

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO

**Tema: “Estudio de la aleación inteligente con memoria de forma
CuZnAl para determinar su aplicación industrial”**

Trabajo de Investigación

Previa a la obtención del Grado Académico de Magister en Diseño Mecánico

Autor: Ing. Segundo Manuel Espín Lagos

Director: Ing. Mg. Juan Francisco Correa Jácome

Ambato - Ecuador

2012

Al Consejo de Posgrado de la UTA.

El tribunal receptor de la defensa del trabajo de investigación con el tema: “Estudio de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl para determinar su aplicación industrial”, presentado por: Ing. Segundo Manuel Espín Lagos y conformado por: Ing. Mg. Edison Viera Alulema, el Ing. Mg. Pablo Valle Velasco, y el Ing. Mg. Manolo Córdova Suárez, Miembros del Tribunal, Ing. Mg. Juan Francisco Correa Jácome, Director del trabajo de investigación y presidido por: Ing. Mg. Francisco Pazmiño Gavilánez Presidente del Tribunal; Ing. Mg. Juan Garcés Chávez Director del CEPOS – UTA, una vez escuchada la defensa oral el Tribunal aprueba y remite el trabajo de investigación para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

Ing. Mg. Francisco Pazmiño Gavilánez
Presidente del Tribunal de Defensa

Ing. Mg. Juan Garcés Chávez
DIRECTOR CEPOS

Ing. Mg. Juan Correa Jácome
Director de Trabajo de Investigación

Ing. Mg. Edison Viera Alulema
Miembro del Tribunal

Ing. Mg. Pablo Valle Velasco
Miembro del Tribunal

Ing. Mg. Manolo Córdova Suárez
Miembro del Tribunal

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el trabajo de investigación con el tema “Estudio de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl para determinar su aplicación industrial”, nos corresponde exclusivamente el Ing. Segundo Manuel Espín Lagos Autor y del Ing. Mg. Juan Francisco Correa Jácome Director del Trabajo de investigación; y el patrimonio intelectual del mismo a la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Segundo Manuel Espín Lagos

Autor

Ing. Mg. Juan Francisco Correa Jácome

Director

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo de investigación o parte de él un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo de investigación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de esta, dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ing. Segundo Manuel Espín Lagos

DEDICATORIA

A Dios, por darme la salud, la vida y las fuerzas necesarias para seguir en este hermoso campo de la Investigación.

A mi padre Manuel y a mi madrecita Blanca, que fue el pilar de mis estudios y gracias a ellos he cosechado muchos frutos. Espero que Dios le alargue la vida para que esté presente en mi tercera graduación.

Al Licenciado Néstor Herrera Jácome, por ser mi mejor amigo de mi juventud, mi consejero y mi segundo padre, no sé donde se encuentra en este momento, pero solo Dios sabe que lo he buscado mucho, para decirle gracias por confiar en mí y que nunca le defraude, recuerdo que me decía, tienes que ser como el ave Fénix, levántate de las cenizas y llegarás muy alto.

A mis mejores amigos, a mis compañeros de estudio y trabajo por su ayuda incondicional y por estar junto a mí en los peores momentos de mi vida.

AGRADECIMIENTO

A la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, a sus Autoridades y cuerpo Docente por ser los gestores de esta Maestría.

A la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por su apoyo con el Taller de Fundición, Laboratorio de Tratamientos Térmicos y Laboratorio de Resistencia de Materiales.

A la Empresa ECUATRAN S.A, por su auspicio para esta Investigación.

A mi tutor de esta Investigación, Ing. Mg. Juan Francisco Correa Jácome, por sus sugerencias y apoyo incondicional.

A los Ingenieros M.Sc. Mario Pastor, Raúl Cabrera, Anibal Viñán Docentes de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y al señor Victor Moreta, por su apoyo gratuito y ayuda incondicional.

A mi esposa María Elena, por su comprensión, por haber sacrificado su tiempo y no estar junto a ella cuando más me necesitaba.

A mi hija Valeria, por ser mi inspiración, para ser un hombre de bien y un ejemplo como profesional y Docente.

A todas aquellas personas e Instituciones que de alguna u otra manera aportaron para el desarrollo de esta investigación muchas gracias, que Dios les Pague.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PÁGINAS PRELIMINARES

Página de título.....	i
Página de tribunal de defensa.....	ii
Página de autoría de la investigación.....	iii
Página de derechos de autor.....	iv
Página de dedicatoria.....	v
Página de agradecimiento.....	vi
Índice de contenidos.....	vii
Índice de gráficos y tablas.....	xv
Resumen ejecutivo.....	xxii

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Tema.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	1
1.2.1 Contextualización.....	1
1.2.2 Análisis crítico.....	5
1.2.3 Prognosis.....	6
1.2.4 Formulación del problema.....	6
1.2.5 Preguntas directrices.....	6

1.2.6 Delimitación del problema.....	6
1.2.6.1 Delimitación de contenido.....	6
1.2.6.2 Delimitación espacial.....	7
1.2.6.2 Delimitación temporal.....	7
1.3 Justificación.....	7
1.4 Objetivos.....	9
1.4.1 Objetivo General.....	9
1.4.2 Objetivos Específicos.....	9

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes investigativos.....	10
2.2 Fundamentación filosófica.....	11
2.3 Fundamentación legal.....	11
2.4 Fundamentación teórica.....	12
2.4.1 Aleaciones con memoria de forma.....	12
2.4.1.1 Clasificación de los materiales Inteligentes.....	15
2.4.2 Efecto memoria de forma.....	16
2.4.3 Superelasticidad (SE).....	17
2.4.4 Transformación Martensítica por Temple.....	18
2.4.5. Efecto de superelasticidad (SE).....	20

2.4.6. Condiciones para SME y SE.....	20
2.4.7 Aleaciones memoria de forma Base Cobre.....	21
2.4.8 Aleación CuZnAl.....	22
2.4.9 Diagramas de fases.....	23
2.4.10 Zinc Equivalente (Zn_{equiv}).....	25
2.4.11 Comportamiento mecánico en monocristales vs policristales...	26
2.4.12 Comportamiento en fractura.....	27
2.4.13 Propiedades del Cobre, Zinc, y Aluminio.....	27
2.4.13.1 El cobre.....	28
2.4.13.2 El Zinc.....	28
2.4.13.3 El aluminio.....	28
2.4.14. Tensión y deformación en metales.....	29
2.4.14.1 Deformación Elástica y Plasticidad.....	29
2.4.14.2 Ensayo de Tracción.....	33
2.4.14.3 Porcentaje de elongación.....	34
2.4.15 Procesos de manufactura.....	36
2.4.15.1 Laminado de metales.....	36
2.4.15.1.1 Proceso de laminación Plana.....	37
2.4.15.1.2 Fuerza, torque y requerimientos de potencia del laminado.	38
2.4.15.2 Extrusión.....	41
	43
2.4.15.2.1 Cálculo de fuerza de extrusión.....	

2.4.15.3 Proceso de estirado.....	44
2.5 Categorías fundamentales.....	46
2.6 Hipótesis.....	47
2.7 Señalamiento de variables de la hipótesis.....	47
2.7.1 Variable Independiente.....	47
2.7.2 Variable Dependiente.....	47
2.7.3 Término de relación.....	47

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Enfoque.....	48
3.2 Modalidad de la investigación.....	48
3.3 Niveles de la investigación.....	49
3.3.1 Investigación Exploratoria.....	49
3.3.2 Investigación Descriptiva.....	50
3.4 Población y muestra.....	50
3.4.1 Población.....	50
3.4.2 Muestra.....	50
3.5 Operacionalización de variables.....	51
3.5.1 Variable independiente.....	51

3.5.2 Variable dependiente.....	52
3.6 Recolección de la información.....	53
3.6.1 Técnicas e instrumentos.....	53
3.7 Procesamiento y análisis.....	54

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis de los resultados.....	55
4.1.1 Prueba 1.....	55
4.1.1.1 Análisis químico prueba 1.....	55
4.1.1.2 Microestructura metalográfica prueba 1.....	56
4.1.1.3 Dureza prueba 1.....	58
4.1.1.4 Ensayo de tracción prueba 1.....	60
4.1.2 Prueba 2.....	60
4.1.3 Prueba 3.....	60
4.1.3.1 Análisis químico prueba 3.....	61
4.1.3.2 Estructura metalográfica prueba 3.....	61
4.1.3.3 Dureza prueba 3.....	62
4.1.3.4 Ensayo de tracción Prueba 3.....	64
4.1.4 Prueba 4.....	64

4.1.4.1 Análisis químico prueba 4.1 primera cuchara.....	65
4.1.4.2 Microestructura metalográfica Prueba 4.1 primera cuchara.....	65
4.1.4.3 Dureza prueba 4.1.....	67
4.1.4.4 Ensayo de tracción probeta prueba 4.1 sin templar.....	68
4.1.4.5 Ensayo de tracción probeta prueba 4.1 templada.....	70
4.1.4.6 Análisis químico prueba 4.2 Segunda cuchara.....	71
4.1.4.7 Microestructura metalográfica Prueba 4.2 Segunda cuchara sin templar.....	71
4.1.4.8 Ensayo de tracción probeta prueba 4.2. sin templar.....	74
4.1.4.9 Ensayo de tracción probeta prueba 4.2. templada.....	75
4.1.4.10 Cálculo de la densidad de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl prueba 4.1.....	77
4.1.4.11 Cálculo de la densidad de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl prueba 4.2.....	79
4.1.4.12 Ensayo de corrosión Pruebas 4.1 y 4.2.....	79
4.1.5 Prueba 5.....	81
4.1.5.1 Análisis Químico Prueba 5.....	82
4.1.5.2 Estructura metalográfica Prueba 5 sin templar.....	83
4.1.5.3 Estructura metalográfica Prueba 5 Templada.....	83
4.1.5.4 Dureza prueba 5 sin templar.....	84

4.1.5.5 Ensayo de Dureza prueba 5 templada.....	85
4.1.5.6 Ensayo de Tracción prueba 5 sin templar.....	85
4.1.5.7. Ensayo de Tracción prueba 5 templada.....	87
4.1.5.8 Ensayo de fatiga prueba 5 templada.....	89
4.1.5.8 Cálculo de la densidad de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl prueba 5.....	93
4.1.5.9 Ensayo de corrosión prueba 5.....	93
4.2 Interpretación de Datos.....	96
4.3 Verificación de la hipótesis.....	100

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.....	103
5.2 Recomendaciones.....	105

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

6.1 Datos informativos.....	107
6.2 Antecedentes de la propuesta.....	108
6.3 Justificación.....	108

6.4 Objetivos.....	109
6.4.1 Objetivo general.....	109
6.4.2 Objetivos específicos.....	109
6.5 Análisis de factibilidad.....	109
6.6 Fundamentación.....	110
6.7 Metodología.....	110
6.7.1 Moldeo de probetas.....	111
6.7.2. Preparación de la materia prima para la aleación CuZnAl..	119
6.7.3. Preparación del horno de inducción.....	119
6.7.4 Precaentamiento del horno de inducción.....	121
6.7.5 Carga del horno.....	121
6.7.6 Fusión del Cobre.....	121
6.7.7 Adición del Zn y Al	121
6.7.8 Homogenización de la colada.....	123
6.7.9 Vertido de la colada en la cuchara.....	124
6.7.10 Colado de las cajas.....	125
6.7.11 Desmoldeo de las cajas de probetas.....	125
6.7.12 Mecanizado de probetas.....	126
6.7.13 Templado de probetas.....	127
6.7.14 Análisis químico de la aleación.....	130
6.7.15 Análisis Metalográfico.....	130

6.7.16 Ensayos Mecánicos.....	135
6.7.17 Ensayos Físicos.....	140
6.7.18 Evaluación de resultados.....	144
6.7.19 Determinación de la aplicación Industrial.....	145
6.8 Administración.....	150
6.9 Previsión de la evaluación.....	152

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS

Figura 1. Mecanismos del efecto memoria de forma	2
Figura 2. Ciclo de calentamiento y enfriamiento en un SMA	13
Figura 3. Maclas de deformación y placas de martensita.....	14
Figura 4. Ciclo de temperatura típico de un material SMA.....	15
Figura 5. Modelo esquematizado del proceso del efecto de forma..	16
Figura 6. Curva tensión deformación de un material superelástico..	18
Figura 7. Modelo esquematizado del proceso del efecto de forma..	19
Figura 8. Zona de superelasticidad función del esfuerzo y temperatura.....	20
Figura 9. Relación entre temperatura M_s y composición de la aleación CuZnAl.....	22
Figura 10. Diagrama de fases ternario Cu-Zn-6%Al.....	24
Figura 11. Diagrama de fases ternario Cu-Zn.....	26
Figura 12. Máquina universal para ensayo de tracción.....	30
Figura 13. Probeta cilíndrica espécimen 1 para ensayo de tracción.	31
Figura 14. Esfuerzo de cedencia convencional.....	32
Figura 15. Deformación localizada mediante el ensayo de tensión..	33
Figura 16. Relación entre el diagrama esfuerzo real-deformación	35

real y el diagrama esfuerzo-deformación ingenieril.....	
Figura 17. Esquema de varios procesos de laminado plano y de forma.....	36
Figura 18. Esquema del proceso de laminación.....	38
Figura 19. Curvas de esfuerzo-deformación reales en tensión.....	39
Figura 20. Cambio de la estructura de los granos de metales laminados.....	41
Figura 21. Esquema del proceso de extrusión directa.....	41
Figura 22. Extruidos y ejemplos de productos fabricados.....	42
Figura 23. Constante de extrusión K de diversos metales.....	44
Figura 24. Variables de proceso en el estirado de alambre.....	44
Figura 25. Análisis químico prueba 1.....	56
Figura 26. Microestructura prueba 1 sin templar.....	57
Figura 27. Microestructura prueba 1 templada.....	57
Figura 28. Probeta prueba 1 templada en agua.....	58
Figura 29. Medición de dureza.....	58
Figura 30. Microestructura prueba 3.....	62
Figura 31. Microestructura prueba 3 templada a 100X.....	62
Figura 32. Análisis químico prueba 4.1.....	65
Figura 33. Microestructura prueba 4.1 sin templar a 100X.....	66
Figura 34. Microestructura prueba 4.1 templada.....	66
Figura 35. Probeta cilíndrica según norma ASTM E-8 ensayo tracción.....	68
Figura 36. Máquina Universal FIM-ESPOCH.....	68
Figura 37. Diagrama esfuerzo-deformación probeta 4.1 sin templar.....	69
Figura 38. Probeta prueba 4.1 sin templar ensayada a tracción.....	69
Figura 39. Fractura irregular probeta 4.1 sin templar.....	70
Figura 40. Probeta 4.1 templada.....	70
Figura 41. Análisis químico prueba 4.2.....	71
Figura 42. Microestructura prueba 4.2 sin templar a 100X.....	72
Figura 43. Microestructura prueba 4.2 templada a 100X.....	72

Figura 44. Diagrama esfuerzo deformación prueba 4.1 sin templar..	74
Figura 45. Probeta 4.2 sin templar ensayada a tracción.....	75
Figura 46. Fractura irregular probeta 4.2 sin templar.....	75
Figura 47. Diagrama esfuerzo-deformación probeta 4.2.....	76
Figura 48. Probeta prueba 4.2 templada ensayada a tracción.....	76
Figura 49. Fractura irregular probeta prueba 4.2 templada.....	77
Figura 50. Determinación de la masa de la probeta.....	77
Figura 51. Colocación de la probeta dentro del vaso graduado.....	78
Figura 52. Pesado de sal en la balanza electrónica.....	79
Figura 53. Análisis químico prueba 5.....	82
Figura 54. Microestructura prueba 5 sin templar.....	83
Figura 55. Microestructura prueba 5 templada a 100X.....	84
Figura 56. Probeta cilíndrica según norma ASTM E-8 ensayo tracción.....	86
Figura 57. Diagrama esfuerzo-deformación prueba 5 sin templar.....	86
Figura 58. Probeta prueba 5 sin templar ensayada a tracción.....	87
Figura 59. Fractura irregular probeta prueba 5 sin templar.....	87
Figura 60. Diagrama esfuerzo-deformación prueba 5 templada.....	88
Figura 61. Probeta prueba 5 templada ensayada a tracción.....	88
Figura 62. Fractura irregular probeta prueba 5 templada.....	89
Figura 63. Probeta para ensayo de fatiga prueba 5 templada.....	89
Figura 64. Probeta prueba 5 sin templar ensayada a fatiga.....	90
Figura 65. Fractura Irregular probeta 5 templada, después del ensayo a fatiga.....	90
Figura 66. Diagrama Esfuerzo-Número de ciclos, prueba 5 ensayo a fatiga.....	92
Figura 67. Probeta plana para el ensayo de fatiga prueba 5.....	92
Figura 68. Fractura Irregular probeta 5 templada, después del ensayo a fatiga.....	92
Figura 69. Probeta para el ensayo de corrosión.....	93
Figura 70. Probeta prueba 5 después de 720 horas de exposición...	94
Figura 71. Microfotografía de la superficie de la probeta prueba 5...	94

Figura 72. Arena de moldeo con 7.5% de humedad.....	112
Figura 73. Disposición de los modelos de madera en la caja.....	112
Figura 74. Caja de moldeo llena de arena.....	113
Figura 75. Atacado de la arena de moldeo.....	113
Figura 76. Aplanado de la caja de moldeo.....	114
Figura 77. Modelos descubiertos de arena.....	114
Figura 78. Colocación de arena fina sobre los modelos.....	115
Figura 79. Disposición de los bebederos en la caja de moldeo.....	115
Figura 80. Atacado de la caja superior.....	116
Figura 81. Extracción de los moldes.....	116
Figura 82. Elaboración de los canales de alimentación.....	117
Figura 83. Revisión de detalles.....	117
Figura 84. Soplado de residuos de arena atrapados en los moldes..	118
Figura 85. Secado de cajas de moldeo.....	118
Figura 86. Horno de inducción FIM-ESPOCH.....	119
Figura 87. Limpieza del horno de inducción.....	120
Figura 88. Primera carga del horno de inducción con cobre.....	121
Figura 89. Reacción del zinc al añadir al cobre líquido.....	122
Figura 90. Reacción del aluminio al añadir a la colada.....	122
Figura 91. Recuperación de colada derramada.....	123
Figura 92. Verificación de fusión completa.....	123
Figura 93. Mezclado manual de la colada.....	124
Figura 94. Vaciado de la colada en la cuchara.....	124
Figura 95. Colado de cajas.....	125
Figura 96. Desmoldeo de cajas.....	125
Figura 97. Recuperación de probetas.....	126
Figura 98. Torneado de probeta ensayo de tracción.....	126
Figura 99. Probeta para ensayo de tracción según norma ASTM E-8.....	127
Figura 100. Probeta para ensayo de Fatiga según norma ASTM E-606-92.....	127
Figura 101. Probeta plana para ensayo de Fatiga.....	127

Figura 102. Determinación de la temperatura de temple de la aleación.....	128
Figura 103. Horno de tratamientos térmicos listo para retiro de probetas.....	129
Figura 104. Probetas de la aleación templadas a 850°C.....	129
Figura 105. Análisis químico aleación 75%Cu, 18,71%Zn, 6.13%Al	130
Figura 106. Corte de probeta para el análisis metalográfico en Discotom.....	131
Figura 107. Desbaste de probetas en el banco de lijas.....	131
Figura 108. Pulido de probetas en pulidora de disco.....	132
Figura 109. Ataque químico.....	132
Figura 110. Observación de la microestructura en el microscopio.....	133
Figura 111. Microestructura Aleación 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al, sin templear.....	134
Figura 112. Microestructura aleación 75%Cu, 18,71%Zn, 6.13%Al...	134
Figura 113. Curva esfuerzo-deformación aleación inteligente.....	135
Figura 114. Máquina para ensayo de fatiga FIM-ESPOCH.....	135
Figura 115. Máquina para ensayo de fatiga para probeta plana.....	137
Figura 116. Diagrama Esfuerzo-Número de ciclos, aleación inteligente con memoria de forma 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al templada.....	138
Figura 117. Ensayo de dureza aleación 75%Cu, 18,71%Zn, 6.13%Al	138
Figura 118. Colocación de la probeta dentro del vaso graduado.....	140
Figura 119. Probeta para ensayo de corrosión.....	141
Figura 120. Pesado en la balanza electrónica 35gr de sal.....	142
Figura 121. Muelle o resorte de ballesta material inteligente.....	145
Figura 122. Ubicación de la ballesta en la máquina universal.....	146
Figura 123. Ballesta de material inteligente con memoria de forma 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al superelástico, sometido a una carga en la Máquina Universal.....	146
Figura 124. Ballesta armada de tres hojas de material inteligente con memoria de forma 75%Cu, 18.71%Zn y 6.13%Al.....	147

Figura 125. Simulación del análisis estático de una viga de 194.7x12.9x5mm de material inteligente.....	148
Figura 126 Simulación del análisis no lineal de una viga de 194.7x12.9x5mm de material inteligente.....	148
Figura 127. Resorte Manufacturado y deformado por fuerza externa.	149

TABLAS.

Tabla 1. Propiedades del cobre, zinc, aluminio.....	29
Tabla 2. Intervalos característicos de temperatura de extrusión.....	44
Tabla 3. Valores de dureza HRB prueba 1 sin templar.....	59
Tabla 4. Valores de dureza HRB prueba 1 templada.....	59
Tabla 5. Valores de dureza HRB prueba 3 sin templar.....	63
Tabla 6. Valores de dureza HRB prueba 3 templada.....	63
Tabla 7. Valores de dureza HRB prueba 4.1 sin templar.....	67
Tabla 8. Valores de dureza HRB prueba 4.1 templada en agua.....	67
Tabla 9. Resultados del ensayo de tracción probeta 4.1 sin templar	69
Tabla 10. Valores de dureza HRB prueba 4.2 sin templar.....	73
Tabla 11. Valores de dureza HRB prueba 4.2 templada en agua....	73
Tabla 12. Resultados ensayo de tracción prueba 4.2 sin templar....	74
Tabla 13. Resultados ensayo de tracción prueba 4.2 templada.....	76
Tabla 14. Valores de dureza HRB prueba 5 sin templar.....	84
Tabla 15. Valores de dureza HRB prueba 5 templada.....	85
Tabla 16. Resultados ensayo de tracción prueba 5 sin templar.....	86
Tabla 17. Resultados ensayo de tracción prueba 5 templada.....	88
Tabla 18. Resultados del ensayo de fatiga prueba 5 templada.....	90
Tabla 19. Resultados de los ensayo de fatiga prueba 5 templada, probetas planas.....	91
Tabla 20. Resumen de pruebas y ensayos realizados.....	96
Tabla 21. Resultados de los ensayos a tracción.....	98
Tabla 22. Composición nominal Bariloche.....	108
Tabla 23. Resultados ensayo de tracción aleación inteligente.....	135
Tabla 24. Resultados del Ensayo de fatiga aleación inteligente.....	136

Tabla 25. Resultados del Ensayo a fatiga con probeta plana	137
Tabla 26. Valores de dureza HRB aleación 75%Cu-18,71%Zn-6.13%Al sin templar.....	139
Tabla 27. Valores de dureza HRB aleación 75%Cu-18,71%Zn-6.13%Al templada.....	139
Tabla 28. Resultados de los ensayos realizados a la aleación.....	144
Tabla 29. Rubros de gastos recursos materiales.....	150
Tabla 30. Rubros de gastos recursos humanos.....	151
Tabla 31. Rubros de gastos recursos varios.....	151
Tabla 32. Rubros de gastos recursos materiales aleación inteligente con memoria de forma superelástica 75%Cu, 18.71%Zn, 6.13%Al, prueba 5.....	152

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO**

**ESTUDIO DE LA ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE
FORMA CuZnAl PARA DETERMINAR SU APLICACIÓN INDUSTRIAL**

Autor: Ing. Segundo Manuel Espín Lagos

Tutor: Ing. Mg. Juan Correa Jácome

Fecha: Julio 24 del 2012

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se realizó cinco pruebas de fundición, hasta obtener una aleación con características de un material inteligente con memoria de forma CuZnAl, posteriormente se procedió a realizar ensayos químicos, mecánicos, y físicos para determinar sus propiedades y en función de estas se determinó su aplicación industrial, finalmente se plantea una propuesta de procedimiento para la obtención de la aleación inteligente con memoria de forma 75%Cu - 18.71%Zn - 6.13%Al, calificada como superelástica, sugiriendo varias aplicaciones. Para el desarrollo de la presente investigación se contó con la colaboración de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, con sus laboratorios y asesoramiento de sus Docentes del Área de Materiales y Resistencia de Materiales.

Descriptores: Material Inteligente, memoria de forma, tracción, flexión, fatiga, análisis metalográfico, ensayos físicos, ensayos mecánicos, superelasticidad, aplicación industrial.

