



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A
TORSIÓN DE LAS ALEACIONES DE LATÓN UNS C36000 Y
UNS C37700**

Tutor: MSc. Ing. Juan Carlos Pereira

ARELLANO MARIA LUISA
BOYER MARIOLGA

Bárbula, Junio de 2009



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A
TORSIÓN DE LAS ALEACIONES DE LATÓN UNS C36000 Y
UNS C37700**

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

Tutor: MSC. Ing. Juan Carlos Pereira

**ARELLANO MARIA LUISA
BOYER MARIOLGA**

Bárbula, Junio de 2009

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo era evaluar el comportamiento mecánico a torsión de las aleaciones de latón UNS C36000 y UNS C37700. Para desarrollar este trabajo fue necesario determinar las propiedades mecánicas a tracción y a torsión, así como también la dureza y la metalografía en cada una de las aleaciones bajo condiciones de tratamiento térmico de recocido y normalizado. Los ensayos de torsión se aplicaron a probetas cilíndricas macizas con extremos cuadrados, geometría establecida debido al diseño de las mordazas de la máquina. Se empleó una velocidad constante de 2 rpm, parámetro importante durante el desarrollo del ensayo, que garantizó la precisión en los resultados de la curva momento torsor versus ángulo de giro. Las propiedades obtenidas del esfuerzo de fluencia en el ensayo de tracción y torsión resultaron ser mayores en la condición de normalizado, mientras que la ductilidad del material se incrementa con la aplicación del recocido y disminuye con el normalizado. Además las aleaciones sometidas a recocido presentaron mayor capacidad de endurecimiento por deformación. Una vez realizados los ensayos de torsión y tracción; se determinaron las relaciones entre los resultados obtenidos de ambos ensayos, obteniendo la relación experimental entre el esfuerzo de fluencia a tracción y el esfuerzo de fluencia a torsión, la cual se mantiene relativamente constante en ambas condiciones de tratamiento térmico. Esta relación fue comparada con los criterios teóricos de fluencia Von Mises y Tresca, donde el primero se acerca más a los datos obtenidos experimentalmente, sin embargo estos criterios son poco adecuados para predecir el comportamiento de la fluencia a torsión y a tracción de las aleaciones bajo las condiciones de estudio. Finalmente con el estudio metalográfico se observaron indicios de deformaciones ocurridas a lo largo de la probeta, producto de los esfuerzos a corte en torsión aplicados durante el ensayo.

Palabras claves: torsión, latón UNS C36000, latón UNS C37700, recocido, normalizado.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

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
<i>e</i>	Deformación unitaria	mm/mm
P	Carga o fuerza	N
L_f	Longitud final de la probeta	mm
L₀	Longitud inicial de la probeta	mm
v	Modulo de Poisson	adimensional
ε	Deformación real	mm/mm
σ_e	Esfuerzo ingenieril	MPa
k	Esfuerzo de fluencia en corte puro	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
τ_0	Esfuerzo de fluencia al corte	MPa
τ_u	Esfuerzo máximo al corte	MPa
G	Modulo de elasticidad al corte	GPa
M_t	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
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Esfuerzos principales	MPa
S_y	Esfuerzo de fluencia	MPa
S_u	Esfuerzo máximo a tracción	MPa
E	Modulo elástico	GPa

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	17
CAPÍTULO I.....	18
1.1 Planteamiento del problema.....	19
1.2 Objetivos	21
1.2.1 Objetivo general.....	21
1.2.2 Objetivos Específicos.....	21
1.3 Justificación de la investigación.....	21
1.4 Limitaciones y Delimitaciones.....	23
1.4.1 Limitaciones.....	23
1.4.2 Delimitaciones	24
CAPÍTULO II	25
2.1 Antecedentes de la investigación	26
2.2 Bases teóricas	28
2.2.1 Metales no férricos.....	28
2.2.2 Aleación de latón UNS C36000.....	32
2.2.3 Aleación de latón UNS C37700.....	33
2.2.4 Tratamientos térmicos para aleaciones de cobre.....	35
2.2.5 Ensayo de torsión.....	39
2.2.6 Ensayo de tracción	51

2.2.7 Criterios de fluencia para materiales dúctiles	57
2.2.8 Evaluación metalográfica.....	60
2.2.9 Ensayo de Dureza	62
CAPÍTULO III	65
3.1 Nivel de la investigación.....	66
3.2 Diseño de la investigación	66
3.2.1 Obtención del material	66
3.2.2 Fabricación de las probetas	68
3.2.3 Aplicación de los tratamientos térmicos	69
3.2.4 Ensayos mecánicos	73
3.2.5 Evaluación metalográfica de las probetas ensayadas a torsión	80
CAPÍTULO IV	83
4.1 Resultados de ensayos de torsión.....	84
4.1.1 Resultados de ensayos de torsión en la aleación UNS C36000 (Recocido).....	84
4.1.2 Resultados de ensayos de torsión en aleación UNS C36000 (Normalizado).....	86
4.1.3 Resultados de ensayos de torsión en aleación UNS C37700 (Recocido)	87
4.1.4 Resultados de ensayos de torsión en aleación UNS C37700 (Normalizado).....	89
4.2 Resultados de ensayos de tracción	90
4.2.1 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C36000 (Normalizado)	90
4.2.2 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C36000 (Recocido).....	92
4.2.3 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C37700 (Normalizado)	93
4.2.4 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C37700 (Recocido).....	94

4.3 Resultados de ensayos de dureza	96
4.3.1 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C36000 (Normalizado).....	96
4.3.2 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C36000 (Recocido)	97
4.3.3 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C37700 (Normalizado).....	99
4.3.4 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C37700 (Recocido)	100
4.3.5 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C36000 (Condición original)	102
4.4 Relaciones entre las propiedades a tracción y torsión.....	103
4.5 Evaluación metalográfica de las probetas ensayadas a torsión	104
4.5.1 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C36000 en condición de recocido ..	106
4.5.2 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C36000 en condición de normalizado	106
4.5.3 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C37700 en condición de recocido ..	107
4.5.4 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C37700 en condición de normalizado	108
4.5.5 Evaluación metalográfica de una probeta sin torsión	109
CAPÍTULO V	110
5.1 Resultados de ensayos de tracción	111
5.1.1 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C36000 (Normalizado)	111
5.1.2 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C36000 (Recocido).....	112
5.1.3 Relación entre las propiedades a tracción para la aleación UNS C36000 sometida a tratamientos de recocido y normalizado	114
5.1.4 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C37700 (Normalizado)	115
5.1.5 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C37700 (Recocido).....	117
5.1.6 Relación entre las propiedades a tracción para la aleación UNS C37700 sometida a tratamientos de recocido y normalizado	118

5.2 Resultados de ensayos de dureza	120
5.2.1 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C36000 (Normalizado).....	120
5.2.2 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C36000 (Recocido)	122
5.2.3 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C37700 (Normalizado).....	124
5.2.4 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C37700 (Recocido)	125
5.3 Ensayos de torsión	127
5.3.1 Ensayos de torsión en la aleación UNS C36000 (Recocido)	127
5.3.2 Ensayos de torsión en la aleación UNS C36000 (Normalizado)	129
5.3.3 Relación entre las propiedades a torsión para la aleación UNS C36000 sometida a tratamientos de recocido y normalizado	131
5.3.4 Ensayos de torsión en la aleación UNS C37700 (Recocido)	133
5.3.5 Ensayos de torsión en la aleación UNS C37700 (Normalizado)	135
5.3.6 Relación entre las propiedades a torsión para la aleación UNS C37700 sometida a tratamientos de recocido y normalizado	137
5.4 Relaciones entre las propiedades obtenidas del ensayo de tracción y torsión	140
5.5 Evaluación metalográfica de las probetas ensayadas a torsión	141
5.5.1 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C36000 en condición de recocido ..	141
5.5.2 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C36000 en condición de normalizado	142
5.5.3 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C37700 en condición de recocido ..	143
5.5.4 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C37700 en condición de normalizado	143
5.5.5 Evaluación metalográfica de una probeta sin torsión	144
CONCLUSIONES	146
RECOMENDACIONES	147
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148

ÍNDICE TABLAS

Tabla 2.1 Composición química del latón UNS C36000.....	32
Tabla 2.2 Propiedades de la aleación UNS C36000 en condición H.....	33
Tabla 2.3 Composición química del latón UNS C37700.....	34
Tabla 2.4 Propiedades de la aleación UNS C37700 en condición M30	34
Tabla 3.1 Composición química de las aleaciones utilizadas en los ensayos	67
Tabla 3.2 Nomenclatura de probetas bajo ensayos mecánicos	67
Tabla 3.3 Dimensiones de una probeta para ensayo de tracción estandarizada.....	69
Tabla 3.4 Valores de temperaturas y tiempos para la aplicación del recocido	70
Tabla 3.5 Valores de temperaturas para la aplicación del normalizado.....	71
Tabla 3.6 Composición del reactivo para el ataque en aleación de latón UNS C36000	81
Tabla 3.7 Composición del reactivo para el ataque en aleación de latón UNS C37700	81
Tabla 4.1 Propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C36000 (Recocido).....	85
Tabla 4.2 Propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C36000 (Normalizado)	87
Tabla 4.3 Propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C37700 (Recocido).....	88
Tabla 4.4 Propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C37700 (Normalizado)	90
Tabla 4.5 Propiedades obtenidas del ensayo de tracción en la aleación UNS C36000 (Normalizado)	92
Tabla 4.5 Propiedades obtenidas del ensayo de tracción en la aleación UNS C36000 (Recocido).....	92
Tabla 4.7 Propiedades obtenidas del ensayo de tracción en la aleación UNS C37700 (Normalizado)	94
Tabla 4.8 Propiedades obtenidas del ensayo de tracción en la aleación UNS C37700 (Recocido).....	95

Tabla 4.9 Resultados de dureza en escala Rockwell F de la aleación UNS C36000 (Normalizado)	96
Tabla 4.10 Resultados de dureza en escala Brinell estándar de la aleación UNS C36000 (Normalizado).....	96
Tabla 4.11 Resultados de dureza en escala Rockwell F de la aleación UNS C36000 (Recocido).....	98
Tabla 4.12 Resultados de dureza en escala Brinell estándar de la aleación UNS C36000 (Recocido)	98
Tabla 4.13 Resultados de dureza en escala Rockwell F de la aleación UNS C37700 (Normalizado)	99
Tabla 4.14 Resultados de dureza en escala Brinell estándar de la aleación UNS C37700 (Normalizado).....	99
Tabla 4.15 Resultados de dureza en escala Rockwell F de la aleación UNS C37700 (Recocido).....	101
Tabla 4.16 Resultados de dureza en escala Brinell estándar de la aleación UNS C37700 (Recocido)	101
Tabla 4.17 Resultados de dureza en escala Rockwell F de la aleación UNS C36000 (Cond. original).....	102
Tabla 4.18 Resultados de dureza Brinell estándar de la aleación UNS C36000 (Cond. original).....	103
Tabla 4.19 Resumen de valores obtenidos en ensayos de tracción y torsión de la aleación UNS C36000.....	104
Tabla 4.20 Resumen de valores obtenidos en ensayos de tracción y torsión de la aleación UNS C37700.....	104
Tabla 4.21 Relaciones entre el esfuerzo de fluencia en tracción y torsión de la aleación UNS C36000.....	104
Tabla 4.22 Relaciones entre el esfuerzo de fluencia en tracción y torsión de la aleación UNS C37700.....	104
Tabla 5.1 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de tracción en la aleación UNS C36000 (Normalizado).....	111
Tabla 5.3 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C36000 (Recocido)	112

Tabla 5.4 Resumen de los valores promedio obtenidos en los ensayos de tracción de la aleación UNS C36000 (Recocido)	113
Tabla 5.5 Comparación entre valores obtenidos en ensayos de tracción para la aleación UNS C36000.....	115
Tabla 5.6 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C37700 (Normalizado).....	115
Tabla 5.7 Resumen de los valores promedio obtenidos en los ensayos de tracción de la aleación UNS C37700 (Normalizado)	116
Tabla 5.8 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C37700 (Recocido)	117
Tabla 5.9 Resumen de los valores promedio obtenidos en los ensayos de tracción de la aleación UNS C37700 (Recocido)	118
Tabla 5.10 Comparación de los valores obtenidos en ensayos de tracción en la aleación UNS C37700.....	119
Tabla 5.11 Resumen de resultados de dureza Brinell estándar aleación UNS C36000 (normalizado)	121
Tabla 5.12 Resumen de resultados de dureza Brinell estándar aleación UNS C36000 (recocido)	123
Tabla 5.13 Resumen de resultados de dureza Brinell estándar aleación UNS C37700 (normalizado)	125
Tabla 5.14 Resumen de resultados de dureza Brinell estándar aleación UNS C37700 (recocido)	126
Tabla 5.15 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C36000 (Recocido)	127
Tabla 5.16 Comparación de los valores obtenidos experimentalmente de la aleación UNS C36000 (Recocido)	128
Tabla 5.17 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C36000 (Normalizado)	129
Tabla 5.18 Comparación de los valores obtenidos experimentalmente de la aleación UNS C36000 (Normalizado).....	130
Tabla 5.19 Comparación entre valores obtenidos de los ensayos de torsión de la aleación UNS C36000.....	132

Tabla 5.20 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C37700 (Recocido)	134
Tabla 5.21 Comparación de los valores obtenidos experimentalmente de la aleación UNS C37700 (Recocido)	134
Tabla 5.22 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C37700 (Normalizado)	135
Tabla 5.23 Comparación de los valores obtenidos experimentalmente de la aleación UNS C37700 (Normalizado).....	136
Tabla 5.24 Comparación de los valores obtenidos en los ensayos de torsión en la aleación UNS C37700.....	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Segmento del diagrama de equilibrio Cu-Zn.....	36
Figura 2.2 Montaje del ensayo de torsión	39
Figura 2.3 Tensiones tangenciales producidas por la torsión	40
Figura 2.4 Barra de longitud unitaria sometida a torsión.....	40
Figura 2.5 Distribución de esfuerzos en la sección.....	42
Figura 2.6 Comportamiento de la región plástica en la curva momento torsor vs ángulo de giro.....	46
Figura 2.7 Curva esfuerzo-deformación en corte por torsión	48
Figura 2.8 Montaje de la probeta en una máquina de ensayos de tracción.....	50
Figura 2.9 Curva esfuerzo vs deformación	52
Figura 2.10 Curva esfuerzo vs deformación real e ingenieril	56
Figura 3.1 Probeta para ensayos de torsión, medidas en mm	67
Figura 3.2 Probeta para ensayos de tracción.....	67
Figura 3.3 Probeta para ensayos de dureza	68
Figura 3.4 Horno ThermolyneProbeta para ensayos de dureza	69
Figura 3.5 Ciclo térmico del recocido.....	70
Figura 3.6 Ciclo térmico del normalizado.....	71
Figura 3.7 Máquina para ensayos de torsión, con manivela	72
Figura 3.8 Máquina para ensayos de torsión, con motorreductor	73
Figura 3.9 Gráfica esfuerzo de corte vs. deformación angular sin considerar el endurecimiento por deformación	75
Figura 3.10 Esfuerzo de fluencia en la curva esfuerzo de corte vs. deformación angular sin considerar el endurecimiento por deformación de la zona plástica.....	75
Figura 3.11 Gráfica esfuerzo de corte vs. deformación angular	76
Figura 3.12 Máquina universal de ensayo de materiales Galdabini.....	77
Figura 3.13 Durómetro digital BUEHLER	79
Figura 3.14 Corte de las probetas ensayadas a torsión	81

Figura 3.15 Probeta utilizada en la evaluación metalográfica	81
Figura 4.1 Probeta antes de ser utilizada en los ensayos de torsión.....	83
Figura 4.2 Curvas esfuerzo de corte vs. deformación angular de la aleación UNS C36000 (Recocido)	84
Figura 4.3 Condición de la probeta T2-R360 una vez finalizado el ensayo de torsión	85
Figura 4.4 Curvas esfuerzo de corte vs. deformación angular de la aleación UNS C36000 (Normalizado).....	85
Figura 4.5 Curvas esfuerzo de corte vs. deformación angular de la aleación UNS C37700 (Recocido)	87
Figura 4.6 Curvas esfuerzo de corte vs. deformación angular de la aleación UNS C37700 (Normalizado).....	88
Figura 4.7 Condición de la probeta T6-N377 una vez finalizado el ensayo de torsión	88
Figura 4.8 Probeta antes de ser utilizada en los ensayos de tracción	89
Figura 4.9 Curvas Esfuerzo ingenieril vs. Deformación unitaria de la aleación UNS C36000 (Normalizado).....	90
Figura 4.10 Condición de la probeta t4-N360 una vez finalizado el ensayo de tracción	90
Figura 4.11 Curvas Esfuerzo ingenieril vs. Deformación unitaria de la aleación UNS C36000 (Recocido)	92
Figura 4.12 Condición de la probeta t3-R360 una vez finalizado el ensayo de tracción	92
Figura 4.13 Curvas Esfuerzo ingenieril vs. Deformación unitaria de la aleación UNS C37700 (Normalizado).....	93
Figura 4.14 Curvas Esfuerzo ingenieril vs. Deformación unitaria de la aleación UNS C37700 (Recocido)	94
Figura 4.15 Comportamiento de dureza HBS vs. distancia de la aleación UNS C36000 (Normalizado).....	96
Figura 4.16 Promedio de dureza de la aleación UNS C36000 (Normalizado)	96
Figura 4.17 Comportamiento de dureza HBS vs. distancia en la aleación UNS C36000 (Recocido)	97

Figura 4.18 Promedio de dureza HBS de la aleación UNS C36000 (Recocido)	98
Figura 4.19 Comportamiento de dureza HBS vs. distancia de la aleación UNS C37700 (Normalizado).....	99
Figura 4.20 Promedio de dureza HBS de la aleación UNS C37700 (Normalizado) ..	99
Figura 4.21 Comportamiento de dureza HBS vs. distancia de la aleación UNS C37700 (Recocido)	100
Figura 4.22 Promedio de dureza HBS de la aleación UNS C37700 (Recocido)	101
Figura 4.23 Comportamiento de dureza HBS vs. distancia de la aleación UNS C36000 (Cond. original)	102
Figura 4.24 Imágenes macroscópicas y microscópicas de una probeta de la aleación UNS C36000 en condición de recocido luego de la torsión	104
Figura 4.25 Imágenes macroscópicas y microscópicas de una probeta de la aleación UNS C36000 en condición de normalizado luego de la torsión	105
Figura 4.26 Imágenes macroscópicas y microscópicas de una probeta de la aleación UNS C37700 en condición de recocido luego de la torsión	106
Figura 4.27 Imágenes macroscópicas y microscópicas de una probeta de la aleación UNS C37700 en condición de normalizado luego de la torsión	107
Figura 4.28 Imágenes macroscópicas y microscópicas de probeta de la aleación UNS C36000, sin torsión	108
Figura 5.1 Gráfica esfuerzo ingenieril vs deformación unitaria de las probetas t5-N360 y t1-R360.....	114
Figura 5.2 Gráfica esfuerzo ingenieril vs deformación unitaria de las probetas t4-N377 y t4-R377.....	118
Figura 5.3 Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular para las probetas T7-R360 y T5-N360 de la aleación UNS C36000.....	130
Figura 5.4 Gráfica de variación de las propiedades mecánicas a torsión de la aleación UNS C36000 con la aplicación de los tratamientos de recocido y normalizado	131
Figura 5.5 Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular para las probetas T6-R377 y T6-N377 de la aleación UNS C37700.....	137
Figura 5.6 Gráfica de variación de las propiedades mecánicas a torsión de la aleación UNS C37700 con la aplicación de los tratamientos térmicos de recocido y normalizado.....	138

INTRODUCCIÓN

El latón es un material metálico no ferroso que resulta de una aleación que por como elemento principal el cobre, además puede tener como elementos secundarios el plomo, zinc, cromo, entre otros. Actualmente existe una gran variedad de aleaciones cobre-zinc, entre las más comunes se encuentran aquellas cuyo porcentaje de zinc varía entre 30-40%, por ser dúctiles y fáciles de trabajar. Estas aleaciones se emplean en todo tipo de objetos domésticos como: candelabros, ceniceros, etc., sin embargo, su aplicación más relevante es en la fabricación de elementos mecánicos que se encuentren sometidos a un momento torsor, como lo son: tuercas, tornillos, barras, hélices, entre otros. Por ello, es importante conocer las propiedades mecánicas a torsión de dichas aleaciones.

En el presente trabajo de grado se evaluará el comportamiento mecánico a torsión de las aleaciones de latón UNS C36000 UNS y C37700. Para conocer las propiedades mecánicas de este material, se ensayarán probetas tratadas térmicamente con recocido y normalizado (alivio de tensiones) a ensayos de tracción y torsión. Adicionalmente, se le realizarán mediciones de dureza Rockwell F en probetas bajo las condiciones anteriores y para finalizar se evaluarán metalográficamente las probetas ensayadas a torsión, esto con el objetivo de observar cualquier indicio de las deformaciones que puedan tener lugar en el material. Una vez obtenidos los resultados de estos ensayos se analizará y se concluirá, con el propósito de alcanzar los objetivos propuestos.

CAPÍTULO I

El Problema

1.1 Planteamiento del problema

En el desarrollo de los procesos de manufactura y el diseño de elementos de máquinas es imprescindible conocer las propiedades mecánicas de los materiales a utilizar, con el fin de predecir su comportamiento en condiciones a las cuales serán sometidos. Uno de los ensayos mecánicos empleado para determinar algunas de estas propiedades es el ensayo de torsión.

Un ensayo de torsión se refiere al desplazamiento circular de una determinada sección transversal de un elemento cuando se aplica sobre éste una fuerza que produce un momento torsor alrededor del eje, es caracterizado por ser una prueba destructiva y permite conocer valores de fluencia a grandes deformaciones, de este ensayo se obtiene el comportamiento a torsión (curva de esfuerzo a corte vs. deformación angular) del material ensayado.

Actualmente en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo se cuenta con una máquina destinada a realizar ensayos de torsión a materiales dúctiles; dicho equipo es de reciente construcción (aproximadamente un año), y está ubicada en las instalaciones del Laboratorio de Materiales, adscrito al Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Mecánica, por lo que ha sido escasamente utilizada en el estudio de las propiedades mecánicas de ciertos materiales.

Las aleaciones de latón (Cu-Zn) presentan una composición química que las caracteriza como materiales dúctiles, las cuales pueden ser ensayadas en la mencionada máquina de torsión. Existe una gran variedad de aleaciones de cobre-zinc, las más útiles contienen hasta un 40 % de zinc.

Los latones designados como UNS C36000 y UNS C37700 son aleaciones bastante utilizadas, por ende son las que se encuentran disponibles en el mercado

metalúrgico, en su mayoría son fundidas y posteriormente extruídas; estas poseen una gran resistencia mecánica y excelentes características para el trabajo en caliente.

Las aleaciones de latón UNS C36000 y UNS C37700 son empleadas en la fabricación de engranes, piñones, bisagras, piezas de cerraduras, tornillos, placas para grabados, entre otros. En general, el latón posee gran demanda en el sector automotriz, naval (hélices tripalas de barcos), eléctrico, en la fabricación de electrodomésticos, válvulas de gas, grifería para agua sanitaria, riego por aspersión, soldadura, electrónica, cerraduras de seguridad, herrajes de construcción, material contra incendio, armamentos, refrigeración. También se utilizan piezas de alta calidad fabricados en latón para elaborar elementos decorativos en iluminación, accesorios de baño, medallas, trofeos o palos de golf. Sus aplicaciones dependen de las características físicas y mecánicas que posea cada aleación, y se les proporcionan con la aplicación de tratamientos térmicos; por estas razones es necesario evaluar sus propiedades mecánicas.

Hasta ahora no se han llevado a cabo estudios completos en cuanto al comportamiento mecánico a torsión de los latones UNS C36000 y UNS C37700, es por ello que se desea realizar ensayos a torsión de estas aleaciones y observar la influencia del recocido y el normalizado en algunas de sus propiedades mecánicas, con la finalidad de obtener información versátil y suficiente para utilizar el material en una situación determinada, tal como es el diseño de piezas y procesos de manufactura.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento mecánico a torsión de las aleaciones de latón UNS C36000 y UNS C37700.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades mecánicas a tracción de las aleaciones de latón UNS C36000 y UNS C37700, en estado de recocido y normalizado.
- Determinar las propiedades mecánicas a torsión de las aleaciones de latón UNS C36000 y UNS C37700, en estado de recocido y normalizado.
- Determinar la relación que existe entre las propiedades mecánicas a tracción y a torsión para muestras ensayadas en estado de recocido y normalizado, para cada aleación.
- Evaluar mediante metalografía las muestras en estado de recocido y normalizado, antes y después de la aplicación de los ensayos de torsión.

1.3 Justificación de la investigación

En el presente trabajo de investigación se estudiarán y establecerán relaciones entre las propiedades mecánicas resultantes de ensayos de tracción con ensayos de torsión de dos aleaciones de latón tratadas térmicamente mediante recocido y normalizado.

Las aleaciones de latón a estudiar se denominan mediante el Sistema Unificado de Numeración para los metales y aleaciones (UNS) como C36000 y C37700, conocidas como latón maquinable y latón para forja respectivamente, por lo cual poseen múltiples aplicaciones y son las de mayor comercialización a nivel nacional. Dichas aleaciones pueden ser sometidas a tratamientos térmicos como recocido y normalizado.

El objetivo principal del recocido es conseguir la combinación óptima de resistencia y ductilidad del material. Por otra parte, el normalizado (alivio de tensiones) es un proceso destinado a aliviar las tensiones internas en los materiales o en piezas terminadas, sin afectar sus propiedades. Este tratamiento térmico se aplica en piezas forjadas, fundiciones de cobre y sus aleaciones, que serán sometidas a esfuerzos de flexión y/o torsión, habitualmente se lleva a cabo a temperaturas por debajo de las utilizadas para el recocido.

Durante la elaboración o fabricación de cobre o de aleaciones de cobre por trabajo en frío, se incrementan la resistencia y la dureza del material, ocasionando una deformación plástica que está acompañada de la deformación elástica y esfuerzos residuales remanentes que pertenecerán en el producto final. Si estos esfuerzos permanecen en una magnitud suficiente se produce la fragilización del material, generando deformaciones inesperadas en procesos de corte o mecanizado y en caliente el agrietamiento de los materiales durante su procesamiento o soldadura. Es allí donde se toma en cuenta el tratamiento de alivio de tensiones [12].

En los mencionados tratamientos térmicos se establecen valores de temperatura, tiempo de permanencia y velocidad de enfriamiento del material, ya que cada uno de estos factores puede afectar los resultados.

Desde el punto de vista práctico, son preferibles tratamientos a altas temperaturas y en intervalos de tiempo cortos. Sin embargo, para garantizar las propiedades mecánicas, frecuentemente es necesaria la aplicación de temperaturas bajas y en períodos de tiempo más largos. Un tratamiento óptimo producirá el alivio de tensiones suficiente sin afectar negativamente a las propiedades del material.

La recolección y posterior organización de los resultados obtenidos permitirán crear una fuente de información de fácil acceso, relacionada con las diferentes aleaciones del material en las condiciones mencionadas. Además permite tener conocimiento de parámetros de interés al momento de resolver un problema en áreas como el diseño de máquinas, materiales y procesos de fabricación, sabiendo de antemano que los requerimientos de las aleaciones de latón UNS C36000 y UNS C37700 se encuentran bajo estándares y normas que deben ser cumplidas.

Las propiedades mecánicas a estudiar de las mencionadas aleaciones y las relaciones que podrán establecerse entre los ensayos a aplicar, conllevan a la investigación del comportamiento mecánico de los materiales, de ese modo se logrará recopilar información actualizada y relevante del material que facilitará pensar en nuevas aplicaciones, así como en estudios posteriores para el uso de estas aleaciones de latón.

1.4 Limitaciones y Delimitaciones

1.4.1 Limitaciones

- La realización de este trabajo de grado está limitada a un año y seis meses.

1.4.2 Delimitaciones

- Los ensayos se realizarán a las aleaciones de latón UNS C36000 y UNS C37700, bajo dos condiciones de tratamiento térmico, a saber, en estado de recocido y estado de normalizado (alivio de tensiones).
- Para los ensayos de tracción se establecerá un mínimo de cuatro ensayos para cada condición.
- Para los ensayos de torsión se establecerá un mínimo de seis ensayos para cada condición.
- Los ensayos de tracción y torsión serán realizados a temperatura ambiente.
- Los ensayos de torsión se realizaran a barras cilíndricas macizas de aleaciones de latón UNS C36000 y UNS C37700.

CAPÍTULO II

Marco Teórico

2.1 Antecedentes de la investigación

BRESSAN y KIRCHHOF (2006). El trabajo va dirigido al desarrollo, prueba y funcionamiento del prototipo automatizado de una máquina para realizar pruebas de torsión en frío a materiales dúctiles. Estos aspectos son importantes para el presente trabajo de grado, ya que los autores mencionados ponen en práctica su máquina de torsión ensayando diferentes materiales metálicos entre ellos el latón. El equipo empleado consiste en una máquina de torsión horizontal compuesta por un motor eléctrico, un volante, un eje horizontal y un sistema de control y adquisición de datos, muy semejante a la máquina de torsión empleada en los ensayos ejecutados para cumplir con uno de los objetivos del presente trabajo.

Esta publicación corrobora de forma experimental y a manera de ejemplo que el estudio de la torsión se realiza a velocidad constante, además sirvió como soporte en la elección de los rangos de temperatura y tiempo aplicado en el recocido, ya que los autores someten sus probetas este tratamiento térmico tal como se realizó en esta tesis.

PALKOVIC y SANÉZ (2006). El trabajo se refiere principalmente al diseño y construcción de una máquina fundamentada en el ensayo de torsión de ejes cilíndricos macizos de materiales dúctiles como son: el aluminio, aleaciones de aluminio, bronce y latón. Con este trabajo se logró comprender el funcionamiento de la mencionada máquina, debido a que proporciona un manual para el uso y mantenimiento de la misma. También se pudieron conocer las dimensiones necesarias de las probetas a ensayar para el encaje adecuado con las mordazas de la máquina.

Simultáneamente se encuentra información de la selección y el diseño de elementos y accesorios, como la caja reductora que inicialmente funciona con accionamiento manual, pero con estas especificaciones se procedió a la selección e

instalación del acople, los ejes y el motor eléctrico apropiado para el correcto funcionamiento de la máquina.

VAN DEVENTER y DURÁN (2008). En la tesis se evalúa el comportamiento mecánico a torsión de una aleación de aluminio, principalmente se enfoca en la determinación y el estudio de diferentes propiedades mecánicas como son: el módulo de elasticidad, el esfuerzo de fluencia, el módulo de corte y esfuerzo de ruptura, mediante el ensayo de especímenes sometidos a esfuerzos de tracción y torsión. También se observó el efecto de tratamientos térmicos entre ellos el recocido, en propiedades mecánicas como la dureza y la ductilidad.

Esta investigación sirve de apoyo para la evaluación del comportamiento mecánico a torsión de las aleaciones de latón C36000 y C37700, en ciertos aspectos como la influencia del recocido en un material, el efecto de endurecimiento por deformación, la evaluación de criterios de fluencia, entre otros, ya que ambos trabajos buscan comparar las propiedades mecánicas a tracción y torsión de materiales dúctiles.

PEREIRA y otros (2008). En la mencionada presentación se evaluó el comportamiento mecánico a torsión de la aleación de aluminio AA6061 con diferentes tratamientos térmicos, como el recocido, envejecimiento natural y envejecimiento artificial en barras de sección circular. Tal como es el propósito del presente trabajo de grado, los autores de esta publicación realizaron ensayos de tracción, torsión, y dureza a diferentes probetas, obteniendo el comportamiento mecánico para cada una de las condiciones mencionadas.

