de un grano equiaxial.

Para una mejor apreciación de la variación del tamaño de grano, se realizó una gráfica comparativa entre la de suministro y cada caso estudiado.

Analizando el diagrama de barras de la Figura 84, el comportamiento del tamaño de grano en el centro de la probeta no presenta variación significativa, su longitud es aproximadamente 35 µm, a medida que se dirige hacia el extremo los valores comienzan a variar de manera considerable, de forma descendente hasta un tamaño de grano de longitud mínima igual a 15,72 µm, para el Caso 6 (Probeta_T.3600°).

El diagrama de la Figura 85, describe de mejor manera el comportamiento del tamaño de grano vertical, con respecto a la distancia. Claramente se nota la evolución del grano, al alejarse del centro el tamaño de grano disminuye y en mayor proporción en el Caso 6 (Probeta_T.3600°).

Figura 84. Comparación del tamaño de grano vertical, entre la probeta de suministro y los casos de estudiado

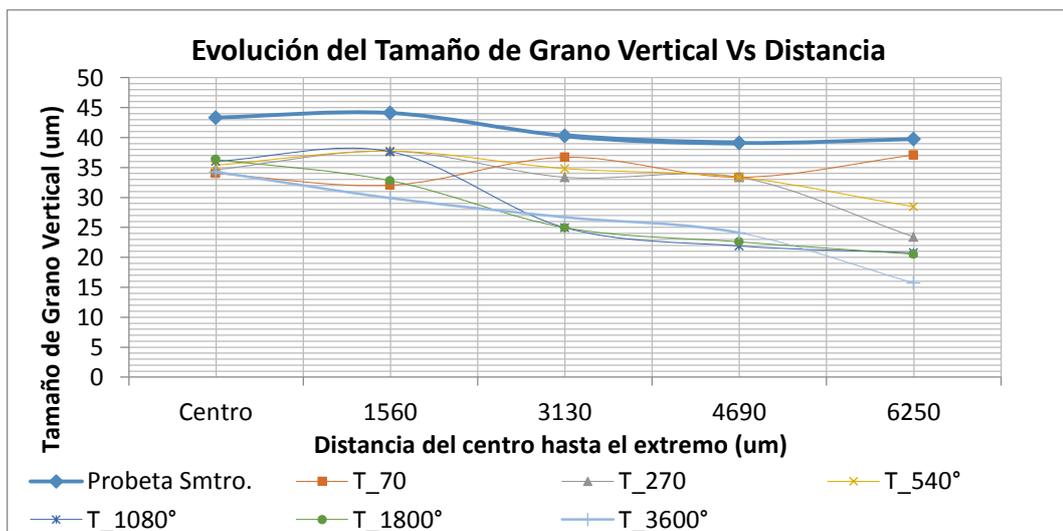


Fuente. Autores

También se observa que la probeta de suministro tiene esta misma tendencia, sin estar afectada por la torsión, esto se debe al proceso de conformado en frío del eje donde la superficie se encuentra expuesta a mayor deformación.

El material muestra cambios de forma, orientación y reducción del tamaño de grano, esta última propiedad conlleva a una mayor dureza de la periferia con respecto al núcleo.

Figura 85. Evolución del tamaño de grano vertical en función de la distancia de la probeta de suministro y los casos estudiados



Fuente: Autores

3.5.1.2 Medición del tamaño de grano horizontal. De igual manera que el ítem anterior se muestran en las tablas el tamaño de grano horizontal según la ASTM y la longitud en micrómetros, desde el centro (0 μm), hasta la periferia (6250 μm), con una variación de distancia de 1560 μm .

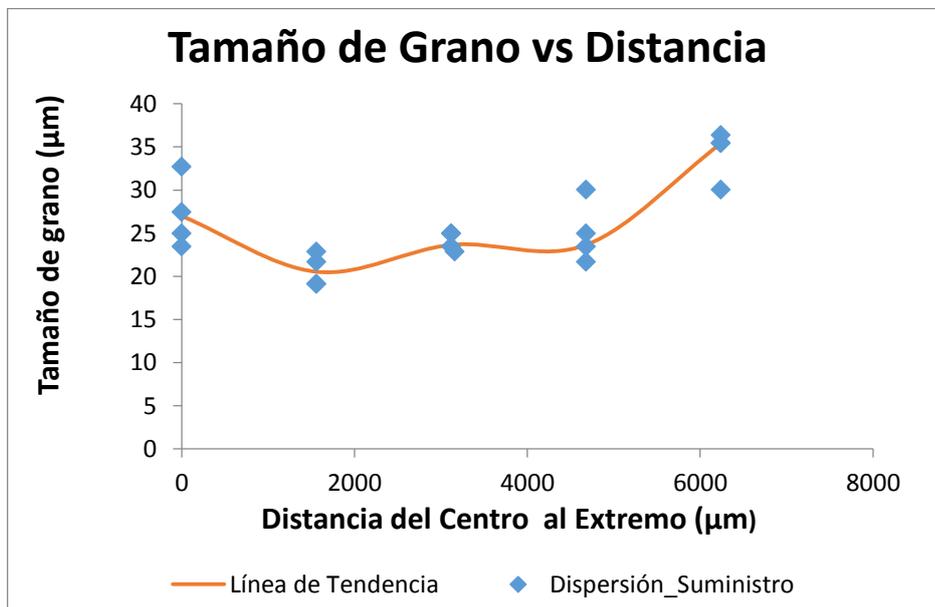
Suministro

Tabla 16. Tamaño de grano horizontal, probeta de suministro

Barrido (μm)	Tamaño de grano ASTM	Tamaño de grano (μm)
Centro 0	7,39	26,99
1560	7,93	20,53
3130	7,52	23,65
4690	7,52	23,65
Extremo 6250	8,38	35,4

Fuente: Autores

Figura 86. Distribución del tamaño de grano horizontal del centro al extremo de la probeta de suministro



Fuente: Autores

Caso 1. (Probeta_T.70°)

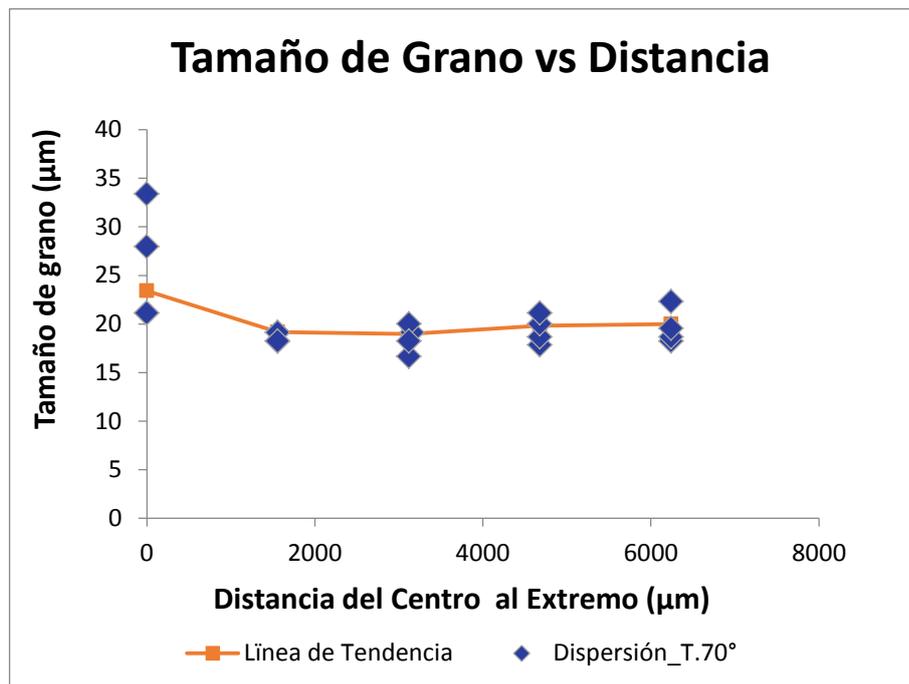
Tabla 17. Tamaño de grano horizontal, probeta torsionada 70°

Barrido (μm)	Tamaño de grano ASTM	Tamaño de grano (μm)
---------------------------	----------------------	-----------------------------------

Centro 0	7,55	23,42
1560	8,13	19,17
3130	8,16	18,98
4690	8,03	19,81
Extremo 6250	8	20

Fuente: Autores

Figura 87. Distribución del tamaño de grano horizontal del centro al extremo de la probeta torsionada 70°



Fuente: Autores

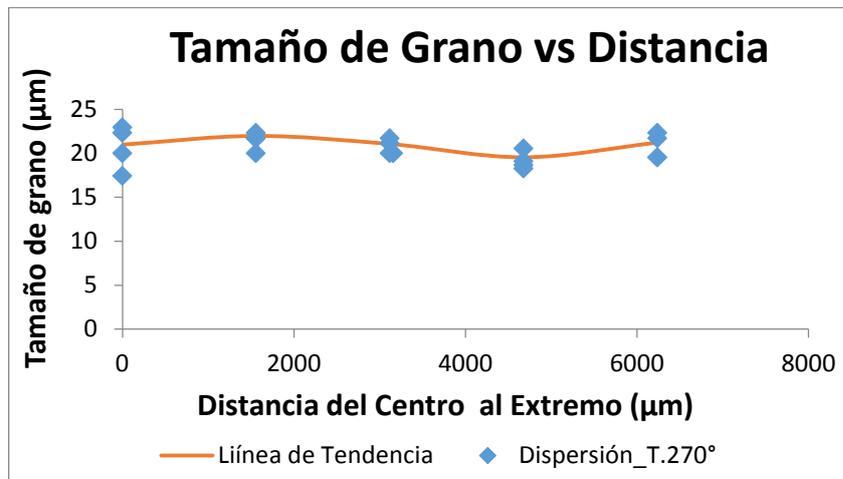
Caso 2. (Probeta_T.270°)

Tabla 18. Tamaño de grano horizontal, probeta torsionada 270°

Barrido (µm)	Tamaño de grano ASTM	Tamaño de grano (µm)
Centro 0	7,87	20,99
1560	7,74	21,98
3130	7,86	21,06
4690	8,07	19,55
Extremo 6250	7,84	21,22

Fuente: Autores

Figura 88. Distribución del tamaño de grano horizontal del centro al extremo de la probeta torsionada 270°



Fuente: Autores

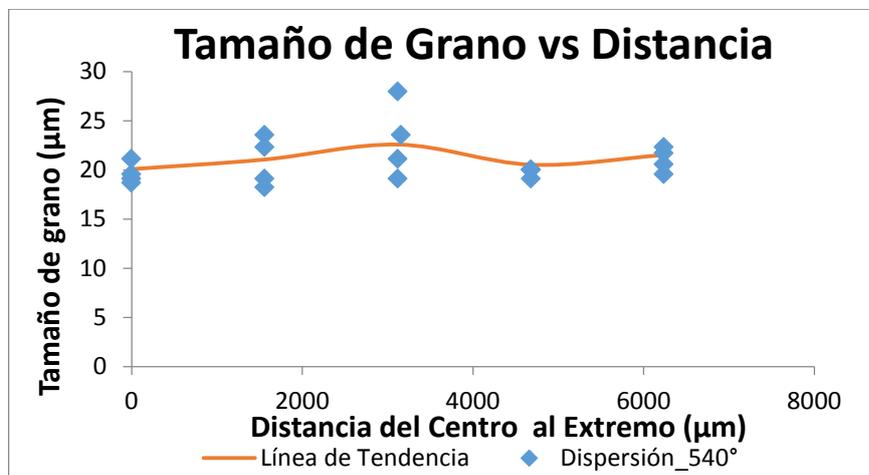
Caso 3. (Probeta_T.540°)

Tabla 19. Tamaño de grano horizontal, probeta torsionada 540°

Barrido (µm)	Tamaño de grano ASTM	Tamaño de grano (µm)
Centro 0	7,99	22,08
1560	7,86	21,06
3130	7,66	22,58
4690	7,93	20,53
Extremo 6250	7,8	21,52

Fuente: Autores

Figura 89. Distribución del tamaño de grano horizontal del centro al extremo de la probeta torsionada 540°



