



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A TORSIÓN DE
LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA6061**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

TUTOR: ING. JUAN PEREIRA

**DURÁN LUÍS
VAN DEVENTER DIEGO**

Valencia, Enero de 2008



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A TORSIÓN DE
LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA6061**

TUTOR: ING. JUAN PEREIRA

DURÁN LUÍS
VAN DEVENTER DIEGO

Valencia, Enero de 2008

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
1.1 Planteamiento del Problema	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Justificación de la investigación	4
1.4 Limitaciones y Delimitaciones	5
1.4.1 Limitaciones	5
1.4.2 Delimitaciones	5
CAPÍTULO II	
2.1 Revisión de antecedentes	6
2.1.1 Antecedente N °1	6
2.1.2 Antecedente N °2	6
2.1.3 Antecedente N °3	7
2.1.4 Antecedente N° 4	7
2.2 Bases teóricas	8
2.2.1 Aleaciones de aluminio	8
2.2.1.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio según AA	9
2.2.2 Aleación de aluminio 6061	11
2.2.2.1 Propiedades físicas	12
2.2.2.2 Propiedades mecánicas	12
2.2.2.3 Tratamientos térmicos	13
2.2.3 Análisis de esfuerzos y deformaciones	15
2.2.3.1 Estudio del comportamiento mecánico a tracción	15
2.2.3.2 Estudio del comportamiento mecánico a torsión de barras	26

Circulares	
2.2.4 Criterios de fluencia	38
2.2.4.1 Criterio de la tensión cortante máxima de Tresca	39
2.2.4.2 Criterio de energía máxima de deformación cortante de von	40
Mises	
2.2.5 Ensayo de dureza	41
2.3 Definición de términos básicos	43
CAPÍTULO III	
3.1 Nivel de la investigación	45
3.2 Diseño de la investigación	45
3.2.1 Adquisición del material	46
3.2.2 Elaboración de las probetas	46
3.2.3 Aplicación de tratamientos térmicos	48
3.2.3.1 Recocido (O)	48
3.2.3.2 Endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural	49
(T4)	
3.2.3.2 Endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial	49
(T6)	
3.2.4 Ensayos mecánicos	50
3.2.4.1 Ensayos de tracción	50
3.2.4.2 Ensayos de torsión	51
3.2.4.3 Ensayos de dureza	52
3.2.5 Macroscopía	52
3.3 Muestra	53
3.4 Técnicas de recolección de datos	54
3.5 Instrumentos de recolección de datos	55
3.6 Técnicas de procesamiento de datos	57
CAPÍTULO IV	

4.1 Resultados de los ensayos de dureza	58
4.1.1 Resultados del ensayo de dureza en condiciones de recocido (O)	58
4.1.2 Resultados del ensayo de dureza en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)	60
4.1.3 Resultados del ensayo de dureza en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)	61
4.2 Resultados de los ensayos de tracción	63
4.2.1 Resultados de los ensayos de tracción en recocido	63
4.2.1.1 Resultado del ensayo de tracción en recocido probeta N° 1	64
4.2.1.2 Resumen de los ensayos de tracción en recocido	67
4.2.2 Resultados de los ensayos de tracción para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)	68
4.2.3 Resultados de los ensayos de tracción para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)	69
4.3 Resultados de los ensayos de torsión	70
4.3.1 Resultados de los ensayos de torsión en recocido	72
4.3.1.1 Resultado del ensayo de torsión en recocido probeta N° 1	72
4.3.1.2 Resultado del ensayo de torsión en recocido probeta N° 2	77
4.3.1.3 Resultado del ensayo de torsión en recocido probeta N° 3	79
4.3.1.4 Resultado del ensayo de torsión en recocido probeta N° 4	80
4.3.1.5 Resultado del ensayo de torsión en recocido probeta N° 5	81
4.3.1.6 Coeficiente de endurecimiento por precipitación promedio para la condición de recocido	82
4.3.2 Resultados de los ensayos de torsión para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)	82
4.3.2.1 Resultado del ensayo de torsión en T4 para la probeta N° 1	83
4.3.2.2 Resultado del ensayo de torsión en T4 para la probeta N° 2	84
4.3.2.3 Resultado del ensayo de torsión en T4 para la probeta N° 3	85

4.3.2.4 Resultado del ensayo de torsión en T4 para la probeta N° 4	86
4.3.2.5 Resultado del ensayo de torsión en T4 para la probeta N° 5	87
4.3.2.6 Coeficiente de endurecimiento por precipitación promedio para la condición de T4	88
4.3.3 Resultados de los ensayos de torsión para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)	89
4.3.3.1 Resultado del ensayo de torsión en T6 para la probeta N° 1	89
4.3.3.2 Resultado del ensayo de torsión en T6 para la probeta N° 2	90
4.3.3.3 Resultado del ensayo de torsión en T6 para la probeta N° 3	91
4.3.3.4 Resultado del ensayo de torsión en T6 para la probeta N° 4	92
4.3.3.5 Resultado del ensayo de torsión en T6 para la probeta N° 5	93
4.3.3.6 Coeficiente de endurecimiento por precipitación promedio para la condición de T6	94
4.4 Aplicación de las relaciones entre las propiedades a tracción y torsión	95
4.5 Macroscopía a muestras extraídas del ensayo de torsión	96
4.6 Comparación de los resultados obtenidos con los tabulados por la AA	96
CAPÍTULO V	
5.1 Resultados del ensayo de dureza	99
5.2 Ensayo de tracción	100
5.2.1 Ensayo de tracción en condición de recocido O	101
5.2.2 Ensayo de tracción en condición T4	102
5.2.3 Ensayo de tracción en condición T6	103
5.2.4 Relación entre las propiedades a tracción para las muestras ensayadas a diferentes tratamientos térmicos	104
5.3 Ensayos de torsión	105
5.3.1 Ensayos de torsión en condición de recocido O	105
5.3.2 Ensayos de torsión en condición de T4	108
5.3.3 Ensayos de torsión en condición de T6	110

5.3.4 Relación entre las propiedades a torsión para las muestras ensayadas a diferentes tratamientos térmicos	113
5.4 Relaciones entre las propiedades extraídas del ensayo de tracción y torsión	116
5.5 Macroscopía	117
5.5.1 Macroscopía en condición de T6	117
5.5.2 Macroscopía en condición de T4	118
5.5.3 Macroscopía en condición de O	119
CONCLUSIONES	121
RECOMENDACIONES	123
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
ANEXOS	
Curvas de carga vs alargamiento para la condición de recocido	1-5
Curvas de carga vs alargamiento para la condición de T4	6-10
Curvas de carga vs alargamiento para la condición de T6	11-15
Composición química del aluminio AA6061	16

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Aplicaciones de la aleación de aluminio 6061	12
2.2 Diagrama de fases Al–Mg-Si	13
2.3 Etapas del endurecimiento por envejecimiento	14
2.4. Esquema de una máquina de ensayos de tracción.	16
2.5. Curva Esfuerzo vs deformación de un material metálico.	17
2.6. Límite proporcional (P), límite elástico(LE).	18
2.7 Límite de Fluencia (Y).	19
2.8. Resistencia a la Fluencia (σ_y).	20
2.9. Resistencia límite de un material dúctil.	20
2.10. Resistencia a la ruptura (B).	21
2.11. Deformaciones longitudinales y transversales.	23
2.12. Curva esfuerzo vs deformación real, e ingenieril.	24
2.13. Comportamiento en la zona plástica en escala log –log.	26
2.14. Barra cilíndrica sometida a torsión.	27
2.15. Variación de la deformación angular en una barra cilíndrica sometida a torsión.	28
2.16. Tensiones tangenciales producidas por la torsión.	29
2.17. Barra de longitud unitaria sometida a torsión.	30
2.18. Distribución de esfuerzos en la sección.	31
2.19. Comportamiento de la región plástica en la curva momento torsor vs ángulo de giro.	35
2.20. Curva esfuerzo cortante vs deformación angular.	38
2.21. Resumen de las diferentes escalas Rokwell y sus identadores	42
3.1. Diagrama de proceso.	45
3.2 Probeta de tracción normalizada, todas las medidas en mm.	46
3.3. Probeta para ensayo de torsión, todas las medidas en mm.	47

3.4. Probeta para el ensayo de dureza, todas las medidas en mm.	47
3.5. Ciclo térmico del recocido	48
3.6. Ciclo térmico del tratamiento T4	49
3.7. Ciclo térmico del tratamiento T6	50
3.8. Equipo universal de ensayo de materiales “GALDABINI”	51
3.9. Corte transversal en las probetas de torsión.	53
3.10. Horno para tratamientos térmicos.	55
3.11. Máquina universal para ensayos de tracción.	56
3.12. Máquina para ensayo de torsión	56
3.13. Durómetro digital Rockwell	57
4.1. Resultados del ensayo de dureza brinell estándar en recocido.	59
4.2. Resumen del ensayo de dureza en recocido.	59
4.3. Resultados de los ensayos de dureza en T4.	60
4.4. Resumen del ensayo de dureza en T4.	61
4.5. Resultados del ensayo de dureza en T6.	62
4.6. Resumen del ensayo de dureza en T6.	62
4.7. Gráfica de Carga vs Alargamiento de la probeta N°1 de recocido.	64
4.8. Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril probeta N° 1 de recocido, aplicación del método offset 0,2%.	66
4.9. Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril de las 5 probetas de recocido.	68
4.10. Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril de las 5 probetas de T4.	69
4.11. Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril de las 5 probetas de T6.	70
4.12. Condición inicial de las probetas del ensayo de torsión.	71
4.13. Gráfica de momento torsor vs ángulo de giro probeta N° 1 de recocido.	72
4.14. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 1 de recocido.	74
4.15. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 1	75

ubicación del límite proporcional.	
4.16. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 1 aplicación del método del offset.	76
4.17. Condición de la probeta N° 1 una vez finalizado el ensayo de torsión.	77
4.18. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 2 de recocido.	78
4.19. Condición de la probeta N° 2 una vez finalizado el ensayo de torsión.	78
4.20. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 3 de recocido.	79
4.21. Condición de la probeta N° 3 una vez finalizado el ensayo de torsión.	79
4.22. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 4 de recocido.	80
4.23. Condición de la probeta N° 4 una vez finalizado el ensayo de torsión.	80
4.24. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 5 de recocido.	81
4.25. Condición de la probeta N° 5 una vez finalizado el ensayo de torsión.	81
4.26. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 1 de T4.	83
4.27. Condición de la probeta N° 1 una vez finalizado el ensayo de torsión.	84
4.28. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 2 de T4.	84
4.29. Condición de la probeta N° 2 una vez finalizado el ensayo de torsión.	85
4.30. Gráfica de Esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 3 de T4.	85
4.31. Condición de la probeta N° 3 una vez finalizado el ensayo de torsión.	86
4.32. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 4 de T4.	86
4.33. Condición de la probeta N° 4 una vez finalizado el ensayo de torsión.	87
4.34. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 5 de T4.	87
4.35. Condición de la probeta N° 5 una vez finalizado el ensayo de torsión.	88
4.36. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 1 de T6.	89
4.37. Condición de la probeta N° 1 una vez finalizado el ensayo de torsión.	90

4.38. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 2 de T6.	90
4.39. Condición de la probeta N° 2 una vez finalizado el ensayo de torsión.	91
4.40. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 3 de T6.	91
4.41. Condición de la probeta N° 3 una vez finalizado el ensayo de torsión.	92
4.42. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 4 de T6.	92
4.43. Condición de la probeta N° 4 una vez finalizado el ensayo de torsión.	93
4.44. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 5 de T6.	93
4.45. Condición de la probeta N° 5 una vez finalizado el ensayo de torsión.	94
5.1. Gráfica de dureza brinell vs tratamientos térmicos.	100
5.2. Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril típicas para los tratamientos de O, T4 y T6.	101
5.3. Gráfica de variación de las propiedades mecánicas a tracción del AA6061 con la aplicación de los tratamientos O, T4 y T6.	104
5.4. Gráficas de esfuerzo de corte vs deformación angular de las 5 probetas en recocido.	106
5.5. Gráficas de esfuerzo de corte vs deformación angular de las 5 probetas de T4.	108
5.6. Gráficas de esfuerzo de corte vs deformación angular de las 5 probetas de T6.	111
5.7. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular para O, T4 y T6.	113
Figura N° 5.8. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular de la zona elástica típicas del AA6061 para O, T4 y T6.	114
5.9. Gráfica de variación de las propiedades mecánicas a torsión del AA6061 con la aplicación de los tratamientos O, T4 y T6.	115
5.10. Macroscopía a probeta de torsión en T6.	117
5.11. Macroscopía a probeta de torsión en T4.	118
5.12. Macroscopía a probeta de torsión en O.	119

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Designaciones del grado de endurecimiento básico	10
2.2. Subdivisiones del tratamiento térmico	10
2.3. Continuación de subdivisiones del tratamiento térmico	11
3.1. Composiciones químicas límites del AA6061	46
3.1. Muestra de los ensayos.	54
4.1. Resumen del ensayo de dureza brinell estándar para la condición de recocido.	58
4.2. Resumen del ensayo de dureza Rockwell 15-T para la condición T4.	60
4.3. Resumen del ensayo de dureza Rockwell B para la condición T6.	61
4.4. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo vs deformación ingenieril para la probeta N° 1 de recocido.	67
4.5. Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de tracción en recocido.	67
4.6. Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de tracción en T4.	69
4.7. Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de tracción en T6.	70
4.8. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 1 de recocido.	77
4.9. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 2 de recocido.	78
4.10. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 3 de recocido.	79
4.11. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 4 de recocido.	80
4.12. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 5 de recocido.	81
4.13. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 1 de T4.	83

4.14. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 2 de T4.	85
4.15. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 3 de T4.	86
4.16. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 4 de T4.	87
4.17. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 5 de T4.	88
4.18. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 1 de T6.	90
4.19. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 2 de T6.	91
4.20. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 3 de T6.	92
4.21. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 4 de T6.	93
4.22. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 5 de T6.	94
4.23. Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de tracción y torsión.	95
4.24. Relaciones entre las propiedades a tracción y torsión.	95
4.25. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de recocido, para los ensayos de dureza, tracción y torsión.	97
4.26. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de T4, para los ensayos de dureza, tracción y torsión.	97
4.27. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de T6, para los ensayos de dureza, tracción y torsión.	98
5.1. Resumen de los valores promedio obtenidos en los ensayos de dureza.	99
5.2. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición	102

de recocido para el ensayo de tracción.	
5.3. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de T4 para el ensayo de tracción.	103
5.4. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de T6 para el ensayo de tracción.	103
5.5. Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de torsión en recocido.	105
5.6. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de recocido para el ensayo de torsión.	107
5.7. Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de torsión en T4.	108
5.8. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de T4 para el ensayo de torsión.	109
5.9. Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de torsión en T6.	110
5.10. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de T6 para el ensayo de torsión.	112
5.11. Resumen de los valores promedios obtenidos de los ensayos de torsión.	114

NOMENCLATURA

Variable	Descripción	Unidad
ε_0	Deformación inicial	mm/mm
m	Coefficiente de endurecimiento por deformación	adimensional
σ_0	Esfuerzo inicial	MPa
σ	Esfuerzo real	MPa
e	Deformación ingenieril	mm/mm
σ_y	Esfuerzo de fluencia	MPa
Y	Límite de fluencia	MPa
P	Carga o fuerza	N
Lf	Longitud final de la probeta	mm
Lo	Longitud inicial de la probeta	mm
%A	Porcentaje de alargamiento	porcentual
Ao	Área inicial de la probeta	m ²
Af	Área final de la probeta	m ²
v	Modulo de poisson	adimensional
ε	Deformación real	mm/mm
σ_e	Esfuerzo ingenieril	MPa
K	Límite de fluencia al corte	MPa
n	Coefficiente de endurecimiento por deformación	adimensional
γ	Deformación angular	rad/rad
r	Cualquier radio interior de la probeta	mm
R	Radio exterior de la probeta	mm
L	Longitud calibrada de la probeta de torsión	mm
τ	Esfuerzo de corte	MPa
G	Modulo de rigidez al corte	GPa
Mt	Momento torsor	N.m

A	Área	m^2
b	Brazo	m
F	Fuerza	N
θ	Ángulo de deformación	grados
I_p	Inercia polar	m^4
θ_L	Deformación angular en la zona plástica	rad/rad
M_o	Momento torsor para una deformación unitaria	N.m
$\tau_{m\acute{a}x}$	Esfuerzo de corte máximo	MPa
$\sigma_1, \sigma_2,$ σ_3	Esfuerzos principales	MPa
S	Límite de fluencia en compresión	MPa
EP	Endurecimiento por precipitación	adimensional
EN	Envejecimiento natural	adimensional
EA	Envejecimiento artificial	adimensional

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
COORDINACIÓN DE PROYECTOS DE GRADO**

SINOPSIS DEL PROYECTO DE GRADO

TITULO DEL TRABAJO

Evaluación del comportamiento mecánico a torsión de la aleación de aluminio AA6061.

FECHA DE INICIO DEL TRABAJO: 2-2006

FECHA DE EX. FINAL: 2-2007

FECHA DE ENTREGA DE EJEMPLARES DEFINITIVOS A DIRECCIÓN DE ESCUELA: 2-2007

SINOPSIS:

El objetivo principal de este trabajo era evaluar el comportamiento mecánico a torsión de la aleación de aluminio AA6061 con diferentes tratamientos térmicos. Para llevar a cabo este trabajo fue necesario determinar las propiedades mecánicas a tracción, torsión, así como la variación de dureza para cada tratamiento térmico aplicado, recocido (O), envejecimiento natural (T4), envejecimiento artificial (T6). Los ensayos de torsión se llevaron a cabo en la máquina para ensayos de torsión del departamento de materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo; las probetas ensayadas eran cilíndricas macizas con extremos cuadrados, geometría ésta que se encuentra regida por la construcción de la máquina. Uno de los parámetros a tomar en cuenta durante el ensayo fue la velocidad del mismo, en vista de que no existe una norma que indique esta velocidad, la misma fue seleccionada por medio de una revisión bibliográfica, la cual arrojó una velocidad de una revolución por minuto constante. Las propiedades obtenidas del ensayo de torsión fueron influenciadas de manera significativa por la aplicación de los tratamientos térmicos aplicados produciendo un aumento tanto del esfuerzo de fluencia al corte como del esfuerzo último al corte, además de una disminución de la ductilidad del material. Una vez realizados los ensayos de tracción; se determinaron las relaciones entre los resultados obtenidos de ambos ensayos, obteniendo así la relación experimental entre el esfuerzo de fluencia a tracción y el esfuerzo de fluencia al corte, relación que disminuye con la aplicación de los tratamientos de endurecimiento. Esta relación fue comparada con los criterios teóricos de fluencia de von Mises y Tresca comprobando que el criterio de von Mises se acerca mucho más a los datos obtenidos experimentalmente que el criterio de Tresca, siendo para la condición de recocido donde hubo menor diferencia entre los resultados experimentales y los teóricos.

CEDULA DE IDENTIDAD

C.I.: 17.315.802

C.I.: 16.864.639

ESTUDIANTES

Luis Duran

Diego Van Deventer

FIRMA

FIRMA

PROFESOR GUÍA: Juan C. Pereira

JURADO: Sandra Cabello

JURADO: Eleazar Diaz



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado para evaluar el trabajo especial de grado titulado **“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A TORSIÓN DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA6061”**, realizado por los bachilleres: **Duran Luis**, cédula de identidad 17.315.802 y **Van Deventer Diego**, cédula de identidad 16.864.639, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho tema.

Prof. Juan C. Pereira
Tutor

Prof. Eleazar Díaz
Jurado

Prof. Sandra Cabello
Jurado

Valencia, Enero de 2008

Dedicatoria

A mi madre por ser participe a lo largo de la carrera de todos los buenos y malos momentos, por su dedicación, esfuerzo, entrega, desde el primer día siempre estuvo a mi lado y nunca se ha separado, a mi padre por animarme a estudiar y a conseguir esta meta, y a mi hermana por prestarme su apoyo cuando lo necesitaba.

A Angélica quien me ha acompañado en los últimos años y que ha vivido de cerca esta experiencia, siempre apoyándome cuando las cosas no salían bien, y a su familia quien me ha acogido como uno más de ellos.

A todas aquellas personas involucradas en este trabajo, que de alguna y otra forma sirvieron de ayuda para alcanzar los objetivos.

Diego Van Deventer

Dedicatoria

A mis padres quienes no solo durante el tiempo que duro este trabajo de grado sino durante toda la carrera, me han ofrecido su apoyo incondicional, permitiendo así la posibilidad de dedicarme solo a mis estudios sin tener que preocuparme por alguna otra cosa. Que a pesar del distanciamiento que puede haber producido los horarios de clases, las muchas noches de estudio y el ajetreo típico de esta carrera, no hay en este mundo personas que estén más orgullosas y felices de que yo esté finalizando esta etapa de mi vida que ellos.

Luis Fernando Durán

Agradecimientos

Al Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación de la Universidad de Carabobo, lugar en donde realizamos la mayoría de los ensayos y a todo su personal docente y técnico que brindaron su apoyo a lo largo de la investigación.

Al taller metalmecánico JLA, en cuyas instalaciones se realizaron todos los mecanizados requeridos para la fabricación de las probetas.

Al tecnológico de la Victoria por facilitar la realización de los ensayos de dureza Brinell.

A todas aquellas personas que de alguna u otra forma ayudaron a que este trabajo se llevara a cabo.

Luis Duran y Diego Van Deventer



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A TORSIÓN DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA6061”

Resumen

El objetivo principal de este trabajo era evaluar el comportamiento mecánico a torsión de la aleación de aluminio AA6061 con diferentes tratamientos térmicos. Para llevar a cabo este trabajo fue necesario determinar las propiedades mecánicas a tracción, torsión, así como la variación de dureza para cada tratamiento térmico aplicado, recocido (O), envejecimiento natural (T4), envejecimiento artificial (T6). Los ensayos de torsión se llevaron a cabo en la máquina para ensayos de torsión del departamento de materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo; las probetas ensayadas eran cilíndricas macizas con extremos cuadrados, geometría ésta que se encuentra regida por la construcción de la máquina. Uno de los parámetros a tomar en cuenta durante el ensayo fue la velocidad del mismo, en vista de que no existe una norma que indique esta velocidad, la misma fue seleccionada por medio de una revisión bibliográfica, la cual arrojó una velocidad de una revolución por minuto constante. Las propiedades obtenidas del ensayo de torsión fueron influenciadas de manera significativa por la aplicación de los tratamientos térmicos aplicados produciendo un aumento tanto del esfuerzo de fluencia al corte como del esfuerzo último al corte, además de una disminución de la ductilidad del material. Una vez realizados los ensayos de tracción; se determinaron las relaciones entre los resultados obtenidos de ambos ensayos, obteniendo así la relación experimental entre el esfuerzo de fluencia a tracción y el esfuerzo de fluencia al corte, relación que disminuye con la aplicación de los tratamientos de endurecimiento. Esta relación fue comparada con los criterios teóricos de fluencia de von Mises y Tresca comprobando que el criterio de von Mises se acerca mucho más a los datos obtenidos experimentalmente que el criterio de Tresca, siendo para la condición de recocido donde hubo menor diferencia entre los resultados experimentales y los teóricos.



INTRODUCCIÓN

En la actualidad las aleaciones de aluminio han adquirido gran importancia dentro de las industrias del conformado de metales, cada una con gran variedad de usos y aplicaciones, la aleación de aluminio AA6061, tiene unas propiedades de conformabilidad, soldabilidad, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión que sin ser ninguna de ellas muy extraordinarias, constituyen un compromiso muy equilibrado; estas propiedades hace que sea utilizado en una gran variedad de productos extruidos y demás.

Las propiedades mecánicas a torsión de esta aleación son valores que poco han sido estudiados, debido a la posibilidad de conseguirlos a través de criterios de fluencia por medio de un ensayo de tracción; el propósito general de esta investigación es obtener estos valores de manera experimental mediante la realización de un ensayo de torsión, además realizar ensayos de tracción para la posterior aplicación de los criterios de fluencia para establecer las comparaciones pertinentes de los valores experimentales y los valores teóricos.

La aleación de aluminio AA6061, se encuentra en el mercado bajo diferentes condiciones de tratamientos térmicos, por lo que es necesario para esta investigación, realizar los diferentes ensayos mecánicos bajo condiciones diferentes de tratamientos térmicos más comunes para esta aleación (recocido, T4, T6).

Además de los ensayos de tracción y torsión, es necesario realizar ensayos de dureza, para así caracterizar el material y constatar la correcta aplicación de los tratamientos térmicos, finalmente para caracterizar las probetas de torsión se realizará una macroscopía a las probetas deformadas después del ensayo de torsión.

CAPÍTULO I
EL PROBLEMA



1.1 Planteamiento del Problema

La constante necesidad en los procesos actuales de manufactura, en donde son más exigentes las condiciones a las que van a ser sometidas los materiales hace que un conocimiento profundo de las propiedades mecánicas de los mismos se haga indispensable.

La aleación de aluminio AA6061 se utiliza en productos extruidos, perfiles arquitectónicos, marco de bicicletas, fabricación de equipos de transporte y estructuras soldadas, entre otras. En muchas de estas aplicaciones el material está tratado térmicamente para conseguir en ellos alguna característica que sea favorable para dicha aplicación.

La aleación de aluminio AA6061 tiene un gran uso, primordialmente porque es de las aleaciones de aluminio que pueden ser endurecibles por precipitación, esta capacidad de mejorar continuamente sus características físicas y mecánicas específicas, hacen que tenga una importancia práctica considerable, es por esto que el conocimiento de las propiedades mecánicas del mismo se ha hecho necesario; entre estas propiedades se encuentran las resultantes del ensayo de torsión, que son las menos conocidas.

Mediante un ensayo de torsión se pueden conocer valores de fluencia a deformaciones grandes, deformaciones que por las características del ensayo de tracción no se pudiesen obtener, también la posibilidad de obtener estos valores experimentales se hace relevante en aplicaciones en donde este aluminio se encuentre sometido a torsión.

Debido a que la aleación de aluminio AA6061, viene presentada comercialmente bajo diferentes tratamientos térmicos como los son el T4, o el T6, las



propiedades mecánicas van a variar entre un tratamiento y otro, la forma en cómo varían los esfuerzos resulta útil para conocer qué tratamiento térmico es más favorable para algún uso en específico. Las variaciones de los esfuerzos que se obtienen del ensayo de tracción pueden resultar familiares ya que hay varios estudios realizados acerca de esto.

Los valores de los esfuerzos que se obtienen producto del ensayo de torsión han sido poco estudiados, debido a que algunas de las propiedades mecánicas que se pueden obtener en un ensayo de torsión (esfuerzo de fluencia al corte), se obtienen a través de ensayos simples de tracción aplicando criterios de fluencia existentes y se obtienen valores a torsión. Lo que se quiere hacer es obtener estos valores de manera experimental mediante un ensayo de torsión y así establecer las comparaciones pertinentes y observar la influencia de ciertos tratamientos térmicos en algunas de las propiedades de este material.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento mecánico a torsión de la aleación de aluminio AA6061.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades mecánicas a tracción de la aleación de aluminio AA 6061 con diferentes tratamientos térmicos.



- Determinar la variación de dureza a muestras de la aleación de aluminio AA6061 con diferentes tratamientos térmicos.
- Determinar las propiedades mecánicas a torsión de la aleación de aluminio AA6061 con diferentes tratamientos térmicos.
- Determinar la relación que existe entre las propiedades a tracción, torsión y dureza para muestras ensayadas con diferentes tratamientos térmicos.
- Comparar los resultados obtenidos con los tabulados para la aleación de acuerdo a la AA.

1.3 Justificación de la investigación

En este trabajo de investigación se estudiarán y relacionarán las propiedades mecánicas obtenidas de un ensayo de tracción con las resultantes de un ensayo de torsión del aluminio AA 6061 para distintos tratamientos térmicos, la obtención de estos valores y su organización en una base de datos facilitará la optimización de los parámetros y condiciones bajo los cuales están regidos los procesos de conformado en los que está envuelto este material, de igual forma esta data servirá para elaboración de trabajos posteriores y permitirá ampliar y facilitar la resolución de problemas en el área de Procesos de Fabricación y Materiales, así como para el diseño de elementos de máquina.

Este trabajo viene a continuar la más reciente tendencia de la línea de investigación de Comportamiento Mecánico de los Materiales de caracterizar a este material y obtener una buena cantidad de información que facilite el uso del mismo en nuevas aplicaciones.



1.4 Limitaciones y Delimitaciones

1.4.1 Limitaciones

- La disponibilidad horaria y humana de los laboratorios de materiales y procesos de fabricación de la Universidad de Carabobo.

1.4.2 Delimitaciones

- Los ensayos se realizaran a la aleación de aluminio AA6061, para tres tratamientos térmicos, O, T4 y T6, siendo éstos los más utilizados para este material.
- Todos los ensayos de tracción, torsión y dureza van a ser realizados a temperatura ambiente.
- Los ensayos de torsión se realizaran a barras cilíndricas macizas de aluminio.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO



2.1 Revisión de antecedentes

2.1.1 Antecedente N °1

Divo, J. y Kirchof, R. (2006). “*Construction and validation test of a torsion test machine*”. Journal of Materials Processing Technology, CLXXIX, 23 – 29.

Este trabajo presentó el desarrollo, ensayo y uso de un prototipo de máquina para ensayo de torsión. Aparte de construir la máquina para el ensayo, elaboraron pruebas en distintos materiales como acero 1020, aluminio y bronce. Entre los resultados experimentales presentados está la curva de momento torsor, módulo de corte, límite de fluencia al corte versus deformación angular para todos los materiales antes mencionados. Entre sus conclusiones más relevantes está que para el aluminio ensayado las propiedades mecánicas del mismo decayeron considerablemente para un ángulo de torsión de 200°, además demostraron que los parámetros característicos de la zona plástica del material (ϵ_0 , m , σ_0) varían a distintos grados de deformación angular.

2.1.2 Antecedente N °2

Forn A. y Martín E. (2005). “*Flujo plástico del material compuesto 6061/Al2O3/22p*”. Anales de mecánica de la fractura, vol. 22, 310 – 316.

En este trabajo se ha analizado la capacidad de endurecimiento por deformación plástica de la aleación de aluminio reforzada con partículas de óxido de aluminio en diferentes estados metalúrgicos: material compuesto recocido, con tratamiento térmico de envejecimiento natural (T4) y con envejecimiento artificial (T6). El comportamiento plástico de la correspondiente aleación monolítica se ha realizado determinando el grado de endurecimiento por deformación plástica,



mediante el cálculo del exponente de endurecimiento. Se observa, en todos los casos, una variación no lineal de dicho exponente con la deformación. El análisis de las superficies de fractura de las muestras ensayadas, mediante microscopía electrónica de barrido, permitió determinar el efecto de los tratamientos térmicos de recocido, T4 y T6 en los mecanismos de fractura y en el comportamiento plástico del material.

2.1.3 Antecedente N°3

Palkovic, E. y Sáñez, F. (2006). “*Diseño y construcción de una máquina para realizar ensayos de torsión*”. Trabajo de grado no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia.

El objetivo de este trabajo fue diseñar y construir una máquina para realizar ensayos de torsión en ejes cilíndricos macizos, de aluminio, bronce y latón. Para ello fue necesario cumplir con varios aspectos propuestos, tales como recolección de bibliografía, formulaciones de hipótesis, evaluaciones de posibles soluciones, diseño y selección de los elementos necesarios así como la fabricación de la máquina y el desarrollo de un manual de uso y mantenimiento de la misma. Como parte del trabajo se realizaron ensayos demostrativos con la máquina de ensayo de torsión construida y se puede apreciar la gráfica de momento torsor vs ángulo de giro de la probeta que la misma máquina proporciona luego de realizado el ensayo.

2.1.4 Antecedente N° 4

Machado, N. y Ramírez, M. (2000). “Efectos de los tratamientos térmicos T5 y T6 sobre las propiedades mecánicas y coeficiente de dilatación de la aleación hipereutéctica de aluminio M-124-Sr”. Trabajo de grado no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia.