Es de principal importancia para esta tesis, debido a que explica de manera clara la aplicación de expresiones matemáticas para hallar la curva esfuerzo de corte vs deformación a corte, y esto conlleva a calcular correctamente los esfuerzos aplicados

durante el ensayo. Además mencionan el proceso de observación macroscópica de las líneas de fluencia de las probetas fracturadas por torsión, lo cual sirve como apoyo ante el ensayo de macroscopía que se realizará en este trabajo.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Metales no férreos

Los materiales metálicos pueden dividirse en dos grandes grupos, metales férreos y metales no férreos; en los primeros el constituyente principal es el hierro, por el contrario en los segundos es algún otro elemento distinto al hierro. Los materiales no férreos más utilizados son las aleaciones de cobre, aluminio, magnesio, níquel, estaño, plomo y zinc, y en menor grado el cadmio, molibdeno, cobalto, circonio, berilio, tántalo y los metales preciosos oro y plata y los del grupo del platino.

El cobre posee propiedades muy importantes como lo son su elevada conductividad térmica y eléctrica, su buena resistencia a la corrosión, maquinabilidad, resistencia y facilidad de fabricación. Algunas de estas propiedades pueden mejorar aleándolo convenientemente con otros elementos.

Las aleaciones base cobre pueden ser mecanizadas sin dificultad por los métodos convencionales y no necesitan de tratamiento térmico complementario. No obstante, pueden aplicarse tratamientos de superficie o recubrimientos para incrementar la dureza superficial y resistencia al desgaste.

Las aleaciones de cobre comerciales de mayor importancia pueden clasificarse en la forma siguiente:

- Latones: Aleaciones cobre-zinc.
 - I. Latones alfa: Aleaciones cuyo contenido en zinc es inferior al 36%.
 - II. Latones alfa más beta: Aleaciones cuyo contenido en cobre varía en 54 a 62%.

- Bronces: Aleaciones de cobre y de otro elemento que interviene en la aleación en cantidades inferiores al 12%.
 - I. Bronces ordinarios.
 - II. Bronces al silicio.
 - III. Bronces al aluminio.
 - IV. Bronces al berilio.

- Cuproníqueles.
- Plata alemana o alpaca.

Existe una gran variedad de aleaciones de cobre y zinc, las más útiles contienen hasta un 40 % de zinc, sin embargo, las que contienen del 30 al 35 % son las de mayor aplicación por ser menos costosas, muy dúctiles y fáciles de trabajar. Al disminuir el contenido de zinc, las aleaciones se aproximan cada vez más al cobre en sus propiedades y mejoran su resistencia a la corrosión. Los colores varían en las diversas composiciones desde el latón rojo hasta el latón amarillo.

Antes del siglo XVIII, el zinc no se usaba ya que requiere 420°C para fundirse y hierve a cerca de 950°C, debajo de la temperatura necesaria para transformar el óxido de zinc en carbón. Ante la ausencia de zinc natural, fue necesario hacer latón mezclando tierra de calamina con cobre y calentando la mezcla en un crisol. El calor era suficiente para reducir la calamina a estado metálico pero no fundir el cobre. El vapor del zinc permitía al cobre formar latón que podía entonces ser fundido para dar una aleación uniforme.

Algunos historiadores romanos se refirieron al latón, denominándolo "arichalum". Fue usado para la manufactura de monedas y muchos romanos lo apreciaron para dar un color dorado a sus cascos. Usaron diferentes grados de aleación que contenían desde 11 hasta 28 % de zinc para obtener colores decorativos para múltiples tipos de joyería ornamental. Para los trabajos de ornato, el metal debía ser muy dúctil y la composición preferida era 18%, parecido al metal dorado 80/20.

En general algunas de las propiedades y aplicaciones del latón son las siguientes:

- Material fácilmente moldeable con una temperatura de fusión inferior comparada con la del hierro, los aceros, el bronce y el cobre puro.
- Se puede fundir y colar piezas de latón con moldes de arena, con moldes metálicos o coquillas, por gravedad o con máquinas inyectoras a presión.
- Posee un excelente comportamiento y plasticidad en la estampación en caliente.
- Admite de buena manera la deformación en frío, cuando la aleación es rica en cobre (a partir del 60% Cu).
- Es buen conductor de la electricidad, de ahí su utilización en numerosas piezas de material eléctrico y en electrónica.
- Es un buen conductor térmico.
- Buena resistencia a la corrosión. De ahí su utilización en grifería y racordaje para conducciones de agua y otros fluidos.
- Tiene excelentes propiedades de soldadura.
- En usos industriales una de las más importantes propiedades, es su excelente maquinabilidad, se mecaniza muy bien por arranque de viruta, que mejora cuando la aleación tiene plomo como componente en proporciones del 2 al 4%.

- El latón es un metal, fácilmente reciclable y cuyos residuos se pueden seleccionar con facilidad y volver a fundir cuantas veces sea necesario, ya que tienen alto valor económico.
- No se altera a temperaturas comprendidas entre 100°C y 200°C, ni se degradada con la luz.
- El aspecto brillante y dorado del latón, le confiere una especial belleza y sin ningún recubrimiento superficial ulterior.
- Buena resistencia al desgaste y puede usarse en la fabricación de cojinetes, piñones, coronas dentales, entre otros.

El latón se fabrica por fundición y posteriormente puede ser extruido; la primera se refiere al uso de hornos eléctricos de inducción que alimentan la colada del material. La fundición de aleaciones de cobre y latones complejos, se lleva a cabo en hornos de inducción, y solidifican por procedimientos de colada continua y centrífuga de altas velocidades. Para la realización de elementos mecánicos se aplica la forja del latón en estampa cerrada empleando cierta lubricación.

La extrusión consiste en aplicar presiones suficientes para provocar la deformación del metal fundido o materia plástica según la preforma de la matriz de extrusión en barras, tubos, perfiles, entre otros. Mediante líneas de producción, se logra una elevada capacidad productiva con un óptimo nivel de calidad. Se requiere una particular atención en el control y la regulación de la temperatura del material extruido durante la fase de extrusión, que constituye la base de la calidad de los productos.

2.2.2 Aleación de latón UNS C36000

La norma ASTM B16 [13] designa el latón UNS C36000 como una aleación de cobre con un considerable contenido de plomo; se especifica su composición química en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Composición química del latón UNS C36000

Aleación de Cobre	Cobre (%)	Plomo (%)	Hierro (%)	Zinc (%)
C36000	60 - 63	2.5 - 3.7	0.35	Resto

Fuente: Norma ASTM B16/B16M – 00 [13]

La aleación de latón UNS C36000 es conocida con el término “Free-cutting brass”, denominado así por su excelente maquinabilidad, propiedad de los materiales que permite comparar la facilidad con que pueden ser mecanizados por arranque de viruta. Al momento de ser trabajado en máquinas, este tipo de latón, requiere potencias y fuerzas de corte reducidas, provocando un desgaste lento de los filos de corte, alargando de ese modo la vida útil de la herramienta, además al mecanizarse se obtienen superficies menos rugosas, y en general con un mejor acabado en comparación con cualquier otra aleación.

Un factor que indica la buena maquinabilidad de un material es la posibilidad de poder controlar fácilmente la longitud de la viruta resultante. Las virutas largas y delgadas pueden enredarse e interferir en las operaciones de corte.

El latón UNS C36000 presenta en su composición química un porcentaje de plomo adecuado, el cual le confiere su condición de fácil maquinado, sin alterar en gran proporción su resistencia. Debido a que los factores que suelen mejorar la resistencia de los materiales a menudo degradan su maquinabilidad. Es por ello que se trata de mejorar la maquinabilidad sin perjudicar la resistencia del material, ya que

en algunos casos, la dureza y la resistencia del material se consideran como los principales factores a evaluar.

Como se mencionó anteriormente sobre estos factores influyen propiedades del material como su composición química, también la conductividad térmica y su estructura microscópica. En la Tabla 2.2 se muestran las diferentes propiedades que hacen de la aleación de latón UNS C36000 un material de gran comercialización para el mecanizado y fabricación de piezas.

Tabla 2.2 Propiedades de la aleación UNS C36000 en condición H

Propiedad física	Densidad (lb/in ³)	0,307
Propiedades mecánicas	Sy (Mpa)	310
	Su (Mpa)	400
	G (Gpa)	37
	E (Gpa)	97
	Elongación(%)	25
	Dureza (HBS)	128
Propiedades térmicas	Calor específico(J/g.°C)	0,380
	Conductividad térmica (W/m-K)	115
	Solidus(°C)	885
	Liquidus(°C)	900

Fuente: Matweb - Material Property Data [22]

2.2.3 Aleación de latón UNS C37700

En la norma ASTM B124 [14] se designa este tipo de latón como UNS C37700, presenta una composición química que se muestra en la Tabla 2.3, la cual varía en

esos rangos, ya que es la tolerancia permitida en cuanto a los requerimientos de la aleación sin que se afecte la calidad de la misma.

Tabla 2.3 Composición química del latón UNS C37700

Aleación de Cobre	Cobre (%)	Plomo (%)	Hierro (%)	Zinc (%)
C37700	58 – 62	1.5 - 2.5	0.30	Resto

Fuente: Norma ASTM B124/B124M – 94 [14]

Tabla 2.4 Propiedades de la aleación UNS C37700 en condición M30

Propiedad física	Densidad (lb/in ³)	0,305
Propiedades mecánicas	Sy (Mpa)	140
	Su (Mpa)	360
	G (Gpa)	39
	E (Gpa)	105
	Elongación (%)	45
	Dureza (HBS)	71
Propiedades térmicas	Calor específico(J/g.°C)	0,380
	Conductividad térmica (W/m-K)	120
	Solidus(°C)	880
	Liquidus(°C)	895

Fuente: Metals Handbook [20]

La aleación de latón UNS C37700 es conocida con el término “Forging brass”, llamado de esa manera por su excelente forjabilidad, propiedad de los materiales capaces de sufrir deformación plástica sin romperse ni desarrollar defectos. Para medir la forjabilidad se han desarrollado numerosas técnicas que buscan someter probetas a ensayos de tracción, compresión y torsión, logrando medir y observar su comportamiento ante la deformación plástica.

En la Tabla 2.4 se indican las diferentes propiedades de la aleación de latón UNS C37700, que la caracterizan por ser un material metálico de común forjabilidad.

2.2.4 Tratamientos térmicos para aleaciones de cobre

Los tratamientos térmicos se definen como procesos en los cuales el material en estado sólido, es sometido a uno o a varios ciclos de calentamiento y enfriamiento para variar algunas de sus propiedades en la forma deseada.

La norma ASTM B16 [13], establece que los tratamientos térmicos para la aleación UNS C36000 son: Endurecimiento Mecánico (H) y Recocido (O).

Por otra parte, la norma ASTM B124 [14], establece que para la aleación UNS C37700 se aplican tratamientos de endurecimiento en frío (H) y trabajo mecánico en caliente o por fundición (M).

Todos estos tratamientos son definidos en la norma ASTM B601 [15]. Adicionalmente, la sección de *Tratamientos Térmicos del ASM Metals Handbook para aleaciones de cobre* [12], recomienda la aplicación del normalizado como tratamiento para el alivio de tensiones en diferentes aleaciones de latón.

Recocido

Es un tratamiento térmico en el cual se altera un material, generando transformaciones en sus propiedades de resistencia y dureza. Este tratamiento se produce en determinadas condiciones de calentamiento, para alcanzar la temperatura adecuada y posterior enfriamiento. El recocido es aplicado para conseguir la recristalización del material, perfeccionar la estructura y mejorar las propiedades obtenidas del trabajo en frío.

Para materiales como el cobre y latón, básicamente el recocido se realiza elevando la temperatura del metal a un valor mayor de 700°F, por un tiempo específico dependiendo del tamaño de la pieza, y luego enfriarlo lentamente dentro del horno. De ese modo el material se recupera y se encuentra preparado para una nueva deformación sin fracturarse.

La estructura del material recocido depende del tamaño de grano, el cual es controlado durante el proceso por medio de la temperatura final de recocido. Las altas temperaturas en el recocido generan grandes tamaños de grano que usualmente corresponden a bajas durezas, disminución de los valores de los esfuerzos e incrementos en la ductilidad. Un material recocido es caracterizado por tener un tamaño de grano mediano. En ocasiones se realizan recocidos especiales para producir estructuras con requerimientos específicos y modificar su condición de fábrica.

La Figura 2.1 muestra una parte del diagrama de equilibrio cobre-zinc que es una representación gráfica de cómo las fases del metal cambian con las variaciones de temperatura y composición. Las dos fases representadas son las llamadas alfa y beta. Alfa es una fase rica en cobre que es muy dúctil a temperatura ambiente y sólo moderadamente plástica a temperatura elevada. Beta es una fase rica en zinc que es dura y quebradiza a temperatura ambiente, pero extremadamente plástica a temperatura alta.

El equilibrio de fases sólo se alcanza en el caso de un calentamiento lento muy prolongado. Una aleación llevada a una cierta temperatura en un tiempo corto (calentamiento rápido), aproximadamente de treinta segundos a algunos minutos, tiene una estructura real en caliente alejada del estado de equilibrio. Esta influencia sobre el comportamiento será tanto más significativa cuanto más rápido sea el calentamiento y cuanta más rica en fase alfa sea la estructura en el estado de origen.

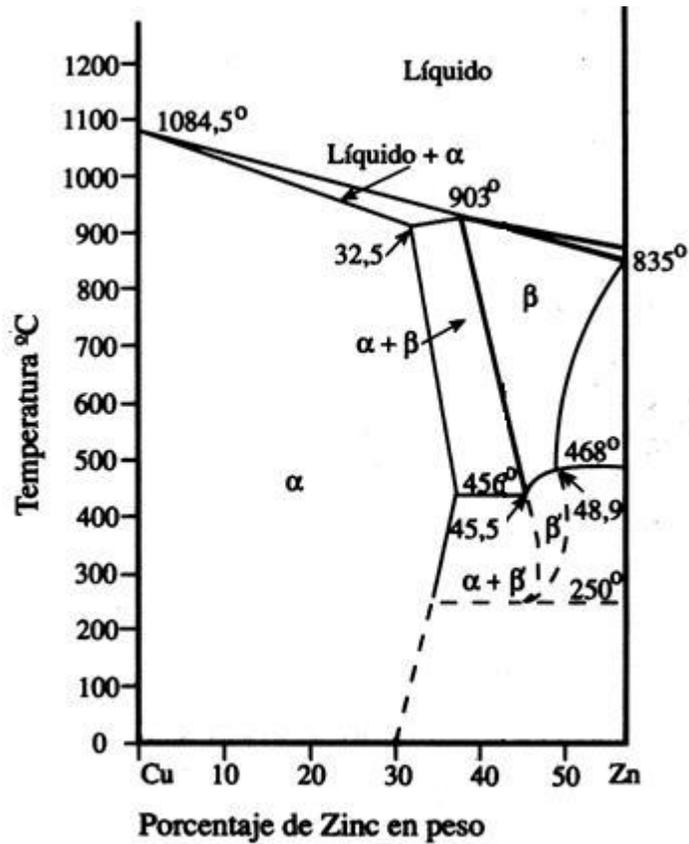


Figura 2.1 Segmento del diagrama de equilibrio Cu-Zn

Por otro lado, la temperatura máxima alcanzada durante el ciclo de calentamiento y la duración de ésta puede provocar la formación de una capa de grandes granos que puede alcanzar un tamaño del orden de un centímetro de longitud. Se pone en evidencia las consecuencias de tal recalentamiento en los macrogranos que se deforman individualmente y las uniones frágiles entre ellos que se rompen.

La aplicación exitosa de un recocido para proporcionar características específicas durante la fabricación de productos requiere de un trabajo bien regulado y organizado, destinado a producir una material homogéneo con un tamaño de grano controlado, de tal modo que proporcione un material uniforme.

Normalizado

El normalizado se define como el calentamiento uniforme de un material metálico hasta una temperatura conveniente por encima del rango de transformación, permanece a dicha temperatura el tiempo suficiente para alcanzar la uniformidad a través de toda su masa, y seguidamente se enfría al aire quieto hasta una temperatura por debajo del rango de transformación. La disminución en la velocidad de enfriamiento convertirá un tratamiento de normalización en un tratamiento de recocido, mientras que un aumento de la velocidad de enfriamiento cambia el tratamiento de normalizado en un temple.

El tratamiento de normalizado en las aleaciones de cobre se aplica con el fin de aliviar tensiones, el término “normalizado” es utilizado simplemente para establecer una analogía en cuanto al enfriamiento del material y a la dureza obtenida en dicho tratamiento con respecto al normalizado aplicado en el acero. Sin embargo, para las aleaciones de cobre no ocurre crecimiento de grano, debido a que el alivio de tensiones se realiza a una temperatura menor que la temperatura de recristalización. En este tratamiento se consigue reducir el número de dislocaciones y de esfuerzos residuales, aunque las propiedades mecánicas permanecen relativamente iguales.

Este tratamiento térmico se lleva a cabo a temperaturas por debajo de las utilizadas para el recocido. El normalizado o alivio de tensiones es importante ya que, luego de la fabricación de piezas de cobre o de aleaciones de cobre por trabajo en frío, se incrementan la resistencia y la dureza del material, ocasionando una deformación plástica que está acompañada de la deformación elástica y esfuerzos residuales remanentes que pertenecerán en el producto final. Si estos esfuerzos permanecen en una magnitud suficiente se produce la fragilización del material, generando deformaciones inesperadas en procesos de corte o mecanizado y en caliente el agrietamiento de los materiales durante su procesamiento o soldadura.

Desde el punto de vista práctico, son preferibles tratamientos a altas temperaturas y en intervalos de tiempo cortos. Sin embargo, para garantizar las propiedades mecánicas, frecuentemente es necesaria la aplicación de temperaturas bajas y en períodos de tiempo más largos (normalizado). Un tratamiento óptimo producirá el alivio de tensiones suficiente sin afectar negativamente a las propiedades del material.

2.2.5 Ensayo de torsión

El ensayo de torsión consiste en aplicar un par torsor a una probeta metálica alrededor de su propio eje longitudinal hasta llegar a su ruptura o hasta alcanzar el número de vueltas establecido por la norma. Los ensayos de torsión simulan de forma adecuada grandes deformaciones, tomando en cuenta que las dimensiones externas de la pieza permanecen sin ninguna alteración.

El corte en un ensayo de torsión implica la aplicación de esfuerzos en dirección opuesta sobre cualquier lado de un elemento delgado para deflectarlo. El esfuerzo cortante τ , se define como:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{(Ecuación 2.1)}$$

$$\gamma = \frac{\delta}{b} \quad \text{(Ecuación 2.2)}$$

Donde F es la fuerza aplicada, A es el área de la sección transversal, γ es la deformación al corte, δ es la deflexión del elemento y b la distancia ortogonal sobre la cual ocurre la deflexión.

La dependencia que existe entre los esfuerzos y las deformaciones de corte se obtiene de este ensayo; donde un espécimen cilíndrico se somete a un momento de torsión, como lo muestra la Figura 2.2, conforme éste momento aumenta el tubo se defleca torciéndose, lo cual es una deformación por cortante para esta geometría.

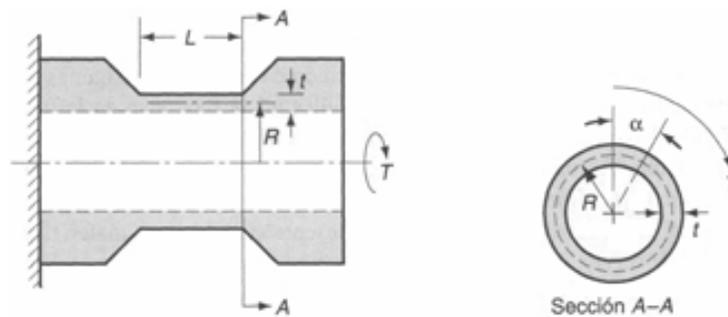


Figura 2.2 Montaje del ensayo de torsión

En la probeta de ensayo surge un estado de tensión opuesto, al mismo tiempo que es posible lograr la destrucción de cualquier material. Las tensiones tangenciales máximas en el caso de torsión, actúan en los planos perpendiculares al eje geométrico de la muestra; y las tensiones normales máximas actúan a un ángulo de 45° .

A partir de las consideraciones anteriores, que están relacionadas con la compatibilidad de las deformaciones, se desea saber qué tipo de tensiones genera la torsión simple y su distribución. Se supone 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.

Según lo anterior sólo falta considerar que en el problema de torsión aparecen únicamente tensiones tangenciales. Como los que se muestran en la Figura 2.3.

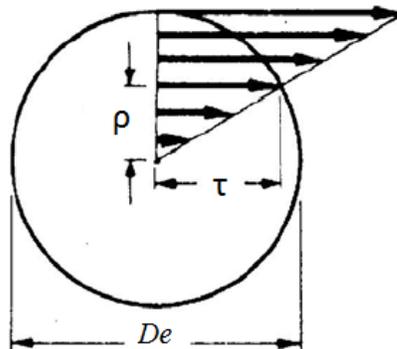


Figura 2.3 Tensiones tangenciales producidas por la torsión

Para esto se hace un análisis de una barra circular maciza sometida a torsión como la mostrada en la Figura 2.4, aplicando las hipótesis antes expuestas, donde se trata de establecer la ley de distribución de las tensiones. Para ello se hace la siguiente consideración: se aísla de una barra torsionada una tajada de longitud L , con un radio exterior R y un radio interior r . El ángulo que giran ambas secciones será θ , este ángulo se denomina ángulo específico de torsión.

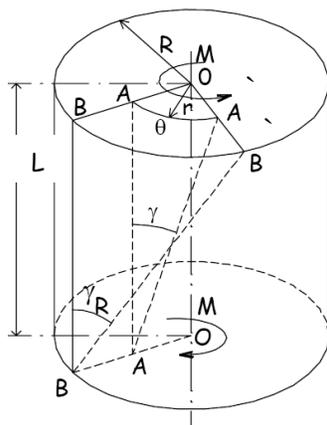


Figura 2.4 Barra de longitud unitaria sometida a torsión

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

$$AA' = r\theta \cong \gamma L \rightarrow \theta = \frac{\gamma L}{r} \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

$$BB' = R\theta \cong \gamma_R L \rightarrow \theta = \frac{\gamma_R L}{R} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

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

$$\gamma = \frac{BB'}{L} = \frac{R\theta}{L} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

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

$$\frac{\gamma \cdot L}{r} = \frac{\gamma_R \cdot L}{R} \rightarrow \gamma = \frac{\gamma_R}{R} r \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

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

$$\tau = \gamma \cdot G \cong \frac{\gamma_R}{R} G \cdot r = \frac{\theta \cdot G}{L} r \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

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 .

Una vez establecida la distribución de esfuerzos en la sección, se puede expresar al momento torsor (M_t) 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.

$$M_t = Fb = \tau Ab \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Debido a la dependencia que existe entre el esfuerzo de corte y el radio, es importante considerar que la fuerza no es constante en toda la sección, este hecho se aprecia en la Figura 2.5.

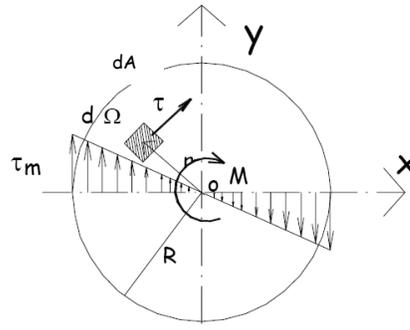


Figura 2.5 Distribución de esfuerzos en la sección.

Por esto se hace necesario plantear la siguiente integral:

$$Mt = \int_A \tau dA \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

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:

$$Mt = \int_A \frac{G\theta \cdot r}{L} (r) dA = \int_A \frac{G\theta}{L} r^2 dA \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

El producto $G\theta/L$, es una constante y se puede extraer de la integral, y así realizar la integración, como se muestra:

$$Mt = \frac{G\theta}{L} \int_A r^2 dA = \left(\frac{G\theta}{L} \right) I_p \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

Se obtiene una integral que se suele llamar el momento polar de inercia (I_p) 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:

$$\tau = \frac{Mt}{I_p} r \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

Siendo la inercia polar igual a I_p :

$$I_p = \frac{\pi D^4}{32} \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

Donde D es el diámetro de la sección donde se aplica el momento. Este valor de I_p es simplemente una característica geométrica de la sección y no tiene significado físico alguno, sustituyendo este término en la ecuación 2.12.

$$\tau = \frac{Mt.r.32}{\pi.16r^4} = 2 \frac{Mt}{\pi.r^3} \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

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.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

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

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{MtR/I_p}{R\theta/L} = \frac{MtL}{\theta I_p} \quad (\text{Ecuación 2.16})$$

Tensiones de torsión para grandes deformaciones

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:

$$\gamma = r \cdot \theta_L \quad (\text{Ecuación 2.17})$$

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

$$Mt = 2\pi \int_0^r \tau r^2 dr \quad (\text{Ecuación 2.18})$$

En esta integral r representa el radio de la sección, y 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 2.17 se obtiene:

$$d\gamma = \theta_L \cdot dr \rightarrow dr = \frac{d\gamma}{\theta_L} \quad (\text{Ecuación 2.19})$$

Y se puede escribir a r^2 como:

$$r^2 = \frac{\gamma^2}{\theta_L^2} \quad (\text{Ecuación 2.20})$$

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

$$Mt = 2\pi \int_0^{\gamma_r} f(\gamma) \frac{\gamma^2}{\theta_L^2} \frac{d\gamma}{\theta_L} \quad (\text{Ecuación 2.21})$$

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

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

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

pero, $f(r\theta_L) = f(\gamma) = \tau$, 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:

$$\tau = \frac{1}{2\pi \cdot r^3} \left(\frac{dMt}{d\theta_L} \cdot \theta_L + 3 \cdot Mt \right) \quad (\text{Ecuación 2.22})$$

Los términos de esta ecuación pueden ser extraídos de la curva momento torsor vs ángulo de deformación, si se observa la Figura 2.6, se puede apreciar que el término $\frac{dMt}{d\theta_L}$, es la pendiente de la recta tangente a los puntos de la curva en la región plástica y θ_L está representado en el eje x, aplicando trigonometría básica se puede obtener la siguiente expresión.

$$\frac{dMt}{d\theta_L} \cdot \theta_L = BC \quad (\text{Ecuación 2.23})$$

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

$$\tau = \frac{1}{2\pi \cdot r^3} (BC + 3 \cdot BA) \quad (\text{Ecuación 2.24})$$

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.

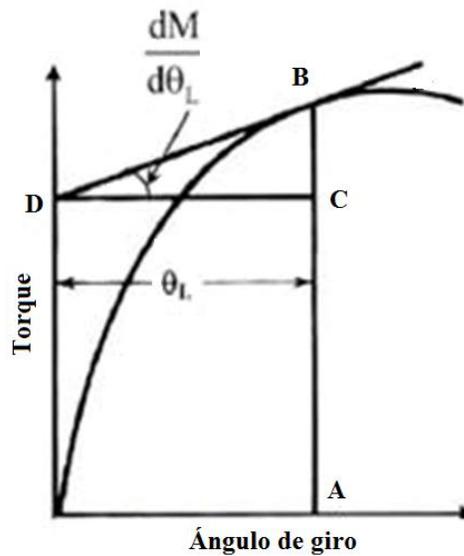


Figura 2.6 Comportamiento de la región plástica en la curva momento torsor vs ángulo de giro

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

$$M_t = M_0 \cdot \theta_L^n \quad (\text{Ecuación 2.25})$$

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 2.25 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 2.22, y así se obtiene:

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

$$\tau = \frac{Mt}{2\pi \cdot r^3} (3 + n) \quad \text{(Ecuación 2.26)}$$

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 [1].

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.

$$n = \frac{\log M_a - \log M_b}{\log \theta_{La} - \log \theta_{Lb}} \quad \text{(Ecuación 2.27)}$$

Comportamiento esfuerzo-deformación

En la región plástica de la curva esfuerzo-deformación el material se endurece con la deformación, lo que provoca un aumento del momento torsor, hasta que finalmente ocurre la fractura.

A diferencia de otros ensayos estáticos, la geometría de la fractura de las muestras reales, corresponde a estados de tensión preestablecidos. Esto se explica por la identidad del estado de tensión a todo lo largo de la muestra ensayada, desde el comienzo del ensayo hasta el momento de su destrucción. Otra consecuencia importante del invariable estado de tensión es el hecho de que la longitud de trabajo y la sección transversal durante el ensayo permanezcan constantes.



Figura 2.7 Curva esfuerzo-deformación en corte por torsión

Propiedades de un ensayo de torsión

La curva que se obtiene del ensayo de torsión presenta, una región elástica y una plástica, como se observa en la Figura 2.7. De la curva pueden obtenerse tres propiedades importantes: esfuerzo de fluencia al corte, el módulo de rigidez o de corte, esfuerzo máximo de corte.

- Esfuerzo de fluencia al corte: es el valor del esfuerzo donde la curva esfuerzo-deformación a corte, experimenta el cambio entre la zona elástica y la zona plástica.

- Módulo de corte: es la pendiente de la recta en la zona elástica de la curva, que da una idea de la rigidez del material en condiciones de esfuerzos cortantes.
- Esfuerzo máximo al corte: es el esfuerzo en donde ocurre la fractura de la probeta, en los ensayos de torsión generalmente este valor coincide con el esfuerzo de ruptura.

Condiciones del ensayo de torsión

Las particularidades descritas del ensayo de torsión, determinan su importancia y su empleo en la práctica. Las muestras deberán tener la parte de trabajo cilíndrica y cabezas cuadradas; las que presentan un diámetro de trabajo de 10 mm y con un largo calculado de 50 a 100 mm son consideradas normales. La posición de ensayo puede ser tanto horizontal como vertical. La mordaza móvil debe trabajar a una velocidad suficientemente lenta como para que no se produzca una elevación de la temperatura de la probeta, que afecte el resultado del ensayo. Para barras que posean dimensiones como las mencionadas anteriormente se recomienda una velocidad de giro menor a 3 revoluciones por minuto para la mordaza móvil del equipo.

Los equipos para realizar ensayos de torsión deberán garantizar las siguientes condiciones:

- Adecuado centraje de la muestra y suavidad del proceso de carga.
- La ausencia de fuerzas de flexión.
- La posibilidad de medir con suficiente precisión la magnitud del momento de torsión.

Estas condiciones son recomendadas por la norma COVENIN 907:1997 [9].

2.2.6 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción en ingeniería es ampliamente utilizado, pues suministra información sobre la resistencia de los materiales utilizados en el diseño y también para verificación de especificaciones de aceptación. Estos ensayos son simulativos pues tratan de reproducir las condiciones reales de trabajo.