Fuente: Autores

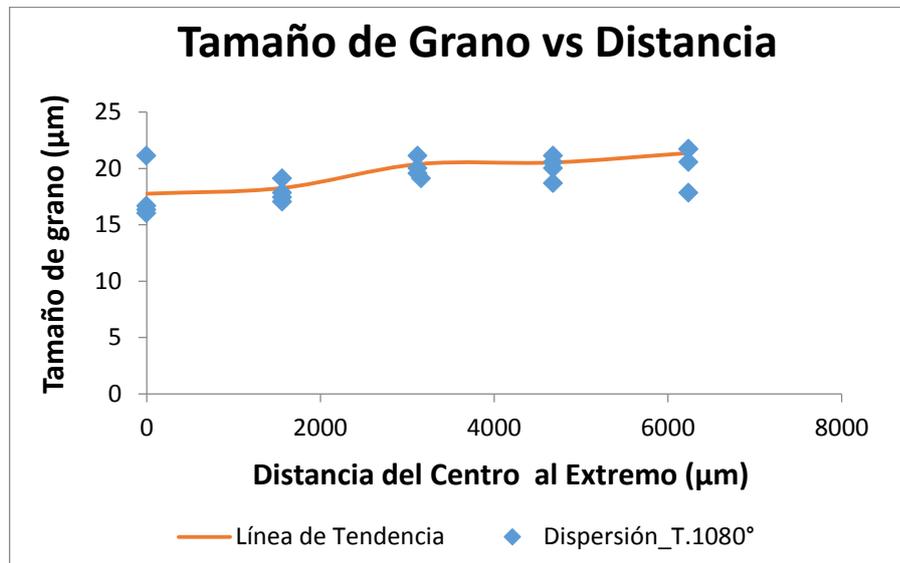
Caso 4. (Probeta_T.1080°)

Tabla 20. Tamaño de grano horizontal, probeta torsionada 1080°

Barrido (μm)	Tamaño de grano ASTM	Tamaño de grano (μm)
Centro 0	8,35	17,76
1560	8,27	18,27
3130	7,95	20,38
4690	7,93	20,53
Extremo 6250	7,82	21,37

Fuente: Autores

Figura 90. Distribución del tamaño de grano horizontal del centro al extremo de la probeta torsionada 1080°



Fuente: Autores

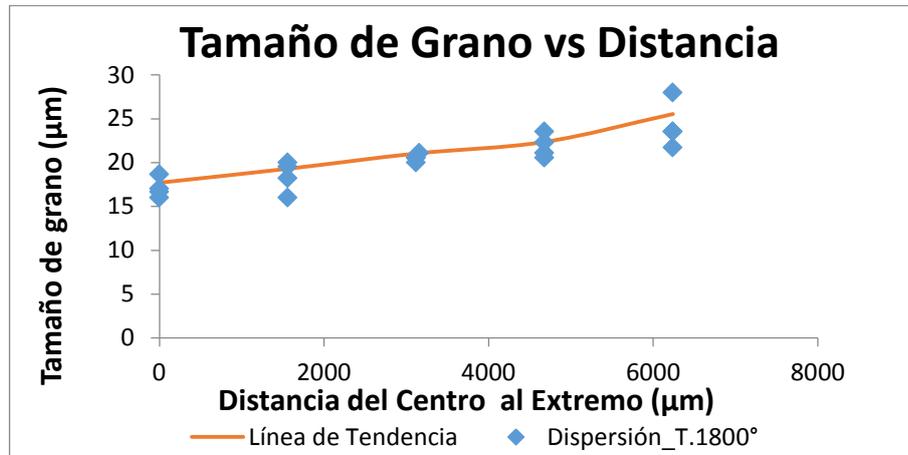
Caso 5. (Probeta_T.1800°)

Tabla 21. Tamaño de grano horizontal, probeta torsionada 1800°

Barrido (μm)	Tamaño de grano ASTM	Tamaño de grano (μm)
Centro 0	8,27	18,27
1560	8,11	19,30
3130	7,86	21,04
4690	7,69	22,36
Extremo 6250	7,44	25,54

Fuente: Autores

Figura 91. Distribución del tamaño de grano horizontal del centro al extremo de la probeta torsionada 1800°



Fuente: Autores

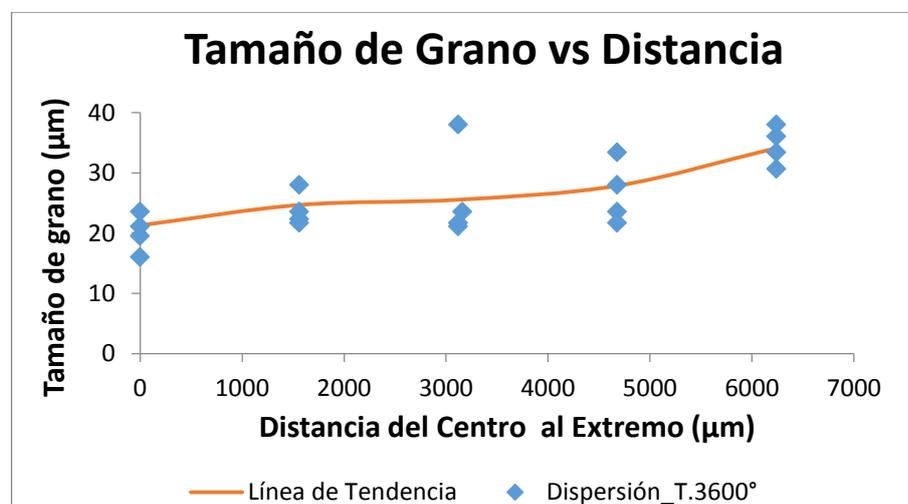
Caso 6. (Probeta_T.3600°)

Tabla 22. Tamaño de grano horizontal, probeta torsionada 3600°

Barrido (µm)	Tamaño de grano ASTM	Tamaño de grano (µm)
Centro 0	7,83	21,29
1560	7,47	24,67
3130	7,44	25,54
4690	7,36	27,86
Extremo 6250	6,98	38,11

Fuente: Autores

Figura 92. Distribución del tamaño de grano horizontal del centro al extremo de la probeta torsionada 3600°



Fuente: Autores

El diagrama de barras de la Figura 93, el comportamiento del tamaño de grano horizontal desde el centro de la probeta hasta el extremo con deformación de 70°, no presenta variación significativa con respecto a la probeta de suministro, su longitud promedio es aproximadamente 21 μm . Sin embargo el tamaño de grano varía especialmente en el Caso 5 (Probeta_1800°) y Caso 6 (Probeta_3600°), de forma ascendente hasta una longitud máxima de grano igual a 38 μm .

Figura 93. Comparación del tamaño de grano horizontal, entre la probeta de suministro y los casos de estudiado

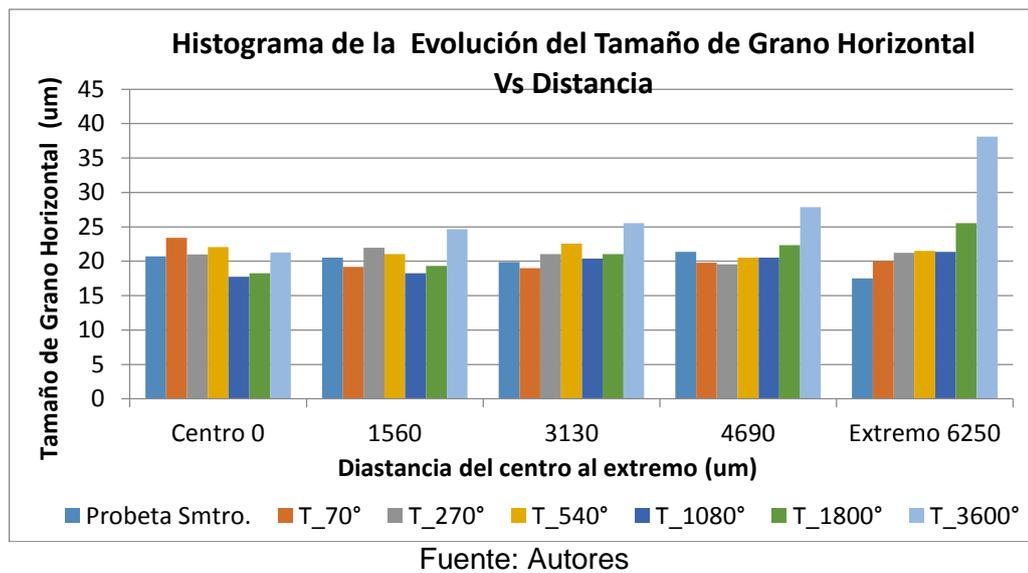
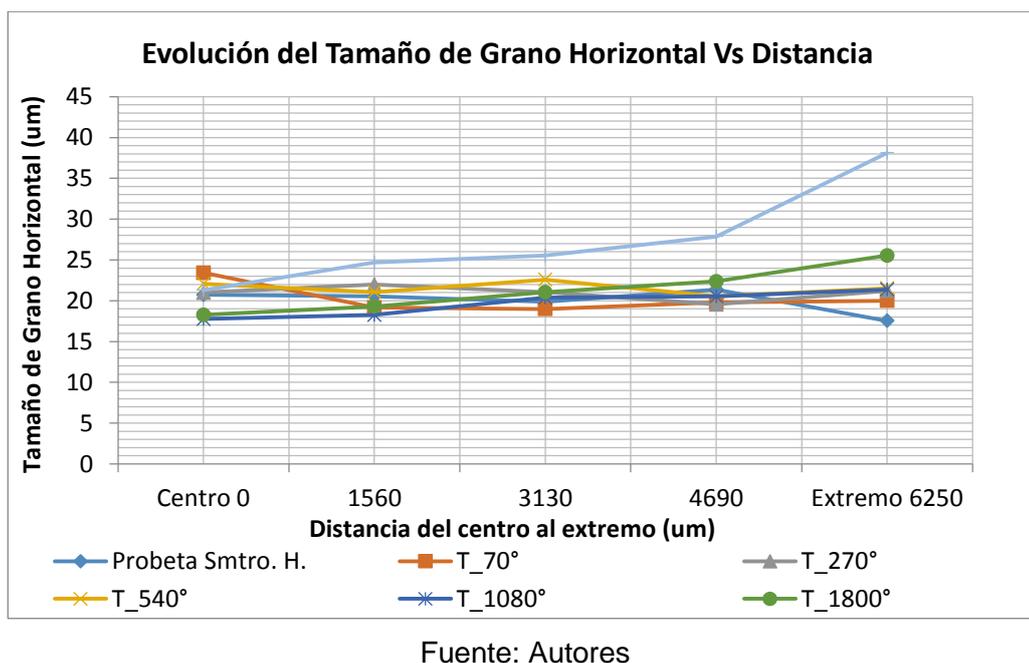


Figura 94. Evolución del tamaño de grano horizontal en función de la distancia de la probeta de suministro y los casos estudiados



El diagrama de la Figura 94, describe de mejor manera el comportamiento del tamaño de grano horizontal, con respecto a la distancia. Claramente se observa la evolución del tamaño de grano mientras se aleja del centro, cambiando sus características como: forma y tamaño, en mayor proporción en el Caso 5 (Probeta_1800°) y Caso 6 (Probeta_3600°), donde la influencia de la torsión es mayor.

3.6 Micro dureza

El ensayo se rige a la norma ASTM E 384 – 84, el barrido de microdureza Vickers se realizó en la sección transversal del eje de transmisión a partir del centro de la probeta hasta el extremo con la finalidad de conocer la variación de la dureza con respecto a la distancia, por cuanto se realizó medidas a cada 150 micrómetros, con una carga de 200g, a las probeta de suministro y casos en estudio.

El equipo utilizado para el ensayo, tiene las siguientes características:

Descripción:

Medidor de microdureza Vickers

Marca: BUEHLER

Modelo: 1600-2000

Serie: B-M83195

Al realizar el ensayo, se obtuvieron las diagonales de las huellas, con lo cual se calculó microdureza Vickers que se muestra en la tabla 23, sin embargo únicamente para variaciones de distancia de 300µm.