La situación planteada en este trabajo de grado trata de una empresa productora de pistones, la cual en busca de mayor eficiencia y rangos de temperaturas de trabajo más elevados, pretende cambiar la aleación F -132 por una nueva aleación hipereutéctica de aluminio silicio M-124-Sr, el objetivo principal de este trabajo es el de determinar la factibilidad de uso de esta aleación en la fabricación de pistones; para esta tarea se estudió entre otras cosas las propiedades mecánicas de la aleación y el efecto de los tratamientos térmicos T5 y T6 en las propiedades mecánicas de esta, entre los resultados más sobresalientes está que las mejoras obtenidas con la aplicación del T5, en cuanto a propiedades mecánicas no fueron significativas, mientras que con el T6 se introduce mejoras significativas, por lo que es el tratamiento térmico más adecuado para este tipo de aleación; por último se concluye que la aleación M-124-Sr es ideal para la fabricación de pistones.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Aleaciones de aluminio

El aluminio y sus aleaciones son materiales que destacan por su ligereza y resistencia a la corrosión, así como por su elevada conductividad térmica y eléctrica. Las propiedades mecánicas del aluminio puro son bastante moderadas, pero aleado con otros elementos las mejora notablemente. Si se comparan la resistencia o la rigidez específica (en relación con la densidad) los aluminios son más ventajosos que los aceros en determinadas aplicaciones (aeronáutica, vehículos, piezas a grandes aceleraciones). Estas cualidades, junto con la gran aptitud para la conformación (deformación en frío, forja, moldeo, extrusión, mecanizado), han convertido a los aluminios en el segundo grupo de materiales más empleados.

Los elementos aleantes principales del aluminio son: cobre (Cu), silicio (Si), magnesio (Mg), zinc (Zn) y manganeso (Mn) y en menores cantidades existen,



frecuentemente, como impurezas o aditivos: hierro (Fe), cromo (Cr) y titanio (Ti). Para aleaciones especiales se adiciona: níquel (Ni), cobalto (Co), plata (Ag), litio (Li), vanadio (V), circonio (Zr), estaño (Sn), plomo (Pb), cadmio (Cd) y bismuto (Bi).

2.2.1.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio según AA. [1]

Como en otros metales, se hace distinción entre las aleaciones de forja (incluyen los de extrusión y laminación) por un lado y, los de moldeo, por otro. A pesar de la gran variedad de aleaciones de forja normalizados, el mercado ofrece una selección relativamente reducida a partir de la cual, siempre que sea posible, hay que hacer la selección. Hay más libertad en las aleaciones de moldeo, ya que en cada colada se puede ajustar a la composición deseada a partir de las proporciones utilizadas de lingotes aleación madre (lingotes para fundir, de composiciones sencillas definidas).

Aleaciones de aluminio de forja

Los productos laminados o extruidos se suministran en una gran diversidad de formas (chapas, planchas, bandas, barras, tubos, hilo de aluminio y una gran variedad de perfiles), que pueden obtenerse en diferentes estados de suministro (recocido, O; deformado en frío, Hxy; bonificado, Tx)., estas aleaciones son clasificadas de acuerdo con los elementos aleantes principales que contenga la aleación, para identificar las aleaciones de aluminio forjado se utiliza una designación numérica de cuatro dígitos. El primer dígito indica el grupo de aleaciones que contienen elementos aleantes específicos. Los dos últimos dígitos identifican la aleación de aluminio o indican la pureza en el aluminio, El segundo dígito indica la modificación de la aleación original o límites de impurezas.



Designaciones del grado de endurecimiento: las designaciones del grado de endurecimiento figuran después de la designación de la aleación y están separadas por un guión (por ejemplo, 1100 – O). Las subdivisiones del grado de endurecimiento básico se indican por uno o más dígitos que siguen a la letra de la designación básica, en las tablas número 1 y 2, se presentan estas designaciones y subdivisiones.

Tabla N° 2.1. Designaciones del grado de endurecimiento básico

Designación	Características
F	Tal como se fabricó. Sin control sobre la cuantía del endurecimiento, ningún límite de propiedades mecánicas.
O	Recocido y recristalizado. Endurecido con mínima resistencia y máxima ductilidad.
H	Endurecimiento por deformación.
T	Tratado térmicamente para producir endurecimientos estables.

Fuente: Smith, W. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, página 455.

Tabla N° 2.2. Subdivisiones del tratamiento térmico

Subdivisión	Características
T1	Envejecimiento natural. Se enfría el producto desde un proceso de modelado a altas temperaturas y se envejece de modo natural hasta una condición sustancialmente estable.
T3	Tratamiento térmico en solución, trabajando en frío y envejecimiento natural hasta una condición sustancialmente estable.
T4	Tratamiento térmico en solución y envejecimiento natural hasta una condición sustancialmente estable.
T5	Enfriado desde el proceso de modelado a altas temperaturas y después envejecimiento artificial.

Fuente: Smith, W. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, página 455.



Tabla N° 2.3. Continuación de subdivisiones del tratamiento térmico

T6	Tratamiento térmico en solución y envejecimiento artificial.
T7	Tratamiento térmico en solución y estabilizado
T8	Tratamiento térmico en solución, trabajado en frío y envejecimiento artificial

Fuente: Smith, W. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, página 455.

Aleaciones de aluminio de moldeo

Son las aleaciones que se obtienen principalmente de procesos como fundición de arena, fundición de molde permanente y fundición en coquilla; las cualidades que se esperan de los aluminios de moldeo son una buena colabilidad (aptitud para llenar correctamente la cavidad de un molde), una contracción relativamente pequeña y la formación de fisuras (causa de la fragilidad) en la contracción. Estas aleaciones se agrupan según los elementos aleantes principales que pueden contener; mediante la utilización de un número de cuatro dígitos con un punto entre los dos últimos dígitos (Ejemplo 332.0).

2.2.2 Aleación de aluminio 6061 [12]

La aleación de aluminio 6061 es al igual que las demás aleaciones de aluminio un material que se destaca por su ligereza y resistencia a la corrosión, así como por su elevada conductividad térmica y eléctrica. Este aluminio pertenece al grupo de aleaciones Al-Mg-Si (serie 6xxx según AA), las cuales presentan porcentajes de Mg y Si inferiores a 1% y bonificables, estos dos componentes magnesio y silicio se combinan entre sí para formar un compuesto intermetálico Mg_2Si , tiene unas propiedades de conformabilidad, soldabilidad, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, que sin ser ninguno de ellos extraordinario, constituyen un compromiso muy equilibrado, estas propiedades hacen que sea usado

en gran variedad de aplicaciones como productos extruidos, perfiles arquitectónicos, marcos de bicicletas, fabricación de equipos de transporte y estructuras soldadas, entre otras.



Figura N° 2.1. Aplicaciones de la aleación de aluminio 6061

2.2.2.1 Propiedades físicas.

Las diferentes propiedades físicas de la aleación con pequeñas diferencias son las mismas que corresponderían a la del aluminio puro, entre ellas están; una densidad baja de $2,7 \text{ g/cm}^3$, una conductividad térmica elevada 180 W/m-K , lo cual resulta beneficioso en piezas que deben conducir o disipar calor; calor específico elevado $0.896 \text{ J/g-}^\circ\text{C}$, y además una dilatación térmica elevada.

2.2.2.2 Propiedades mecánicas.

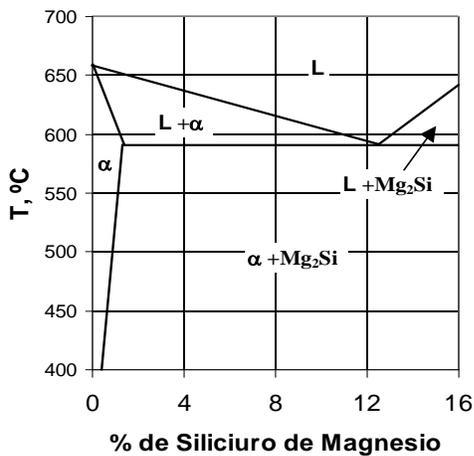
A temperatura ambiente (en condiciones de recocido), la resistencia a la fluencia es de 55.2 MPa , el esfuerzo último a la tracción de 124 MPa , un módulo de elasticidad moderado de 68.9 GPa , las durezas son algo bajas, en general no adecuadas para soportar grandes presiones superficiales, la resistencia a la fatiga es aceptable. El comportamiento a temperaturas elevadas es limitado, ya a partir de 100°C , la fluencia comienza a manifestarse de forma acusada y disminuyen considerablemente las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, límite elástico y dureza) y, a partir de 350°C la resistencia sólo se mantiene en valores residuales.



En cambio, las propiedades a bajas temperaturas son excelentes, la resistencia aumenta y la resiliencia, el límite elástico y el alargamiento se mantienen hasta temperaturas operativas de $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.2.2.3 Tratamientos térmicos

Una de las características del aluminio AA6061 es su capacidad de ser endurecido por precipitación, dicha capacidad se debe a que reúne las condiciones necesarias para ser sometido a este tratamiento térmico como lo es que presenta una solubilidad decreciente a medida que la temperatura disminuye (como se observa en el diagrama de fases de la figura N° 2.2), posee un precipitado duro y frágil, la aleación además es templeable.



[13] Figura N° 2.2 Diagrama de fases Al–Mg–Si

El objeto del reforzamiento por precipitación es crear, en una aleación tratada térmicamente, una dispersión uniforme de un precipitado coherente fino y duro, en una matriz más blanda y dúctil, con esto las partículas precipitadas actúan como obstáculos del movimiento de las dislocaciones produciendo el incremento de la resistencia mecánica de la aleación. [13] Este tratamiento consta de tres pasos:

- Tratamiento por solución: Se calienta la aleación a una temperatura por encima de la temperatura de solvus y ahí se sostiene hasta que se produzca una solución sólida homogénea.
- Templado: Después del tratamiento por solución, se procede a enfriar rápidamente la muestra a una temperatura inferior, usualmente la ambiental, y por ello, el medio de enfriamiento es normalmente agua a temperatura ambiente. La estructura sólida de la aleación después del temple por agua consta de una solución sólida supersaturada.
- Envejecimiento: La aleación se calienta a una temperatura menor a la de solvus. A esta temperatura de envejecimiento, los átomos sólo pueden difundirse a distancias cortas. Dado que la solución sólida supersaturada no es estable, los átomos adicionales se difunden a numerosos sitios de nucleación y crecen los precipitados, cuando la precipitación se hace a temperatura ambiente se conoce como envejecimiento natural, y cuando se produce a temperaturas más altas se conoce como envejecimiento artificial.

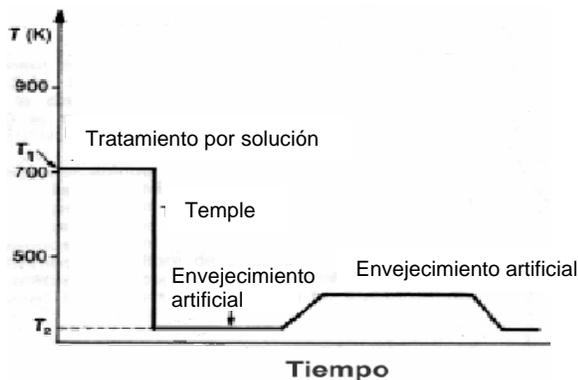


Figura N° 2.3. Etapas del endurecimiento por envejecimiento



2.2.3 Análisis de esfuerzos y deformaciones

En esta sección se presentan las bases teóricas necesarias para entender el comportamiento de un material bajo los ensayos de tracción y torsión, además se presentan una serie de relaciones que describen dicho comportamiento.

Cuando a un cuerpo se le aplica una fuerza externa que tiende a cambiar su forma o tamaño, el cuerpo se resiste a esa fuerza. La resistencia externa del cuerpo se conoce como esfuerzo y los cambios en las dimensiones del cuerpo que la acompañan se llaman deformaciones. El esfuerzo total es la resistencia interna total que actúa en una sección del cuerpo.

2.2.3.1 Estudio del comportamiento mecánico a tracción [2]

El ensayo de tracción es uno de los que se realiza con más frecuencia para determinar ciertas propiedades mecánicas. Este se basa en aplicar una carga axial a la probeta en sus extremos, esta carga provoca una deformación en la probeta hasta alcanzar su rotura.

La importancia de este ensayo radica en que simula las condiciones reales de trabajo del material ensayado, en este ensayo el material se lleva hasta la fractura en un intervalo de tiempo relativamente corto a una velocidad constante, proporcionada por el equipo universal de ensayos a tracción cuyo esquema simple se muestra en la figura N° 2.4.

En la máquina se observa cómo la probeta debe estar sujeta por sus extremos a la máquina y ésta desplaza sus mordazas en forma axial lo que produce una carga sobre la probeta, con esta carga y la sección transversal inicial de la probeta se puede determinar el esfuerzo producido por cualquier fuerza, el alargamiento de la probeta o

deformación se mide como una relación entre la longitud inicial y la longitud final de la probeta en la zona calibrada.

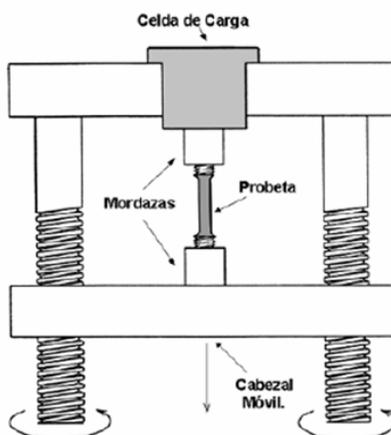


Figura N° 2.4. Esquema de una máquina de ensayos de tracción.

A continuación se presentan las ecuaciones para el cálculo de esfuerzo (σ) y deformación (e) en un ensayo de tracción.

$$\sigma = \frac{F}{A_o} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

$$e = \frac{L_f - L_o}{L_o} \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Durante el transcurso del ensayo, el área de la sección transversal de la probeta no se mantiene constante, eso trae que la curva obtenida con las ecuaciones anteriores no es del todo real, es por esto que se elaboran dos curvas esfuerzo vs deformación, la ingenieril, en donde no se toma en cuenta la variación de la sección transversal y la real en donde si se toma en cuenta esta variación de área en la sección transversal.

Todos los materiales metálicos tienen un comportamiento elástico y plástico, el rango elástico representa el intervalo de deformaciones que soporta el material sin

presentar deformaciones permanentes. En este rango el material sufre un proceso de recuperación en donde recobra sus dimensiones iniciales si la fuerza aplicada es removida, en otras palabras la deformación causada por la aplicación de la fuerza desaparece cuando cesa la acción de la misma, mientras que en el rango plástico las deformaciones son permanentes y terminan por deformar al material y modifica sus dimensiones iniciales.

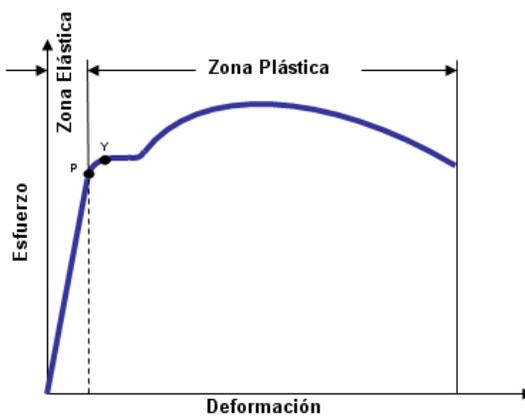


Figura N° 2.5. Curva Esfuerzo vs deformación de un material metálico.

Información que se obtiene del ensayo de tracción

Por medio de la curva esfuerzo vs deformación ingenieril se pueden extraer los siguientes resultados:

Límite proporcional: para muchos materiales estructurales se ha encontrado que la parte inicial de la gráfica esfuerzo-deformación puede ser aproximada por la recta OP. En este intervalo, el esfuerzo y la deformación son proporcionales entre sí (Ley de Hooke), de manera que cualquier incremento en esfuerzo resultará de un aumento proporcional a la deformación. El esfuerzo en el límite del rango de proporcionalidad P se conoce como límite de proporcionalidad.

Límite elástico: este indica que ahora el material tiene una deformación permanente; por tanto, el límite elástico puede definirse como el esfuerzo mínimo al que ocurre la

primera deformación permanente. Para la mayoría de los materiales estructurales, el límite elástico tiene casi el mismo valor numérico que el límite de proporcionalidad.

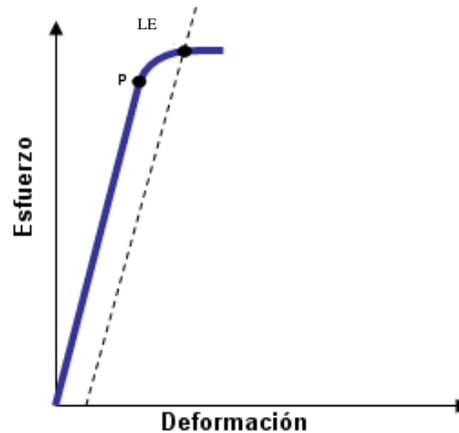


Figura N° 2.6. Límite proporcional (P), límite elástico (LE).

Límite de fluencia: conforme la carga (fuerza) en la pieza a prueba aumenta más allá del límite elástico, se alcanza un esfuerzo al cual el material continúa deformándose sin que haya incremento de la carga. El esfuerzo en el punto Y de la figura N° 2.7, se conoce como punto de fluencia (σ_y). Este fenómeno ocurre sólo en ciertos materiales dúctiles.

El esfuerzo puede disminuir realmente por un momento, resultando en un punto de fluencia superior y en uno inferior. Como el punto de fluencia es relativamente fácil de determinar y la deformación permanente es pequeña hasta el punto de fluencia, constituye un valor muy importante de considerar en el diseño de muchas partes para maquinaria cuya utilidad se afectaría si ocurriera una gran deformación permanente. Esto es válido sólo para materiales que exhiban un punto de fluencia bien definido.

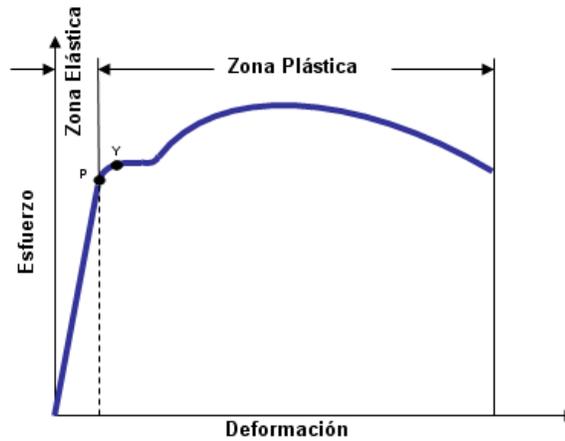
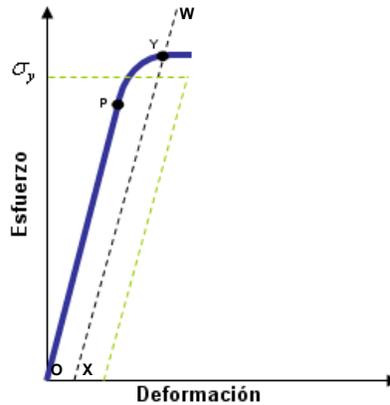


Figura N° 2.7. Límite de Fluencia (Y).

Resistencia a la fluencia: la mayoría de los materiales no ferrosos y los aceros de alta resistencia no tienen un punto de fluencia definido. Para estos materiales, la máxima resistencia útil corresponde a la resistencia de fluencia, que es el esfuerzo al cual un material exhibe una desviación limitante especificada de la proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación. Por lo general, este valor se determina por el método de la deformación permanente específica (método offset).

En la figura N° 2.8, la deformación especificada OX se marca sobre el eje de la deformación. En seguida, se traza la línea XW paralela a OP , localizando de esta manera el punto Y intersección de la línea XW con el diagrama esfuerzo-deformación.

El valor del esfuerzo en el punto Y indica la resistencia de fluencia. El valor de la deformación permanente especificada está generalmente entre 0.10 y 0.20% de la longitud calibrada.

Figura N° 2.8. Resistencia a la Fluencia (σ_y).

Resistencia límite: Conforme aumenta la carga aplicada sobre la pieza a prueba, el esfuerzo y la deformación se incrementan, como lo indica la porción de la curva YM figura N° 2.9, para un material dúctil, hasta que se alcanza el esfuerzo máximo en el punto M; por tanto, la resistencia límite o la resistencia a la tensión es el esfuerzo máximo desarrollado por el material, basado en el área transversal original.

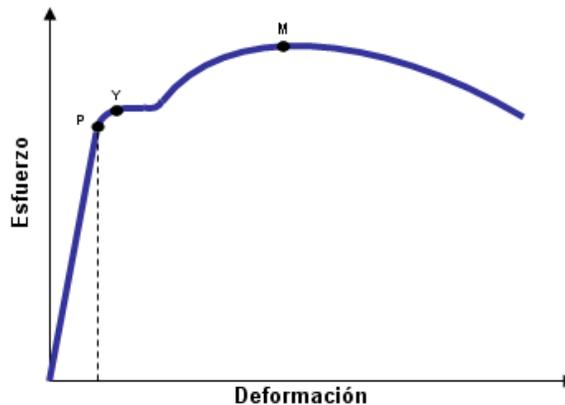


Figura N° 2.9. Resistencia límite de un material dúctil.

Resistencia a la ruptura: para un material dúctil, hasta el punto de resistencia límite, la deformación es uniforme a lo largo de la longitud de la barra. Al esfuerzo máximo, la muestra experimenta una deformación localizada o formación de cuello y la carga

diminuye conforme el área decrece. Este alargamiento en forma de cuello es una deformación no uniforme y ocurre rápidamente hasta el punto en que el material falla. La resistencia a la ruptura (punto B, en la figura N° 2.10), determinada al dividir la carga de ruptura entre el área transversal original, es siempre menor que la resistencia límite. Para un material frágil, la resistencia límite y la resistencia de ruptura coinciden.

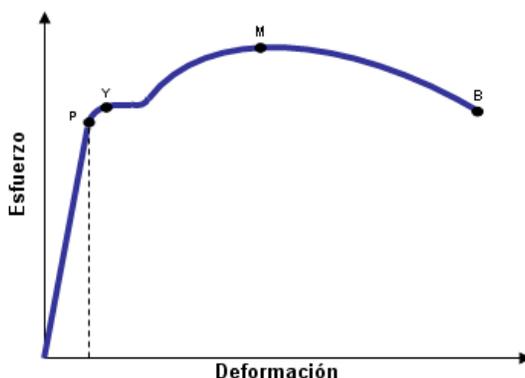


Figura N° 2.10. Resistencia a la ruptura (B).

Ductilidad: la ductilidad de un material se determinará a partir de la cantidad de deformación que le es posible al material soportar hasta que se fractura. Ésta se determina en un ensayo de tracción mediante dos mediciones:

- **Porcentaje de alargamiento a la rotura:** se determina uniendo después de la fractura, las partes de la probeta y midiendo la distancia entre las marcas hechas en la probeta en la longitud calibrada antes de la prueba, se calcula con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Alargamiento} = \left(\frac{L_f - L_o}{L_o} \right) \times 100 \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Dicho porcentaje representa el alargamiento que sufre la probeta desde que alcanza el esfuerzo de fluencia hasta el momento de su ruptura.



- **Porcentaje de reducción de área:** al igual que el porcentaje de alargamiento este también se determina a partir de las mitades fracturadas de la probeta ensayada, midiendo para ello el área transversal mínima y se aplica la siguiente ecuación:

$$\% \text{ reducción de área} = \left(\frac{A_o - A_f}{A_f} \right) \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Módulo de la elasticidad: este valor también conocido como módulo de Young, es la pendiente de la curva esfuerzo vs deformación unitaria en la zona elástica, el módulo está estrechamente relacionado con las fuerzas que unen los átomos en el material. Una pendiente muy acentuada en la gráfica de las fuerzas, indica que se requieren grandes fuerzas para separar los átomos y producir la deformación elástica del metal, lo cual indica que éste tiene un alto módulo de elasticidad.

Resiliencia: no es más que la energía absorbida en el campo elástico. Se cuantifica como el área bajo la curva en el campo elástico. Se interpreta como una medida de la energía por unidad de volumen que puede absorber un material sin sufrir deformación permanente y que, por tanto se libera al retirar la carga.

Tenacidad: es la energía absorbida por el material en el campo plástico. Es la capacidad de un material para absorber energía y deformarse plásticamente antes de fracturarse. Se denota como el área bajo la totalidad de la curva esfuerzo vs deformación en el ensayo de tracción. Ésta es principalmente una propiedad del intervalo plástico, ya que sólo una pequeña parte de la energía total absorbida es energía elástica que puede recuperarse cuando se suprime el esfuerzo.

Modulo de Poisson: al referirse a los ensayos de tracción la probeta sufre un alargamiento en sentido longitudinal y una contracción en sentido transversal como se muestra en la figura N° 2.11.

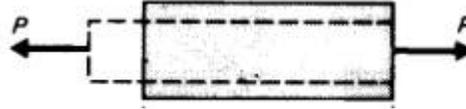


Figura N° 2.11. Deformaciones longitudinales y transversales.

Cuando el ensayo se realiza dentro de la zona elástica, se denomina coeficiente de Poisson a la relación que hay entre la contracción lateral y el alargamiento longitudinal.

$$\nu = \frac{-\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{longitudinal}} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Curva esfuerzo vs deformación real: como ya se explicó en páginas anteriores es posible que se cometa un error en el levantamiento de la curva esfuerzo vs deformación ya que para el cálculo de los esfuerzos se toma al área inicial como fija para todo el ensayo, lo cual varía por la formación del cuello en la que será la posterior región de fractura, esta disminución de área intuye un posible aumento en los esfuerzos si se toma en cuenta esta disminución de área, por lo tanto el esfuerzo deberá calcularse como la carga entre el área instantánea, esto implicara un conocimiento de el área de la sección transversal en cualquier instante de tiempo, lo que a primera vista es poco probable.

De igual manera, la deformación real proporciona un valor más realista del alargamiento de la probeta, este valor se puede estimar de mejor manera si se divide en pequeñas particiones el alargamiento total y con cada partición se calcula la deformación, este valor converge al cálculo de la siguiente integral:

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

En esta ecuación L representa la longitud en cualquier instante, se puede determinar la deformación total sustituyendo L_f .

Como es de notar si se compara la curva esfuerzo vs deformación real, con la ingenieril, estas curvas coincidirán en todos los puntos mientras que el área de la probeta no disminuya, por lo tanto en la región elástica no hay variaciones entre las dos curvas. Como los valores de deformación son pequeños, la deformación real es casi idéntica a la ingenieril, la diferencia entre estas dos curvas se da obviamente en la región plástica. La constante disminución en el área de falla, es decir, el cuello de la probeta, hace que el esfuerzo aumente, lo que da como resultado que en esta zona la curva real se encuentre por encima de la ingenieril.

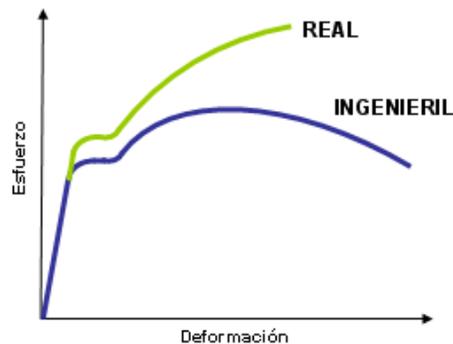


Figura N° 2.12. Curva esfuerzo vs deformación real, e ingenieril.

Conforme al esfuerzo se vuelve significativo en la región plástica, los valores de deformación real e ingenieril divergen. La deformación real puede relacionarse con la ingenieril mediante la siguiente expresión.

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

De la misma forma se pueden relacionar el esfuerzo real y el ingenieril, de acuerdo a la siguiente expresión.

$$\sigma = \sigma_e(1 + e) \quad (\text{Ecuación 2.8})$$



Es importante resaltar que en la curva real el esfuerzo aumenta hasta la ruptura, este fenómeno es imposible de apreciar en la curva ingenieril, por el incorrecto uso del área inicial para todo el cálculo. Este fenómeno indica que el material se torna más resistente conforme aumenta el esfuerzo, a esta propiedad se le llama endurecimiento por deformación, característica importante en muchos procesos de fabricación como el conformado de metales.

El comportamiento en la zona plástica del ensayo se ve afectado por este endurecimiento por deformación, si esta porción de la curva se representa en un papel de escala bilogarítmica (log – log), el resultado será un comportamiento prácticamente lineal, por lo tanto este comportamiento de la curva esfuerzo vs deformación real en la región plástica se puede ajustar a la siguiente ecuación:

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

En esta ecuación, K representa el coeficiente de resistencia y su significado no es más que el esfuerzo real que sufre la probeta para una deformación real igual a la unidad, ésta se obtiene extendiendo imaginariamente la curva esfuerzo vs deformación que se trazó en la escala logarítmica y a n se le llama el exponente de endurecimiento por deformación, y es la pendiente de la línea dibujada en la escala bilogarítmica, su significado se asocia a la tendencia del material a endurecerse.

El valor de n se puede obtener con la ubicación de dos puntos (a,b) de la recta y obteniendo su pendiente mediante la siguiente ecuación.

$$n = \frac{\log \sigma_a - \log \sigma_b}{\log \varepsilon_a - \log \varepsilon_b} \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

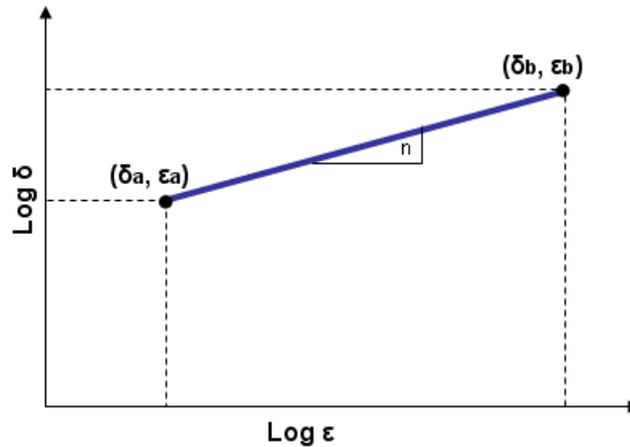


Figura N° 2.13. Comportamiento en la zona plástica en escala log –log.

2.2.3.2 Estudio del comportamiento mecánico a torsión de barras circulares

La torsión es una deformación producida en un sólido por efecto de acciones que pueden ser consideradas como pares de fuerza de momento de igual magnitud y sentido contrario. La torsión genera en las piezas, esfuerzos y deformaciones, cuyas distribuciones no son uniformes en las secciones resistentes lo cual origina esfuerzos cortantes.

Se dice que un cuerpo está sujeto en una sección a torsión simple, cuando la reducción de las fuerzas actuantes sobre éste, a un lado de la sección, da como resultado un momento que queda contenida en el plano de la misma.

Los ensayos de torsión se caracterizan por sujetar a una probeta en ambos de sus extremos y aplicarle un par torsor, esto producirá en la probeta una serie de esfuerzos de corte que deforman a la probeta hasta su ruptura.

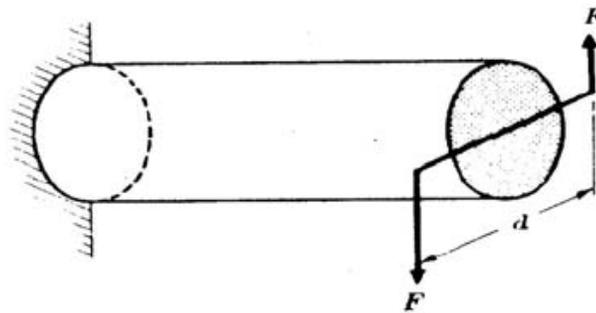


Figura N° 2.14. Barra cilíndrica sometida a torsión.

La mayoría de los ensayos de torsión reportan una curva de momento torsor vs ángulo de deformación, luego se deben aplicar ciertas relaciones para obtener la curva esfuerzo vs deformación.