Para la ejecución del ensayo de tracción es necesario el uso del equipo universal de ensayos a tracción (Figura 2.8) que proporciona la fuerza necesaria para alcanzar la ruptura del espécimen en corto tiempo, en función de la elongación que sufre la probeta a velocidad constante. El funcionamiento de la máquina consiste en el desplazamiento axial de sus mordazas, aplicando simultáneamente la carga sobre la probeta sujeta a ellas, lo que provoca la reducción del área transversal inicial y por ende la elongación de la probeta. Con este ensayo se logra conocer importante información acerca del metal en estudio, como son:

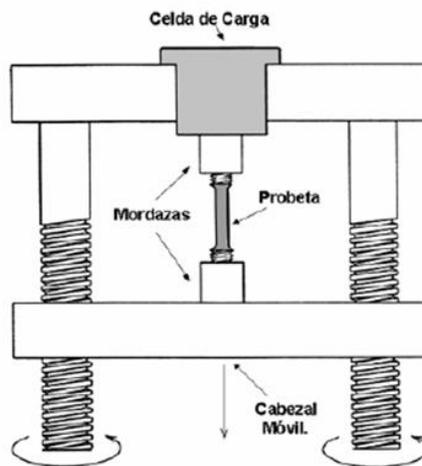


Figura 2.8 Montaje de la probeta en una máquina de ensayos de tracción

- Límite de fluencia: solo se presenta en ciertos materiales dúctiles y depende de la fuerza que se ejerce sobre el espécimen ensayado, representa un valor de

esfuerzo donde el material se deforma sin que aumente el valor de carga aplicada y es superior al límite elástico. Muchas veces el esfuerzo puede ir variando hasta resultar un punto de fluencia límite superior y otro límite inferior.

- Límite elástico de deformación (LE): es el esfuerzo a partir del cual se produce la primera deformación permanente, este valor puede aproximarse al límite de proporcionalidad del material en prueba.
- Límite proporcional (P): representa el punto final de la recta ascendente donde el esfuerzo es proporcional a la deformación, es decir, es el esfuerzo límite del rango de proporcionalidad.
- Módulo de elasticidad: representa la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación que sufre el material. Un elevado módulo de elasticidad indica que la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la zona elástica es bastante pronunciada, esto quiere decir, que se requieren grandes fuerzas para separar los átomos y producir la deformación elástica del metal.
- Resistencia a la fluencia (S_y): 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).
- Resistencia máxima (S_u): superado el punto de fluencia y manteniéndose el incremento del esfuerzo según la deformación experimentada, se alcanza el punto de resistencia al límite o esfuerzo máximo que puede ser desarrollado por el material.

- Resistencia a la ruptura (R): es el valor resultante del cociente entre la carga en la ruptura y el área transversal original. La resistencia a la ruptura siempre es inferior que la resistencia máxima. Para un material frágil, la resistencia límite y la resistencia de ruptura coinciden.
- Ductilidad: es la capacidad que posee un material para deformarse plásticamente sin fracturarse, esta condición se consigue en función del incremento de la longitud o de la reducción del área.

Alargamiento_{ruptura}: representa el incremento de longitud de la probeta durante el ensayo.

$$\% \text{ Alargamiento}_{ruptura} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \cdot 100\% \quad (\text{Ecuación 2.28})$$

Reducción de área (RA): es la diferencia que existe entre el área inicial y el área final de la probeta al final del ensayo.

$$\% RA = \frac{A_o - A_f}{A_o} \cdot 100\% \quad (\text{Ecuación 2.29})$$

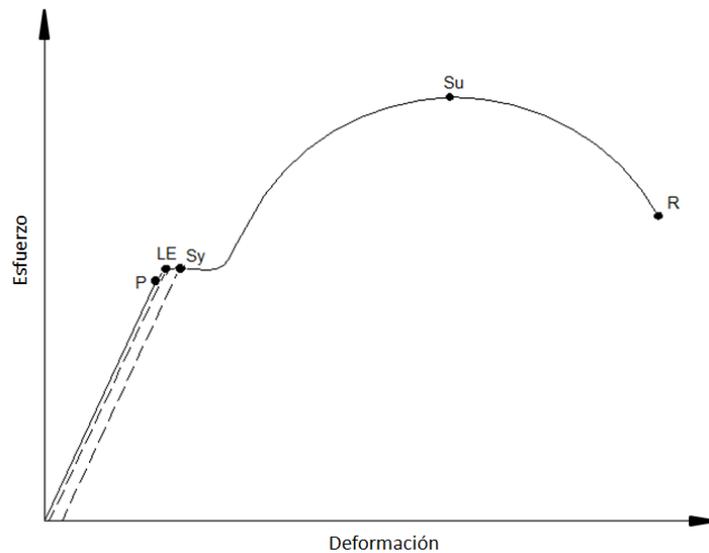


Figura 2.9 Curva esfuerzo vs deformación

La curva de esfuerzo deformación ingenieril o nominal se obtiene a partir de las medidas de carga y alargamiento. El valor del esfuerzo que soporta el material se define como:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (\text{Ecuación 2.30})$$

El alargamiento es la variación de la longitud $\Delta L = L_f - L_0$, y la elongación se define como:

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{Ecuación 2.31.1})$$

Entonces,

$$e = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (\text{Ecuación 2.31.2})$$

Todo cuerpo al soportar una fuerza aplicada trata de deformarse en el sentido de aplicación de la fuerza. En el caso del ensayo de tracción, la fuerza se aplica en dirección del eje de ella y por eso se denomina axial, la probeta se alargará en dirección de su longitud y se encogerá en el sentido o plano perpendicular. Aunque el esfuerzo y la deformación ocurren simultáneamente en el ensayo, los dos conceptos son completamente distintos.

Si a todos los valores de la carga aplicados progresivamente se dividen por el área inicial de la probeta (A_0), se obtienen los diferentes valores del esfuerzo convencional o nominal aplicados, y si a todos los valores de ΔL observados y medidos se dividen por la longitud inicial de prueba (L_0), se obtienen los diferentes valores de deformación convencional ingenieril o nominal del ensayo. Estos valores se pueden representar en un sistema de ejes ortogonales obteniendo la curva esfuerzo – deformación ingenieril. Sin embargo este ensayo no considera la variación en el área de la sección transversal que se va generando en la probeta, es por ello que es necesario determinar la curva esfuerzo – deformación real, la cual toma en cuenta

tanto el cambio de la sección transversal como en la deformación infinitesimal. La deformación y el esfuerzo real se consiguen aplicando las siguientes relaciones:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Ecuación 2.32})$$

$$\varepsilon = Ln \frac{L}{L_0} = Ln \frac{A_0}{A} \quad (\text{Ecuación 2.33})$$

donde A es el área instantánea, ε es la deformación real o logarítmica y σ es el esfuerzo real.

Sin embargo, el esfuerzo y la deformación real pueden relacionarse con el esfuerzo y la deformación ingenieril, ecuaciones 2.30 y 2.31.2, respectivamente mediante las expresiones que siguen.

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (\text{Ecuación 2.34})$$

$$\sigma = \sigma_e(1 + e) \quad (\text{Ecuación 2.35})$$

Estas expresiones implican que conforme el esfuerzo se vuelve más significativo en la región plástica, los valores de deformación real e ingenieril divergen, tal como se observa en la Figura 2.10.

En la curva esfuerzo-deformación puede definirse la zona elástica y la zona plástica. En la zona elástica el esfuerzo es proporcional a la deformación que ocurre durante el ensayo, por lo tanto al liberar la carga aplicada, el material recupera su longitud inicial; este comportamiento lineal se rige por la Ley de Hooke, donde la

constante de proporcionalidad o el módulo de elasticidad E , es propio de cada material y representa la pendiente de la recta.

$$S = E \cdot e \quad (\text{Ecuación 2.36})$$

donde S es el esfuerzo de fluencia y e la deformación unitaria.

Seguidamente se encuentra la zona plástica de la curva, donde por el contrario el comportamiento entre los esfuerzos y las deformaciones no es lineal, debido a que el material se deforma permanentemente, produciéndose el endurecimiento por deformación, es decir, a medida que aumenta el esfuerzo el material es más resistente. Este segmento de curva que presenta un comportamiento plástico del material iniciado a partir del punto de fluencia, puede ser transformado a un comportamiento prácticamente lineal mediante una escala bilogarítmica.

La curva linealizada de la zona plástica se representa mediante la ecuación de fluencia o bien llamada Ley de Hollomon, la cual toma en cuenta un coeficiente de resistencia σ_0 y el coeficiente de endurecimiento m , que son el esfuerzo para una deformación real unitaria y la pendiente de la recta obtenida en la escala log-log respectivamente.

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \varepsilon^m \quad (\text{Ecuación 2.37})$$

El valor de m se puede calcular eligiendo dos puntos a y b de la recta linealizada y obteniendo su pendiente mediante la siguiente ecuación.

$$m = \frac{\log \sigma_a - \log \sigma_b}{\log \varepsilon_a - \log \varepsilon_b} \quad (\text{Ecuación 2.38})$$

Por lo tanto, la diferencia entre la curva real e ingenieril se observa en la región plástica (Figura 2.10), debido al incremento de los valores de los esfuerzos producto de la consideración en los cálculos de las áreas instantáneas, las cuales van disminuyendo, desplazando la curva hacia arriba; además la deformación logarítmica es menor a la ingenieril y genera un desplazamiento en la curva hacia la izquierda.

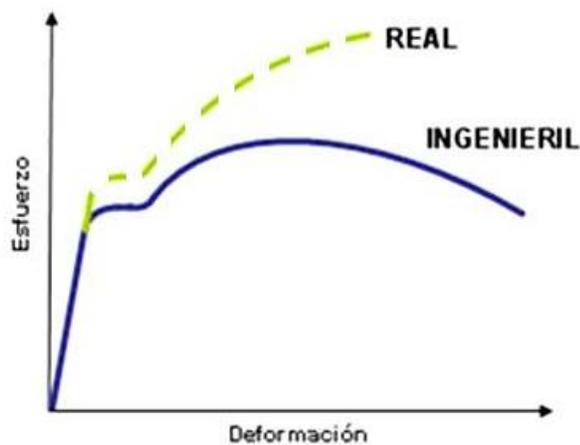


Figura 2.10 Curva esfuerzo vs deformación real e ingenieril

2.2.7 Criterios de fluencia para materiales dúctiles

En años anteriores fueron planteadas teorías con la finalidad de estudiar la fluencia de un material dúctil mediante el cálculo de la tensión a la cual falla, estas teorías son conocidas como criterios de fluencia, los más trascendentales son el de Von Mises y Tresca; permiten conocer información importante acerca de las deformaciones permanentes a las que puede estar sometido un elemento.

El problema de deducir relaciones matemáticas para predecir las condiciones a las cuales la deformación plástica comienza, es cuando un material está sometido a

diferentes combinaciones de esfuerzos, lo cual es una consideración importante en el área de la plasticidad.

Criterio de Von Mises

En 1913 Von Mises propuso que la fluencia ocurre cuando el segundo invariante del tensor de esfuerzos desviatorios J^2 excede algún valor crítico:

$$J^2 = k^2 \quad \text{(Ecuación 2.39)}$$

$$\text{donde } J^2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2].$$

Para hallar la constante k , se aplica el criterio de fluencia en tensión uniaxial, $\sigma_1 = \sigma_0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

$$\begin{aligned} \sigma_0^2 + \sigma_0^2 &= 6k^2 \\ \sigma_0 &= \sqrt{3}k \end{aligned} \quad \text{(Ecuación 2.40)}$$

Sustituyendo la ecuación 2.40 en la ecuación 2.39 se obtiene el conocido criterio de fluencia de Von Mises

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad \text{(Ecuación 2.41)}$$

o también se escribe en función de la matriz de esfuerzos

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]^{1/2} \quad \text{(Ecuación 2.42)}$$

La ecuación 2.41 o 2.42 predice que el flujo plástico ocurrirá cuando las diferencias de los esfuerzos (del lado derecho de la ecuación), excedan el esfuerzo σ_0 .

La constante k de la ecuación 2.39, considera el estado de esfuerzo en corte puro, como se genera en un ensayo de torsión.

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

$$\text{para fluencia } \sigma_1^2 + \sigma_1^2 + 4\sigma_1^2 = 6k^2 \therefore \sigma_1 = k$$

De modo que k representa el esfuerzo de fluencia en corte puro (torsión). Por lo tanto, el criterio de Von Mises predice como el esfuerzo de fluencia en torsión será menor que en tensión uniaxial de acuerdo a:

$$k = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_0 = 0,577 \sigma_0 \quad (\text{Ecuación 2.43})$$

Resumiendo, el criterio de deformación según Von Mises implica que la deformación no depende de ningún esfuerzo en particular, más bien la deformación es una función que depende de tres valores de esfuerzo principal. Como el criterio de Von Mises contiene expresiones cuadráticas, el resultado es independiente del signo de los esfuerzos individuales. Esto es una ventaja, ya que no es necesario conocer cual esfuerzo principal es mayor o menor al momento de usar el criterio de deformación de Von Mises.

Criterio de Tresca

Este criterio de fluencia establece que la deformación ocurre cuando el esfuerzo cortante máximo se iguala al esfuerzo de corte en el ensayo de tensión uniaxial. Para que ocurra la fluencia en un material dúctil, el esfuerzo de corte máximo tiene esta expresión:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (\text{Ecuación 2.44})$$

donde σ_1 y σ_3 son algebraicamente los esfuerzos principales máximo y mínimo respectivamente.

Para tensión uniaxial, $\sigma_1 = \sigma_0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$, y el esfuerzo de fluencia cortante τ_0 es igual a $\sigma_0 / 2$. Sustituyendo en la ecuación 2.44,

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_0 = \frac{\sigma_0}{2} \quad (\text{Ecuación 2.45})$$

Por lo tanto el criterio del esfuerzo cortante máximo se obtiene por medio de:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0 \quad (\text{Ecuación 2.46})$$

Para la condición de corte puro, $\sigma_1 = -\sigma_3 = k, \sigma_2 = 0$, el criterio del esfuerzo cortante máximo predice que la deformación ocurrirá cuando $\sigma_1 - \sigma_3 = 2k = \sigma_0$ o bien $k = \frac{\sigma_0}{2}$. Por lo que este criterio puede ser definido así:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_1 - \sigma'_3 = 2k \quad (\text{Ecuación 2.47})$$

Se nota que el criterio del esfuerzo cortante máximo es matemáticamente más sencillo y es menos preciso que el criterio de Von Mises. No obstante, este criterio no toma en consideración el esfuerzo principal intermedio (σ_2).

2.2.8 Evaluación metalográfica

Un ensayo de metalografía consiste en el estudio de la constitución y la estructura de los metales y las aleaciones, estableciendo relaciones con sus propiedades físicas y mecánicas. La evaluación metalográfica puede llevarse a cabo a nivel microscópico o macroscópico, dependiendo de lo que se desee observar en la superficie del material.

Para desarrollar un análisis microscópico es necesario realizar la preparación metalográfica del material a estudiar, cumpliendo una metodología específica y aplicando los reactivos adecuados según sea el metal en estudio, a fin de observar sus características empleando un microscopio. Este ensayo se desarrolla con el objetivo de conocer que tipo de aleación se tiene, su composición aproximada, la estructura de las muestras y el tamaño de grano. También este estudio proporciona información acerca del tratamiento mecánico previo que se aplicó en el material, es decir, se puede determinar si el material fue trefilado, laminado, extraído o forjado.

Por otra parte el ensayo macroscópico o macroscopía de un metal permite comprobar la distribución de defectos como grietas superficiales, defectos de forja, rechupes, partes soldadas, entre otros. Los exámenes macroscópicos en ocasiones se realizan sin preparación especial, pero generalmente es necesaria una cuidadosa preparación de la superficie para poner de manifiesto las características macroscópicas que podrán observarse sin emplear el microscopio.

En macroscopía, se utilizan criterios para el tipo de corte a emplear y extraer la muestra dependiendo del estudio a realizar. Es necesario desarrollar el corte de la muestra de manera tal que no se altere la estructura de la misma con algún aumento de temperatura por el roce con la herramienta. Los tipos de corte que se emplean son los siguientes:

- **Corte transversal:** Naturaleza del material, homogeneidad, segregaciones, procesos de fabricación de barras, entre otros.
- **Corte longitudinal:** Proceso de fabricación de piezas, tipo y calidad de la soldadura, líneas de fluencia, entre otros.

2.2.9 Ensayo de Dureza

La dureza no es una propiedad intrínseca de un material, simplemente está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas del mismo, es por ello que el valor de dureza no puede utilizarse directamente en trabajos de diseño, como puede hacerse con un valor de resistencia a la tensión.

Un ensayo de dureza es una medición directa en el que el número de dureza resultante es una función del grado de penetración de la pieza ensayada mediante la acción de un penetrador bajo una carga elástica dada. El valor de dureza obtenido en una prueba determinada sirve sólo como comparación entre materiales o tratamientos.

Ensayo de dureza Rockwell

El procedimiento de prueba y la preparación de la muestra suelen ser sencillos, los resultados pueden utilizarse para estimar otras propiedades mecánicas. Este ensayo se realiza en una máquina de lectura directa especialmente diseñada que aplica la carga a través de un sistema de pesas y palancas. El indentador puede ser una bola de acero o un cono de diamante con una punta ligeramente redondeada. El valor de la dureza, según se lee en un indicador o pantalla, es un número arbitrario que está inversamente relacionado con la profundidad de la huella, 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. No existe ningún valor de dureza de Rockwell designado para un solo número porque resulta necesario indicar cual indentador y cual carga se emplearon al hacer el ensayo.

En la operación de la máquina se aplica inicialmente una pequeña carga de 10 kg, la cual causa una penetración inicial que pone el penetrador sobre el material y lo mantiene en posición, a continuación se aplica la carga principal o carga mayor; ésta

es usualmente de 60 o 100 kg cuando se usa una bola de acero como penetrador (Rockwell B), aunque pueden usarse otras cargas cuando resulte necesario y es, generalmente, de 150 kg cuando se emplea el cono de diamante (Rockwell C).

El penetrador esférico es normalmente de 1/16 pulgadas de diámetro, pero otros de mayor diámetro tales como 1/8, 1/4, o 1/2 pulgada pueden emplearse para materiales suaves. Después de que la carga principal se aplica y retira, se toma la lectura de la dureza de la pantalla mientras la carga menor permanece en posición. El número de dureza resultante debe preceder al símbolo HR, seguido de la letra que designa la escala definida según la combinación de carga y penetrador empleado.

Existen algunas condiciones que deben tomarse muy en cuenta al momento de aplicar un ensayo de dureza Rockwell a un material como son:

La superficie del ensayo debe ser plana, libre de películas de óxido, fosas y materia extraña que pueda afectar a los resultados debido a que una superficie carcomida puede arrojar lecturas erradas debido a la cercanía de algunas indentaciones al borde de una depresión; esto permite el libre flujo del metal alrededor de la herramienta penetradora y resulta una lectura baja. Por ejemplo, las superficies aceitadas generalmente arrojan lecturas ligeramente más bajas que las secas debido a la fricción reducida en el penetrador.

La superficie contraria al ensayo debe estar libre de escama, suciedad u otras materias extrañas que puedan aplastarse o fluir bajo la presión de ensayo afectando así los resultados.

Todos los ensayos de dureza deben hacerse sobre un solo espesor del material; el número de dureza determinado por penetración en una superficie curva es erróneo debido a la forma de la superficie.

Por otra parte, en secciones de piezas delgadas se aplica la medición de dureza con Rockwell superficial, método concebido especialmente para ensayos de dureza en que resulten posibles únicamente penetraciones someras y cuando se desee conocer la dureza de la probeta cerca de la superficie.

Se opera bajo el mismo principio que Rockwell regular, pero se emplean cargas menores y mayores más ligeras, el sistema de medición de la profundidad es más sensitivo. En lugar de la carga menor de 10 kg y las cargas mayores de 60, 100, 150 kg de Rockwell regular, para el ensayo superficial se aplica una carga menor de 3 kg y cargas mayores de 15, 30 o 45 kg. Un punto de dureza en la prueba superficial corresponde a una diferencia en profundidad de penetración de 0,001 mm.

CAPÍTULO III

Marco Metodológico

3.1 Nivel de la investigación

El desarrollo de este trabajo de grado se considera como una investigación de tipo experimental, ya que por medio de ésta se buscó caracterizar dos materiales metálicos con las diferentes propiedades obtenidas, y de ese modo, conocer el comportamiento de los mismos cuando son sometidos a esfuerzos torsores y tensiles.

3.2 Diseño de la investigación

El presente trabajo de grado se refiere a la evaluación del comportamiento mecánico a torsión de las aleaciones de latón UNS C36000 y UNS C37700, en estado de recocido y normalizado, tomando en cuenta los tratamientos térmicos que establecen las normas correspondientes a cada aleación.

3.2.1 Obtención del material

Las aleaciones de latón UNS C36000 y UNS C37700 se encuentran entre las aleaciones de cobre-zinc más utilizadas, por su variedad de aplicaciones, y pueden encontrarse en diferentes medidas.

En base a los calibres encontrados comercialmente de estas aleaciones, y a los requerimientos que exigen los ensayos realizados, se adquirió cada aleación en barras cilíndricas de 3 m de longitud, de diámetros de 1” y de 1 1/4”.

El proceso final de fabricación de las barras de la aleación UNS C36000 fue trefilado en frío, y de las barras de la aleación UNS C37700 un proceso de extrusión en caliente, siendo estas las condiciones de entrega de cada material.

Se tomó una muestra de material de cada aleación a la cual se le aplicó un análisis químico por electrólisis utilizando un espectrómetro del laboratorio de calidad de la empresa Vetramet C.A. Las composiciones de ambos materiales se muestran en la Tabla siguiente.

Tabla 3.1 Composición química de las aleaciones utilizadas en los ensayos

Aleación	Sn%	Pb%	Zn%	P%	Mn%	Fe%	Ni%	Si%
UNS C36000	0.0638	3.433	35.11	0.0195	0.0020	0.1054	0.0355	0.0059
UNS C37700	0.0814	2.491	38.78	0.0339	0.0020	0.0868	0.0426	0.0049

Fuente: Anexo A

Continuación de Tabla 3.1

Aleación	Cr%	As%	Sb%	Cd%	Ag%	Al%	Cu%
UNS C36000	0.0010	0.0020	0.0028	0.0010	0.0163	0.0010	61.20
UNS C37700	0.0010	0.0020	0.0059	0.0010	0.0219	0.0010	58.45

Fuente: Anexo A

A continuación en la Tabla 3.2, se establece la nomenclatura que se empleará para diferenciar las dos aleaciones sometidas a los ensayos mecánicos de torsión y tracción.

Tabla 3.2 Nomenclatura de probetas bajo ensayos mecánicos

Aleación	Tratamiento	Ensayada a torsión	Ensayada a tracción
UNS C36000	Recocido	TX- R360	tX-R360
	Normalizado	TX-N360	tX-N360
UNS C37700	Recocido	TX- R377	tX-R377
	Normalizado	TX-N377	tX-N377

X: representa el número del ensayo

3.2.2 Fabricación de las probetas

Las probetas de torsión se realizaron a partir de las barras cilíndricas de $1 \frac{1}{4}$ " de diámetro, siguiendo las recomendaciones de la norma COVENIN 907-1997 [9], para establecer la geometría de la probeta, y las especificaciones de la máquina de torsión, para los extremos de la misma. La fabricación de dicha probeta se realizó mediante un proceso de mecanizado, específicamente torneado y fresado. La Figura 3.1 muestra la descripción de las dimensiones de las probetas.

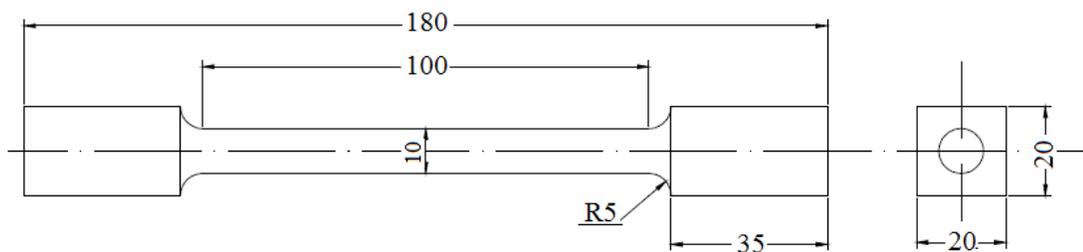


Figura 3.1 Probeta para ensayos de torsión, medidas en mm

La elaboración de las probetas para el ensayo de tracción fue a partir de las barras cilíndricas de 1" de diámetro, tomando como criterio las especificaciones establecidas por la norma ASTM E8 [23], las características de la probeta se muestran en la Figura 3.2. Las probetas se realizaron por mecanizado.

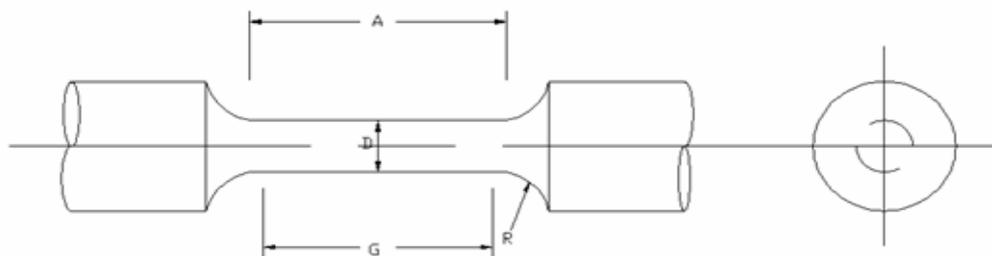


Figura 3.2 Probeta para ensayos de tracción

Tabla 3.3 Dimensiones de una probeta para ensayo de tracción estandarizada

Descripción	Dimensiones (mm)
D - Diámetro nominal	12,7±0,2,54
G - Longitud nominal	50,8±0,127
R - Radio del filete	9,525
A - Longitud de la sección reducida	57,15

Fuente: Norma ASTM E8 [23]

Para el ensayo de dureza se fabricaron las probetas a partir de barras cilíndricas de 1 1/2” de diámetro, y se siguieron las recomendaciones de la norma ASTM E18-05 [24]. Estas probetas fueron obtenidas con operaciones básicas de torneado como lo es el tronzado y refrentado, y luego se lijaron las mismas con lijas de diferentes denominaciones para asegurar la ausencia de óxidos ó partículas extrañas. En la Figura 3.3 se puede observar la geometría de la probeta ensayada.

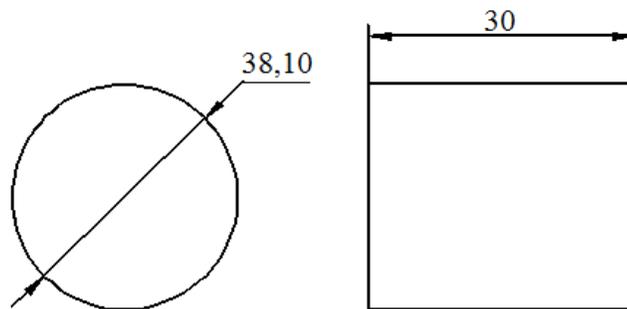


Figura 3.3 Probeta para ensayos de dureza

3.2.3 Aplicación de los tratamientos térmicos

Una vez elaboradas todas las probetas, se le aplicaron los tratamientos térmicos normalizado y recocido a ambas aleaciones de latón (UNS C36000 y UNS C37700). Para esto se empleó un horno Thermolyne, modelo FURNACE 48000, y de temperatura máxima igual a 1200 °C, este se encuentra en el Laboratorio de

Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, el mismo se puede observar en la Figura 3.4.



Figura 3.4 Horno Thermolyne, utilizado en los tratamientos térmicos

Recocido

Tanto las probetas de latón UNS C36000 como las de la aleación UNS C37700 fueron sometidas a las mismas condiciones de temperatura y tiempo, como se muestra en la Tabla 3.4, tomando como referencia las especificaciones del ASM Metals Handbook [12] y diferentes trabajos de investigación consultados. Al finalizar el tiempo establecido de 60 min, a una temperatura constante de 510°C, se dejó descender la misma hasta alcanzar en las probetas la temperatura ambiente dentro del horno.

Tabla 3.4 Valores de temperaturas y tiempos para la aplicación del recocido

Aleación	Temp. de recocido (°C)	Tiempo (min)
UNS C36000	425-600	60
UNS C37700	425-600	60

Fuente: ASM Metals Handbook [12]

En la Figura 3.5 se muestra el ciclo térmico del recocido, donde se puede observar el aumento de temperatura por un período de tiempo muy corto en relación al tiempo en que permanece a temperatura constante y el tiempo de enfriamiento que ocurre dentro del horno.

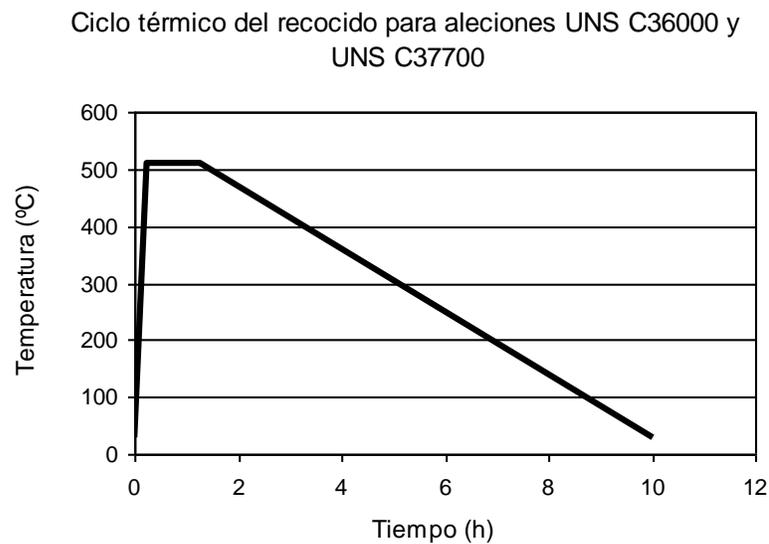


Figura 3.5 Ciclo térmico del recocido

Normalizado

La temperatura del normalizado ó también llamado alivio de tensiones para ambas aleaciones se tomó del ASM Metals Handbook [12], se muestra en la siguiente Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Valores de temperaturas para la aplicación del normalizado

Aleación	Temp. de normalizado (°C)
UNS C36000	290
UNS C37700	290

Fuente: ASM Metals Handbook. [12]

El tiempo de permanencia a la temperatura de 290° fue de 90 min tanto para la aleación UNS C36000 como para la UNS C37700, un tiempo superior a lo que indica el ASM Metals Handbook que es de 60 min, esto con el fin de asegurar la homogeneización del material, también tomando como referencia diferentes trabajos de investigación consultados y la aplicación que realiza la empresa venezolana Vetramet C.A., la cual se encarga de producir específicamente estos dos tipos de aleaciones de cobre, realizando este tratamiento al material para el alivio de tensiones.

Una vez sometidas las probetas a la temperatura de permanencia en el tiempo indicado se dejaron enfriar fuera del horno, logrando así que la temperatura del material descendiera en menos tiempo comparado con el enfriamiento del recocido gracias a la convección del aire. En la Figura 3.6 se puede observar el comportamiento del ciclo térmico del normalizado.

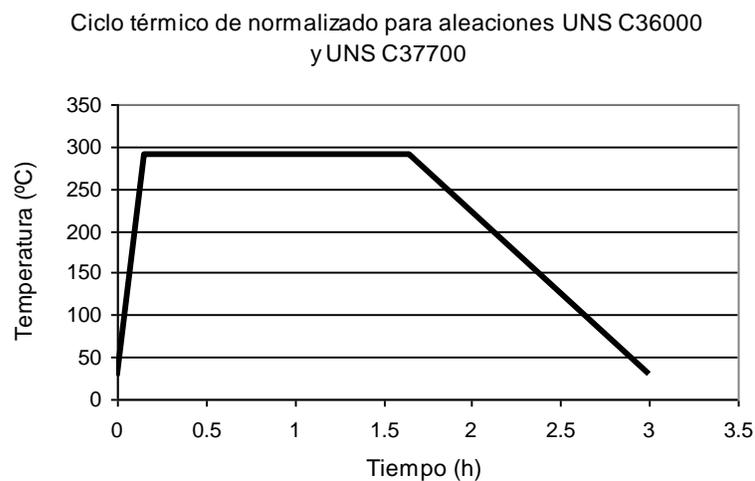


Figura 3.6 Ciclo térmico del normalizado

3.2.4 Ensayos mecánicos

Ensayo de torsión

Las probetas de torsión descritas anteriormente (Figura 3.1) fueron ensayadas empleando la máquina para ensayos de torsión que posee el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, la cual fue desarrollada en la investigación de Palkovic y Sánez (2006).