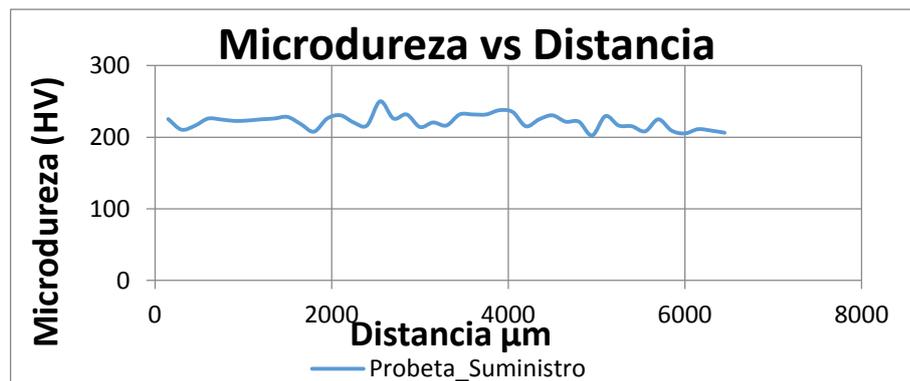
Tabla 23. Valores de distancia desde la superficie al centro del eje, y la dureza correspondiente a cada ángulo de deformación

X (µm)	Dureza(HV)						
	Probeta Suministro T_0°	Probeta 01 T_70°	Probeta 02 T_270°	Probeta 03 T_540°	Probeta 04 T_1080°	Probeta 05 T_1800°	Probeta 06 T_3600°
0	0	0	0	0	0	0	0
300	210,580	226,108	240,739	240,739	240,739	226,108	263,732
600	226,000	226,108	253,491	226,108	256,838	212,771	263,732
900	222,800	240,739	240,739	250,210	243,835	226,108	250,210
1200	225,000	237,701	260,251	234,721	256,838	237,701	263,732
1500	228,360	246,992	278,381	240,739	250,210	240,739	263,732
1800	207,770	250,210	253,491	250,210	243,835	278,381	270,908

2100	230,640	240,739	278,381	278,381	253,491	243,835	260,251
2400	216,380	246,992	253,491	274,607	256,838	274,607	256,838
2700	226,110	237,701	267,284	263,732	260,251	270,908	263,732
3000	214,310	246,992	256,838	256,838	267,284	270,908	260,251
3300	216,380	231,796	250,210	268,607	246,992	290,184	274,607
3600	231,800	243,835	250,210	246,992	267,284	286,168	264,607
3900	237,700	226,108	253,491	263,732	272,234	274,607	266,838
4200	215,340	260,251	237,701	265,652	250,210	278,381	270,251
4500	230,640	220,627	246,992	263,732	267,284	270,908	273,491
4800	221,710	228,925	226,108	250,210	278,381	267,284	284,607
5100	229,500	240,739	250,210	260,184	275,908	286,168	280,908
5400	215,340	237,701	246,992	263,732	270,251	276,838	294,286
5700	225,000	226,108	250,210	260,284	274,607	290,184	311,593
6000	205,330	215,342	231,796	247,961	263,732	294,286	335,461
6300	209,250	217,961	231,796	252,284	267,284	294,286	325,595

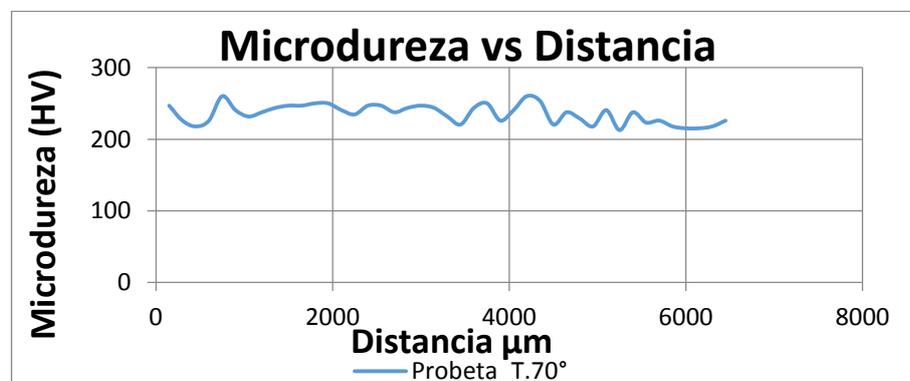
Fuente: Autores

Figura 95. Diagrama de evolución de microdureza vs distancia desde el extremo al centro de la probeta de suministro



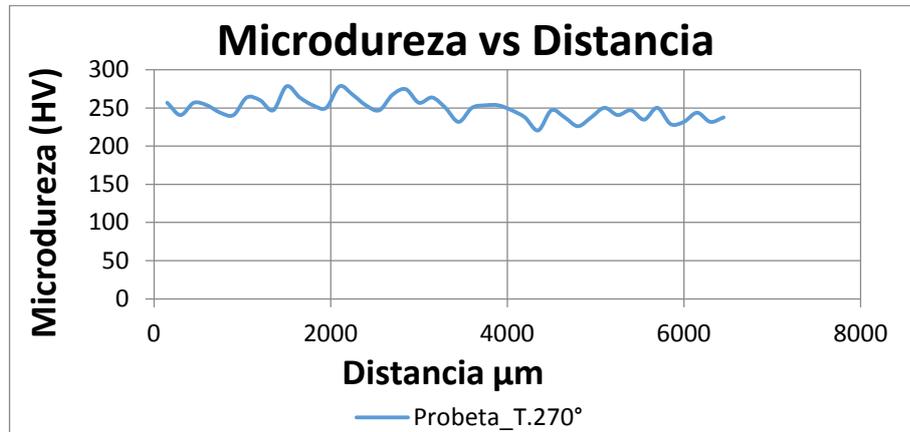
Fuente: Autores

Figura 96. Diagrama de evolución de microdureza vs distancia desde el extremo al centro de la Probeta_T.70°



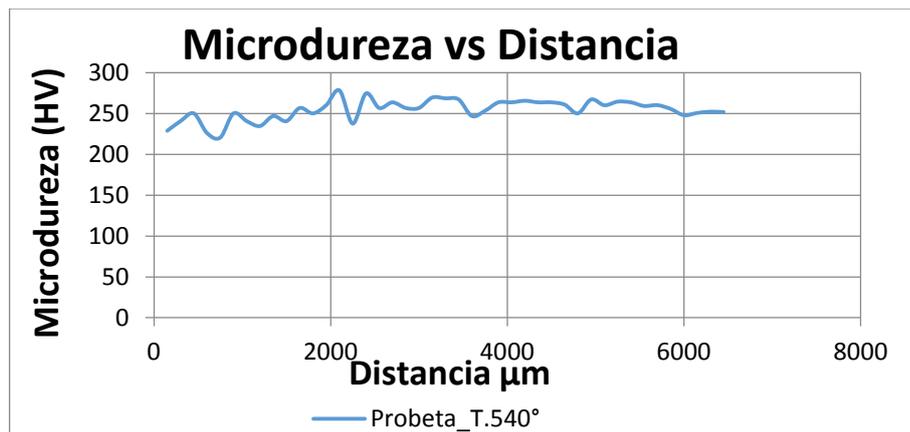
Fuente: Autores

Figura 97. Diagrama de evolución de microdureza vs distancia desde el extremo al centro de la Probeta_T.270°



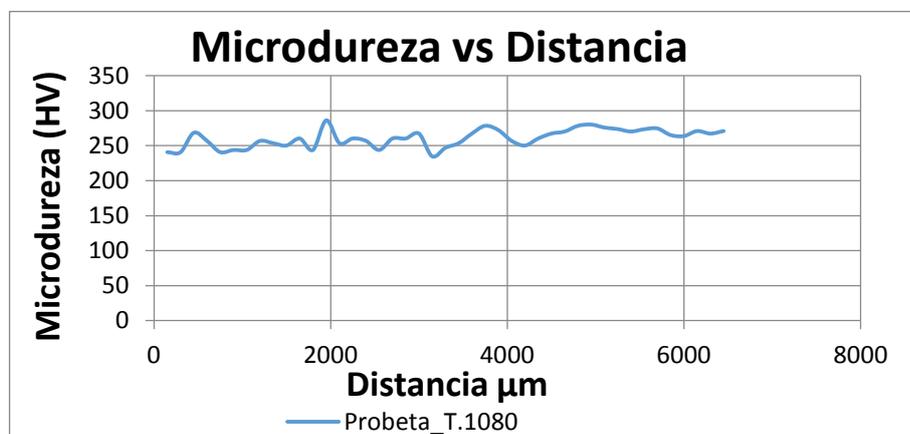
Fuente: Autores

Figura 98. Diagrama de evolución de microdureza vs distancia desde el extremo al centro de la Probeta_T.540°



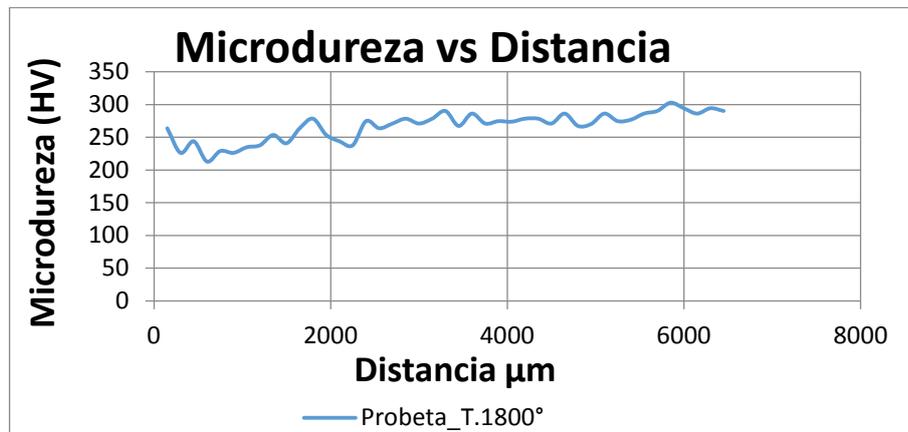
Fuente: Autores

Figura 99. Diagrama de evolución de microdureza vs distancia desde el extremo al centro de la Probeta_T.1080°



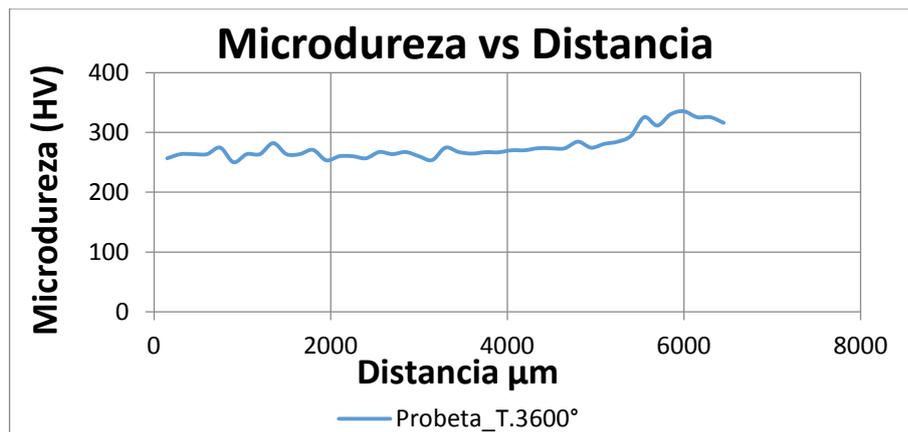
Fuente: Autores

Figura 100. Diagrama de evolución de microdureza vs distancia desde el extremo al centro de la Probeta_T.1800°



Fuente: Autores

Figura 101. Diagrama de evolución de microdureza vs distancia desde el extremo al centro de la Probeta_T.3600°