Más adelante se muestran estas relaciones y su principio de deducción para barras circulares, es importante destacar que la deducción de estas ecuaciones requiere una serie de suposiciones y manejos matemáticos que permiten hallar las ecuaciones necesarias, en este caso se mostrara la deducción para barras circulares macizas, otras secciones transversales requieren otras deducciones más complicadas aún.

Esfuerzos y deformaciones originados por torsión [11]

Es necesario entonces establecer una relación entre el momento torsionante y los esfuerzos que se producen. En este caso sólo se ahondará en descubrir esta relación para sólidos cilíndricos macizos debido a la trascendencia que tiene para este trabajo. En general, obtener esta relación parte de ciertas hipótesis:

- La primera de ellas es la homogeneidad del material, hipótesis más orientada a establecer una uniformidad de las propiedades del material en cualquier punto del mismo, hipótesis que sin ser tan cierta se puede asumir.
- Las secciones normales al eje de la pieza permanecen planas y paralelas a sí misma luego de la deformación por torsión. Además, luego de la deformación, las secciones mantienen su forma, es decir no hay alabeo o distorsión en planos paralelos normales al eje del cilindro, esta hipótesis tiene implícito el hecho de que los planos paralelos perpendiculares a la barra cilíndrica permanecen a una distancia constante.
- En una barra de sección circular que se somete a un momento torsor la deformación angular γ , varía linealmente desde su eje longitudinal. Esto significa que una recta como la ab se mueve a la posición ab' , cuando se aplica el momento torsor, otro enfoque posible es considerar radios semejantes, es decir, el radio ob , tras el momento torsor gira a la posición ob' , manteniéndose recto, este hecho se ejemplifica en la figura N° 2.15.

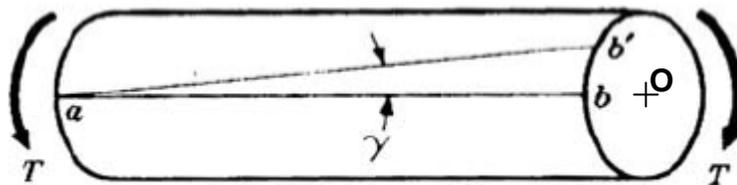


Figura N° 2.15. Variación de la deformación angular en una barra cilíndrica sometida a torsión.

Es importante acotar que estas hipótesis se verifican sólo en el caso de cilindros circulares macizos y huecos. Para esta clase de sólidos estas suposiciones se cumplen tan bien, que se aplican aún después del límite de comportamiento elástico del material.

A partir de las consideraciones anteriores, que están relacionadas con la compatibilidad de las deformaciones, deseamos saber qué tipo de tensiones genera la torsión simple y cual es su distribución. Supongamos en primera instancia que aparecen tensiones normales σ . Su distribución no podría ser uniforme ya que de ser así existiría una resultante normal a la sección. Al distribuirse entonces en forma variable, según la Ley de Hooke, las deformaciones específicas ε variarían también punto a punto, y la sección no continuaría siendo normal al eje, no siendo válida la segunda hipótesis, que indica que la sección se mantiene plana.

En virtud de lo anterior sólo resta considerar que en el problema de torsión aparecen únicamente tensiones tangenciales. Como los que se muestran en la figura N° 2.16.

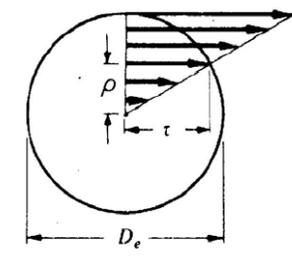


Figura N° 2.16. Tensiones tangenciales producidas por la torsión.

Para esto se hace un análisis de una barra circular maciza sometida a torsión como la mostrada en la figura N° 2.17, aplicando las hipótesis antes expuestas. A continuación trataremos de establecer la ley de distribución de las tensiones. Para ello consideramos que aislamos de una barra torsionada una tajada de longitud L , con un radio exterior R . El ángulo que giran ambas secciones será θ , a este ángulo lo denominaremos ángulo específico de torsión.

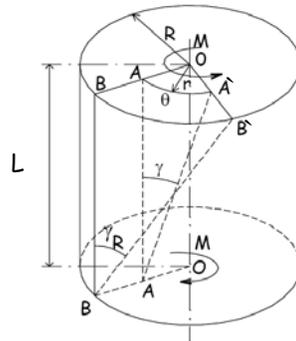


Figura N° 2.17. Barra de longitud unitaria sometida a torsión.

Para ello se busca la longitud de las fibras deformadas AA' y BB' :

$$AA' = r\theta \cong \gamma L \rightarrow \theta = \frac{\gamma L}{r}$$

$$BB' = R\theta \cong \gamma_R L \rightarrow \theta = \frac{\gamma_R L}{R}$$

El ángulo γ resulta ser el ángulo de distorsión de la sección. Debemos tener presente que si el ángulo θ es pequeño entonces los arcos se confunden con las tangentes, lo que permite establecer $\gamma \cong \text{tg } \gamma$. Por lo que las deformaciones angulares se pueden calcular con las siguientes ecuaciones:

$$\gamma = \frac{BB'}{L} = \frac{R\theta}{L} \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

Se igualan estas relaciones, obtenidas para el ángulo específico de torsión y se obtiene:

$$\frac{\gamma L}{r} = \frac{\gamma_R L}{R} \rightarrow \gamma = \frac{\gamma_R}{L} r$$

De acuerdo a la ley de Hooke, que establece las deformaciones son directamente proporcionales a los esfuerzos aplicados se tiene que:

$$\tau = \gamma G \cong \frac{\gamma_R}{R} Gr = \theta Gr \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

En esta ecuación se observa claramente cómo el esfuerzo de corte varía proporcionalmente con el radio del cilindro, por lo que el esfuerzo mayor se producirá en la periferia del cilindro, además se observa la constante de proporcionalidad G , a la que se llamará de ahora en adelante como módulo de elasticidad en corte.

Una vez establecida la distribución de esfuerzos en la sección, se puede expresar al momento torsor aplicado en función del esfuerzo. Por lo tanto se puede formular la siguiente expresión, si se parte del hecho básico de que el momento debe ser expresado como una fuerza por un brazo.

$$Mt = Fb = \tau Ab$$

Ahora bien, es importante considerar que esta fuerza no es constante en toda la sección, por la dependencia que tiene el esfuerzo de corte en función del radio, hecho este que se aprecia claramente en la figura N° 2.18.

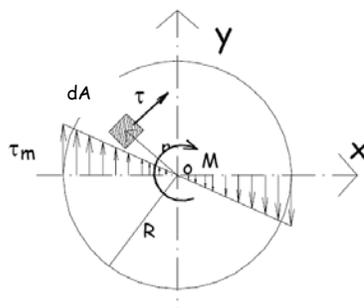


Figura N° 2.18. Distribución de esfuerzos en la sección.

Es por esto que se hace necesario plantear la siguiente integral:



$$Mt = \int_A \tau r dA$$

Si se sustituye a τ por la expresión que se dedujo en pasos anteriores y así proceder a la integración en el área circular se obtiene lo siguiente:

$$Mt = \int_A G\theta r(r) dA = G\theta \int_A r^2 dA$$

Si se observa el producto $G\theta$, es una constante y se puede extraer de la integral, y así realizar la integración, como se muestra:

$$Mt = G\theta \int_A r^2 dA = G\theta I_p \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

Como se aprecia se obtiene una integral que se suele llamar como el momento polar de inercia de una sección circular maciza, con lo que finalmente se encuentra una relación entre el momento torsor y el esfuerzo de corte producido. Sustituyendo a θ , por su relación con τ , se tendrá una ecuación de esfuerzo de corte en función del momento torsor que afecta a la barra:

$$\tau = \frac{Mt}{I_p} r \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

Siendo la inercia polar igual a:

$$I_p = \frac{\pi D^4}{32} \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

Este valor de I_p es simplemente una característica geométrica de la sección y no tiene significado físico alguno.



De igual manera se puede obtener una ecuación para calcular el módulo de elasticidad en corte, solo válida por supuesto en el rango elástico del material.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (\text{Ecuación 2.16})$$

Si se sustituyen las relaciones encontradas para el esfuerzo de corte y la deformación angular se obtiene la siguiente ecuación:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{MtR / Ip}{R\theta / L} = \frac{MtL}{\theta Ip} \quad (\text{Ecuación 2.17})$$

Tensiones de torsión para grandes deformaciones [11]

Superado el límite elástico del material, las tensiones de corte en el eje no son proporcionales a la distancia al centro del mismo. No obstante se continúa cumpliendo que:

$$\gamma = r\theta_L \quad (\text{Ecuación 2.18})$$

Donde $\theta_L = \frac{\theta}{L}$, por otra parte si la sección es circular se puede escribir:

$$Mt = 2\pi \int_0^r \tau r^2 dr$$

En esta integral r representa el radio de la sección, y a τ es ahora una función de la deformación angular $\tau = f(\gamma)$, esta función es desconocida y se debe determinar.

Si se diferencia la ecuación 2.18 se obtiene:

$$d\gamma = \frac{dr}{\theta_L} \rightarrow dr = \theta_L d\gamma$$



Y se puede escribir a r^2 como:

$$r^2 = \frac{\gamma^2}{\theta_L^2}$$

Se sustituye esto en la expresión del momento torsor y se obtiene:

$$Mt = 2\pi \int_0^{\gamma_r} f(\gamma) \frac{\gamma^2}{\theta_L^2} \frac{d\gamma}{\theta_L}$$

Donde $\gamma_r = r\theta_L$, ahora se diferencia esta ecuación con respecto a θ_L , tomando en cuenta lo siguiente:

$$\frac{d}{d\theta_L} = \frac{d}{d\left(\frac{\gamma}{r}\right)} = r \frac{d}{d\gamma}$$

Con lo que se obtiene,

$$\frac{d}{d\theta_L} (Mt \cdot \theta_L^3) = 2\pi \cdot r \cdot f(r\theta_L) \cdot (r\theta_L^2) = 2\pi \cdot r^3 \cdot \theta_L^2 \cdot f(r\theta_L)$$

Pero $f(r \cdot \theta_L) = f(\gamma) = \tau$, por lo tanto se sustituye en la ecuación y se tiene:

$$\frac{d}{d\theta_L} (Mt \cdot \theta_L^3) = 2\pi \cdot r^3 \cdot \theta_L^2 \cdot \tau$$

Si se aplica la derivada del producto se obtiene,

$$\frac{dMt}{d\theta_L} \cdot \theta_L^3 + 3 \cdot Mt \cdot \theta_L^2 = 2\pi \cdot r^3 \cdot \theta_L^2 \cdot \tau$$

Despejando al esfuerzo de corte se tiene que:

$$\tau = \frac{1}{2\pi \cdot r^3} \left(\frac{dMt}{d\theta_L} \cdot \theta_L + 3 \cdot Mt \right) \quad \text{(Ecuación 2.19)}$$

Los términos de esta ecuación pueden ser extraídos de la curva momento torsor vs ángulo de deformación, si se observa la figura N° 2.19, se puede apreciar que el termino $\frac{dMt}{d\theta_L}$, es la pendiente de la recta tangente a los puntos de la curva en la

región plástica y θ_L esta representado en el eje x, aplicando trigonometría básica se puede obtener la siguiente expresión.

$$\frac{dMt}{d\theta_L} \cdot \theta_L = BC$$

Si el momento torsor esta representado en el eje y, se puede escribir esta ecuación de la siguiente forma:

$$\tau = \frac{1}{2\pi \cdot r^3} (BC + 3 \cdot BA) \quad \text{(Ecuación 2.20)}$$

Con esta ecuación se puede obtener el esfuerzo de corte para cualquier punto de la curva momento torsor vs ángulo de giro, esta ecuación requiere que se midan los segmentos, más adelante se procederá a modelar el comportamiento de la zona plástica de la curva bajo una ecuación potencial de grado n, con esto se obtendrá una ecuación genérica que permitirá obtener los esfuerzos cortantes en la zona plástica a partir de la curva momento torsor vs ángulo de giro.

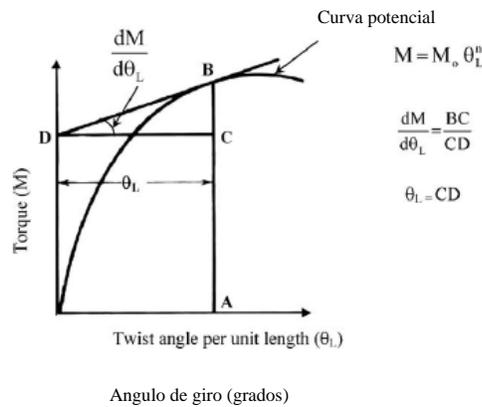


Figura N° 2.19. Comportamiento de la región plástica en la curva momento torsor vs ángulo de giro.

Como la zona plástica tiene un comportamiento potencial, es posible plantear la siguiente expresión.

$$M_t = M_0 \cdot \theta_L^n \quad \text{(Ecuación 2.21)}$$



Diferenciando esta ecuación con respecto a θ_L .

$$\frac{dM_t}{d\theta_L} = M_0 \cdot n \cdot \theta_L^{n-1} = M_0 \cdot n \cdot \frac{\theta_L^n}{\theta_L}$$

Se despeja a M_0 , de la ecuación 2.20 y se sustituye en la expresión anterior obteniendo:

$$\frac{dM_t}{d\theta_L} = \frac{M_t}{\theta_L^n} \cdot n \cdot \frac{\theta_L^n}{\theta_L} = \frac{n \cdot M_t}{\theta_L}$$

Esta expresión se puede sustituir en la ecuación 2.19, y así se obtiene:

$$\tau = \frac{1}{2\pi \cdot r^3} \left(\frac{n \cdot M_t}{\theta_L} \cdot \theta_L + 3 \cdot M_t \right) = \frac{1}{2\pi \cdot r^3} (n \cdot M_t + 3 \cdot M_t)$$

$$\tau = \frac{M_t}{2\pi \cdot r^3} (3 + n) \quad (\text{Ecuación 2.22})$$

Ecuación que permite obtener el esfuerzo de corte para cualquier punto de la zona plástica, a n se le llama el exponente de endurecimiento por deformación.

El valor de n se puede obtener dibujando la zona plástica de la curva momento torsor vs ángulo de deformación en una escala logarítmica, esto originará una tendencia recta, la pendiente de esta recta será en valor de n. si se ubican dos puntos de esta recta (a,b), el valor de n se puede calcular como.

$$n = \frac{\log M_a - \log M_b}{\log \theta_{La} - \log \theta_{Lb}} \quad (\text{Ecuación 2.23})$$



Ensayos de Torsión

En general un ensayo como el de torsión se utiliza para extraer la información clásica que genera una curva esfuerzo versus deformación, de ella se pueden extraer el correspondiente valor de esfuerzo para una deformación en específico, pero con una cualidad especial, las curvas que se obtienen mediante el ensayo de torsión admiten deformaciones más grandes que las que se pudieran obtener de un ensayo de tracción o compresión, manteniendo las dimensiones externas de la probeta casi intactas, es por esto que el ensayo de torsión es muy útil en procesos de conformado en donde se producen reducciones de secciones muy grandes, por el orden del 80 a 90%, destacando que en esta curva la tensión de fluencia que se mide es la tensión de fluencia por esfuerzo cortante puro, K .

El ensayo de torsión da información directamente del comportamiento al corte del material y la información de su comportamiento a tracción se puede deducir fácilmente, mediante la aplicación de los criterios de fluencia, transformando los esfuerzos de fluencia a corte en esfuerzos de fluencia a tracción y se relaciona la deformación angular con la deformación lineal.

De una curva esfuerzo vs deformación angular se extraen los siguientes resultados:

Límite de fluencia al corte: en general es el punto en donde la zona elástica se acaba, en los ensayos de torsión suele apreciarse muy bien este punto a diferencia de los ensayos de tracción, en donde este punto no se marca claramente. En los ensayos de torsión suele haber una transición suave entre la zona elástica y la plástica.

Módulo de corte: no es más que la pendiente de la recta en la zona elástica de la curva, este da una idea de la rigidez del material en condiciones de esfuerzos cortantes.

Resistencia a la ruptura: es el esfuerzo en donde ocurre la ruptura de la probeta, en la mayoría de los ensayos de torsión este valor coincide con el esfuerzo máximo.



Figura N° 2.20. Curva esfuerzo cortante vs deformación angular.

2.2.4 Criterios de fluencia [5]

Los criterios de fluencia son teorías a partir de las cuales se trata de determinar la tensión a la cual va a fallar un material dúctil por fluencia, estos criterios son el punto de partida del conformado de los metales, y son de gran utilidad en el diseño de elementos que no pueden sufrir deformaciones permanentes.

Se han propuesto diversos criterios de fluencia, de los cuales los más importantes son el de Tresca y von Mises.



2.2.4.1 Criterio de la tensión cortante máxima de Tresca [5]

El criterio de tresca establece que el material empieza a deformar plásticamente cuando el esfuerzo de corte máximo alcanza determinado valor y dicho valor corresponde al valor que tendrá el esfuerzo de corte máximo en un ensayo de tracción cuando se alcanza la fluencia. Para que ocurra la fluencia en un material dúctil, el esfuerzo de corte máximo tiene esta expresión:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (\text{Ecuación 2.24})$$

Para el caso de un ensayo de tracción, cuando ocurre la fluencia se tiene que:

$$\sigma_1 = Y \therefore \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

En este caso Y es el esfuerzo de fluencia en tracción, sustituyendo estos valores en la ecuación de tresca se tiene:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{Y - 0}{2} = \frac{Y}{2} \quad (\text{Ecuación 2.25})$$

Si se compara las ecuaciones 2.24 y 2.25, se obtiene el criterio de tresca para fluencia de materiales dúctiles.

$$\sigma_1 - \sigma_3 \geq Y \quad (\text{Ecuación 2.26})$$

Con este criterio se pueden hallar las relaciones entre Y (esfuerzo de fluencia en tracción), S (esfuerzo de fluencia en compresión plana) y K (esfuerzo de fluencia en corte puro).

Para el caso de un ensayo de compresión plana cuando ocurre la fluencia se tiene que:

$$\sigma_1 = 0; \sigma_2 = \frac{-S}{2}; \sigma_3 = -S$$

Relacionando S con Y , de acuerdo a la ecuación 2.26 se tiene:



$$0 - (-S) = Y \rightarrow S = Y \quad (\text{Ecuación 2.27})$$

Para el caso de un ensayo de corte puro cuando ocurre la fluencia se tiene que:

$$\sigma_1 = K; \sigma_2 = 0; \sigma_3 = -K$$

Relacionando K con Y , de acuerdo a la ecuación 2.26 se tiene:

$$K - (-K) = Y \rightarrow 2K = Y \quad (\text{Ecuación 2.28})$$

Por lo tanto tresca relaciona a Y , S y K , mediante la siguiente expresión:

$$Y = S = 2K$$

2.2.4.2 Criterio de energía máxima de deformación cortante de von Mises [5]

El criterio de von Mises establece que el material empieza a deformarse plásticamente cuando el esfuerzo de corte máximo alcanza un valor, y dicho valor corresponde al valor que tendrá el esfuerzo de corte octaedral en un ensayo de tracción cuando se alcanza la fluencia.

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (\text{Ecuación 2.29})$$

Para el caso de un ensayo de tracción cuando ocurre la fluencia se tiene que:

$$\sigma_1 = Y \therefore \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

Sustituyendo estas relaciones en la ecuación 2.29, se tiene:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(Y - 0)^2 + (0 - 0)^2 + (0 - Y)^2} \rightarrow \tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} Y \quad (\text{Ecuación 2.30})$$



Si se compara las ecuaciones 2.29 y 2.30, se obtiene en criterio de von Mises para fluencia de materiales dúctiles.

$$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \geq Y \quad (\text{Ecuación 2.31})$$

En compresión plana relacionando S con Y , según von Mises:

$$S = \frac{2}{\sqrt{3}} Y \cong 1,155Y \quad (\text{Ecuación 2.32})$$

En corte puro relacionando K con Y , según von Mises:

$$K = \frac{1}{\sqrt{3}} Y \cong 0,577Y \quad (\text{Ecuación 2.33})$$

Por lo tanto von Mises relaciona a Y , S y K , mediante la siguiente expresión:

$$Y = \frac{\sqrt{3}}{2} S = \sqrt{3} K$$

2.2.5 Ensayo de Dureza

Es difícil definir la propiedad de dureza, excepto en relación con la prueba empleada en particular para determinar su valor. Debe tenerse en cuenta que un número o valor de dureza no puede utilizarse directamente en trabajos de diseño, como se puede hacer con un valor de resistencia a la tensión, ya que los números de dureza no tienen significado intrínseco.

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

El procedimiento de prueba y la preparación de la muestra suelen ser sencillos y los resultados pueden utilizarse para estimar otras propiedades mecánicas.

Prueba o ensayo de dureza Rockwell.

En esta prueba de dureza se utiliza un instrumento de lectura directa basado en el principio de medición de profundidad diferencial. La prueba se lleva a cabo al elevar la muestra lentamente contra el marcador hasta que se ha aplicado una carga determinada menor. Luego se aplica la carga mayor a través de un sistema de palanca de carga. Después de que la aguja del disco llega al reposo, se quita la carga mayor, y con la carga menor todavía en acción, el número de dureza Rockwell es leído en el disco medidor. Como el orden de los números se invierte en el disco medidor, una impresión poco profunda en un material duro dará un número grande en tanto que una impresión profunda en un material blando dará un número pequeño.

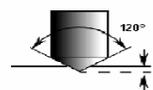
Hay dos máquinas Rockwell: El probador normal para secciones relativamente gruesas y el probador superficial para secciones delgadas. La carga menor es de 10 kg en el probador normal y de 3 kg en el probador superficial.

■ Ensayo ROCKWELL A, C, D

Indentador: Cono de diamante (HRA, HRC, HRD)

Carga: PA = 60 Kg
PC = 150 Kg
PD = 100 Kg

Formula: HRA, HRC, HRD = 100 - 500t



USOS:
Rockwell A → materiales muy duros
Rockwell C-D → acero de alta resistencia

■ Ensayo ROCKWELL B, F, G, E

Indentador: Esfera de acero $f = 1/16$ " (HRB, HRF, HRG)

Esfera de acero $f = 1/8$ " (HRE)

Carga: PB = 100 Kg
PF = 60 Kg
PG = 150 Kg
PE = 100 Kg



USOS:
Rockwell B → latón, acero de baja resistencia
Rockwell E-F → materiales muy suaves
Rockwell G → aluminio, materiales suaves

Formula: HRB, HRF, HRG, HRE = 130 - 500t

25

Figura N° 2.21. Resumen de las diferentes escalas Rockwell y sus indentadores



Pueden utilizarse diversos marcadores de muescas y cargas y cada combinación determina una escala Rockwell específica. Los marcadores de muescas incluyen bolas de acero duras de 1/16, 1/8, 1/4 y 1/2 de pulgada de diámetro y un marcador cónico de diamante de 120°. Generalmente las cargas mayores son de 60, 100 y 150 kg en el probador normal y de 15, 30 y 45 kg en el probador superficial.

Las escalas Rockwell empleadas más comúnmente son la B (marcador de bola de 1/16 de pulg. y 100 kg de carga) y la C (marcador de diamante y 150 kg de carga), ambas obtenidas con el probador normal. Debido a las muchas escalas Rockwell, el número de dureza debe especificarse mediante el símbolo HR seguido de la letra que designa la escala y precedido de los números de dureza; por ejemplo, 82 HRB significa una dureza de Rockwell de 82 medida en la escala B (bola de 1/16 de pulg y 100 kg de carga). Para la conversión de la dureza Rockwell a las otras escalas se usa la norma ASTM E -140: “Tablas de Conversión de Dureza normales para Metales (Relación Entre Dureza Brinell, Dureza Vickers, Dureza Rockwell, Rockwell de Dureza Superficial, Dureza Knoop, y Dureza escleroscopio)”.

2.3 Definición de términos básicos.

Diagrama Tensión – Deformación: gráfico experimental de la tensión respecto a la deformación, normalmente se representa σ sobre el eje y, y a ϵ sobre el eje x.

Endurecimiento por deformación: Es el endurecimiento de un metal o aleación por trabajo en frío. Durante el trabajo en frío, las dislocaciones se multiplican e intercalan, dando lugar a un incremento de la resistencia del metal o aleación.

Endurecimiento por solución sólida: endurecimiento de un metal por formación de aleaciones para formar soluciones sólidas. Las dislocaciones tienen mayor dificultad



en el movimiento a través de la red metálica cuando hay átomos de diferentes tamaños y características eléctricas, como en el caso de soluciones sólidas.

Esfuerzo ingenieril: fuerza uniaxial promedio dividida entre el área de la sección inicial.

Esfuerzos octaedrales: son los esfuerzos que están contenidos en el plano octaedral, sabiendo que este es un plano cuya normal forma ángulos iguales con todos los ejes coordenados. Este ángulo es fijo y vale $54,73^\circ$. Y el esfuerzo de corte en estos planos se rige con la siguiente ecuación:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

Esfuerzos principales: son los valores extremos de las magnitudes de los vectores esfuerzos en un punto de un sólido cualquiera sometido a un estado de cargas. Los planos que contienen a estos vectores se les llama planos principales, estos tienen una característica resaltante, en ellos la magnitud de los esfuerzos cortantes es igual a cero. Estos se designan como σ_1 , σ_2 , σ_3 .

Estado de esfuerzos: no es más que la magnitud y dirección de los esfuerzos en un punto de un sólido cualquiera.

CAPÍTULO III

MARCO

METODOLÓGICO



3.1 Nivel de la investigación

El trabajo pretendió caracterizar la aleación de aluminio AA6061, bajo diferentes condiciones de tratamientos térmicos, por lo que se realizaron diferentes ensayos para definir su comportamiento; este hecho hizo que este trabajo de grado sea del tipo descriptivo.

3.2 Diseño de la investigación

La estrategia para cumplir con los objetivos planteados fue la siguiente.

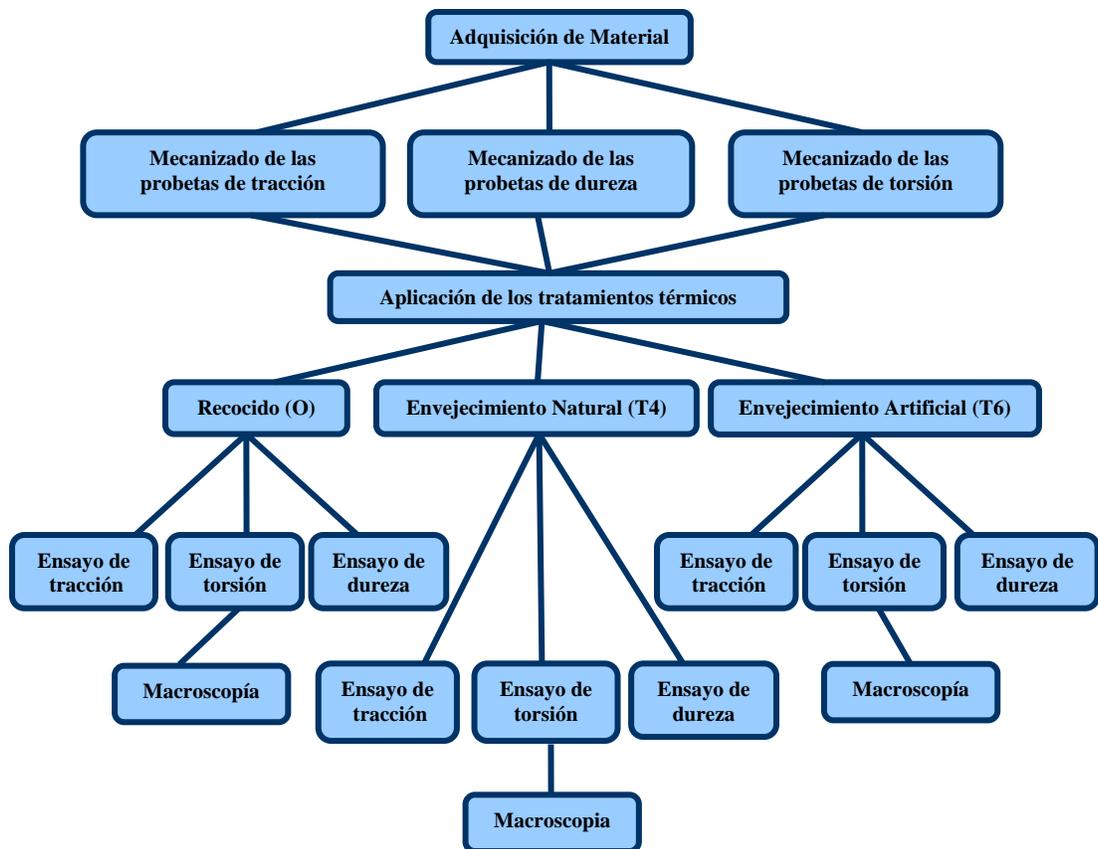


Figura N° 3.1. Diagrama de proceso.

3.2.1 Adquisición del material

La aleación de aluminio AA6061, es presentado comercialmente en diferentes formas, en nuestro caso fue necesario la adquisición del mismo en barras cilíndricas de 3/4” de diámetro por una longitud de 2 metros y barras cilíndricas de 1 ½” de diámetro por una longitud de 2 metros, que vienen en condiciones de recocido y con la siguiente composición química (condiciones esta que pueden variar entre colada y colada).

Tabla N° 3.1. Composición química única del AA6061 utilizado en los ensayos.

Aleación	Silicio	Hierro	Cobre	Manganeso	Magnesio	Cromo	Zinc	Titanio
6001	0,4-0,8	0,7	0,15-0,4	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	0,15

Fuente: Alreyven C.A, Certificado #00504054

3.2.2 Elaboración de las probetas

Las probetas de tracción se fabricaron a partir de las barras circulares de ¾” de diámetro, y siguieron las especificaciones dictadas por la norma ASTM B557, que rige los ensayos de tracción en aleaciones de aluminio y magnesio; la figura N° 3.2, muestra las características geométricas de esta probeta. La fabricación de estas probetas se realizó en un torno mediante un proceso de arranque de viruta para obtener las dimensiones requeridas.

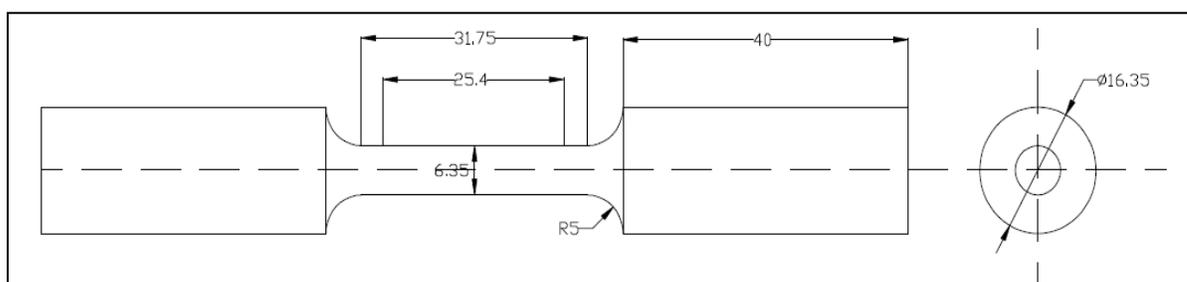


Figura N° 3.2. Probeta de tracción normalizada, todas las medidas en mm.

La elaboración de la probeta torsión se realizó a partir de barras cilíndricas de 1 ½” de diámetro, y siguiendo las recomendaciones de la norma COVENIN 907-1997 para la escogencia del diámetro y el largo de la probeta; y las especificaciones de la máquina del ensayo de torsión para los extremos de la probeta, la geometría de la probeta se muestra en la figura N° 3.3. La fabricación de estas probetas se realizó en un torno.