Esta máquina de torsión anteriormente funcionaba de forma manual con el uso de una manivela quien dirigía la velocidad de rotación del ensayo conjuntamente con una caja reductora de relación 60:1, dicha máquina se observa en la Figura 3.7. Esto fue modificado acoplando a la caja reductora mencionada, que poseía inicialmente la máquina, un motorreductor de 0,5 Hp, 1750rpm, relación de transmisión 15:1, marca Motovario, modelo NMRV 040, con el fin de garantizar realmente el desarrollo del ensayo a velocidad constante.

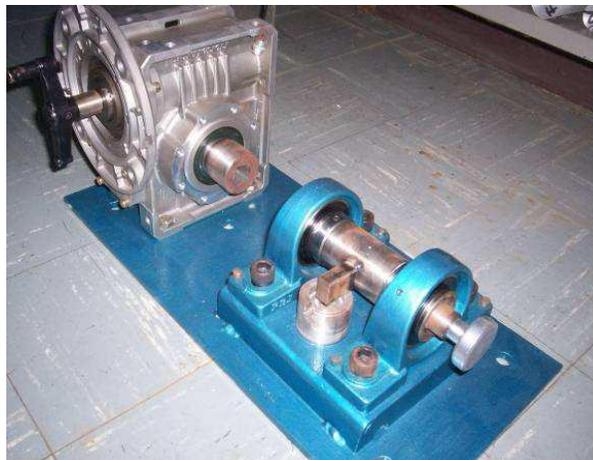


Figura 3.7 Máquina para ensayos de torsión, con manivela

Para lograr el ensamble del motorreductor a la máquina fue necesario usar un acople, modelo L-075 de hierro, el cual fue mecanizado en cada uno de sus dos extremos con la finalidad de lograr la unión correcta con el eje del motorreductor y de la caja reductora respectivamente. Estos cambios en el funcionamiento de la máquina llevaron a la fabricación de una base que permitiera fijar el motor a una altura tal que se garantizara la alineación de los ejes. La máquina de torsión con las modificaciones se puede ver en la Figura 3.8.

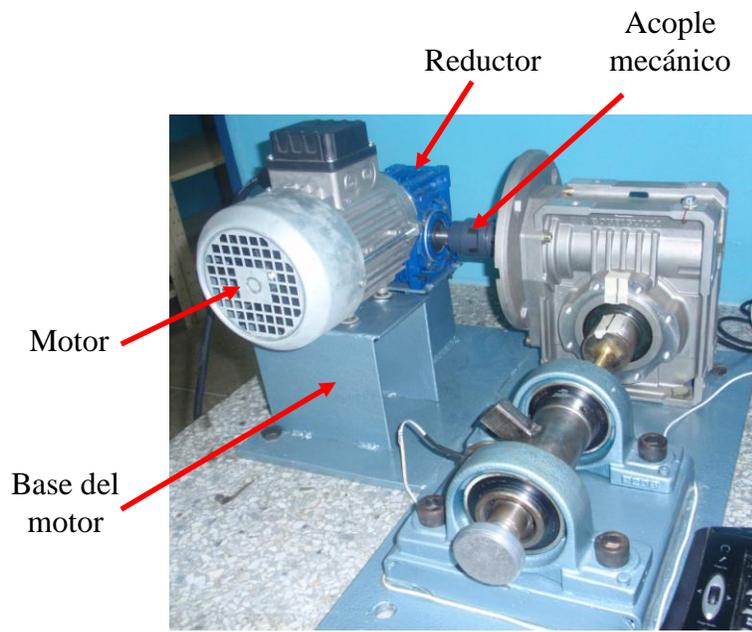


Figura 3.8 Máquina para ensayos de torsión, con motorreductor

Para el ensayo de torsión se sometieron siete probetas para cada condición de tratamiento térmico a un par torsor alrededor de su propio eje longitudinal hasta llegar a su punto de ruptura, dicho par torsor se aplicó sobre uno de los extremos de la probeta a través de la mordaza giratoria que posee la máquina, la cual junto con la mordaza fija producen sobre la probeta una deformación paulatina hasta llegar a que falle el material; la mordaza móvil giró a una velocidad constante de aproximadamente 2 rev/min, esta velocidad es recomendada por la norma COVENIN 907-1997 [9].

En este ensayo, los valores de carga aplicada se adquirieron mediante una celda de carga ensamblada a la máquina, que presenta una interfase a un computador y grafica en tiempo real la curva momento torsor vs. ángulo de deformación.

Una vez culminados los ensayos de torsión se procede a conseguir las curvas de esfuerzo de corte versus deformación angular a partir de la curva momento torsor vs. ángulo de deformación. Para calcular el esfuerzo de corte, se aplica la ecuación 2.12 en la zona elástica y la ecuación 2.26 para la zona plástica, ya que se considera el endurecimiento por deformación del material en esta última zona como lo propuso *Bressan y Kirchof* [1]. La deformación angular que sufre la probeta por unidad de longitud se obtiene mediante la ecuación 2.5.

Para establecer en qué punto de la curva momento torsor vs. ángulo de giro comienza la zona plástica del material, se obtiene inicialmente la curva esfuerzo de corte vs. deformación angular empleando la ecuación 2.12 para todo el rango de deformación. Luego se consigue el límite de proporcionalidad de dicha curva, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 3.9.

Posterior a la obtención del límite proporcional, se calcula el módulo de elasticidad en corte empleando la ecuación 2.16, y el esfuerzo de fluencia mediante el método offset como se observa en el ejemplo de la Figura 3.10; dichos parámetros según el comportamiento obtenido de la curva esfuerzo de corte vs. deformación angular.

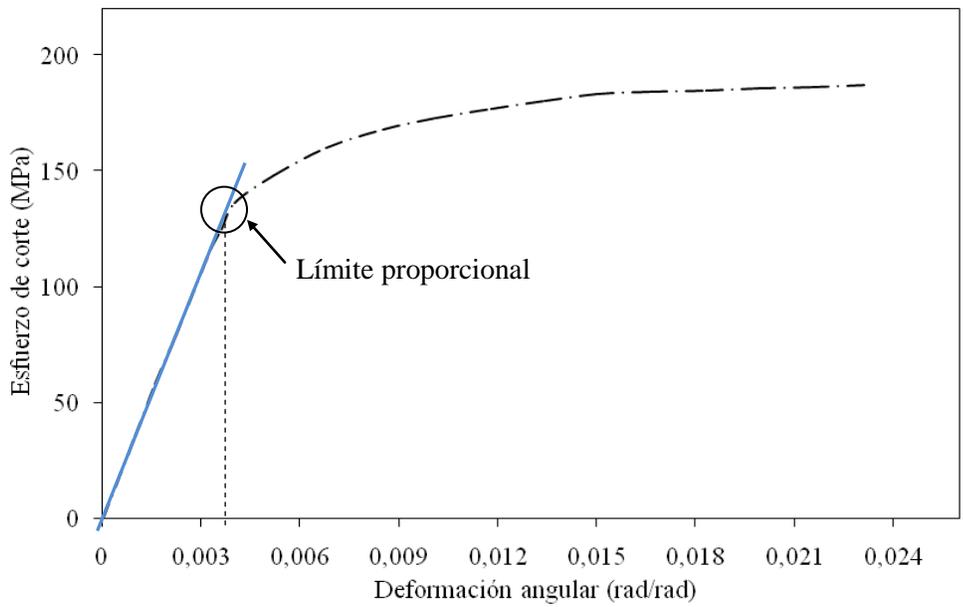


Figura 3.9 Gráfica esfuerzo de corte vs. deformación angular sin considerar el endurecimiento por deformación

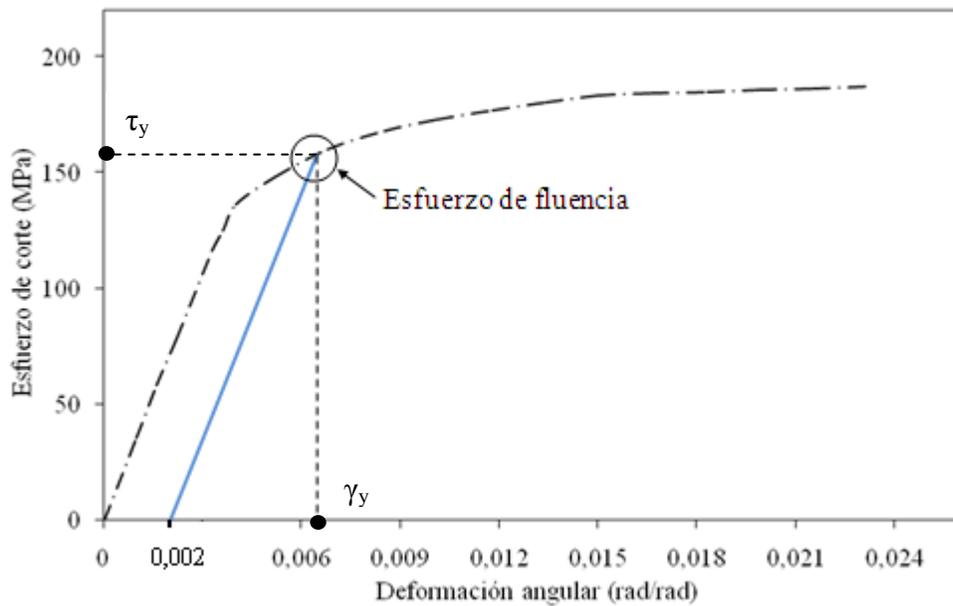


Figura 3.10 Esfuerzo de fluencia en la curva esfuerzo de corte vs. deformación angular sin considerar el endurecimiento por deformación de la zona plástica

A partir de la deformación angular correspondiente al esfuerzo de fluencia, se aplica la ecuación 2.26 para calcular nuevamente el esfuerzo a corte en la zona plástica, ésta depende del exponente de la ley de endurecimiento que describe el comportamiento del material en la zona plástica de la curva momento torsor vs. ángulo de giro, según la ecuación potencial 2.25.

La ecuación potencial que describe el comportamiento de la zona plástica de la curva momento torsor vs. ángulo de giro, se obtiene mediante el método de ajuste por mínimos cuadrados no lineal empleando un software comercial, el cual arroja el grado de ajuste (coeficiente de correlación) entre la ecuación obtenida y el comportamiento experimental.

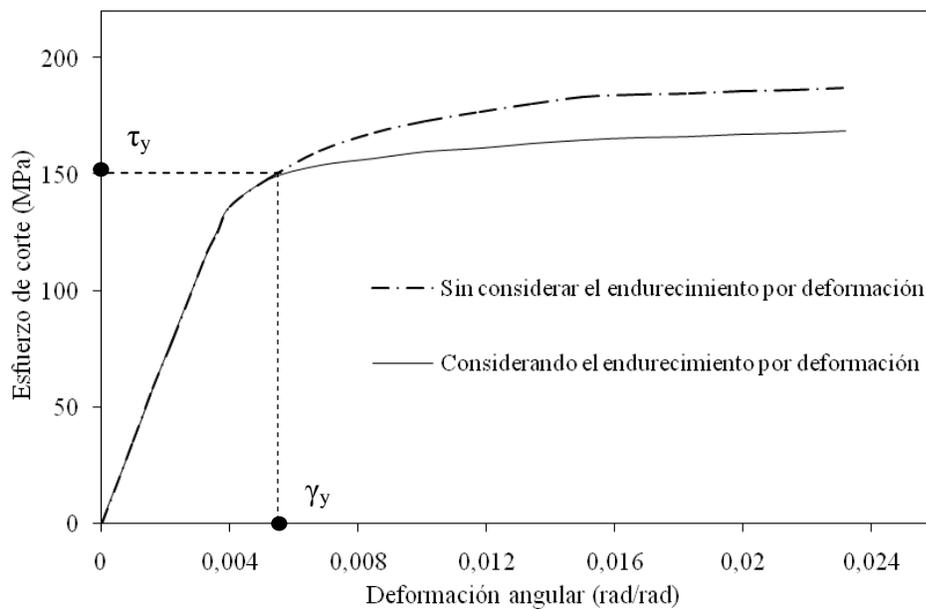


Figura 3.11 Gráfica esfuerzo de corte vs. deformación angular

Una vez obtenida la ecuación potencial, se calcula el comportamiento del esfuerzo a corte vs. deformación angular en la zona plástica correspondiente a la nueva curva

que considera el endurecimiento por deformación, como se muestra en el ejemplo de la Figura 3.11.

Finalmente de la curva esfuerzo de corte en función de la deformación angular se extraen los valores de las propiedades características. El exponente “ n ” de la ecuación potencial debe registrarse para cada una de las curvas obtenidas, ya que representa el coeficiente de endurecimiento en la zona plástica para cada muestra ensayada.

Ensayo de tracción

En el ensayo de tracción se utilizó un equipo universal para ensayos de materiales marca Galdabini, modelo CTM 20, que se muestra en la Figura 3.9. Con una capacidad de 20 ton. Este equipo se encuentra en el Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.



Figura 3.12 Máquina universal de ensayo de materiales. Marca: Galdabini

Se ensayaron cinco probetas por cada condición de tratamiento térmico. Accionando la máquina universal Galdabini se aplicó una carga axial de tracción a cada probeta, manejando una velocidad controlada de aproximadamente 5 mm/min en

la zona elástica y 10 mm/min en la zona plástica, dependiendo del comportamiento del material durante el ensayo de tracción.

Para realizar los cálculos respectivos se empleó la ecuación 2.30, con la cual se dividen los valores de carga aplicada por el área inicial de la sección transversal de la probeta, y así obtener el esfuerzo ingenieril. Por consiguiente, con el uso de la ecuación 2.31.1 se halló la deformación unitaria que sufre la probeta, dividiendo el alargamiento entre la longitud inicial de la misma.

Aplicando el método offset en esta nueva curva esfuerzo ingenieril vs. deformación unitaria se calculó el esfuerzo de fluencia. Además, se pudo identificar el valor del esfuerzo máximo y hallar el porcentaje de alargamiento a la ruptura ocurrido en la probeta mediante la ecuación 2.28.

Ensayo de dureza

El ensayo de dureza se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM E18-05 [24].

Se empleó un durómetro digital marca Buehler, este se muestra en la Figura 3.13. Para ambas aleaciones y condiciones se usó un penetrador de bola de 1/16" de diámetro, y se realizaron los ensayos en la escala de dureza Rockwell F, con una carga de 60 kgf.

Para la ubicación de las indentaciones en la probeta de dureza se estableció que la distancia entre los centros de dos indentaciones debe ser 3 veces el diámetro del penetrador, y la distancia entre el centro de una indentación y el borde de la probeta debe ser 2,5 veces el diámetro del penetrador. Realizando un total de trece

identaciones en forma de “X” imaginaria a lo largo de todo el diámetro de cada probeta.

Antes de iniciar estos ensayos fue necesario certificar que la probeta de dureza estuviera libre de óxidos sobretodo la superficie plana donde se realizó la penetración.



Figura 3.13 Durómetro digital BUEHLER

Finalmente se empleó la Tabla 4 de norma ASTM E140 [21], para hallar el equivalente de dureza Rockwell F en la escala Brinell estándar.

3.2.5 Evaluación metalográfica de las probetas ensayadas a torsión

Al finalizar los ensayos de torsión se procedió a tomar una probeta fracturada por cada condición de tratamiento térmico para realizarle el estudio metalográfico, y

observar el comportamiento de las fibras deformadas después de la aplicación del momento torsor.

Para efectuar la metalografía se realizó un corte transversal a cada probeta, posteriormente se aplicaron desbastes gruesos con lijas n°240 y n°320, y desbastes finos con lijas n°400 y n°600. Además se utilizó el banco de pulido donde aplicando alúmina gruesa y fina a los paños de pulido grueso y fino respectivamente se logró conseguir una superficie lisa y adecuada para el ataque químico.

Se utilizaron las especificaciones de la norma ASTM E340 [16] y ASTM E407-99 [17]. La composición de los reactivos aplicados se muestra en la Tabla 3.6 y 3.7.

Tabla 3.6 Composición del reactivo para el ataque en aleación de latón UNS C36000

Compuesto	Cantidad (ml)
Ácido nítrico (HNO ₃)	50
Agua destilada (H ₂ O)	50

Fuente: Norma ASTM E340 [16]

Tabla 3.7 Composición del reactivo para el ataque en aleación de latón UNS C37700

Compuesto	Cantidad
Dicromato de potasio (K ₂ Cr ₂ O ₇)	2g
Acido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	8ml
Acido clorhídrico (HCl)	4 gotas
Agua destilada (H ₂ O)	100ml

Fuente: Norma ASTM E340 [16]

El reactivo que se muestra en la Tabla 3.6 se aplicó en las probetas de la aleación UNS C36000 por un período de tiempo de 20 segundos y en la Tabla 3.7 se observa la composición del reactivo aplicado en la aleación UNS C37700 durante 4 min. Seguidamente se limpió cada muestra con abundante agua y se secó al aire limpio, de

ese modo se pudo observar macroscópicamente y microscópicamente la superficie atacada.

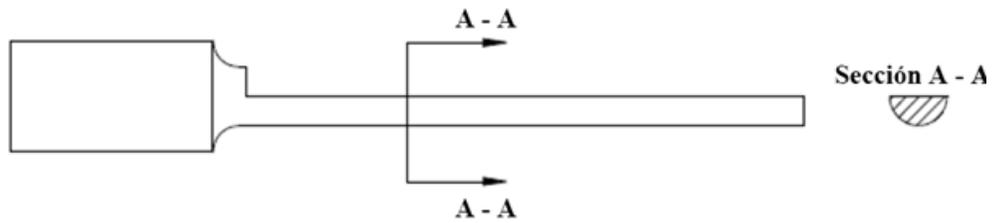


Figura 3.14 Corte de las probetas ensayadas a torsión

En esta evaluación metalográfica se obtuvieron imágenes tanto macroscópicas como microscópicas del material, tomando las fotografías en el centro y en cada borde de la sección longitudinal de la probeta mostrada en la Figura 3.15.



Figura 3.15 Probeta utilizada en la evaluación metalográfica

CAPÍTULO IV

Resultados

4.1 Resultados de ensayos de torsión

Al finalizar los ensayos de torsión y con el propósito de obtener las propiedades y valores asociados a este ensayo, se realizaron los cálculos necesarios según la metodología antes mencionada. En la figura 4.1 se puede observar una probeta utilizada en los ensayos de torsión antes de ser deformada.



Figura 4.1 Probeta antes de ser utilizada en los ensayos de torsión

4.1.1 Resultados de ensayos de torsión en la aleación UNS C36000 (Recocido)

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de torsión en condición de recocido de la aleación UNS C36000. En el gráfico de la figura 4.2 se puede visualizar el comportamiento de las siete probetas de la aleación UNS C36000 en condición de recocido sometidas a ensayos de torsión. Se emplearon varios estilos de líneas para lograr su diferenciación.

A fin de conseguir un valor específico de cada propiedad de la aleación se procedió a sintetizar los resultados en la tabla 4.1 y de ese modo hallar los promedios de todas las propiedades extraídas de las curvas esfuerzo al corte vs. deformación angular.

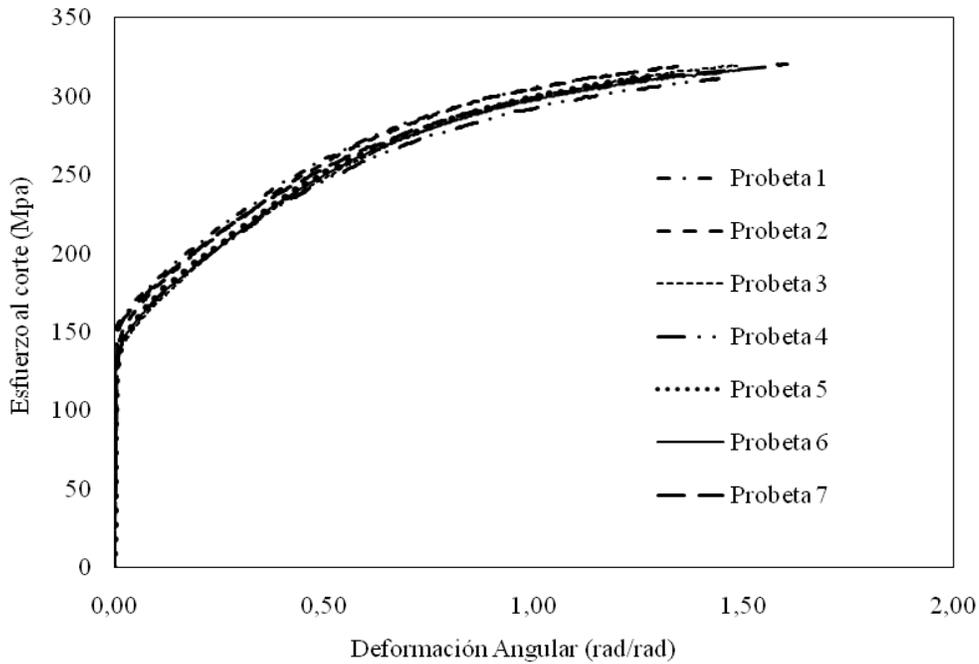


Figura 4.2 Curvas esfuerzo de corte vs. deformación angular de la aleación UNS C36000 (Recocido)

Tabla 4.1 Propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C36000 (Recocido)

Muestra	Límite proporcional (MPa)	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación última a corte (rad/rad)	Exponente n Zona Plástica	Coefficiente de Correlación %
T1-R360	130,2256	154,7523	33.3920	319,5465	1,3567	0,2693	99,4400
T2-R360	130,0445	142,5840	24.6990	320,0298	1,3989	0,2754	99,2500
T3-R360	131,8538	135,9497	21.9602	322,7243	1,5820	0,2404	99,4450
T4-R360	128,6281	136,2101	20.2397	313,0760	1,5165	0,2219	99,4600
T5-R360	130,7099	134,3376	22.1919	312,7522	1,2843	0,2056	99,1900
T6-R360	131,1257	135,0990	24.5750	319,4503	1,5997	0,2216	99,3060
T7-R360	132,9652	150,6102	24.4850	320,3982	1,6059	0,1917	99,3400
Promedio	131,6505	141,3633	24.5061	318,2825	1,4777	0,2323	99,3473
Desviación Estándar	2,2544	7,6599	3.9468	3,5439	0,1207	0,0290	-



Figura 4.3 Condición de la probeta T2-R360 una vez finalizado el ensayo de torsión

4.1.2 Resultados de ensayos de torsión en aleación UNS C36000 (Normalizado)

En la gráfica de la figura 4.4 se puede visualizar el comportamiento de las siete probetas de la aleación UNS C36000 en condición de normalizado y sometidas a esfuerzos torsores.

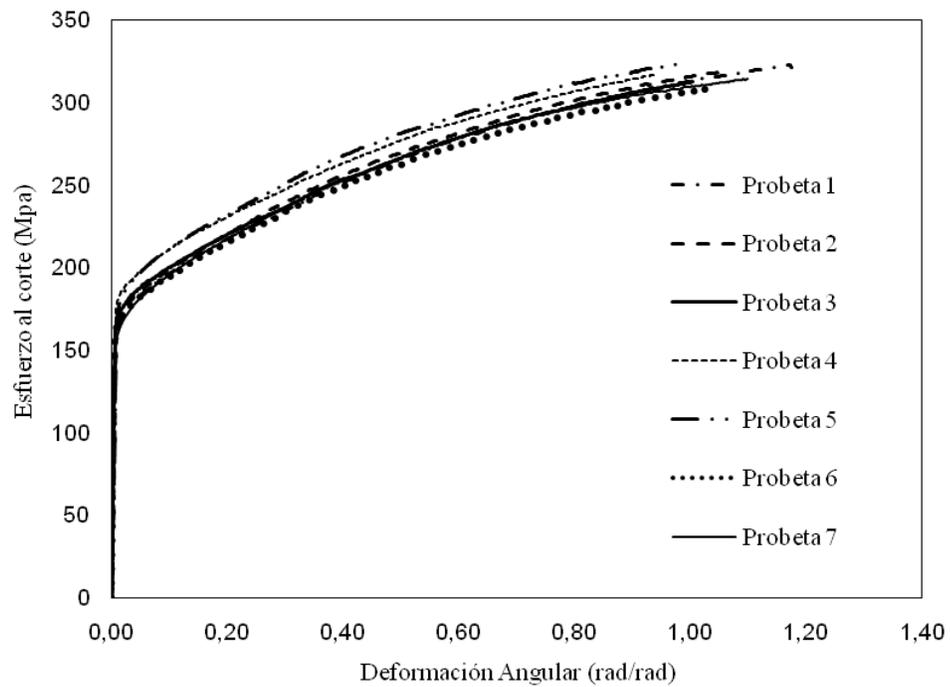


Figura 4.4 Curvas esfuerzo de corte vs. deformación angular de la aleación UNS C36000 (Normalizado)

Se presentan en la tabla 4.2 los valores o propiedades obtenidas en cada probeta, que caracterizan el comportamiento a torsión de la aleación UNS C36000 en condición de normalizado.

Tabla 4.2 Propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C36000 (Normalizado)

Muestra	Límite proporcional (MPa)	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación última a corte (rad/rad)	Exponente n Zona Plástica	Coefficiente de Correlación %
T1-N360	153,4618	164,4497	20,2959	322,5944	1,1747	0,2426	99,1320
T2-N360	152,1157	165,1690	23,6360	318,8946	1,0485	0,2419	98,7800
T3-N360	153,8090	168,6748	32,2786	313,8243	1,0167	0,1370	99,5200
T4-N360	157,1631	178,7055	26,0572	316,9232	0,9422	0,1383	99,3300
T5-N360	154,3656	176,0489	20,0903	324,3932	0,9955	0,1460	99,6300
T6-N360	151,9493	164,1934	30,8913	307,9972	1,0339	0,1515	99,8800
T7-N360	153,9043	157,3765	20,9507	314,7150	1,1064	0,1636	99,0160
Promedio	153,8241	167,8025	24,8857	317,0488	1,0454	0,1744	99,3269
Desviación Estándar	1,6042	6,8405	4,6782	5,1533	0,0703	0,0437	-

4.1.3 Resultados de ensayos de torsión en aleación UNS C37700 (Recocido)

En el gráfico de la figura 4.5 se puede visualizar el comportamiento de las siete probetas de la aleación UNS C37700 en condición de recocido.

Se presentan en la tabla 4.3 los valores o propiedades obtenidas en cada probeta, que caracterizan el comportamiento a torsión de la aleación UNS C37700 en condición de recocido, así como el promedio de dichos valores.

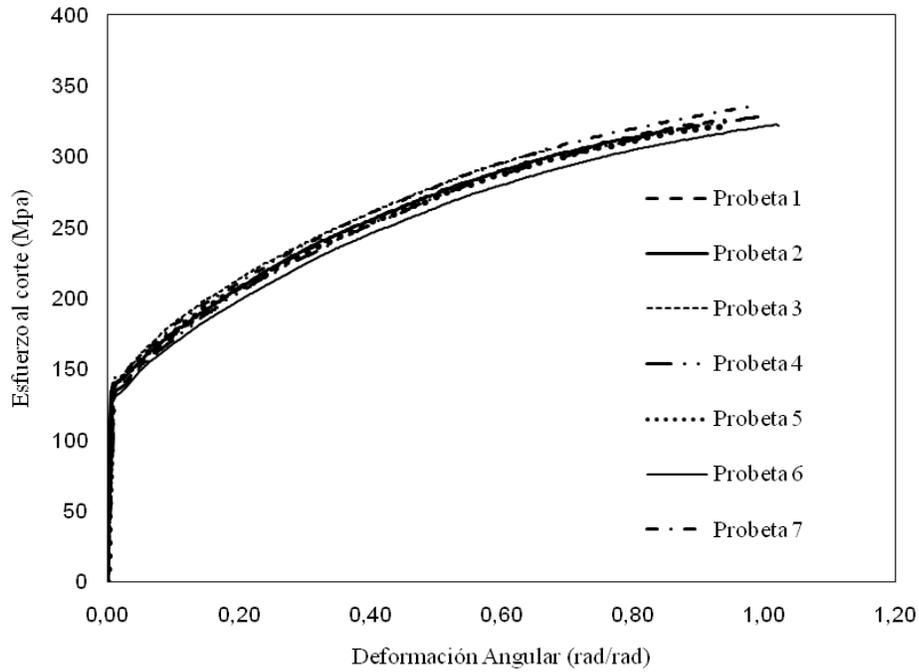


Figura 4.5 Curvas esfuerzo de corte vs. deformación angular de la aleación UNS C37700 (Recocido)

Tabla 4.3 Propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C37700 (Recocido)

Muestra	Límite proporcional (MPa)	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación última a corte (rad/rad)	Exponente n Zona Plástica	Coefficiente de Correlación R2
T1-R377	135,8698	137,2946	16,3636	326,6023	0,9414	0,3250	0,9958
T2-R377	134,3010	136,9767	27,9026	323,8656	0,9166	0,2232	0,9980
T3-R377	138,0778	139,3844	21,6093	305,0726	0,6750	0,2238	0,9945
T4-R377	126,0784	134,2481	13,1464	330,6324	1,0445	0,2683	0,9954
T5-R377	134,9220	139,5961	21,2193	321,9400	0,9337	0,2392	0,9924
T6-R377	129,6658	130,3493	19,2550	322,6284	1,0259	0,2427	0,9940
T7-R377	142,0759	144,4803	15,5357	335,4996	0,9869	0,2442	0,9947
Promedio	134,4272	137,4756	19,2903	323,7487	0,9320	0,2523	0,9950
Desviación Estándar	4,8777	4,1177	4,5306	8,8394	0,1139	0,0328	-

4.1.4 Resultados de ensayos de torsión en aleación UNS C37700 (Normalizado)

En el gráfico de la figura 4.6 se puede visualizar el comportamiento de las siete probetas de la aleación UNS C37700 en condición de normalizado.

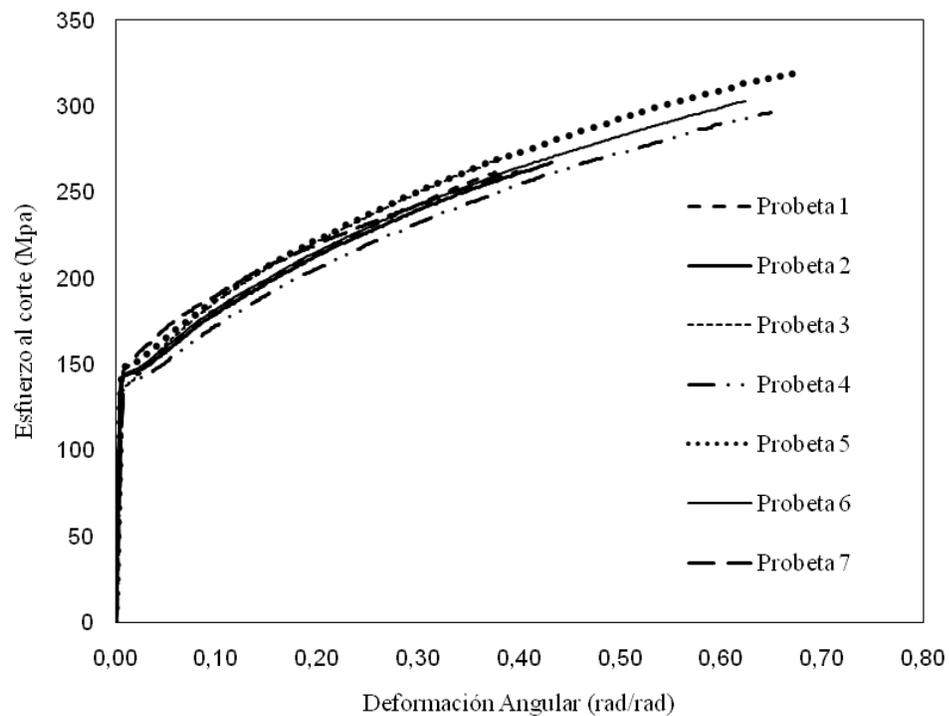


Figura 4.6 Curvas esfuerzo de corte vs. deformación angular de la aleación UNS C37700 (Normalizado)

Se presentan en la tabla 4.4 los valores o propiedades obtenidas en cada probeta, que caracterizan el comportamiento a torsión de la aleación UNS C37700 en condición de normalizado.