**TECHNICAL UNIVERSITY OF AMBATO
CENTRE FOR POSGRADUATE STUDIES
MASTER DEGREE IN MECHANICAL DESIGN**

**STUDY OF A SMART ALLOY WITH SHAPE MEMORY CuZnAl TO
DETERMINE ITS INDUSTRIAL APPLICATION**

Author: Segundo Manuel Espín Lagos, Eng.

Tutor: M.Sc. Juan Correa Jacome, Eng.

Date: July 24th, 2012

SUMMARY

In the current investigation project, five foundry tests were done until obtaining an alloy with characteristics of a smart material with shape memory CuZnAl; subsequently chemical, mechanical, and physical testing were applied to determine its properties, as a function of them, its industrial application was determined; to finally pose a procedure proposal for the smart alloy with shape memory 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al obtaining, qualified as super elastic suggesting a variety of applications. For the development of this investigation the collaboration of the Mechanical School of the Polytechnic Superior School was required as well as labs and faculty advisory in the area of Materials and Resistance Materials.

Descriptors: Smart Material, shape memory, traction, flexion, fatigue, metallographic analysis, physical tests, mechanical tests, super elasticity, industrial application.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 TEMA:

ESTUDIO DE LA ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE FORMA
CuZnAl PARA DETERMINAR SU APLICACIÓN INDUSTRIAL.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 CONTEXTUALIZACIÓN

Las aleaciones inteligentes con memoria de forma al ser unos materiales con nuevas propiedades, abren un nuevo campo de aplicaciones tecnológicas respecto a los materiales convencionales. Estas aleaciones además de presentar las propiedades típicas de un metal, presentan otras propiedades que las hacen diferentes de estos, como es la superelasticidad y el efecto memoria de forma. Se conocen diferentes familias de materiales con memoria de forma entre los que destacan los polímeros, los cerámicos y los metales. Dentro de los metales tres grupos son los más importantes: las aleaciones base NiTi utilizadas en la actualidad, sobre todo en el campo biomédico debido a su biocompatibilidad, las aleaciones base cobre muy utilizadas en investigación por sus buenas propiedades de memoria de forma, y por último las aleaciones férreas con memoria de forma que están en proceso de desarrollo, pero que su buena resistencia a la corrosión y bajo costo, las hace tener un futuro prometedor.

En Estados Unidos de Norteamérica, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts Cambridge, Rashmi Bhavsar, Nitim Vaidya y otros, en el 2008, estudiaron el mecanismo del efecto memoria de forma, determinando que al enfriarse, la fase de austenita de alta temperatura, con una red cúbica centrada en la cara, se convierte en la fase martensítica de baja temperatura. Debido a los esfuerzos experimentados durante el enfriamiento, la martensita producida a partir de la austenita experimenta un proceso de maclado de cristales: la formación de capas adyacentes relacionadas por simetría especular. La deformación remueve el maclado. La martensita demaclinada posee una red cristalina tetragonal. El calentamiento de la martensita demaclinada deformada la convierte nuevamente a la fase de austenita¹, como se observa en la figura 1.

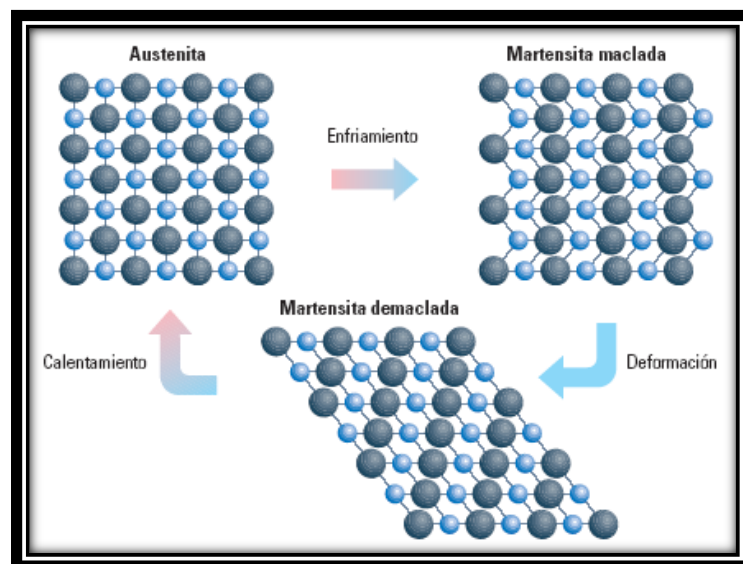


Figura 1. Mecanismos del efecto memoria de forma. (Fuente: Rashmi Bhavsar, Nitim Vaidya y otros. 2008)

En Barcelona - España, en el departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Politécnica de Catalunya, en el 2000, Francisco Javier Peña Andrés, realiza el estudio sobre la Caracterización

¹Rashmi Bhavsar ,Nitim Vaidya y Otros. (2008). Artículo sobre Inteligencia en materiales Innovadores.

de la cinética de crecimiento de grano, desgaste y corrosión en aleaciones inteligentes con memoria de forma base cobre para aplicaciones tecnológicas².

En San Carlos de Bariloche Argentina, En la Universidad Nacional de Cuyo, en marzo del 2006, Eugenia Zelaya, realiza el estudio sobre la Estabilidad de fases bajo Irradiación en aleaciones con memoria de forma base cobre, determinando los efectos de la irradiación sobre la estabilidad de fases que intervienen en una transformación martensítica, se emplearon diferentes tipos de partículas y de energía en los experimentos de irradiación, El primer tipo de irradiación fue llevado a cabo con electrones de 2.6 Mev, el segundo con iones de cobre de 170 Kev y 300 Kev y el tercero con iones rápidos y pesados con energías entre 200 MeV y 600 MeV. La implantación de iones de cobre produce un cambio de estructura de la fase β en aleaciones de CuZnAl a una fase compacta cuya estructura depende de la fluencia de irradiación. Se estudiaron los cambios en los parámetros de red en fase martensítica inducidas por inducción mediante la técnica de difracción de electrones de haz convergente. Los cambios observados no estarían relacionados con el proceso convencional de estabilización de la martensita³.

En la Universidad Santiago de Chile, en enero del 2008, Pablo Cecil Salvador Gibson Torres, realiza el estudio sobre la fabricación y caracterización de una aleación con memoria de forma CuZnAl considerada para disipadores sísmicos, el objetivo fue producir una aleación CuZnAl con memoria de forma y caracterizarla, teniendo en vista aplicaciones de disipación de energía sísmica. El material permitió ensayar probetas de tracción con un diámetro útil de 12.7mm, para comparar resultados con estudios previos donde solo se trabajó con diámetros de hasta 8mm. La composición objetivo era 75.4%Cu, 16.9

² PEÑA ANDRÉS, Francisco Javier.(2000).Tesis de grado. Caracterización De la Cinética de crecimiento de grano, desgaste y corrosión en aleaciones inteligentes con memoria de forma base cobre para aplicaciones tecnológicas. Universidad Politécnica de Cataluña.

³ ZELAYA, Eugenia. (2006). Tesis de grado. Estabilidad de fases bajo irradiación en aleaciones con memoria de forma base cobre. Universidad Nacional de Cuyo y C.N.E.A.

%Zn, y 7.7 %Al, que corresponde a una aleación superelástica. Para los diámetros de 12.7mm aquí empleados se obtuvo valores y patrones de evolución de parámetros clásicos y superelásticos similares a los encontrados por otros autores a menores diámetros en aleaciones similares⁴.

En la Universidad de Santiago de Chile, En enero del 2009, Guillermo Octavio Astorga Faúndez, realiza el estudio del modelo mediante lógica difusa que representa el comportamiento de barras de CuZnAl. Para alcanzar el objetivo planteado se trabajó con dos sets de datos distintos, los cuales fueron obtenidos de ensayos dinámicos a tracción realizados a dos tipos distintos de barras (laminadas y extruidas). Las barras provienen de la misma colada pero el proceso de preparación de las probetas fue distinto. Los ensayos se realizaron variando distintos parámetros que influyen en el comportamiento dinámico de las barras. Para el caso de las barras laminadas se varió la deformación máxima, diámetro de la probeta y la frecuencia de ensayo. En el caso de las barras extruidas, los parámetros que se variaron fueron: La temperatura ambiente, frecuencia de ensayo y el número de ciclos. Estos dos tipos de barras se comportaron de manera distintas en los ensayos de laboratorio, por lo que se plantearon dos modelos difusos distintos. Como son muchas las variables que influyen en un modelo difuso, se realizó un análisis de sensibilidad en donde se determinó la influencia que tienen algunas variables en la obtención de un buen modelo difuso. Identificadas las variables y parámetros que más influyen y que determinan un buen modelo difuso se pudo obtener un modelo para cada tipo de barra. El principal resultado del análisis de sensibilidad fue que la frecuencia de ensayo no influyó en la realización de un buen modelo difuso, es importante considerar datos de chequeo que sean representativos del

⁴ GIBSON TORRES, Pablo Cecil Salvador. (2008). Tesis de grado. Fabricación y Caracterización de una aleación con memoria de forma CuZnAl considerada para disipadores sísmicos. Universidad Santiago de Chile.

fenómeno que se está estudiando, una buena medida es considerar datos intermedios de los datos de entrenamiento⁵.

En nuestro País hasta el momento, no se conoce de ningún estudio realizado sobre materiales inteligentes con memoria de forma CuZnAl, es por esta razón que he tomado la iniciativa en realizar ésta Investigación, en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica, de la Universidad Técnica de Ambato y con el apoyo de los Laboratorios de Tratamientos Térmicos, Resistencia de Materiales y Taller de Fundición de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

1.2.2 ANÁLISIS CRÍTICO

Debido a la limitada investigación de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl (Cobre, Zinc, Aluminio), no se ha podido desarrollar nuevas aplicaciones industriales y productos de calidad por desconocimiento de sus propiedades.

Este tipo de aleación, nos ofrece grandes expectativas para aplicaciones Industriales, y es esta razón que nos motiva a profundizar este estudio, para determinar parámetros desconocidos por los ingenieros de diseño, lo que limita su aplicación industrial.

Tecnológicamente es factible de realizarlo, la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato cuenta con los equipos necesarios y el personal técnico para ésta investigación, cuyos resultados serán aprovechados por los Ingenieros para desarrollar nuevos productos en nuestra Universidad y en nuestro País.

⁵ ASTORGA FAÚNDEZ , Guillermo Octavio. (2009). Tesis de grado. Modelo mediante lógica difusa que representa el comportamiento de barras de CuZnAl. Universidad Santiago de Chile.

1.2.3 PROGNOSIS

La falta de estudio en el área de materiales inteligentes limitaría la competitividad industrial de nuestro país.

1.2.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿La determinación de parámetros y procesos de manufactura de materiales inteligentes con memoria de forma CuZnAl mejorará calidad y productividad en nuestro medio?

1.2.5 PREGUNTAS DIRECTRICES

¿Cuál será el proceso de obtención de la aleación Inteligente con memoria de forma CuZnAl más apropiado?

¿Cuál será la composición apropiada para la aleación Inteligente con memoria de forma CuZnAl?

¿Las normas ASTM permitirán ensayar la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl?

¿Qué propiedades presentará la aleación Inteligente con memoria CuZnAl obtenida?

¿Qué aplicación industrial se podrá dar a la aleación Inteligente con memoria de forma CuZnAl?

1.2.6 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.6.1 Delimitación de contenido

Los parámetros están enmarcados dentro del campo de Ingeniería Mecánica, específicamente dentro de las líneas de investigación de nuestra maestría que son materiales para ingeniería y diseño mecánico,

para lo cual se hizo uso de la red virtual y biblioteca física, empleando normas y demás documentación relacionadas al ensayo de materiales.

1.2.6.2 Delimitación espacial

La presente investigación se realizó en la Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica, campus Huachi. La obtención de la Aleación se realizó en el taller de Fundición, de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, utilizando el horno de Inducción, el Temple y los Ensayos de Tracción se lo realizaron en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo porque al momento se encontraban descalibrados y en reparación los equipos de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

1.2.6.3 Delimitación temporal

La ejecución de esta investigación sobre el estudio de la aleación inteligente con memoria CuZnAl para determinar sus propiedades y aplicación industrial se realizó durante el periodo establecido de Julio 2011 – Mayo 2012

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los materiales con memoria de forma también llamados materiales inteligentes poseen propiedades que los diferencian del resto de materiales. Estas propiedades no son propiedades mejoradas respecto a los materiales convencionales, sino que son nuevas propiedades que hacen que el proceso de diseño con materiales deba ser modificado.

La comprensión de estas nuevas propiedades y la estandarización de todos los parámetros que las caracterizan por parte de todas aquellas

personas involucradas en el proceso de diseño, harán que estos materiales adquieran una importancia industrial que aún no tienen. En este estudio se describen las propiedades que caracterizan a este tipo de aleación, a la vez, que se hizo un análisis de sus posibles aplicaciones.

Las aleaciones con memoria de forma se conocen desde hace aproximadamente unos 60 años, si bien, es sólo hace 30 años cuando comienzan a aparecer sus primeras aplicaciones. El progreso de estos materiales ha sido lento, en primer lugar debido a que su desarrollo ha necesitado de una tecnología nueva: el origen y los mecanismos que dan lugar a las propiedades de memoria de forma son bien conocidos actualmente, no pudiendo decir lo mismo de los aspectos ingenieriles. En segundo lugar a que estos materiales son bien conocidos por la comunidad científica, pero no así por los diseñadores e ingenieros de diseño.

Las nuevas aleaciones, no son simplemente un nuevo tipo de material como pueden ser las aleaciones de titanio o las superaleaciones, se presentan como una nueva filosofía en el campo de la ingeniería y el diseño. Es este hecho, el responsable de que los parámetros de diseño utilizados para este tipo de materiales, sean diferentes a los utilizados para la mayoría de los materiales funcionales. Así, parámetros de diseño como son el límite elástico, la resistencia máxima, el módulo elástico, la ductilidad, entre otros, son reemplazados por propiedades o parámetros tales como: tensión de recuperación, velocidad de recuperación, temperatura de transformación, histéresis térmica, etc.

El conocimiento de estos materiales abre nuevas posibilidades en el campo del diseño y la ingeniería de diseño.

En nuestro país, hasta este momento no existen investigaciones sobre los materiales inteligentes con memoria de forma CuZnAl. En la provincia de Tungurahua tampoco existen investigaciones conocidas, es por este

hecho, que he tomado esta iniciativa, ya que es una investigación factible de realizarla, lo cual contribuirá en el desarrollo de nuevas aplicaciones de este tipo de materiales, aportando de alguna manera al desarrollo industrial de nuestra provincia y al engrandecimiento de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

1.4 OBJETIVOS

1.4.5 Objetivo general

Determinar los parámetros de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl para su aplicación industrial.

1.4.6 Objetivos específicos

- Determinar el proceso de obtención de la aleación Inteligente con memoria de forma CuZnAl más apropiado.
- Determinar la composición química apropiada de la aleación inteligente con memoria de forma.
- Ensayar la aleación obtenida mediante normas ASTM (E-3, E-7, E-8, E-9, E-18, E-112, E-606, B- 593, E-G1-03, B117-02)
- Determinar sus propiedades metalográficas, químicas y mecánicas.
- Determinar su posible aplicación industrial.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes investigativos

La primera observación recordada acerca de transformaciones de aleaciones con memoria fue vivida por Chang y Read en 1932.

Ellos notaron una reversibilidad de transformación en AuCd con observaciones metalográficas y cambios de resistencia, y en 1951 el efecto de memoria en las formas fue observado en varias barras de AuCd. En 1938, la transformación fue observada en latón (CuZn). Sin embargo, no fue sino hasta 1962, cuando Buehler y asociados descubrieron el efecto en el equiatómico níquel-titanio (NiTi) marcando el comienzo serio de la investigación tanto en la metalurgia como de sus aplicaciones. En 1965, la primer serie de aleaciones metálicas de níquel y titanio fueron producidas por el Laboratorio de Ordenanza Naval. En el plazo de 10 años, un buen número de productos estaba en el mercado, y el entendimiento del efecto era mucho más avanzado. El estudio de estas aleaciones inteligentes ha continuado incrementándose desde entonces, y más productos que usan estos materiales salen al mercado cada año.

A medida que el efecto en cuestión fue comprendido, otro número de aleaciones que exhibían la propiedad fueron investigadas. Aunque una amplia gama de aleaciones es conocida por exhibir un efecto de memoria en su forma, solo aquellas que son capaces de recobrar una sustancial tensión o generar una significativa fuerza, son de interés comercial. Como

dato, estas han sido aleaciones de níquel-titanio y aleaciones a base de cobre tales como CuZnAl y CuAlNi.

Esta propiedad inteligente es el resultado de la habilidad de la sustancia de sobrellevar un cambio de fase, una especie de ballet atómico en el cual los átomos en el sólido cambian sutilmente su posición respondiendo a un estímulo como cambio de temperatura o aplicación de fuerza mecánica. Una demostración simple es doblar una muestra, luego exponerla a una fuente de calor como un secador de pelo o agua caliente. La muestra recupera su forma original en cuanto su temperatura se eleva por sobre la temperatura correspondiente al cambio de fase. Esta temperatura dependerá de la variación de la proporción de átomos de la aleación correspondiente.

2.2 Fundamentación filosófica

La presente investigación está ubicada en el paradigma crítico propositivo; crítico porque aporta a una realidad de avances tecnológicos en el área de materiales y propositivo por cuanto busca plantear una alternativa de solución a la escasa disponibilidad de materiales inteligentes, y desconocimiento de sus propiedades para los ingenieros de diseño, lo cual limita la aplicación industrial y desarrollo de nuevos productos.

2.3 Fundamentación legal

La presente investigación se desarrollará basada en las normas técnicas ASTM:

- ASTM E-3 Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens¹
- ASTM E-7 Standard Terminology Relating to Metallography¹

- ASTM E-8 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials¹
- ASTM E-18 Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials^{1,2}
- ASTM E-112 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size¹
- ASTM E-606 Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing¹
- ASTM B-593 Standard Test Method for Bending Fatigue Testing for Copper-Alloy Spring Materials¹
- ASTM B-117 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus¹
- ASTM G1-03 Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation corrosion Test Specimens¹

2.4. Fundamentación Teórica

2.4.1 Aleaciones con memoria de forma

Las aleaciones con memoria de forma, o "Shape Memory Alloys" (SMA) se define como aquellos materiales capaces de "recordar" su forma y capaces de volver a esa forma incluso después de haber sido deformados. Este efecto de memoria de forma se puede producir por un cambio térmico o magnético.

Tales comportamientos se deben a los cambios en las características cristalográficas que pueden ocurrir en la aleación. El cristal puede estar en dos distintas fases, en fase austenita o en otra llamada martensita. La fase austenita, o fase β , tiene una alta simetría y es estable a altas temperaturas y a bajos niveles de tensión. La fase martensita, es usualmente la fase estable a bajas temperaturas y altos niveles de tensión. Presenta una baja simetría y su ordenamiento depende del tipo de austenita de donde proviene.

El concepto básico detrás de las aleaciones con memoria de forma es la transformación martensítica que ocurre en la microestructura del material una vez que se le ha aplicado un esfuerzo externo. Esta transformación, según sea el caso, puede ser reversible, vale decir, bajo determinadas condiciones se puede volver al estado austenítico o martensítico inicial, es decir, recuperar su forma. El efecto superelástico está ligado a lo anterior, en el cual la transformación de austenita a martensita se realiza mediante una deformación elástica o maclado, proceso que es reversible una vez retirado el esfuerzo que lo provocó. La memoria de forma ocurre en presencia inicial de estructura martensítica. Dependiendo del tipo de aleación y tratamiento térmico se aplica cierta temperatura a la pieza, la cual hace estable la fase austenítica nuevamente, retornando así a la forma original.

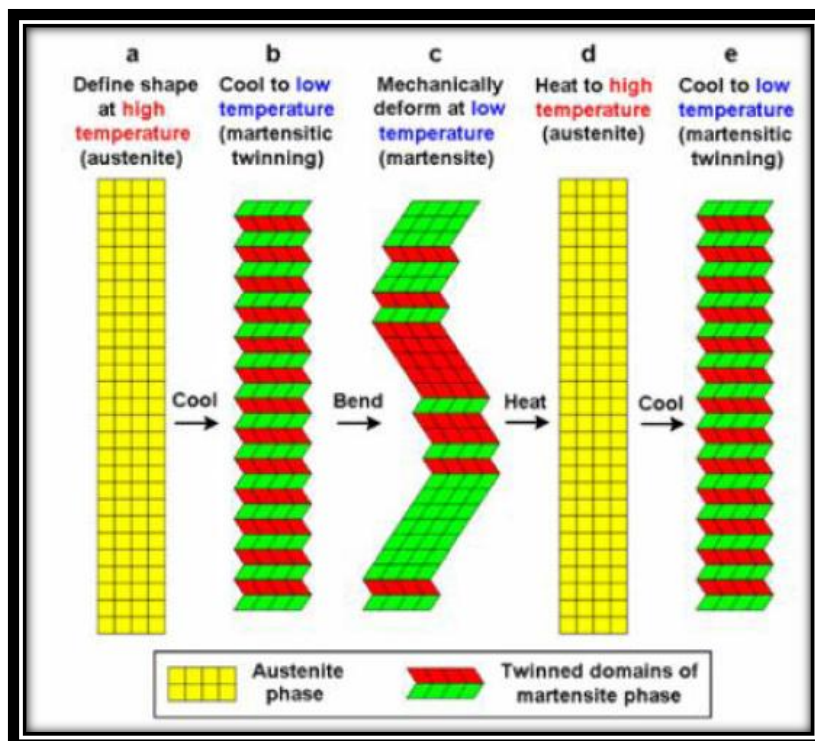


Figura 2. Ciclo de calentamiento y enfriamiento en un SMA (Fuente: Pablo Cecil Salvador Gibson Torres. Tesis de grado, Santiago de Chile, Agosto 2008)

Estas transformaciones de fases poseen gran interés ingenieril debido a que bajo esfuerzos presentan un comportamiento mecánico inusual:

disipan energía en el momento de la carga y la descarga, es decir, el área bajo la curva Carga-Descarga es distinta de cero. Cada fase presenta distintos porcentajes de amortiguamiento de energía según su microestructura.

Una característica particular y que ayuda mucho a su identificación es la forma de agujas que presenta en la estructura metalográfica de la figura 3.

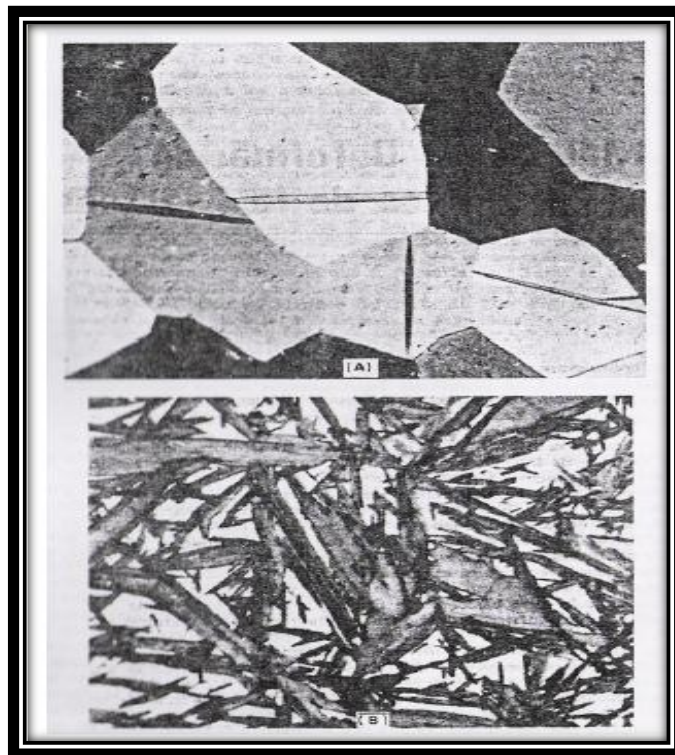


Figura 3. A) Maclas de deformación, B) Placas de martensita (Fuente: Pablo Cecil Salvador Gibson Torres. Tesis de grado, Santiago de Chile, Agosto 2008)

En ausencia de tensiones, la cantidad de cristales en fases α y β depende de la temperatura ambiente. La Figura 4, muestra el ciclo de temperaturas típico de un material SMA. Ms y Mf corresponden a las temperaturas de inicio y término de la transformación martensítica respectivamente, As y Af, temperaturas de inicio y de fin de la transformación austenítica. Por lo tanto, es posible calentar un material que se encuentre 100% en martensita y obtener 100% de austenita.