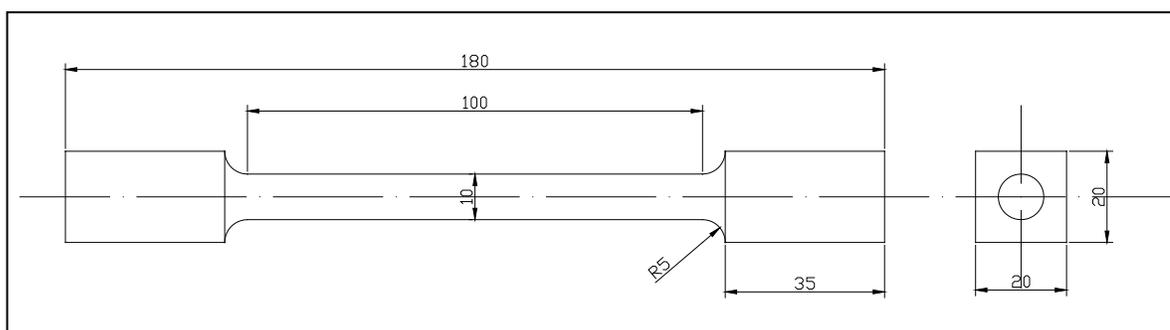


Figura N° 3.3. Probeta para ensayo de torsión, todas las medidas en mm.

La elaboración de las probetas para el ensayo de dureza, se realizó a partir de barras cilíndricas de 1 ½” de diámetro, y siguiendo las recomendaciones de la norma E18-05, “Métodos para el ensayo de dureza Rockwell y Dureza Superficial Rockwell de materiales metálicos”, la geometría de la probeta se muestra en la figura N° 3.4.

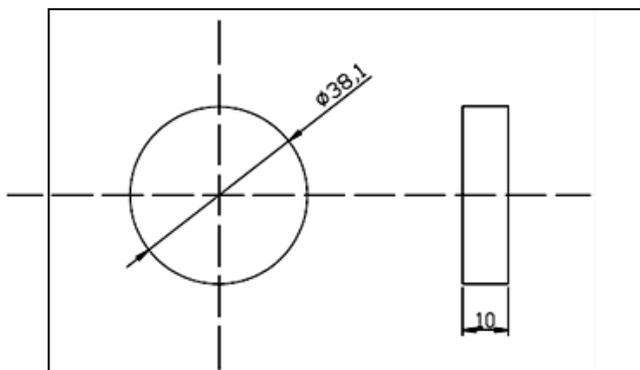


Figura N° 3.4. Probeta para el ensayo de dureza, todas las medidas en mm.

3.2.3 Aplicación de tratamientos térmicos

Luego se realizaron los tratamientos térmicos a las diferentes probetas en el horno del laboratorio de materiales de la Universidad de Carabobo, las temperaturas y tiempos de estadía en el horno, dichos valores fueron tomados de la norma B918 – 01 “Tratamientos Térmicos de las Aleaciones de Aluminio Forjadas”.

3.2.3.1 Recocido (O)

Las probetas fueron sometidas a una temperatura de 410 °C, durante un tiempo de tres horas, para luego dejarse enfriar en el horno; con este tratamiento se busca que el material posea la menor cantidad de trabajo en frío, para que los valores de los ensayos con este tratamiento aplicado sirvan como referencia, al ser del material en condiciones iniciales. La norma ASTM B918 indica la temperatura del tratamiento y un rango de tiempo entre dos y tres horas, donde se tomó el valor superior.

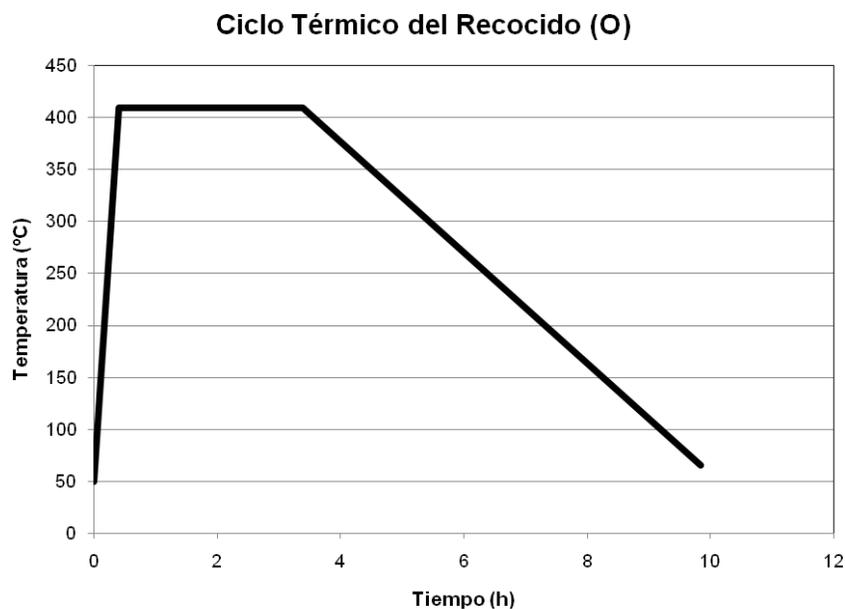


Figura N° 3.5. Ciclo térmico del recocido.

3.2.3.2 Endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)

Las probetas se sometieron primero al tratamiento térmico de solución donde fueron calentadas hasta los 550 °C por un tiempo de 55 minutos, seguido de un enfriamiento rápido en agua, luego se sometieron a un envejecimiento natural en donde las probetas se dejaron una semana al aire tranquilo. La norma ASTM B918 indica un rango de temperaturas de trabajo de 515 – 579 °C del cual se tomó una temperatura media, mientras el tiempo del tratamiento va a depender del espesor de la probeta, por último la norma indica que el tiempo se comienza a contar cuando se alcanza el valor inferior del rango de temperaturas (515 °C).

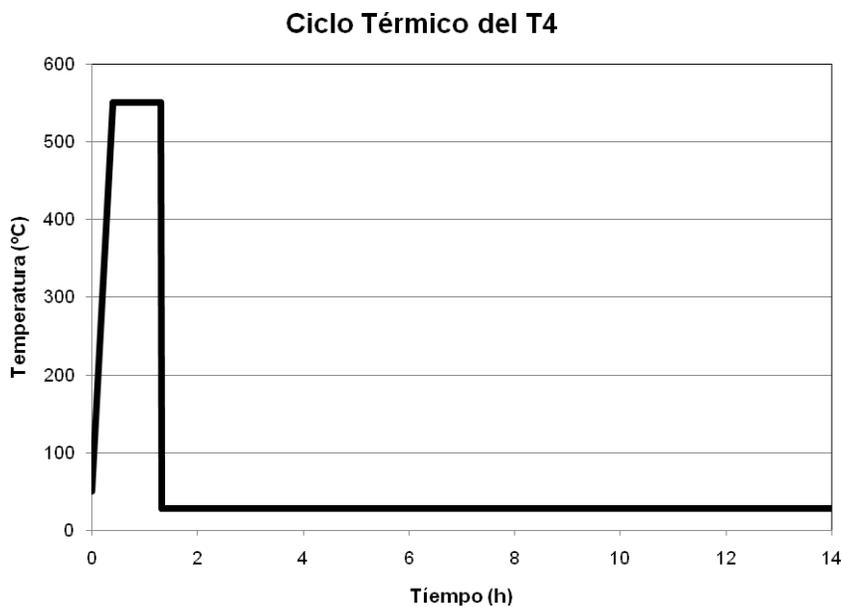


Figura N° 3.6. Ciclo térmico del tratamiento T4.

3.2.3.2 Endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)

Las probetas fueron sometidas primero al tratamiento térmico de solución donde fueron calentadas hasta los 550 °C por un tiempo de 55 minutos, seguido de

un enfriamiento rápido en agua, luego se les aplicó un envejecimiento artificial en donde las probetas se calentaron hasta una temperatura de 175 °C durante ocho (8) horas y luego se llevaron al aire tranquilo. La norma ASTM 918 indica la temperatura del envejecimiento y el tiempo de calentamiento.

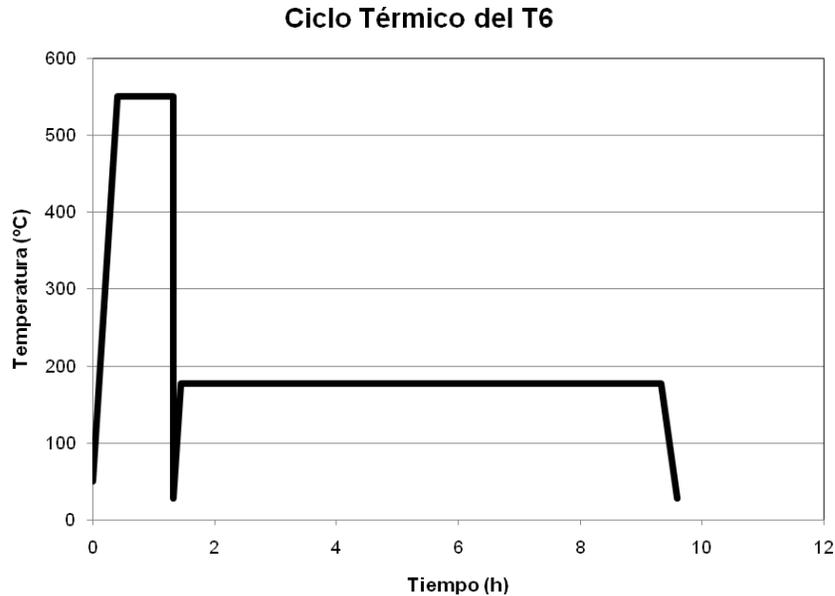


Figura N° 3.7. Ciclo térmico del tratamiento T6

3.2.4 Ensayos mecánicos

3.2.4.1 Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción se realizaron en el banco universal para ensayos de tracción GALDABINI, el cual está ubicado en el laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Universidad de Carabobo, en este se ensayaron las probetas de tracción con la geometría mostrada en la figura N° 3.2, la cual se ajusta a la norma ASTM B557, para la realización de ensayos de tracción en aleaciones de aluminio.



Figuras N° 3.8. Equipo universal de ensayo de materiales “GALDABINI”.

Para este estudio se utilizaron un total de cinco probetas para cada condición de tratamiento térmico, en este ensayo se hizo que la probeta rompiera en un periodo de tiempo relativamente corto con una velocidad controlada de 2,5 mm/min en la zona elástica y 10 mm/min en la zona plástica. La fuerza que se aplicó a la probeta fue en forma de carga axial, esta carga produjo un alargamiento, y se reportó una gráfica de carga axial aplicada en función del alargamiento.

3.2.4.2 Ensayos de torsión

Para la realización de los ensayos de torsión, se utilizó el banco de torsión con que cuenta el laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Universidad de Carabobo (ver figura N° 3.12), se ensayaron las probetas de torsión con la geometría mostrada en la figura N° 3.3, esta geometría siguió las dimensiones recomendadas por la norma COVENIN 907:1997, en cuanto a diámetro de la probeta y longitud calibrada, los extremos de la probeta estuvieron condicionados en su geometría y dimensión por la forma de las mordazas de la máquina, lo que hizo que las probetas de torsión no sean del todo normalizadas.

Para cada condición de tratamiento térmico se realizaron cinco ensayos, en este ensayo se hizo que la probeta rompiera, mediante la aplicación de un esfuerzo de corte, durante un periodo de tiempo relativamente corto, la aplicación del momento



torsor corrió a cargo de la mordaza giratoria, la cual giró a una velocidad de 1 rev/min constantes (tomada a partir de revisiones bibliográficas realizadas), este par torsor comenzó a deformar a las probetas ya que la otra mordaza es fija, creándose un giro de la mordaza con respecto al eje longitudinal de la probeta. Los valores de carga aplicada en este ensayo se obtuvieron mediante una celda de carga acoplada a la máquina, la cual presenta una interfase a un computador y grafica en tiempo real la curva momento torsor vs ángulo de deformación.

3.2.4.3 Ensayos de dureza

Para llevar a cabo estos ensayos fue necesario asegurarse que la superficie de las probetas se encontrara libre de óxidos, partículas extrañas, para ello se lijaron las probetas con lijas de diferentes denominaciones.

Los ensayos de dureza para las condiciones de T4 y T6, fueron realizados en el durómetro digital Rockwell, se realizaron a una escala que permitiese transformarlas mediante tablas a la escala Brinell estándar. Para ambas condiciones se uso un penetrador de bola de 1/16", la condición T4 fue ensayada en la escala de dureza superficial 15-T, con una carga total de 15 Kgf; la condición T6 fue ensayada en la escala de dureza Rockwell B, teniendo una carga total de ensayo de 100 Kgf.

El ensayo de dureza para la condición de recocido fue realizado en un durómetro Brinell usando un indentador de bola de 10 mm y aplicando una carga de 500 Kgf.

3.2.5 Macroscopía

Una vez realizados los ensayos de torsión y con la finalidad de ver como se comportarán las líneas de fluencia del material una vez aplicada la torsión, se

prepararán tres probetas (una por cada condición de tratamiento térmico), ya rotas del ensayo de torsión.

En cada una de las tres probetas se realizó un corte transversal, este corte se hizo por medio de una electroerosionadora de hilo, método que permitió que no aumentara la temperatura de la superficie para no alterar la estructura de la misma, luego de realizaron los desbastes finos pertinentes según la norma ASTM E3 de preparación metalografía para preparar la probeta para realizar el macroataque.

Para realizar el macroataque se utilizó el reactivo sugerido por la norma ASTM E 0340-00R06, para macroataques en aleaciones de aluminio, el reactivo recibe el nombre de Tucker's y está compuesto por 45 mL de ácido clorhídrico (HCl), 15 mL de ácido nítrico (HNO₃), 15 mL de ácido fluorhídrico (HF) y 25 mL de agua destilada (H₂O), tomando en cuenta las condiciones de seguridad al manejar sustancias tóxicas.

El ataque se llevó a cabo por un intervalo de tiempo de 15 segundos para luego lavar la superficie con abundante agua y secar. Una vez realizada la macroscopía se hizo uso de un microscopio de aumento 50X para apreciar mejor la superficie. En la siguiente imagen se muestra el corte transversal en las probetas.

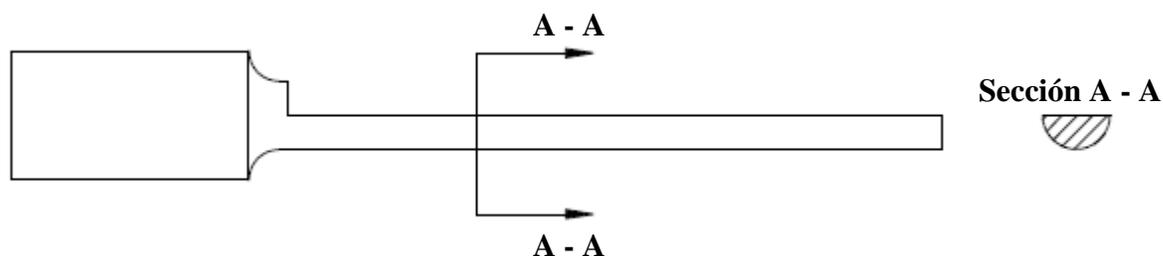


Figura N° 3.9. Corte transversal en las probetas de torsión.



3.3 Muestra

En este caso la muestra constituye el total de probetas a ensayadas, para la validación de los ensayos se usaron cinco probetas para cada condición establecida y para cada uno de los ensayos que se realizaron, en total fueron 45 probetas que se repartieron de la siguiente manera.

Tabla N° 3.1. Muestra de los ensayos.

Ensayo \ Tratamiento	Recocido (O)	T4	T6
Tracción	5	5	5
Torsión	5	5	5
Dureza	5	5	5

3.4 Técnicas de recolección de datos

La recolección de datos se realizó mediante ensayos mecánicos como se ha ido explicando a lo largo de este capítulo, para los ensayos de tracción y torsión las máquinas arrojan las gráficas correspondientes en tiempo real mientras transcurre el ensayo, estas se visualizaron en el monitor que estas tienen integrado y se imprimió la data generada por la mismas como método de recolección.

En los ensayos de dureza, la máquina de ensayo arroja el valor directo de la dureza, la recolección de estos valores se realizó de forma manual y se tabuló para la posterior graficación.

3.5 Instrumentos de recolección de datos

A continuación se presentan las máquinas utilizadas para realizar los ensayos así como sus respectivos datos de placa:

- **Horno**

Marca: Thermolyne Modelo: FURNACE 48000.

Temperatura máxima: 1200 °C.



Figura N° 3.10. Horno para tratamientos térmicos.

- **Máquina universal para ensayos de tracción**

Marca: GALDABINI.

Modelo: CTM 20.

Capacidad: 20 TON.



Figura N° 3.11. Máquina universal para ensayos de tracción.

- **Máquina para ensayo de torsión**

Esta máquina fue fabricada producto de un trabajo de grado realizado por Palkovic, E. y Sánez, F. (2006), en colaboración del Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación de la Universidad de Carabobo.

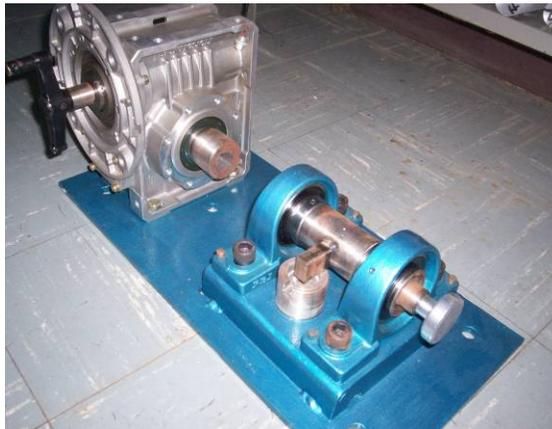


Figura N° 3.12. Máquina para ensayo de torsión.

- **Durómetro digital Rockwell**

Marca: Buehler

Modelo: Macrotech 5100.



Figura N° 3.13. Durómetro digital Rockwell.

3.6 Técnicas de procesamiento de datos

Los diferentes valores obtenidos de los ensayos mecánicos fueron tabulados, y en el caso del ensayo de tracción y torsión se les aplicó las diferentes ecuaciones presentadas en las bases teóricas para así presentar los gráficos de dispersión, en donde se presentarán las relaciones entre las diferentes variables a estudiar, para su posterior análisis.

CAPÍTULO IV
DESARROLLO
DEL
TRABAJO



4.1 Resultados de los ensayos de dureza

Para cada condición de estudio se ha escogido una escala de dureza que permita obtener valores entre los rangos permitidos, y además permitan la conversión a dureza Brinell. Dichos valores no necesitaron ningún tipo de cálculo debido a que el durómetro arroja directamente los valores de dureza, para la conversión a dureza Brinell se utilizó la norma E-140 “Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness”

4.1.1 Resultados del ensayo de dureza en condiciones de recocido (O)

El ensayo se realizó en la escala de dureza brinell estándar, se realizaron siete mediciones en cada una de las 5 probetas ensayadas, dichas mediciones se realizaron a lo largo de una línea imaginaria que va de un extremo de la probeta a otro, una medición en el centro de la probeta (0mm), dos mediciones a aproximadamente 6mm del centro, dos mediciones a aproximadamente 12 mm del centro y finalmente dos a 18 mm del centro. Dichos resultados se reflejan en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.1. Resumen del ensayo de dureza brinell estándar para la condición de recocido.

Probeta	Distancia (mm)							Promedio
	18	12	6	0	6	12	18	
Probeta 1	28,7	29,4	30,2	29,6	29,9	29,6	28,9	29,5
Probeta 2	28,6	29,2	29,9	28,9	29,7	29,1	29,5	29,3
Probeta 3	29,1	29,8	30,3	29,8	30,5	29,7	29,4	29,8
Probeta 4	28,9	29,5	30,1	29,7	29,9	29,4	29,1	29,5
Probeta 5	29	29,4	29,9	29,1	29,2	29,3	29,1	29,2
Promedio								29,5
Desviación estándar								0,23

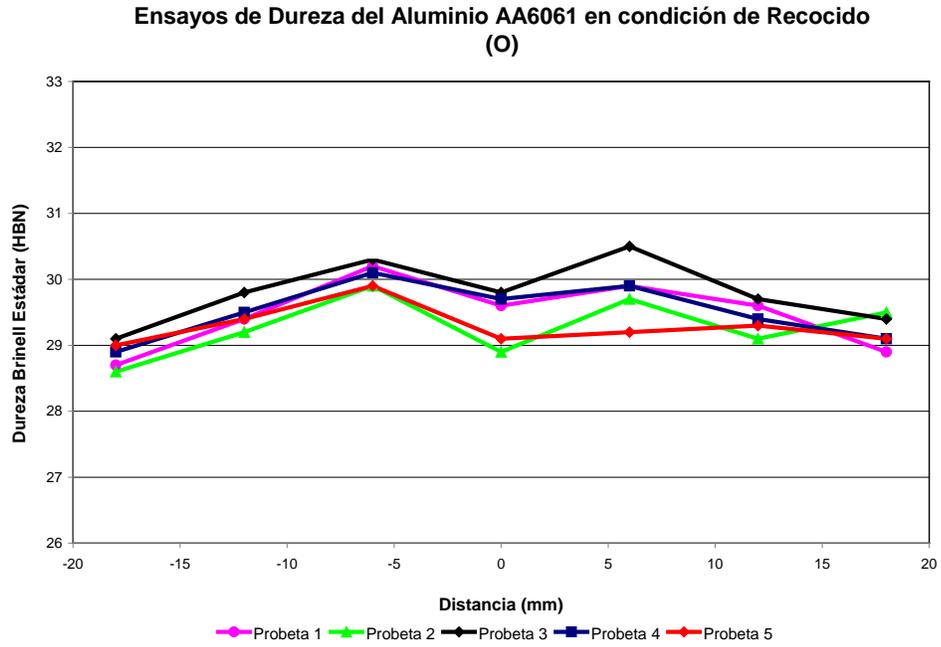


Figura N° 4.1. Resultados del ensayo de dureza brinell estándar en recocido.

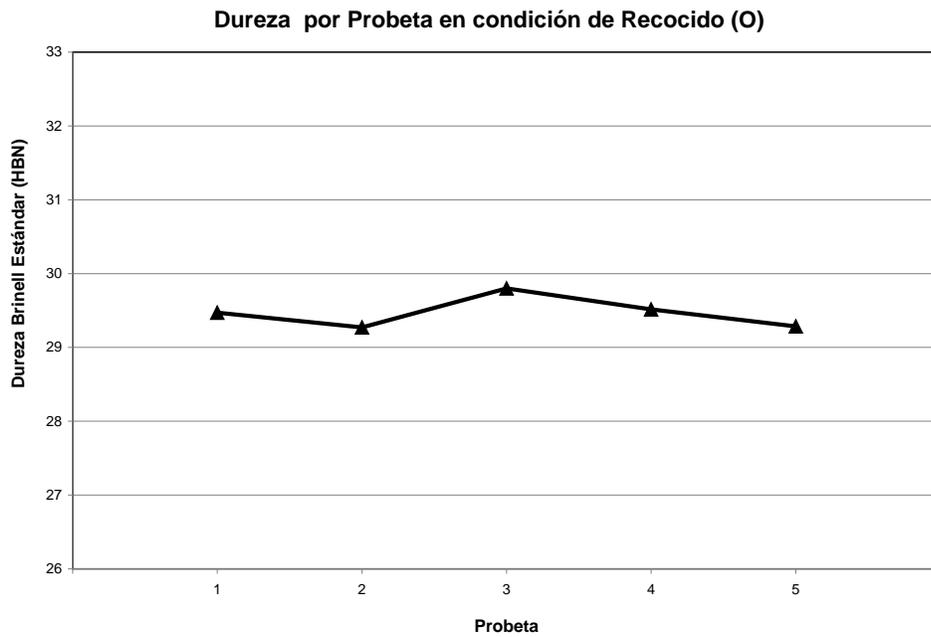


Figura N° 4.2. Resumen del ensayo de dureza en recocido.



4.1.2 Resultados del ensayo de dureza en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)

El ensayo se realizó en la escala de dureza superficial Rockwell 15-T, se realizaron siete mediciones en cada probeta, y la cantidad de cinco probetas para ensayar, dichas mediciones se realizaron a lo largo de una línea imaginaria que va de un extremo de la probeta a otro. Los resultados se reflejan en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.2. Resumen del ensayo de dureza Rockwell 15-T para la condición T4.

Probeta	Distancia (mm)							Promedio (HR15-T)	Promedio (HBN)
	18	12	6	0	6	12	18		
Probeta 1	70,04	72,98	73,40	68,36	73,19	70,04	70,04	71,15	62,9
Probeta 2	72,50	72,70	72,30	69,30	71,70	72,10	72,00	71,80	64,5
Probeta 3	73,43	73,04	73,82	66,83	73,82	72,65	70,13	71,96	64,9
Probeta 4	71,70	72,10	72,50	68,20	71,70	69,90	67,70	70,54	61,4
Probeta 5	70,30	70,90	71,10	67,50	71,70	70,10	69,00	70,09	60,3
Promedio									62,8
Desviación estándar									1,96

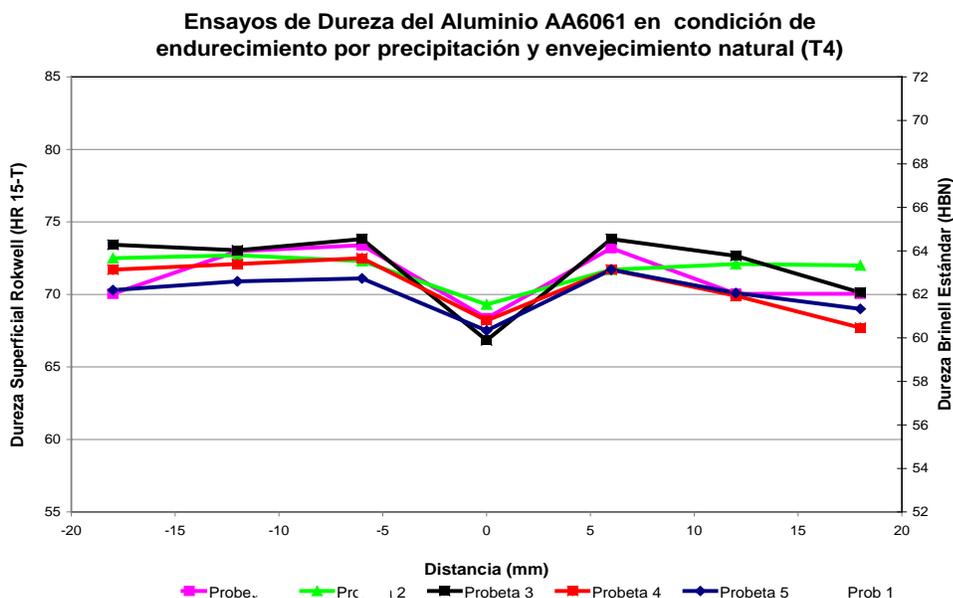


Figura N° 4.3. Resultados de los ensayos de dureza en T4.

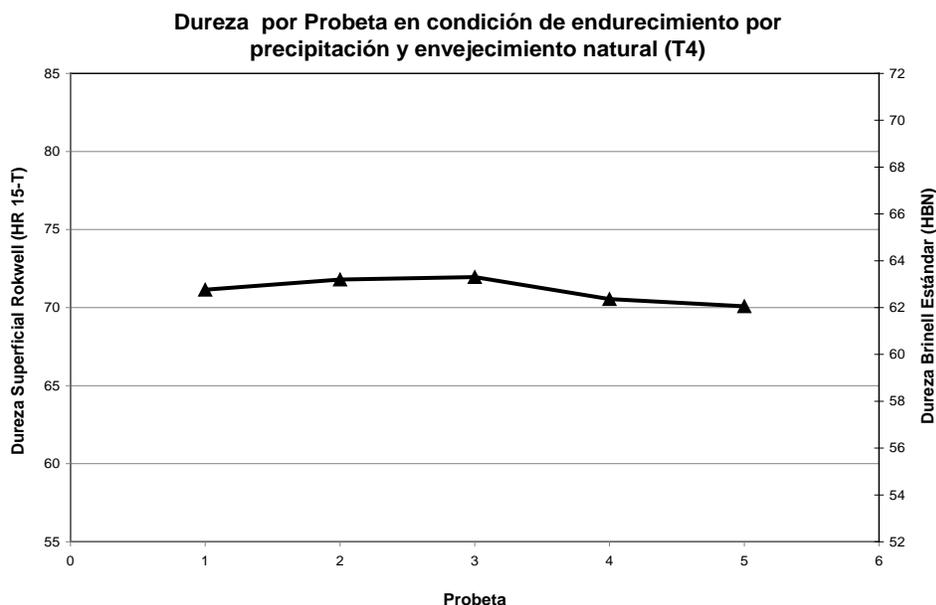


Figura N° 4.4. Resumen del ensayo de dureza en T4.

4.1.3 Resultados del ensayo de dureza en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)

El ensayo se realizó en la escala de dureza Rockwell B, se realizaron siete mediciones en cada probeta, y la cantidad de cinco probetas para ensayar, dichas mediciones se realizaron a lo largo de una línea imaginaria que va de un extremo de la probeta a otro. Dichos resultados se reflejan en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.3. Resumen del ensayo de dureza Rockwell B para la condición T6.

Probeta	Distancia (mm)							Promedio (HRB)	Promedio (HBN)
	18	12	6	0	6	12	18		
Probeta 1	58,4	60,6	61,3	56,3	60,8	59,1	58,9	59,34	99,18
Probeta 2	60,5	61,5	62,3	57,9	61,6	61,8	58,8	60,63	100,62
Probeta 3	53,8	59,2	59,2	54,2	59,1	58,1	55,3	56,99	96,23
Probeta 4	61,2	62,6	62,5	60,4	62	62,9	60,1	61,67	101,67
Probeta 5	55,4	57,3	57,6	54,6	57,3	57,2	53,3	56,10	95,13
Promedio									98,50
Desviación estándar									1,97



Ensayos de Dureza del Aluminio AA6061 en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)

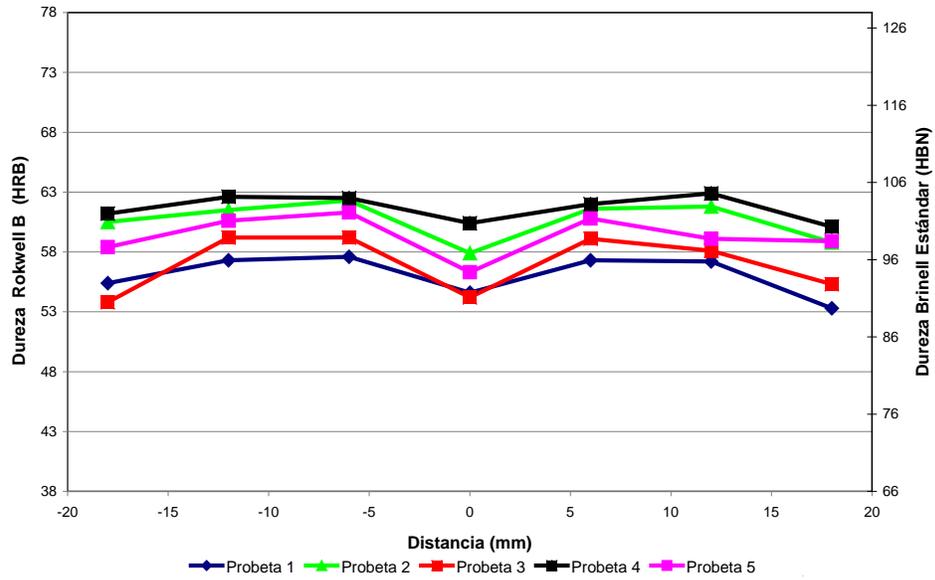


Figura N° 4.5. Resultados del ensayo de dureza en T6.