Figura 4.7 Condición de la probeta T6-N377 una vez finalizado el ensayo de torsión

Tabla 4.4 Propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C37700 (Normalizado)

Muestra	Límite proporcional (MPa)	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación última a corte (rad/rad)	Exponente n Zona Plástica	Coefficiente de Correlación %
T1-N377	136,7353	141,4353	30,8750	261,7713	0,3782	0,3609	99,2600
T2-N377	140,5651	142,0196	35,0190	268,5730	0,4419	0,2290	99,7500
T3-N377	134,4711	136,2243	22,4090	269,9340	0,3818	0,2361	99,0200
T4-N377	134,4912	138,1559	20,5480	296,6727	0,6489	0,2324	98,9000
T5-N377	143,0327	147,6957	24,8380	321,5581	0,6917	0,2224	99,3300
T6-N377	136,6315	145,4953	24,6167	306,4407	0,6456	0,2156	99,4000
T7-N377	141,7373	147,5259	22,2970	262,1371	0,3976	0,1585	99,0030
Promedio	138,2377	142,6503	25,8004	283,8696	0,5122	0,2364	99,2376
Desviación Estándar	3,2451	4,1522	4,8466	22,3051	0,1319	0,0564	-

4.2 Resultados de ensayos de tracción

Al finalizar los ensayos de tracción y con el propósito de obtener algunas propiedades y valores asociados a este ensayo, se realizaron los cálculos necesarios para la aleación UNS C36000 en la condición de normalizado. En la figura 4.8 se muestra la probeta utilizada en los ensayos de tracción.



Figura 4.8 Probeta antes de ser utilizada en los ensayos de tracción

4.2.1 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C36000 (Normalizado)

En la figura 4.9 se puede visualizar el comportamiento de las cinco probetas de la aleación UNS C36000 en condición de normalizado y sometidas a esfuerzos tensiles.

Se construyó cada curva con los datos de carga y alargamiento arrojados por la máquina de ensayos Galdabini.

Con el fin de conseguir un valor representativo de cada propiedad de la aleación se procedió a sintetizar los resultados en la tabla 4.5 y de ese modo hallar los promedios de todas las propiedades extraídas de las curvas de la figura 4.9.

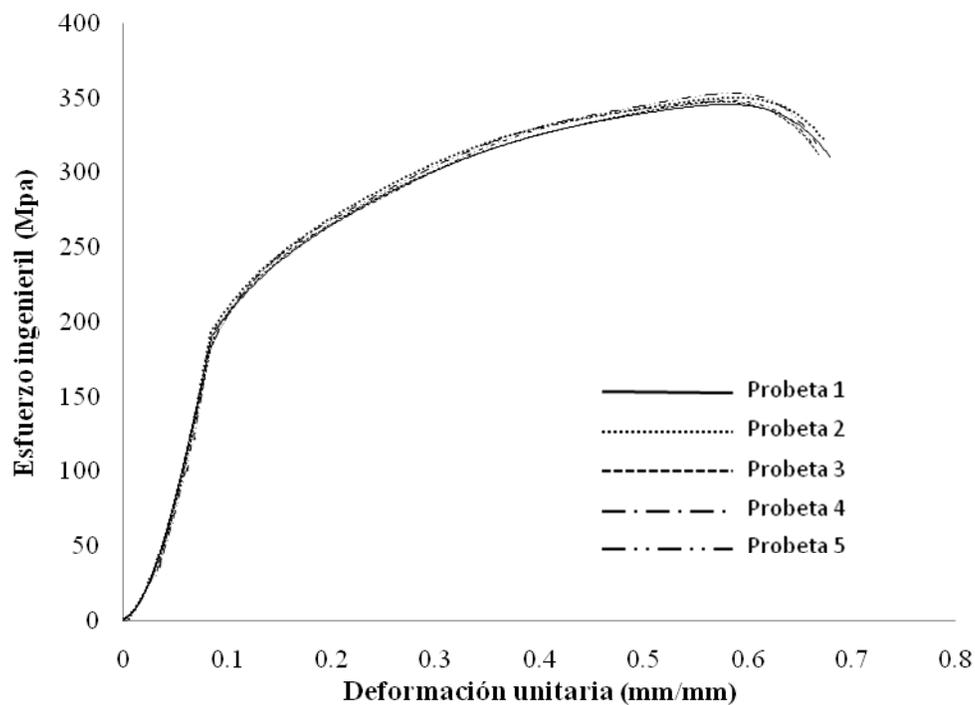


Figura 4.9 Curvas Esfuerzo ingenieril vs. Deformación unitaria de la aleación UNS C36000 (Normalizado)



Figura 4.10 Condición de la probeta t4-N360 una vez finalizado el ensayo de tracción

Tabla 4.5 Propiedades obtenidas del ensayo de tracción en la aleación UNS C36000 (Normalizado)

Probeta	Módulo elástico (GPa)	Esfuerzo fluencia (Mpa)	Deformación elástica (mm/mm)	Esfuerzo máximo (Mpa)	Deformación máxima (mm/mm)	Alargamiento ruptura (%)
t1- N360	2,807	222,147	0,08113	345,53	0,6791	41,30
t2- N360	2,809	221,039	0,08068	349,76	0,6757	43,10
t3- N360	2,665	218,241	0,08390	346,71	0,6689	37,92
t4- N360	2,707	218,660	0,08277	347,93	0,6621	41,66
t5- N360	2,453	192.649	0,08055	352,58	0,6662	40,64
Promedio	2,69	214,55	0,08	348,50	0,67	40,92
Desviación estándar	0,15	12,35	0,001	2,77	0,01	1,91

4.2.2 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C36000 (Recocido)

En el gráfico de la figura 4.11 se puede visualizar el comportamiento de las cinco probetas de la aleación UNS C36000 en condición de recocido y sometidas a ensayos de tracción.

Con el fin de conseguir un valor representativo de cada propiedad de la aleación se procedió a sintetizar los resultados en la tabla 4.6 y de ese modo hallar los promedios de todas las propiedades extraídas de las curvas de figura 4.11.

Tabla 4.6 Propiedades obtenidas del ensayo de tracción en la aleación UNS C36000 (Recocido)

Probeta	Módulo elástico (GPa)	Esfuerzo fluencia (Mpa)	Deformación elástica (mm/mm)	Esfuerzo máximo (Mpa)	Deformación máxima (mm/mm)	Alargamiento ruptura (%)
t1- R360	1,980	161,921	0,08379	336,03	0,9292	52,54
t2- R360	1,908	144,267	0,07760	330,70	0,7729	39,54
t3- R360	2,624	187,234	0,07336	334,60	0,7707	49,46
t4- R360	2,614	186,390	0,07331	334,80	0,7409	47,56
t5- R360	2,316	152,537	0,06785	334,79	0,8712	48,56
Promedio	2,29	166,47	0,08	334,19	0,82	47,53
Desviación estándar	0,34	19,59	0,01	2,03	0,08	4,84

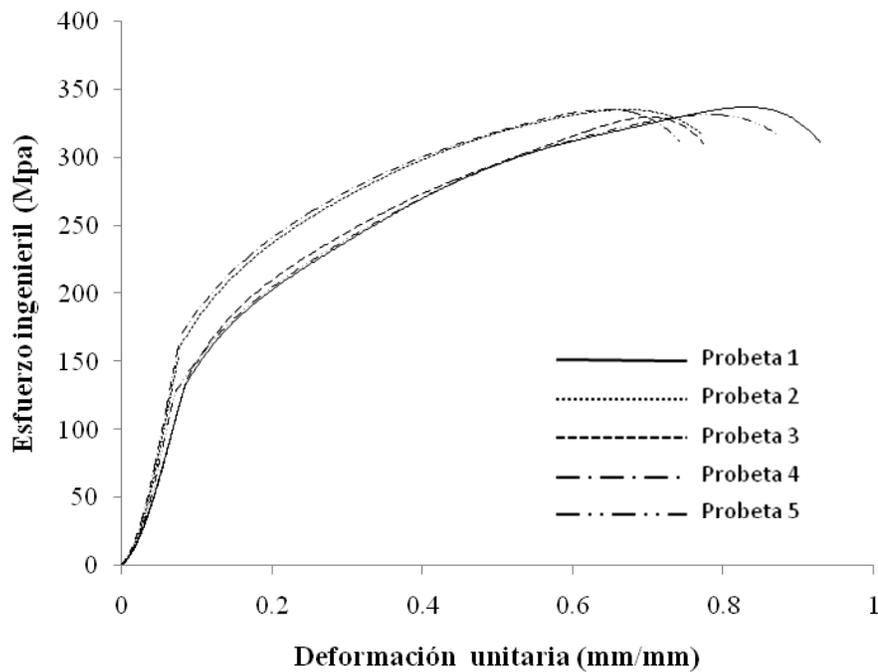


Figura 4.11 Curvas Esfuerzo ingenieril vs. Deformación unitaria de la aleación UNS C36000 (Recocido)



Figura 4.12 Condición de la probeta t3-R360 una vez finalizado el ensayo de tracción

4.2.3 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C37700 (Normalizado)

En la figura 4.13 se puede visualizar el comportamiento de las cinco probetas de la aleación UNS C37700 en condición de normalizado y sometidas a esfuerzos tensores.

Con el fin de conseguir un valor representativo de cada propiedad de la aleación se procedió a sintetizar los resultados en la tabla 4.7 y de ese modo hallar los promedios de todas las propiedades extraídas de las curvas de figura 4.13.

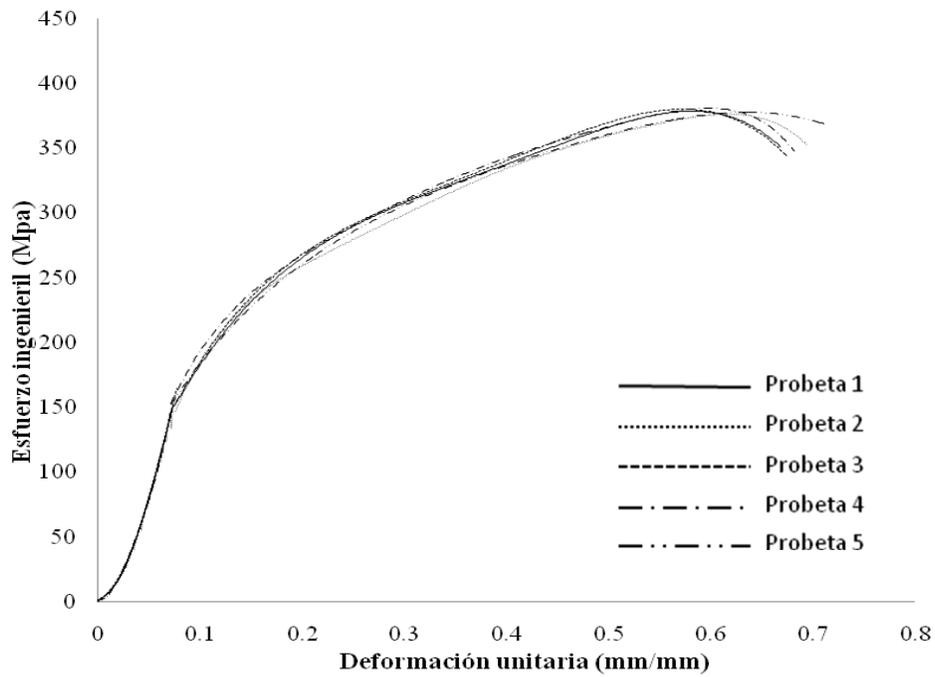


Figura 4.13 Curvas Esfuerzo ingenieril vs. Deformación unitaria de la aleación UNS C37700 (Normalizado)

Tabla 4.7 Propiedades obtenidas del ensayo de tracción en la aleación UNS C37700 (Normalizado)

Probeta	Módulo elástico (GPa)	Esfuerzo fluencia (Mpa)	Deformación elástica (mm/mm)	Esfuerzo máximo (Mpa)	Deformación máxima (mm/mm)	Alargamiento ruptura (%)
t1- N377	2,664	196,316	0,075687	379,647	0,6724	40,72
t2- N377	2,562	185,923	0,074552	376,299	0,6943	40,70
t3- N377	2,667	194,878	0,075062	380,053	0,6750	42,78
t4- N377	2,512	186,314	0,076164	382,436	0,6824	41,80
t5- N377	2,605	185,040	0,073022	379,536	0,7111	42,82
Promedio	2,60	189,69	0,07	379,59	0,69	41,76
Desviación estándar	0,07	5,43	0,001	2,19	0,02	1,05

4.2.4 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C37700 (Recocido)

En la figura 4.14 se puede visualizar el comportamiento de las cinco probetas de la aleación UNS C37700 en condición de recocido y sometidas a ensayos de tracción.

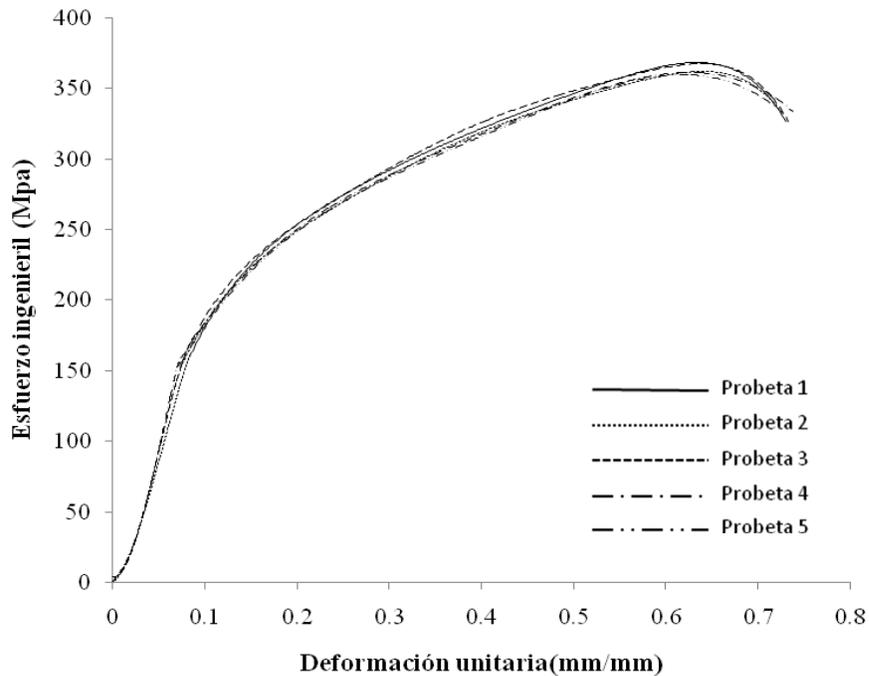


Figura 4.14 Curvas Esfuerzo ingenieril vs. Deformación unitaria de la aleación UNS C37700 (Recocido)

Con el fin de conseguir un valor representativo de cada propiedad de la aleación se procedió a sintetizar los resultados en la tabla 4.8 y de ese modo hallar los promedios de todas las propiedades extraídas de las curvas de figura 4.14.

Tabla 4.8 Propiedades obtenidas del ensayo de tracción en la aleación UNS C37700 (Recocido)

Probeta	Módulo elástico (GPa)	Esfuerzo fluencia (Mpa)	Deformación elástica (mm/mm)	Esfuerzo máximo (Mpa)	Deformación máxima (mm/mm)	Alargamiento ruptura (%)
t1- R377	2,579	198,054	0,078793	367,426	0,73014	42,64
t2- R377	2,584	172,485	0,071076	368,097	0,73282	46,36
t3- R377	2,878	161,159	0,057999	364,11	0,72658	43,86
t4- R377	2,723	181,175	0,068528	364,485	0,73706	45,44
t5- R377	2,707	185,388	0,070495	359,154	0,72338	47,80
Promedio	2,69	179,65	0,07	364,65	0,73	45,22
Desviación estándar	0,12	13,85	0,01	3,54	0,01	2,03

4.3 Resultados de ensayos de dureza

4.3.1 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C36000 (Normalizado)

A continuación en la tabla 4.9 se dan a conocer las mediciones de dureza en tres probetas de la aleación UNS C36000 en condición de normalizado, la cuarta columna de la tabla muestra el promedio de estos valores en escala Rockwell F. En la tabla 4.10 se observan los mismos resultados de dureza pero en escala Brinell.

Tabla 4.9 Resultados de dureza en escala Rockwell F de la aleación UNS C36000 (Normalizado)

Distancia (mm)	Dureza Rockwell F		
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
15	91,35	90,10	90,75
10	85,40	85,25	85,70
5	83,15	83,20	83,05
0	81,60	80,50	81,40
-5	83,30	82,65	83,20
-10	85,65	85,15	86,00
-15	91,10	90,70	90,85

En esta tabla 4.10 también se muestran los resultados del cálculo de un promedio de dureza en escala Brinell estándar, por cada probeta y otro promedio dependiendo de la posición donde se haya realizado la indentación.

Tabla 4.10 Resultados de dureza en escala Brinell estándar de la aleación UNS C36000 (Normalizado)

Distancia (mm)	Dureza Brinell			Dureza Brinell (HBS)
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	
15	94,18	90,85	92,71	92,65
10	82,00	81,70	82,00	82,05
5	78,41	78,50	78,25	78,38
0	76,36	74,83	76,18	75,95
-5	78,66	77,58	78,50	78,25
-10	82,27	81,50	82,66	82,22
-15	93,71	92,57	93,00	93,08
Promedio (HBS)	83,66	82,50	83,33	83,16
Desviación Estándar	7,328	6,730	6,879	

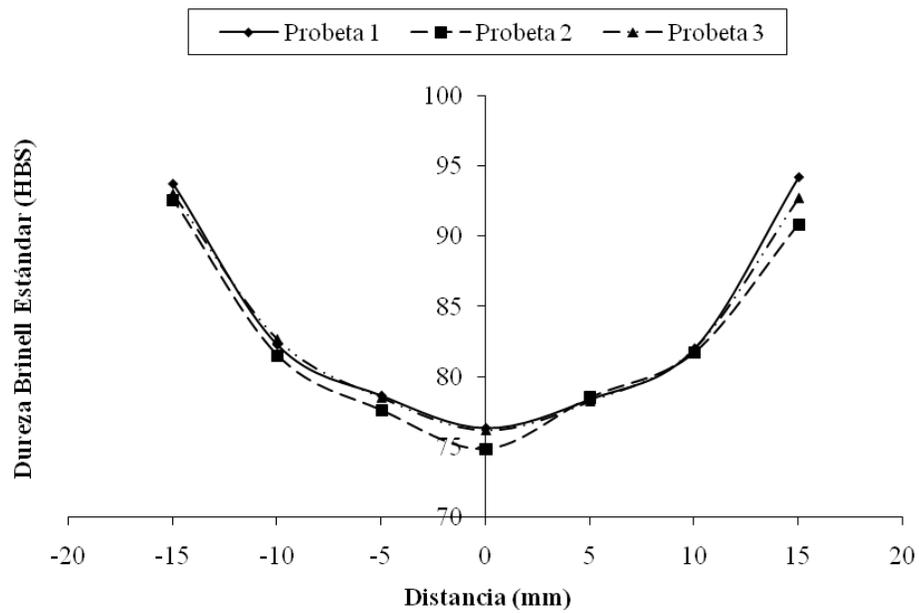


Figura 4.15 Comportamiento de dureza HBS vs. distancia de la aleación UNS C36000 (Normalizado)

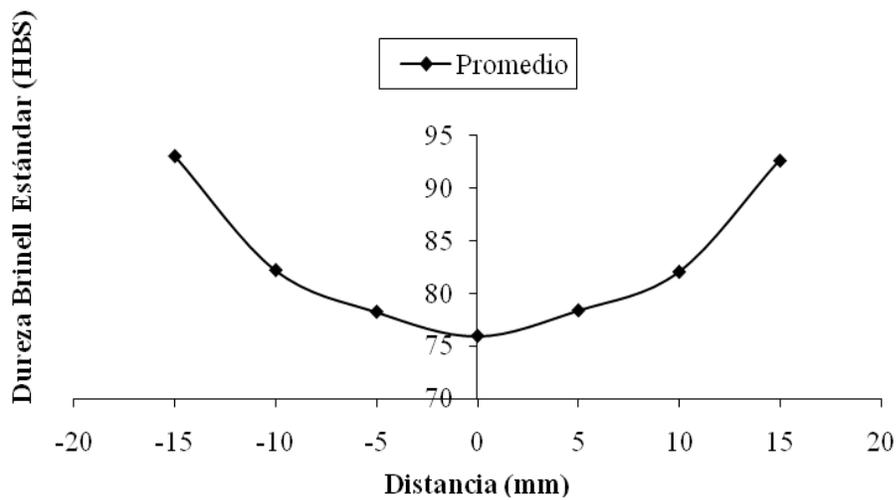


Figura 4.16 Promedio de dureza de la aleación UNS C36000 (Normalizado)

4.3.2 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C36000 (Recocido)

En la tabla 4.11 se exponen los valores de las mediciones de dureza en tres probetas de la aleación UNS C36000 en estado de recocido. Además, se realizó el

cálculo promedio de los resultados obtenidos en cada línea y se transformaron a dureza en escala Brinell estándar.

Tabla 4.11 Resultados de dureza en escala Rockwell F de la aleación UNS C36000 (Recocido)

Distancia (mm)	Dureza Rockwell F		Dureza Rockwell F
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
15	78,85	77,25	78,00
10	77,00	76,80	77,50
5	71,80	71,11	71,35
0	70,10	71,00	70,50
-5	72,20	71,55	71,30
-10	78,00	75,05	77,30
-15	78,25	77,40	77,95

Tabla 4.12 Resultados de dureza en escala Brinell estándar de la aleación UNS C36000 (Recocido)

Distancia (mm)	Dureza Brinell			Promedio Dureza
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Brinell (HBS)
15	72,35	69,78	71,00	71,05
10	69,42	69,14	70,16	69,57
5	62,00	61,61	61,75	62,78
0	61,05	61,55	61,27	62,29
-5	62,28	61,86	61,72	62,93
-10	71,14	66,41	69,85	69,11
-15	71,41	70,00	70,91	70,78
Promedio (HBS)	67,09	65,76	66,67	66,51
Desviación estándar	5,061	4,003	4,776	

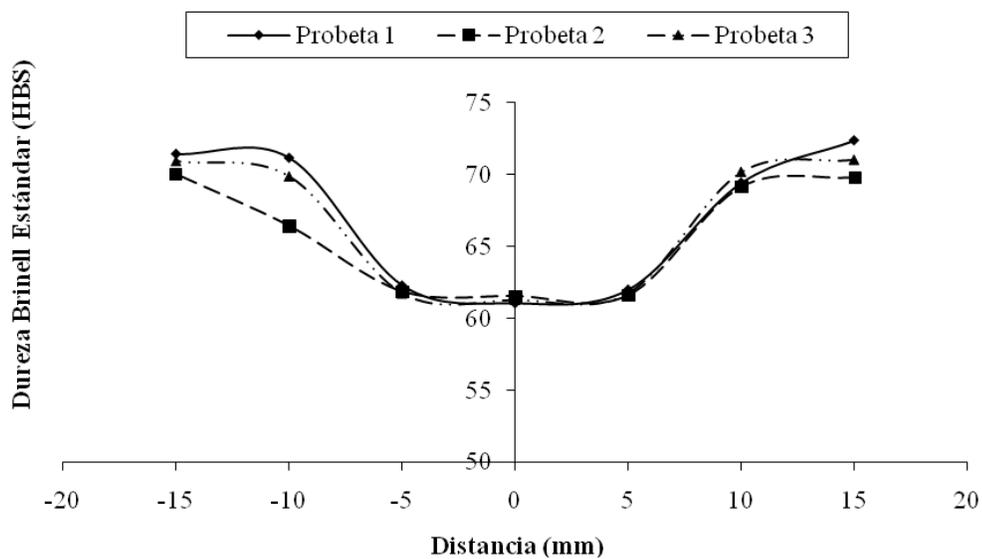


Figura 4.17 Comportamiento de dureza HBS vs. distancia en la aleación UNS C36000 (Recocido)

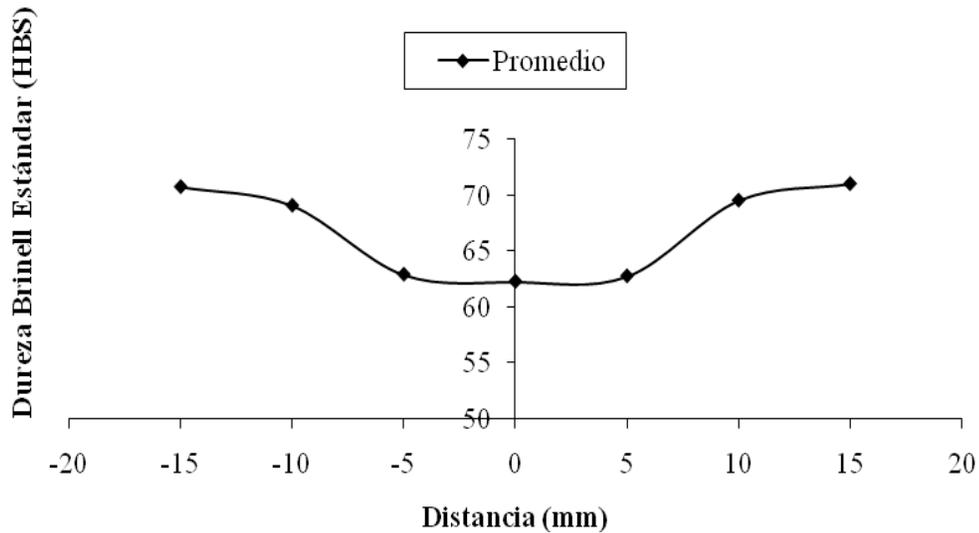


Figura 4.18 Promedio de dureza HBS de la aleación UNS C36000 (Recocido)

4.3.3 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C37700 (Normalizado)

Tabla 4.13 Resultados de dureza en escala Rockwell F de la aleación UNS C37700 (Normalizado)

Distancia (mm)	Dureza Rockwell F		
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
15	80,90	81,10	80,50
10	80,70	81,30	80,60
5	80,90	81,60	81,20
0	79,40	81,50	80,10
-5	81,00	81,60	80,90
-10	80,30	81,40	80,40
-15	80,70	81,20	80,40

Tabla 4.14 Resultados de dureza en escala Brinell estándar de la aleación UNS C37700 (Normalizado)

Distancia (mm)	Dureza Brinell			Promedio Dureza Brinell (HBS)
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	
15	75,50	75,83	74,83	75,39
10	75,16	76,09	75,00	75,42
5	75,50	76,36	76,00	75,95
0	73,14	76,27	74,16	74,52
-5	75,66	76,36	75,50	75,84
-10	74,50	76,18	74,66	75,11
-15	75,16	76,00	74,66	75,27
Promedio (HBS)	74,95	76,16	74,97	75,36
Desviación estándar	0,88	0,20	0,61	

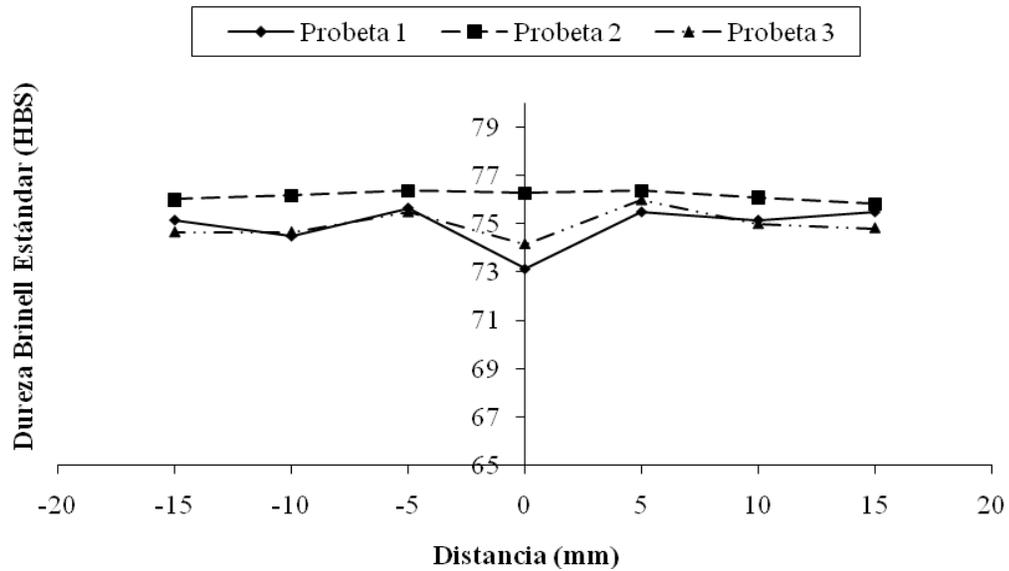


Figura 4.19 Comportamiento de dureza HBS vs. distancia de la aleación UNS C37700 (Normalizado)

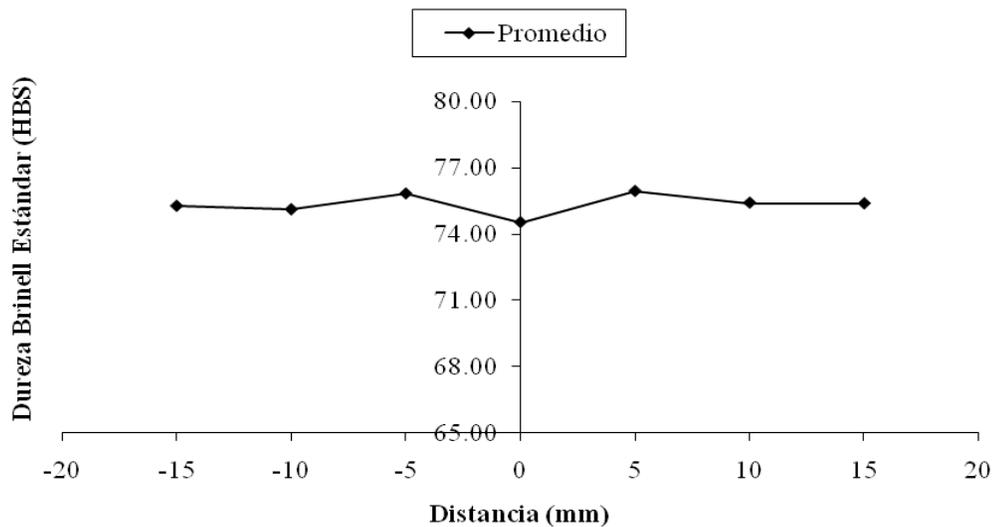


Figura 4.20 Promedio de dureza HBS de la aleación UNS C37700 (Normalizado)

4.3.4 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C37700 (Recocido)

En la tabla 4.15 se presentan los resultados de medir la dureza en tres probetas de la aleación UNS C37700 en condición de recocido. En la tabla se puede observar una columna con el cálculo promedio de los valores obtenidos del centro al extremo de la muestra, tanto en escala de dureza Rockwell como en escala Brinell estándar.