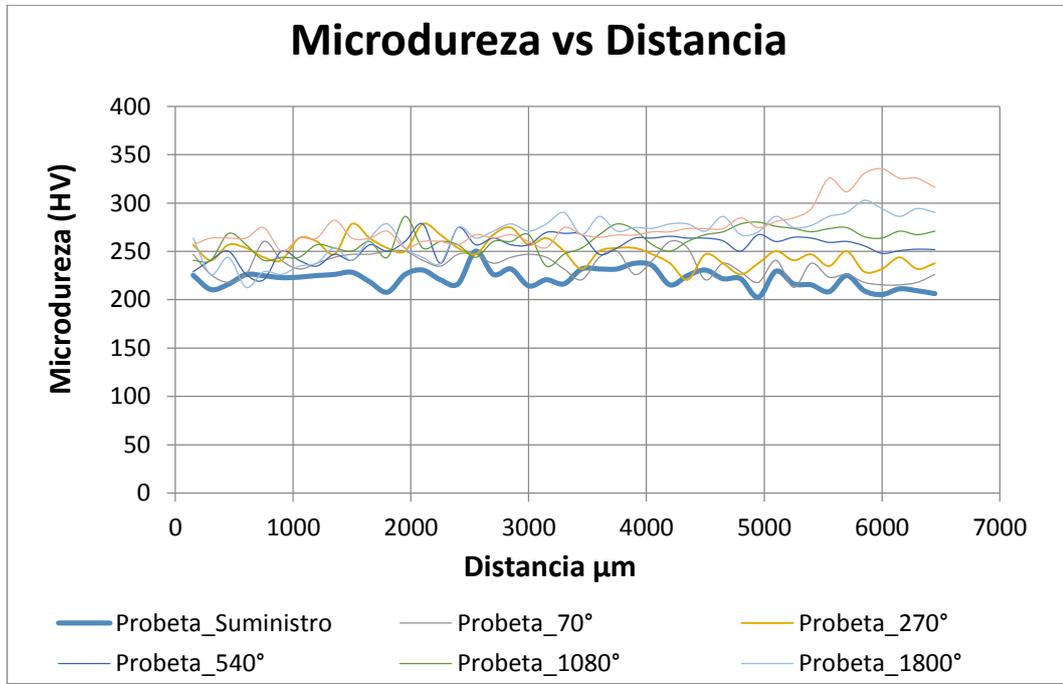


Fuente: Autores

Para diferenciar la evolución de los perfiles de microdureza, se sobreponen todas las curvas en una misma gráfica, notándose que en la Probeta_Suministro se conserva la dureza de 221,6 HV aproximadamente a lo largo de todo el barrido del ensayo, mientras que para el resto de casos experimentales la máxima dureza se encuentra en la periferia del eje de transmisión y disminuyendo progresivamente, conforme se acerca al centro y el ángulo de deformación por torsión sea menor, es así que para el caso 1 (Probeta_T.70°) se tiene una dureza máxima de 226,11 HV, para el caso 2 (Probeta_T.270°) un valor máximo de 237,7 HV, para el caso 3 (Probeta_T.540°) una dureza máxima de 251,8 HV, para el caso 4 (Probeta_T.1080°) un valor máximo de 270,91 HV, para el caso 5 (Probeta_T.1800°) una dureza máxima

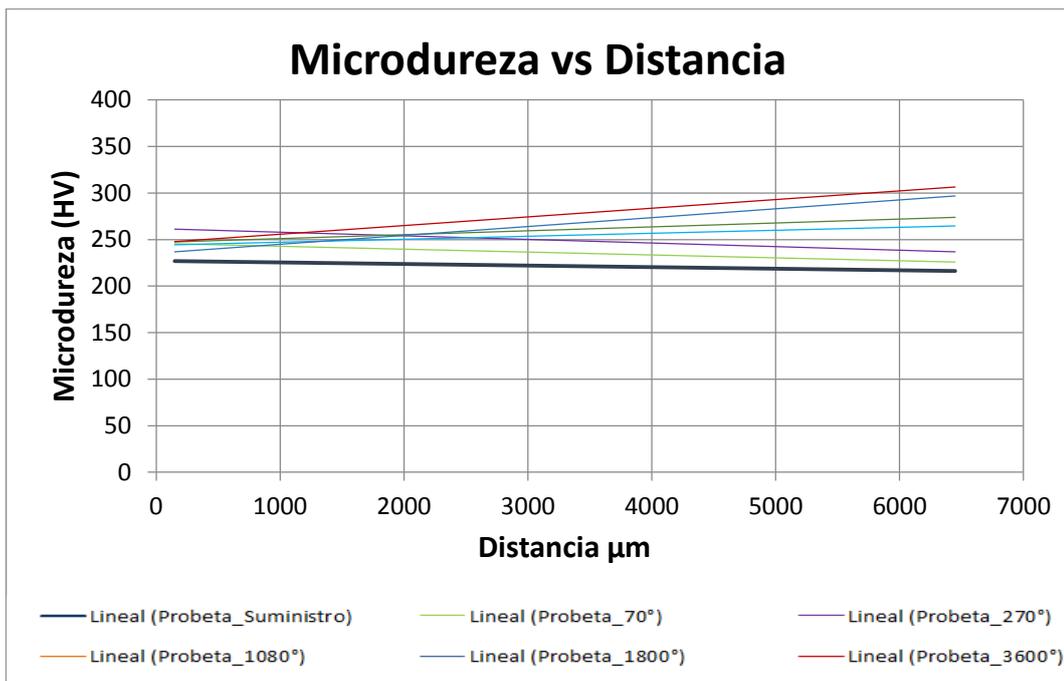
de 290,18 HV y por último en el caso 6 (Probeta_T.3600°) alcanzó una dureza de 316,16 HV.

Figura 102. Evolución de microdureza de la probeta de suministro y los casos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 con respecto a la distancia desde el centro al extremo



Fuente: Autores

Figura 103. Evolución de microdurezas de la probeta de suministro y los casos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 linealizada con respecto a la distancia desde el centro al extremo



Fuente: Autores

De igual manera y de forma más clara se puede apreciar, todo lo mencionado anteriormente, al analizar la Figura 103, Evolución de microdureza vs distancia desde el extremo al centro, diagrama linealizado. Con distancias cerca al centro y ángulos no significativos como: Caso 1 (Probeta_T.70°) y Caso 2 (Probeta_T.270°) de deformación plástica por torsión, la dureza no varía, se mantiene relativamente, mientras que en los extremos y a partir de los caso 3, 4, 5 y 6 es notorio el incremento de dureza.

3.7 Ensayo mecánico de tracción

Al igual que el ensayo realizado para caracterización de las muestras donde se efectuó el ensayo de tracción simple, ya se encuentra especificado bajo que norma se rige este ensayo. Por lo que se someterá los seis casos experimentales, a esfuerzos axiales hasta la fractura del material.

Los valores de deformación se tomaron para cada 100 kg de carga, sin embargo en las tablas muestran valores solo para cada 400 kg.

Ensayo de tracción Caso 1. (Probeta_T.70°)

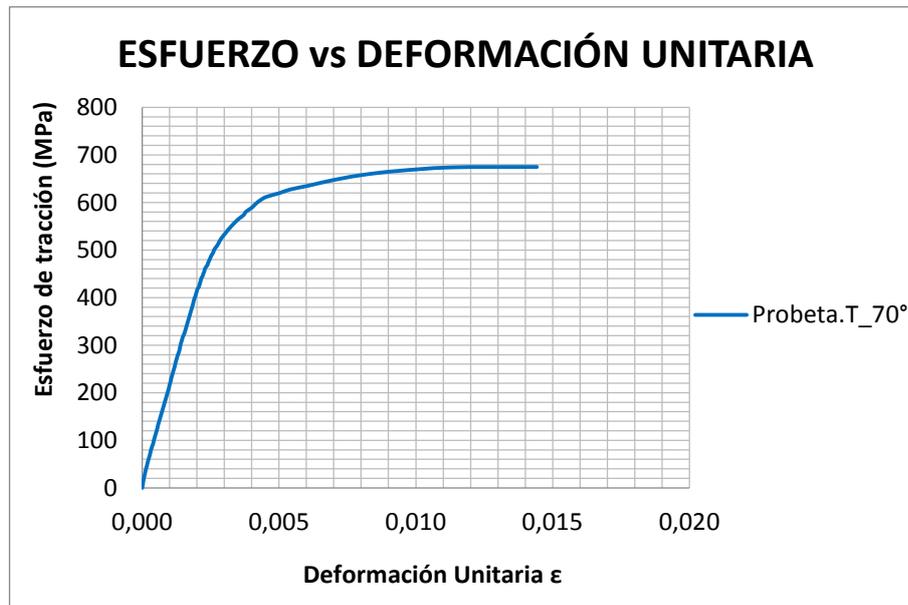
Tabla 24. Valores de fuerza, deformación unitaria y esfuerzo axial, de la probeta torsionada 70°

$F(kg)$	ϵ	$\sigma\left(\frac{kg}{cm^2}\right)$	$\sigma(MPa)$
400	9,881E-05	315,772	30,98
800	0,000237	631,543	61,95
1200	0,000395	947,315	92,93
1600	0,000543	1263,087	123,91
2000	0,000692	1578,859	154,89
2400	0,000850	1894,630	185,86
2800	0,000998	2210,402	216,84
3200	0,001146	2526,174	247,82
3600	0,001294	2841,946	278,79
4000	0,001443	3157,717	309,77
4400	0,001621	3473,489	340,75
4800	0,001779	3789,261	371,73
5200	0,001937	4105,033	402,70
5600	0,002125	4420,804	433,68
6000	0,002332	4736,576	464,66
6400	0,002599	5052,348	495,64

6800	0,002915	5368,120	526,61
7200	0,003379	5683,891	557,59
7600	0,003992	5999,663	588,57
8000	0,005010	6315,435	619,54
8400	0,007292	6631,207	650,52
8700	0,011304	6868,035	673,75
8711,5	0,014427	6877,114	674,64
5860		4626,056	453,82

Fuente: Autores

Figura 104. Curva esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018, torsionada 70°



Fuente: Autores

Ensayo de tracción Caso 2. (Probeta_T.270°)

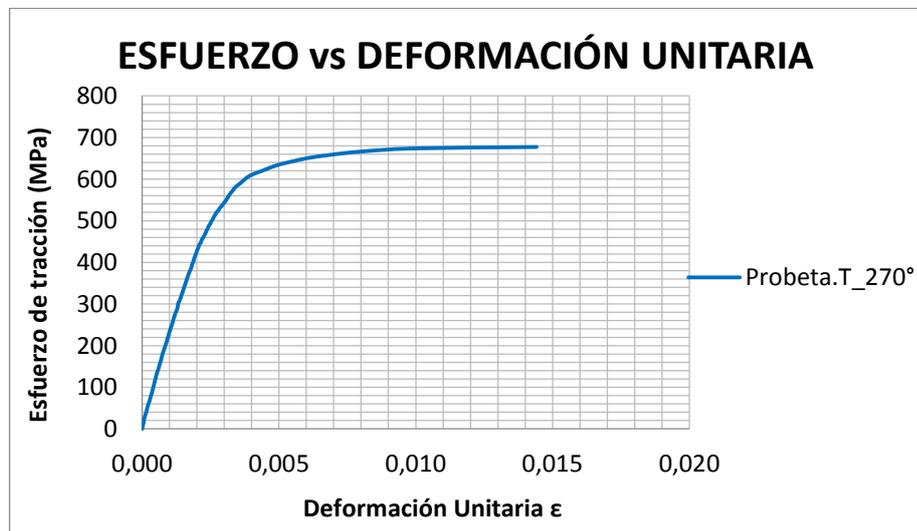
Tabla 25. Valores de fuerza, deformación unitaria y esfuerzo axial, de la probeta torsionada 270°

$F(kg)$	ϵ	$\sigma(\frac{kg}{cm^2})$	$\sigma(MPa)$
400,0000	0,0001	315,772	30,98
800,0000	0,0002	631,543	61,95
1200,0000	0,0004	947,315	92,93
1600,0000	0,0005	1263,087	123,91
2000,0000	0,0006	1578,859	154,89
2400,0000	0,0008	1894,630	185,86
2800,0000	0,0009	2210,402	216,84
3200,0000	0,0011	2526,174	247,82
3600,0000	0,0012	2841,946	278,79
4000,0000	0,0014	3157,717	309,77

4400,0000	0,0015	3473,489	340,75
4800,0000	0,0017	3789,261	371,73
5200,0000	0,0019	4105,033	402,70
5600,0000	0,0020	4420,804	433,68
6000,0000	0,0023	4736,576	464,66
6400,0000	0,0025	5052,348	495,64
6800,0000	0,0028	5368,120	526,61
7200,0000	0,0031	5683,891	557,59
7800,0000	0,0038	6157,549	604,06
8400,0000	0,0060	6631,207	650,52
8745,0000	0,0144	6903,560	677,24
5985,0000		4724,735	463,50

Fuente: Autor

Figura 105. Curva esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018, torsionada 270°



Fuente: Autores

Ensayo de tracción Caso 3. (Probeta_T.540°)