Dureza por Probeta en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)

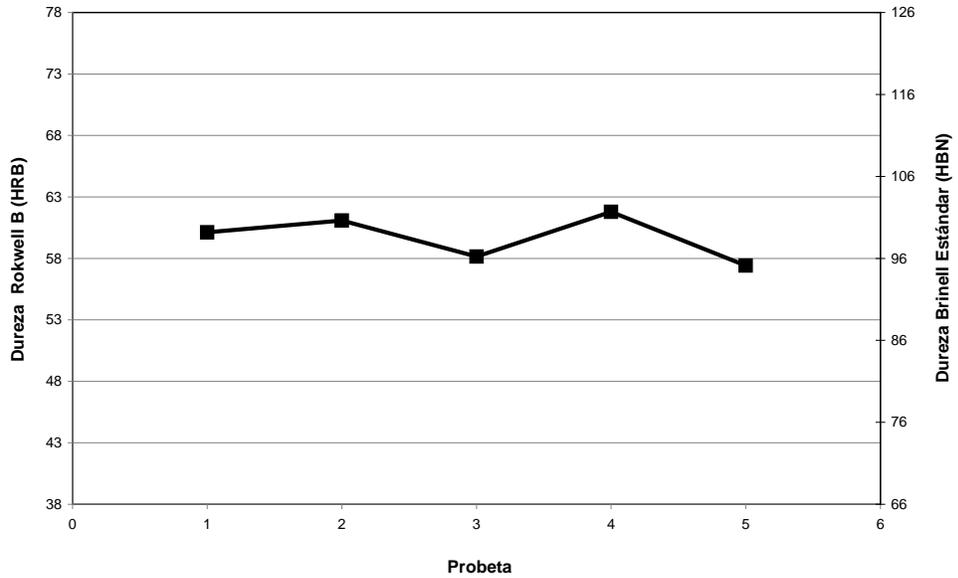


Figura N° 4.6. Resumen del ensayo de dureza en T6.



4.2 Resultados de los ensayos de tracción

Una vez concluidos los ensayos de tracción y obtenido las curvas Carga vs Alargamiento, se procedió a obtener las curvas Esfuerzo vs Deformación con la finalidad de obtener el esfuerzo de fluencia y otros valores característicos de este ensayo.

Para transformar los valores de alargamiento de la probeta a deformación lineal se utilizará la ecuación N° 2.2, mientras que para la transformar el valor de carga en esfuerzo la ecuación N° 2.1, teniendo estas curvas se determina el esfuerzo de fluencia mediante el método offset al 0,2%, en donde es dibujada una línea paralela a la zona elástica de la gráfica tensión-deformación a una deformación de 0,002 (mm/mm), de esta manera el punto donde corte esta gráfica es el esfuerzo de fluencia buscado.

Otros valores característicos a obtener de este ensayo, van a ser el esfuerzo último, el porcentaje de alargamiento a la ruptura.

Este procedimiento se realizó para cada una de las probetas, tomando en cuenta, que se tenían cinco probetas por cada condición para poder validar los ensayos; teniendo así al final de cada condición un resumen de todos los valores obtenidos, y la posibilidad de obtener un promedio de éstos valores que son los que finalmente van a ser utilizados para el desarrollo de los objetivos.

4.2.1 Resultados de los ensayos de tracción en recocido (O)

Los resultados de los ensayos de tracción en recocido se muestran a continuación, en este caso se mostrará cómo realizar todos los cálculos necesarios

para el primer ensayo luego se mostrarán los resultados obtenidos en una gráfica y tabla resumen, esto con la finalidad de simplificar.

4.2.1.1 Resultado del ensayo de tracción en recocido para la probeta N° 1

La máquina de ensayo arroja la relación entre la carga aplicada a la probeta y la deformación correspondiente reflejada en una gráfica carga aplicada vs alargamiento. A continuación se muestra esta curva (la curva que imprime la máquina se encuentra en los anexos).

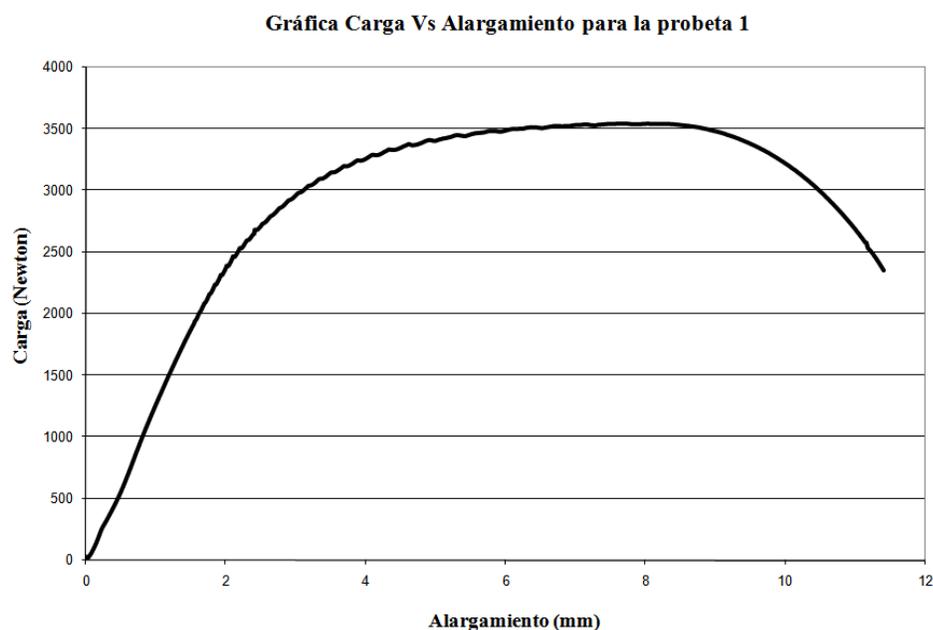


Figura N° 4.7. Gráfica de Carga vs Alargamiento de la probeta N° 1 de recocido.

Una vez obtenida esta curva es necesario transformarla en la curva esfuerzo vs deformación, para ello se aplicarán las ecuaciones necesarias. A continuación se muestra un ejemplo con el punto (1,821; 2062).



Para obtener el valor de la deformación lineal se aplica la ecuación N° 2.2, de la siguiente forma:

$$e = \frac{L_f - L_o}{L_o}$$

Siendo el termino ($L_f - L_o$) el alargamiento de la probeta y L_o la longitud inicial, valor que va a ser igual a la longitud calibrada. Aplicando la ecuación para el punto seleccionado se tiene:

$$e = \frac{1,821 \text{ mm}}{25,4 \text{ mm}} = 0,071 \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

Para obtener el esfuerzo ingenieril se aplica la ecuación N° 2.1 de la siguiente forma:

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

Donde F es la carga aplicada, y A_o representa el área inicial de la probeta que se calcula de la siguiente forma:

$$A_o = \frac{\pi D^2}{4}$$

Sustituyendo el valor del diámetro inicial se obtiene.

$$A_o = \frac{\pi(6,35\text{mm})^2}{4} = 3,17 \times 10^{-5} \text{ m}^4$$

Con este valor del área se calcula el valor del esfuerzo a tracción.

$$\sigma = \frac{F}{A_o} = \frac{2062\text{N}}{3,17 \times 10^{-5} \text{ m}^4} = 65110544,76\text{Pa} = 66,11\text{MPa}$$

Realizando estas operaciones con cada punto de la gráfica de carga vs alargamiento, se obtiene la curva de esfuerzo vs deformación ingenieril, además dibujando la recta offset, resulta la siguiente gráfica.

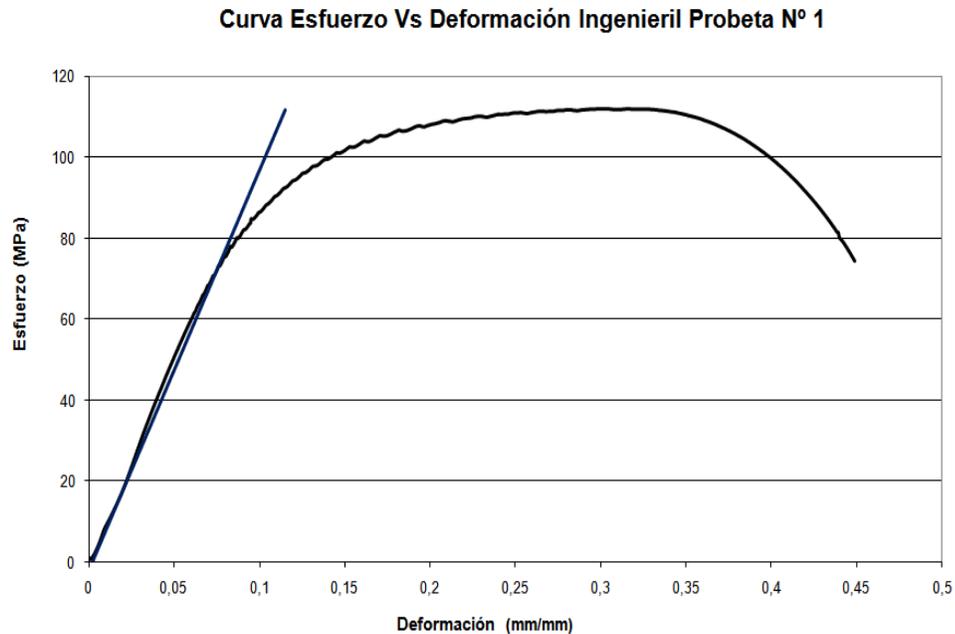


Figura N° 4.8. Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril probeta N°1 de recocido, aplicación del método offset 0,2%.

Una vez obtenida esta curva se pueden obtener los valores característicos de la misma; primero para obtener el esfuerzo de fluencia se busca el corte de la recta offset con la gráfica esfuerzo vs deformación ingenieril, para esta probeta se tiene que dicho valor es de 65,5 MPa para una deformación de 0,066 mm/mm, otro valor importante que se puede obtener de la observación de esta gráfica es el esfuerzo máximo, el cual es para este caso 112,0 MPa con una deformación lineal de 0,32 mm/mm.

La ductilidad del metal, se calcula en función del porcentaje de alargamiento a la ruptura; al final de cada ensayo se midió la longitud final uniendo las dos partes



fracturadas y registrando la distancia que hay entre las marcas de la longitud calibrada. El porcentaje de alargamiento se calcula mediante la ecuación 2.3:

$$\% \text{ Alargamiento} = \left(\frac{L_f - L_o}{L_o} \right) \times (100) = \left(\frac{35,0 - 25,4}{25,4} \right) \times (100) = 37,8\%$$

A continuación se muestra una tabla resumen de todos los valores obtenidos de la curva.

Tabla N° 4.4. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo vs deformación ingenieril para la probeta N° 1 de recocido.

Esfuerzo de fluencia	65,5	MPa
Deformación elástica	0,072	mm/mm
Esfuerzo último	112,0	MPa
% de alargamiento a la ruptura	37,8	%

4.2.1.2 Resumen de los ensayos de tracción en recocido

A continuación se muestra una tabla resumen de los resultados obtenidos en tracción para la condición de recocido, esta tabla contiene los promedios de todas las propiedades extraídas de las gráficas de cada una de las cinco probetas ensayadas, con la finalidad de obtener un valor representativo de cada propiedad.

Tabla N° 4.5. Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de tracción en recocido.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Promedio	Desviación estándar
Esfuerzo de fluencia (Mpa)	65,5	67,1	64,43	60,7	66,43	64,83	2,52
Deformación elástica (mm/mm)	0,072	0,0761	0,0618	0,0704	0,073	0,0707	0,0053
Esfuerzo último (Mpa)	112	113,14	113,71	112,98	112	112,77	0,75
% de alargamiento a la ruptura (%)	37,8	36,6	34,3	35,0	37,0	36,14	1,44

El siguiente gráfico muestra las 5 curvas de esfuerzo vs deformación ingenieril obtenidas en los ensayos de tracción en recocido.

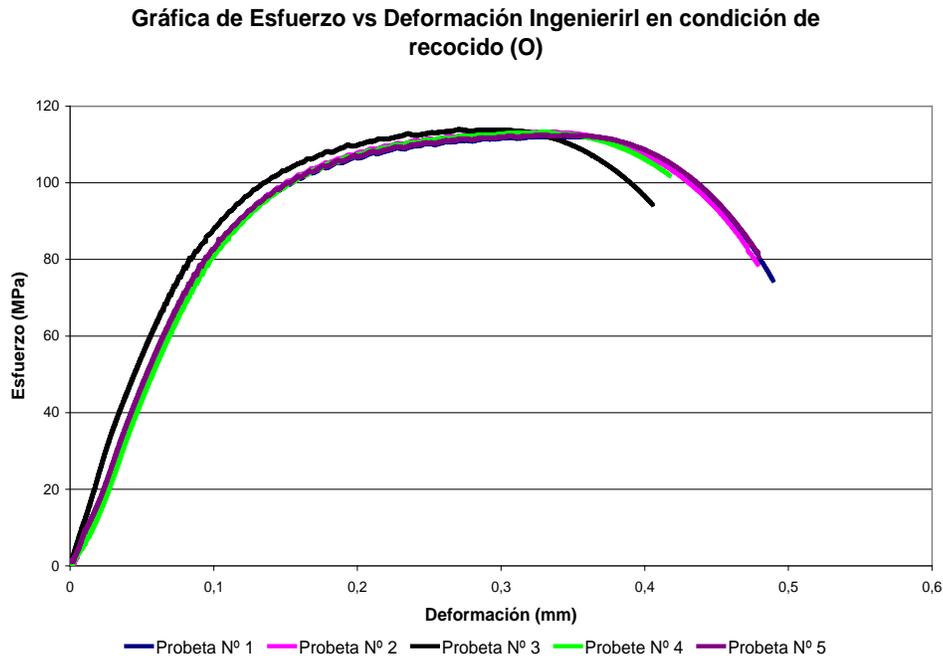


Figura N° 4.9. Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril de las 5 probetas de recocido.

4.2.2 Resultados de los ensayos de tracción para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)

La tabla resumen que se muestra a continuación contiene los resultados obtenidos en tracción para la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4).



Tabla N° 4.6. Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de tracción en T4.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Promedio	Desviación estándar
Esfuerzo de fluencia (Mpa)	135,98	143,5	140,37	149,7	142,94	142,50	5,00
Deformación elástica(mm/mm)	0,0627	0,0728	0,0721	0,082	0,0681	0,0715	0,0071
Esfuerzo último (Mpa)	243,77	259,08	252,55	258,45	257,13	254,19	6,36
% de alargamiento a la ruptura (%)	31,89	31,73	32,44	30,98	30,98	31,60	0,63

Gráficas de Esfuerzo vs Deformación en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)

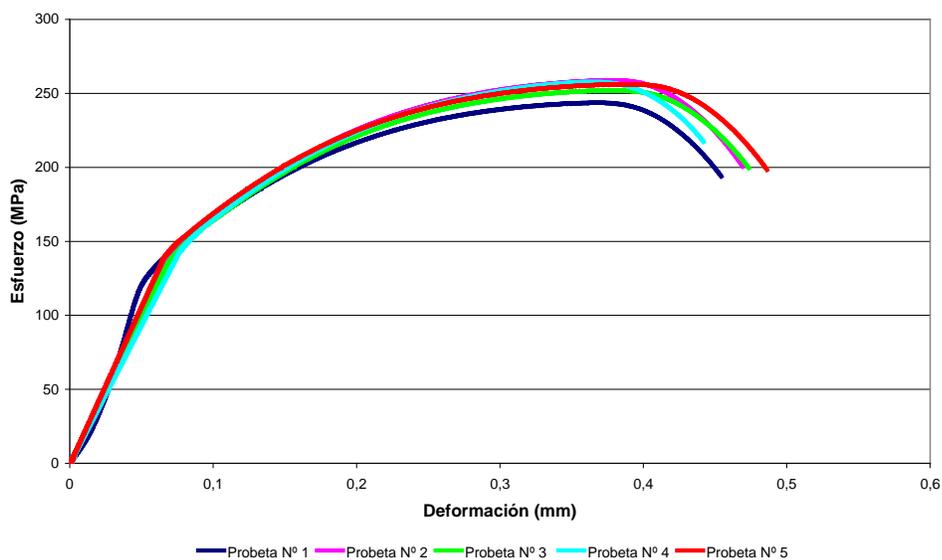


Figura N° 4.10. Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril de las 5 probetas de T4.

4.2.2.1 Resultados de los ensayos de tracción para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)

La tabla resumen que se muestra a continuación contiene los resultados obtenidos en tracción para la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6).



Tabla N° 4.7. Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de tracción en T6.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Promedio	Desviación estándar
Esfuerzo de fluencia (Mpa)	270,42	260,13	254,43	267,9	278,1	266,20	9,19
Deformación elástica (mm/mm)	0,0705	0,0818	0,0884	0,0907	0,0907	0,0844	0,0086
Esfuerzo último (Mpa)	291,36	297,04	306,58	306,26	299,85	300,22	6,43
% de alargamiento a la ruptura (%)	25,2	24,21	25,35	23,22	26,26	24,85	1,16

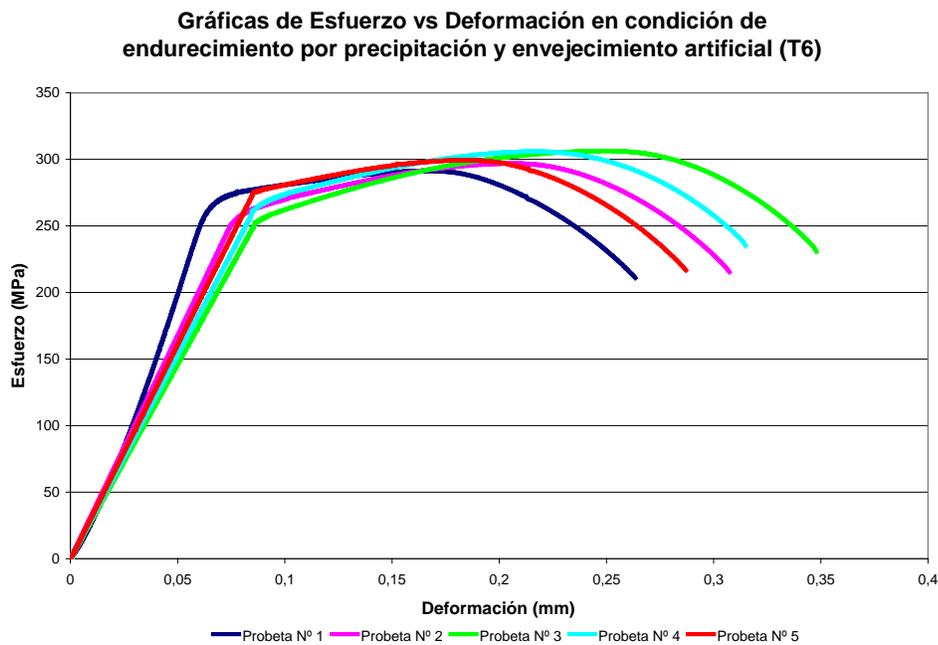


Figura N° 4.11. Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril de las 5 probetas sometidas a T6.

4.3 Resultados de los ensayos de torsión

Una vez realizados los ensayos de torsión es necesario aplicar varias de las relaciones mostradas en el capítulo II, con la finalidad de transformar la curva de momento torsor vs ángulo de giro de la probeta, en una curva de esfuerzo de corte vs deformación angular.



Las curvas obtenidas deberán tener la forma de una curva clásica de esfuerzo deformación, compuesta primero por una zona lineal donde los valores de esfuerzo son proporcionales a los valores de deformación, a esta parte de la curva se le denomina zona elástica, el punto en donde termina la proporcionalidad entre los valores de esfuerzo y deformación se le denomina límite de proporcionalidad.

Luego la curva experimenta una transición a la zona plástica, zona en donde los esfuerzos y las deformaciones tienen una relación potencial; el punto de inicio de esta zona es el llamado esfuerzo de fluencia, punto en el que el material empieza a fluir, la zona plástica culmina con la rotura del material la cual describe el esfuerzo último del mismo.

Para transformar el ángulo de giro de la probeta en deformación angular se utilizará la ecuación N° 2.11, de igual forma se utilizarán las ecuaciones N° 2.14 y N° 2.15 para obtener el esfuerzo de corte a partir del momento torsor.

Tomando en cuenta que los ensayos se realizaron para tres condiciones distintas de tratamientos térmicos y para cada condición un número de ensayos para tener confirmación de los resultados.

A continuación se muestra la condición inicial de las probetas utilizadas en los ensayos de torsión.

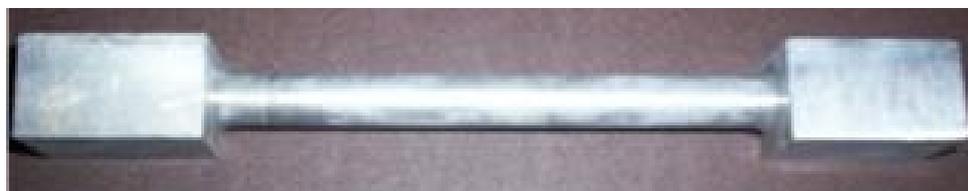


Figura N° 4.12. Condición inicial de las probetas del ensayo de torsión.

4.3.1 Resultados de los ensayos de torsión en recocido

Los resultados de los ensayos de torsión en recocido se muestran a continuación, en este caso se mostrará cómo realizar todos los cálculos necesarios para el primer ensayo luego se mostrarán los resultados obtenidos simplemente, con la finalidad de simplificar.

4.3.1.1 Resultado del ensayo de torsión en recocido para la probeta N° 1

En primer lugar el ensayo da como resultado una curva de momento torsor vs ángulo de giro, esta curva representa, el momento o par de fuerza que se tiene que aplicar a la probeta para producir en la misma un giro sobre su mismo eje, sin permitir ninguna otra deformación. A continuación se muestra esta curva.

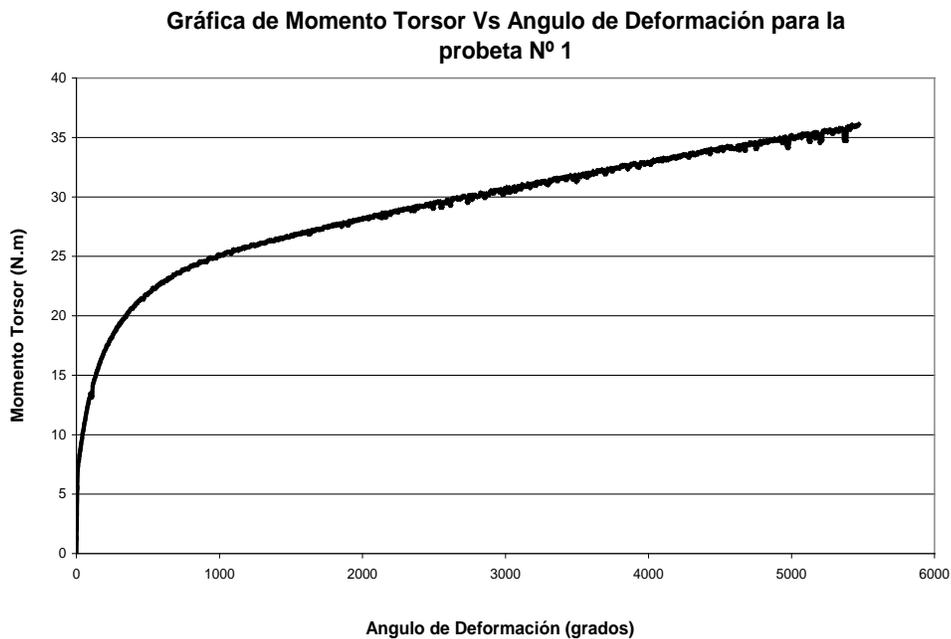


Figura N° 4.13. Gráfica de momento torsor vs ángulo de giro probeta N° 1 de recocido.



Una vez obtenida esta curva es necesario transformarla en la curva esfuerzo deformación, para ello se aplicaran las ecuaciones necesarias. A continuación se muestra un ejemplo con el punto (43,73; 10,1).

Para obtener la deformación angular se aplica la ecuación N° 2.11, de la siguiente forma:

$$\gamma = \frac{R\theta}{L}$$

Siendo γ la deformación angular, R el radio de la probeta, θ el ángulo de giro de la probeta y L la longitud de la misma. Aplicando la ecuación para el punto seleccionado se tiene:

$$\gamma = \frac{(0,005m) \cdot (43,73) \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right)}{0,1m} = 0,038161 \frac{rad}{rad}$$

Para obtener el esfuerzo de corte se aplica la ecuación N° 2.14 y 2.15, de la siguiente forma:

$$\tau = \frac{Mt}{I_p} r$$

Donde Mt es el momento torsor, r es el radio de la probeta y I_p representa la inercia polar de la sección que se calcula de la siguiente forma:

$$I_p = \frac{\pi D^4}{32}$$

Sustituyendo el valor del diámetro se obtiene.



$$I_p = \frac{\pi(0,01)^4}{32} = 9,8175 \times 10^{-10} m^4$$

Con este valor de inercia polar se calcula el valor del esfuerzo de corte.

$$\tau = \frac{10,1N \cdot m}{9,8175 \times 10^{-10} m^4} (0,005m) = 51438877,67 Pa = 51,4 MPa$$

Realizando estas operaciones con cada punto de la gráfica de momento torsor vs ángulo de giro, se obtiene la curva de esfuerzo de corte vs deformación angular que se muestra a continuación.

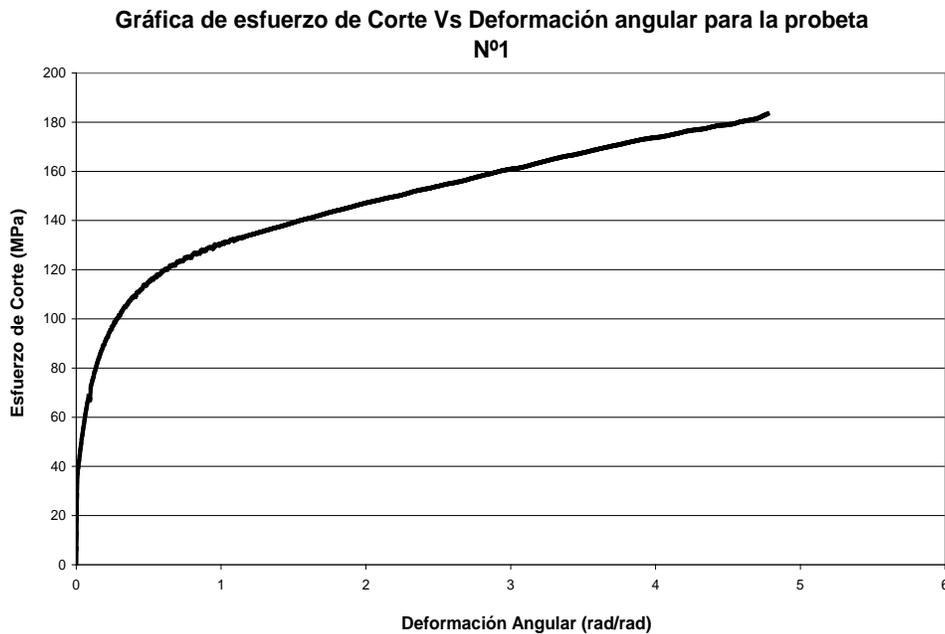


Figura N° 4.14. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 1 de recocido.

Una vez obtenida esta curva se pueden obtener los valores característicos de la misma, primero para obtener el límite de proporcionalidad se traza una recta encima

de la zona elástica y se observa en qué punto la curva esfuerzo deformación se separa de esta recta.

De la gráfica N° 4.16 se observa que el punto donde la proporcionalidad termina es 28,26 MPa, para una deformación angular de 0,004773475 rad/rad, una vez obtenido este punto se puede obtener el módulo de elasticidad en corte o simplemente el módulo de corte, calculando la pendiente de la recta en la zona elástica, mediante la siguiente ecuación N° 2.16, con lo que se obtiene.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{28265917,93Pa}{0,004773475 \frac{rad}{rad}} = 5921454490Pa = 5,9GPa$$



Figura N° 4.15. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 1 ubicación del límite de proporcionalidad.

Una vez calculado el módulo de corte, se obtiene el esfuerzo de fluencia, mediante el método de offset, trazando una recta paralela a la zona elástica, que pase por una deformación angular de 0,002 rad/rad, en el punto en que esta recta corte la



curva de esfuerzo de corte vs deformación angular, se obtiene el esfuerzo de fluencia al corte.

De la gráfica N° 4.17 se observa el punto en que cortan la recta del offset y la curva de esfuerzo de corte vs deformación angular para un esfuerzo de aproximadamente 35000000 Pa o 35 MPa y una deformación de 0,008 rad/rad. Por último es importante reportar el esfuerzo último de corte, es decir el esfuerzo de corte para el cual se produce la rotura de la probeta, a partir de la figura N° 4.15, se observa el esfuerzo último que en este caso también coincide con el esfuerzo máximo el cual es 183906720,1 Pa, para una deformación angular a la rotura de 4,77456633 rad/rad.

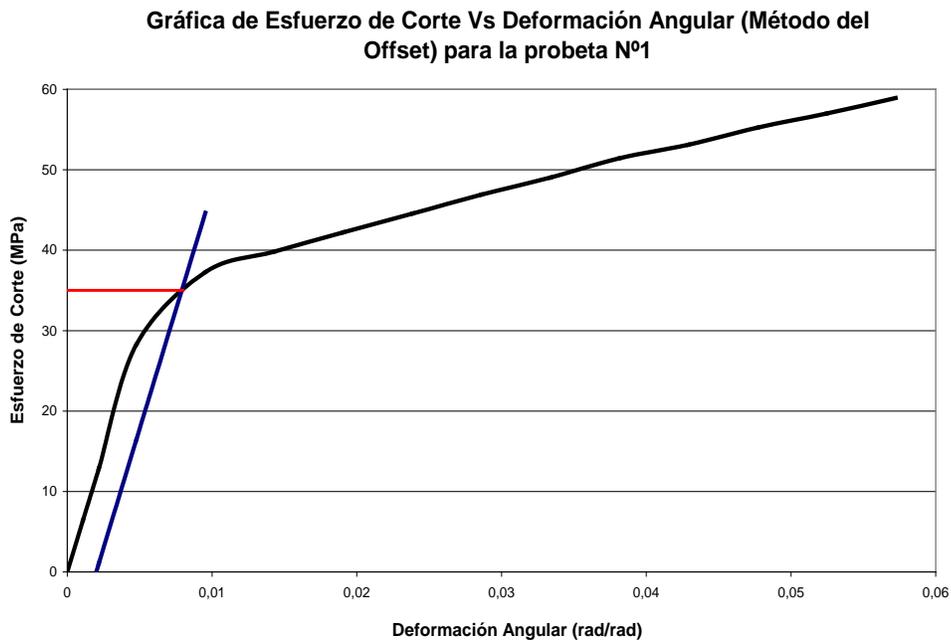


Figura N° 4.16. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 1 aplicación del método del offset.

Tabla N° 4.8. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 1 de recocido.

Límite de proporcionalidad	28,2	MPa
Módulo de elasticidad al corte	5,9	GPa
Esfuerzo de fluencia al corte	35	MPa
Deformación angular elástica	0,008	rad/rad
Esfuerzo último de corte	183,9	MPa
Deformación angular a la rotura	4,77	rad/rad

La siguiente figura muestra la condición de la probeta una vez finalizado el ensayo, la línea negra era al comienzo del ensayo una línea recta de extremo a extremo.



Figura N° 4.17. Condición de la probeta N° 1 una vez finalizado el ensayo de torsión.

4.3.1.2 Resultado del ensayo de torsión en recocido para la probeta N° 2

Una vez mostrado el procedimiento para la probeta N°1, en este caso se presentarán los resultados de manera directa, acotando que el mismo procedimiento usado en la probeta número 1 se repetirá en el resto de los ensayos, por lo tanto se presentará la curva esfuerzo de corte vs deformación angular y una tabla resumen con todos los valores que se extraen de la gráfica.