Tabla 4.15 Resultados de dureza en escala Rockwell F de la aleación UNS C37700 (Recocido)

Distancia (mm)	Dureza Rockwell F		Dureza Rockwell F
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
15	76,55	78,20	78,00
10	76,20	77,70	78,00
5	76,55	77,70	78,15
0	75,75	77,70	77,80
-5	76,20	77,30	77,30
-10	77,15	77,90	78,10
-15	76,90	78,45	78,10

Tabla 4.16 Resultados de dureza en escala Brinell estándar de la aleación UNS C37700 (Recocido)

Distancia (mm)	Dureza Brinell			Promedio Dureza
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Brinell (HBS)
15	68,78	71,33	71,00	70,30
10	68,28	70,50	71,00	68,00
5	68,78	70,50	71,25	70,11
0	67,64	70,50	70,66	69,54
-5	68,28	69,85	69,85	69,32
-10	69,64	70,83	71,16	70,53
-15	69,28	71,75	71,16	70,70
Promedio (HBS)	68,67	70,75	70,87	70,10
Desviación estándar	0,671	0,625	0,488	

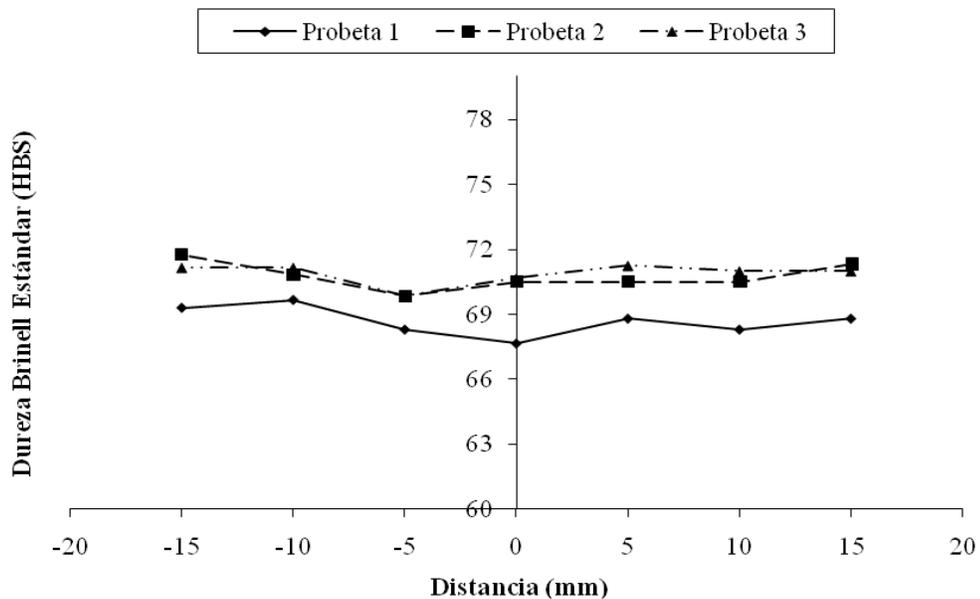


Figura 4.21 Comportamiento de dureza HBS vs. distancia de la aleación UNS C37700 (Recocido)

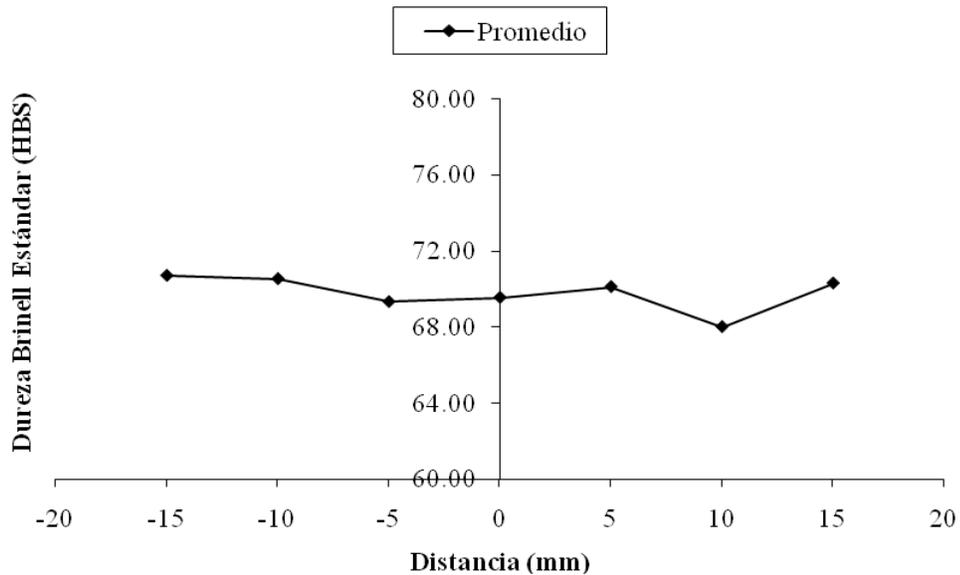


Figura 4.22 Promedio de dureza HBS de la aleación UNS C37700 (Recocido)

4.3.5 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C36000 (Condición original)

Tabla 4.17 Resultados de dureza en escala Rockwell F de la aleación UNS C36000 (Cond. original)

Distancia (mm)	Dureza Rockwell F Probeta 1	Dureza Rockwell F Probeta 2	Promedio Rockwell F
15	93,80	95,55	94,68
10	88,30	91,20	89,75
5	86,00	88,75	87,38
0	83,70	86,60	85,15
-5	86,65	88,80	87,73
-10	88,10	91,35	89,73
-15	93,30	95,20	94,25

En la tabla 4.18 se muestran los resultados de las indentaciones en escala Brinell estándar de la aleación UNS C36000 en estado de entrega.

La figura 4.23 muestra gráficamente el comportamiento de los valores de dureza medidos en dos probetas de la aleación UNS C36000 en condición original, observándose el gradiente de deformación desde el centro al extremo de la muestra.

Tabla 4.18 Resultados de dureza Brinell estándar de la aleación UNS C36000 (Cond. original)

Distancia (mm)	Dureza Brinell Probeta 1	Dureza Brinell Probeta 2	Dureza Brinell (HBS)
15	100,60	106,00	103,30
10	86,60	94,00	90,30
5	82,66	87,50	85,08
0	79,22	83,66	81,44
-5	83,77	87,60	8,568
-10	86,20	94,18	90,19
-15	99,60	105,40	102,50
Promedio por probeta (HBS)	88,38	94,05	91,21
Desviación	8,38	8,79	

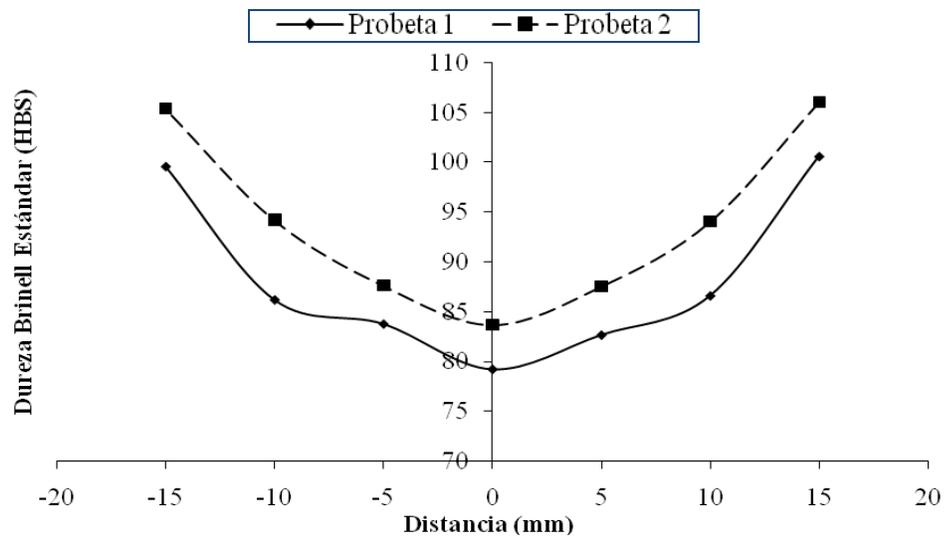


Figura 4.23 Comportamiento de dureza HBS vs. distancia de la aleación UNS C36000 (Cond. original)

4.4 Relaciones entre las propiedades a tracción y torsión

Luego de culminar todos los ensayos de tracción y torsión se compararán los valores característicos obtenidos en los mismos. En las tablas que siguen se pueden observar los valores de las propiedades obtenidas para las dos aleaciones bajo las dos condiciones de estudio.

Tabla 4.19 Resumen de valores obtenidos en ensayos de tracción y torsión de la aleación UNS C36000

Condición	Módulo de elasticidad al corte (GPa)	Módulo elástico (GPa)	Esfuerzo de fluencia al corte (MPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo máximo al corte (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)
	G	E	τ_y	S_y	τ_u	S_u
RECOCIDO	24,5061	2,2880	141,3633	166,4700	318,2825	334,1850
NORMALIZADO	24,8857	2,6880	167,8025	214,5500	317,0488	348,5020

Tabla 4.20 Resumen de valores obtenidos en ensayos de tracción y torsión de la aleación UNS C37700

Condición	Módulo de elasticidad al corte (GPa)	Módulo elástico (GPa)	Esfuerzo de fluencia al corte (MPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo máximo al corte (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)
	G	E	τ_y	S_y	τ_u	S_u
RECOCIDO	19,2903	2,6940	137,4756	179,652	323,7487	364,6540
NORMALIZADO	26,7378	2,6020	141,1062	189,694	283,7018	379,5940

Las propiedades a tracción y torsión de un material dúctil se pueden relacionar por medio de los criterios de fluencia, por esta razón se aplicaran los criterios expuestos en el capítulo II, como lo son el criterio de la tensión cortante máxima de Tresca y el criterio de energía máxima de deformación cortante de Von Mises.

Tabla 4.21 Relaciones entre el esfuerzo de fluencia en tracción y torsión de la aleación UNS C36000

Condición	Relación S_y/τ_y experimental	Criterio de Von Mises	Criterio de Tresca
RECOCIDO	1,18	1,73	2,00
NORMALIZADO	1,33		

Tabla 4.22 Relaciones entre el esfuerzo de fluencia en tracción y torsión de la aleación UNS C37700

Condición	Relación S_y/τ_y experimental	Criterio de Von Mises	Criterio de Tresca
RECOCIDO	1,31	1,73	2,00
NORMALIZADO	1,33		

4.5 Evaluación metalográfica de las probetas ensayadas a torsión

A continuación se presentan las imágenes obtenidas en cuanto a la evaluación metalográfica de las aleaciones estudiadas para cada condición de tratamiento térmico, luego de ser deformado el material por el ensayo de torsión.

4.5.1 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C36000 en condición de recocido



Figura 4.24 Imágenes macroscópicas y microscópicas de una probeta de la aleación UNS C36000 en condición de recocido luego de la torsión

4.5.2 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C36000 en condición de normalizado

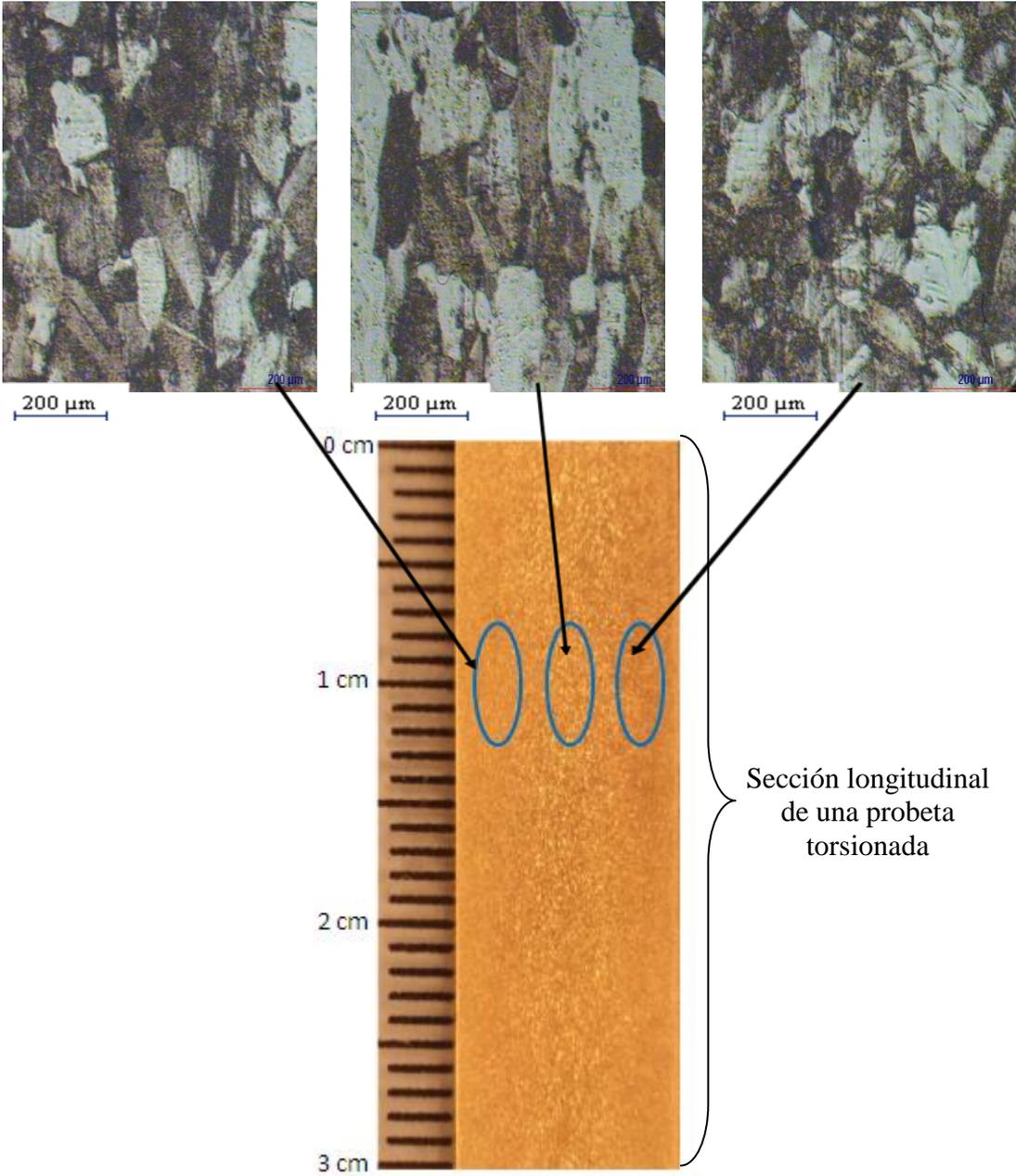


Figura 4.25 Imágenes macroscópicas y microscópicas de una probeta de la aleación UNS C36000 en condición de normalizado luego de la torsión

4.5.3 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C37700 en condición de recocido

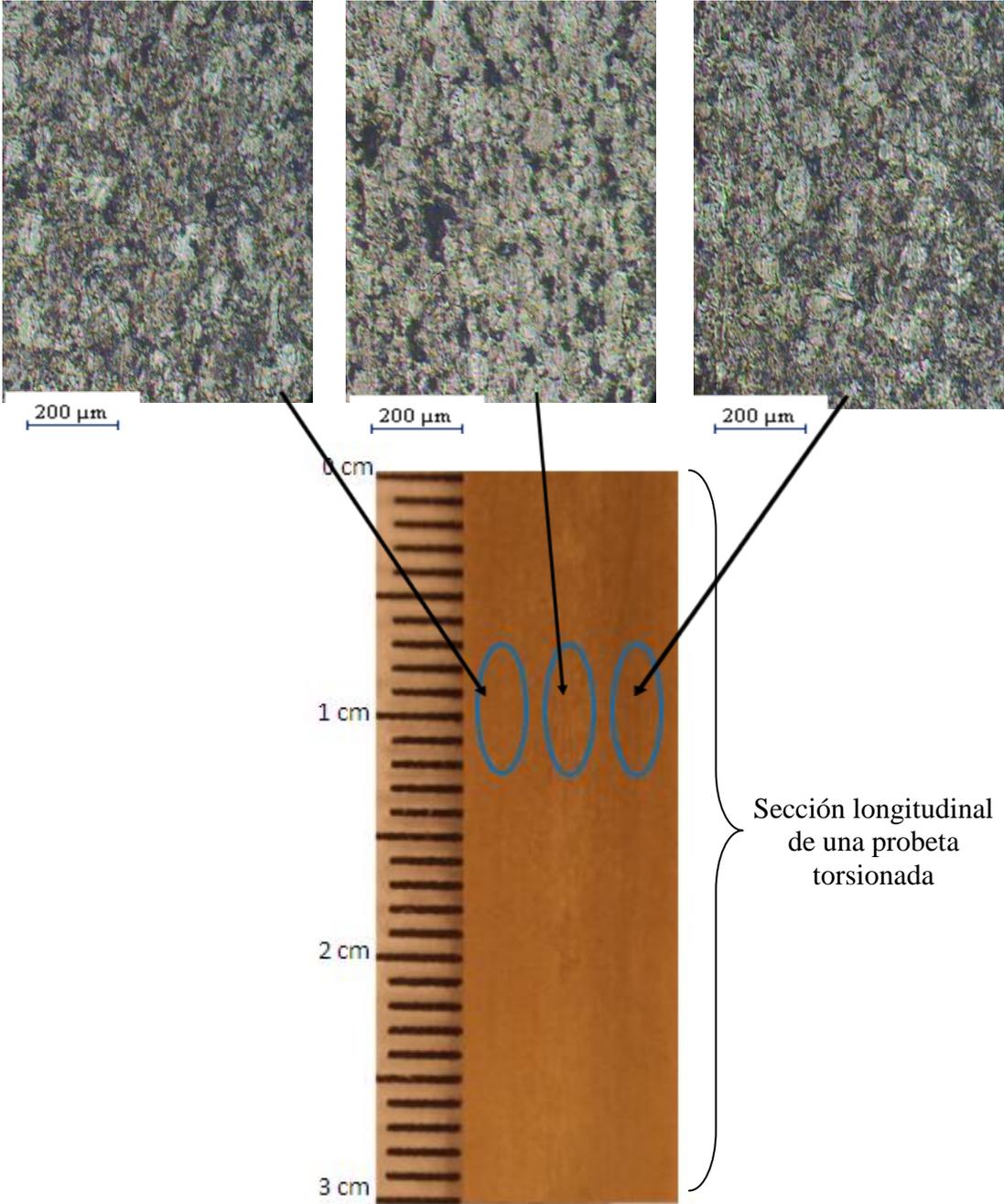


Figura 4.26 Imágenes macroscópicas y microscópicas de una probeta de la aleación UNS C37700 en condición de recocido luego de la torsión

4.5.4 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C37700 en condición de normalizado

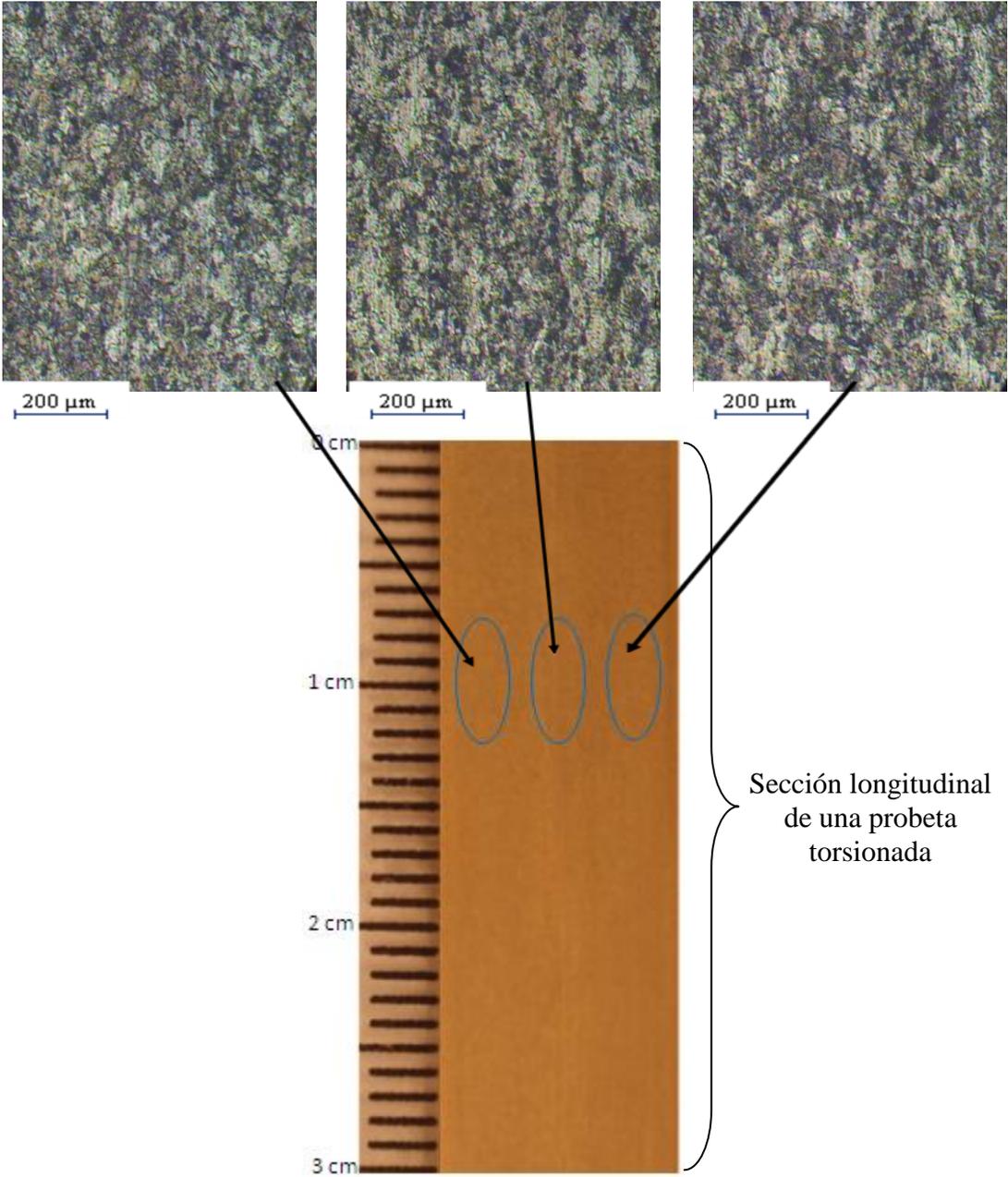


Figura 4.27 Imágenes macroscópicas y microscópicas de una probeta de la aleación UNS C37700 en condición de normalizado luego de la torsión

4.5.5 Evaluación metalográfica de una probeta sin torsión

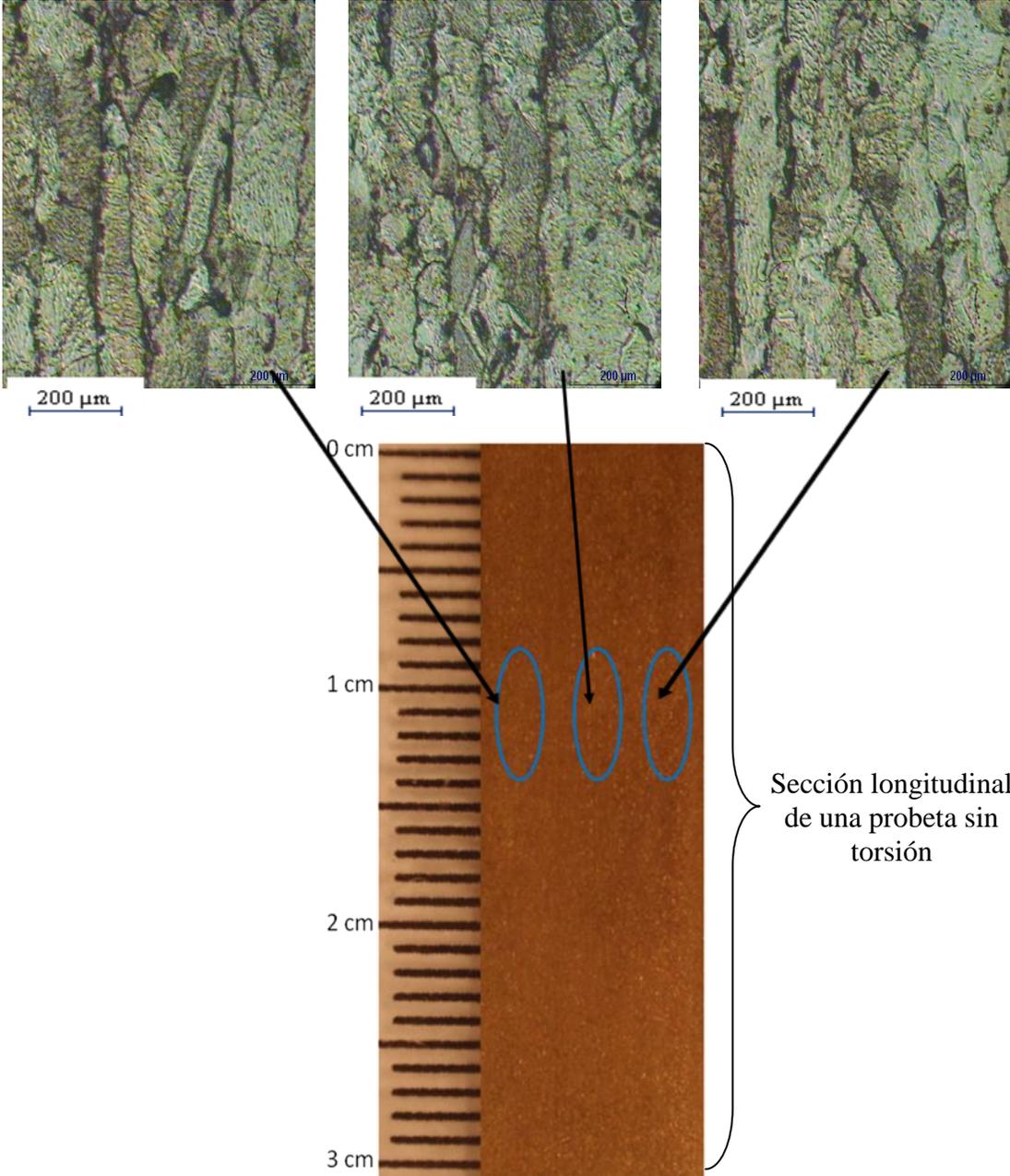


Figura 4.28 Imágenes macroscópicas y microscópicas de probeta de la aleación UNS C36000, sin torsión

CAPÍTULO V

Análisis de Resultados

5.1 Resultados de ensayos de tracción

Los ensayos de tracción permitieron conocer algunas propiedades mecánicas y valores particulares de las aleaciones UNS C36000 y UNS C37700.

5.1.1 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C36000 (Normalizado)

A continuación se muestran los resultados promedio de las propiedades obtenidas en los ensayos de tracción de la aleación UNS C36000 en condición de normalizado.

Tabla 5.1 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de tracción en la aleación UNS C36000 (Normalizado)

	Módulo elástico (GPa)	Esfuerzo fluencia (MPa)	Deformación elástica (mm/mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación máxima (mm/mm)	Alargamiento ruptura (%)
Promedio	2,69	214,55	0,08	348,50	0,67	40,92
Desviación	0,15	12,35	0,001	2,77	0,01	1,91

Para esta condición de tratamiento térmico los valores característicos de las 5 probetas se comportan de una manera muy similar, es por ello que las desviaciones resultantes son valores bastantes bajos, exceptuando la del esfuerzo de fluencia que arroja una desviación de 12,35. Esto se observa en las gráficas esfuerzo versus deformación unitaria de la figura 4.9.

La aleación UNS C36000 en esta condición arrojó un esfuerzo de fluencia promedio de 214,55 MPa, para una deformación unitaria de 0,08 mm/mm, siendo el módulo de elasticidad obtenido de 2,69 GPa. El esfuerzo máximo promedio fue 348,50 MPa y la deformación máxima correspondiente de 0,67 mm/mm. Además la probeta sufrió un alargamiento del 40,92%.

En lo sucesivo se muestra una tabla comparativa entre los valores obtenidos durante los ensayos de tracción de la aleación de latón UNS C36000 en estado de

normalizado y los límites teóricos para la misma condición.

Tabla 5.2 Resumen de los valores promedio obtenidos en los ensayos de tracción de la aleación UNS C36000 (Normalizado)

	Esfuerzo fluencia (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	Alargamiento ruptura (%)
Valor obtenido	214,55	348,50	40,92
Valor teórico^A	310,00	400,00	Mínimo 25,00

A: Valores reportados para la aleación UNS C36000 en el ASM Metals Handbook [22].

El valor promedio del esfuerzo de fluencia obtenido es 214,55 MPa, dicho resultado es inferior al tabulado por el ASM Metals Handbook de 310,00 MPa, lo que representa una diferencia del 30,79 %. El valor del esfuerzo último según esta bibliografía es 400,00 MPa y el obtenido experimentalmente es de 348,50 MPa, entre ambos valores existe una diferencia del 12,87 %. Otro valor característico a obtener de este ensayo, es la ductilidad del material, dicho valor está representado por el porcentaje de alargamiento a la rotura, el cual se calculó en 40,92 % y el porcentaje mínimo de alargamiento estipulado en el ASM Metals Handbook es de 25%, así que el resultado aceptado teóricamente.

5.1.2 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C36000 (Recocido)

En la tabla siguiente se puede observar el promedio de los valores característicos en tracción de la aleación UNS C36000 para la condición de recocido, especificando también la desviación de los resultados obtenidos.

Tabla 5.3 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C36000 (Recocido)

	Módulo elástico (GPa)	Esfuerzo fluencia (MPa)	Deformación elástica (mm/mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación máxima (mm/mm)	Alargamiento ruptura (%)
Promedio	2,29	166,47	0,08	334,19	0,82	47,53
Desviación	0,34	19,59	0,01	2,03	0,08	4,84

Como se observa en la gráfica esfuerzo ingenieril versus deformación unitaria de la figura 4.11, las curvas para las 5 probetas ensayadas bajo esta condición presentan un comportamiento bastante parecido, los parámetros obtenidos son muy cercanos resultando desviaciones pequeñas que se dan a conocer en la tabla anterior. Esta tendencia cambia un poco para el esfuerzo de fluencia que resulta 19,59 de desviación entre los valores de su muestra.

En promedio se tiene un esfuerzo de fluencia igual a 166,47 MPa con una deformación unitaria de 0,08 mm/mm. Se obtuvo en promedio un esfuerzo máximo de 334,19 MPa para una deformación última de 0,82 mm/mm. El porcentaje de alargamiento a la ruptura fue 47,53.

A continuación se dan a conocer los valores obtenidos durante los ensayos de tracción para la aleación UNS C36000 en estado de recocido y los valores referenciales de esta aleación en la misma condición.

Tabla 5.4 Resumen de los valores promedio obtenidos en los ensayos de tracción de la aleación UNS C36000 (Recocido)

	Esfuerzo fluencia	Esfuerzo máximo	Alargamiento ruptura
	(MPa)	(MPa)	(%)
Valor obtenido	166,47	334,19	47,53
Valor referencial^B	135,00	340,00	34,00

B: Valores obtenidos por J.D. Bressan y R.Kirchhof U. [1]

Se obtuvo 166,47 MPa como valor promedio del esfuerzo de fluencia el cual supera al dato de referencia publicado en 18,9%, ya que es 135 MPa. Experimentalmente se llegó a un resultado de esfuerzo último 334,19 MPa, y comparándose con el valor que arroja la tabla 5.4 de 340 MPa se puede calcular una diferencia del 1,7%. Para finalizar se halló una discrepancia de 28,46% entre el alargamiento teórico y el referencial.