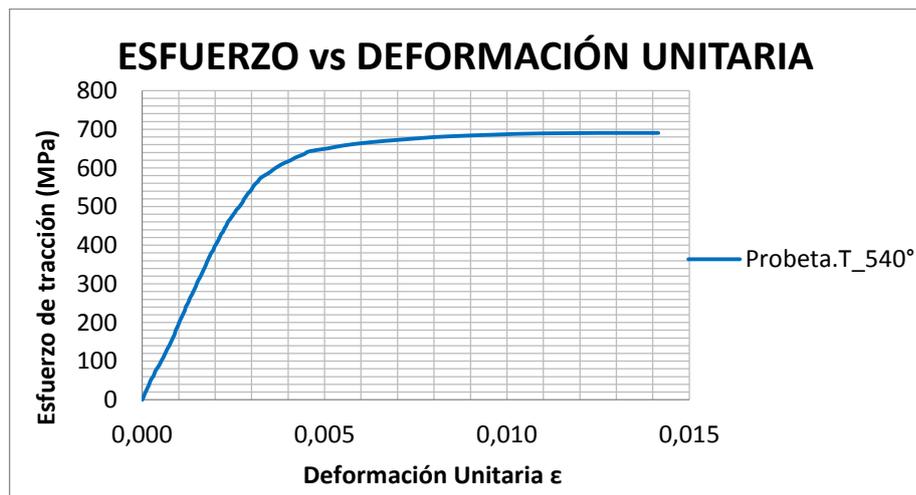
Tabla 26. Valores de fuerza, deformación unitaria y esfuerzo axial, de la probeta torsionada 540°

$F(kg)$	ϵ	$\sigma(\frac{kg}{cm^2})$	$\sigma(MPa)$
400	0,000145	315,772	30,98
800	0,000310	631,543	61,95
1200	0,000484	947,315	92,93
1600	0,000649	1263,087	123,91
2000	0,000814	1578,859	154,89
2400	0,000949	1894,630	185,86
2800	0,001094	2210,402	216,84
3200	0,001240	2526,174	247,82
3600	0,001395	2841,946	278,79

4000	0,001540	3157,717	309,77
4400	0,001705	3473,489	340,75
4800	0,001850	3789,261	371,73
5200	0,002024	4105,033	402,70
5800	0,002295	4578,690	449,17
6000	0,002383	4736,576	464,66
6400	0,002625	5052,348	495,64
6800	0,002847	5368,120	526,61
7200	0,003090	5683,891	557,59
7600	0,003496	5999,663	588,57
8000	0,004068	6315,435	619,54
8400	0,005094	6631,207	650,52
8800	0,008397	6946,978	681,50
8915	0,014150	7037,763	690,40
5925		4677,369	458,85

Fuente: Autores

Figura 106. Curva esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018, torsionada 540°



Fuente: Autores

Ensayo de tracción Caso 4. (Probeta_T.1080°)

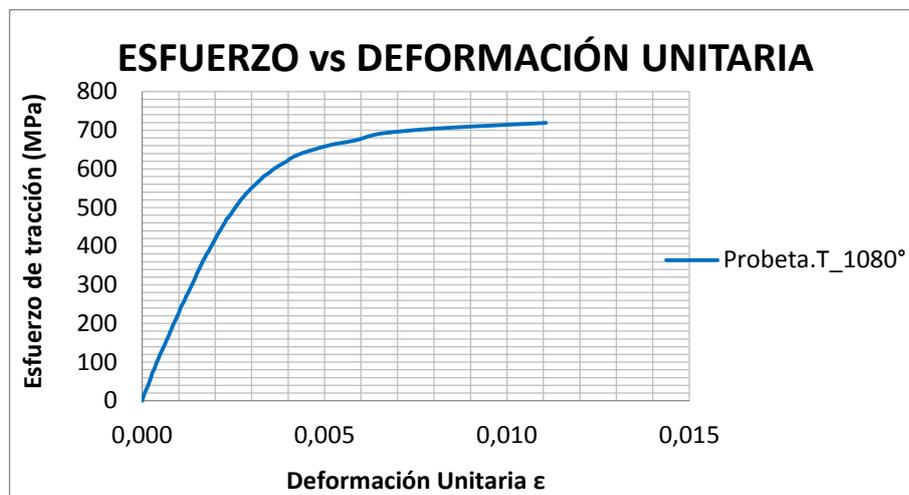
Tabla 27. Valores de fuerza, deformación unitaria y esfuerzo axial, de la probeta torsionada 1080°

$F(kg)$	ϵ	$\sigma(\frac{kg}{cm^2})$	$\sigma(MPa)$
400	0,00012	315,772	30,98
800	0,00025	631,543	61,95
1200	0,00037	947,315	92,93
1600	0,00051	1263,087	123,91
2000	0,00066	1578,859	154,89
2400	0,00080	1894,630	185,86

2800	0,00095	2210,402	216,84
3200	0,00109	2526,174	247,82
3600	0,00125	2841,946	278,79
4000	0,00141	3157,717	309,77
4400	0,00156	3473,489	340,75
4800	0,00173	3789,261	371,73
5200	0,00191	4105,033	402,70
5600	0,00209	4420,804	433,68
6000	0,00228	4736,576	464,66
6400	0,00252	5052,348	495,64
6800	0,00276	5368,120	526,61
7200	0,00308	5683,891	557,59
7600	0,00346	5999,663	588,57
8000	0,00396	6315,435	619,54
8400	0,00473	6631,207	650,52
8900	0,00641	7025,921	689,24
9200	0,00965	7262,750	712,48
9285	0,01107	7329,852	719,06
6100		4815,519	472,40

Fuente: Autores

Figura 107. Curva esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018, torsionada 1080°



Fuente: Autores

Ensayo de tracción Caso 5. (Probeta_T.1800°)

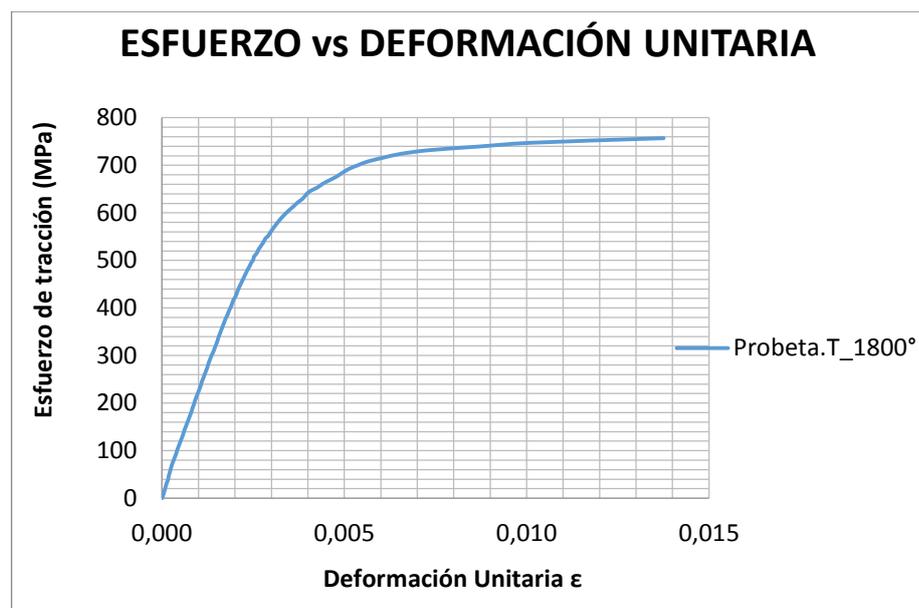
Tabla 28. Valores de fuerza, deformación unitaria y esfuerzo axial, de la probeta torsionada 1800°

$F(kg)$	ϵ	$\sigma(\frac{kg}{cm^2})$	$\sigma(MPa)$
400	0,000127	320,784	31,47

800	0,000245	641,567	62,94
1200	0,000392	962,351	94,41
1600	0,000539	1283,135	125,88
2000	0,000686	1603,918	157,34
2400	0,000833	1924,702	188,81
2800	0,000980	2245,486	220,28
3200	0,001127	2566,269	251,75
3600	0,001275	2887,053	283,22
4000	0,001441	3207,837	314,69
4400	0,001588	3528,620	346,16
4800	0,001745	3849,404	377,63
5200	0,001922	4170,188	409,10
5600	0,002098	4490,971	440,56
6000	0,002294	4811,755	472,03
6400	0,002510	5132,539	503,50
6800	0,002755	5453,323	534,97
7200	0,003039	5774,106	566,44
7600	0,003382	6094,890	597,91
8000	0,003853	6415,674	629,38
8400	0,004402	6736,457	660,85
8800	0,005127	7057,241	692,32
9200	0,006529	7378,025	723,78
9621	0,013755	7715,649	756,91
6250		5093,082	499,63

Fuente: Autores

Figura 108. Curva esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018 axial, torsionada 1800°



Ensayo de tracción Caso 6. (Probeta_T.3600°)

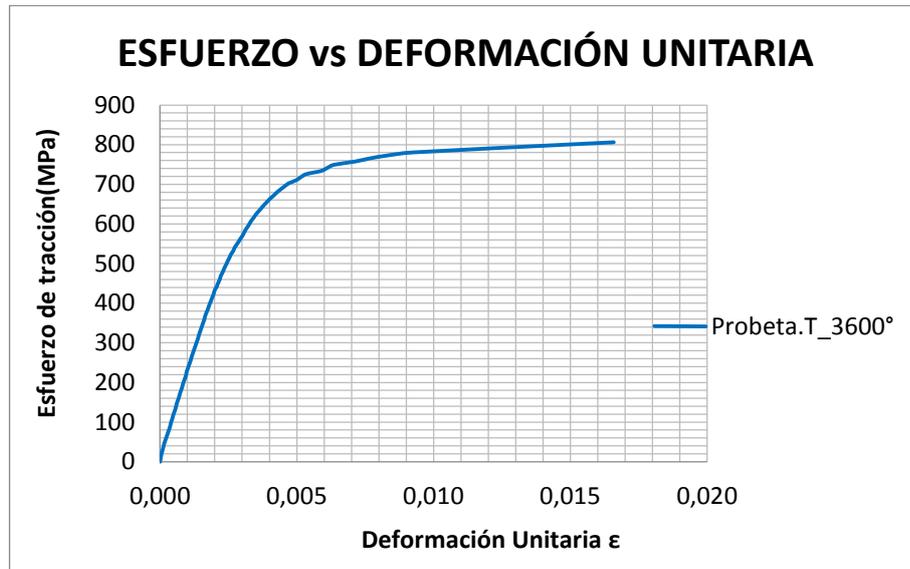
Tabla 29. Valores de fuerza, deformación unitaria y esfuerzo axial, de la probeta torsionada 3600°

$F(Kg)$	ϵ	$\sigma(\frac{Kg}{cm^2})$	$\sigma(MPa)$
400	9,804E-05	318,268	31,22
800	0,000235	636,536	62,44
1200	0,000382	954,804	93,67
1600	0,000520	1273,072	124,89
2000	0,000657	1591,340	156,11
2400	0,000804	1909,608	187,33
2800	0,000951	2227,875	218,55
3200	0,001088	2546,143	249,78
3600	0,001235	2864,411	281,00
4000	0,001392	3182,679	312,22
4400	0,001539	3500,947	343,44
4800	0,001686	3819,215	374,66
5200	0,001863	4137,483	405,89
5600	0,002029	4455,751	437,11
6000	0,002216	4774,019	468,33
6400	0,002431	5092,287	499,55
6800	0,002667	5410,555	530,78
7200	0,002931	5728,823	562,00
7600	0,003206	6047,091	593,22
8000	0,003510	6365,358	624,44
8400	0,003912	6683,626	655,66
8800	0,004402	7001,894	686,89
9200	0,005147	7320,162	718,11
9600	0,006363	7638,430	749,33
10000	0,009255	7956,698	780,55
10325	0,016587	8216,276	806,02
7500		5967,896	585,45

Fuente: Autores

Como se puede observar en cada una de las Figuras, la torsión plástica influye de manera considerable en las curvas esfuerzo de tracción vs deformación unitaria, a medida que se incrementa el grado de torsión, aumenta cada punto en la gráfica en una misma deformación.