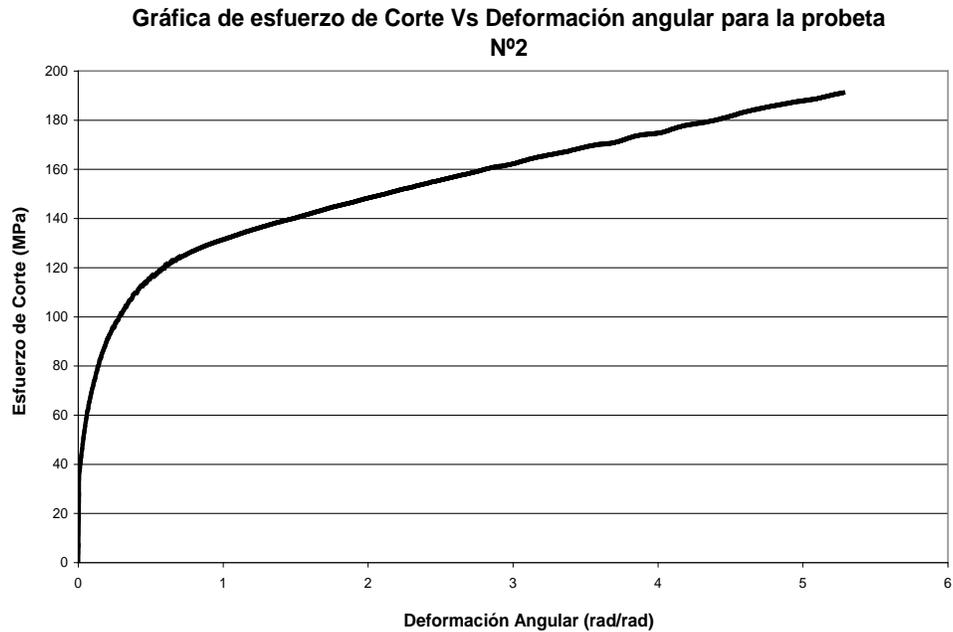


Figura N° 4.18. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 2 de recocido.

Tabla N° 4.9. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 2 de recocido.

Límite de proporcionalidad	27,7	MPa
Módulo de elasticidad al corte	6,5	GPa
Esfuerzo de fluencia al corte	36	MPa
Deformación angular elástica	0,0075	rad/rad
Esfuerzo último de corte	190,98	MPa
Deformación angular a la rotura	5,28	rad/rad

La siguiente figura muestra la condición de la probeta N° 2 una vez finalizado el ensayo de torsión.



Figura N° 4.19. Condición de la probeta N° 2 una vez finalizado el ensayo de torsión.

4.3.1.3 Resultado del ensayo de torsión en recocido para la probeta N° 3

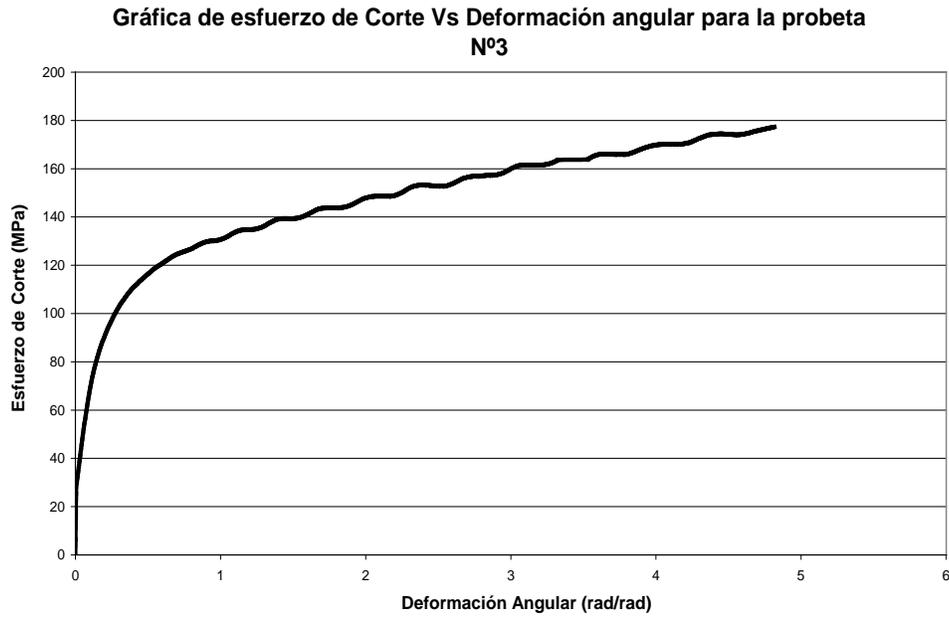


Figura N° 4.20. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 3 de recocido.

Tabla N° 4.10. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 3 de recocido.

Límite de proporcionalidad	28,5	MPa
Módulo de elasticidad al corte	5,9	GPa
Esfuerzo de fluencia al corte	37	MPa
Deformación angular elástica	0,007	rad/rad
Esfuerzo último de corte	174,1	MPa
Deformación angular a la rotura	4,81	rad/rad



Figura N° 4.21. Condición de la probeta N° 3 una vez finalizado el ensayo de torsión.

4.3.1.4 Resultado del ensayo de torsión en recocido para la probeta N° 4

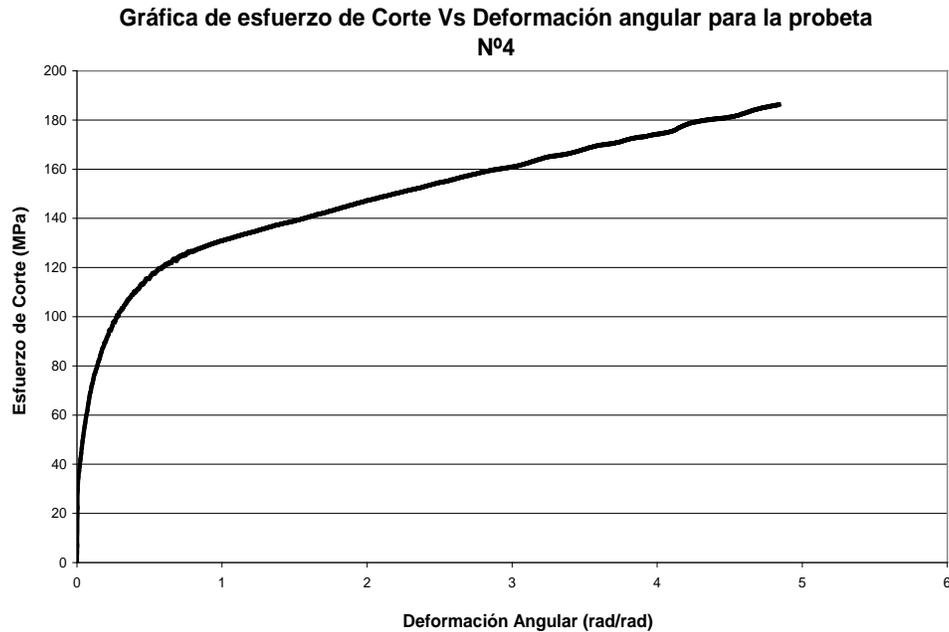


Figura N° 4.22. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 4 de recocido.

Tabla N° 4.11. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 4 de recocido.

Límite de proporcionalidad	29,5	MPa
Módulo de elasticidad al corte	6,1	GPa
Esfuerzo de fluencia al corte	33	MPa
Deformación angular elástica	0,0075	rad/rad
Esfuerzo último de corte	186,1	MPa
Deformación angular a la rotura	4,84	rad/rad



Figura N° 4.23. Condición de la probeta N° 4 una vez finalizado el ensayo de torsión.

4.3.1.5 Resultado del ensayo de torsión en recocido para la probeta N° 5

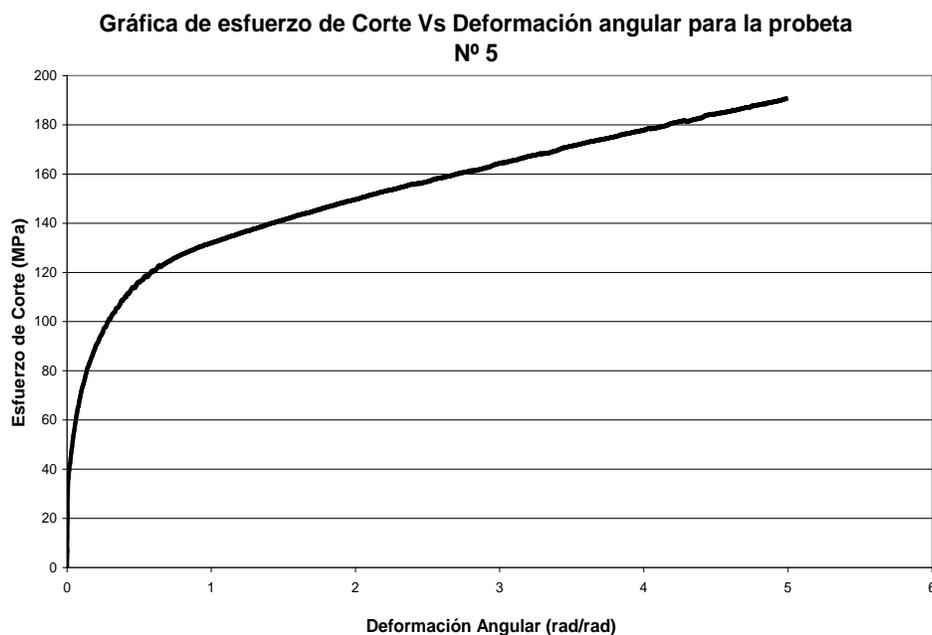


Figura N° 4.24. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 5 de recocido.

Tabla N° 4.12. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 5 de recocido.

Límite de proporcionalidad	29,5	MPa
Módulo de elasticidad al corte	6,1	GPa
Esfuerzo de fluencia al corte	34	MPa
Deformación angular elástica	0,0075	rad/rad
Esfuerzo último de corte	191,1	MPa
Deformación angular a la rotura	4,98	rad/rad



Figura N° 4.25. Condición de la probeta N° 5 una vez finalizado el ensayo de torsión.



4.3.1.6 Coeficiente de endurecimiento por deformación promedio para la condición de recocido

Con la finalidad de obtener la relación entre los esfuerzos de corte y las deformaciones en la zona plástica, se calcula el coeficiente de endurecimiento por deformación con la siguiente ecuación.

$$n = \frac{\log S_u - \log S_y}{\log \gamma_u - \log \gamma_y}$$

Donde S_u y S_y , representan el esfuerzo último y el esfuerzo de fluencia al corte respectivamente, mientras que γ_u y γ_y representan la deformación angular a la ruptura y la deformación angular a la fluencia respectivamente, utilizando los valores promedios de la tabla N° 4.29.

$$n = \frac{\log 185,27 - \log 35}{\log 4,94 - \log 0,0075} = 0,25$$

4.3.2 Resultados de los ensayos de torsión para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)

Los resultados de los ensayos de torsión para la condición de T4 se muestran a continuación, en este caso como ya se mostro como realizar los cálculos necesarios, se mostrará la curva de esfuerzo de corte vs deformación angular así como los resultados obtenidos sin mostrar los cálculos realizados.

4.3.2.1 Resultado del ensayo de torsión en T4 para la probeta N° 1

A continuación se muestra la curva de esfuerzo de corte vs deformación angular resultante para la probeta N°1 de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4), así como una tabla resumen con los demás valores obtenidos.

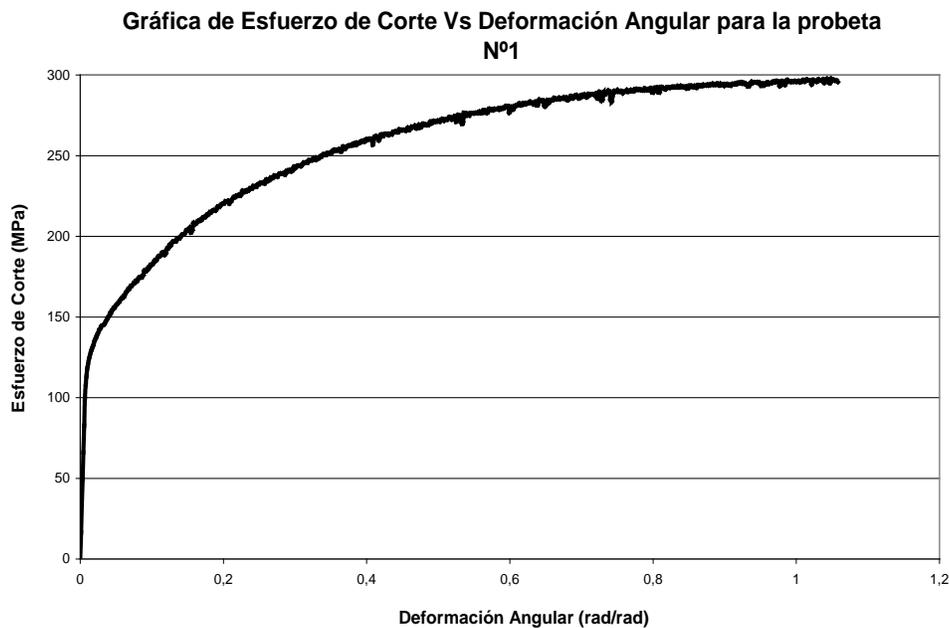


Figura N° 4.26. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 1 de T4.

Tabla N° 4.13. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 1 de T4.

Límite de proporcionalidad	99,3	MPa
Módulo de elasticidad al corte	15,2	GPa
Esfuerzo de fluencia al corte	118,2	MPa
Deformación angular elástica	0,0098	rad/rad
Esfuerzo último de corte	295,6	MPa
Deformación angular a la rotura	1,058	rad/rad



Figura N° 4.27. Condición de la probeta N° 1 una vez finalizado el ensayo de torsión.

4.3.2.2 Resultado del ensayo de torsión en T4 para la probeta N° 2

De igual forma que en el caso anterior a continuación se muestra la curva de esfuerzo de corte vs deformación angular resultante, así como una tabla resumen con los demás valores obtenidos.

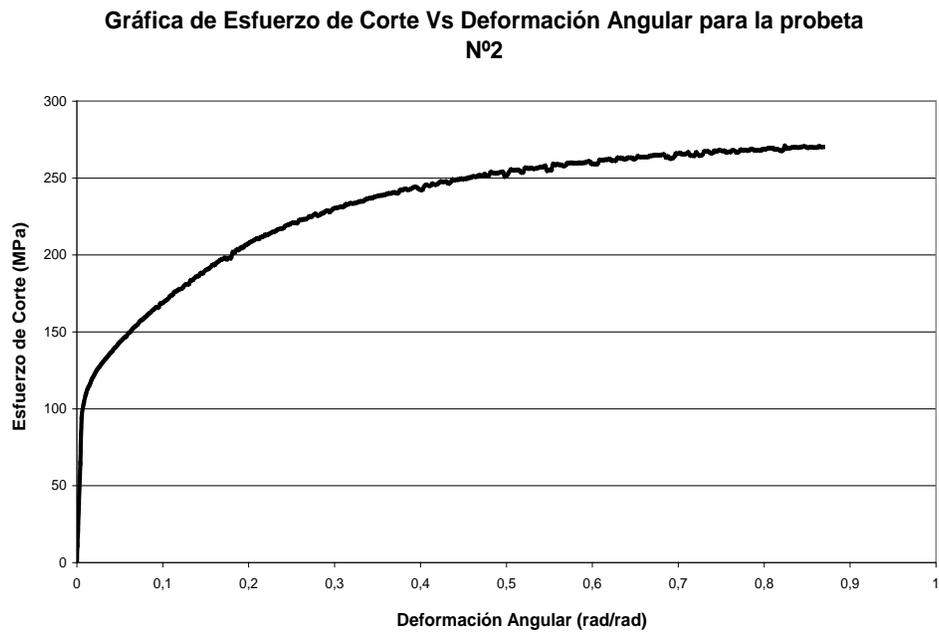


Figura N° 4.28. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 2 de T4.

Tabla N° 4.14. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 2 de T4.

Límite de proporcionalidad	94,5	MPa
Módulo de elasticidad al corte	16,5	GPa
Esfuerzo de fluencia al corte	109,4	MPa
Deformación angular elástica	0,0104	rad/rad
Esfuerzo último de corte	270,2	MPa
Deformación angular a la rotura	0,86	rad/rad



Figura N° 4.29. Condición de la probeta N° 2 una vez finalizado el ensayo de torsión.

4.3.2.3 Resultado del ensayo de torsión en T4 para la probeta N° 3

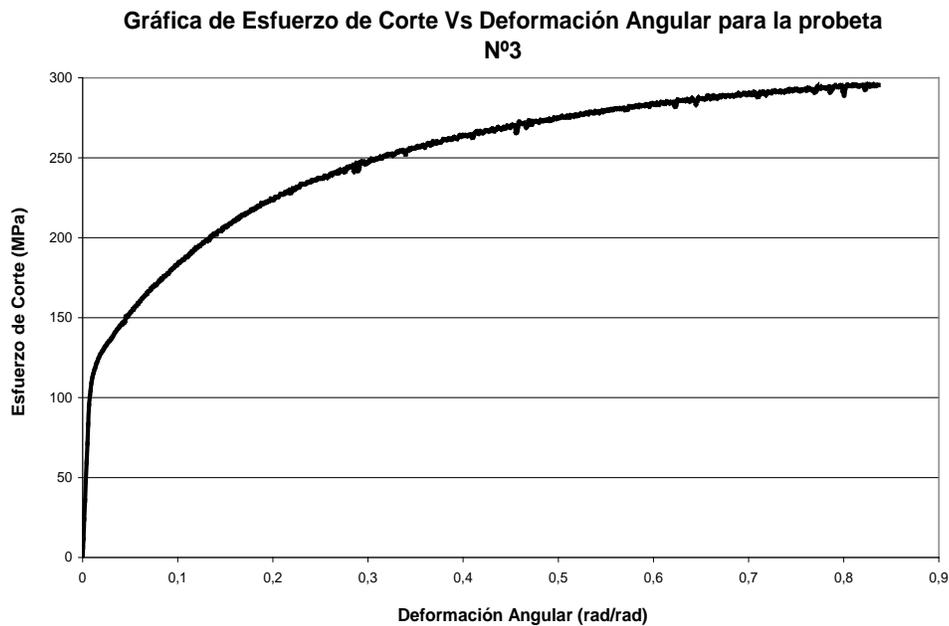


Figura N° 4.30. Gráfica de Esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 3 de T4.

Tabla N° 4.15. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 3 de T4.

Límite de proporcionalidad	95,2	MPa
Módulo de elasticidad al corte	14,2	GPa
Esfuerzo de fluencia al corte	111,8	MPa
Deformación angular elástica	0,00838	rad/rad
Esfuerzo último de corte	295,5	MPa
Deformación angular a la rotura	0,836	rad/rad



Figura N° 4.31. Condición de la probeta N° 3 una vez finalizado el ensayo de torsión.

4.3.2.4 Resultado del ensayo de torsión en T4 para la probeta N° 4

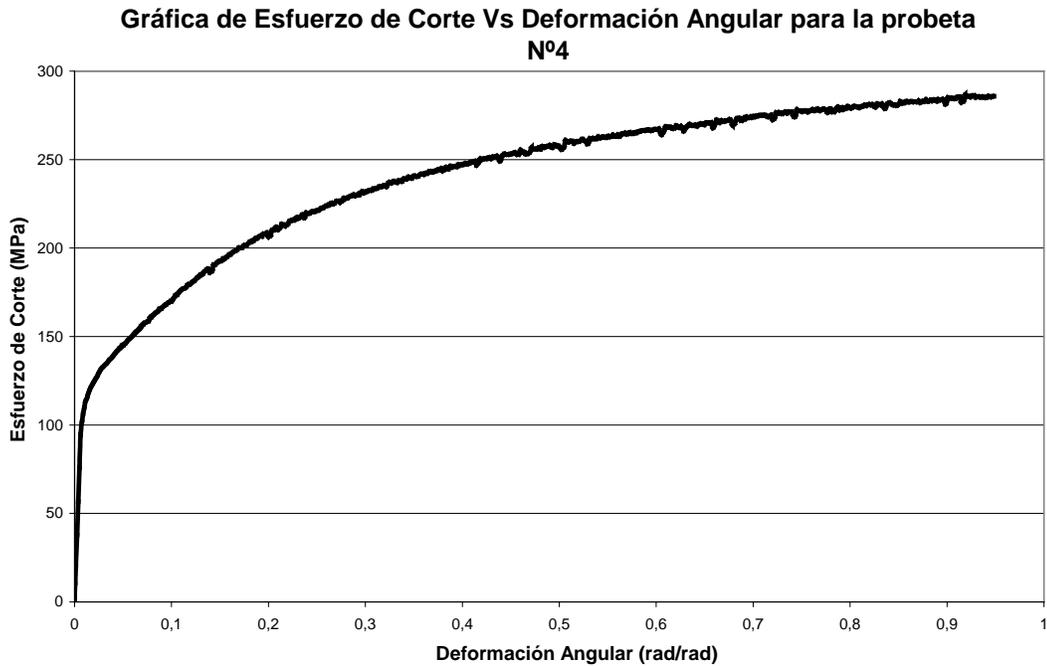


Figura N° 4.32. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 4 de T4.

Tabla N° 4.16. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 4 de T4.

Límite de proporcionalidad	94,6	MPa
Módulo de elasticidad al corte	15,1	GPa
Esfuerzo de fluencia al corte	109,9	MPa
Deformación angular elástica	0,0088	rad/rad
Esfuerzo último de corte	285,8	MPa
Deformación angular a la rotura	0,948	rad/rad



Figura N° 4.33. Condición de la probeta N° 4 una vez finalizado el ensayo de torsión.

4.3.2.5 Resultado del ensayo de torsión en T4 para la probeta N° 5

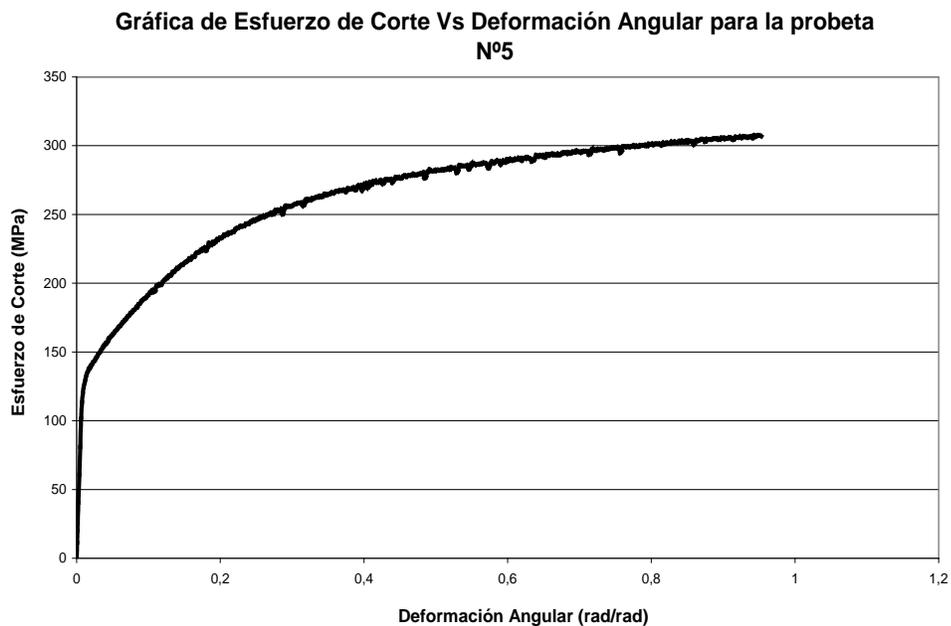


Figura N° 4.34. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 5 de T4.

Tabla N° 4.17. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 5 de T4.

Límite de proporcionalidad	101,3	MPa
Módulo de elasticidad al corte	16,2	GPa
Esfuerzo de fluencia al corte	119,7	MPa
Deformación angular elástica	0,0099	rad/rad
Esfuerzo último de corte	306,8	MPa
Deformación angular a la rotura	0,95	rad/rad



Figura N° 4.35. Condición de la probeta N° 5 una vez finalizado el ensayo de torsión.

4.3.2.6 Coeficiente de endurecimiento por precipitación promedio para la condición de T4

Con la finalidad de obtener la relación entre los esfuerzos de corte y las deformaciones en la zona plástica, se calcula el coeficiente de endurecimiento por deformación con la siguiente ecuación.

$$n = \frac{\log S_u - \log S_y}{\log \gamma_u - \log \gamma_y}$$

Donde S_u y S_y , representan el esfuerzo último y el esfuerzo de fluencia al corte respectivamente, mientras que γ_u y γ_y representan la deformación angular a la ruptura y la deformación angular a la fluencia respectivamente, utilizando los valores promedios de la tabla N° 4.35.

$$n = \frac{\log 290,78 - \log 113,8}{\log 0,9304 - \log 0,009456} = 0,20$$

4.3.3 Resultados de los ensayos de torsión para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)

A continuación se muestran los resultados de los ensayos de torsión para la condición de envejecimiento artificial (T6), para esta condición se realizaron un total de 5 ensayos para confirmar la repetibilidad de los resultados.

Para cada ensayo se mostrará sólo la curva esfuerzo de corte vs deformación angular, los cálculos necesarios para transformar la curva de momento torsor vs ángulo de giro de la probeta son los mismos que se mostraron en la condición de recocido para la probeta N°1.

4.3.3.1 Resultado del ensayo de torsión en T6 para la probeta N° 1

Gráfica de esfuerzo de Corte Vs Deformación angular para la probeta N° 1

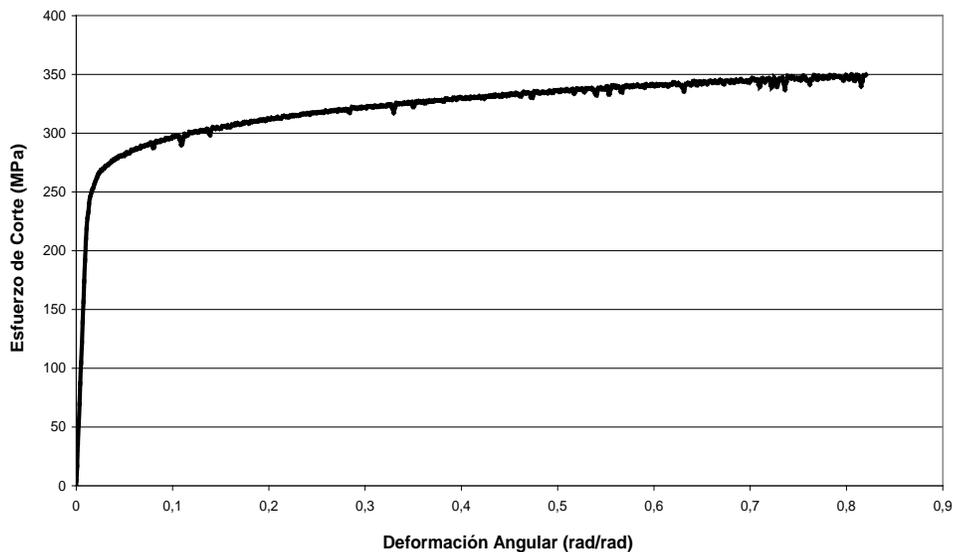


Figura N° 4.36. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 1 de T6.

Tabla N° 4.18. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 1 de T6.

Límite de proporcionalidad	191,90	MPa
Módulo de elasticidad al corte	20,75	GPa
Esfuerzo de fluencia al corte	239,57	MPa
Deformación angular elástica	0,01415	rad/rad
Esfuerzo último de corte	349,88	MPa
Deformación angular a la rotura	0,82	rad/rad



Figura N° 4.37. Condición de la probeta N° 1 una vez finalizado el ensayo de torsión.

4.3.3.2 Resultado del ensayo de torsión en T6 para la probeta N° 2

Gráfica de esfuerzo de Corte Vs Deformación angular para la probeta N° 2

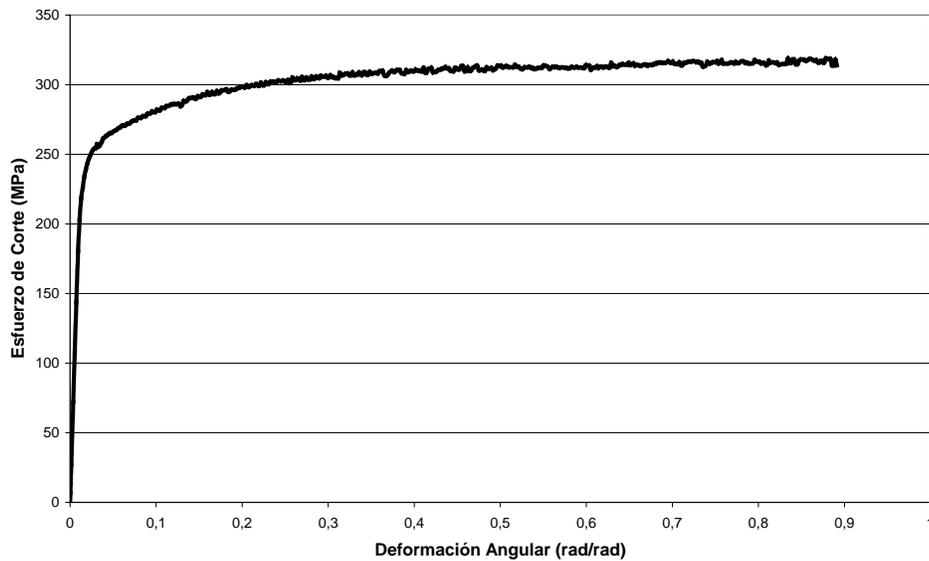


Figura N° 4.38. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 2 de T6.

Tabla N° 4.19. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 2 de T6.

Límite de proporcionalidad	180,34	MPa
Módulo de elasticidad al corte	19,66	GPa
Esfuerzo de fluencia al corte	225,97	MPa
Deformación angular elástica	0,01466	rad/rad
Esfuerzo último de corte	313,87	MPa
Deformación angular a la rotura	0,89	rad/rad



Figura N° 4.39. Condición de la probeta N° 2 una vez finalizado el ensayo de torsión.

4.3.3.3 Resultado del ensayo de torsión en T6 para la probeta N° 3

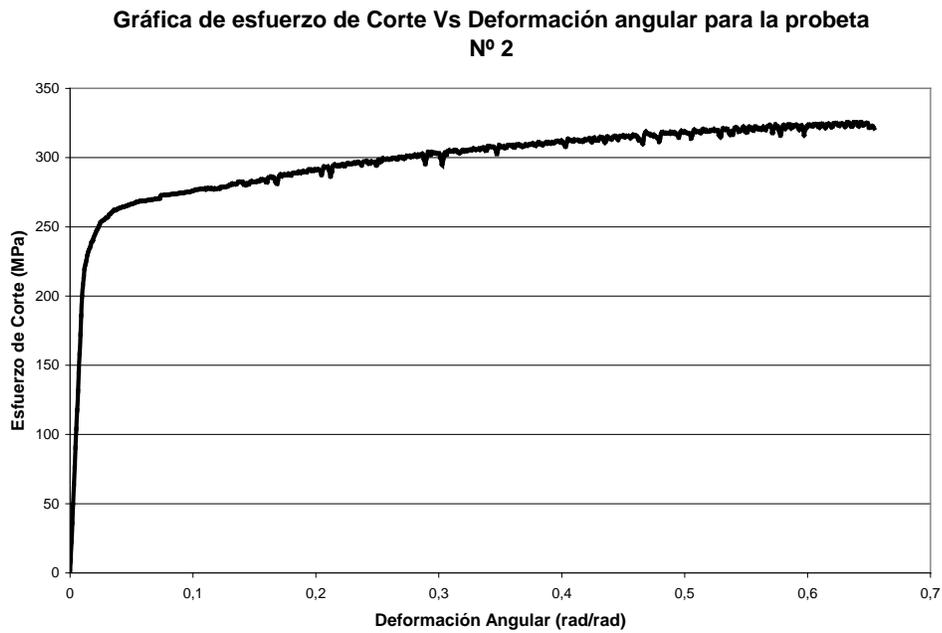


Figura N° 4.40. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 3 de T6.

Tabla N° 4.20. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 3 de T6.

Límite de proporcionalidad	185,74	MPa
Módulo de elasticidad al corte	20,42	GPa
Esfuerzo de fluencia al corte	230,71	MPa
Deformación angular elástica	0,01443	rad/rad
Esfuerzo último de corte	321,06	MPa
Deformación angular a la rotura	0,65	rad/rad



Figura N° 4.41. Condición de la probeta N° 3 una vez finalizado el ensayo de torsión.