5.1.3 Relación entre las propiedades a tracción para la aleación UNS C36000 sometida a tratamientos de recocido y normalizado

Con el propósito de comprender de una mejor manera la influencia de los tratamientos térmicos recocido y normalizado en la aleación UNS C36000, a continuación se muestra una gráfica del comportamiento mecánico a tracción de las probetas de dicha aleación pero con la aplicación de tratamientos distintos, allí se observa específicamente las curvas de esfuerzo contra deformación unitaria que sufre la muestra t5-N360 y la muestra t1-R360, pero este mismo comportamiento se cumple en todo el material ensayado para cada condición.

A pesar que ambas curvas de la figura 5.1 se comportan de modo semejante y con deformaciones muy similares en la zona elástica, se nota claramente que la probeta en condición de normalizado presenta valores de esfuerzos superiores a la probeta en condición de recocido. A la vez se observa como la curva de la probeta sometida al tratamiento de normalizado alcanza menor deformación que la de recocido. Esto se debe a que con la aplicación de recocido se consigue una estructura de granos recristalizados que incrementan la ductilidad del material, sacrificando un poco la resistencia mecánica del mismo, por lo que estos esfuerzos son menores a la condición de comparación mostrada.

En la tabla 5.5 se comparan los valores promedios de las propiedades extraídas de los ensayos de tracción para las probetas de la aleación UNS C36000. Como se mencionó en párrafos anteriores, se puede observar que la tendencia de los valores de esfuerzos estudiadas bajo normalizado son superiores a los de recocido.

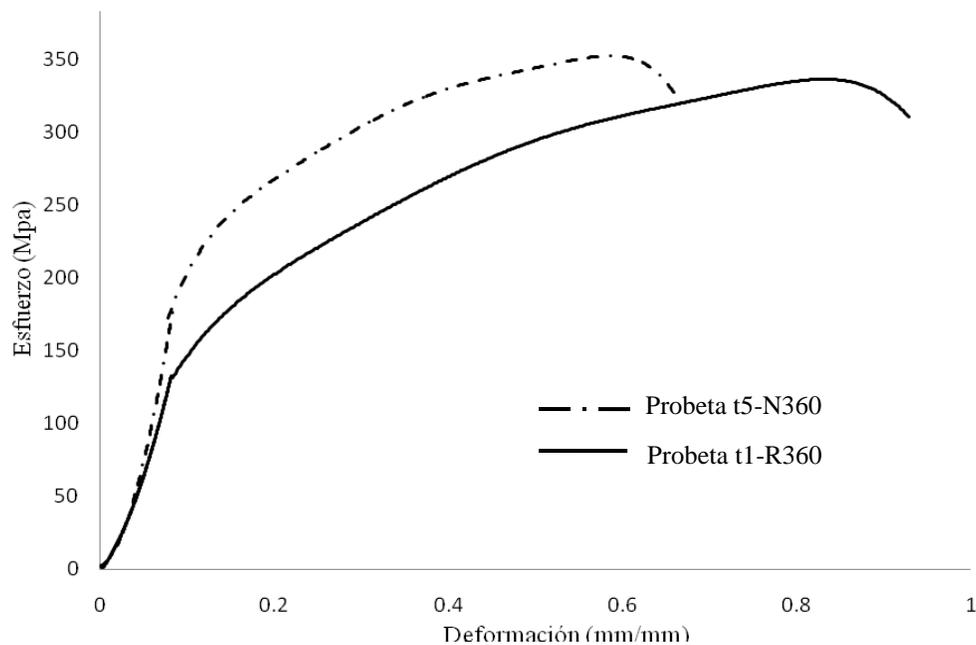


Figura 5.1 Gráfica esfuerzo ingenieril vs deformación unitaria de las probetas t5-N360 y t1-R360

Tabla 5.5 Comparación entre valores obtenidos en ensayos de tracción para la aleación UNS C36000

Condición	Esfuerzo fluencia (MPa)	Deformación elástica (mm/mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación máxima (mm/mm)	Alargamiento ruptura (%)
Recocido	166,47	0,08	334,19	0,82	47,53
Normalizado	214,55	0,08	348,50	0,67	40,92

5.1.4 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C37700 (Normalizado)

En la tabla 5.6 se puede ver el promedio de los valores característicos del comportamiento a tracción de la aleación UNS C37700 en condición de normalizado, así como el valor de la desviación de los resultados para las 5 probetas de estudio.

Tabla 5.6 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C37700 (Normalizado)

	Módulo elástico (GPa)	Esfuerzo fluencia (MPa)	Deformación elástica (mm/mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación máxima (mm/mm)	Alargamiento ruptura (%)
Promedio	2,60	189,69	0,07	379,59	0,69	41,76
Desviación	0,07	5,43	0,001	2,19	0,02	1,05

El estudio de la aleación UNS C37700 en cinco probetas sometidas a esta condición de tratamiento térmico, arrojó resultados bastante análogos. Las desviaciones que se calcularon entre los cinco datos de cada parámetro fueron despreciables en comparación a las obtenidas anteriormente; el valor más elevado fue de 5,43, que corresponde específicamente al esfuerzo de fluencia, punto en el cual ocurre el cambio a la zona plástica de cada curva esfuerzo ingenieril vs deformación unitaria de la figura 4.13.

En la tabla 5.6 se observan los promedios del módulo elástico, el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo máximo, sus deformaciones correspondientes. Estos son 2,6 GPa, 189,69 MPa, 379,59 MPa con 0,07 mm/mm y 0,69 mm/mm respectivamente. La ductilidad del material viene dada por el 41,76% del alargamiento a la ruptura promedio obtenido.

Es importante establecer cuan cercanos de la realidad se encuentran los valores obtenidos de los ensayos de esta aleación de latón en condición de normalizado, para ello se recopiló la información teórica necesaria en la tabla 5.7.

Tabla 5.7 Resumen de los valores promedio obtenidos en los ensayos de tracción de la aleación UNS C37700 (Normalizado)

	Esfuerzo fluencia (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	Alargamiento ruptura (%)
Valor obtenido	189,69	379,59	41,76
Valor teórico^A	190,00	370,00	45,00

A: Valores reportados para la aleación UNS C37700 en el ASM Metals Handbook [22].

Con la tabla 5.7 se puede analizar sí los resultados obtenidos llevan un comportamiento aceptable según lo establecido por la ASM. En este caso el esfuerzo de fluencia es 189,69 MPa y la teoría especifica un esfuerzo de fluencia de 190,00 MPa, por lo cual la pequeña diferencia calculada es de 0,16 %. Para el esfuerzo máximo experimental corresponde un 379,59 MPa, siendo el teórico

370,00 MPa, entre ellos existe una discrepancia del 2,52 % y se observa que el porcentaje de alargamiento obtenido es menor que el teórico por 7,20%.

5.1.5 Resultados de ensayos de tracción en aleación UNS C37700 (Recocido)

Se muestra a continuación una tabla resumen con los promedios de los parámetros característicos en los ensayos de tracción de la aleación UNS C37700 en estado recocido.

Se muestra en la tabla 5.8 que la fluencia del material en promedio ocurre a 179,65 MPa a una deformación elástica de 0,07 mm/mm. La desviación para estos parámetros es de 13,85 y 0,01 respectivamente. Ahora bien, el esfuerzo máximo y la deformación máxima son 364,65 MPa y 0,73 mm/mm, y los valores de las cinco probetas presentan una desviación de 3,54 para el esfuerzo máximo y 0,01 para la deformación máxima.

Tabla 5.8 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C37700 (Recocido)

	Módulo elástico (GPa)	Esfuerzo fluencia (MPa)	Deformación elástica (mm/mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación máxima (mm/mm)	Alargamiento ruptura (%)
Promedio	2,69	179,65	0,07	364,65	0,73	45,22
Desviación	0,12	13,85	0,01	3,54	0,01	2,03

Finalmente el resultado en promedio del módulo de fluencia es 2,69 GPa y el alargamiento a la ruptura que sufrió la probeta fue 45,22 %; de igual manera se obtuvieron valores de desviaciones bajos por la pequeña variación entre los resultados de cada muestra.

Con el propósito de realizar la analogía entre los resultados obtenidos de los ensayos de tracción en las probetas de la aleación UNS C37700 bajo la condición de

recocido y los datos de referencia se muestra la tabla 5.9.

Tabla 5.9 Resumen de los valores promedio obtenidos en los ensayos de tracción de la aleación UNS C37700 (Recocido)

	Esfuerzo fluencia (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	Alargamiento ruptura (%)
Valor obtenido	179,65	364,65	45,22
Valor referencial^B	135,00	340,00	34,00

B: Valores obtenidos por J.D. Bressan y R.Kirchhof U. [1]

Según los valores referenciales tomados de la publicación de Bressan y Kirchhof, y los resultados arrojados por los ensayos experimentales para esta aleación, se calcularon diferencias del 24,85% para el esfuerzo de fluencia promedio, 6,76% para el esfuerzo máximo promedio y un 24,81% correspondiente al alargamiento que se vio presente en las probetas.

5.1.6 Relación entre las propiedades a tracción para la aleación UNS C37700 sometida a tratamientos de recocido y normalizado

Para analizar de una mejor forma la relación que se obtuvo entre las probetas UNS C37700 bajo condición de recocido y de normalizado, se muestra la figura 5.2 con una gráfica de esfuerzo ingenieril versus deformación unitaria de las probetas t4-N377 y t4-R377, es decir, para esta aleación se ejemplifica con una muestra por cada tratamiento térmico el comportamiento mecánico a tracción.

Se observa que en ambas condiciones las curvas se comportan de manera muy similar en la zona elástica. Seguidamente en la zona plástica se presentan variaciones entre las probetas, ya que la estudiada bajo condición de normalizado admite valores de esfuerzos mayores pero deformaciones menores a la probeta en condición de recocido. Este comportamiento se origina debido a que el tratamiento de normalizado a baja temperatura solo garantiza una pequeña recuperación del material, lo cual

minimiza el alargamiento que pueda sufrir esta probeta en comparación a la sometida a recocido.

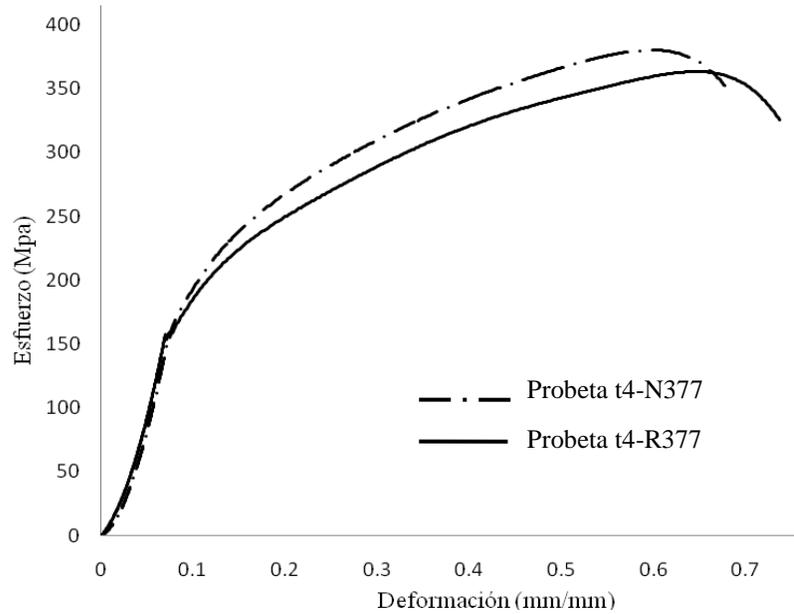


Figura 5.2 Gráfica esfuerzo ingenieril vs deformación unitaria de las probetas t4-N377 y t4-R377

En la tabla 5.10 se comparan los valores promedios de las propiedades arrojadas por todos los ensayos de tracción aplicados en la aleación UNS C37700. Los resultados de los esfuerzos de las probetas estudiadas bajo normalizado son superiores a los de recocido, mientras que la tendencia de la deformación en la zona plástica es superior en recocido.

Tabla 5.10 Comparación de los valores obtenidos en ensayos de tracción en la aleación UNS C37700

Condición	Esfuerzo fluencia (MPa)	Deformación elástica (mm/mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación máxima (mm/mm)	Alargamiento ruptura (%)
RECOCIDO	179,65	0,07	364,65	0,73	45,22
NORMALIZADO	189,69	0,07	379,59	0,69	41,76

5.2 Resultados de ensayos de dureza

Una vez obtenidos los resultados de las mediciones de dureza desde el centro al extremo de tres muestras de las aleaciones de latón en ambas condiciones de estudio, se procede a analizar los diferentes comportamientos del material realizando las indentaciones en una disposición lineal, con el propósito de conocer la influencia de la aplicación del tratamiento térmico.

Los resultados obtenidos que se dieron a conocer en el capítulo anterior se encuentran en escala Rockwell F, ya que es el valor que arroja directamente el equipo de medición. Seguidamente se realiza la conversión a escala Brinell estándar debido a que facilita la comparación y el análisis con respecto a los datos teóricos o referenciales.

5.2.1 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C36000 (Normalizado)

Observando la figura 4.15, la cual representa gráficamente los datos registrados durante el ensayo de dureza de tres probetas de la aleación UNS C36000 en condición de normalizado, se nota un incremento desde 74 HBS en el centro hasta 94 HBS en el extremo. Este comportamiento reafirma la existencia de un gradiente de deformación entre el extremo y el centro del material, lo cual está relacionado con la condición previa que se muestra en la figura 4.23.

Los resultados de dureza obtenidos de las probetas de esta aleación con la aplicación del tratamiento térmico de normalizado presentan bastante discrepancia entre ellos, debido a que este tratamiento de alivio de tensiones se realizó a baja temperatura en comparación a la de recocido, factor que influye para alcanzar la temperatura de recristalización, y aunque los granos presentaban una energía previa

no se logró conseguir el equilibrio entre los valores resultantes de la dureza del material.

La figura 4.16 muestra una curva del comportamiento promedio de las probetas en esta condición de estudio, dicha gráfica está en función de la distancia al centro y de igual manera se nota el crecimiento hacia el extremo de los valores de dureza.

A continuación se muestra un resumen de la tabla 4.10, con el promedio de los resultados de las mediciones de dureza en tres probetas de la aleación UNS C36000 en condición de normalizado. Además, se muestra el valor de desviación estándar resultante entre las siete mediciones de cada probeta.

Tabla 5.11 Resumen de resultados de dureza Brinell estándar aleación UNS C36000 (normalizado)

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio (HBS)
Promedio (HBS)	83,66	82,50	83,33	83,16
Desviación Estándar	7,33	6,73	6,88	

En la tabla 5.11 se observa el valor experimental 83,16 de dureza Brinell estándar obtenido de las tres probetas de la aleación UNS C36000 bajo condición de normalizado. Para la condición mencionada el valor teórico mínimo es 74 HBS, establecido en la norma ASTM B16[13] . Por lo tanto, el valor obtenido empíricamente es aceptado bajo el requerimiento de la norma que rige este tipo de aleaciones.

Finalmente, se observa en la tabla 5.11 el valor de la desviación estándar para las tres probetas de UNS C36000 tratadas térmicamente con normalizado. Estos datos de desviación dependen directamente de los valores de la muestra, para este caso van cambiando en función de la distancia al centro debido al gradiente de deformación

asociado a la condición de entrega de esta aleación, por lo tanto, existe una variación en las mediciones dando origen a la desviación tabulada.

5.2.2 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C36000 (Recocido)

De la figura 4.17, se observa la representación gráfica de los datos registrados durante el ensayo de dureza de tres probetas de la aleación UNS C36000 en estado de recocido. La curva presenta un aumento proporcional en los valores de dureza desde el centro hacia el extremo, iniciando en 61 HBS y culminando en 72,3 HBS.

Como ya se explicó en párrafos anteriores, este comportamiento se debe al estado de entrega del material en trefilado en frío; donde los granos del borde se encuentran endurecidos por deformación. Además, para estas probetas de la aleación UNS C36000 sometidas a recocido, puede suponerse que se alcanzó una recristalización parcial de los granos, debido a que el tratamiento se llevo a cabo a una temperatura superior a su temperatura de recristalización, pero existen diferentes factores como la condición previa del material, el tiempo de permanencia en el horno, la composición química de la aleación, entre otros, que inciden directamente en la obtención de una microestructura parcial o totalmente recristalizada.

La figura 4.18 muestra la curva promedio de los valores de dureza de las probetas en esta condición de estudio, como es de esperar, es una gráfica creciente del centro al borde.

A continuación se muestra un resumen de la tabla 4.12, con el promedio de los resultados de las mediciones de dureza en tres probetas de la aleación UNS C36000 en condición de recocido. Además, se muestra el valor de desviación estándar resultante entre las siete mediciones de cada probeta.

Tabla 5.12 Resumen de resultados de dureza Brinell estándar aleación UNS C36000 (recocido)

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio (HBS)
Promedio (HBS)	67,09	65,76	66,67	66,51
Desviación estándar	5,06	4,00	4,77	

El valor empírico resultante entre el promedio de las tres probetas ensayadas en condición de recocido de la aleación UNS C36000 fue 66,51 de dureza Brinell estándar. El valor reportado para aleaciones de latón en estado de recocido según Bressan y Kirchof [1], es 66 HBS. Tomando éste como un valor referencial para el resultado experimental, existe una diferencia despreciable de 0,75%.

En la misma tabla 5.12 se presenta el resultado de la desviación estándar entre las mediciones de dureza en las tres probetas recocidas de la aleación UNS C36000. Para esta aleación de latón los valores de la muestra van incrementándose desde el centro al borde de la sección transversal, lo cual justifica el resultado de la desviación estándar registrado.

Estudiando el comportamiento de la aleación UNS C36000 bajo ambos tratamientos térmicos, se puede decir que los resultados de dureza en todas las probetas sometidas a recocido están por debajo de los obtenidos en normalizado, independientemente que la tendencia de la curva sea de manera ascendente desde un radio igual a 0 hasta el radio igual a 15 mm. Esta diferencia entre los tratamientos aplicados sobre la aleación UNS C36000 se debe a que el normalizado es un alivio de tensiones que se lleva a cabo a bajas temperaturas, donde simplemente se alcanza la recuperación del material eliminando las tensiones internas que tuvieron origen durante la deformación elástica [10]. En cambio, al aplicar recocido en las probetas de la misma aleación no sólo se logran eliminar dichas tensiones, sino también se alcanza la recristalización parcial de los granos. Adicionalmente el medio de enfriamiento que caracteriza al tratamiento de recocido influye en la dureza obtenida,

ya que el material alcanza la temperatura ambiente dentro del horno de un modo uniforme, consiguiendo valores de dureza menores que en el tratamiento de normalizado.

5.2.3 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C37700 (Normalizado)

La figura 4.19 muestra el comportamiento de tres probetas de aleación UNS C37700 en condición de normalizado, que fueron sometidas a ensayo de dureza.

Se puede observar que los valores graficados se mantienen en un rango de dureza Brinell estándar entre 73 y 77, por lo cual la curva presenta una tendencia lineal sin mayores cambios desde el núcleo al extremo, es decir, mientras el radio es mayor la dureza del material se mantiene relativamente constante.

La causa de este comportamiento se basa en que el estado original del material es extruido en caliente, por lo tanto, no presenta ninguna deformación plástica acumulada y al ser sometido a normalizado, muy pocas variaciones pueden ocurrir en la dureza a lo largo de su sección transversal, ya que la estructura es homogénea.

En la figura 4.20 se da a conocer la curva gráfica promedio de las mediciones de dureza en probetas de esta condición de estudio, dicha gráfica muestra un comportamiento estable de los resultados.

A continuación se muestra un resumen de la tabla 4.14, con el promedio de los resultados de las mediciones de dureza en tres probetas de la aleación UNS C37700 en condición de normalizado.

Según los valores típicos del ASM Metals Handbook [20] para la condición de normalizado, la aleación UNS C36000 presenta un valor mínimo de 71 HBS. Los

resultados experimentales arrojaron un valor promedio de 75,36 HBS para las tres muestras, ésta última la se correlaciona de manera satisfactoria con el dato teórico.

Tabla 5.13 Resumen de resultados de dureza Brinell estándar aleación UNS C37700 (normalizado)

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio (HBS)
Promedio (HBS)	74,95	76,16	74,97	75,36
Desviación estándar	0,88	0,19	0,61	

En la tabla 5.13 se especifica la desviación estándar entre las cifras de dureza obtenidas de las tres probetas de la aleación UNS C37700 sometidas a normalizado. En este caso se obtuvieron valores por debajo de la unidad debido a la pequeña variación en los valores medidos.

5.2.4 Resultados del ensayo de dureza en la aleación UNS C37700 (Recocido)

En el capítulo anterior se observa la figura 4.21, donde se dan a conocer tres curvas del comportamiento de las probetas de aleación UNS C37700 en condición de normalizado sometidas a ensayo de dureza.

En esta condición de estudio la curva está limitada entre 67 HBS y 71 HBS, la máxima variación es de 4 unidades; por ello la gráfica de dureza se mantiene prácticamente lineal en el recorrido de toda la sección transversal de la probeta.

La aleación UNS C37700 en su estado original no presentó trabajo en frío previo, lo que se traduce en ausencia de deformación en los granos de la superficie; por lo tanto al ser sometida a tratamiento de recocido los resultados experimentales representan muy poca variación a lo largo de su sección transversal. Tal como se

observa en la figura 4.22, donde se muestra una curva del comportamiento promedio de las probetas de ésta aleación tratada térmicamente con recocido.

A continuación se muestra un resumen de la tabla 4.16, con el promedio de los resultados de las mediciones de dureza en tres probetas de la aleación UNS C37700 en condición de recocido. Además, se muestra el valor de desviación estándar resultante entre las siete mediciones de cada probeta.

Tabla 5.14 Resumen de resultados de dureza Brinell estándar aleación UNS C37700 (recocido)

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio (HBS)
Promedio (HBS)	68,67	70,75	70,87	70,10
Desviación estándar	0,67	0,63	0,49	

Tomando como referencia el 66 HBS, valor publicado en el trabajo de investigación realizado por Bressan y Kirchhof para este tipo de aleación en estado de recocido, se puede analizar el resultado obtenido empíricamente. En la tabla 5.14 se observa un 70,10 HBS, que representa el valor experimental promedio de tres probetas estudiadas bajo la misma condición. Este caso se determina una diferencia de 6,2% entre el valor expresado por los autores y el resultado experimental.

En la tabla 5.14 también se observan las desviaciones estándar para las tres probetas de la aleación UNS C37700 con recocido, y como es de esperar se obtuvieron valores bastante bajos, ya que las mediciones realizadas fueron bastante cercanas entre sí.

El normalizado y el recocido aplicados sobre la aleación UNS C37700 no tuvieron gran influencia en los resultados, debido a que la condición original de esta aleación no presentaba deformaciones previas que pudieran eliminarse. Sin embargo,

realizando el análisis del comportamiento de la aleación UNS C37700 sometida a los tratamientos térmicos de recocido y normalizado, se puede decir que los resultados de dureza en todas las probetas estudiadas bajo la condición de recocido son menores a las mediciones de dureza de las probetas en estado de normalizado, en este caso la tendencia de la curva para ambos tratamientos es prácticamente constante con respecto a la distancia del centro desde donde se midió la dureza.

5.3 Ensayos de torsión

Por medio de los resultados obtenidos en los ensayos de torsión se conocieron los valores que describen el comportamiento mecánico a torsión de las aleaciones de latón estudiadas, como lo son la aleación UNS C36000 y UNS C37700, tanto en estado de recocido como de normalizado para cada aleación.

5.3.1 Ensayos de torsión en la aleación UNS C36000 (Recocido)

En la tabla 5.15 se puede observar el promedio de los valores característicos en torsión de la aleación UNS C36000 para esta condición de recocido, especificando también la desviación de los resultados obtenidos.

Tabla 5.15 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C36000 (Recocido)

	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Deformación de fluencia (rad/rad)	Módulo de Elasticidad al corte (GPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación última (rad/rad)
Promedio	141,36	$0,69 \times 10^{-2}$	24,51	318,28	1,48
Desviación	7,66	$0,05 \times 10^{-2}$	3,95	3,54	0,12

Como se observa en la gráfica esfuerzo al corte versus deformación angular de la figura 4.2 las curvas para las 7 probetas ensayadas bajo esta condición presentan el

mismo comportamiento, los parámetros obtenidos son muy cercanos, lo que arroja desviaciones entre ellos relativamente bajas.

En promedio se tiene un esfuerzo de fluencia al corte igual a 141,36 MPa con una deformación angular de 0,0069 rad/rad, lo que equivale a 7,9 grados de giro, se obtuvo en promedio un esfuerzo máximo al corte de 318,28 MPa para una deformación última de 1,48 rad/rad, lo que equivale aproximadamente 1690 grados de giro, es decir ocurrió la rotura del material aproximadamente a las 4 ½ vueltas. La diferencia entre la deformación elástica y la deformación última indica la cantidad de deformación que admite el material bajo la condición de recocido, y en cuanto al incremento que ocurre desde el esfuerzo de fluencia hasta el esfuerzo último se debe al endurecimiento por deformación que resulta en el material luego que pasa la zona elástica.

Se muestra en la tabla 5.16 la comparación entre los valores obtenidos en los ensayos de torsión y los valores referenciales.

Tabla 5.16 Comparación de los valores obtenidos experimentalmente de la aleación UNS C36000 (Recocido)

	Módulo elástico a corte (GPa)	Esfuerzo fluencia a corte (MPa)	Esfuerzo máximo a corte (MPa)
Valor obtenido	24,51	141,36	318,28
Valor referencial ^A	37,00	149,00	283,00

A: Valores obtenidos por J.D. Bressan y R.Kirchhof U. [1]

Se observa que el modulo elástico obtenido resulto ser de 24,51 GPa, mientras que el valor referencial es igual a 37 GPa, lo que indica que el modulo de elasticidad al corte resultante en los ensayos realizados es 33,76% menor al valor referencial para aleaciones de latón en estado de recocido.

Con respecto al esfuerzo de fluencia, el valor resultante fue 141,36 MPa que es menor en un 5% al esfuerzo de fluencia referencial, ambos valores resultan ser muy cercanos.

Comparando los valores de esfuerzo máximo se observa que el valor obtenido en los ensayos de torsión para esta condición es igual a 318,28 MPa, mayor en un 12% al valor tabulado en la referencia [1].

5.3.2 Ensayos de torsión en la aleación UNS C36000 (Normalizado)

A continuación se muestran los resultados en promedio de las propiedades obtenidas en los ensayos de torsión de la aleación UNS C36000 en condición de normalizado.

Tabla 5.17 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C36000 (Normalizado)

	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Deformación de fluencia (rad/rad)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación última (rad/rad)
Promedio	167,80	$0,90 \times 10^{-2}$	24,89	317,05	1,05
Desviación	6,84	$0,12 \times 10^{-2}$	4,68	5,15	0,07

Para esta condición de tratamiento térmico los valores característicos de las 7 probetas se comportan de manera similar, notándolo en las curvas esfuerzo al corte versus deformación angular de la figura 4.4.

Se obtuvo un esfuerzo de fluencia promedio de 167,80 MPa para una deformación angular de 0,009 rad/rad equivalente a 10 grados de giro, lo que indica que el material comienza su fluencia prácticamente al iniciar el giro de la mordaza móvil.

El esfuerzo a la ruptura para las siete probetas de esta condición de ensayo estuvo alrededor de 317,05 MPa bajo una deformación última ó de ruptura igual 1,05 rad/rad, lo que significa que las probetas partieron cerca de las 3 ¼ vueltas.

Estas probetas también sufren un endurecimiento por deformación al igual que las probetas en estado recocido, que hace que en la zona plástica los esfuerzos aumenten con las deformaciones, en este caso en menor proporción que en recocido.

Tabla 5.18 Comparación de los valores obtenidos experimentalmente de la aleación UNS C36000 (Normalizado)

	Módulo elástico a corte (GPa)	Esfuerzo fluencia a corte (MPa)	Esfuerzo máximo a corte (MPa)
Valor obtenido	24,89	167,80	317,05
Valor referencial ^B	37,00	Mínimo 155,00	Mínimo 235,00

B: Valores reportados para la aleación UNS C37700 en el ASM Metals Handbook [22].

Comparando los resultados obtenidos con los valores referenciales, se observa que el módulo de corte estuvo de nuevo por debajo del valor reportado en el ASM Metals Handbook que lo reporta en 37 GPa, mientras que el obtenido en promedio es de 24,89 GPa, el resultado experimental es inferior al recomendado en un 30%.

En cuanto al esfuerzo de fluencia, el valor mínimo referencial para la aleación UNS C36000 está alrededor de los 155 MPa, el obtenido experimentalmente es de 167,80 MPa, lo que indica que es superior en un 8% al límite inferior del esfuerzo de fluencia reportado en el ASM Metals Handbook.

El promedio del esfuerzo último resultante de los ensayos de torsión es de 317,05 MPa, que resulta ser superior en una diferencia del 35% al valor mínimo tabulado por el ASM Metals Handbook que es igual a 235 MPa.

5.3.3 Relación entre las propiedades a torsión para la aleación UNS C36000 sometida a tratamientos de recocido y normalizado

En la figura 5.3 se presenta el comportamiento de las curvas esfuerzo al corte versus deformación angular de una probeta de la aleación UNS C36000 en cada condición de tratamiento térmico, esto con el fin de observar la diferencia entre el comportamiento mecánico a torsión característico de este material para el estado de recocido y para el estado de normalizado. En este gráfico se observa la influencia del tratamiento de recocido para el aumento de la deformación angular que admite el material antes de la ruptura.

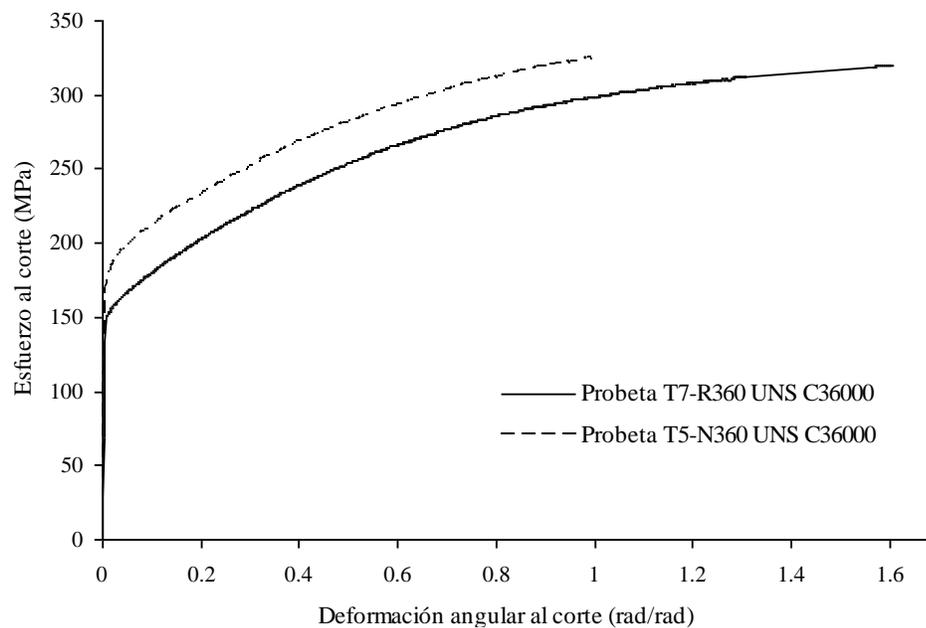


Figura 5.3 Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular para las probetas T7-R360 y T5-N360 de la aleación UNS C36000

Se presenta a continuación una tabla comparativa de los parámetros característicos a torsión de la aleación UNS C36000 entre los tratamientos de recocido y normalizado.