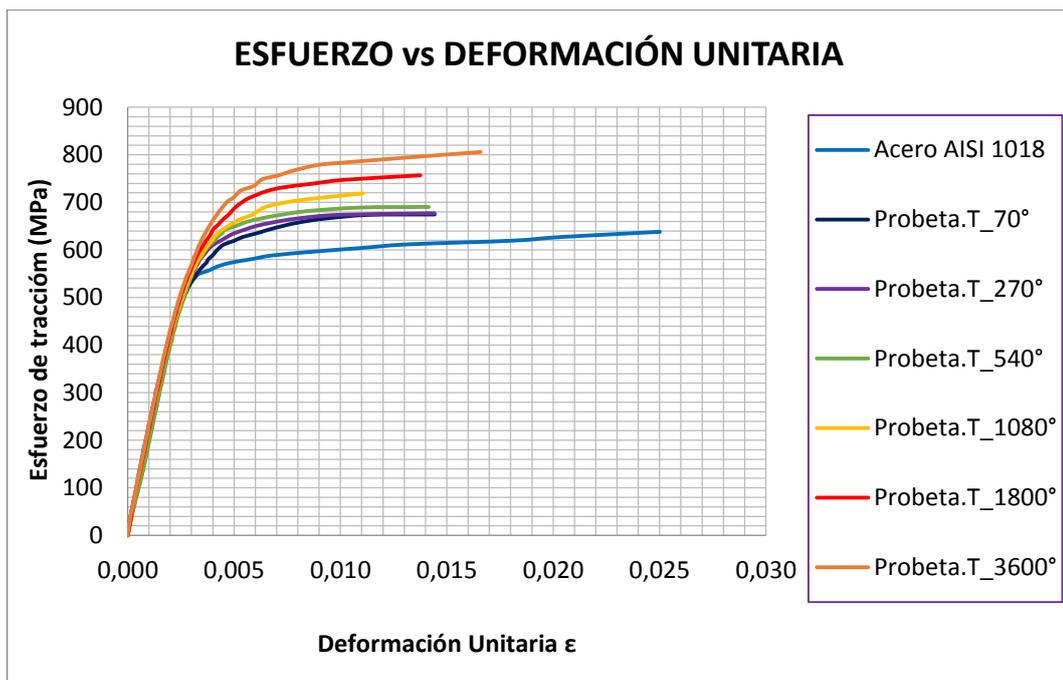
Figura 109. Curva esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018 axial, torsionada 3600°



Fuente: Autores

Para apreciar si existe cambios de las propiedades mecánicas como: límite proporcional, límite de fluencia y máximo esfuerzo, del acero AISI SAE 1018 laminado en frío, al experimentar la torsión plástica, se sobreponen todas las curvas esfuerzo de tracción - deformación unitaria.

Figura 110. Curvas esfuerzo-deformación del acero AISI SAE 1018, de los casos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y suministro



Fuente: Autores

3.7.1 Análisis de las propiedades mecánicas. El comportamiento de las curvas indica una variación ascendente de las propiedades mecánicas prioritarias de esta investigación (eje de las ordenadas), así como una disminución en la deformación unitaria (eje de las abscisas), por consecuencia de la deformación angular expuesta a las probetas, por tanto se afirma que material es mucho más resistente pero menos elástico, con respecto a la muestra en estado de suministro.

Para cuantificar la variación de cada caso con respecto al material en estado de suministro se tiene la Tabla 30.

Tabla 30. Comparación de las propiedades mecánicas a tracción, de la probeta de suministro con cada una de las propiedades respecto a cada caso

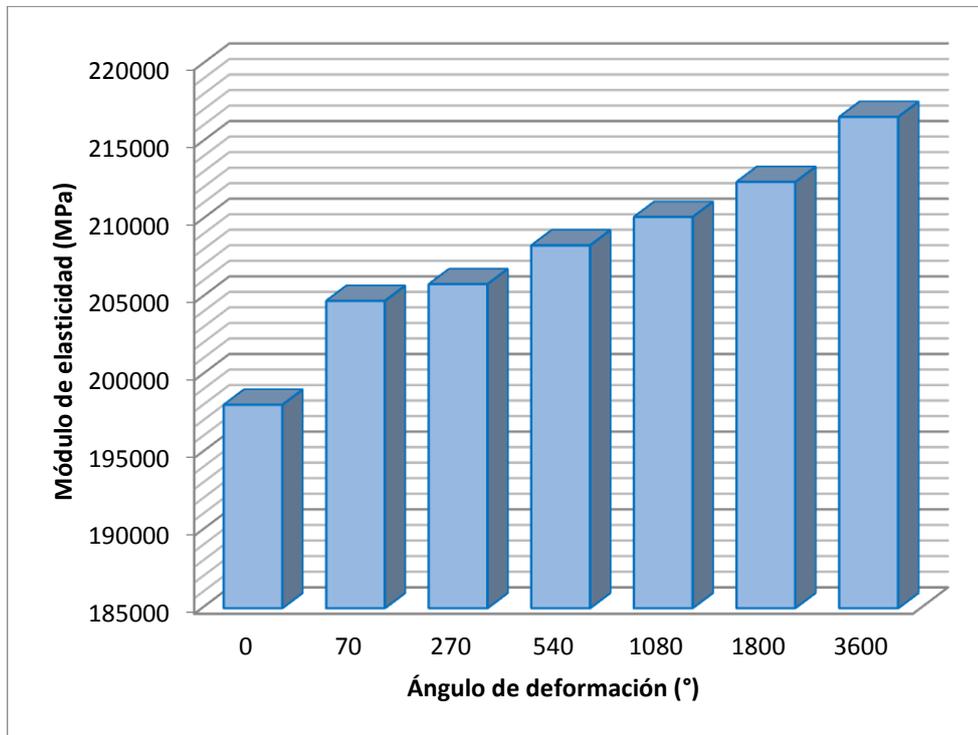
DIFERENCIA ENTRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS					
MUESTRAS	Módulo de elasticidad MPa	Esfuerzo de fluencia MPa	Esfuerzo máximo MPa	Esfuerzo último MPa	Elongación %
PROMEDIO 1	204756,55	337,32	674,64	453,82	14,73
P. SUMINISTRO	198060,52	319,07	638,13	424,77	19,57
DIFERENCIA	6696,03	18,26	36,51	29,04	4,84
PROMEDIO 2	205835,40	338,62	677,24	463,50	4,39
P. SUMINISTRO	198060,52	319,07	638,13	424,77	19,57
DIFERENCIA	7774,87	19,55	39,11	38,72	15,18
PROMEDIO 3	208333,70	345,20	690,40	458,85	2,78
P. SUMINISTRO	198060,52	319,07	638,13	424,77	19,57
DIFERENCIA	10273,18	26,14	52,27	34,07	16,79
PROMEDIO 4	210161,88	359,53	719,06	472,40	2,49
P. SUMINISTRO	198060,52	319,07	638,13	424,77	19,57
DIFERENCIA	12101,36	40,46	80,93	47,63	17,08
PROMEDIO 5	212414,93	378,56	757,12	484,47	1,96
P. SUMINISTRO	198060,52	319,07	638,13	424,77	19,57
DIFERENCIA	14354,41	59,49	118,99	59,69	17,61
PROMEDIO 6	216603,20	403,01	806,02	580,82	1,57
P. SUMINISTRO	198060,52	319,07	638,13	424,77	19,57
DIFERENCIA	18542,68	83,94	167,89	156,05	18,00

Fuente: Autores

Se calculó la variación existente entre la probeta en estado de suministro con cada caso influenciado por el esfuerzo de torsión, para una mejor apreciación de las variaciones de las propiedades mecánicas se hace referencia cuadros estadísticos.

En la Figura 111, se observa la variación existente del módulo de elasticidad de la probeta, notándose que a una deformación angular de 70°, el módulo es el menor, correspondiente a 204756,55 MPa, mientras tanto que a mayor grado de torsión, 3600°, el mismo sufre un incremento hasta 216603,20 MPa.

Figura 111. Comportamiento del módulo de elasticidad en función del grado de torsión

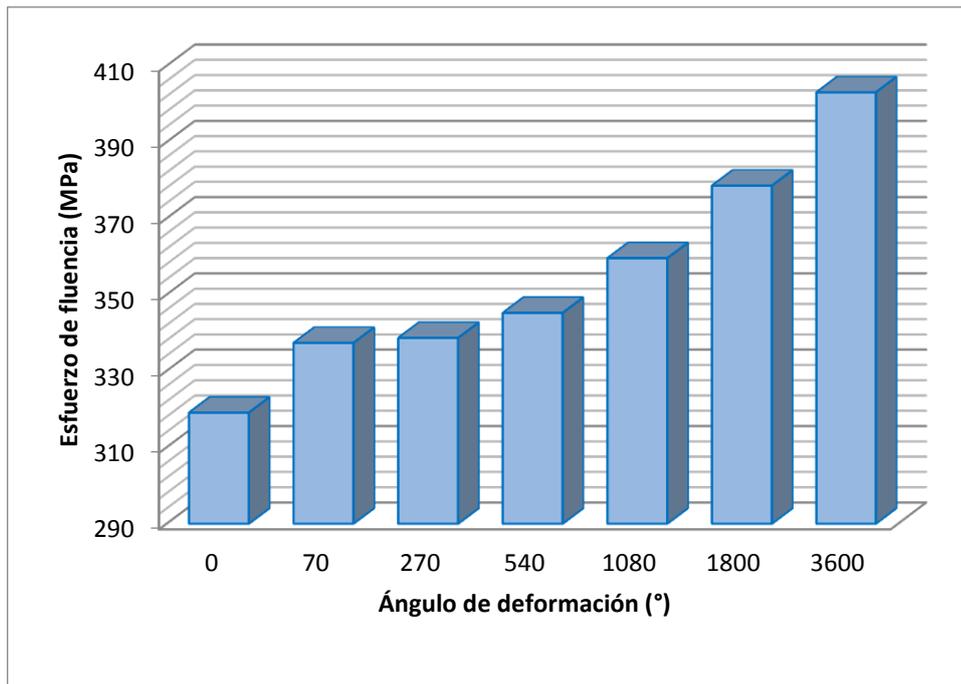


Fuente: Autores

Al analizar la Figura 112, de igual manera existe variación del esfuerzo de fluencia, pero en menor proporción al módulo de elasticidad.

Siendo esta propiedad de gran importancia en la investigación, por lo que el mismo se utilizado en el diseño de elementos de máquinas, entonces la torsión plástica se podría considerar un proceso de mejoramiento de propiedades en los ejes.

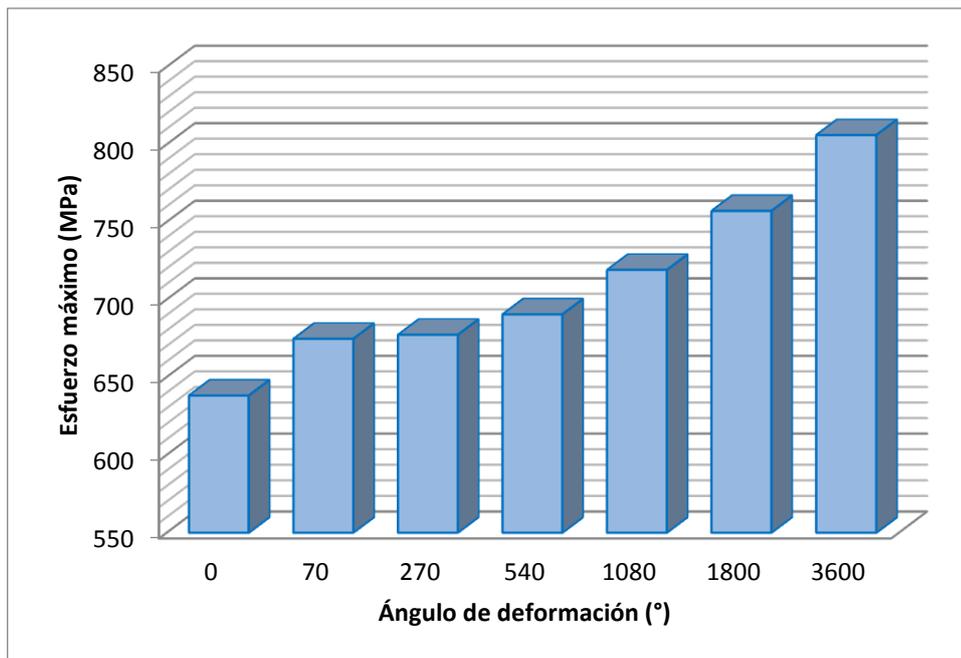
Figura 112. Comportamiento del esfuerzo de fluencia en función del grado de torsión



Fuente: Autores

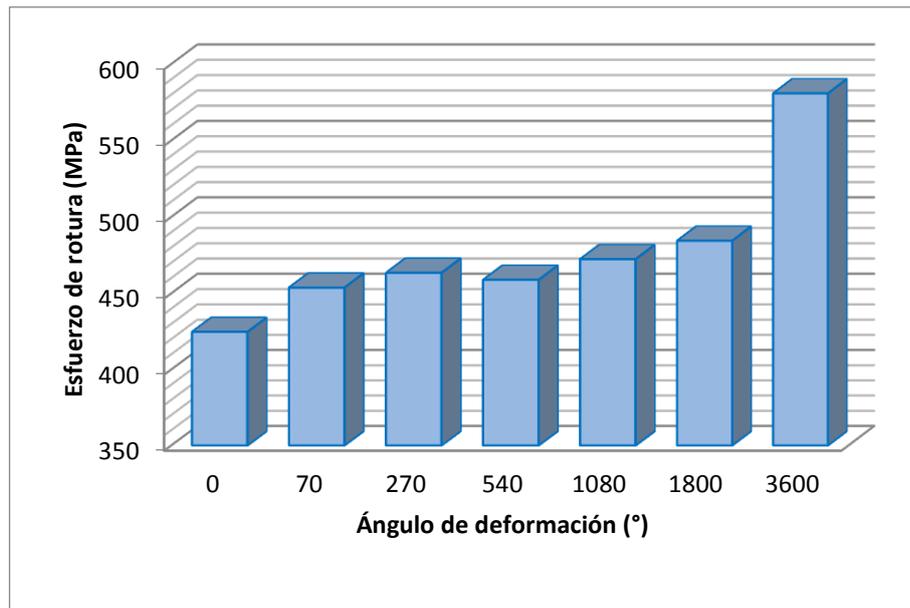
En la Figura 113 existe variación en incremento del esfuerzo máximo en función del ángulo de deformación. Donde con una deformación angular de 70° se tiene un esfuerzo máximo de 674,64 MPa, mientras que al torsionar 3600° el esfuerzo máximo es 806,02 MPa.