4.3.3.4 Resultado del ensayo de torsión en T6 para la probeta N° 4

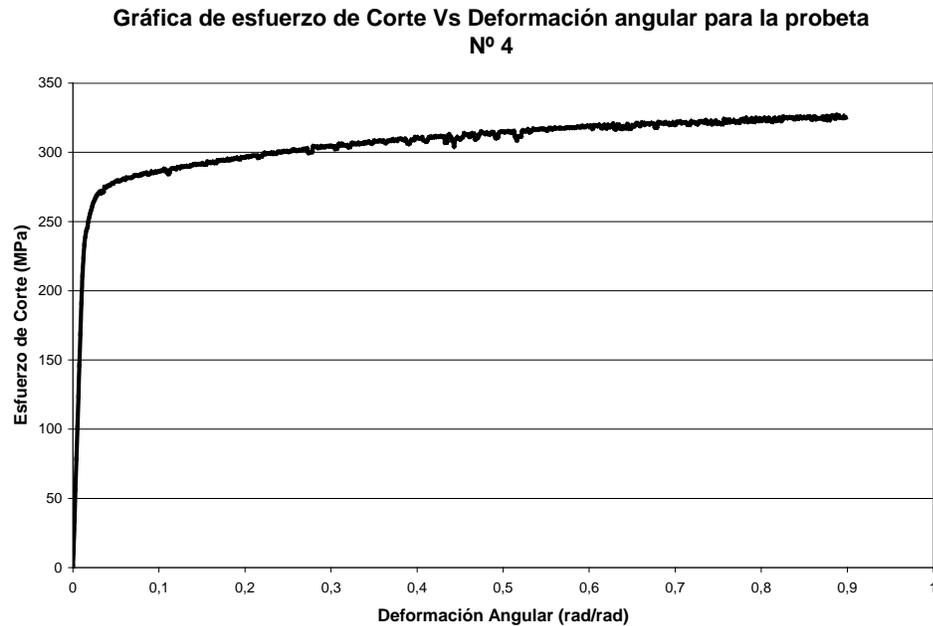


Figura N° 4.42. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 4 de T6.

Tabla N° 4.21. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 4 de T6.

Límite de proporcionalidad	191,13	MPa
Módulo de elasticidad al corte	19,36	GPa
Esfuerzo de fluencia al corte	239,36	MPa
Deformación angular elástica	0,01451	rad/rad
Esfuerzo último de corte	324,93	MPa
Deformación angular a la rotura	0,89	rad/rad



Figura N° 4.43. Condición de la probeta N° 4 una vez finalizado el ensayo de torsión.

4.3.3.5 Resultado del ensayo de torsión en T6 para la probeta N° 5

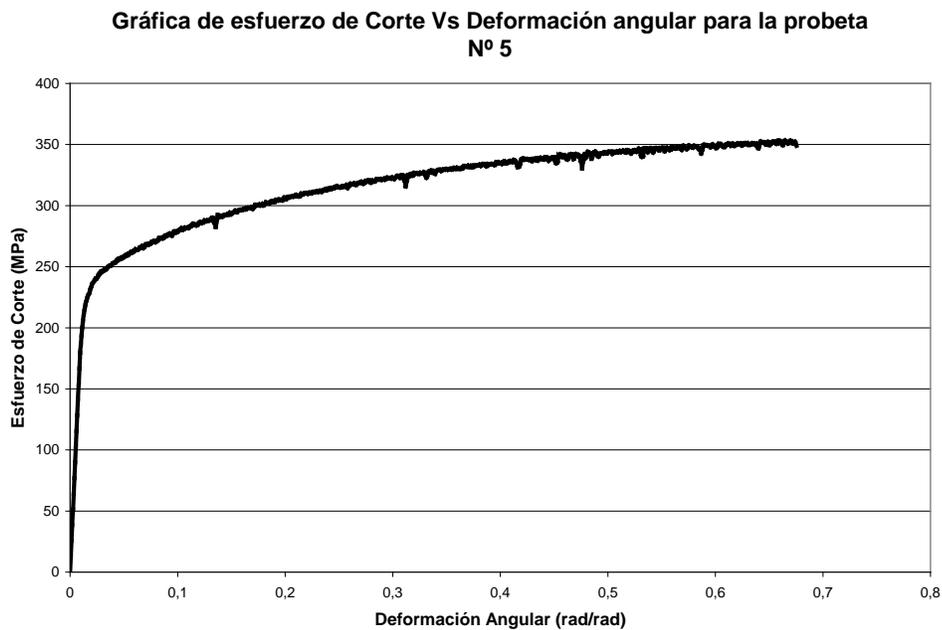


Figura N° 4.44. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular probeta N° 5 de T6.

Tabla N° 4.22. Resumen de los valores obtenidos de la gráfica esfuerzo de corte vs deformación angular para la probeta N° 5 de T6.

Límite de proporcionalidad	186,45	MPa
Módulo de elasticidad al corte	19,24	GPa
Esfuerzo de fluencia al corte	220,72	MPa
Deformación angular elástica	0,01467	rad/rad
Esfuerzo último de corte	348,86	MPa
Deformación angular a la rotura	0,67	rad/rad



Figura N° 4.45. Condición de la probeta N° 5 una vez finalizado el ensayo de torsión.

4.3.3.6 Coeficiente de endurecimiento por precipitación promedio para la condición de T6

Con la finalidad de obtener la relación entre los esfuerzos de corte y las deformaciones en la zona plástica, se calcula el coeficiente de endurecimiento por deformación con la siguiente ecuación.

$$n = \frac{\log S_u - \log S_y}{\log \gamma_u - \log \gamma_y}$$

Donde S_u y S_y , representan el esfuerzo último y el esfuerzo de fluencia al corte respectivamente, mientras que γ_u y γ_y representan la deformación angular a la ruptura y la deformación angular a la fluencia respectivamente, utilizando los valores promedios de la tabla N° 4.41.

$$n = \frac{\log 331,72 - \log 231,26}{\log 0,78 - \log 0,0144} = 0,10$$



4.4 Aplicación de las relaciones entre las propiedades a tracción y torsión

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos de tracción y torsión, se pueden establecer comparación entre los valores obtenidos mediante la aplicación de los criterios de fluencia para materiales dúctiles, en este caso se aplicaran los criterios de fluencia a los cuales se hizo referencia en el capítulo II, los cuales son el criterio de la tensión cortante máxima de Tresca y el criterio de energía máxima de deformación cortante de von Mises, de igual forma se compararán los esfuerzos últimos obtenidos de cada ensayo, así como el modulo de elasticidad en tracción y torsión para ello se hará uso de los resultados obtenidos de los ensayos de tracción y de torsión, estos resultados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.23. Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de tracción y torsión.

		(O)	(T4)	(T6)
Esfuerzo de fluencia (MPa)	Y	64,8	142,5	265,7
Esfuerzo de fluencia al corte (Mpa)	K	35	113,8	231,3
Esfuerzo último de fluencia (MPa)	S _{uf}	112,77	254,19	300,22
Esfuerzo último de corte (MPa)	S _{uc}	185,27	290,78	331,72
Módulo de elasticidad (GPa)	E	1,018	2,002	3,260
Módulo de elasticidad al corte (GPa)	G	6,15	15,44	19,9

La siguiente tabla muestra el resultado de las relaciones entre las propiedades a tracción y torsión, para las distintas condiciones de tratamientos térmicos.

Tabla N° 4.24. Relaciones entre las propiedades a tracción y torsión.

	(O)	(T4)	(T6)
Y/K	1,85	1,25	1,25
S _{uf} /S _{uc}	0,6	0,87	0,90



4.5 Macroscopía a muestras extraídas del ensayo de torsión

Una vez realizados los ensayos de torsión y con la finalidad de ver como se comportaron las líneas de fluencia del material una vez aplicada la torsión, se preparan tres probetas ya rotas del ensayo de torsión, siguiendo los pasos mostrados en el marco metodológico, se obtuvieron las siguientes superficies atacadas.

Para cada una de las macroscopías realizadas se muestra a continuación una foto general de la probeta, así como un acercamiento que permite evaluar las líneas de fluencia, de igual forma se añade una imagen tomada a 50X. Estas imágenes son presentadas y analizadas en los análisis de resultados

4.6 Comparación de los resultados obtenidos con los tabulados por la AA

Una vez finalizados los ensayos es conveniente comparar los resultados obtenidos con los que reporta la Aluminum Association, para tener una referencia clara de la fiabilidad de los resultados obtenidos experimentalmente, tomando en cuenta que en varios casos no se reportan ciertos valores de propiedades por no ser tan relevantes como otros.

A continuación se muestran tres tablas en las cuales se comparan los valores de las propiedades obtenidas por cada condición de tratamiento térmico, en los ensayos de dureza, tracción y torsión:



Tabla N° 4.25. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de recocido, para los ensayos de dureza, tracción y torsión.

	O(experimental)	O(valor referencial)	O(límites norma ASTM B 221M)
Dureza Brinell (HB)	29,5	30 ^A	--
Esfuerzo último (Mpa)	112,77	124 ^A	--
Esfuerzo de fluencia (Mpa)	64,83	55,2 ^A	Máximo 150
%Alargamiento a la rotura	36,14	30 ^A	18
Esfuerzo de fluencia al corte (Mpa)	35,0	82,7 ^A	--
Módulo de corte (Gpa)	6,15	24,0 ^B	--

A: valor típico de la Aluminum Association.

B: valor reportado en el Metals Handbook como estimado de otras aleaciones de aluminio similares.

Tabla N° 4.26. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de T4, para los ensayos de dureza, tracción y torsión.

	T4(experimental)	T4(valor referencial)	T4(límites norma ASTM B 221M)
Dureza Brinell (HB)	62,8	65 ^A	--
Esfuerzo último (Mpa)	254,19	241 ^A	Mínimo 180
Esfuerzo de fluencia (Mpa)	142,5	145 ^A	Mínimo 95
%Alargamiento a la rotura	31,6	25 ^A	16
Esfuerzo de fluencia al corte (Mpa)	113,8	165 ^A	--
Módulo de corte (Gpa)	15,44	24,0 ^B	--

A: valor típico de la Aluminum Association.

B: valor reportado en el Metals Handbook como estimado de otras aleaciones de aluminio similares.



Tabla N° 4.27. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de T6, para los ensayos de dureza, tracción y torsión.

	T6(experimental)	T6(valor referencial)	T6(límites norma ASTM B 221M)
Dureza Brinell (HB)	98,5	95 ^A	--
Esfuerzo último (Mpa)	299,85	310 ^A	Mínimo 240
Esfuerzo de fluencia (Mpa)	278,1	276 ^A	Mínimo 205
%Alargamiento a la rotura	26,26	17 ^A	8
Esfuerzo de fluencia al corte (Mpa)	113,8	207 ^A	--
Módulo de corte (Gpa)	15,44	24,0 ^B	--

A: valor típico de la Aluminum Association.

B: valor reportado en el Metals Handbook como estimado de otras aleaciones de aluminio similares.

CAPÍTULO V
ANÁLISIS
DE
RESULTADOS



5.1 Resultados del ensayo de dureza

Los resultados del ensayo de dureza permiten comprobar de una manera sencilla si la aplicación de los tratamientos térmicos ha sido correcta, los valores resultantes del ensayo fueron convertidos a la escala Brinell estándar debido a que las tablas con las que se va a comparar vienen en dicha escala. Los resultados obtenidos de este ensayo se reflejan en la siguiente tabla:

Tabla N° 5.1. Resumen de los valores promedio obtenidos en los ensayos de dureza.

	(O)	(T4)	(T6)
Dureza Brinell Estándar (HBN)	29,5	62,8	98,5
Valor referencial de dureza ^A	30	65	95

A: valor típico de la Aluminum Association.

Según valores típicos de la AA para la condición de recocido la aleación de aluminio AA6061 presenta un valor de 30 HB, los resultados experimentales arrojan un valor de 29,5 HB en promedio para las 5 muestras, por lo que existe una diferencia del 1,69% entre ambos valores. Los valores típicos de la AA para la condición T4 es de 65 HB, mientras que los experimentales 62,8 HB, entre los valores tabulados y experimentales existe una diferencia de 3,38% ; para la condición T6 la dureza según la AA es de 95 HB y se tienen como resultado experimental 98,5 HB habiendo una diferencia entre ambos valores de 3,68%.

La mayor diferencia entre valores tabulados por la AA y los experimentales fue para la condición T4 y T6, la diferencia de estos valores con los obtenidos en la condición de recocido se debe a que para los primeros mencionados, fue necesaria la conversión de los valores originales a la escala Brinell estándar mediante tablas de conversión mientras que los obtenidos para la condición de recocido fueron obtenidos directamente en escala Brinell. Teniendo en cuenta que la diferencia entre los valores

de la AA con los experimentales en las tres condiciones fue tan poca, se demuestra que la aplicación de los tratamientos térmicos fue satisfactoria.

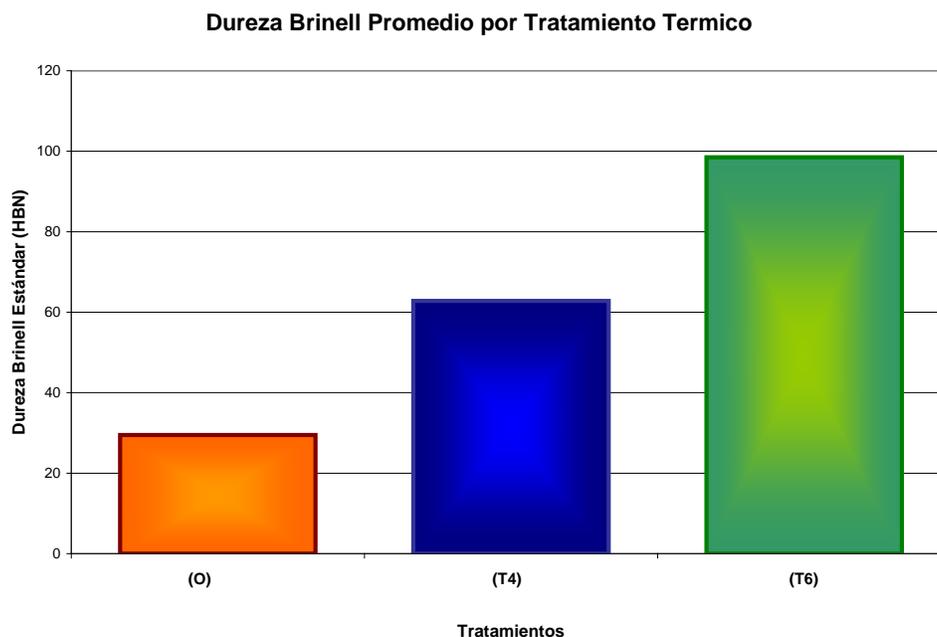


Figura N° 5.1. Gráfica de dureza brinell vs tratamientos térmicos.

La variación de dureza entre los tratamientos térmicos se observa claramente en la figura anterior donde se tienen los valores más bajos de dureza para la condición de recocido, el valor de dureza se duplica con la aplicación del T4; si el valor de dureza en recocido se compara con el del T6 existe una relación de 3,3 o sea que triplica el valor de dureza; este comportamiento era esperado ya que el objetivo del envejecimiento del aluminio es el de aumentar los valores de las propiedades de la aleación.

5.2 Ensayo de tracción

Los resultados del ensayo de tracción permitieron conocer valores característicos de la aleación de aluminio AA6061, como el esfuerzo de fluencia;

propiedad mecánica que es relacionada con el esfuerzo de fluencia al corte mediante los criterios de fluencia, relación que fue calculada en el capítulo anterior.

El siguiente gráfico muestra la curva de esfuerzo vs deformación angular para una probeta con un comportamiento típico en cada condición de tratamiento térmico.

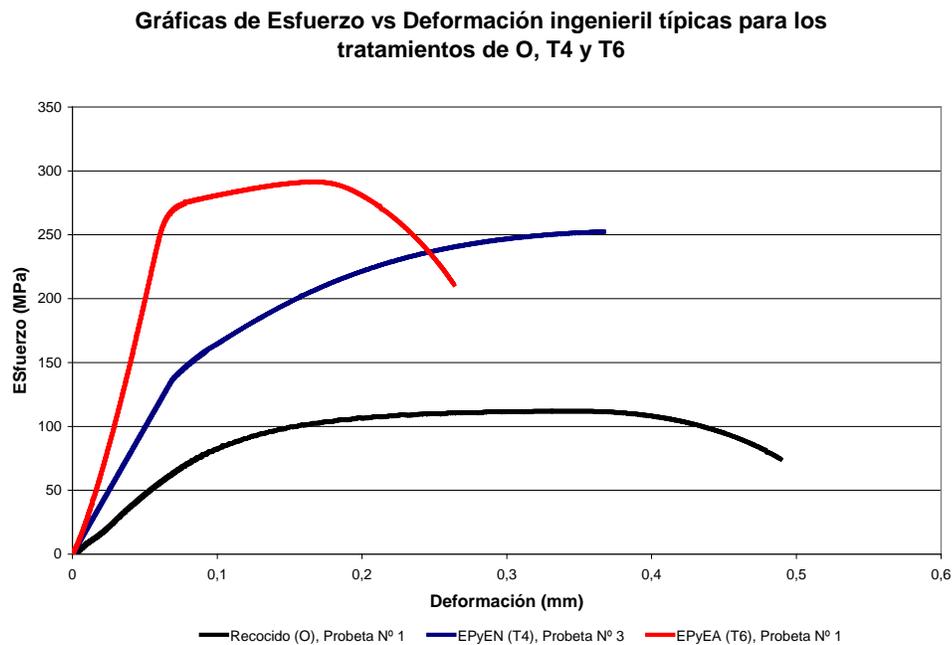


Figura Nº 5.2. Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril típicas para los tratamientos de O, T4 y T6.

5.2.1 Ensayo de tracción en condición de recocido

Esta condición del aluminio viene a representar las condiciones originales del mismo, así que todos los valores que se obtengan del ensayo de tracción para esta condición van a servir como puntos de comparación, cuando se requiera tener una relación con los tratamientos térmicos T4 y T6.



Tabla N° 5.2. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de recocido para el ensayo de tracción.

	O(experimental)	O^A (valor referencial)	O(límites norma ASTM B 221M)
Esfuerzo de fluencia (Mpa)	64,83	55,2	Máximo 150
Esfuerzo último (Mpa)	112,77	124	--
%Alargamiento a la rotura	36,14	30	18

A: valor típico de la Aluminum Association.

El valor promedio del esfuerzo de fluencia es de 64,83 MPa, dicho resultado es superior a los tabulados por la AA por 9,63 MPa lo que representa una diferencia del 17,44 %, aun así este valor es válido debido a que la norma ATM B221M-051 indica que para la condición de recocido se puede tener hasta un máximo de esfuerzo de fluencia de 150 MPa.

El valor del esfuerzo último según la AA es de 124 MPa, el obtenido experimentalmente es de 112,77 MPa, entre ambos valores existe una diferencia del 9,06 %. Otro valor característico a obtener de este ensayo, es la ductilidad del material, dicho valor está representado en el porcentaje de deformación a la rotura, el cual experimentalmente se determinó en 36,14 % mientras que el porcentaje de deformación de la AA es de 30%, habiendo una diferencia entre ambos del 6,14%.

5.2.2 Ensayo de tracción en condición T4

Teniendo como referencia la figura N° 5.1 donde se comparan las gráficas de esfuerzo vs deformación ingenieril en cada condición, se visualiza un claro aumento de las propiedades mecánicas como el de esfuerzo de fluencia, y el esfuerzo último, por ejemplo en cuanto al esfuerzo de fluencia es en una relación de 2,2 dicho aumento era de esperarse ya que ese, es el objetivo del envejecimiento natural.



Tabla N° 5.3. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de T4 para el ensayo de tracción.

	T4(experimental)	T4^A (valor referencial)	T4(límites norma ASTM B 221M)
Esfuerzo de fluencia (Mpa)	142,5	145	Mínimo 95
Esfuerzo último (Mpa)	254,19	241	Mínimo 180
%Alargamiento a la rotura	31,6	25	16

A: valor típico de la Aluminum Association.

El esfuerzo de fluencia según la AA es de 145 MPa habiendo una diferencia entre el obtenido experimentalmente de 1,72%, entre el esfuerzo último de la AA y el obtenido experimentalmente hay una diferencia del 5,47%, en cuanto a la ductilidad del material no hay mayor diferencia ya que el presentado por la AA es de 25% y el obtenido experimentalmente 31,60%.

5.2.3 Ensayo de tracción en condición T6

En la figura N° 5.1 se visualiza que la curva esfuerzo vs deformación ingenieril del T6 está arriba de las demás gráficas, si se toma como referencia el esfuerzo de fluencia se tiene que entre la condición T4 y T6 existe un aumento con una relación de 1,86, casi el doble, y en cuanto a la condición T6 y la de recocido es de 4,1.

Tabla N° 5.4. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de T6 para el ensayo de tracción.

	T6(experimental)	T6^A (valor referencial)	T6(límites norma ASTM B 221M)
Esfuerzo de fluencia (Mpa)	278,1	276	Mínimo 205
Esfuerzo último (Mpa)	299,85	310	Mínimo 240
%Alargamiento a la rotura	26,26	17	8

A: valor típico de la Aluminum Association.



Según valores típicos de la AA la aleación de aluminio AA6061 presenta un esfuerzo de fluencia de 276 MPa, los resultados experimentales arrojan un valor de 266,2 MPa, habiendo así una diferencia entre ambos valores de 3,5 %, el esfuerzo último según AA es de 310 MPa y el valor promedio de los ensayos es de 300,22 MPa, habiendo solo una diferencia entre ambos del 3,15%; la ductilidad en la condición T6 disminuye considerablemente respecto a las otras dos condiciones, toda la ganancia de resistencia a la tracción fue a costa de una disminución de la ductilidad, la diferencia para este valor característico y el valor AA es de 7 %.

5.2.4 Relación entre las propiedades a tracción para las muestras ensayadas a diferentes tratamientos térmicos

Comparando los resultados obtenidos en los ensayos a diferentes tratamientos térmicos, se evidencia el cambio que experimentan las propiedades mecánicas resultantes del ensayo de tracción con la aplicación de los tratamientos térmicos.

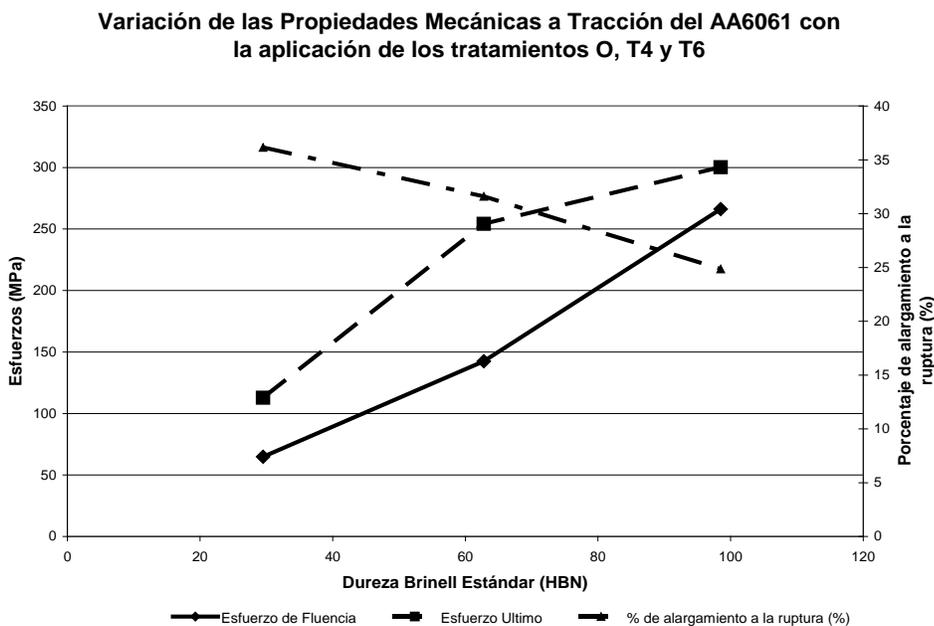


Figura N° 5.3. Gráfica de variación de las propiedades mecánicas a tracción del AA6061 con la aplicación de los tratamientos O, T4 y T6.



La figura anterior, relaciona a las propiedades que se obtuvieron del ensayo de tracción, con la dureza en cada condición de tratamiento térmico, en esta gráfica se nota, como el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo último aumentan a medida que la dureza aumenta, esto a costa de una disminución de la ductilidad.

El esfuerzo de fluencia en condiciones de T4 es mas de 2,2 veces mayor que en condiciones de recocido y en T6 es 4 veces mayor, lo que indica claramente como la aplicación de estos tratamientos genera un incremento en el valor de esta propiedad. De igual forma esfuerzo último aumenta también 1,9 veces con la aplicación del T4 y 2,5 veces con la aplicación del T6.

5.3 Ensayos de torsión

5.3.1 Ensayos de torsión en condición de recocido

A continuación se muestra una tabla resumen de los resultados obtenidos en torsión para la condición de recocido, esta tabla contiene los promedios entre cada uno de los ensayos para la misma condición.

Tabla N° 5.5. Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de torsión en recocido.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Promedio	Desviación estándar
Límite proporcional (Mpa)	28,27	27,70	28,52	29,54	29,54	28,71	0,81
Módulo de elasticidad al corte (GPa)	5,92	6,52	5,94	6,19	6,15	6,15	0,24
Esfuerzo de fluencia al corte (Mpa)	35	36	37	33	34	35	1,5
Deformación angular elástica (rad/rad)	0,008	0,008	0,007	0,008	0,008	0,0075	0,0004
Esfuerzo último de corte (Mpa)	183,91	190,99	174,18	186,20	191,09	185,27	6,93
Deformación angular a la rotura (rad/rad)	4,77	5,28	4,82	4,84	4,99	4,94	0,21

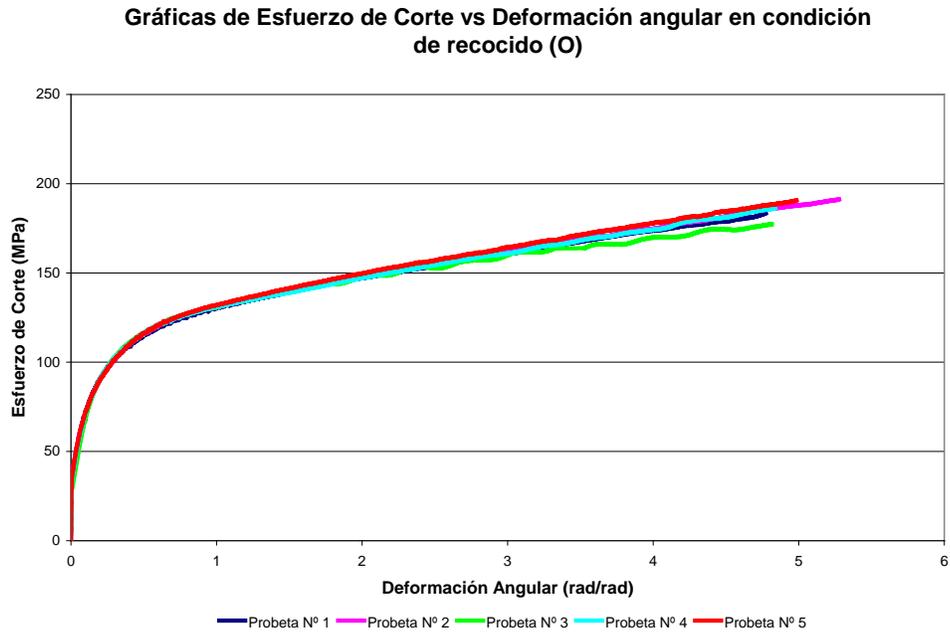


Figura N° 5.4. Gráficas de esfuerzo de corte vs deformación angular de las 5 probetas en recocido.

En las gráficas de esfuerzo de corte vs deformación angular para esta condición, se observa como las curvas de las 5 muestras ensayadas son muy similares, en promedio se obtuvo un esfuerzo de fluencia al corte de 35 MPa para una deformación angular de 0,0075 rad/rad, el cual es equivalente a 8° de giro de la probeta, en promedio se tuvo un esfuerzo último de corte de 185 MPa con una deformación angular a la rotura de casi 5 rad/rad, lo que deja en evidencia la gran cantidad de deformación que admite el material bajo la condición de recocido y la gran diferencia entre el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último se debe a que existe un endurecimiento por deformación notablemente grande lo que se traduce en un incremento de los esfuerzos a medida que aumentan las deformaciones desde el punto de fluencia hasta la rotura.

En general, de los 5 ensayos realizados para esta condición se observa como característica notable que existe una variación significativa entre las deformaciones



angulares a la rotura, estos 5 valores presentan entre sí un rango de 0,50 rad/rad, que equivale a 570° de giro es decir una vuelta y media más durante el ensayo. Estas variaciones se puede deber a que la condición de recocido es la que requirió mayor número de vueltas durante el ensayo, lo que hizo más difícil mantener la velocidad de giro constante durante todo el ensayo.

El resto de los parámetros calculados como el módulo de elasticidad al corte, el límite proporcional y la deformación angular elástica presentan en las 5 muestras ensayadas valores muy similares.

Tabla Nº 5.6. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de recocido para el ensayo de torsión.

	O(experimental)	O (valor referencial)
Esfuerzo de fluencia al corte (Mpa)	35,0	82,7 ^A
Módulo de corte (Mpa)	6,15	24,0 ^B

A: valor típico de la Aluminum Association.

B: valor reportado en el Metals Handbook [17] como estimado de otras aleaciones de aluminio similares.

En cuanto a la comparación de los resultados obtenidos con los recomendados por la AA, que en este caso solo reporta valores para el esfuerzo de fluencia al corte, el esfuerzo de corte tabulado por la AA es de 82 MPa mientras que el obtenido experimentalmente equivale a 35 MPa, lo que indica que el resultado estuvo por debajo más de un 50%, estos resultados tan bajos se deben a que para esta condición de ensayo la fluencia se alcanza a tan solo 8° de giro de la probeta, casi en el mismo inicio del ensayo, momento en el cual la velocidad del ensayo es muy inestable ya que se produce la aceleración inicial para ir de 0 a 1 rev/min, por lo que es muy probable que la velocidad halla sido inferior a la estipulada por el ensayo.



El valor de módulo de elasticidad al corte no está especificado por la AA, valores similares de algunas aleaciones de aluminio estiman un módulo de corte de 24 GPa y el obtenido estuvo en el orden de los 6 GPa es decir el resultado equivale a 25% de lo que se esperaba.

5.3.2 Ensayos de torsión en condición de T4

Tabla N° 5.7. Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de torsión en T4.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Promedio	Desviación estándar
Límite proporcional (Mpa)	99,3	94,5	95,2	94,6	101,3	96,98	3,28
Módulo de elasticidad al corte (GPa)	15,2	16,5	14,2	15,1	16,2	15,44	0,92
Esfuerzo de fluencia al corte (Mpa)	118,2	109,4	111,8	109,9	119,7	113,8	4,81
Deformación angular elástica (rad/rad)	0,0098	0,0104	0,0083	0,0088	0,0099	0,0094	0,0008
Esfuerzo último de corte (Mpa)	295,6	270,2	295,5	285,8	306,8	290,78	13,69
Deformación angular a la rotura (rad/rad)	1,058	0,86	0,836	0,948	0,95	0,9304	0,087

Gráficos de Esfuerzo de Corte Vs Deformación Angular en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)

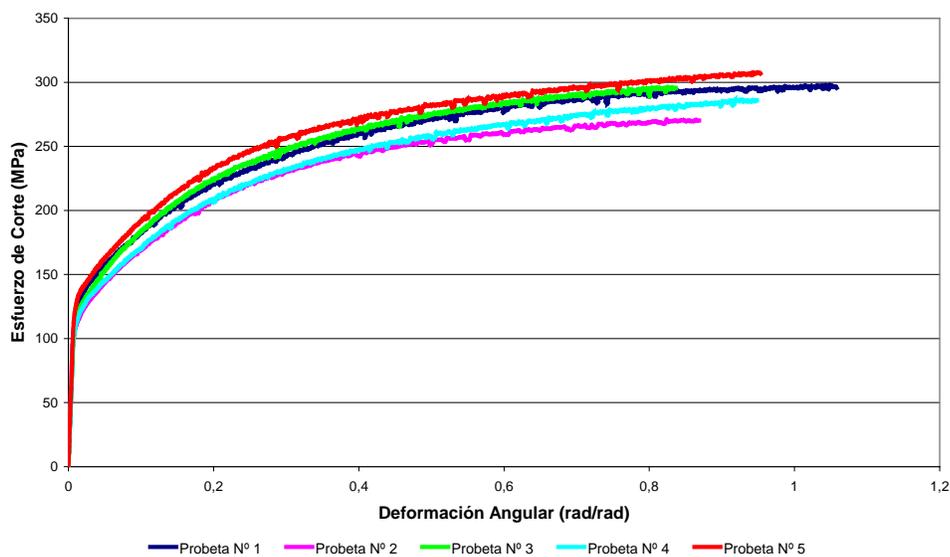


Figura N° 5.5. Gráficas de esfuerzo de corte vs deformación angular de las 5 probetas de T4.