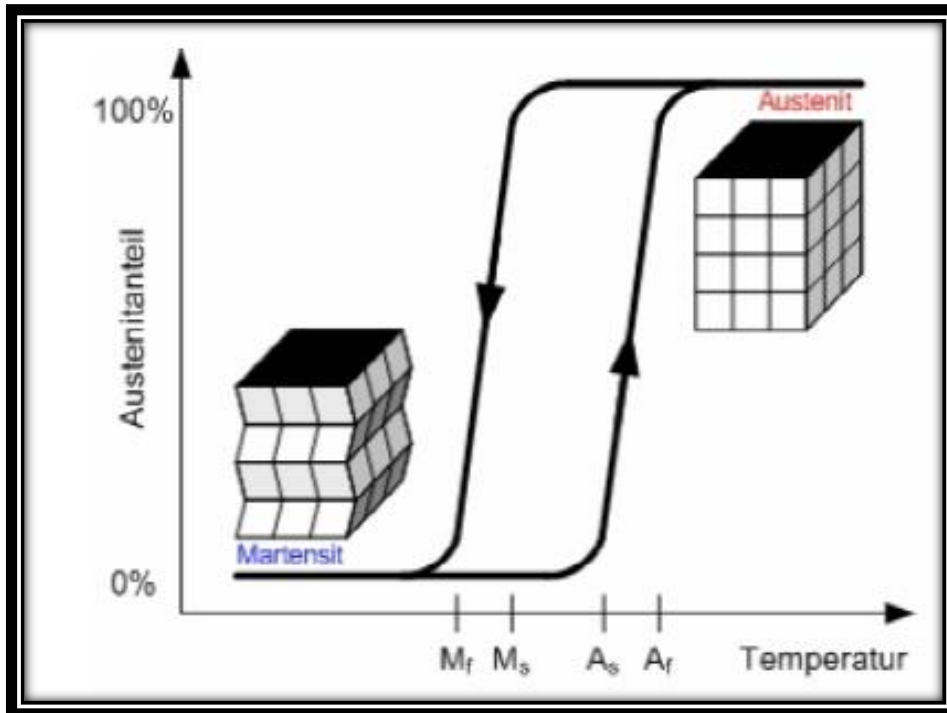


Figura 4. Ciclo de temperaturas típico de un material SMA.
(Fuente : Otsuka & Wayman, 1998).

2.4.1.1 Clasificación de los materiales Inteligentes

La clasificación más general que se hace de este tipo de materiales es según las fuerzas aplicadas al material: Campos térmicos o Magnéticos.

a) Materiales con memoria de forma

- Aleaciones con memoria de forma
- Polímeros con memoria de forma
- Cerámicos con memoria de forma
- Aleaciones con memoria de forma ferromagnéticas

b) Materiales electro y magnetoactivos

- Materiales electro y magnetoreológicos
- Materiales piezoeléctricos
- Materiales electro y magnetorestrictivos

c) Materiales foto y cromoactivos

- Electroluminiscentes
- Fluorescentes
- Fosforescentes
- Fotocrómicos
- Termocrómicos
- Electrocrómicos

2.4.2 Efecto memoria de forma

El efecto memoria de forma (SME), corresponde al fenómeno producido cuando es posible recuperar una deformación previa, por medio de un ciclo de calor.

El SME es un fenómeno tal que, cuando una muestra es deformada a una temperatura bajo A_s , ésta recupera su forma original gracias a la transformación reversible producida al calentar el material a una temperatura sobre A_f . La deformación recuperable puede ser de tipo tracción, compresión y torsión. Específicamente, este comportamiento se presenta cuando la deformación se aplica por debajo de la temperatura M_f , o entre M_f y A_s , temperatura donde la martensita comienza a ser inestable.

Dependiendo del régimen de temperatura, el mecanismo del SME es ligeramente diferente, dicho mecanismo es esquematizado en la Figura 5.

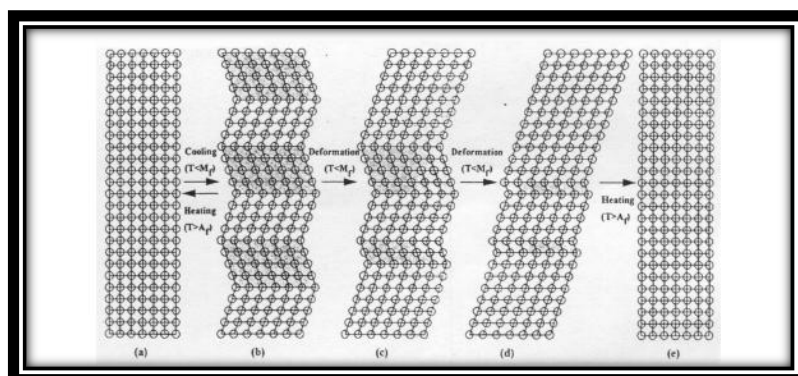


Figura 5. Modelo esquematizado del proceso del efecto de forma.

(Fuente: Otsuka&Wayman, 1998)

En la Figura 5 es posible observar un mono cristal que originalmente se encuentra en fase austenita (a), con un enfriamiento posterior hasta una temperatura menor que M_f pasa a transformarse en martensita auto acomodada, en distintas variantes, sin producir un cambio de forma en la muestra (b). Así si se aplica un esfuerzo externo, los bordes de macla se desplazan para acomodarse al esfuerzo, logrando que las variantes originalmente observadas comiencen a unificarse en sólo una variante si el esfuerzo aplicado es lo suficientemente alto (c y d). Una vez obtenida martensita casi totalmente orientada en sólo una variante, la muestra es calentada hasta una temperatura mayor a A_f , logrando así transformación cristalográficamente reversible para obtener nuevamente la fase original (d). En el caso que el esfuerzo externo aplicado no sea a temperatura menor que M_f , si no que una temperatura mayor que M_f pero a la vez menor que A_s ($M_f > T > A_s$) la transformación de martensita inducida por esfuerzo también colabora a la deformación, sumando su efecto, por lo que el mecanismo de SME es esencialmente igual al explicado anteriormente.

2.4.3 Superelasticidad (SE)

El efecto de memoria de forma (SME), muestra que el efecto es tanto térmico como mecánico. El efecto superelástico es otro tipo de memoria de forma, el cual es independiente de la temperatura. La superelasticidad de un material ocurre cuando éste se encuentra a una temperatura mayor que A_f , es decir, cuando existe 100% austenita. A estos niveles de temperatura el estado austenita es estable a bajas deformaciones. Si se aplica una carga induciendo grandes deformaciones sobre el material, la microestructura se acomoda hasta llegar a una fase que es más estable a grandes tensiones (fase martensita). Luego, si el material es descargado, se producirá el efecto de memoria de forma, debido al hecho que la martensita es inestable a temperaturas superiores a A_f , y en consecuencia, el material recuperará su estado estable (austenita)

quedando sin deformaciones remanentes y generando ciclos de histéresis, que se reflejan en una disipación importante de energía. Este comportamiento se ilustra en la Figura 6.

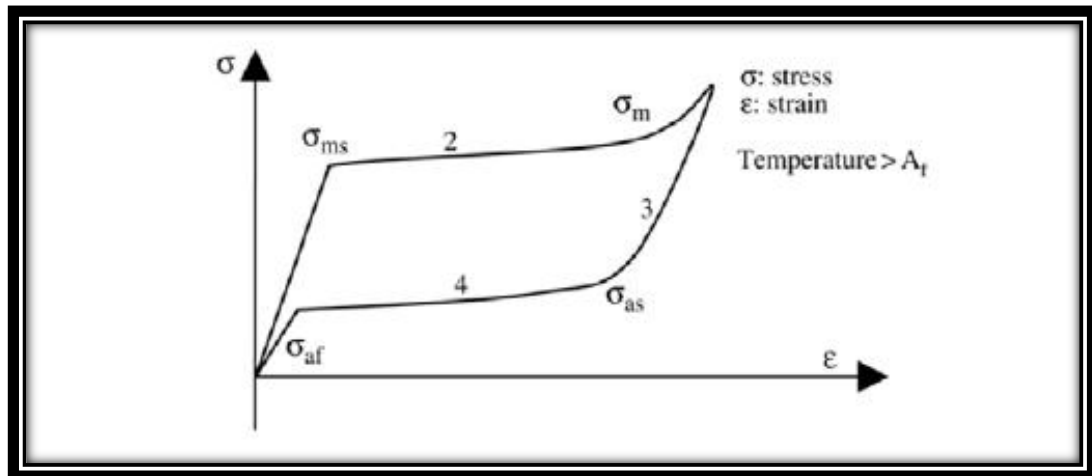


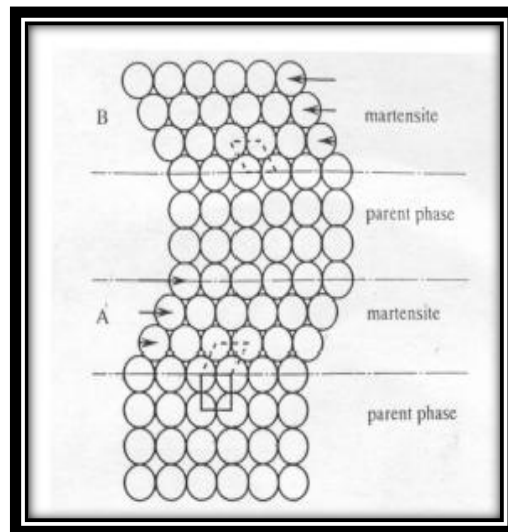
Figura 6. Curva tensión - deformación típico de un material superelástico.
(Fuente: Otsuka & Wayman, 1998)

2.4.4 Transformación Martensítica por Temple

La transformación de fases presente en los SMA se conoce como transformación martensítica (MT), consiste básicamente en la transformación de la fase Madre (Austenita) en Martensita como resultado del tratamiento térmico llamado Temple.

Usualmente la Austenita (fase de alta temperatura) es de disposición atómica cúbica, a diferencia de la Martensita (fase de baja temperatura) que presenta poca simetría. La MT es de carácter adifusional (sin movimiento de átomos en largas distancias), lo que en ella ocurre es un reordenamiento "militar" (movimiento masivo en una única dirección) debido a esfuerzos de corte y cizalle en los planos cristalográficos más densos y de posible movimiento. El movimiento produce distorsión de volumen y fundamentalmente, en este caso, una estructura cristalina diferente que provoca un cambio de fases.

En la figura 7 se esquematiza la transformación, cuando la temperatura se baja hasta un valor menor que una temperatura crítica, la MT comienza a suceder por medio de un mecanismo denominado corte. Debido a la baja simetría que presenta la martensita, muchas variantes de ella es posible encontrar, la martensita de las zonas A y B poseen la misma estructura pero orientación diferente.



**Figura 7. Modelo esquematizado de la transformación martensítica.
(Fuente: Otsuka&Wayman. 1998)**

Luego si se eleva la temperatura hasta un valor donde la martensita se vuelve inestable la transformación es reversa (RT) y gracias al carácter cristalográficamente reversible que posee, la martensita regresa a la orientación original de su fase madre. Así aunque los desplazamientos atómicos relativos son pequeños (comparados con la distancia interatómica) un cambio de forma microscópico aparece asociado a la transformación.

Cuando se temple un SMA desde la fase Austenita, debido a un mecanismo de corte se produce la transformación martensítica. El proceso de formación de martensita se genera por nucleación y crecimiento de la estructura cristalina asociada a esa fase, se produce de manera autoacomodante, es decir, cada aguja de martensita se orienta

según un ordenamiento que obedece a una regla de compatibilidad de deformaciones en las orientaciones de martensita que se van formando. (Saldivia, 2000)

2.4.5. Efecto de superelasticidad (SE)

El efecto de superelásticidad es un tipo de memoria de forma independiente de la temperatura o calentamiento post-deformación. Este efecto se da en el rango de temperaturas $M_s - M$ antes descritos. Al aplicar la tensión en ese rango se induce la transformación de austenita a martensita y una vez liberada la tensión se produce la transformación inversa con la consecuente recuperación de la forma original. Lo anterior se debe a que a temperatura ambiente la fase de alta energía (austenita) se hace estable, esto mediante tratamientos termomecánicos adecuados según el material en uso⁶.

2.4.6. Condiciones para SME y SE

Existe una relación entre SME y SE que se esquematiza en la Figura 8, la presencia de cualquiera de los dos efectos en un mismo material depende en conjunto de la composición, la temperatura de trabajo y la no superación de esfuerzos críticos que provocan desplazamientos cristalográficos irreversibles.

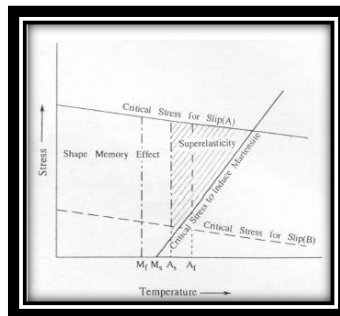


Figura 8. Zona de superelasticidad en función de esfuerzo y temperatura.

(Fuente: Otsuka & Waymen, 1998)

⁶ GIBSON TORRES, Pablo Cesil Salvador. (2008). Fabricación y caracterización de una aleación con memoria de forma CuZnAl considerada para disipadores sísmicos. Santiago de Chile.

De la Figura 8 se observa que SME ocurre bajo As (con posterior calentamiento sobre Af) y SE sucede sobre Af, donde la martensita es totalmente inestable ante la ausencia de esfuerzo.

Existen además rectas que localizan los efectos, simbolizando las zonas donde se encuentra el esfuerzo crítico para inducir martensita y el esfuerzo crítico para encontrar desplazamientos (rectas A y B). Además de las condiciones anteriores, es posible de encontrar SME y SE en aleaciones termoelásticas y aleaciones ordenadas. La razón de porque las aleaciones termoelásticas son favorecidas por SME y SE, se debe en parte a la pequeña fuerza conductora necesaria para la transformación, lo cual evita la introducción de dislocaciones y la presencia de maclas. La estructura ordenada favorece la falta de deslizamientos cristalográficos, puesto que este tipo de estructura usualmente tiene un mayor esfuerzo crítico necesario para producir deslizamiento que en una estructura desordenada.

De los argumentos anteriores es de esperar que las características de SME y SE puedan ser mejoradas por endurecimiento de la aleación termoelástica. Desde el punto de vista metalúrgico físico se puede aumentar el esfuerzo crítico de deslizamiento con: solución endurecida, endurecimiento por precipitación, y endurecimiento por aplicación de trabajo.

2.4.7 Aleaciones memoria de forma Base Cobre

Las aleaciones Ti-Ni SMA, junto a sus buenas propiedades como SME, tienen además buenas propiedades en ductilidad y resistencia a la corrosión, sin embargo, son demasiadas costosas en comparación con las aleaciones de Cobre, que por su parte tienen en comparación ventajas en conductividad eléctrica, conductividad térmica y deformabilidad. En las aleaciones binarias base cobre, y en especial en la aleación CuZn,

habitualmente son agregados elementos ternarios, para aumentar la temperatura de cambio de fase M_s y estabilizar la fase β . Así, por ejemplo, la aleación CuZnAl mejora sus propiedades respecto a ductilidad y fractura de límite de grano. Además del Aluminio se conocen distintos elementos posibles de actuar como elementos ternarios y cuaternarios que junto a modificar las temperaturas de transformación sirven de afinadores de grano. Ejemplo de estos elementos que son posibles de agregar en las aleaciones SMA, CuAl y CuZn son: Al, Si, Be para modificar temperaturas de transformación, y Ti, Zr y B para afinar el tamaño de grano.

En la Figura 9, se esquematiza la relación entre la composición de la aleación ternaria CuZnAl y su respectiva temperatura de transformación de fase M_s , en la Figura es posible observar que la temperatura M_s de la aleación SMA, puede ajustarse entre aproximadamente 173°K y 473°K, según la composición establecida.

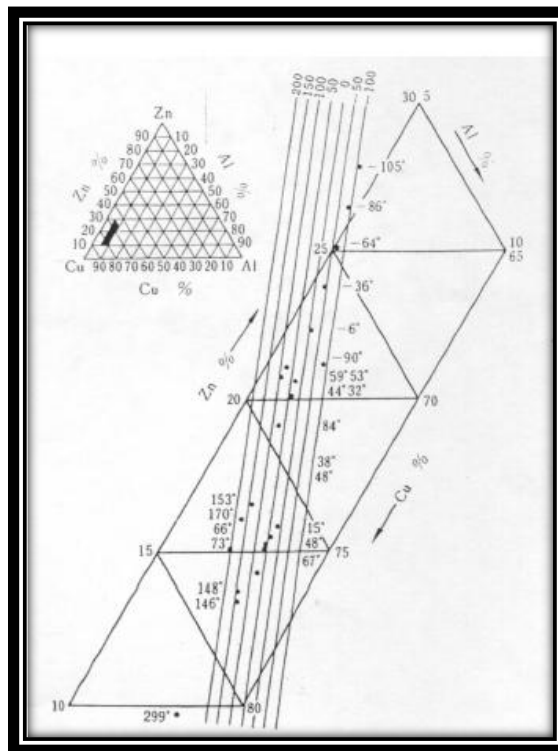


Figura 9. Relación entre temperatura M_s y composición de aleación CuZnAl.
(Fuente: Otsuka&Wayman 1998)

Cabe destacar que aunque el esquema sólo muestra la relación entre la temperatura M_s y la composición de la aleación, las temperaturas de cambio de fase están también influenciadas por otros factores como, los tratamientos de calor efectuados sobre el material, la rapidez del templado, el tamaño de grano y el número de ciclos efectuados. Como ejemplo representativo de la influencia de estos últimos factores se establece experimentalmente que a menor tamaño de grano la temperatura M_s tiende a ser menor que en una muestra análoga de mayor tamaño de grano.

2.4.8 Aleación CuZnAl

Según estudios y experimentación previa, existen aleaciones con elemento base Cobre que tiene comportamiento con memoria de forma. Algunos investigadores se enfocan a la aleación ternaria 75% Cu, 17.04% Zn, 7.24% Al, que según la información bibliográfica y experimental previa presenta efecto superelástico. Como se desconoce o no existe el diagrama ternario que represente el actuar de los tres elementos en forma continua y simultánea, el análisis se realiza según dos enfoques distintos y posibles de comparar a futuro: la ecuación de Zn equivalente que transforma el valor de Zn según la cantidad de Al en el diagrama CuZn (Figura 10) y los diagramas CuZn para distintos porcentajes de Al.

Las aleaciones Cu-Zn-Al poseen mayor ductilidad y resistencia a la fractura Intergranular

2.4.9 Diagramas de fases

Para encontrar las temperaturas de transformación de fases es necesario contar con el diagrama de fases ternario Cu-Zn para un determinado % de

Al o con el diagrama binario Cu-Zn, incluyendo la ecuación del $Zn_{\text{equivalente}}$ según el porcentaje de átomos de aluminio⁷.

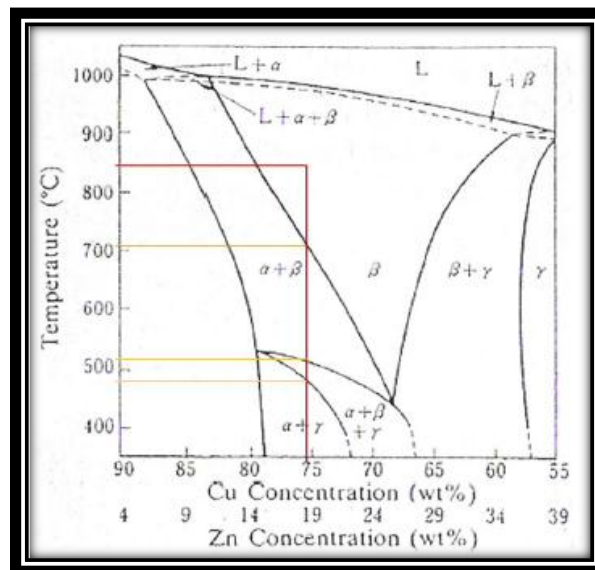


Figura 10. Diagrama de fases ternario Cu-Zn-6%Al. (Fuente: GIBSON TORRES, Pablo Cecil Salvador. 2008. Fabricación y caracterización de una aleación con memoria de forma CuZnAl considerada para disipadores sísmicos. Santiago de Chile)

La Simbología es la siguiente:

α = Solución primaria de Cu, FCC. Fase ploma oscura en solución en la matriz de austenita. Fase maleable a temperatura ambiente.

β = Fase austenítica desordenada de alta temperatura, ordenamiento tipo B2→9R (martensita), cristal FCC. Fase más clara, correspondiente a la matriz. Fase maleable a altas temperaturas.

γ = Cu₅Zn₈, fase cúbica inmersa en la perlítica y alrededor de la solución primaria. Fase de color negro.

$\alpha+\beta$ = Estructura eutectoide característica o Perlita.

⁷GIBSON TORRES, Pablo Cesil Salvador. (2008). Fabricación y caracterización de una aleación con memoria de forma CuZnAl considerada para disipadores sísmicos. Santiago de Chile.

2.4.10 Zinc Equivalente (Zn_{equiv})

La presencia de otros elementos de aleación puede modificar las propiedades intrínsecas de las fases presentes o modificar la proporción entre las fases. De acuerdo a la teoría de Guillet todas las adiciones hechas a los latones binarios pueden evaluarse en un “equivalente en Zn”, pasándose así a un porcentaje equivalente (ficticio) de zinc:

$$Zn_{equiv} = 100 - Cu\% \cdot \frac{100}{100 + X\%(k-1)} \quad (1)$$

Donde:

X = es el porcentaje del elemento de aleación.

k = es el coeficiente de equivalencia en Zn.

Algunos coeficientes k son los siguientes:

Ni = -1.2, Co = -1, Pb = 0, Mn = 0.5, Cd = 0.7, Fe = 0.9, Sn = 2, Al = 6,

Si = 10

De esta fórmula resulta que los elementos con $k < 1$ aumentan la proporción de fase α , mejorando la maleabilidad en frío, en cambio, aquellos con $k > 1$ aumentan la proporción de β , mejorando la aptitud al conformado en caliente⁸.

Ahora que se conoce la ecuación Zn_{equiv} , se puede analizar el diagrama binario Cu-Zn:

⁸ GIBSON TORRES, Pablo Cesil Salvador. (2008). Fabricación y caracterización de una aleación con memoria de forma CuZnAl considerada para disipadores sísmicos. Santiago de Chile.

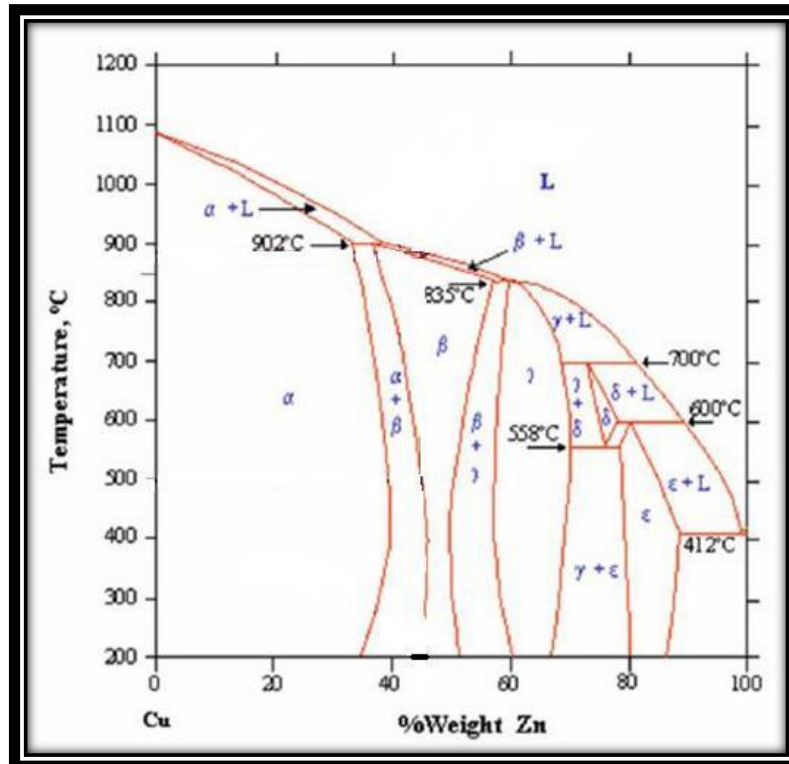


Figura 11. Diagrama de fases ternario Cu-Zn. (Fuente: Otsuka K, and Wayman C. 1998. Shape Memory Materials, Cambridge University Press, New York.)

2.4.11 Comportamiento mecánico en monocristales vs policristales

Los materiales SMA, poseen un comportamiento mecánico distinto, dependiendo de si son monocristales o policristales. Una de las propiedades características de los SMA policristalinos, en relación con un monocristal, es que su deformación recuperable es considerablemente menor en comparación con un monocristal, debido a que la deformación producida es diferente en cada grano, lo que conlleva una recurrente y fácil fractura de bordes de grano.

En el caso de CuZnAl la aleación es dúctil, incluso en estado policristalino, donde el efecto SE soporta esfuerzos de aplicación sobre 300 MPa. La explicación de este comportamiento está relacionada con el carácter de estructura ordenada que presenta su fase Austenítica.