Figura 113. Comportamiento del esfuerzo máximo en función del grado de torsión



Fuente: Autores

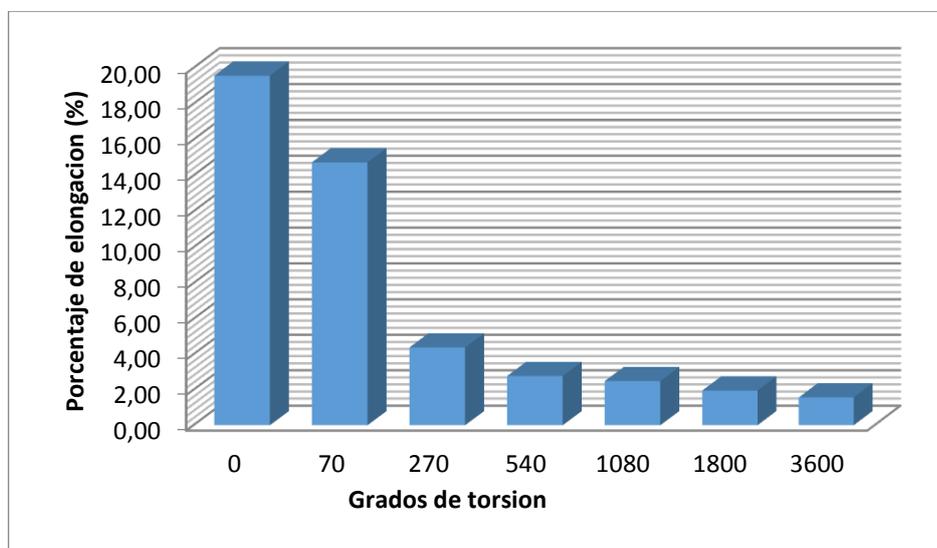
Figura 114. Comportamiento del esfuerzo de rotura en función del grado de torsión



Fuente: Autores

En la Figura 114, se tiene el mismo comportamiento de las propiedades analizadas anteriormente, con menores ángulos de torsión las propiedades respectivas son semejantes a las de la probeta en estado de suministro, por lo contrario que las mismas propiedades se incrementan con el aumento del ángulo de torsión. Esto resulta ser muy importante, por cuanto con una torsión previa se puede controlar las propiedades mecánicas de acuerdo a un respectivo ángulo de deformación, proceso que no se logra con deformación plástica por rodillos.

Figura 115. Comportamiento del porcentaje de elongación en función del grado de torsión



Fuente: Autores

Al analizar la Figura 115, se aprecia un comportamiento contrario a las demás propiedades es decir a menor deformación angular de 70°, se tiene un máximo porcentaje de elongación de 14,73%, mientras que a mayor grado de torsión, 3600°, se tiene un mínimo de 1,57%.

Como es de conocimiento el porcentaje de elongación depende del material que se utiliza, al hablar específicamente del Acero AISI SAE 1018 laminado en frío, el promedio de esta propiedad varía de 18-25 %, esta característica es propia de los materiales dúctiles. La Figura 115, muestra los valores de elongación para cada probeta ensayada a torsión y ninguno pertenece al intervalo establecido del acero en estado de suministro por ende el material ya no se lo considera como dúctil.

3.8 Examen fotomacrográfico de las facturas de la probeta de suministro y casos en estudio

El diámetro inicial promedio de las probetas, antes de ser sometidas al ensayo de tracción fue de 12,5 mm, dato referente para la comparación con los diámetros de las probetas influenciadas por torsión, que fueron medidas después de la fractura.

El examen fotomacrográfico de fractura se basa en la observación de los conos de la probeta de suministro y Caso 1 (Probeta_T.70°), Caso 2 (Probeta_T.270°), Caso 3 (Probeta_T.540°), Caso 4 (Probeta_T.1080°), Caso 5 (Probeta_T.1800°) y Caso 6 (Probeta_T.3600°) , Se utilizó un microscopio óptico y se consiguieron fotografías con 1,75 de aumento.

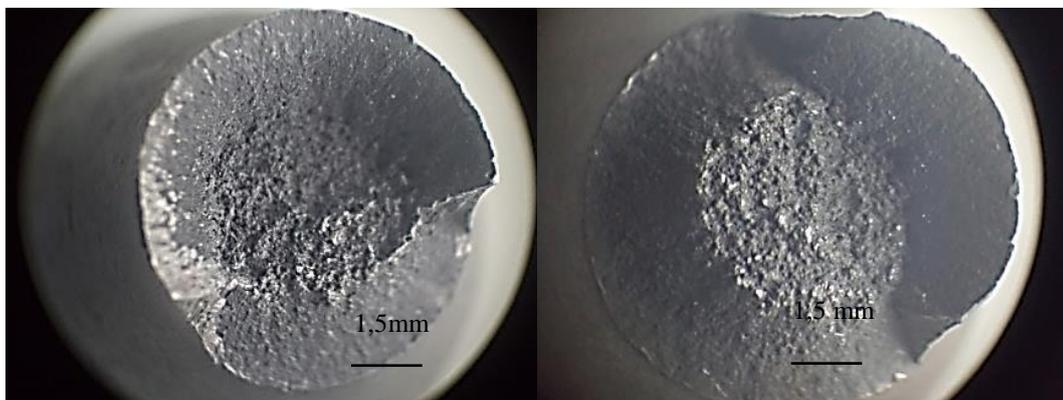
Al medir el cráter de las probetas con el respectivo ángulo de torsión y comparar con la probeta de suministro existe una variación en el diámetro del cráter, en condiciones de suministro el cráter tiene un diámetro de 4,65 mm produciéndose mayor estricción antes de la fractura, mientras que la probeta con mayor deformación angular presenta un diámetro de 8,8 mm donde su estricción es mínima.

En los seis casos de estudio, se observa a medida que aumenta el grado de torsión, se modifica el comportamiento mecánico del material (aumento de S_y) así como su comportamiento en fractura, al presentar las macrofotografías donde se aprecia superficies irregulares con numerosas elevaciones y depresiones, notándose la anisotropía resistente.

Todas las muestras presentan una corona o anillo exterior formado por coalescencia de microhuecos, y una zona central, ésta de aspecto más fibroso. Entre la corona exterior y el área central de la superficie de fractura se encuentra una zona intermedia, en la cual se observa una mezcla de superficies de fractura por coalescencia de microhuecos, en las muestras sometidos a menor torsión, disminuye progresivamente el porcentaje de fracturas por coalescencia a medida que aumenta el grado de torsión, de forma que en las probetas con mayor torsión, la zona intermedia se encuentra constituida casi exclusivamente por coalescencia de microhuecos, por ende se podría decir que la fractura se inicia en el centro y se propaga al exterior.

Probeta de suministro

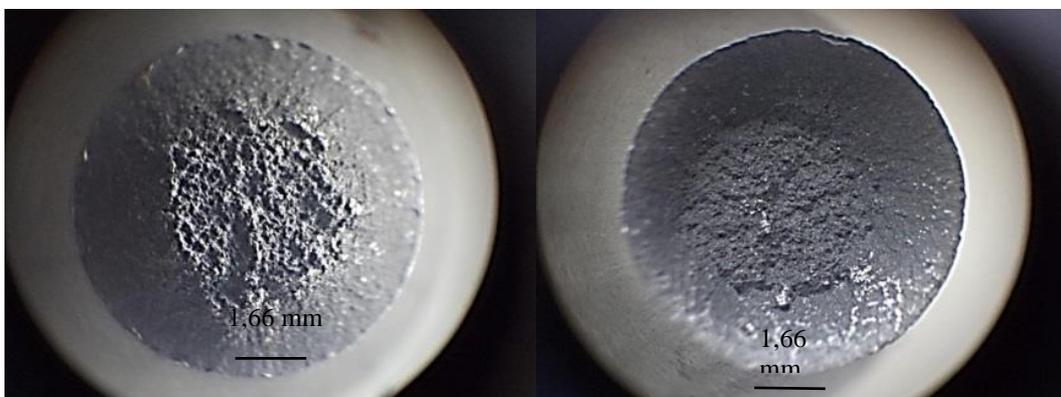
Figura 116. Fracturas de la probeta en estado de suministro



Fuente: Autores

Caso 1 (Probeta_T.70°)

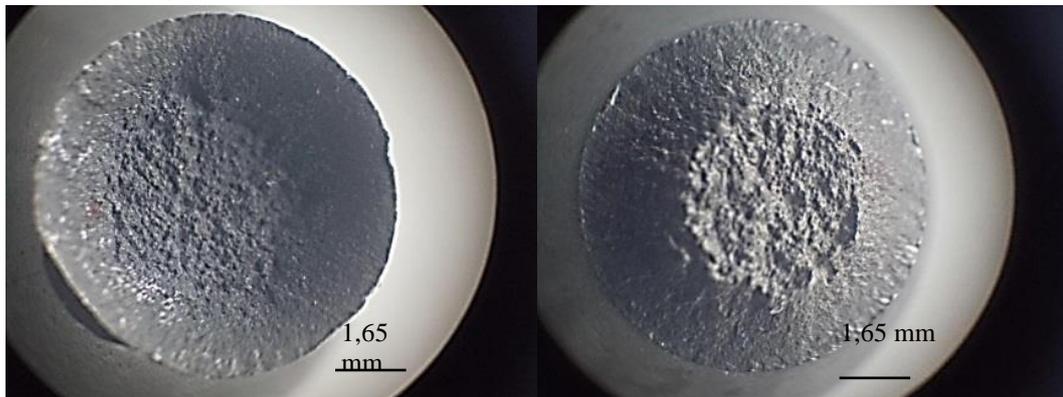
Figura 117. Fracturas de la probeta, caso 1 (Probeta_T.70°)



Fuente: Autores

Caso 2 (Probeta_T.270°)

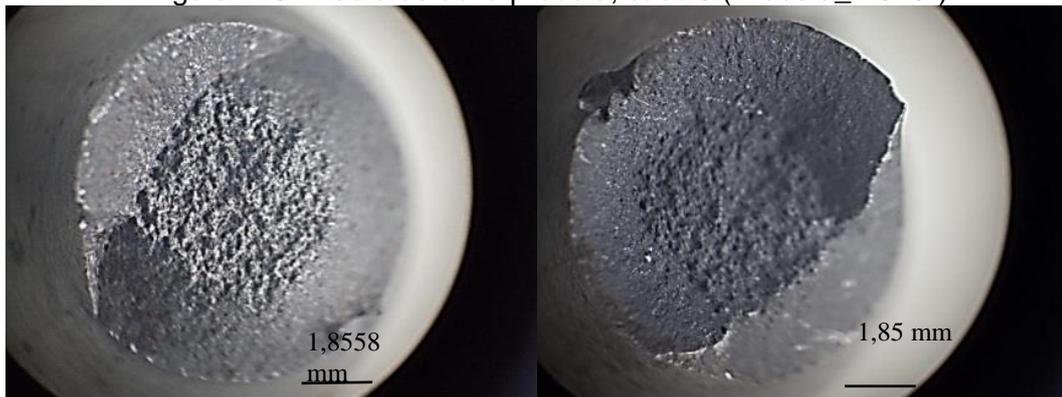
Figura 118. Fracturas de la probeta, caso 2 (Probeta_T.270°)