Para las 5 muestras ensayadas bajo la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4) se obtuvo en promedio un esfuerzo de fluencia al corte de 114 MPa, y este esfuerzo ocurre para una deformación angular promedio de 0,0094 rad/rad que equivale a 11° grados de giro de la probeta.

A su vez los ensayos arrojan en promedio un esfuerzo último de corte de 290 MPa para una deformación angular cercana a 1 rad/rad, lo que indica que todas las probetas rompieron en la cercanía de las 3 vueltas.

Al igual que en la condición de recocido la probeta sufre un endurecimiento por deformación que hace que en la zona plástica los esfuerzos aumenten con las deformaciones, en este caso en menor proporción que en recocido debido a que el coeficiente de endurecimiento tiene un valor menor.

En general las 5 curvas de esfuerzo de corte vs deformación angular tienen el mismo comportamiento, estas 5 probetas rompieron dentro de un rango inferior a $\frac{3}{4}$ de vuelta es decir 270°, esta repetibilidad de los ensayos hace que se obtengan valores característicos muy similares en las 5 muestras.

Tabla N° 5.8. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de T4 para el ensayo de torsión.

	T4(experimental)	T4 (valor referencial)
Esfuerzo de fluencia al corte (Mpa)	113,8	165 ^A
Módulo de corte (Mpa)	15,44	24,0 ^B

A: valor típico de la Aluminum Association.

B: valor reportado en el Metals Handbook [17] como estimado de otras aleaciones de aluminio similares.



Comparando los resultados obtenidos con los tabulados por la AA, se observa que el esfuerzo de fluencia al corte estuvo de nuevo por debajo del establecido por la AA que lo reporta en 165 MPa, mientras que el obtenido en promedio experimentalmente es de 114 MPa, el resultado obtenido es inferior al recomendado en un 30 %.

En cuanto al valor de módulo de corte que no está especificado por la AA, valores de aleaciones de aluminio similares sugieren que este valor esté alrededor de los 24 GPa, el obtenido experimentalmente es de 16 GPa valor inferior en un 30%.

5.3.3 Ensayos de torsión en condición de T6

A continuación se muestra una tabla resumen de los resultados obtenidos en torsión para la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6).

Tabla N° 5.9. Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de torsión en T6.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Promedio	Desviación estándar
Límite proporcional (Mpa)	191,9	180,34	185,74	191,13	186,45	187,11	4,67
Módulo de elasticidad al corte (GPa)	20,75	19,66	20,42	19,36	19,24	19,88	0,66
Esfuerzo de fluencia al corte (Mpa)	239,57	225,97	230,71	239,36	220,72	231,26	8,27
Deformación angular elástica (rad/rad)	0,01415	0,01466	0,01443	0,01451	0,01467	0,0144	0,0002
Esfuerzo último de corte (Mpa)	349,88	313,87	321,06	324,93	348,86	331,72	16,59
Deformación angular a la rotura (rad/rad)	0,82	0,89	0,65	0,89	0,67	0,78	0,11

Para esta condición de ensayo el esfuerzo de fluencia al corte fue de 231 MPa en promedio, para una deformación angular de 0,014 rad/rad, lo que significa que la fluencia se alcanzó a los 17° de giro de la probeta en el ensayo.

El esfuerzo último de corte fue de 331 MPa y ocurrió para una deformación angular de 0,78 rad/rad, es decir la rotura de las probetas para esta condición de ensayo estuvo alrededor de las 2 ½ vueltas, aunque al igual que en la condición de recocido hubo una variación en la deformación angular a la rotura, de las 5 muestras ensayadas se obtuvo un rango en esta deformación de 0,2 rad/rad lo que indica una variación cercana a 200° de giro en la rotura de las probetas, que es importante dado que las probetas rompieron a 2 ½ vueltas o lo que es lo mismo 900° de giro, lo que indica una variación de más del 20% en la rotura de la probeta.

De igual forma en esta condición se hace presente el endurecimiento por deformación en la zona plástica, pero en este caso en menor proporción, esto se puede evidenciar ya que en esta condición existe menos diferencia entre el esfuerzo de fluencia al corte y el esfuerzo último de corte.

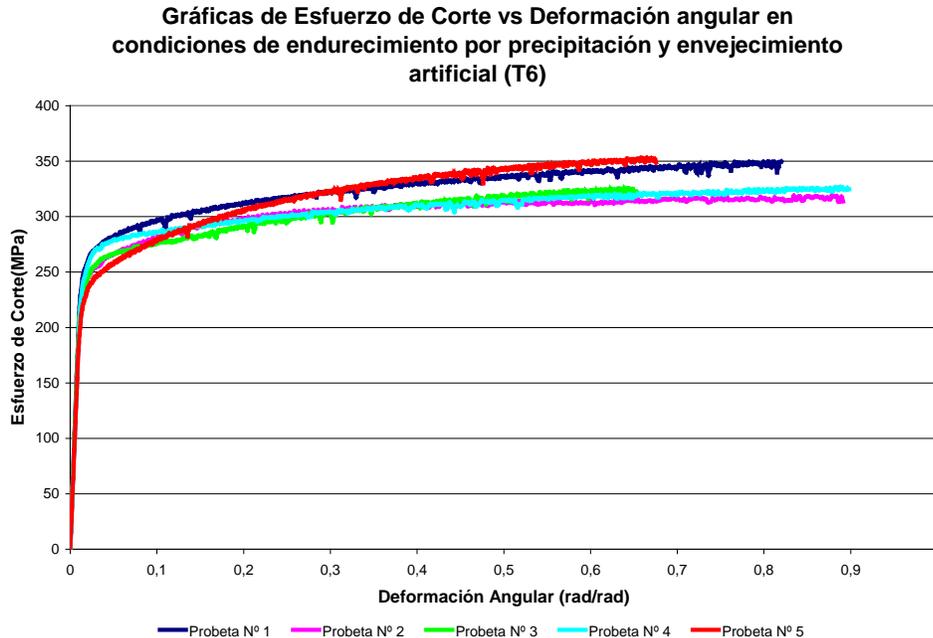


Figura N° 5.6. Gráficas de esfuerzo de corte vs deformación angular de las 5 probetas de T6.



Analizando las curvas de esfuerzo de corte vs deformación angular de las 5 muestras se observa como las mismas tiene formas muy similares, lo que hizo que los valores característicos extraídos de las mismas fuesen parecidos.

Tabla N° 5.10. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en condición de T6 para el ensayo de torsión.

	T6(experimental)	T6 (valor referencial)
Esfuerzo de fluencia al corte (Mpa)	231,3	207 ^A
Módulo de corte (Mpa)	19,9	24,0 ^B

A: valor típico de la Aluminum Association.

B: valor reportado en el Metals Handbook [17] como estimado de otras aleaciones de aluminio similares.

Contrastando los valores obtenidos del ensayo bajo la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6), se observan resultados muy similares en cuanto al esfuerzo de fluencia al corte, la AA tabula este esfuerzo en 217 MPa, mientras que el valor obtenido de los ensayos es de 231 MPa, es decir el valor obtenido excede en un 6% el tabulado, esta condición ratifica que para esta condición de tratamiento térmico se obtuvo el resultado más cercano al tabulado por la AA.

El valor de módulo de elasticidad al corte sugerido (no está aceptado como típico de la AA) es de 24 GPa, de los ensayos se obtuvo un módulo de elasticidad al corte de 20 GPa , el resultado obtenido es menor en un 15 %, siendo esta condición de ensayo la que más se acerca en este valor, esto se debe a que de todos los ensayos es el que más grados de giro necesitó para llegar a la fluencia lo que permite que la velocidad del ensayo se estabilice.

5.3.4 Relación entre las propiedades a torsión para las muestras ensayadas a diferentes tratamientos térmicos

El siguiente gráfico muestra la curva de esfuerzo de corte vs deformación angular para una probeta con un comportamiento típico en cada condición de tratamiento térmico, con la finalidad de observar la variación que presenta la curva con la aplicación de los tratamientos y ver como varían los esfuerzos de corte y las deformaciones angulares.

En las curvas se observan como los tratamientos de endurecimiento por precipitación aumentan considerablemente el esfuerzo de fluencia al corte así como el esfuerzo último del material, esto a expensas de una disminución de la deformación angular.

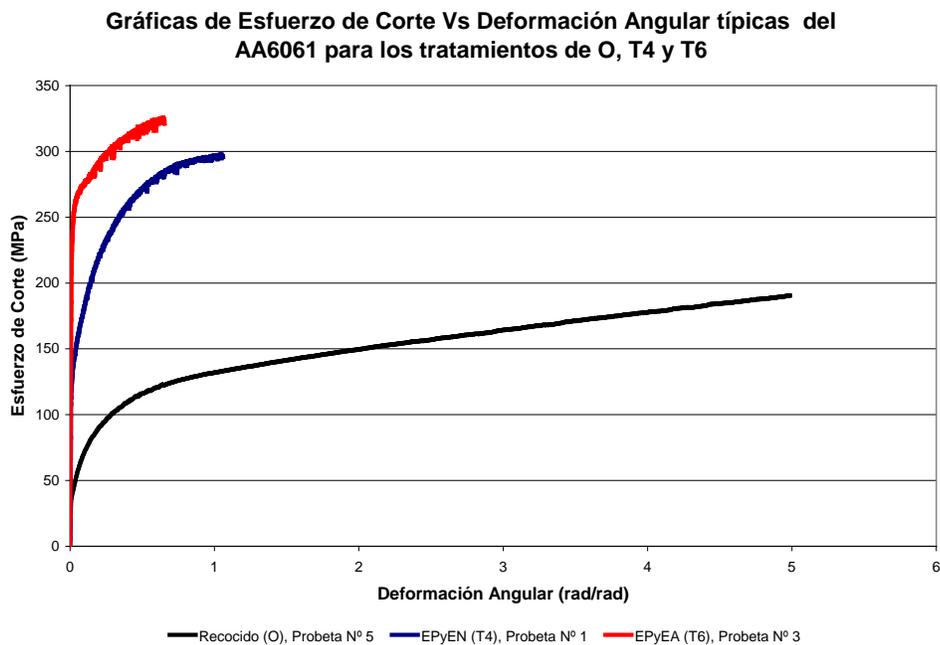


Figura Nº 5.7. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular para O, T4 y T6.



En la siguiente tabla se muestra la variación de los parámetros extraídos de las curvas de esfuerzo de corte vs deformación angular en cada condición, mediante la comparación de los promedios obtenidos de las cinco muestras en cada condición.

Tabla N° 5.11. Resumen de los valores promedios obtenidos de los ensayos de torsión.

	(O)	(T4)	(T6)
Límite proporcional (MPa)	28,71	96,98	187,11
Módulo de elasticidad (GPa)	6,15	15,44	198,89
Esfuerzo de fluencia al corte (MPa)	35	113,8	231,26
Deformación angular elástica (rad/rad)	0,0075	0,00945	0,0144
Esfuerzo último de corte (MPa)	185,27	290,78	331,72
Deformación angular a la rotura (rad/rad)	4,94	0,930	0,78

El siguiente gráfico muestra la zona elástica del gráfico anterior y en el mismo, se aprecia el aumento de la pendiente de a recta en la región elástica, es decir, el aumento del módulo de elasticidad en corte.

Gráficas de Esfuerzo de Corte Vs Deformación angular (Zona Elástica), típicas del AA6061 para los tratamiento O, T4 y T6

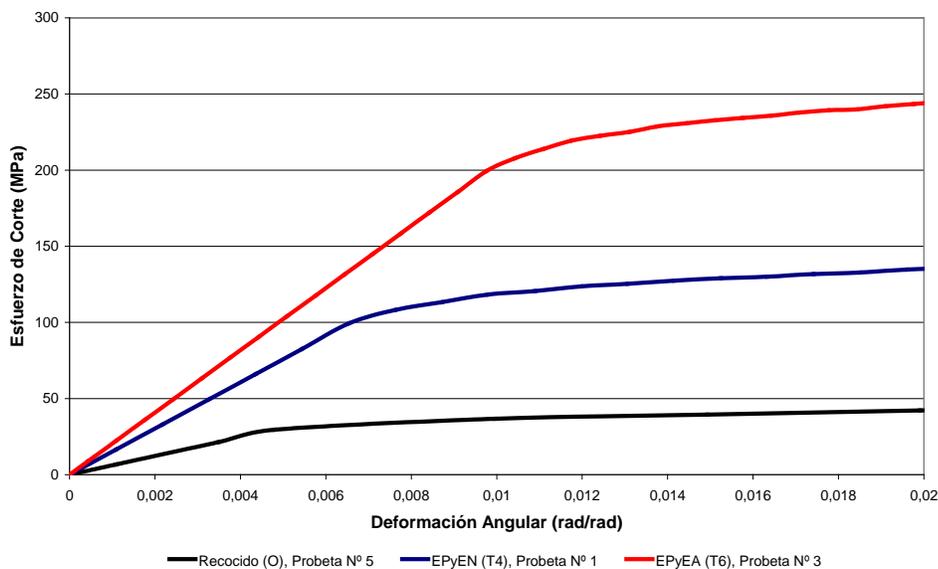


Figura N° 5.8. Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular de la zona elástica típicas del AA6061 para O, T4 y T6.

La siguiente gráfica muestran la variación que sufrieron las propiedades a torsión con la aplicación de los tratamientos térmicos de recocido (O), endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4), y envejecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6), estas gráficas son la representación de la tabla N° 5.11.

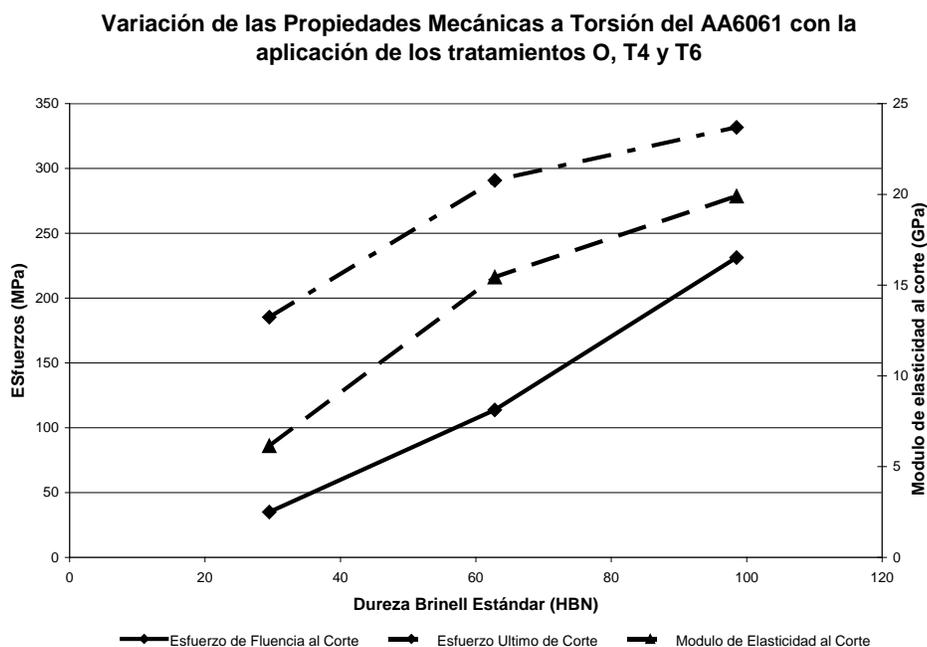


Figura N° 5.9. Gráfica de variación de las propiedades mecánicas a torsión del AA6061 con la aplicación de los tratamientos O, T4 y T6.

Comparando los resultados obtenidos en los ensayos a diferentes tratamientos térmicos, se evidencia el cambio que experimentan las propiedades mecánicas resultantes del ensayo de torsión con la aplicación de los tratamientos térmicos.

Este hecho se evidencia claramente en la figura N° 5.9, que relaciona a las propiedades que se obtuvieron del ensayo de torsión, con la dureza en cada condición de tratamiento térmico, en esta gráfica se visualiza, como el esfuerzo de fluencia al



corte, el esfuerzo último de corte y el módulo de elasticidad en corte aumentan a medida que la dureza aumenta.

El esfuerzo de fluencia en condiciones de T4 es mas de 3 veces mayor que en condiciones de recocido y en T6 es casi 7 veces mayor, lo que indica claramente como la aplicación de estos tratamientos favorece en gran medida esta propiedad.

El esfuerzo último de corte aumenta 1,5 veces con la aplicación del T4 y 1,8 veces con la aplicación del T6, teniendo en cuenta también que en este caso el aumento es menor que en otras propiedades por la influencia del endurecimiento por deformación que sufre la probeta en la zona plástica durante el ensayo.

5.4 Relaciones entre las propiedades extraídas del ensayo de tracción y torsión

Al aplicar las relaciones entre el esfuerzo de fluencia obtenido del ensayo de tracción y el obtenido del ensayo de torsión, se observa como esta relación disminuye con la aplicación de los tratamientos térmicos de endurecimiento, este hecho se aprecia en la tabla N° 4.44, al comparar estos resultados con lo teóricos que establecen los criterios de fluencia tanto de Tresca como de von Mises, se observa que en general la condición de recocido es la que se acerca más a ambas relaciones obteniendo errores de solo 8% para Tresca y 6 % para von Mises.

La relación de Tresca no arroja resultados tan exactos para las condiciones de T4 y T6, dando errores de 38% con respecto a lo establecido teóricamente por el criterio.

La teoría de von Mises aplicada a las condiciones de T4 y T6, entregan resultados más cercanos, con un error de 28%.

Por lo que se puede establecer que el criterio de energía máxima de deformación cortante de von Mises describe mejor los resultados obtenidos, en base a que las relaciones están más cercanas a las que este criterio indica como comunes para los materiales dúctiles.

En resumen después de la aplicación de la relación (Y/K) se observa como el material cumple mayormente los criterios en condiciones de recocido, una vez aplicados los tratamientos térmicos se observa como el cociente entre Y y K, tiende a disminuir un poco, con lo cual los criterios dejan de ser más exactos, pero como era de esperar siendo el aluminio AA 6061 un material dúctil en recocido los criterios de fluencia se cumplen en buena manera.

5.5 Macroscopía

5.5.1 Macroscopía en condición de T6

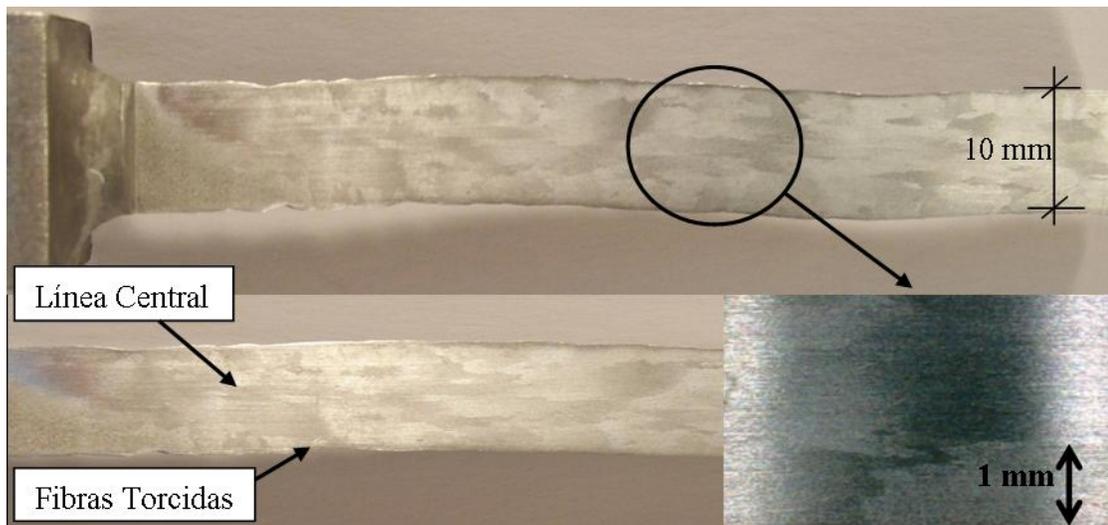


Figura N° 5.10. Macroscopía a probeta de torsión en T6.

Una vez realizada la macroscopía de la sección de la probeta se observan claramente las líneas de fluencia después de la deformación. Se diferencia una zona

central la cual presenta una tonalidad distinta de las demás, en esta zona central se encuentran las fibras que menos deformación sufrieron debido a su ubicación en el centro de la probeta.

A los alrededores de esta línea central se encuentran las fibras deformadas por la torsión, las cuales al enrollarse en torno a la fibra central se observan en la figura N° 5.10, con formas irregulares que representan los cortes transversales de las fibras, para esta condición en particular (T6), dichas formas se aprecian más claramente que en los restantes tratamientos ya que existe una menor agrupación de fibras, por ser menor de la deformación que sufre la probeta durante el ensayo.

La disposición de los granos se puede observar en la imagen a 50X, donde el tamaño de las mismas es considerable si se compara con la figura N° 5.11 del tratamiento T4.

5.5.2 Macroscopía en condición de T4

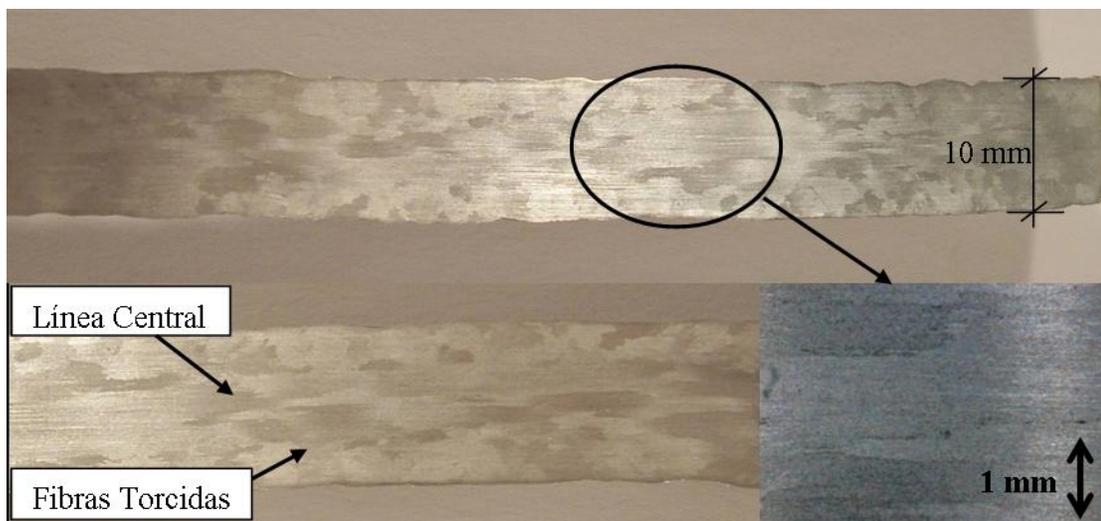


Figura N° 5.11. Macroscopía a probeta de torsión en T4.

Al igual que en la condición de T6 se observa una línea central bien definida, que representa las fibras que sufrieron la menor deformación durante el ensayo.

En comparación con el T6 la línea central se observa con mayor detalle, esta es más delgada, lo que indica que fue mayor el número de fibras que se enrollaron alrededor de esta.

Al ser mayor la deformación sufrida durante el ensayo se observa mayor aglomeración de fibras alrededor de la línea central, esta condición se aprecia en la imagen a 50X, donde es difícil distinguir un grano de otro.

5.5.3 Macroscopía en condición de O

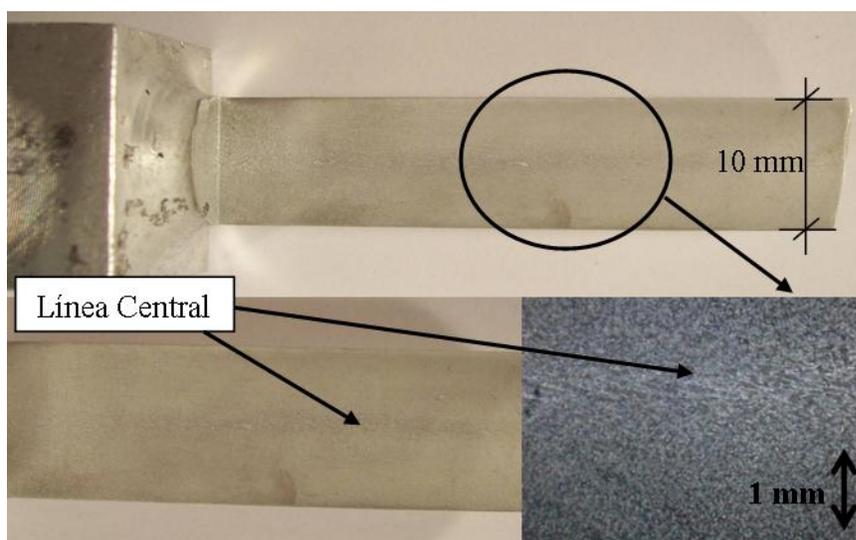


Figura N° 5.12. Macroscopía a probeta de torsión en O.

Se observa una línea central bien delgada que presenta la particularidad de ser casi recta, en la zona adyacente a la línea central solo se observa un cambio de tonalidad que a simple vista no permite apreciar la deformación que sufrió la probeta durante el ensayo.



En la foto a 50X se observa en detalle las fibras alrededor de la línea central, estas se presentan como pequeños puntos lo que indica la gran deformación que sufrió la probeta, adicionalmente se observa la línea central situación que no se presento para las condiciones anteriores.



CONCLUSIONES

- Los tratamientos térmicos de envejecimiento natural (T4) y artificial (T6), influyen de manera significativa en las propiedades mecánicas extraídas del ensayo de tracción de la aleación de aluminio AA6061, produciendo un aumento notable en el esfuerzo de fluencia y en el esfuerzo último a expensas de una disminución de la gran ductilidad que muestra en condición de recocido.
- La aplicación de los tratamientos T4 y T6, generan un aumento del esfuerzo de fluencia al corte y el esfuerzo último de corte, con una reducción de la deformación angular a la rotura, lo que ratifica la disminución de ductilidad que generan dichos tratamientos térmicos.
- La aparición de precipitados que trae consigo la aplicación de los tratamientos de endurecimiento, aumenta la dureza en el T4 y T6, el doble y triple respecto a la condición de recocido.
- La relación entre el esfuerzo de fluencia a tracción (Y) y el esfuerzo de fluencia al corte (K), disminuye con la aplicación de los tratamientos de endurecimiento, acercándose más a los valores teóricos en condición de recocido.
- La aplicación de los criterios de fluencia demuestra que el criterio de von Mises se acerca mucho más a los datos obtenidos experimentalmente que el criterio de Tresca, por lo que el criterio de von Mises permite obtener con bastante aproximación el esfuerzo de fluencia al corte mediante un esfuerzo de fluencia en tracción o viceversa para el aluminio AA6061.



-
- Las probetas sometidas a torsión no presentan deformación alguna en el centro de las mismas, este comportamiento comprueba que la deformación angular es proporcional al radio de la probeta.
 - La capacidad de endurecimiento por deformación en los ensayos de torsión disminuye con la aplicación de los tratamientos térmicos de envejecimiento.
 - Los valores de las propiedades mecánicas a tracción obtenidas experimentalmente cumplen con los valores exigidos por la Aluminum Association para la aleación de aluminio AA6061.



RECOMENDACIONES

- Realizar investigaciones de torsión a diferentes temperaturas de ensayo, con la finalidad de observar si existe una influencia de esta variable en las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo.
- Promover investigaciones sobre torsión en otros materiales, con el fin de crear una base de datos que pueda ser utilizada con fines didácticas para la resolución de problemas de conformado de metales y diseño de elementos de máquina.
- Realizar un estudio sobre la influencia de la velocidad del ensayo de torsión en las propiedades mecánicas resultantes de este ensayo.
- Realizar un estudio acerca de la influencia de la geometría de la probeta de torsión, en donde se presenten la influencia sobre las propiedades cuando se usan probetas cilíndricas macizas y huecas.
- Instalar un motor a la máquina de ensayo de torsión para obtener con mayor facilidad la velocidad constante necesaria durante el ensayo



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Smith, William F.** (2003). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales* (3era edición). Madrid: Editorial Mc. Graw – Hill.
2. **Askeland, Donald R.** (1987). *La ciencia e Ingeniería de los Materiales* (1era edición). México: Grupo Editorial Iberoamericana.
3. **Rowe, Geoffrey** (1973). *Conformado de los Metales* (1era edición). México: Ediciones Urmo.
4. **Groover, Mikell** (1997). *Fundamentos de la Manufactura Moderna* (3era edición). México: Editorial Prentice Hall.
5. **Ramírez, Jose L.** (1989). *Bases para la Conformación de Metales*. Publicaciones Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.
6. **Popov, Egor.** (2001). *Mecánica de los Sólidos* (4ta edición). México: Editorial Pearson Education.
7. **Forn, A.** (2005). *Flujo Plástico del Material Compuesto 6061/Al₂O₃/22p*. Análisis Mecánico de la Fractura XXII, 310 – 316.
8. **Universidad de Antioquia.** (2007). [On - line]. Disponible en: <http://www.materiales.eia.edu.co/laboratorios/tracción>.
9. **Werensky, J.** (1999). *An interpretation of torsion test results of an aluminum alloy AlCu2SiMn*. Scandinavian Journal of metallurgy, XXVIII, (4), 151 – 159.
10. **Barrios, R. y Rodríguez, L.** (2004). *Determinación del esfuerzo de fluencia a tracción y compresión para dos aleaciones de aluminio con diferentes grados de deformación*. Trabajo de grado no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia.



11. **Divo, J. y Kirchof, R.** (2006). *Construction and validation test of a torsion test machine.* Journal of Materials Processing Technology, CLXXIX, 23 – 29.

12. **Universidad de Rosario. Santa Fe, Argentina.** (2007). [On - line]. Disponible en: <http://www.oni.escuelas.edu.ar>

13. **Tecnológico de Monterrey.** *Endurecimiento por envejecimiento* (2006). [On - line]. Disponible en: <http://www.mty.itesm.mx/dia/deptos/im/m00-862/Lecturas/LP1M2.pdf>.

14. **Universidad Politécnica de Cataluña.** *Estudio de la implantación de una unidad productiva dedicada a la fabricación de conjuntos soldados de aluminio* (2007). [On - line]. Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2833/8/41774-8.pdf>.

15. **Chacón, Ruben.** *Variables Significativas del Torneado de Probetas para Ensayo de Torsión* (2006). [On - line]. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07.

16. **University of New Mexico.** *Torsion test of aluminium* (2006). [On - line]. Disponible en: http://civilx.unm.edu/laboratories_ss/mechmat/aluminum.html.

17. **ASM International.** (1990). *Metals Handbook Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Vol 2* (10 edición)

18. **Dieter, George E.** (2000). *Mechanical Metallurgy* (3era edición). Editorial Mc. Graw – Hill.