2.4.12 Comportamiento en fractura

Los policristales SMA son frágiles y susceptibles a la fractura intergranular, aunque sean templadas desde austenita. La razón de esta fragilidad no está relacionada con la segregación de impurezas en los límites de grano (como Bi, Sb, S, P, O y Pb) que son conocidos por causar debilidad en dicha zona para el Cobre, la razón de este comportamiento es la alta anomalía de la anisotropía elástica que conduce a concentración de esfuerzos en los bordes de grano, debido a la deformación elástica y plástica incompatible entre los granos. Esto conlleva que es posible encontrar formación de martensita inducida por esfuerzo a lo largo de los bordes de grano al templar. Para mantener la compatibilidad en los bordes de grano que no presentan deformación acomodante, lo que se produce es una grieta de tamaño dependiente de la orientación de los granos adyacentes.

Para prevenir la fractura intergranular es necesario reducir el tamaño de las grietas producidas por los desplazamientos, que se logra con reducción del tamaño de grano, y pequeña dependencia entre la orientación de la deformación de transformación y la deformación plástica.

2.4.13 Propiedades del Cobre, Zinc, y Aluminio

2.4.13.1 El cobre

El cobre es un metal no ferroso, se presenta de un color rojizo característico, cuyas propiedades más importantes son: alta conductividad eléctrica y térmica, buena resistencia a la corrosión, buena maquinabilidad, alta resistencia mecánica y facilidad de fabricación, además el cobre es no magnético, puede ser soldado con latón y soldado con estaño.

Varias de estas propiedades pueden ser mejoradas mediante una aleación adecuada. La mayor parte del cobre se utiliza para conductores eléctricos ya que contienen el 99.99 % de pureza.

2.4.13.2 El Zinc

El zinc puro tiene una temperatura de recristalización inferior a la ambiente, de modo que se autorecuerce y no puede endurecerse por trabajo a temperatura ambiente. Entre las aplicaciones típicas se incluyen cascos estirados para pilas, arandelas, como elemento aleante en fundiciones, como recubrimiento superficial del acero para evitar la corrosión.

Es más anódico que el acero, y en una atmósfera corrosiva al realizar el zincado, actúa como ánodo de sacrificio. De este modo, el zinc se consume mientras se protege el acero de cualquier ataque químico. El óxido de zinc se utiliza en la manufactura del cemento dental, esmaltes, vidrios, barnices, fósforos, pinturas, cerámicos, artículos de hule, llantas, etc.

2.4.13.3 El aluminio

El aluminio es ligero, y su densidad es como la tercera parte de la del acero o de las aleaciones de cobre. El aluminio tiene una maleabilidad y formabilidad, alta resistencia a la corrosión y gran conductividad eléctrica y térmica. El aluminio no es tóxico ni magnético y no produce chispa. La característica no magnética hace al aluminio útil para diversos fines de protección eléctrica.

Aunque la conductividad eléctrica del aluminio de la clase conductor, es como el 62 % que la del cobre, su peso ligero lo hace más apropiado para conductores eléctricos con un grado de pureza del 99,99 %.

Tabla 1. Propiedades del cobre, zinc, aluminio. (Fuente: Tabla Periódica Universal Actualizada. Ediciones Didácticas Internacionales)

PROPIEDADES	COBRE	ZINC	ALUMINIO
Número atómico	29	30	13
Peso molecular (gr/mol)	63,54	65,37	26,9815
Densidad (gr/cm ³)	8,96	7,14	2,7
Radio atómico (A ⁰)	1,28	1,38	1,43
Estructura cristalina	FCC	Hexagonal	FCC
Electronegatividad de Pauling	1,9	1,6	1,5
Punto de fusión (°C)	1083	419,5	660
Punto de ebullición (°C)	2595	906	2450
Módulo de elasticidad (Kg/mm)	12500	9400	7200
Conductividad eléctrica (S)	0,593	0,167	0,382

2.4.14. Tensión y deformación en metales

2.4.14.1 Deformación Elástica y Plasticidad

Cuando se somete una pieza de metal a una fuerza de tracción uniaxial, se produce la deformación del metal. Si el metal recupera sus dimensiones originales cuando se elimina la fuerza, se considera que el metal ha sufrido deformación elástica. La cantidad de deformación elástica que puede soportar un metal es pequeña pues durante la deformación elástica, los átomos del metal se desplazan de sus posiciones originales, pero sin llegar a alcanzar nuevas posiciones. De este modo, cuando la fuerza sobre el metal deformado elásticamente se elimina, los átomos del metal vuelven a sus posiciones iniciales y el metal recupera su forma inicial. Si el metal se deforma tanto que no puede recuperar completamente sus dimensiones originales, se considera que ha sufrido una deformación plástica. Durante la deformación plástica, los átomos del metal se desplazan continuamente desde sus posiciones

iniciales hasta otras nuevas. La propiedad que tienen algunos metales de ser extensamente deformados sin que se fracturen, es una de las más útiles en ingeniería⁹.

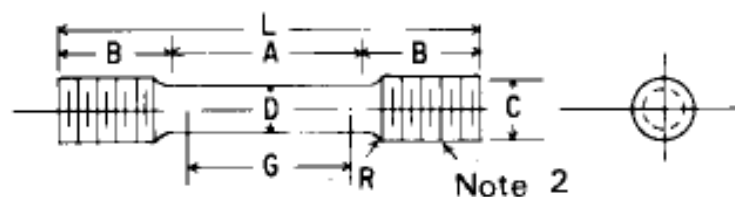
2.4.14.2 Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción se utiliza para evaluar la resistencia de metales y aleaciones, se utiliza la Norma ASTM E-8, en la figura 13 se muestra la máquina Universal para ensayos de tracción, de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



Figura 12. Máquina Universal para ensayos de Tracción.

(Fuente: Cortesía FIM-ESPOCH)



	Specimen 1 in.
G—Gage length	2.000 ± 0.005
D—Diameter (Note 1)	0.500 ± 0.010
R—Radius of fillet, min	3/8
A—Length of reduced section	2 1/4, min
L—Over-all length, approximate	5
B—Length of end section (Note 3)	1 3/8, approximately
C—Diameter of end section	3/4
E—Length of shoulder and fillet section, approximate	...
F—Diameter of shoulder	...

Figura 13. Probeta cilíndrica espécimen 1 para el ensayo de tracción.

(Fuente: norma ASTM E-8)

⁹ SMITH, William. Fundamentos de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Cuarta Edición. Editorial Mc. Graw Hill

El ensayo de tracción mide la resistencia de un material a una fuerza estática o gradualmente aplicada, para este ensayo se utiliza una probeta típica que tiene un diámetro de 0.505 pulg y una longitud calibrada de 2 pulg. La probeta se coloca en la máquina de pruebas y se le aplica una fuerza F , que se conoce como carga. Para medir el alargamiento del material causado por la aplicación de la fuerza en la longitud calibrada se utiliza un extensómetro.

Esfuerzo y deformación Ingenieril

Para un material dado, los resultados de un solo ensayo son aplicables a todo tamaño y formas de muestras, si se convierte la fuerza en esfuerzo y la distancia entre marcas calibradas en deformación. El esfuerzo y la deformación ingenieril se expresa con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Esfuerzo ingenieril } (\delta) = \frac{F}{A_o} \quad (2)$$

$$\text{Deformación ingenieril } (\varepsilon) = \frac{l-l_o}{l_o} \quad (3)$$

Donde:

A_o = área original de la sección transversal de la probeta antes de iniciar el ensayo.

l_o = distancia original entre marcas calibradas

l = distancia entre las mismas después de haberse aplicado la fuerza F .

Propiedades obtenidas del ensayo de tensión

A partir del ensayo de tensión se puede obtener información relacionada con la resistencia, rigidez y ductilidad del material.

Esfuerzo de Cedencia

El esfuerzo de Cedencia es el esfuerzo al cual la deformación plástica se hace importante. En los metales, es por lo general el esfuerzo requerido

para que las dislocaciones se deslicen. El esfuerzo de cedencia es por tanto, el esfuerzo que divide los comportamientos elástico y plástico del material. Si se desea diseñar un componente que no se deforme plásticamente, se debe seleccionar un material con un límite elástico elevado o fabricar el componente de tamaño suficiente para que la fuerza aplicada produzca un esfuerzo, que de por debajo del esfuerzo de cedencia.

En algunos materiales, el esfuerzo al cual el material cambia su comportamiento de elástico a plástico no se detecta fácilmente. En este caso, se determina un esfuerzo de cedencia convencional. Se traza una línea paralela a la porción inicial de la curva esfuerzo-deformación, pero desplazada a 0.002 pulg/pulg (0.2%) del origen. El esfuerzo de cedencia convencional de 0.2% es el esfuerzo al cual dicha línea interseca la curva esfuerzo-deformación¹⁰, lo antes mencionado se indica en la figura 14.

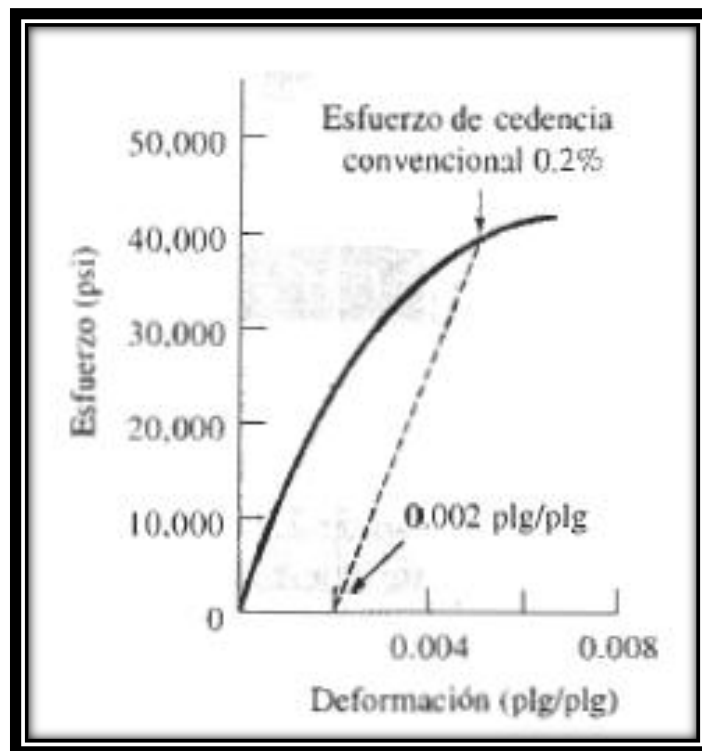


Figura 14. Esfuerzo de cedencia convencional. (Fuente: Askeland Donal R.1998)

¹⁰ ASKELAND, Donal R.(1998). Ciencia e Ingeniería de Materiales. Tercera edición, International Thomson Editores.

Resistencia a la Tracción

El esfuerzo obtenido de la fuerza más alta aplicada es la resistencia a la tensión, que es el esfuerzo máximo sobre la curva esfuerzo-deformación ingenieril. En muchos materiales dúctiles, la deformación no se mantiene uniforme. En cierto momento una región se deforma más que otras y ocurre una reducción local de importancia en la sección recta. Esta región localmente deformada se conoce como zona de estricción. La resistencia a la tensión es el esfuerzo al cual se inicia este encuellamiento o estricción en materiales dúctiles. Esto se puede observar en la figura 15.

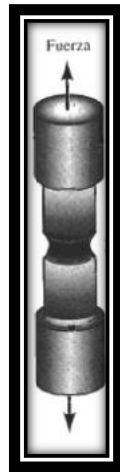


Figura 15. Deformación localizada mediante el ensayo de tracción de un material dúctil produciendo una región de encuellamiento. (Fuente: Asleland Donal. 1998)

Módulo de elasticidad o módulo de Young (E)

Es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en su región elástica. Esta relación es la ley de Hooke, y se la expresa de la siguiente manera:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

Donde:

E = módulo de elasticidad.

σ = esfuerzo

ε = deformación

2.4.14.3 Porcentaje de elongación

La cantidad de elongación que una muestra experimenta, indica claramente su valor de ductilidad. Esta ductilidad se expresa como porcentaje de elongación tomando la dimensión de referencia de 2 pulgadas. Cuando un material presenta un mayor porcentaje de elongación es más dúctil. Este parámetro es importante para el control de calidad de las muestras ensayadas, puesto que es dependiente de la presencia de imperfecciones en las probetas:

$$\text{Porcentaje de elongación} = \frac{l-l_0}{l_0} * 100\% \quad (5)$$

Donde:

l = longitud final

l_0 = longitud inicial (50 mm).

Esfuerzo real-deformación real

La reducción en el esfuerzo, más allá de la resistencia a la tensión ocurre en razón a nuestra definición de esfuerzo ingenieril. Se utilizó el área original A_0 en los cálculos, pero esto no es correcto, porque dicha área se modifica continuamente. Se definen esfuerzo real y deformación real mediante las ecuaciones siguientes:

$$\text{Esfuerzo real } \sigma_r = \frac{F}{A} \quad (6)$$

$$\text{Deformación real} = \int \frac{dl}{l} \quad (7)$$

Donde:

A = área real a la cual se le aplica la fuerza F .

La expresión $\ln (A_0/A)$ deberá ser utilizada después de que empiece el encuellamiento. La curva esfuerzo real-deformación real se compara con la curva esfuerzo-deformación ingenieril en la figura 16. El esfuerzo real sigue incrementándose después del encuellamiento, ya que aunque la carga requerida se reduce, el área se reduce aún más.

El comportamiento mecánico real en el ensayo de tensión se utiliza para el diseño de los procesos de manufactura, en los que el material se deforma plásticamente. Cuando se excede el esfuerzo de cedencia. El material se deforma. El componente ha fallado, porque ya no tiene la forma original. Además, solo después de que se inicia el encuellamiento se desarrolla una diferencia significativa entre ambas curvas. En este punto, el componente está ya muy deformado y no satisface las condiciones de uso requerido¹¹.

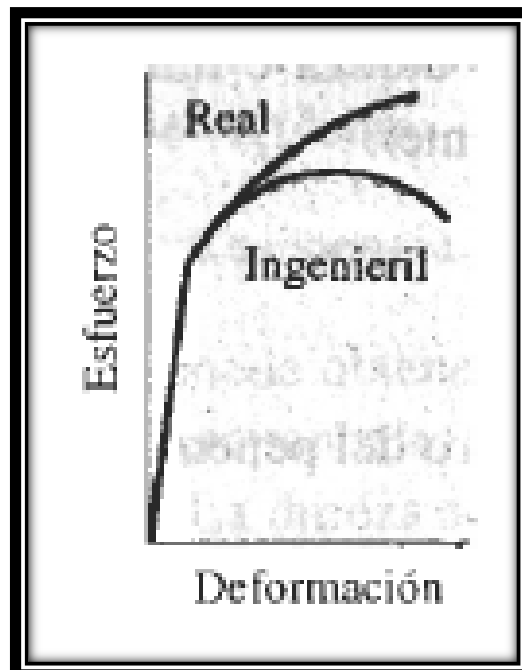


Figura 16. Relación entre el diagrama de esfuerzo real-deformación real y el diagrama esfuerzo-deformación ingenieril. (Fuente: Askeland Donal. 1998)

¹¹ ASKELAND, Donal R. (1998). Ciencia e Ingeniería de los materiales. Tercera edición. International Thomson Editores.

2.4.15 Procesos de manufactura

2.4.15.1 Laminado de metales

El laminado es el proceso que consiste en reducir el espesor o cambiar la sección transversal de una pieza de trabajo larga mediante fuerzas de compresión aplicadas con un conjunto de rodillos. En la figura 17 se tiene varios tipos de laminado plano y de forma.

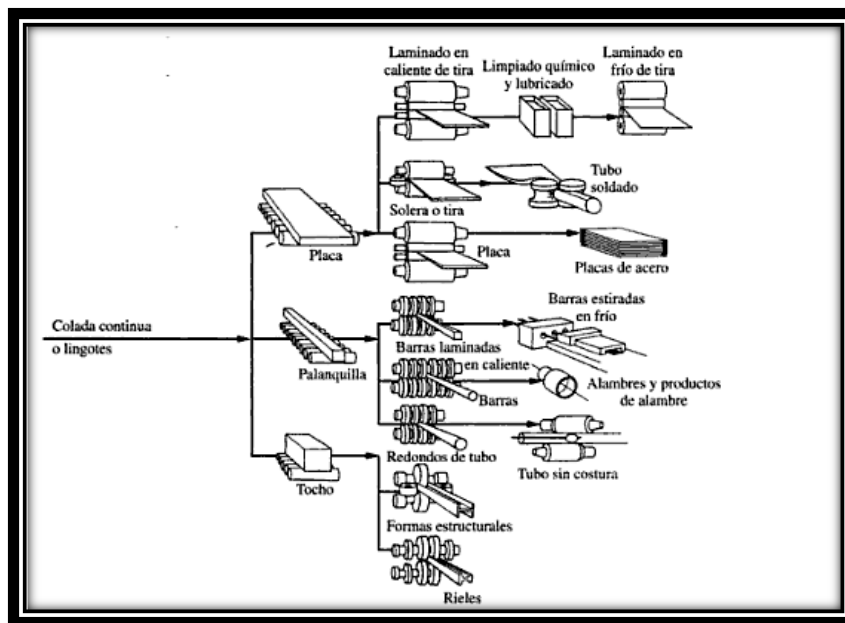


Figura 17. Esquema de varios procesos de laminado plano y de forma.

(Fuente: American Iron and steel Institute)

Primero se efectúa la laminación a temperaturas elevadas (laminación en caliente). Durante esta fase, la estructura de grano grueso, quebradiza y porosa del lingote (o de colada continua), se rompe en una estructura maleable que tiene un tamaño de grano más fino y propiedades mejoradas, como resistencia y dureza. Posteriormente, se acostumbra realizar la laminación a temperatura ambiente (laminación en frío), en la que el producto laminado adquiere más resistencia y dureza y mejor acabado superficial. Sin embargo, requiere, mayor energía (debido al

incremento de la resistencia del material a temperatura ambiente) y da como resultado un producto con propiedades anisotrópicas.

2.4.15.1.1 Proceso de laminación Plana

Una cinta metálica de espesor h_0 entra en el espacio de laminación y un par de rodillos giratorios la reduce a un espesor h_f , cada uno impulsado de manera individual por motores eléctricos. La velocidad de la superficie de los rodillos es V_r . La velocidad de la cinta aumenta desde su valor de entrada V_0 conforme se mueve a través del espacio de laminación, de la misma manera en que un fluido incompresible debe fluir más rápidamente cuando pasa a través de un canal convergente. La velocidad de la cinta es mayor a la salida del espacio de laminación y se denota V_f .

Puesto que la velocidad de la superficie del rodillo rígido es constante, existe un deslizamiento relativo entre rodillo y la cinta a lo largo del arco de contacto en el espacio de laminación L . En un punto a lo largo de la longitud de contacto (conocido como punto neutral o punto deslizante), la velocidad de la cinta es la misma que la del rodillo. A la izquierda de este punto, el rodillo se mueve más rápido que la cinta; a la derecha, la cinta se mueve más rápido que el rodillo. Por consiguiente, las fuerzas de fricción, que se oponen al movimiento entre los dos cuerpos deslizantes, actúan sobre la cinta como se observa en la figura 18.

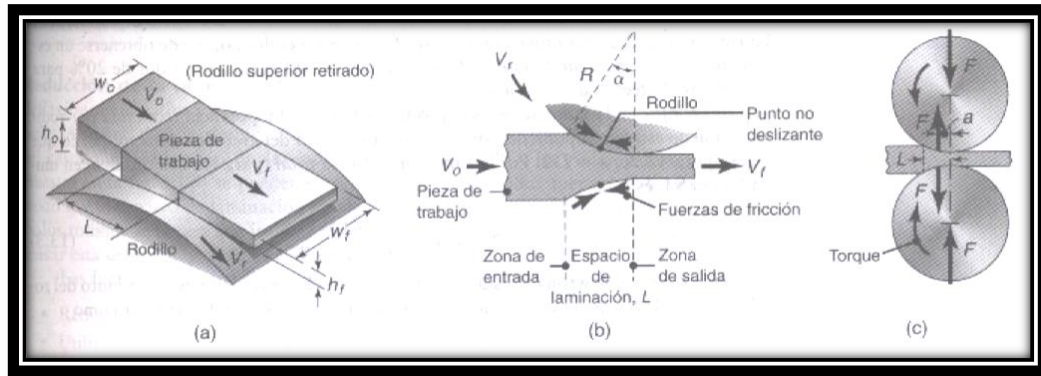


Figura 18. a) Esquema del proceso de laminación plana, b) Fuerzas de fricción que actúan sobre las superficies de la cinta, c) La fuerza de laminado (F) y el torque (T) que actúan sobre los rodillos. Por lo general, el ancho de la cinta (w) aumenta durante la laminación. (Fuente: S. Kalpakjian y S.R. Schmid. 2008)

La reducción máxima posible se define como la diferencia entre los espesores inicial y final de la cinta ($h_0 - h_f$). Se puede demostrar que es una función del coeficiente de fricción (μ) entre la cinta y el rodillo y el radio del rodillo (R) mediante la siguiente relación:

$$h_0 - h_f = \mu^2 R \quad (8)$$

Como se esperaba, cuanto más alta sea la fricción y más grande el radio del rodillo, mayor será la reducción máxima posible. Obsérvese que esta situación es similar al uso de neumáticos grandes (R elevado) y marcas profundas (μ elevado) en los tractores agrícolas y en el equipo todo terreno para su movimiento en tierra, lo que permite que los vehículos avancen sobre caminos accidentados sin patinarse.

2.4.15.1.2 Fuerza, torque y requerimientos de potencia del laminado

Los rodillos aplican presión sobre la cinta plana para reducir su espesor, lo que produce una fuerza de laminado (F) como se muestra en la figura 19. Obsérvese que esta fuerza es perpendicular al plano de la cinta y no a un ángulo. Esto se debe a que el arco de contacto es muy pequeño en

comparación con el radio del rodillo, por lo que puede asumirse que la fuerza de laminado es perpendicular al lugar de trabajo sin provocar un error significativo en los cálculos. La fuerza de laminado en la laminación plana se puede obtener a partir de la fórmula

$$F = LwY_{\text{prom}} \quad (9)$$

Donde:

L = longitud de contacto entre el rodillo y la cinta

w = anchura de la cinta

Y_{prom} = esfuerzo real promedio de la cinta en el espacio de laminación, que se determina con la ayuda del gráfico de la figura 19.

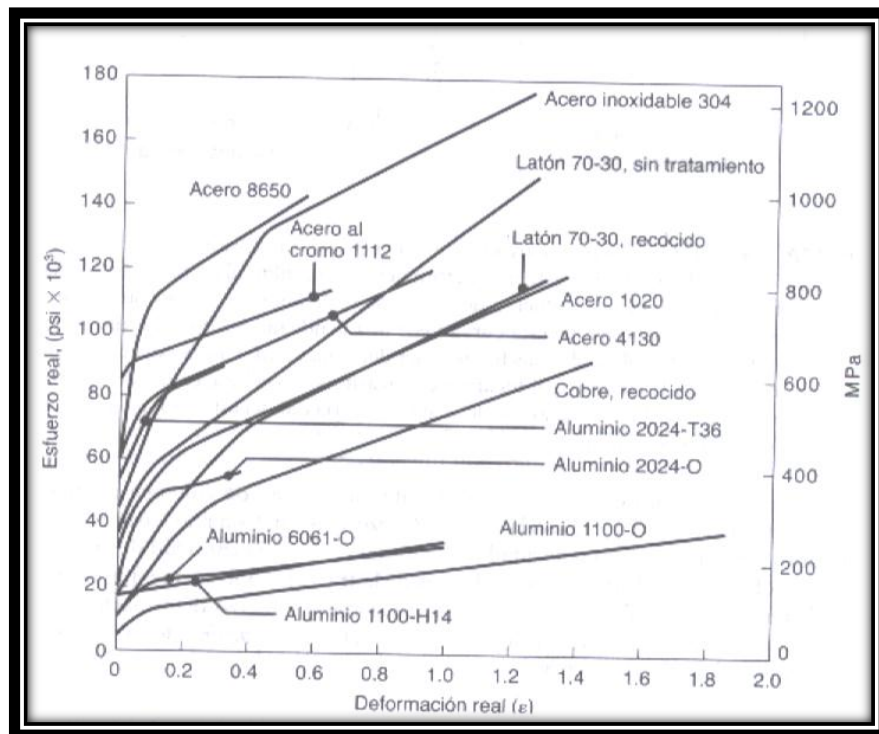


Figura 19. Curvas esfuerzo-deformación reales en tensión a temperatura ambiente para diversos metales. Las curvas inician a un nivel finito de esfuerzo: las regiones elásticas tienen una pendiente muy pronunciada para mostrarse en esta figura, por lo que cada curva comienza en el esfuerzo de fluencia (Y) del material. (Fuente: S. Kalpakjian y S.R. Schmid. 2008)

La ecuación es para una situación sin fricción, sin embargo, puede obtenerse un estimado de la fuerza real de laminado si se aumenta esta fuerza alrededor de 20% para considerar el efecto de fricción.