Fuente: Autores

Caso 3 (Probeta_T.540°)

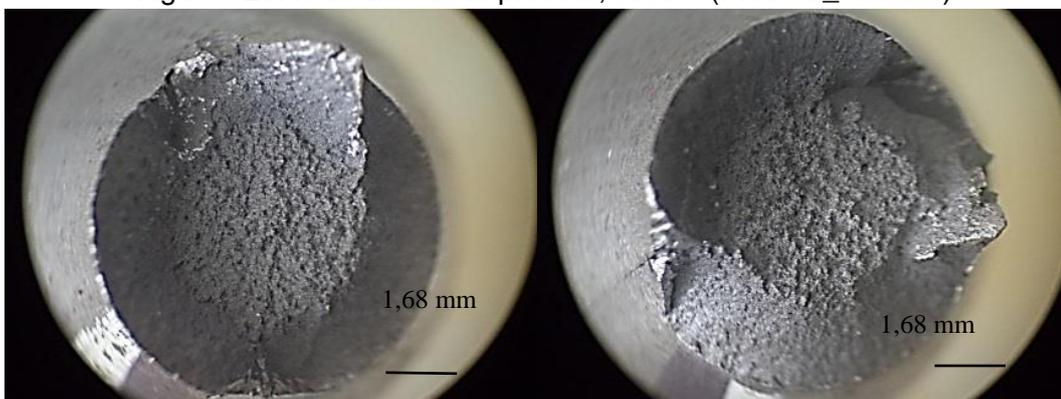
Figura 119. Fracturas de la probeta, caso 3 (Probeta_T.540°)



Fuente: Autores

Caso 4 (Probeta_T.1080°)

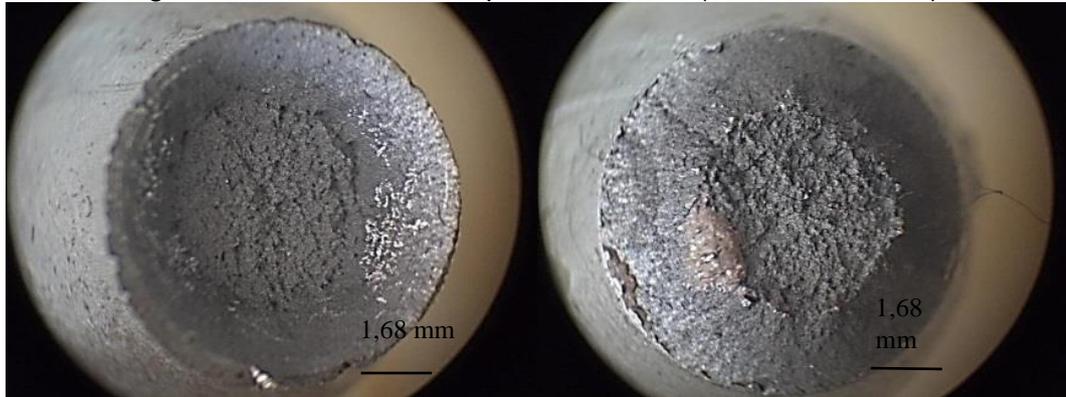
Figura 120. Fracturas de la probeta, caso 4 (Probeta_T.1080°)



Fuente: Autores

Caso 5 (Probeta_T.1800°)

Figura 121. Fracturas de la probeta, caso 5 (Probeta_T.1800°)



Fuente: Autores

Caso 6 (Probeta_T.3600°)

Figura 122. Fracturas de la probeta, caso 2 (Probeta_T.3600°)



Fuente: Autores

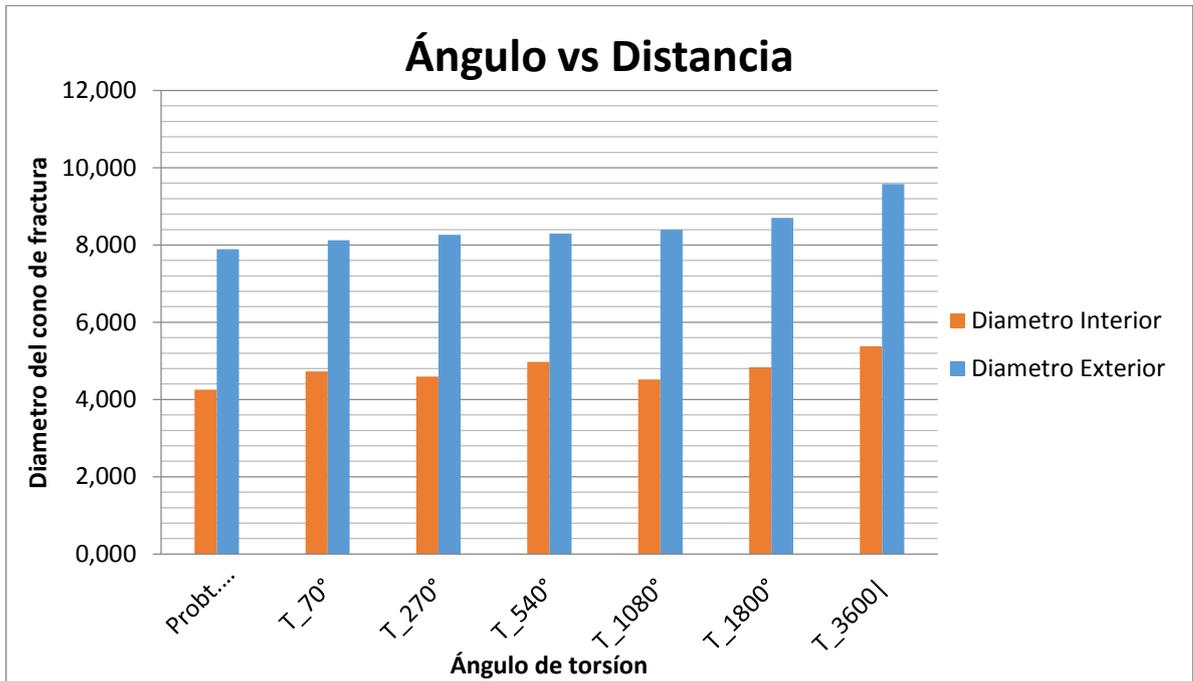
3.8.1 *Análisis cuantitativo de las macrofotografías de fracturas.* Con las fotografías de las fracturas, se han realizado una serie de medidas sobre las distintas superficies para tabular diámetro interno y externo de los conos en la Tabla 31.

Tabla 31. Diámetros de los conos formados por el esfuerzo de torsión

Probeta	D. Interno	D. Externo
Probeta_Suministro	4,252	7,895
Probeta_T.70°	4,724	8,125
Probeta_T.270°	4,590	8,262
Probeta_T.540°	4,973	8,297
Probeta_T.1080°	4,516	8,400
Probeta_T.1800°	4,832	8,703
Probeta_T.3600°	5,379	9,579

Fuente: Autores

Figura 123. Diagrama de evolución de diámetro del cono de fractura vs ángulo de deformación por torsión



Fuente: Autores

En el diagrama de barras, diámetro del cono de fractura vs ángulo de deformación por torsión se aprecia como el diámetro externo de la probeta de suministro disminuye de 12,6 mm a 7,895mm, ya que antes de llegar a la fractura se produjo una estricción, provocando así un cuello de botella típico de un material dúctil.

Mientras que en el Caso 6 (Probeta_T.3600°), donde la influencia de la torsión plástica es mayor, antes de llegar a la fractura su diámetro disminuye en menor proporción hasta 9,579 mm, correspondiente a un material semi frágil.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La tesis recoge los resultados de los trabajos realizados sobre la elastoplasticidad anisótropa en grandes deformaciones de metales específicamente en el acero AISI-SAE 1018, desde el punto de vista experimental. En este capítulo se presentan las principales conclusiones y aportaciones de la investigación desarrollada.

4.1 Conclusiones

Analizando el ensayo de tracción se puede afirmar; a medida que aumenta el ángulo de deformación por torsión se tiene un incremento en las propiedades mecánicas del material de ensayo, esto lo puede apreciar claramente al comparar la probeta de suministro con el caso 6 (Probeta_T.3600°), que presenta mayor esfuerzo a la fluencia con una variación porcentual de 21,5 %.

Los resultados del análisis metalográfico, revelan que las probetas deformadas a diferentes ángulos, tiene una estructura de ferrita y perlita antes y después del proceso de deformación por torsión.

Se observó un cambio de tamaño, forma y orientación de los granos en la superficie de la probeta, la misma que se genera debido al esfuerzo cortante máximo.

Se afirma que la deformación plástica superficial por torsión genera desplazamiento o dislocación en los cristales causando endurecimiento en el material, maclaje por acritud.

El esfuerzo cortante producido por la torsión nos hace notar que a mayor ángulo de deformación la zona influenciada, donde se produce una variación de tamaño forma y de orientación de los granos, es máxima, mientras que con un menor ángulo de deformación de la zona afectada es mínima. Lo cual nos indica que existe un endurecimiento superficial, el mismo que se respalda con las mediciones de microdurezara tomadas en cada una de las probetas a lo largo del radio, por lo que el material afectado por torsión es más resistente el desgaste.

Al realizar el análisis fotomacrográfico se puede apreciar claramente mediante el tipo de fractura que el material en condiciones de suministro es dúctil, mientras al aumentar la torsión plástica, las fracturas varían hasta presentar una fractura de menor conicidad, correspondiente a un material semi frágil.

4.2 Recomendaciones

Con los ensayos realizados en esta investigación se comprobado que el material mejora sus propiedades en los en la periferia, por tal razón seria de suma importancia realizar un estudio de cómo afecta la torsión platica en la tribología de ejes.

Como es del conocimiento el endurecimiento por deformación en frio es a causa del aumento de densidades de dislocaciones en el material, por tanto surge la necesidad de cuantificar la variación de dislocaciones con la ayuda de equipos de mayor capacidad.

BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR, . 2013. Estructuras Cristalinas. [Online] 2013. [Cited: 21 12 2013.]

Ame. 2009. <http://auladetecnologias.blogspot.com/2009/09/redes-cristalinas-de-los-metales.html>. [Online] 2009.

American Society of Materials. 1991. Handbook Volume 4. Heat Treating. USA : s.n., 1991.

Análisis fractográfico cuantitativo del comportamiento en fractura de aceros perlíticos progresivamente trefilados. AYASO, . 2005. Salamanca : s.n., 2005.

ASM. 1998. Metals Handbook. [book auth.] Joseph DAVIS. Desk Edition. Ohio : s.n., 1998.

BAUSSCHINGER, . 1886. "Über die veränderung der elastizitätsgrenze und derfestigkeit des eisens und stahls durch strecken und quetschen, durch erwärmen und abkühlen und durch oft mal wiederholte beanspruchung. 1886.

CALLISTER, . 1997. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Barcelona : Reverté, 1997.

Crystallite size refinement in elemental species under mechanical processing conditions. DELOGU, . 2005. Cagliari : s.n., 2005.

Elastoplasticidad anisótropa de metales. MASING, . 1926. Caminero : s.n., 1926.

Evaluacion del Endurecimiento de Barras de Acero y Laton en Ensayos de Traccion y Torsion Ciclica. Celtlin, . 2005. 2, Belo Horizonte : s.n., 2005, Vol. 16.

Evaluación del endurecimiento de barras de Acero y de laton en Ensayos de Tracción y Torsión Cíclica. AGUILAR, . 2005. 2, Belo Horizonte : s.n., 2005, Vol. 16.

FARGHALLI A. MOHAMED, YONG, Li. Creep and superplasticity in nanocrystalline materials. California : s.n.

Mecánica estructural. ALFREDO, . 2011. José Simeón Cañas : s.n., 2011.

PRAT, . 2006. Elasticidad y Plasticidad. Catalunya : Camins Open Course Ware, 2006.

Procedimiento para endurecer el acero 45 mediante la deformación plástica con rodillo simple. Fernandez, . 2008. 1, Bogota : s.n., 2008, Vol. 28.

Torrano, and Herrero Pérez, . 2011. Universidad Politécnica de Cartagena. [Online] 2011. [Cited: 23 Noviembre 2014.]

TORRANO, Santiago y HERRERO Pérez, D. 2011. Introduccion a la elasticidad-resistencia. Cartagena : s.n., 2011.