Tabla 5.19 Comparación entre valores obtenidos de los ensayos de torsión de la aleación UNS C36000

Condición	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Deformación de fluencia (rad/rad)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación última (rad/rad)	Exponente n endurecimiento por deformación
Normalizado	167,80	$0,90 \times 10^{-2}$	24,89	317,05	1,05	0,17
Recocido	141,36	$0,69 \times 10^{-2}$	24,51	318,29	1,48	0,23

Se tiene que la relación entre el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo máximo al corte (τ_y/τ_{max}) disminuye en el normalizado, debido a que el endurecimiento por deformación que puede admitir el material es menor para esta condición. Esto también se observa en el valor obtenido del exponente de endurecimiento de la ley potencial de endurecimiento por deformación para el rango plástico, donde este parámetro resultó mayor en la condición de recocido, lo que indica que con la aplicación de este tratamiento térmico se obtiene una capacidad superior de endurecimiento por deformación en relación al tratamiento de normalizado.

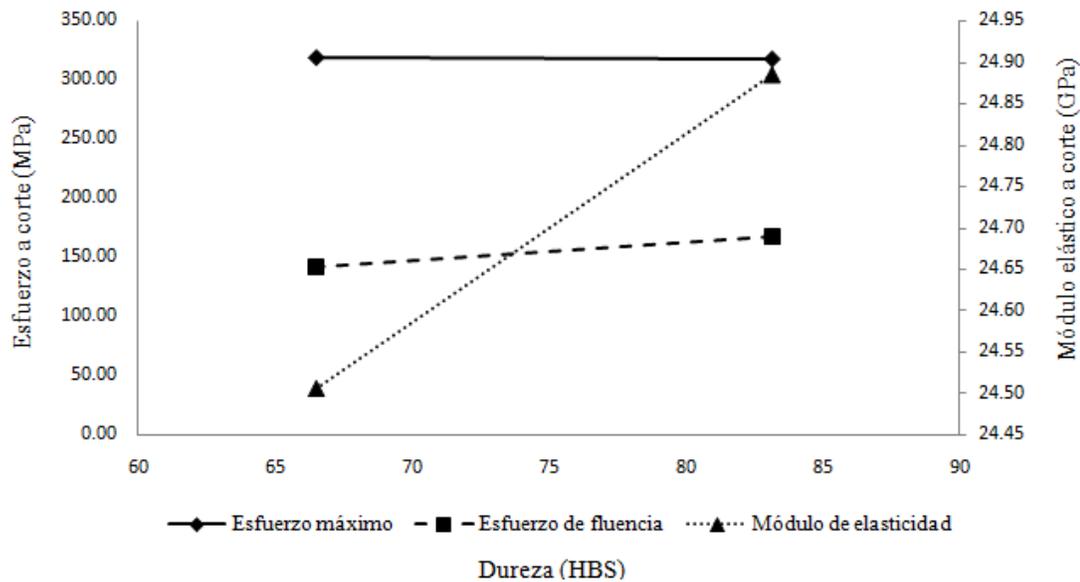


Figura 5.4 Gráfica de variación de las propiedades mecánicas a torsión de la aleación UNS C36000 con la aplicación de los tratamientos de recocido y normalizado

La gráfica de la figura 5.4 muestra la variación que sufrieron las propiedades mecánicas a torsión con la aplicación de los tratamientos térmicos de recocido y normalizado, relacionándolas con la dureza obtenida en cada condición, estas gráficas son la representación de la tabla 5.19.

El resultado experimental del esfuerzo máximo a corte para ambas condiciones de tratamiento térmico de la aleación UNS C36000 fue aproximadamente el mismo valor, con una variación del 0,3%. Sin embargo, con la aplicación del recocido se obtuvo un incremento igual a 29% en la deformación máxima a la rotura con respecto a la condición de normalizado, lo cual indica que el material en condición de recocido tiene mayor ductilidad.

Para el tratamiento de normalizado se obtuvo un esfuerzo de fluencia mayor en un 15% que en la condición de recocido, siendo este esfuerzo igual a 167,80 MPa.

Se observa que el módulo elástico a corte resultó ser muy cercano para ambas condiciones, siendo en la condición de normalizado 1,52% superior que en la condición de recocido.

5.3.4 Ensayos de torsión en la aleación UNS C37700 (Recocido)

Se muestra en la tabla 5.20 un resumen con los promedios de los parámetros característicos en los ensayos de torsión de la aleación UNS C37700 en estado recocido.

La fluencia del material en promedio ocurre a 137,48 MPa para una deformación angular de 0,0093 rad/rad, es decir el esfuerzo de fluencia se alcanzó a los 10 grados de giro de la probeta.

Tabla 5.20 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C37700 (Recocido)

	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Deformación de fluencia (rad/rad)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación última (rad/rad)
Promedio	137,48	$0,93 \times 10^{-2}$	19,29	323,75	0,93
Desviación	4,12	$0,18 \times 10^{-2}$	4,53	8,84	0,11

Para las 7 probetas ensayadas bajo esta condición se obtuvo en promedio un esfuerzo último de 323,75 MPa y este esfuerzo ocurre para una deformación angular promedio de 0,9320 rad/rad, que equivale a 1060 grados de giro de la probeta ó 2,94 vueltas.

De forma global las 7 curvas de esfuerzo de corte vs deformación angular mostradas en la figura 4.5 tienen el mismo comportamiento, estas 7 probetas rompieron en aproximadamente $2 \frac{3}{4}$ vueltas, variando este valor en un rango inferior a $\frac{3}{4}$ de vuelta, es decir 255 grados.

Este material bajo la condición de normalizado presenta un endurecimiento por deformación luego de la fluencia apreciable, es por ello el gran incremento de los esfuerzos a medida que aumentan las deformaciones desde el punto de fluencia hasta la rotura.

Tabla 5.21 Comparación de los valores obtenidos experimentalmente de la aleación UNS C37700 (Recocido)

	Módulo elástico a corte (GPa)	Esfuerzo fluencia a corte (MPa)	Esfuerzo máximo a corte (MPa)
Valor obtenido	19,29	137,48	323,75
Valor referencial ^A	37,00	149,00	283,00

A: Valores obtenidos por J.D. Bressan y R.Kirchhof U. [1]

El valor del módulo de elasticidad al corte reportado para aleaciones de latón en estado de recocido es de 37 GPa, y el obtenido estuvo en el orden de los 19 GPa, es decir el resultado equivale al 51% de lo que se esperaba.

Contrastando los valores obtenidos del ensayo bajo la condición de normalizado para la aleación UNS C37700, se observan resultados muy similares en cuanto al esfuerzo de fluencia al corte, el esfuerzo referencial es de 149 MPa, mientras que el valor obtenido de los ensayos es de 137,48 MPa, es decir el valor obtenido es inferior en un 8% al tabulado.

El valor de esfuerzo máximo al corte que se tiene de referencia es de 283 GPa, y de los ensayos realizados se obtuvo un esfuerzo máximo al corte de 323,75 GPa, el resultado obtenido es mayor en un 14 %.

5.3.5 Ensayos de torsión en la aleación UNS C37700 (Normalizado)

En la tabla 5.22 se puede ver el promedio de los valores característicos del comportamiento a torsión de la aleación UNS C37700 en condición de normalizado, así como el valor de la desviación de los resultados para las 7 probetas de estudio.

Tabla 5.22 Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en la aleación UNS C37700 (Normalizado)

	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Deformación de fluencia (rad/rad)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación última (rad/rad)
Promedio	142,65	$0,75 \times 10^{-2}$	25,80	283,87	0,51
Desviación	4,15	$0,10 \times 10^{-2}$	4,85	22,31	0,13

El esfuerzo de fluencia fue aproximadamente de 142,65 MPa para estos ensayos, y una deformación elástica de 0,0075 rad/rad, lo que significa que la fluencia se alcanzó a los 8,5 grados de giro de la probeta ensayada.

Adicionalmente los 7 ensayos arrojan en promedio un esfuerzo máximo de 283,87 MPa para una deformación angular de 0,51 rad/rad, es decir la ruptura de las probetas ocurrió cerca de las 1 ½ vueltas.

En la curva esfuerzo al corte versus deformación angular de la figura 4.6 y en la desviación de los resultados del esfuerzo máximo se puede observar una variación significativa de este parámetro para los 7 ensayos, desde 261,77 MPa a 321,56 MPa.

También se nota una variación en el resultado de la deformación última, la cual está alrededor de 0,31 rad/rad que equivale a 355 grados de giro, esto es importante dado que algunas de las probetas rompieron a 580 grados de giro, que es igual a 1 ½ vueltas, lo que indica una variación de más del 50% en la rotura de la probeta. Sin embargo, esta diferencia (0,31 rad/rad) entre los resultados de los ensayos en cuanto a la deformación última se presenta similar en el resto de las condiciones de estudio, pero es en esta condición donde se ve con mayor relevancia debido a la poca deformación que admite el material bajo la condición de normalizado antes de la ruptura.

De igual manera en esta condición se hace presente el endurecimiento por deformación en la zona plástica, esto se puede notar en el aumento de los esfuerzos al corte según va creciendo la deformación angular presente en el material una vez que pasa el esfuerzo de fluencia.

Tabla 5.23 Comparación de los valores obtenidos experimentalmente de la aleación UNS C37700 (Normalizado)

	Módulo elástico a corte (GPa)	Esfuerzo fluencia a corte (MPa)	Esfuerzo máximo a corte (MPa)
Valor obtenido	25,80	142,65	283,87
Valor referencial^B	39,00	Mínimo 109,69	-

B: Valores reportados para la aleación UNS C37700 en el ASM Metals Handbook. [22]

Se observa una diferencia alrededor del 34% entre el valor obtenido y el valor referencial del módulo elástico al corte, siendo el valor experimental inferior al referencial.

Comparando los valores de esfuerzo de fluencia para esta aleación en condición de normalizado, se observa que el valor obtenido experimentalmente es igual a 142,65 MPa, siendo este resultado un 30% superior al valor mínimo reportado en el ASM Metals Handbook, el cual es 109,69 MPa.

En cuanto al valor de esfuerzo máximo al corte para la aleación UNS C37700 no está especificado por el ASM Metals Handbook, sin embargo valores de aleaciones de latón similares sugieren que este valor sea mayor a los 235 GPa, el obtenido experimentalmente es de 283,87 GPa valor superior en un 20%.

5.3.6 Relación entre las propiedades a torsión para la aleación UNS C37700 sometida a tratamientos de recocido y normalizado

A continuación se muestra la curva esfuerzo al corte versus deformación angular para una probeta de la aleación UNS C37700 con un comportamiento típico en cada condición de tratamiento térmico, esto con el propósito de observar la variación del esfuerzo a corte y de la deformación angular entre el estado de recocido y el estado de normalizado.

En la figura 5.5 se observa como el tratamiento de recocido interviene en el aumento de la deformación angular que puede admitir el material antes de llegar a la rotura.

En la tabla 5.24 se presenta la variación de los parámetros extraídos de las curvas de esfuerzo de corte en función de la deformación angular en cada condición para la aleación UNS C37700, mediante la comparación de los promedios obtenidos de las siete muestras en cada tratamiento térmico.

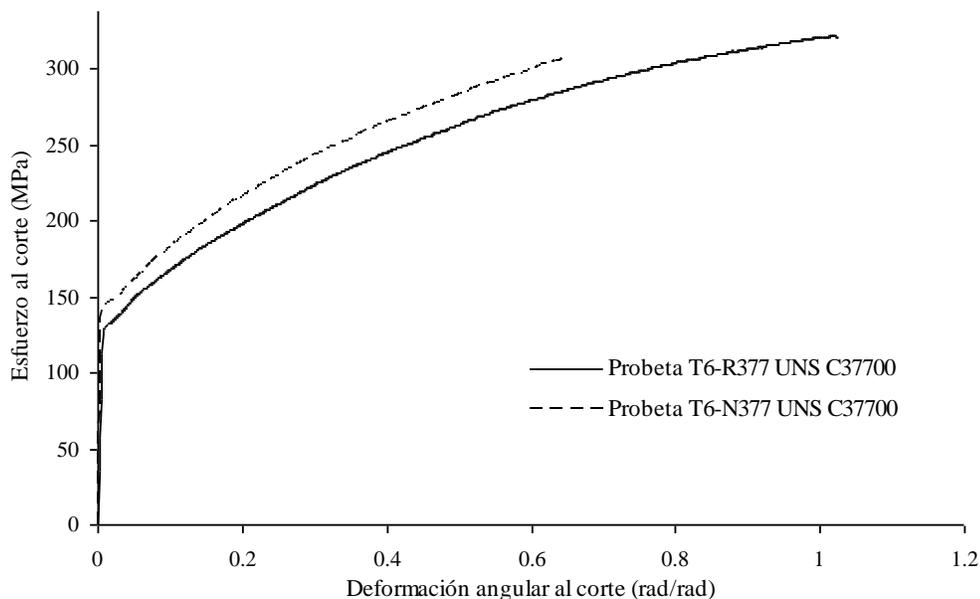


Figura 5.5 Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular para las probetas T6-R377 y T6-N377 de la aleación UNS C37700

Tabla 5.24 Comparación de los valores obtenidos en los ensayos de torsión en la aleación UNS C37700

Condición	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Deformación elástica (rad/rad)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación última (rad/rad)	Exponente n endurecimiento por deformación
Normalizado	142,65	$0,75 \times 10^{-2}$	25,80	283,87	0,51	0,24
Recocido	137,48	$0,93 \times 10^{-2}$	19,29	323,75	0,93	0,25

El valor obtenido del exponente de endurecimiento de la ley potencial de endurecimiento por deformación para el rango plástico resultó mayor en la condición de recocido, lo que indica que con la aplicación de este tratamiento térmico se obtiene una capacidad superior de endurecimiento por deformación en relación al tratamiento de normalizado. Sin embargo, los valores del exponente de endurecimiento para cada condición fueron muy cercanos, variando apenas un 7%.

La deformación angular última resultante en el recocido es superior en un 45% a la obtenida en el normalizado, lo que indica que se gana ductilidad en el material con la aplicación del recocido.

La figura 5.6 muestra el cambio que presentan las propiedades a torsión de la aleación de latón UNS C37700, según el valor de dureza en cada tratamiento.

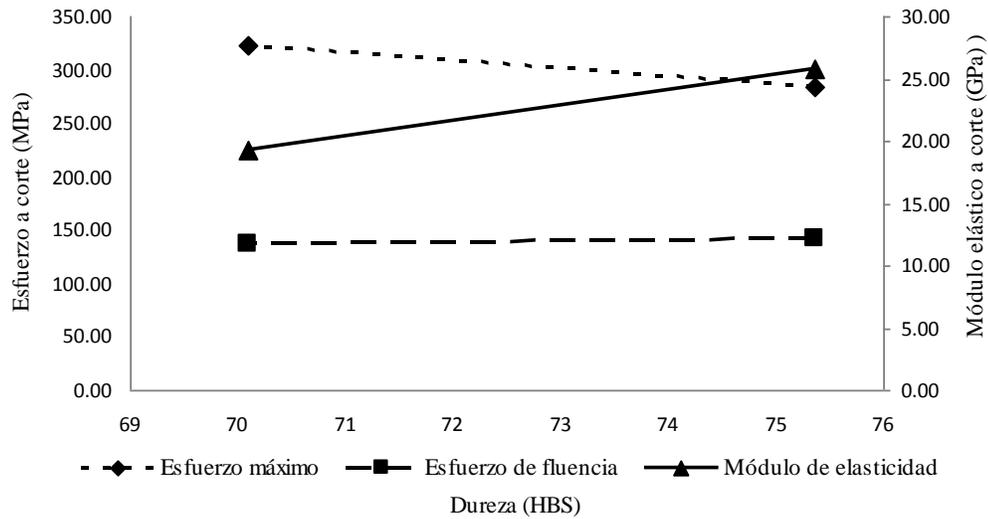


Figura 5.6 Gráfica de variación de las propiedades mecánicas a torsión de la aleación UNS C37700 con la aplicación de los tratamientos de recocido y normalizado

En la gráfica de la figura 5.6 se observa que el módulo elástico a corte resultó superior para el valor de dureza mayor, la cual se obtuvo en la condición de normalizado. El modulo elástico para esta condición fue 25% superior al obtenido en el recocido.

La aleación UNS C37700 antes de la aplicación de los tratamientos no poseía deformación en frío, ya que su proceso de fabricación fue extruido en caliente, esto permite que al aplicarle los tratamientos de normalizado y recocido sus propiedades mecánicas no cambien de forma considerable, lo cual se observa en los resultados de los ensayos a torsión para esta aleación en estado de recocido y normalizado, donde la dureza en el recocido disminuye solo un 7% a la obtenida en el normalizado.

El esfuerzo de fluencia fue relativamente el mismo entre las condiciones de tratamiento térmico, resultando en el normalizado superior en un 3,5% al recocido.

Adicionalmente el valor de esfuerzo último a corte fue mayor en la condición de recocido, sin embargo el comportamiento del esfuerzo a corte para esta condición se mantuvo por debajo de los valores de esfuerzo a corte de la condición de normalizado hasta aproximadamente el 80% del rango de deformación angular que admite el material antes de la ruptura en condición de recocido, se puede observar en la figura 5.5. Esto debido a que la aplicación del recocido aumenta la ductilidad del material y por lo antes mencionado con respecto a la baja variación entre las condiciones, el aumento de la deformación angular hace que el esfuerzo a corte en el recocido supere al esfuerzo máximo a corte en el normalizado.

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

Las relaciones entre el esfuerzo de fluencia obtenido del ensayo de tracción y el obtenido del ensayo de torsión de las aleaciones UNS C36000 y UNS C37700 se muestran en las tablas 4.21 y 4.22, respectivamente.

Para la aleación UNS C36000 se observa que la relación en el tratamiento de recocido es menor en un 8% con respecto a la condición de normalizado. Al comparar estos resultados con los teóricos que establecen los criterios de fluencia tanto de Tresca como de Von Mises, se tiene que la condición de normalizado es la que más se acerca a ambas relaciones obteniendo errores de 33% para Tresca y 23% para Von Mises.

La teoría de Von Mises es la que más se aproxima a los resultados experimentales para ambas condiciones, con un error de 32% para el recocido y un 23% para la condición de normalizado.

Para la aleación UNS C37700 se observa que las relaciones entre el esfuerzo de fluencia a tracción y torsión para ambos tratamientos fue aproximadamente el mismo,

variando en un 2%, esto debido a que la condición de este material antes de la aplicación de los tratamientos no tenía deformación previa, lo cual implica que no se obtengan variaciones significativas en las propiedades mecánicas del material entre la condición de recocido y la condición de normalizado.

Al comparar los valores de las relaciones obtenidas con los valores teóricos que establecen los criterios de fluencia, se observa que en la condición de normalizado se tienen errores de 33% para Tresca y 23% para Von Mises en ambas aleaciones, y en la condición de recocido se obtuvo una diferencia en la aleación UNS C36000 de 41% para Tresca y 32% para Von Mises, en cambio la aleación UNS C37700 difiere en 35% para Tresca y 24% para Von Mises.

Por lo que se puede establecer que el criterio de energía máxima de deformación cortante de Von Mises describe un poco mejor los resultados obtenidos para ambas aleaciones y condiciones de tratamiento térmico, ya que las relaciones experimentales están más cercanas a las que este criterio indica como comunes para los materiales dúctiles. Sin embargo, para las condiciones estudiadas en este trabajo los criterios de fluencia no permiten predecir de forma adecuada el comportamiento a torsión a partir del comportamiento a tracción, o de manera inversa.

5.5 Evaluación metalográfica de las probetas ensayadas a torsión

5.5.1 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C36000 en condición de recocido

En la figura 4.24 se observan las imágenes obtenidas tanto microscópicas como macroscópicamente de una probeta de la aleación UNS C36000 en condición de recocido luego de ser deformada a torsión.

En el estudio microscópico se puede notar una diferencia apreciable entre la distribución y tamaño de los granos de las muestras en los bordes en relación a la muestra del centro de la probeta. En los bordes, los granos no parecen estar bien definidos y se observan de menor tamaño que los granos del centro, ya que en esta zona central están las fibras que menos deformación sufrieron debido a su ubicación en la sección transversal de la probeta, y por ende los granos también presentan menor deformación.

Como se puede ver en la figura 4.24 el ataque químico no proporcionó buenos resultados en cuanto a la macroscopía del material, notándose solamente una leve variación en la tonalidad del centro de la probeta.

5.5.2 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C36000 en condición de normalizado

En la figura 4.25 se pueden observar las muestras obtenidas en la evaluación metalográfica para la aleación UNS C36000 en condición de normalizado, apreciándose en la imagen macroscópica una tonalidad distinta en la zona central de la sección de la probeta. Esta tonalidad se presenta de forma más uniforme a diferencia que la presentada en la condición de recocido, sin embargo se sigue notando poco definida.

En los bordes de la sección transversal de la probeta los granos son mas pequeños y presentan mayor distorsión que los granos del centro, esto puede suceder debido a que en los alrededores del centro se encuentran las fibras deformadas por la torsión, las cuales al enrollarse en torno a la fibra central presentan formas irregulares que representan los cortes transversales de las fibras.

Las imágenes obtenidas en la microscopía para esta condición muestran de forma más clara los granos del material, y las formas de los mismos se aprecian mejor que en la condición de recocido, ya que existe una menor agrupación de fibras, por ser menor la deformación que sufre la probeta durante el ensayo.

5.5.3 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C37700 en condición de recocido

Al igual que en la aleación UNS C36000 para las dos condiciones de tratamiento térmico en esta aleación se observa la zona central de tonalidad distinta, que se va perdiendo a medida que se acerca a los bordes, esto puede deberse al comportamiento de la deformación de las fibras a lo largo de la sección transversal de la probeta.

El ataque químico para esta aleación y condición no reveló claramente los granos del material en la microscopía. Sin embargo, se puede notar una diferencia entre la microestructura del centro con respecto a la de los bordes de la sección transversal de la probeta, notándose los granos en el centro con una disposición distinta a los granos en los extremos, lo cual es un indicio de la deformación de las fibras en función al radio de giro de la probeta.

5.5.4 Evaluación metalográfica de la aleación UNS C37700 en condición de normalizado

En la figura 4.27 se pueden apreciar las imágenes obtenidas en la evaluación metalográfica para la aleación UNS C37700 en condición de normalizado, apreciándose en la muestra macroscópica muy poca variación en la tonalidad del centro de la sección de la probeta.

La microscopía para esta condición de normalizado presenta una poca diferencia en las muestras de los bordes de la sección de la probeta con respecto al centro de la misma, aun cuando no se distinguen de buena manera los granos del material, como también sucedió en la condición de recocido para esta misma aleación.

La mínima variación en la tonalidad y la inapreciable diferencia de disposición de los granos, puede deberse a que en esta condición el material admitió muy poca deformación angular, lo que lleva a la escasa deformación en las fibras del material.

5.5.5 Evaluación metalográfica de una probeta sin torsión

En la figura 4.28 se pueden observar las muestras de la metalografía de una probeta de la aleación UNS C36000 sin haberse sometido a ningún tratamiento térmico ni ensayo de torsión.

Las imágenes microscópicas que se pueden observar en la figura 4.28 muestran de forma clara los granos y disposición de los mismos, los cuales van todos en un mismo sentido, pudiendo decir que no presentan distorsión ni variación, si se comparan las imágenes de los bordes con el centro de la sección transversal de la probeta.

Los granos están dispuestos en sentido longitudinal a la probeta, lo cual confirma que no poseen deformación angular. Esto mismo debe suceder con el comportamiento de las fibras del material, las cuales permanecen en la misma posición en toda la sección transversal de la probeta, por la ausencia de deformación producto de un momento torsor.

En la imagen macroscópica se puede observar que no se presenta ninguna tonalidad distinta para una zona determinada de la probeta, lo cual es indicio de que

toda la sección longitudinal del material esta bajo una misma condición de deformación.

Al comparar la metalografía de la probeta sin torsión de la aleación UNS C36000 con las correspondientes a las probetas de la misma aleación pero en estado de recocido y de normalizado, se puede observar un cambio notable en la microestructura del material, ya que en la sección longitudinal de las probetas torsionadas se muestra un cambio en la disposición y tamaño de grano aparente, variando esta característica desde el centro a los bordes de la probeta, lo que puede deberse a la deformación angular que sufrió el material, adicionalmente a la aplicación de los tratamientos térmicos.

CONCLUSIONES

La aplicación de los tratamientos térmicos de normalizado y recocido influyen en el esfuerzo de fluencia a tracción, ya que esta propiedad resultó ser mayor en un 22% para la condición de normalizado con respecto a la condición de recocido en la aleación UNS C36000 y en un 5% para la aleación UNS C37700.

El alargamiento a la ruptura que arroja el ensayo de tracción es mayor para las muestras sometidas a tratamiento térmico de recocido, en un 14% para la aleación UNS C36000 y para la aleación UNS C37700 en un 8%, es decir, la ductilidad del material se incrementa según el tratamiento aplicado.

Se evaluó el comportamiento mecánico a torsión, obteniéndose que la aplicación del tratamiento de normalizado en ambas aleaciones genera un aumento del esfuerzo de fluencia al corte, de 15% para la aleación UNS C36000 y para la aleación UNS C37700 de 4%, con una reducción de la deformación angular a la rotura respecto a la condición de recocido, de 29% para la aleación UNS C36000 y para la aleación UNS C37700 de 45%; lo que confirma la disminución de ductilidad que genera dicho tratamiento térmico.

La capacidad de endurecimiento por deformación en torsión de las aleaciones de latón estudiadas es superior en la condición de recocido, en un 26% para la aleación UNS C36000 y para la aleación UNS C37700 en un 4%, notándose en el aumento del exponente de la ley potencial de endurecimiento por deformación para el rango plástico del material en torsión, y de la relación entre el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo máximo al corte ($\tau_y/\tau_{m\acute{a}x}$) en torsión.

El criterio de fluencia de Von Mises describe mejor los resultados obtenidos para ambas aleaciones y condiciones de tratamiento térmico, ya que las relaciones

experimentales se aproximan por lo menos en un 70% a las que este criterio indica como comunes para los materiales dúctiles y un 59% para el criterio de Tresca.

El desarrollo de la metalografía en probetas ensayadas a torsión permite evidenciar la influencia de los esfuerzos a corte en torsión aplicados a lo largo de la muestra, dando a conocer indicios de las deformaciones que pueden o no generarse en las fibras del material.

Mediante el estudio metalográfico se comprobó la diferencia entre las condiciones originales de las aleaciones estudiadas, producto del proceso de fabricación de cada una, notándose entre ellas un cambio significativo en el tamaño y distribución de los granos, que a su vez va asociado a la dureza.

RECOMENDACIONES

Realizar investigaciones sobre el comportamiento mecánico a torsión de otras aleaciones de latón, con la finalidad de comparar las propiedades mecánicas a torsión entre distintas aleaciones.

Determinar las propiedades mecánicas de las aleaciones de latón estudiadas en condición original, extruido en caliente para la aleación UNS C37700 y trefilado en frío para la aleación UNS C36000, para conocer la influencia de los tratamientos de recocido y normalizado en el material con respecto a la condición de entrega.

Mejorar el sistema de adquisición de datos de la máquina de ensayos de torsión para bajas deformaciones, a fin de obtener un módulo de elasticidad a corte con mayor exactitud.

Utilizar un extensómetro durante el desarrollo de los ensayos a tracción cuando se desee determinar el módulo elástico y el alargamiento real del material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRESSAN, J. y KIRCHHOF, R. (2006). *Construction and validation tests of a torsion test machine*". Journal of Materials Processing Technology, 179 (Issues 1-3), 23-29.
- [2] GARCÍA, M. (1982). *"Influencia de la deformación en frío y tratamientos térmicos sobre las cualidades de torsión de aceros al carbono"*. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Carabobo, Valencia - Estado Carabobo.
- [3] PALKOVIC, E. y SANÉZ, F. (2006). *"Diseño y construcción de una máquina para realizar ensayos de torsión"*. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Carabobo, Valencia - Estado Carabobo.
- [4] CHACÓN R., SUÁREZ R., ANDUELA L. y LÓPEZ O. (2006). *"Variables Significativas del Torneado de Probetas para Ensayo de Torsión"*. Información tecnológica, 17(5), 43-50.
- [5] CLARK J. W. y MOORE R. L. (1952). *"Torsion test of aluminum-alloy stiffened circular cylinders"*. National advisory committee for aeronautics (NACA). Technical note 2821. Washington-EE.UU.
- [6] APARICIO G. y CAMEJO F. (2003). *"Laboratorio de procesos de fabricación I"*. Publicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia - Estado Carabobo.
- [7] VAN DEVENTER Diego y DURÁN Luís. (2008). *"Evaluación del comportamiento mecánico a torsión de la aleación de aluminio AA6061"*. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Carabobo, Valencia - Estado Carabobo.
- [8] PEREIRA Juan C., DURÁN Luís, VAN DEVENTER Diego y ZAMBRANO Jenny. (2008). *"Comportamiento mecánico a torsión de la aleación de aluminio AA6061 tratada térmicamente"*. X Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales – IBEROMET. Colombia.

- [9] Norma COVENIN 907. (1997). “*Alambres de acero. Método de ensayo de torsión simple*”. Caracas.
- [10] AVNER, S. (1977). “*Introducción a la Metalurgia Física*”. Mc Graw Hill. Páginas consultadas 360-369. México.
- [11] DIETER, G. (1961). “*Mechanical Metallurgy*”. Mc Graw Hill. Páginas consultadas 338-345. EE.UU.
- [12] ASM Metals Handbook. (1964). 8th Edición. *Heat Treating, Cleaning and Finishing*. Volumen 2. Página 284. EE.UU.
- [13] Norma ASTM B 16/B 16M-00. (2000). “*Standard Specification for Free-Cutting Brass Rod, Bar and Shapes for Use in Screw Machines*”. EE.UU.
- [14] Norma ASTM B 124/B 124M - 94. (1994). “*Standard Specification for Copper and Copper Alloy Forging Rod, Bar, and Shapes*”. EE.UU.
- [15] Norma ASTM B 601-97a. (1998). “*Temper Designations for Coppers and Coppers Alloys*”. EE.UU.
- [16] Norma ASTM E340-00. (2006). “*Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys*”. EE.UU.
- [17] Norma ASTM E407-99. (1999). “*Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*”. EE.UU.
- [18] ASM Metals Handbook. (1969). 8th Edición. *Forming*. Volumen 4. Página 405. EE.UU.
- [19] ASM Metals Handbook. (1967). 8th Edición. *Machining*. Volumen 3. Página 468. EE.UU.
- [20] ASM Metals Handbook. (1990). 9th edición. *Properties and selection nonferrous alloys and special purpose materials*. Volumen 2. EE.UU.
- [21] Norma ASTM E140-05. (2005). “*Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness Microetching Metals and Alloys*”. EE.UU.

- [22] MATWEB. *Aleación UNS C36000*. (2009). [On - line]. Disponible en:
<http://www.matweb.com/SEARCH/DataSheet.aspx?MatGUID=D6B982D35B1D427B940601F1798248B3CKCK=1>
- [23] Norma ASTM E8-00. (2004). “*Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*”. EE.UU.
- [24] Norma ASTM E18-05. (2005). “*Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*”. EE.UU.