El torque en la laminación es el producto de F.a. La potencia requerida por rodillo se puede estimar suponiendo que F actúa a la mitad del arco de contacto, por lo que

$$a = \frac{L}{2} \quad (10)$$

Por lo tanto, la potencia total para los dos rodillos en unidades del SI, es

$$\text{Potencia} = \frac{2\pi FLN}{60000\text{KW}} \quad (11)$$

Donde:

F está en newtons

L está en metros

N son las revoluciones por minuto del rodillo.

En unidades inglesas tradicionales, la potencia total se puede expresar como

$$\text{Potencia} = \frac{2\pi FLN}{33000\text{hp}} \quad (12)$$

Donde:

F está en libras

L está en pies.

En los materiales sufren cambios en los granos en el proceso de laminado, de granos grandes a granos pequeños en el laminado en caliente, lo cual mejora la resistencia y ductilidad. Ver figura 20.

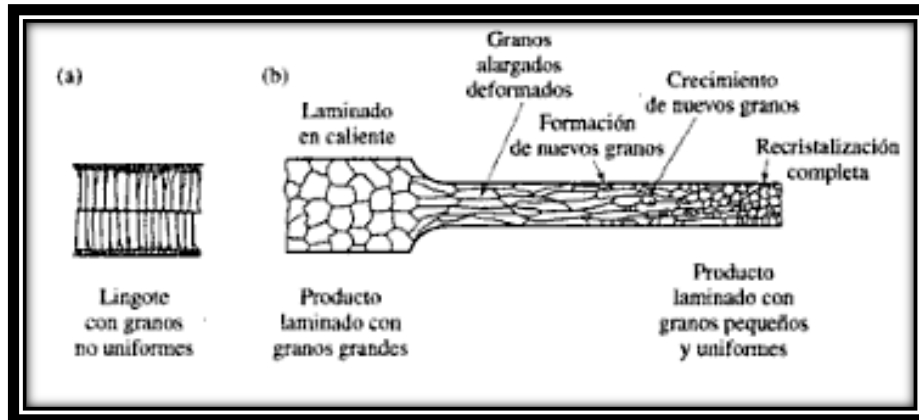


Figura 20. Cambios en la Estructura de los granos de metales laminados.

(Fuente: S. Kalpakjian y S.R. Schmid. 2008)

2.4.15.2 Extrusión

La extrusión tiene numerosas aplicaciones en la manufactura de productos continuos y discretos a partir de una gran variedad de metales y aleaciones. En la extrusión, la palanquilla cilíndrica se fuerza a través de un dado o matriz (figura 22) de manera similar a como se aprieta el tubo de la pasta dental. Por medio de la extrusión se puede producir una gran variedad de secciones transversales sólidas o huecas, que fundamentalmente son partes semiterminadas¹².

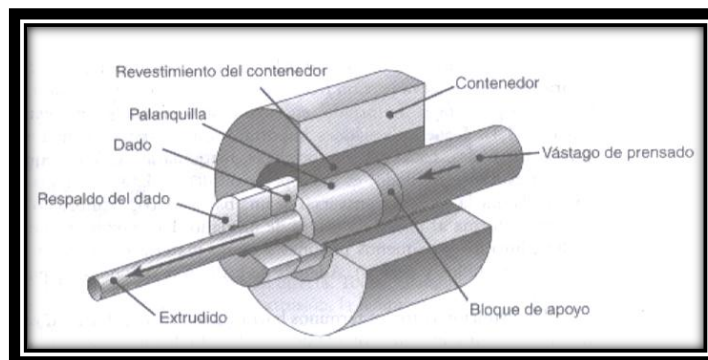


Figura 21. Esquema del proceso de extrusión directa.

(Fuente: S. Kalpakjian y S.R. Schmid. 2008)

¹² KALPAKJIAN .S. y S.R. Schmid. (2008). Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición. Editorial Pearson.

Una característica de la extrusión (del latín extrudere, que significa sacar por la fuerza) es que pueden ocurrir grandes deformaciones sin fracturas porque el material se somete a compresión triaxial elevada. Debido a que la geometría del dado permanece sin cambios durante la operación, por lo general los productos extruidos tienen una sección transversal constante.

Entre los productos comunes fabricados mediante extrusión se encuentran los rieles para puertas corredizas, los marcos de ventanas, tuberías de diversas secciones transversales, perfiles, y numerosas formas estructurales y arquitectónicas. Los elementos extruidos se pueden cortar a las longitudes deseadas, que después se convierten en partes discretas, como soportes, engranajes, ganchos para ropa, etc. Ver figura 22.

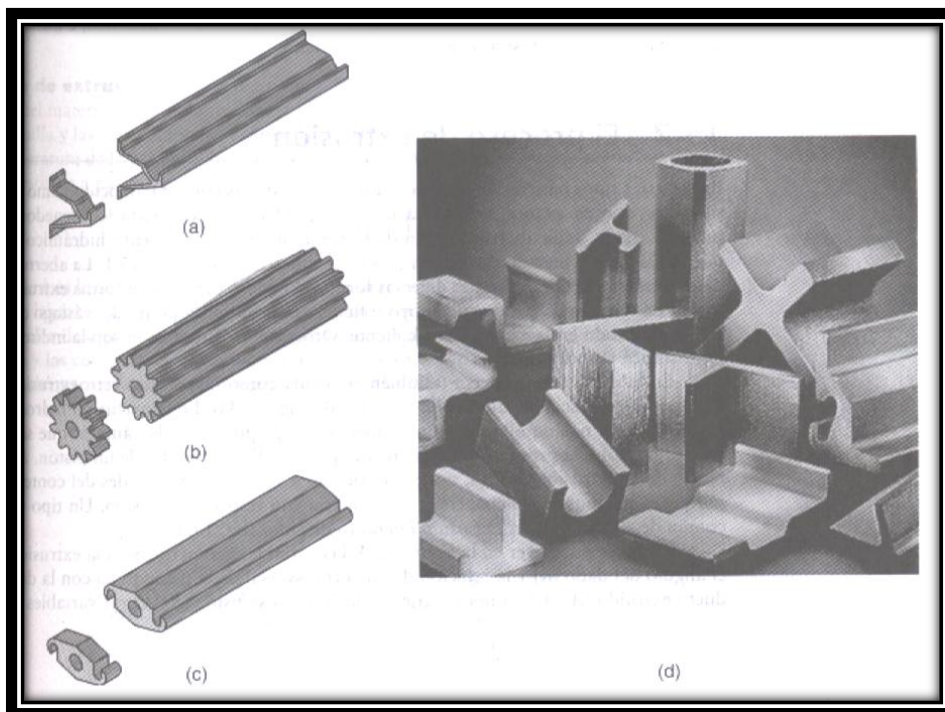


Figura 22. Extruidos y ejemplos de productos fabricados mediante el corte de extrudido. (Fuente: S. Kalpakjian y S:RSchmid. 2008)

Los materiales comúnmente extruidos son el aluminio, cobre y aleaciones, acero, magnesio y plomo, también se pueden extruir otros metales y aleaciones, con diferentes niveles de dificultad.

Dependiendo de la ductilidad del material, la extrusión se puede efectuar a temperatura ambiente (en frío) o elevada (en caliente).

2.4.15.2.1 Cálculo de fuerza de extrusión

La fuerza requerida para la extrusión depende de la resistencia del material de la palanquilla, la relación de extrusión, la fricción entre la palanquilla y las superficies de la cámara y el dado, y las variables del proceso, como la temperatura de la palanquilla y la velocidad de extrusión. La fuerza de extrusión (F) se puede estimar a partir de la formula:

$$F = A_0 k \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \quad (13)$$

Donde:

K = constante de extrusión que se determina de manera experimenta

A_0 = área de la palanquilla

A_f = área del producto extruido

De este modo, el valor de k es una medida de la resistencia del material que se extruye y las condiciones de fricción. En la figura 24 se dan los valores de k de diversos metales para gama de temperaturas de extrusión.

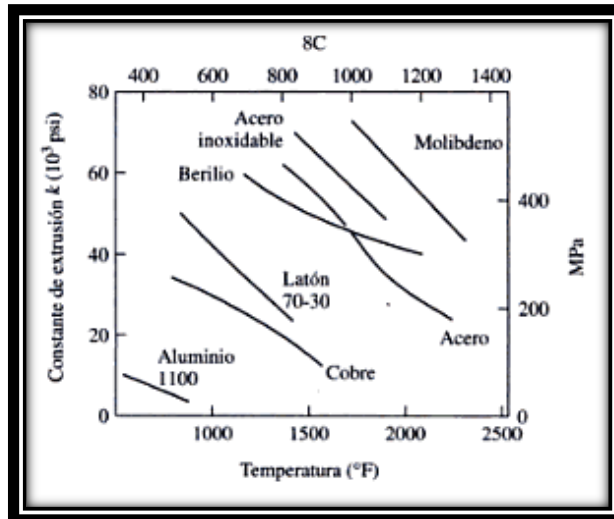


Figura 23. Constante de extrusión k de diversos metales a diferentes temperaturas. (Fuente: S. Kalpakjian y S. R. Schmid. 2008)

Tabla 2. Intervalos característicos de temperaturas de extrusión para diversos metales y aleaciones. (Fuente: S. Kalpakjian y S. R. Schmid. 2008)

Plomo	200-250°C
Aluminio y sus aleaciones	375-475°C
Cobre y sus aleaciones	650-975°C
Aceros	875-1300°C
Aleaciones refractareas	975-2200°C

2.4.15.3 Proceso de estirado

En el estirado se reduce o cambia la sección transversal de una barra o alambre largo, en general jalándola a través de un dado conocido como dado de estirado como se puede apreciar en la figura 24

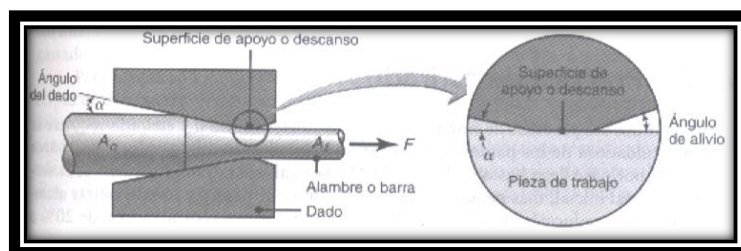


Figura 24. Variables de proceso en el estirado de alambre. (Fuente: S. Kalpakjian y S. R. Schmid. 2008)

La diferencia entre el estirado y la extrusión es que en ésta el material se empuja a través de un dado, mientras que en el estirado se jala a través de él. Los productos de barra y alambre abarcan una muy amplia gama de aplicaciones, incluyendo redondos para flechas de transmisión de potencia y movimiento, componentes de máquinas y estructuras, piezas brutas para pernos y remaches, alambre eléctrico, cables, miembros estructurales con carga de tensión, electrodos de soldadura, resortes, sujetadores para papel, rayos para ruedas de bicicleta e instrumentos musicales de cuerda.

Las variables principales de procesamiento en el estirado son similares a las de la extrusión, es decir, la reducción del área transversal, el ángulo del dado, la fricción a lo largo de las interfaces del dado y la pieza de trabajo, así como la velocidad de estirado. El ángulo del dado influye en la fuerza de estirado y la calidad del producto estirado.

Fuerza de Estirado

La fuerza de estirado (F) bajo condiciones ideales y sin fricción es similar a la de extrusión. Se determina mediante la expresión

$$F = Y_{\text{prom}} A_f \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \quad (14)$$

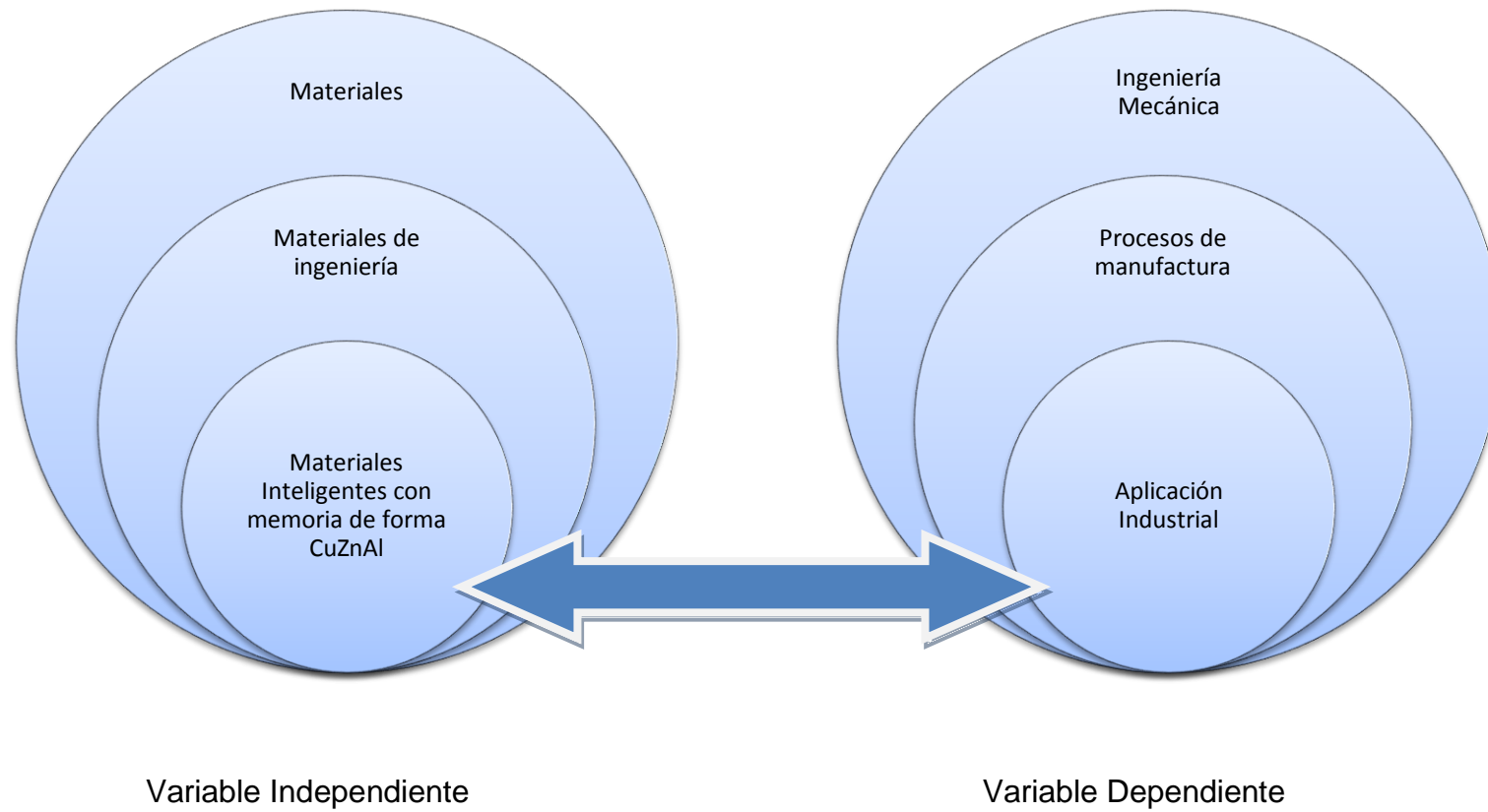
Donde:

Y_{prom} = esfuerzo real promedio del material en el hueco del dado.

Puesto que debe realizarse más trabajo para vencer la fricción, la fuerza aumenta con el incremento de fricción¹³.

¹³ KALPAKJIAN .S. y S.R. Schmid.(2008). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Quinta edición. Editorial Pearson.

2.5 Categorías fundamentales



2.6 Hipótesis

¿Los materiales inteligentes con memoria de forma CuZnAl permitirán desarrollar con calidad nuevos productos?

2.7 Señalamiento de variables de la hipótesis

2.7.1 Variable Independiente

Materiales inteligentes con memoria de forma CuZnAl

2.7.2 Variable Dependiente

Nuevos productos

2.7.3 Término de relación

Desarrollar

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Enfoque

El enfoque utilizado en la presente investigación tiene tendencia hacia el paradigma cuanti-cualitativo, debido a que en esta investigación se privilegia técnicas cualitativas y cuantitativas buscando la comprensión de los fenómenos para orientarse hacia la formación de hipótesis que permitan solucionar la temática de esta investigación.

De la misma manera de acuerdo al paradigma mencionado se hizo énfasis en el proceso de obtención de la aleación y la determinación de sus propiedades y aplicación industrial.

3.2 Modalidad de la Investigación

La presente investigación tiene un diseño basado en las modalidades de investigación siguientes:

Aplicada.- Porque los resultados de ésta investigación se utilizó para la determinación de las propiedades y la aplicación industrial de las aleaciones inteligentes con memoria de forma CuZnAl.

De laboratorio.- la presente investigación se desarrolló en un ambiente controlado en el laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato y el Taller de Fundición de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Descriptiva.- a través de esta investigación se logró fomentar la tecnología e interés por el estudio de aleaciones inteligentes con memoria de forma CuZnAl.

Investigación Bibliográfica.- el propósito de este tipo de investigación es conocer, comparar, ampliar, profundizar y deducir diferentes enfoques, teorías, conceptualizaciones y criterios de diversos autores sobre una cuestión determinada, basándose en documentos, por lo tanto en el presente trabajo se utilizó la documentación acorde a nuestra investigación.

3.3 Niveles de la Investigación

3.3.1 Investigación Exploratoria

Los estudios exploratorios se efectúan, normalmente cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado o que no ha sido abordado antes. Los estudios exploratorios son como realizar un viaje a lugares que no conocemos, sino simplemente alguien nos ha hecho un breve comentario sobre el lugar y finalmente, los estudios exploratorios sirven para familiarizarnos con fenómenos relativamente desconocidos.

De esta manera la presente investigación alcanzó el primer nivel exploratorio de investigación pues se reconoció variables de interés investigativo, como la determinación de las propiedades y aplicación industrial de la aleación inteligente con memoria CuZnAl; además se tomó en cuenta un problema poco estudiado en el ámbito de los materiales en la Ingeniería Mecánica.

3.3.2 Investigación Descriptiva

El propósito es que, el investigador describe situaciones y eventos, es decir, como es y cómo se manifiestan determinados fenómenos. Los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que sean sometidos a análisis, miden o evalúan con la precisión posible diversos aspectos, dimensiones o componentes del fenómeno a investigar.

Esta investigación tiene un alcance del segundo nivel descriptivo de investigación debido a que se analizó variables de manera aislada en la parte de red de categorías, describiendo las características de cada variable como proceso utilizado en la obtención de la aleación inteligente con memoria CuZnAl. Con este trabajo investigativo se evaluó las propiedades de la aleación para posteriormente determinar su aplicación industrial.

3.4 Población y Muestra

3.4.1 Población

La población para esta investigación fue:

Lingotes cilíndricos y barras rectangulares de aleación Inteligente con memoria de forma CuZnAl obtenidos en el horno de Inducción de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

3.4.2 Muestra

El universo poblacional es el conjunto de individuos u objetos de los que se desea conocer algo en una investigación.

En nuestro caso fue: Probetas de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl

3.5 Operacionalización de Variables

3.5.1 Variable independiente:

Aleación Inteligente con memoria de forma CuZnAl

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Técnicas e Instrumentos
Aleación CuZnAl es una aleación de cobre, zinc y aluminio, este tipo de aleaciones con memoria de forma sufren una transformación martensítica por tratamiento térmico, que ocurre en la microestructura del material o por haberle aplicado un esfuerzo externo. Luego se aplica cierta temperatura a la pieza, la cual hace estable la fase austenítica o se retira la carga que lo deforma y nuevamente, retornando así a la forma original.	Materiales utilizados en la obtención de la aleación	¿Qué materiales se utilizan para la obtención de la aleación?	-Cobre metálico -Zinc metálico - Aluminio metálico -Vainillas de bala	-Observación directa -Observación Bibliográfica
	Fundición	¿Qué hornos se utilizan para la obtención de la aleación	-Inducción -Eléctrico -Hogar abierto	-Observación directa -Ensayos de fundición
	Aleación CuZnAl	¿Cuáles son los parámetros que influyen en la obtención de la aleación?	-Material -Tiempo -Temperatura -Composición	-Observación directa -Ensayos de fundición

3.5.2 Variable dependiente:

- Aplicación Industrial

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Técnicas e Instrumentos
Una aplicación Industrial de un determinado material, está relacionado directamente con las propiedades del mismo, sean estas: propiedades químicas, mecánicas, físicas, eléctricas, etc.	Propiedades	¿Qué propiedades se determinan?	Químicas Mecánicas Físicas	Observación de campo Ensayos mecánicos, físicos y metalografía
	Aplicaciones	¿Qué aplicación industrial con calidad tendrá la aleación?	Mecánica Eléctrica	Observación bibliográfica Observación de campo. Ensayos mecánicos, físicos, y metalografía

3.6 Recolección de la Información

3.6.1 Técnicas e instrumentos utilizados en la observación

DETALLE	TÉCNICA	INSTRUMENTOS
OBSERVACIÓN	Directa e Indirecta Participante, No participante Estructurada, No estructurada Individual, No individual	Cuaderno de notas Diario Ficha de campo Lista de cotejo

3.6.2 Técnicas e instrumentos documentales

DETALLE	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
DOCUMENTALES	Bibliografía, Catálogos, Publicaciones, Artículos, Estudios, Fichas Técnicas, Tabulaciones.

Se utilizó técnicas para la recolección de la información tales como la observación, ya que se requiere observar y analizar la información que servirá como guía en la investigación.

Documental para la recolección de información de libros, publicaciones, artículos, estudios, fichas técnicas y tabulaciones de datos resultado de los diferentes ensayos de las probetas de la aleación inteligente con

memoria de forma CuZnAl, los cuales permitieron recoger la información de forma correcta y eficiente.

3.7 Procesamiento y Análisis

La información obtenida de los ensayos de las probetas de la aleación Inteligente con memoria de forma CuZnAl, se analizó mediante fotografías microestructurales, tablas y gráficos que muestren resumidamente las propiedades que tiene este material. Los datos recopilados se tabularon una vez terminado los ensayos para verificar y comparar la información recogida.

Para la recolección, procesamiento y análisis de la información se siguió los siguientes puntos:

- Revisión crítica de la información bibliográfica recogida.
- Selección de la información más importante y puntual.
- Análisis químico de cada lingote de la aleación Inteligente con memoria CuZnAl.
- Análisis metalográfico de las diferentes probetas de la aleación obtenida.
- Ensayo de tracción de las diferentes probetas de la aleación obtenida.
- Ensayo de fatiga de las diferentes probetas de la aleación obtenida.
- Ensayo de dureza de las diferentes probetas de la aleación obtenida.
- Ensayos Físicos de las diferentes probetas de la aleación obtenida.

Finalmente se tabularon todos los resultados y se sacaron las conclusiones pertinentes para el análisis e interpretación de los resultados.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis de los resultados.

4.1.1 Prueba 1

Fecha: 22/12/2011

Hora de inicio: 9h00

Hora de Finalización: 14h00

Para la obtención de aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl se realizó la primera prueba, y se utilizó un horno a gas con crisol metálico que dispone la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

Se utilizó:

- 1836,7 gr de vainillas de fusil (Latón: 70 % Cu, 30% Zn)
- 146,4 gr de alambre de aluminio electrolítico (99.9 % de pureza)

4.1.1.1 Análisis químico prueba 1

El análisis químico de la aleación se realizó en la empresa FERRO ALEACIONES S.A (FALESA) de la ciudad de Guayaquil, utilizando un Espectrómetro de Chispa de última Tecnología, arrojando los siguientes resultados:



Figura 25. Análisis Químico Prueba 1, espectrómetro de chispa FALESA.
(Fuente: El autor)

Cu = 66.90 %

Zn = 25.18 %

Al = 7.37 %

Fe = 0.371 %

Otros = 0.179 %

Como se puede observar en la aleación obtenida se encuentra 0.371 % de hierro, que es un porcentaje muy elevado, por haber utilizado un crisol metálico, transfiriéndose el hierro del crisol a la aleación.

El Informe detallado del análisis Químico se presenta en el Anexo A1

4.1.1.2 Microestructura metalográfica prueba 1

Para determinar la microestructura de la aleación obtenida se realiza el análisis metalográfico, en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, obteniendo los el siguiente resultado:

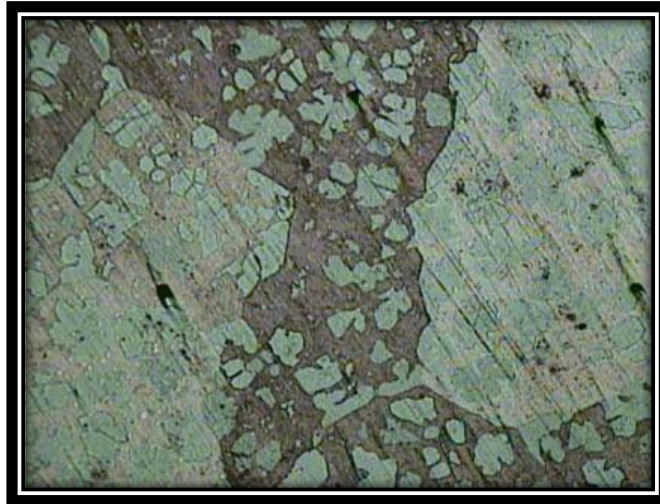


Figura 26. Microestructura Prueba 1 sin templar, a 100X, atacado con reactivo químico (20 gr de FeCl_3 , 5 ml de HCl , 1 gr de CrO_2 , y 100 ml de agua destilada) durante 3 segundos, observando una microestructura en fase α y β (fuente: El autor)

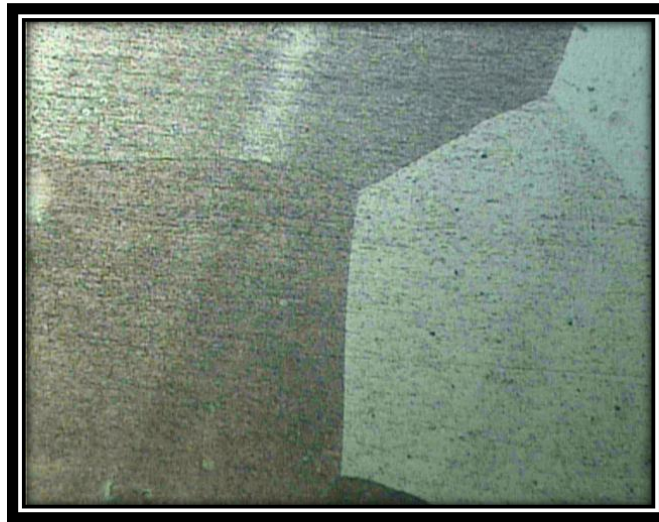


Figura 27. Microestructura Prueba 1 templada, a 100X, atacado con reactivo químico (20 gr de FeCl_3 , 5 ml de HCl , 1 gr de CrO_2 , y 100 ml de agua destilada) durante 3 segundos, observando una microestructura en fase β sin presencia de Martensita. (Fuente: El autor)

Además se debe indicar que al templar el material, presentó fisuras que inician en la superficie y se prolonga a la parte interna del material, como se puede observar el la figura 28.



Figura 28. Probeta Prueba 1 Templada en agua a temperatura ambiente desde 850°C durante 1 hora de permanencia a esta temperatura. Presencia de fisuras externas e internas. (Fuente: El autor)

4.1.1.3 Dureza prueba 1

Para determinar la dureza se utilizó un durómetro del Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, con escala de dureza Rockwell B (HRB) con esfera de 1/16", carga de 980 N y utilizando la norma ASTM E-18, arrojó los siguientes resultados:

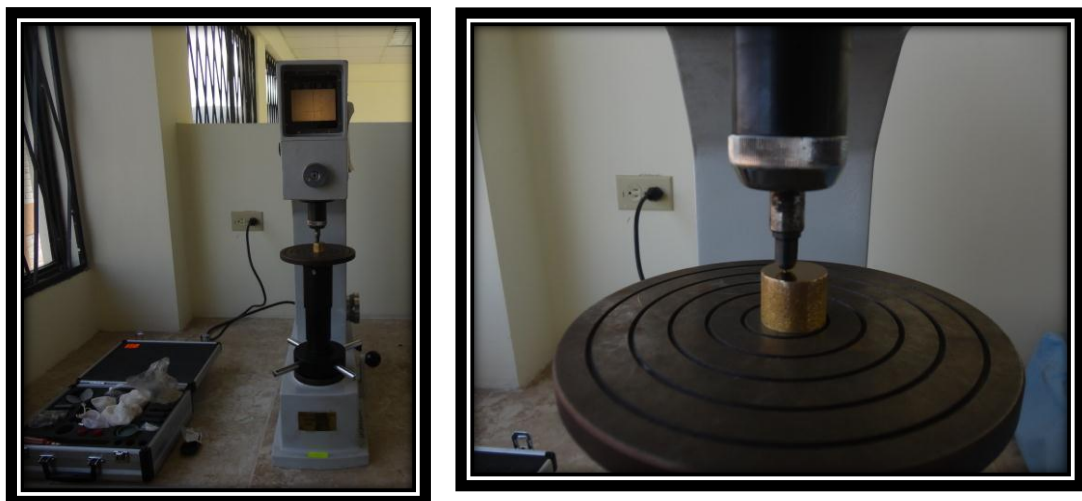


Figura 29. Medición de Dureza. (Fuente el autor)

Tabla 3. Valores de Dureza HRB Prueba 1 sin Templar. (Fuente: El autor)

No. MEDICIÓN	DUREZA HRB
1	54.5
2	55.0
3	55.0
4	54.5
5	57.0
6	56.0
7	57.0
8	56.0
9	56.0
10	57.0
DUREZA PROMEDIO	55.8

Tabla 4. Valores de Dureza HRB Prueba 1 Templada en agua a temperatura ambiente, desde 850°C después de 1 hora de permanencia a esta temperatura.

(Fuente: El autor)

No. MEDICIÓN	DUREZA HRB
1	88.0
2	94.0
3	87.0
4	92.0
5	89.0
6	95.0
7	92.0
8	91.5
9	96.0
10	93.0
DUREZA PROMEDIO	91.8

4.1.1.4 Ensayo de tracción prueba 1

El ensayo de tracción no se pudo realizar por no tener una cantidad suficiente de material para la elaboración de las probetas normalizadas.

Cabe indicar que se solicitó el auspicio de vainillas de fusil al Ejército Ecuatoriano para la presente investigación, pero fue negado por Seguridad Nacional.

4.1.2 Prueba 2

Fecha: 30/12/2011

Hora de inicio: 8h40

Hora de Finalización: 14h00

Para la obtención de aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl se realizó una segunda prueba, y se utilizó un horno a gas con crisol de grafito para evitar contaminaciones de la aleación, que dispone la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

Se utilizó:

- 1000 gr de vainillas de fusil (Latón: 70% Cu, 30% Zn)
- 70 gr de alambre de aluminio electrolítico (99.9 % de pureza)

Resultados: No se consiguió la fusión de la aleación por cuanto al utilizar un horno de grafito, se requiere mayor poder calorífico debido al gran espesor, y el horno utilizado a gas no fue el adecuado.

4.1.3 Prueba 3

Fecha: 10/01/2012

Hora de inicio: 7h30

Hora de Finalización: 13h30

Para la obtención de aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl, se realizó una tercera prueba y se utilizó un horno a diesel, con una boquilla de 3.5 galones por hora con crisol de grafito, que dispone la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

Se utilizó:

- 3000 gr de Cobre electrolítico (99.9 % de pureza)
- 1059.2 gr de zinc electrolítico (99.9 % de pureza), considerando un 25 % más por pérdidas de evaporación y oxidación
- 287.8 gr de alambre de aluminio electrolítico (99.9 % de pureza)

4.1.3.1 Análisis químico prueba 3

El análisis químico de la aleación obtenida se realizó en el Laboratorio CESTTA de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, aplicando el método de Absorción Atómica, arrojando los siguientes resultados:

Cu = 98.02 %

Zn = 0.62 %

Al = 1.69 %

De los resultados obtenidos se puede observar que la pérdida Zn fue muy elevada, y se debió a la evaporación y oxidación del mismo.

El Informe detallado del análisis Químico se presenta en el Anexo A2

4.1.3.2 Estructura metalográfica prueba 3

Para determinar la microestructura de la aleación obtenida se realiza el análisis metalográfico, en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, obteniendo los el siguiente resultado:



Figura 30. Microestructura Prueba 3 sin templar a 100X, atacado con reactivo químico (20 gr de FeCl_3 , 5 ml de HCl , 1 gr de CrO_2 , y 100 ml de agua destilada) durante 3 segundos, observando una microestructura en fase β , con un tamaño de grano extremadamente grande. (Fuente: El autor)

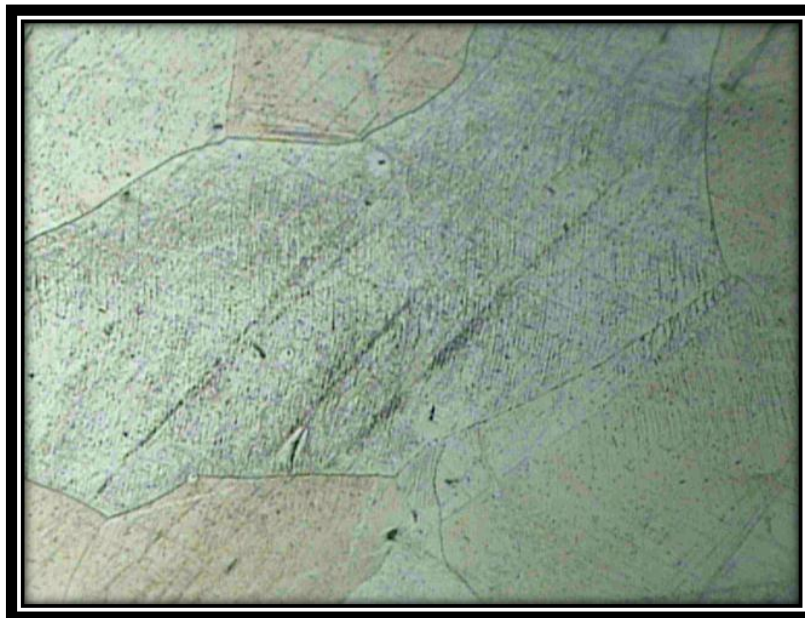


Figura 31. Microestructura Prueba 3 Templada a 100X, atacado con reactivo químico (20 gr de FeCl_3 , 5 ml de HCl , 1 gr de CrO_2 , y 100 ml de agua destilada) durante 3 segundos, Se observa una microestructura en fase β , con un tamaño de grano extremadamente grande y no existe la presencia de Martensita. (Fuente: El autor)

4.1.3.3 Dureza prueba 3

Para determinar la dureza se utilizó un durómetro del Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, con escala de dureza Rockwell B (HRB) con esfera de 1/16", carga de 980 N y utilizando la norma ASTM E-18, arrojó los siguientes resultados:

Tabla 5. Valores de Dureza HRB Prueba 3 sin Templar. (Fuente: El autor)

No. MEDICIÓN	DUREZA HRB
1	40.5
2	41.0
3	39.5
4	39.0
5	40.0
6	40.5
7	41.5
8	39.5
9	40.5
10	39.0
DUREZA PROMEDIO	40.1

Tabla 6. Valores de Dureza HRB Prueba 3 Templada en agua a temperatura ambiente, desde 850°C después de 1 hora de permanencia a esta temperatura.

(Fuente: El autor)

No. MEDICIÓN	DUREZA HRB
1	29.0
2	31.0
3	30.5
4	30.0
5	33.0

6	31.0
7	31.5
8	32.0
9	31.5
10	30.0
DUREZA PROMEDIO	31.0

4.1.3.4 Ensayo de tracción Prueba 3

El ensayo de tracción no se pudo realizar por no tener una cantidad suficiente de material para la elaboración de las probetas normalizadas, ya que el horno utilizado es demasiado grande y existió muchas pérdidas por adherirse a las paredes del crisol.

4.1.4 Prueba 4

Fecha: 24/02/2012

Hora de inicio: 8h10

Hora de Finalización: 12h00

Para la realización de la cuarta prueba se utilizó un horno de Inducción de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, y con el objeto de obtener 100 libras de aleación se añadió:

- 73 lbs de Cobre electrolítico (99.9 % de pureza), auspiciado por la empresa ECUATRAN S.A.
- 26.5 lbs de zinc electrolítico (99.9 % de pureza), incluido un 20 % más por pérdidas de evaporación y oxidación
- 6.3 lbs de alambre de aluminio electrolítico (99.9 % de pureza), incluido un 5 % por pérdidas

Resultados: Se obtuvo aproximadamente 100 libras de aleación por lo que se coló en moldes de arena vaciando primero en una cuchara y después en las cajas de probetas, luego de aproximadamente unos 10 minutos se vacía el resto en la cuchara y se coló las cajas de probetas faltantes, obteniendo los siguientes resultados:

4.1.4.1 Análisis químico prueba 4.1 primera cuchara

El análisis químico de la aleación de la primera cuchara, se realizó en la empresa FERRO ALEACIONES S.A (FALESA) de la ciudad de Guayaquil, utilizando un Espectrómetro de Chispa de última Tecnología, arrojando los siguientes resultados:



**Figura 32. Análisis Químico Prueba 4.1, Espectrómetro de chispa FALESA.
(Fuente: El autor)**

Cu = 69.7 %

Zn = 23.49 %

Al = 6.71 %

Otros = 0.1 %

El Informe detallado del análisis Químico se presenta en el Anexo A3

4.1.4.2 Microestructura metalográfica Prueba 4.1 primera cuchara

Para determinar la microestructura de la aleación obtenida se realiza el análisis metalográfico, en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, obteniendo los siguientes resultados:



Figura 33. Microestructura Prueba 4.1 sin templar a 100X, atacado con reactivo químico (20 gr de FeCl_3 , 5 ml de HCl , 1 gr de CrO_2 , y 100 ml de agua destilada) durante 3 segundos, observando una microestructura en fase β , con un tamaño de grano extremadamente grande. (Fuente: El autor)

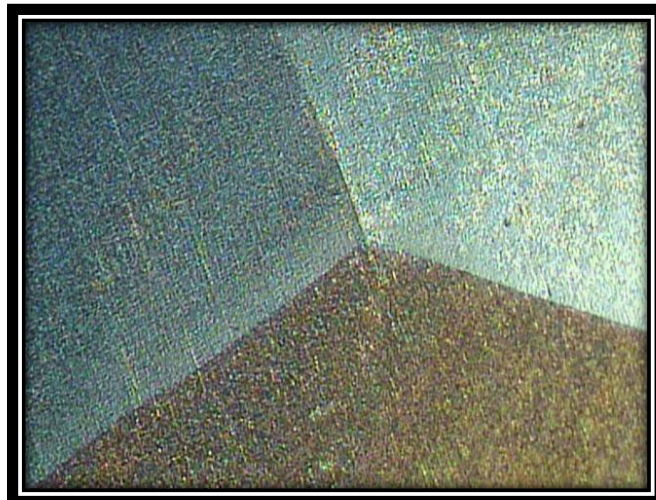


Figura 34. Microestructura Prueba 4.1 templada a 100X, atacado con reactivo químico (20 gr de FeCl_3 , 5 ml de HCl , 1 gr de CrO_2 , y 100 ml de agua destilada) durante 3 segundos, observando una microestructura en fase β , con un tamaño de grano extremadamente grande, no existe presencia de martensita. (Fuente: El autor)

4.1.4.3 Dureza prueba 4.1

Para determinar la dureza se aplicó la norma ASTM E-18, y con la ayuda de un durómetro con escala de dureza ROCKWELL B (HRB), con esfera de 1/16", carga de 980 N y se obtuvo los siguientes resultados para la prueba 4.1 primera cuchara:

Tabla 7. Valores de Dureza HRB Prueba 4.1 sin Templar. (Fuente: El autor)

No. MEDICIÓN	DUREZA HRB
1	96.5
2	96.5
3	93.0
4	97.0
5	98.0
6	98.0
7	97.5
8	96.0
9	93.5
10	94.5
DUREZA PROMEDIO	90.05

Tabla 8. Valores de Dureza HRB Prueba 4.1 Templada en agua a temperatura ambiente, desde 850°C después de 1 hora de permanencia a esta temperatura.

(Fuente: El autor)

No. MEDICIÓN	DUREZA HRB
1	91.0
2	92.0
3	93.0
4	95.0
5	91.0
6	87.0

7	88.0
8	87.0
9	89.0
10	91.0
DUREZA PROMEDIO	94.4

4.1.4.4 Ensayo de tracción probeta prueba 4.1 sin templar

El ensayo de tracción de la probeta de la prueba 4.1 sin templar según la norma ASTM E-8, se lo realizó en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, obteniendo los siguientes resultados.



Figura 35. Probeta cilíndrica según norma ASTM E-8 para ensayo de tracción.
(Fuente: El autor)



Figura 36. Máquina Universal Facultad de Mecánica ESPOCH. (Fuente: El autor)

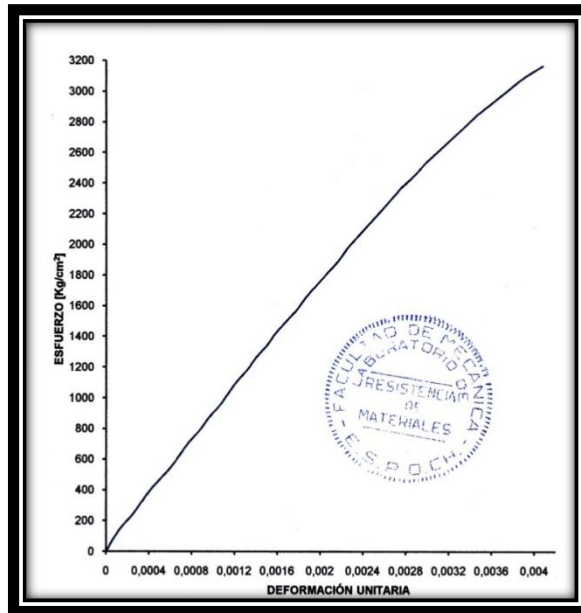


Figura 37. Diagrama esfuerzo - deformación probeta 4.1 sin templar.
(Fuente: El autor)

Tabla 9. Resultados del Ensayo de Tracción probeta Prueba 4.1 sin templar
(Fuente: El autor)

DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	PRUEBA 4.1 SIN TEMPLAR
Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)	9.7x10 ⁵
Carga de Fluencia (Kg)	3243
Esfuerzo de Fluencia (Kg/cm ²)	2560
Carga Máxima (Kg)	4030
Esfuerzo Máximo (Kg/cm ²)	3181.32
Porcentaje de Elongación (%)	2.03
Tipo de Falla	Irregular



Figura 38. Probeta prueba 4.1 sin templar ensayada a tracción. (Fuente: El autor)



Figura 39. Fractura irregular probeta prueba 4.1 sin templar. (Fuente: El autor)

4.1.4.5 Ensayo de tracción probeta prueba 4.1 templada

El ensayo de tracción de la probeta de la prueba 4.1 templada, no se lo pudo realizar, por darnos como resultado un material muy frágil y el tamaño de grano demasiado grande y fue imposible el mecanizado de las probetas según la norma ASTM E-8, se intentó mecanizar 5 probetas obteniendo el mismo resultado, como se puede observar en la figura 41.



Figura 40. Probeta Prueba 4.1 Templada, presenta desprendimiento de granos y ruptura en el momento de mecanizarla, debido a su alta fragilidad después del temple y tamaño de grano muy grande. (Fuente: el autor)

4.1.4.6 Análisis químico prueba 4.2 Segunda cuchara

El análisis químico de la aleación de la Segunda cuchara, se realizó en la empresa FERRO ALEACIONES S.A (FALESA) de la ciudad de Guayaquil, utilizando un Espectrómetro de Chispa de última Tecnología, arrojando los siguientes resultados:



Figura 41. Análisis Químico Prueba 4.2, Espectrómetro de chispa FALESA
(Fuente: El autor)

Cu = 71.6 %

Zn = 23.53 %

Al = 4.79 %

Otros = 0.08 %

El Informe detallado del análisis Químico se presenta en el Anexo A4

4.1.4.7 Microestructura metalográfica Prueba 4.2 Segunda cuchara sin templar

Para determinar la microestructura de la aleación obtenida prueba 4.2 sin templar, se realizó el análisis metalográfico, en el Laboratorio de

Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, obteniendo el siguiente resultado:

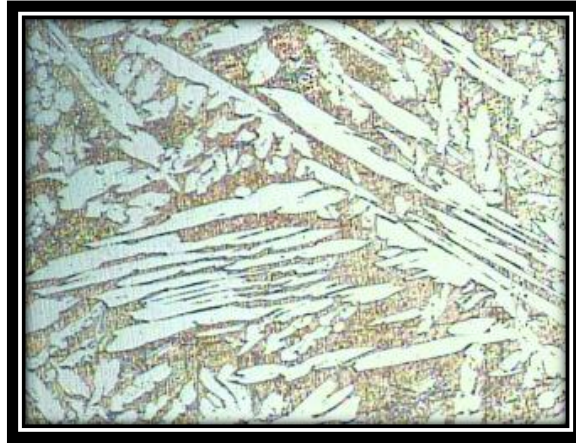


Figura. 42. Microestructura Prueba 4.2 sin templar a 100X, atacado con reactivo químico (20 gr de FeCl_3 , 5 ml de HCl, 1 gr de CrO_2 , y 100 ml de agua destilada) durante 3 segundos, observamos una microestructura de fase β (matriz) y fase α . (Fuente: El autor)

Como se puede observar las dos microestructuras son totalmente diferentes, esto se puede deber, a que la segunda cuchara se quedó 10 minutos más en el horno, originando la evaporación y oxidación del zinc, ya que al añadir el aluminio se produce una reacción exotérmica produciéndose el incremento brusco de temperatura de la colada.

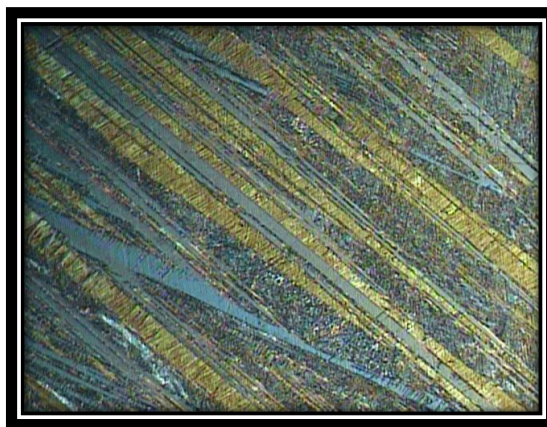


Figura 43. Microestructura Prueba 4.2 templada, a 100X, a 850°C durante 1 hora, atacado con reactivo químico (20 gr de FeCl_3 , 5 ml de HCl, 1 gr de CrO_2 , y 100 ml de agua destilada) durante 3 segundos, observamos una microestructura de dos fases, fase β (matriz) y Martensita. (Fuente: El autor)

Tabla 10. Valores de Dureza HRB Prueba 4.2 sin Templar. (Fuente: El autor)

No. MEDICIÓN	DUREZA HRB
1	69.0
2	73.0
3	71.0
4	67.0
5	73.0
6	70.0
7	72.0
8	69.0
9	69.0
10	69.0
DUREZA PROMEDIO	70.2

Tabla 11. Valores de Dureza HRB Prueba 4.2 Templada en agua a temperatura ambiente, desde 850°C después de 1 hora de permanencia a esta temperatura.

(Fuente: El autor)

No. MEDICIÓN	DUREZA HRB
1	84.0
2	81.0
3	82.0
4	84.0
5	83.0
6	83.0
7	82.0
8	82.0
9	81.0
10	79.0
DUREZA PROMEDIO	82.1

4.1.4.8 Ensayo de tracción probeta prueba 4.2. sin templar

El ensayo de tracción de la probeta de la prueba 4.1 sin templar según la norma ASTM E-8, se lo realizó en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, dándonos los siguientes resultados.

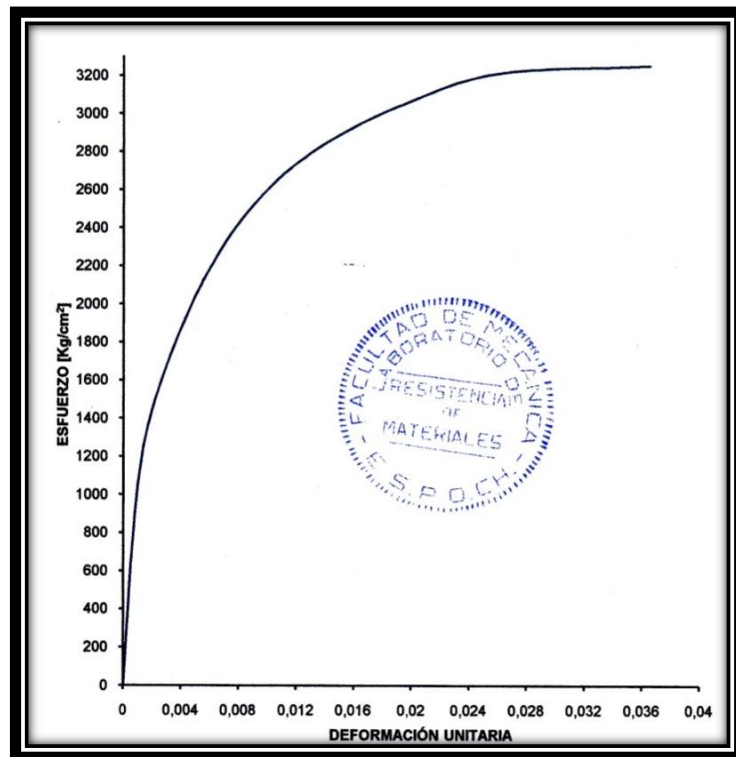


Figura 44. Diagrama esfuerzo - deformación prueba 4.1 sin templar.

Tabla 12. Resultados del Ensayo de Tracción Prueba 4.2 sin templar

DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	PRUEBA 4.2 SIN TEMPLAR
Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)	1.2x10 ⁶
Carga de Fluencia (Kg)	2307
Esfuerzo de Fluencia (Kg/cm ²)	1850
Carga Máxima (Kg)	4050
Esfuerzo Máximo (Kg/cm ²)	3248.05
Porcentaje de Elongación (%)	1.40
Tipo de Falla	Irregular



Figura. 45. Probeta prueba 4.2 sin templar ensayada a tracción. (Fuente: El autor)



Figura 46. Fractura irregular probeta Prueba 4.2 sin templar después del ensayo a tracción. (Fuente: El autor)

4.1.4.9 Ensayo de tracción probeta prueba 4.2 templada

El ensayo de tracción de la probeta de la prueba 4.2 templada según la norma ASTM E-8, se lo realizó en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, dándonos los siguientes resultados.

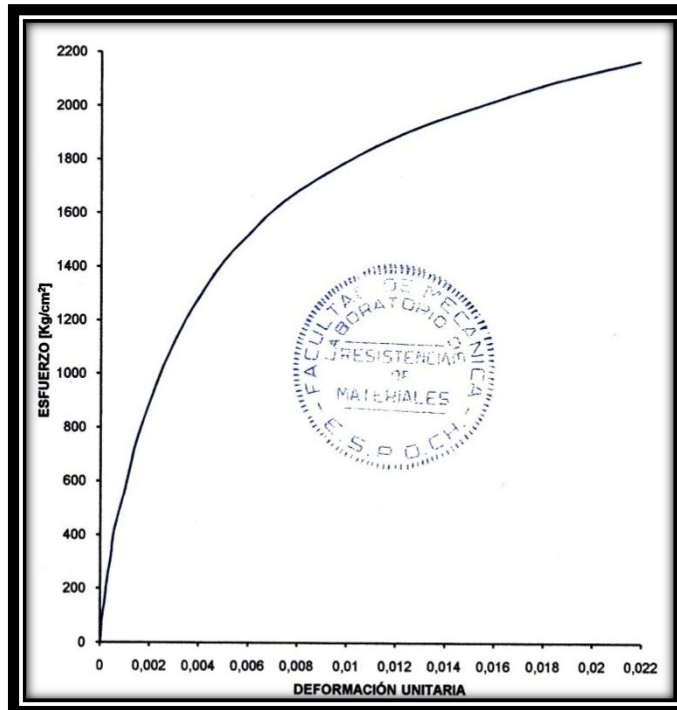


Figura 47. Diagrama esfuerzo - deformación probeta 4.2 templada.

Tabla 13. Resultados del Ensayo de Tracción Probeta 4.2 templada.

DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	PRUEBA 4.2 TEMPLADA
Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)	7.7x10 ⁵
Carga de Fluencia (Kg)	1621
Esfuerzo de Fluencia (Kg/cm ²)	1300
Carga Máxima (Kg)	2770
Esfuerzo Máximo (Kg/cm ²)	2221.51
Porcentaje de Elongación (%)	4.23
Tipo de Falla	Irregular



Figura 48. Probeta Prueba 4.2 templada, ensayada a tracción. (Fuente: El autor)



Figura 49. Fractura irregular probeta Prueba 4.2 templada, después del ensayo a tracción. (Fuente: El autor)

4.1.4.10 Cálculo de la densidad de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl prueba 4.1

Para el cálculo de la densidad utilizamos la ecuación:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (15)$$

Donde:

$$\rho = \text{Densidad de la aleación CuZnAl} \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$m = \text{Masa}(\text{gr})$$

$$v = \text{Volumen} (\text{cm}^3)$$

La masa se determinó con la ayuda de una balanza electrónica



Figura 50. Determinación de la masa de la probeta. (Fuente: El Autor)

Dándonos un valor de 780.7 gr.

El volumen se determinó con la ayuda de un vaso graduado en el que colocamos 1400 cm³ de agua, luego introducimos la probeta de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl dentro del vaso con agua y leemos el volumen de agua desplazado, dándonos una lectura de 1502 cm³ en total, procediendo a restar los 1400 cm³ iniciales, tenemos el valor de 102 cm³ de volumen desplazado, lo que equivaldría al volumen de la probeta.



**Figura 51. Colocación de la probeta dentro del vaso graduado con agua.
(Fuente: El Autor)**

Reemplazando en la ecuación 15 tenemos:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$\rho = \frac{780.5 \text{ gr}}{102 \text{ cm}^3}$$

$$\rho = 7.65 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

4.1.4.11 Cálculo de la densidad de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl prueba 4.2

Siguiendo el mismo procedimiento que el caso anterior, se determinó que la densidad para la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl prueba 4.2 es de 7.82 gr/cm^3 , para una masa de 453,8 gr y un volumen de agua desplazada de 58 cm^3 .

4.1.4.12 Ensayo de corrosión Pruebas 4.1 y 4.2

El ensayo se desarrolló de acuerdo a la norma ASTM B-117-02, que se aplica para corrosión acelerada a nivel de laboratorio, tal que permita simular ambientes corrosivos extremos de forma controlada, determinando la vida esperada de resistencia de los materiales bajo dichas condiciones. Se procedió de la siguiente manera:

1. Se preparó las probetas de la aleación Inteligente con memoria de forma CuZnAl de las pruebas 4.1 y 4.2 de las siguientes dimensiones: $62.8 \times 25.4 \times 4.1 \text{ mm}$ y $25.6 \times 25.2 \times 6.1 \text{ mm}$. Respectivamente.
2. Pesamos las probetas, determinando de esta manera los pesos iniciales, siendo: 48 gr y 28.2 gr respectivamente.
3. Preparamos el medio corrosivo. En un litro de agua se añade 35 gr de sal (ClNa), y la agitamos



Figura 52. Pesado de sal en la balanza electrónica (35 gr)
(Fuente: El Autor)

4. Colocamos las probetas en el medio corrosivo en un vaso de ensayo graduado y la dejamos ahí por un mes (720 Horas).
5. Transcurrido este tiempo, retiramos las muestras del vaso de ensayo y procedemos a limpiarlas.
6. Finalmente procedemos a analizar las muestras y determinamos el tipo de corrosión si la hubiera y posteriormente la pesamos. En caso de corrosión uniforme, procedemos quitar toda la capa de óxido que se ha formado sobre la pieza y posteriormente la pesamos.
7. Determinamos la velocidad de corrosión utilizando la siguiente ecuación:

$$\frac{mm}{yr} = \frac{(87.6 W)}{(D.A.T)} \quad (16)$$

Donde:

$W =$ Pérdida de peso en mgr

$D =$ Densidad en $\frac{gr}{cm^3}$

$A =$ Área en cm^2 de todas las caras de la probeta

$T =$ Tiempo de permanencia de probetas en agua salada en Horas

Velocidad de corrosión prueba 4.1

$$W = W_i - W_f = 48 \text{ gr} - 47.98\text{gr} = 0.02\text{gr} = 20\text{mg}$$

$$A = 2(0.41\text{cm} \times 6.28\text{cm}) + 2(0.41\text{cm} \times 2.54\text{cm}) + 2(2.54\text{cm} \times 6.28\text{cm}) = 39.13 \text{ cm}^2$$

$$T = 30 \text{ días} = 720 \text{ horas}$$

Reemplazando en la ecuación 16 tenemos:

$$\frac{mm}{yr} = \frac{(87.6 \times 20)}{(7.65 \times 39.13 \times 720)}$$

$$\frac{mm}{yr} = 0.0081$$

Se tiene como resultado una velocidad de corrosión de 0.0081 mm por año. Se califica a la aleación como sobresaliente en cuanto a corrosión se refiere.

Velocidad de corrosión prueba 4.2

$$W = W_i - W_f = 28.2 \text{ gr} - 28.19 \text{ gr} = 0.01 \text{ mg}$$

$$A = 2(0.61 \text{ cm} \times 2.52 \text{ cm}) + 2(0.61 \text{ cm} \times 2.56 \text{ cm}) + 2(2.52 \text{ cm} \times 2.56 \text{ cm}) = 19.09 \text{ cm}^2$$

$$T = 30 \text{ días} = 720 \text{ horas}$$

Reemplazando en la ecuación 16 tenemos:

$$\frac{mm}{yr} = \frac{(87.6 \times 10)}{(7.82 \times 19.09 \times 720)}$$

$$\frac{mm}{yr} = 0.0081$$

Se tiene como resultado una velocidad de corrosión de 0.0081 mm por año. Se califica a la aleación como sobresaliente en cuanto a corrosión se refiere.

4.1.5 Prueba 5

Fecha: 29/03/2012

Hora de inicio: 7h21

Hora de Finalización: 9h57

Para la realización de la quinta prueba se utilizó un horno de Inducción de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, y con el objeto de obtener 80 libras de aleación se añadió:

- 60.16 lbs de Cobre electrolítico en lámina (99.9 % de pureza), auspiciado por la empresa ECUATRAN S.A.

- 15.79 lbs de zinc electrolítico (99.9 % de pureza), incluido un 11.32 % más por pérdidas de evaporación y oxidación.
- 5.93 lbs de alambre de aluminio electrolítico (99.9 % de pureza), incluido un 5 % por pérdidas.

Resultados: Se obtuvo aproximadamente 80 libras de aleación por lo que se coló en moldes de arena, vaciando primero en una cuchara y después en las cajas de probetas, luego de aproximadamente unos 10 minutos se vacía el resto en la cuchara y se cola las cajas de probetas faltantes, dándonos los siguientes resultados :

4.1.5.1 Análisis Químico Prueba 5

El análisis químico de la aleación de la quinta prueba, se realizó en la empresa FERRO ALEACIONES S.A (FALESA) de la ciudad de Guayaquil, utilizando un Espectrómetro de Chispa de última Tecnología, arrojando los siguientes resultados:



**Figura 53. Análisis Químico Prueba 5, Espectrómetro de chispa. FALESA.
(Fuente: El autor)**

Cu = 75 %

Zn = 18,71 %

Al = 6.13 %

Otros = 0.16 %

El Informe detallado del análisis Químico se presenta en el Anexo A5

4.1.5.2 Estructura metalográfica Prueba 5 sin templar

El análisis metalográfico de la prueba 5 se lo realizó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, procediendo a realizar el análisis metalográfico de varias cajas coladas de esta prueba, determinando que la microestructura es homogénea, siendo la misma para todos los casos.



Figura 54. Microestructura Prueba 5 sin templar a 100X, atacado con reactivo químico (20 gr de FeCl_3 , 5 ml de HCl , 1 gr de CrO_2 , y 100 ml de agua destilada) durante 3 segundos, observamos una microestructura de dos fases β (matriz) y α . (Fuente: El autor)

4.1.5.3 Estructura metalográfica Prueba 5 Templada

El análisis metalográfico de la prueba 5 templada a 850°C , por el lapso de 1 hora y enfriada en agua a temperatura ambiente, se lo realizó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, determinando la siguiente microestructura:

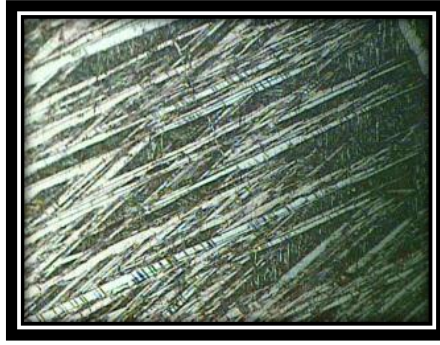


Figura 55. Microestructura Prueba 5 templada a 100X, atacado con reactivo químico (20 gr de FeCl_3 , 5 ml de HCl, 1 gr de CrO_2 , y 100 ml de agua destilada) durante 3 segundos, observamos una microestructura de fase β y Martensita.

(Fuente: El autor)

4.1.5.4 Dureza prueba 5 sin templar

Para determinar la dureza se utilizó el durómetro del Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, se aplicó la norma ASTM E-18, con escala de dureza Rockwell B (HRB), con esfera de $1/16''$, carga de 980 N y nos arrojando los siguientes Resultados para la prueba 5:

Tabla 14. Valores de Dureza HRB Prueba 5 sin Templar. (Fuente: El autor)

No. MEDICIÓN	DUREZA HRB
1	77.5
2	80.0
3	80.5
4	79.5
5	83.0
6	78.5
7	79.5
8	83.0
9	81.0
10	81.0
DUREZA PROMEDIO	80.4

4.1.5.5 Ensayo de Dureza prueba 5 templada

Para determinar la dureza se utilizó el durómetro del Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, se aplicó la norma ASTM E-18, con escala de dureza Rockwell B (HRB), con esfera de 1/16", carga de 980 N y nos arrojando los siguientes Resultados para la prueba 5:

Tabla 15. Valores de Dureza HRB Prueba 5 Templada en agua a temperatura ambiente, desde 850°C después de 1 hora de permanencia a esta temperatura.

(Fuente: El autor)

No. MEDICIÓN	DUREZA HRB
1	99.0
2	95.5
3	96.5
4	92.0
5	98.0
6	100.0
7	91.0
8	100.0
9	99.0
10	96.0
DUREZA PROMEDIO	96.7

4.1.5.6 Ensayo de Tracción prueba 5 sin templar

El ensayo de tracción de la probeta de la prueba 5 sin templar según la norma ASTM E-8, se lo realizó en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, dándonos los siguientes resultados.



Figura 56. Probeta cilíndrica según norma ASTM E-8 para ensayo de tracción, prueba 5 sin templar. (Fuente: El autor)

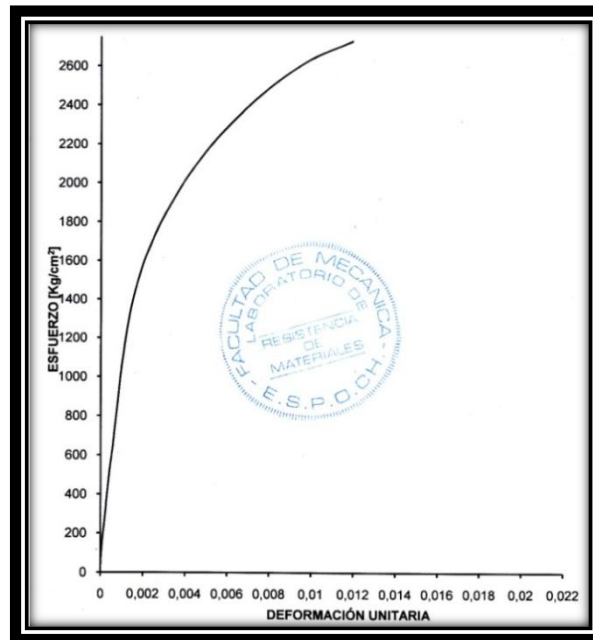


Figura 57. Diagrama esfuerzo - deformación prueba 5 sin templar. (Fuente: El autor)

Tabla 16. Resultados del Ensayo de Tracción prueba 5 sin templar

DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	PRUEBA 5 SIN TEMPLAR
Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)	1.3x10 ⁶
Carga de Fluencia (Kg)	2519
Esfuerzo de Fluencia (Kg/cm ²)	2020
Carga Máxima (Kg)	3420
Esfuerzo Máximo (Kg/cm ²)	2742,80
Porcentaje de Elongación (%)	1.61
Tipo de Falla	Irregular



Figura 58. Probeta prueba 5 sin templar ensayada a tracción. (Fuente: El autor)



Figura 59. Fractura irregular probeta prueba 5 sin templar después del ensayo a tracción. (Fuente: El autor)

4.1.5.7. Ensayo de Tracción prueba 5 templada

El ensayo de tracción de la probeta de la prueba 5 templada según la norma ASTM E-8, se lo realizó en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, dándonos los siguientes resultados.

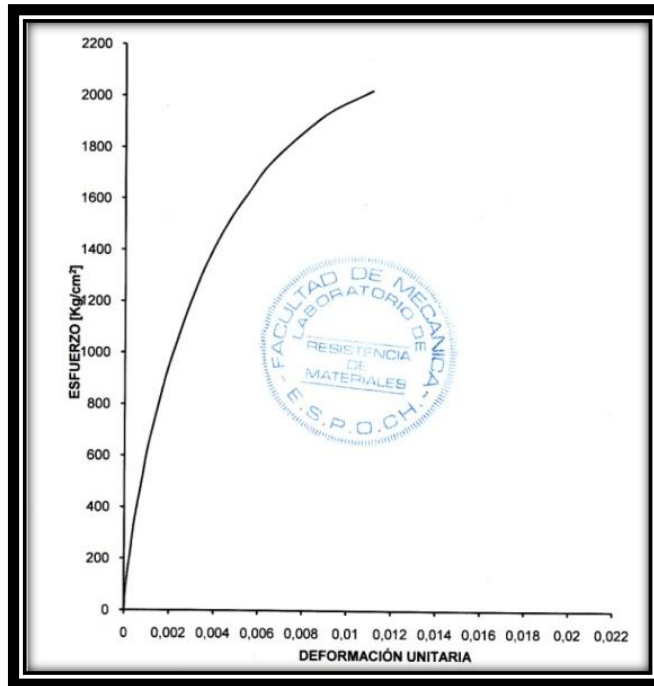


Figura 60. Diagrama esfuerzo - deformación prueba 5 templada. (Fuente: El autor)

Tabla 17. Resultados del Ensayo de Tracción prueba 5 templada.

DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	PRUEBA 5 TEMPLADA
Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)	7.4x10 ⁵
Carga de Fluencia (Kg)	1853
Esfuerzo de Fluencia (Kg/cm ²)	1440
Carga Máxima (Kg)	2600
Esfuerzo Máximo (Kg/cm ²)	2020.52
Porcentaje de Elongación (%)	3.65
Tipo de Falla	Irregular



Figura 61. Probeta prueba 5 templada ensayada a tracción. (Fuente: El autor)



Figura 62. Fractura irregular probeta prueba 5 templada después del ensayo a tracción. (Fuente: El autor)

4.1.5.8 Ensayo de fatiga probeta prueba 5 templada

Para establecer la resistencia a fatiga de un material, se necesita un número muy grande de ensayos debido a la naturaleza estadística de la fatiga, en este caso, se realizó 1 ensayo por no disponer de más material de la aleación, para este tipo de probeta. El ensayo de fatiga de la aleación de la prueba 5 templada, según la norma ASTM E-606-92- (Reapproved 1998), se llevó a cabo en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Mecánica de la Escuela superior Politécnica de Chimborazo, dando los siguientes resultados:



Figura 63. Probeta para ensayo de fatiga prueba 5 templada, según norma ASTM E-606-92-Reapproved 1998. (Fuente: El autor)

Tabla 18. Resultados del ensayo de fatiga prueba 5 templada.

CARGA (Kg)	DIÁMETRO (mm)	ESFUERZO (Kg/mm ²)	REVOLUCIONES (RPM)	HORAS DE VIDA
1	7.5	0.249	26964	7min, 35 s



Figura 64. Probeta prueba 5 sin templar ensayada a fatiga. (Fuente: El autor)

El informe detallado del ensayo de fatiga se presenta en el Anexo D.



Figura 65. Fractura Irregular probeta 5 templada, después del ensayo a fatiga.
(Fuente: El autor)

También se procedió a realizar el ensayo de fatiga de 4 probetas planas, por disponer de material para este tipo de ensayo. Por no existir una norma específica para el ensayo de fatiga de la aleación CuZnAl, el ensayo se lo realizó según la norma ASTM B-593-93 (Reapproved 2003), con la salvedad que esta norma es para el Método de prueba estándar para ensayo de fatiga a flexión para materiales elásticos de aleación de cobre, hasta espesores de 1.57 mm, en una máquina diseñada y construida por el Ing. Jorge Patricio Guamanquispe Toasa, Docente de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 19. Resultados de los ensayo de fatiga prueba 5 templada, probetas planas.

CARACTERÍSTICAS	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	ENSAYO 4
Material	Aleación CuZnAl	Aleación CuZnAl	Aleación CuZnAl	Aleación CuZnAl
Dimensiones	Probeta tipo b	Probeta tipo b	Probeta tipo b	Probeta tipo b
Tipo de carga	Flexión en cantiléver cíclica	Flexión en cantiléver cíclica	Flexión en cantiléver cíclica	Flexión en cantiléver cíclica
Módulo Elasticidad (MPa)	72569.21	72569.21	72569.21	72569.21
Carga (N)	190	156	130	56.6
Esfuerzo (MPa)	423.322	277.028	218.133	144.631
Espesor de la probeta (mm)	4.8	4.8	4.8	4.8
Deflexión (mm)	9	7.5	5.5	3.5
Número de ciclos hasta la falla	5565	35000	45445	52084
Tiempo de vida (min)	3.0	19.4	25.2	28.9

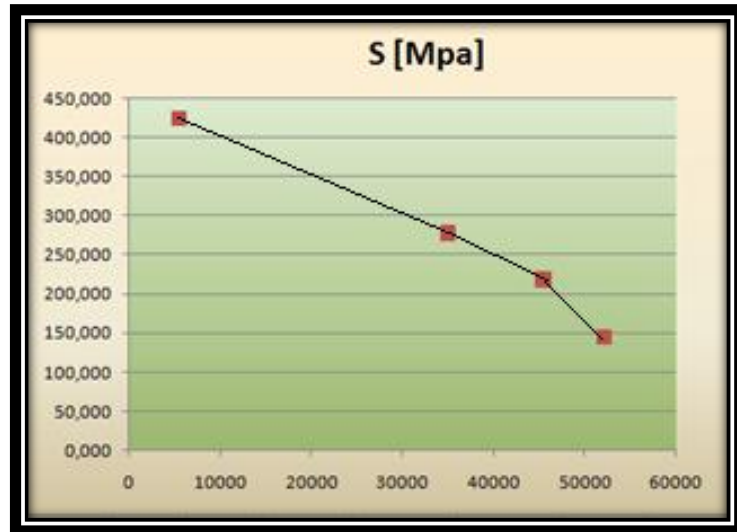


Figura 66. Diagrama Esfuerzo-Número de ciclos, prueba 5 ensayo a fatiga.
(Fuente: El autor)



Figura 67. Probeta plana para el ensayo de fatiga prueba 5. (Fuente: El autor)

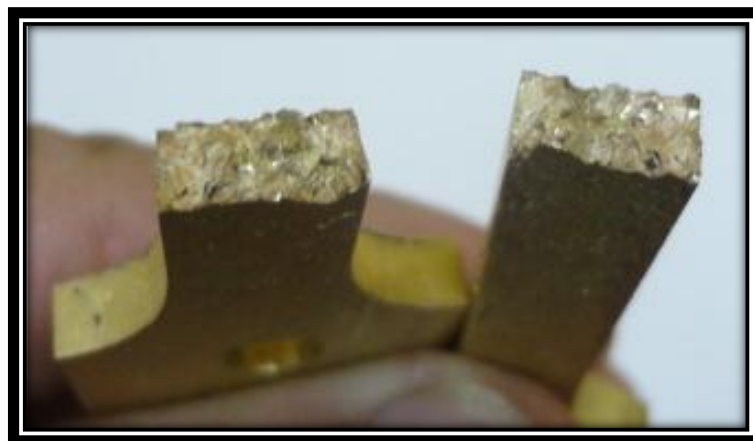


Figura 68. Fractura Irregular probeta 5 templada, después del ensayo a fatiga.
(Fuente: El autor)

Como el número de ciclos que resiste el material es mayor que 10^3 , según Shygly se considera como un **material de alto ciclaje a fatiga**.

4.1.5.9 Cálculo de la densidad de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl prueba 5

Siguiendo el mismo procedimiento que el literal 4.1.4.10, se determinó que la densidad para la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl prueba 5 es de 7.63 gr/cm^3 , para una masa de $770,4 \text{ gr}$ y un volumen de agua desplazada de 101 cm^3 .

4.1.5.10 Ensayo de corrosión prueba 5

Aplicando el procedimiento del literal 4.1.4.12 se realizó el ensayo de corrosión y se calculó la velocidad de corrosión de la siguiente manera:



Figura 69. Probeta para ensayo de corrosión. (Fuente: El autor)

Pasado las 720 horas de exposición de la probeta en solución salina, se procede a retirar la probeta y se observa pequeñas manchas negras en la superficie, como se observa en la figura 70.



Figura 70. Probeta de prueba 5 después de las 720 horas de exposición en agua salina, presenta manchas pequeñas, que luego de limpiarlas y pulirlas se determina que se trata de corrosión por picado. (Fuente: El autor)

Realizando un análisis visual y microscópico se determinó que después de la exposición de la probeta en agua salada por 720 horas, presenta corrosión por picado en tres zonas muy pequeñas, como se puede observar en la figura 71.

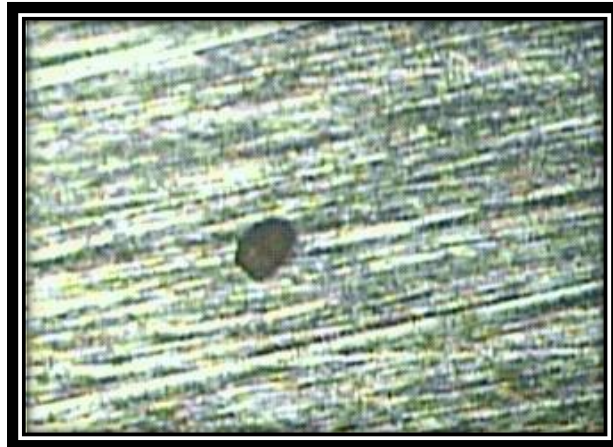


Figura 71. Microfotografía de la superficie de la probeta prueba 5, a 100X, después del ensayo de corrosión. Presenta corrosión por picado.(Fuente: El autor)

Posteriormente procedemos a calcular la velocidad de corrosión en mm por año, con la ecuación 16.

$$\frac{mm}{yr} = \frac{(87.6 W)}{(D.A.T)} \quad (16)$$

$$W = W_i - W_f = 30 \text{ gr} - 29.99\text{gr} = 0.01\text{gr} = 10 \text{ mgr}$$

$$A = 2(0.44\text{cm} \times 3.745\text{cm}) + 2(0.44\text{cm} \times 2.59\text{cm}) + 2(2.59\text{cm} \times 3.745\text{cm}) = 18,25 \text{ cm}^2$$

$$T = 30 \text{ días} = 720 \text{ horas}$$

Reemplazando en la ecuación 16 tenemos:

$$\frac{mm}{yr} = \frac{(87.6 (10))}{(7.63 \times 18.25 \times 720)}$$

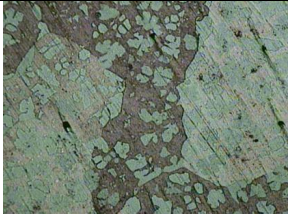

$$\frac{mm}{yr} = 0.0087$$

Se tiene como resultado una velocidad de corrosión de 0.0087 mm por año. Se califica a la aleación inteligente con memoria de forma 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al como sobresaliente en cuanto a corrosión se refiere.

4.2 Interpretación de Datos

En la tabla 20 y tabla 21 se presenta un resumen de todas las pruebas y ensayos realizados.

Tabla 20. Resumen de pruebas y ensayos realizados. (Fuente: El Autor)

No. PRUEBAS	TIPO HORNO	ELEMENTOS AÑADIDOS (LBS)	COMPOSICIÓN QUÍMICA OBTENIDA (%)	DUREZA SIN TEMPLAR (HRB)	DUREZA DESPUÉS TEMPLE (HRB)	MICROESTRUCTURA OBTENIDA SIN TEMPLAR (100X)	MICROESTRUCTURA OBTENIDA DESPUÉS DEL TEMPLE EN AGUA 850°C 1H (100X)
1	A GAS CRISOL ACERO FICM	Vainillas = 4.05 Al = 0.32	Cu = 66.9 Zn = 25.18 Al = 7.37 Fe = 0.371	55.8	91.8		
2	A GAS CRISOL GRAFITO FICM	Vainillas = 2.2 Al = 0.154	No alcanza temperatura de fusión				




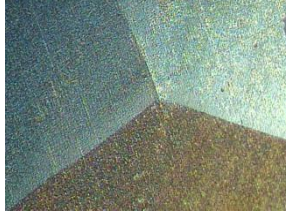

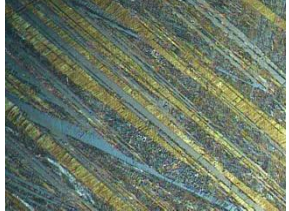
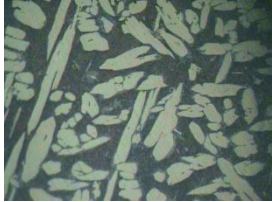
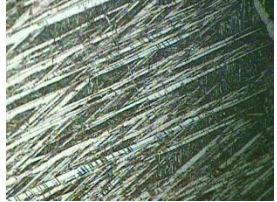
3	A DIESEL CRISOL GRAFITO FICM	Cu = 6.6 Zn = 2.33 Al = 0.63	Cu = 98.02 Zn = 0.62 Al = 1.69	40.1	31.0		
4.1	DE INDUCCIÓN CRISOL GRAFITO 1C ESPOCH	Cu = 73 Zn = 26.5 Al = 6.25	Cu = 69.7 Zn = 23.49 Al = 6.71 Otros = 0.1	90.05	94.4		
4.2	DE INDUCCIÓN CRISOL GRAFITO 2C ESPOCH	Cu = 73 Zn = 26.5 Al = 6.25	Cu = 71.6 Zn = 23.53 Al = 4.79	70.2	82.1		
5	DE INDUCCIÓN CRISOL GRAFITO ESPOCH	Cu = 60.16 Zn = 15.79 Al = 5.93	Cu = 75 Zn = 18.71 Al = 6.13 Otros = 0.16	80.4	96.7		

Tabla 21. Resultados de los ensayos de tracción

PROPIEDAD	PRUEBA 4.1 SIN TEMPLAR	PRUEBA 4.2 SIN TEMPLAR	PRUEBA 4.2 TEMPLADA	PRUEBA 5 SIN TEMPLAR	PRUEBA 5 TEMPLADA
Módulo de Elasticidad [Kg/cm²]	9.7x10 ⁵	1.2x10 ⁶	7.7x10 ⁵	1.3x10 ⁶	7.4x10 ⁵
Carga de Fluencia [Kg]	3243	2307	1621	2519	1853
Esfuerzo de Fluencia [Kg/cm²]	2560	1850	1300	2020	1440
Carga Máxima [Kg]	4030	4050	2770	3420	2600
Esfuerzo Máximo [Kg/cm²]	3181.32	3248.05	2221.51	2742.80	2020.52
% de Elongación	2.03	1.4	4.23	1.61	3.65
Tipo de Falla	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular

La prueba 1 se lo realizó en un horno a gas con crisol de acero al carbono, se fundió 4.05 libras de vainillas de fusil y luego se añadió 0.32 libras de aluminio electrolítico, obteniendo una aleación con una composición de 66.9%Cu, 25.18%Zn, 7.37%Al y 0.371%Fe. Luego de templearlo su dureza cambia de 55.8HRB a 91.8HRB, incrementándose en 36HRB, lo cual le transformó en una aleación extremadamente frágil, presentándose grietas en la probeta, tanto superficialmente como internamente. En cuanto a su microestructura, se tiene presencia de fase β (matriz) y fase α en la probeta sin templear, y en la probeta templeada se tiene solo fase β sin la presencia de martensita.

En la prueba 2, en un horno a gas con crisol de grafito se colocó 2.2 libras de vainillas de fusil, pero no llega a fundirse, por no alcanzar el punto de fusión de las vainillas (950°C), debido al espesor del crisol de grafito que fue de 13 mm, y se necesitó más poder calorífico.

En la prueba 3, en un horno a diesel con crisol de grafito, se fundió 6.6 libras de cobre electrolítico, 2.33 libras de Zinc, y 0.63 libras de aluminio electrolítico, obteniendo una composición de la aleación de 98.02%Cu, 0.62%Zn, y 1.69%Al. Luego de templearla su dureza cambia de 40.1HRB a 31.0HRB, disminuyendo en 9.1HRB, debido a su composición química y su dureza que están fuera de los rangos de las aleaciones inteligentes con memoria de forma, se rechaza esta aleación para el presente estudio.

En la prueba 4.1, en un horno de inducción con crisol de grafito, se fundió 73 libras de cobre electrolítico, 26.5 libras de Zinc electrolítico y 6.25 libras de aluminio electrolítico, obteniendo una aleación con 69.7%Cu, 23.4%Zn, 6.71%Al y otros elementos 0.16%. Luego de templear su dureza cambia de 90.05HRB a 94.4HRB, incrementándose en 3.95HRB, teniendo una aleación frágil. En cuanto a su microestructura se tiene la presencia solo de fase β en la probeta sin templear y templeada, sin la presencia de martensita. **Esta aleación se comporta como un material inteligente**

con memoria de forma, recuperando su forma original una vez que ha sido deformada al aplicarle calor con un serillo.

En la prueba 4.2, en un horno de inducción con crisol de grafito, se fundió 73 libras de cobre electrolítico, 26.5 libras de Zinc electrolítico y 6.25 libras de aluminio electrolítico, obteniendo una aleación con 71.6%Cu, 23.53%Zn, 4.79%Al. Luego de templar su dureza cambia de 70.2HRB a 82.1HRB, incrementándose en 11.9HRB. En cuanto a su microestructura se tiene la presencia de fase β (matriz) y fase α en la probeta sin templar y fase β y martensita en las probetas templadas, **obteniendo una aleación inteligente con memoria de forma superelástica, que recupera su forma original una vez que ha sido retirada la carga que lo deforma.**

En la prueba 5, en un horno de inducción con crisol de grafito, se fundió 60.16 libras de láminas de cobre electrolítico, 15.79 libras de zinc electrolítico y 5.93 libras de aluminio electrolítico, obteniendo una aleación con 75%Cu, 18.71%Zn, 6.13%Al y otros elementos 0.16%, Luego de templarla su dureza cambia de 80.4HRB a 96.7HRB incrementándose en 16.3HRB. En cuanto a su microestructura se tiene la presencia de fase β y fase α en las probetas sin templar y fase β y martensita en las probetas templadas. Su elongación es de 3.65, y como el número de ciclos de vida es superior a 10^3 ciclos, **el resultado es una aleación inteligente con memoria de forma superelástica que recupera su forma original una vez que ha sido retirada la carga que lo deforma.**

4.3 Verificación de la hipótesis

Tomando en cuenta los resultados de los análisis químicos, ensayos de tracción, fatiga, dureza, densidad y corrosión, realizadas y expuestas anteriormente, se comprobó que se obtuvo tres tipos de aleación inteligente con memoria de forma, la una correspondiente a la prueba 4.1

con una composición 69.7%Cu, 23.4%Zn, 6.71%Al, que recupera su forma original una vez que ha sido deformada al aplicarle calor, que una de las aplicaciones mecánicas sería, como uniones para tuberías de cobre y aleaciones con un ajuste perfecto, para esto se debe mecanizar una unión con un diámetro interior inferior al diámetro exterior de la tubería, luego se debe agrandarlo hasta acoplar las tuberías, una vez acopladas las tuberías dentro de la unión se aplica calor a esta y recupera su forma original es decir quedando de un diámetro interno inferior al diámetro externo de las tuberías produciéndose de esta manera un acople y ajuste perfecto de calidad sin fugas ni deformaciones.

El segundo tipo de aleación es la aleación inteligente con memoria de forma, de la prueba 4.2 con una composición de 71.6%Cu, 23.53%Zn, 4.79%Al que recupera su forma original, una vez que ha sido retirada la carga que lo deforma, calificada como aleación superelástica. Por ser una aleación superelástica se puede utilizar en bases de maquinaria para absorber vibraciones, en vigas y columnas de maquinaria y construcciones antisísmicas que sustituiría al acero, por ser esta aleación resistente a la corrosión a más de superelástica, en muelles y resortes de espiras, de platos y ballestas, barras de torsión en vehículos, pinzas elásticas, que también sustituirá al acero por ser resistente a la corrosión y superelástica mejorando la calidad y durabilidad de estos elementos.

El tercer tipo de aleación, es la aleación inteligente con memoria de forma, de la prueba 5 con una composición de 75%Cu, 18.71%Zn, y 6.13%Al, que recupera su forma original una vez que ha sido retirada la carga que lo deforma, también calificada como aleación superelástica. Las aplicaciones son similares a la aleación anterior, pero se trabajará con esta por ser la aleación que presentó homogeneidad en toda su colada y también por presentar una vida a fatiga mayor a 10^3 ciclos, considerado como un material de alto ciclaje a fatiga, cuyos resultados se pueden observar en la tabla 18, y tabla 19.

Como no existen datos de propiedades mecánicas, físicas y metalográficas de aleaciones similares, por que recién se está iniciando el estudio de este tipo de materiales inteligentes con memoria de forma, no se puede comprobar la hipótesis estadísticamente, solo se hará referencia al acero AISI/SAE 6150 que es un acero al cromo-vanadio de alta calidad, con excelentes características y apropiado para muelles o resortes tanto de espiras, de platos y ballestas por su alta elasticidad. Este tipo de acero, como todos los muelles, tiene excelentes propiedades elásticas pero poca capacidad de absorción de energía mecánica.

Además tiene poca resistencia a la corrosión por lo que se requiere grandes diámetros y espesores, si comparamos con la aleación inteligente con memoria de forma superelástica de la prueba 5 con 75%Cu, 18.71%Zn, y 6.13%Al, en cambio esta tiene calificación de sobresaliente en cuanto a corrosión se refiere, por tener una velocidad de corrosión de 0.0087 mm/año, según los cálculos realizados en el apartado 4.1.5.10, lo que le convierte en un material de alta calidad con relación a esta propiedad.

Por todo lo expuesto anteriormente, queda demostrada la hipótesis, es decir, que si se puede desarrollar con calidad nuevos productos, con un material inteligente con memoria de forma CuZnAl.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La aleación de la prueba 1, con composición 66.9%Cu, 25.18%Zn, 7.37%Al y 0.371%Fe, es una aleación con fase β , al templearla no se obtuvo martensita, pero su dureza subió 36 HRB volviéndola demasiado frágil, se considera que es por la presencia de hierro, al utilizar un crisol de hierro en un horno a gas.
- La prueba 2, no alcanzó la temperatura de fusión, porque se utilizó un crisol de grafito de 13 mm de espesor en un horno a gas, y no se consiguió el poder calorífico necesario para fundir las vainillas de fusil.
- La aleación de la prueba 3, con composición 98.02%Cu, 0.62%Zn y 1.69%Al, es una aleación de fase β , al templearla no se obtuvo martensita, pero su dureza bajo en 9.1HRB, y no se comporta como material inteligente. Existió demasiadas pérdidas del Zn por evaporación y oxidación y de aluminio por la reacción exotérmica que produce derramamientos y pérdidas de material.
- La aleación de la prueba 4.1 (primera cuchara), con composición química 69.7 % Cu, 23.49 % Zn, 6.71 % Al, nos dio como resultado una aleación inteligente con memoria de forma, que recupera su forma original al aplicarle calor una vez que ha sido deformada, la evidencia se presenta en un video.
- La aleación de la prueba 4.2 (segunda cuchara), con composición química 71.6 % Cu, 23.53 % Zn y 4.79 % Al, nos dio como resultado una aleación superelástica, recuperando su forma original una vez que se retira la carga que lo deforma, lo cual se corrobora con los

resultados del ensayo de tracción, y su microestructura metalográfica presenta una fase β más Martensita después de templarla.

- La aleación de la prueba 4.2 (segunda cuchara), se templó a 850°C por un lapso de 30 minutos y luego se enfrió en agua a temperatura ambiente.
- La prueba 4.2, presentó un porcentaje de elongación de 1.4 sin templar y un porcentaje de elongación de 4.23 después de templarla, corroborando también de esta manera que es una aleación superelástica.
- La prueba 5, nos dió una composición química de 75%Cu, 18.71%Zn, 6.13%Al, presentando uniformidad de toda la colada, lo cual se comprobó con los análisis metalográficos de todas las cajas de esta colada, obteniendo la misma microestructura.
- De los análisis y ensayos realizados a la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl de la prueba 5, también se concluye que es una aleación superelástica.
- La aleación 5 se templó a 850°C con un tiempo de permanencia de 1 hora y luego se enfrió en agua a temperatura ambiente.
- La prueba 5 presentó un porcentaje de elongación de 1.61 sin templar y un porcentaje de elongación de 3.65 después de templarla, corroborando también de esta manera que es una aleación superelástica.
- La prueba 5 al realizar el ensayo de fatiga se obtuvo los ciclos de vida hasta la falla, superior a 10^3 , lo que demuestra que tiene resistencia a la fatiga de alto ciclaje.
- Como la velocidad de corrosión de la aleación de la prueba 5 fue de 0.0087 mm por año, se lo califica a la aleación inteligente con memoria de forma 75%Cu, 18.71%Zn, 6.13%Al como sobresaliente, en cuanto a corrosión se refiere.
- La pérdida de zinc por evaporación y oxidación en éste proceso es del 11, 32 %.

- En todos los casos existió pérdidas de aluminio debido a la reacción exotérmica, lo cual produjo la elevación brusca de temperatura y el derramamiento de la colada. Las pérdidas de aluminio son aproximadamente de un 5.5 %.
- En este tipo de aleación primero se debe fundir el cobre, luego añadir el zinc y finalmente el aluminio, no añadir el zinc al final porque existe demasiadas pérdidas por evaporación y oxidación ya que al añadir el aluminio se produce una reacción exotérmica, lo que origina una subida brusca de temperatura de la colada, y al añadir luego el zinc se produce las pérdidas por evaporación y oxidación antes indicadas, ya que el punto de ebullición del Zinc es de 906°C.
- La aleación inteligente con memoria de forma 69.7 % Cu, 23.49 % Zn, 6.71 % Al de la prueba 4.1, se puede utilizar en elementos de unión para tuberías, mecanizando una unión de menor diámetro que las tuberías a unir, luego se le agranda su diámetro interno hasta que se pueda acoplar las tuberías y finalmente se aplica calor a la unión y recupera su forma original, es decir quedando de menor diámetro que las tuberías produciéndose un apriete perfecto.
- La aleación inteligente con memoria de forma 75%Cu, 18.71%Zn, y 6.13%Al de la prueba 5, se puede aplicar en muelles tipo espiral o ballesta, en actuadores eléctricos y mecánicos, en estructuras de puentes, en bases de maquinaria para absorber vibraciones, columnas y vigas de maquinaria, en barras de torsión debido a su alta superelasticidad.

5.2 Recomendaciones

- Bajar la frecuencia del horno 10 minutos antes de colar, para que se produzca el auto mezclado y garantizar la homogeneidad de toda la colada como en la prueba 5.

- Utilizar 0.1 % de bórax para afinar el grano de la aleación y ayudar a la escorificación.
- Utilizar equipo de seguridad para evitar quemaduras, por que al colocar el Zn y Al se produce evaporación y reacciones exotérmicas respectivamente, que originan una nube de óxido de zinc y derramamientos de la colada.
- Se recomienda en futuras pruebas, tomar en cuenta las pérdidas de Zn y Al
- Se recomienda utilizar en lo posible hornos de inducción de baja frecuencia, ya que estos ayudan al automezclado, garantizando la homogeneidad de la aleación.
- Se recomienda a futuros investigadores sobre este tema, trabajar sobre la composición de la prueba 4.1 y determinar más aplicaciones mecánicas.
- Se recomienda obtener la suficiente cantidad de material, para que se pueda realizar todos los ensayos mecánicos y en especial los ensayos a fatiga, que requieren de un gran número de probetas para la realización del análisis estadístico de fatiga.

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LA ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE FORMA 75%Cu - 18.71%Zn - 6.13%Al, CALIFICADA COMO SUPERELÁSTICA.

6.1 DATOS INFORMATIVOS

La aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl, todavía no ha sido muy difundida en nuestro país y a nivel mundial, por falta de estudio y desconocimiento de sus propiedades, por esta razón me he centrado en esta investigación en primer lugar para obtener una aleación con memoria de forma CuZnAl, para posteriormente analizar sus propiedades y en función de éstas determinar su aplicación industrial. Se obtuvo dos tipos de aleación CuZnAl, en el primer caso se consiguió una aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl que recupera su forma original una vez que ha sido deformada al aplicarle calor y la segunda una aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl que recupera su forma original una vez que se retira la carga que lo deforma, calificada como aleación superelástica, lo cual fue corroborado en ambos casos por los resultados de los análisis químicos, ensayos mecánicos y ensayos físicos realizados en probetas de dichas aleaciones.

6.2 Antecedentes de la propuesta

En el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile, en agosto del 2008 Pablo Cecil Salvador Gibson Torres, realizó un estudio similar denominado “ FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA ALEACIÓN CON MEMORIA DE FORMA CuZnAl CONSIDERADA PARA DISIPADORES SÍSMICOS”.

Desde el año 2000 se han desarrollado en la Universidad de Chile estudios sobre aleaciones con memoria para uso en disipación de energía sísmica. Se han realizado varias tesis en los departamentos de Ingeniería Civil y Mecánica han fabricado aleaciones de Cu-Zn-Al de composición cercana a la usada por el Centro Atómico de Bariloche (CAB) en monocristales. Los valores nominales de tal composición se presenta en la tabla 22.

Tabla 22. Composición Nominal Bariloche. (Fuente: GIBSON T. Pablo Cecil Salvador. Tesis de Grado. 2008)

Aleación	Componentes		
	Cu[%wt]	Zn[%wt]	Al[%wt]
Bariloche	75.35	16.90	7.71
Vera [34]	75.00	17.04	7.24
Pedrasa [33]	75.37	19.91	7.07
Vargas [35]	74.12	20.04	5.82
Saldivia (1,5 %wt.Ni) [39]	67.80	27.00	3.70

6.3 JUSTIFICACIÓN

Es necesario determinar un procedimiento, para obtener la aleación CuZnAl cuya composición sea de 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al calificada como superelástica, el cual se pueda seguir a fin de garantizar su

composición y propiedades, para posteriormente determinar su aplicación Industrial.

6.4 OBJETIVOS

6.4.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar un procedimiento para la obtención de la aleación inteligente con memoria de forma 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al, calificada como superelástica.

6.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Ensayar y analizar la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl obtenida.
- Determinar su aplicación industrial.

6.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

La presente propuesta es factible de realizarla ya que se cuenta con la tecnología y el recurso humano para el desarrollo, y contamos con el apoyo de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en cuanto a equipos, mientras se reparan y calibran los de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

La obtención de la aleación se realizará en el horno de inducción de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de 60 Kg de capacidad, con asesoramiento del Ing. M.Sc. Mario Pastor. Debo indicar que al momento la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato está en proceso de adquisición de un horno de inducción de 5 Kg de capacidad, lo cual permitirá realizar trabajos similares con pequeñas cantidades.

El análisis químico se realizará en la Empresa Ferro Aleaciones S.A de la ciudad de Guayaquil, mediante un espectrómetro de Chispa, cuyos resultados son entregados en 2 días laborables.

La Carrera de ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, cuenta con un laboratorio de Materiales en excelentes condiciones, en donde se realizará la mayor parte de ensayos de la aleación y los complementarios en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

6.6 FUNDAMENTACIÓN

La presente propuesta se basa en la información recolectada en el Capítulo II, IV y V que se relaciona con el marco teórico, análisis e interpretación de resultados y conclusiones respectivamente, donde se presentan la fundamentación teórica necesaria, los resultados de los diferentes ensayos y análisis químicos de las 5 pruebas realizadas en la presente investigación, hasta que se consiguió lo esperado, es decir una aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl con composición química 75%Cu, 18.71%Zn y 6.13%Al

6.7 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del estudio se requiere el seguimiento de varias actividades las cuales se detallan a continuación:

1. Moldeo de las cajas en arena de probetas a utilizar en los ensayos.
2. Preparación de la materia prima.
3. Preparación del horno.
4. Pre calentamiento del horno.
5. Carga del horno.
6. Fusión del cobre.

7. Adición del Zn y Al.
8. Homogenización de la colada.
9. Vertido de la colada en la cuchara.
10. Colado de las cajas
11. Desmoldeo de las cajas de probetas.
12. Mecanizado de las probetas.
13. Temple de probetas.
14. Análisis Químico.
15. Análisis Metalográfico
16. Ensayos Mecánicos.
17. Ensayos Físicos.
18. Evaluación y resultados.
19. Determinación de la aplicación industrial.

6.7.1 Moldeo de probetas

Para el estudio de la aleación inteligente con memoria de forma, se moldea probetas de sección cilíndricas de 25 mm de diámetro por 200 mm de largo y probetas de sección rectangular de 12.5 mm x 4mm por 200 mm de largo y probetas de sección rectangular de 25 mm x 4 mm por 200 mm de largo.

En la práctica, casi todo tipo de piezas y probetas siguen el mismo procedimiento para su moldeo en arena, que a continuación se detalla.

1. Fabricar la caja de moldeo si no existiera, de acuerdo a las dimensiones de las probetas o piezas, siendo de metal de 5 pulgadas de altura, tanto para la caja superior e inferior.
2. Preparar la arena de moldeo sirniendola y humedeciéndola hasta 7.5% de humedad, o hacer la prueba del puño.



Figura 72. Arena de moldeo con 7.5 % de humedad. (Fuente: El autor)

3. Mojar las paredes interiores de la caja de moldeo para que exista una buena adhesión de la arena de moldeo.
4. Colocar los moldes de las probetas sobre un tablero de trabajo, de manera que quede el modelo en la posición deseada.
5. Colocar la mitad inferior de la caja de moldeo alrededor del modelo y sobre el tablero de trabajo, como se indica en la figura 68.

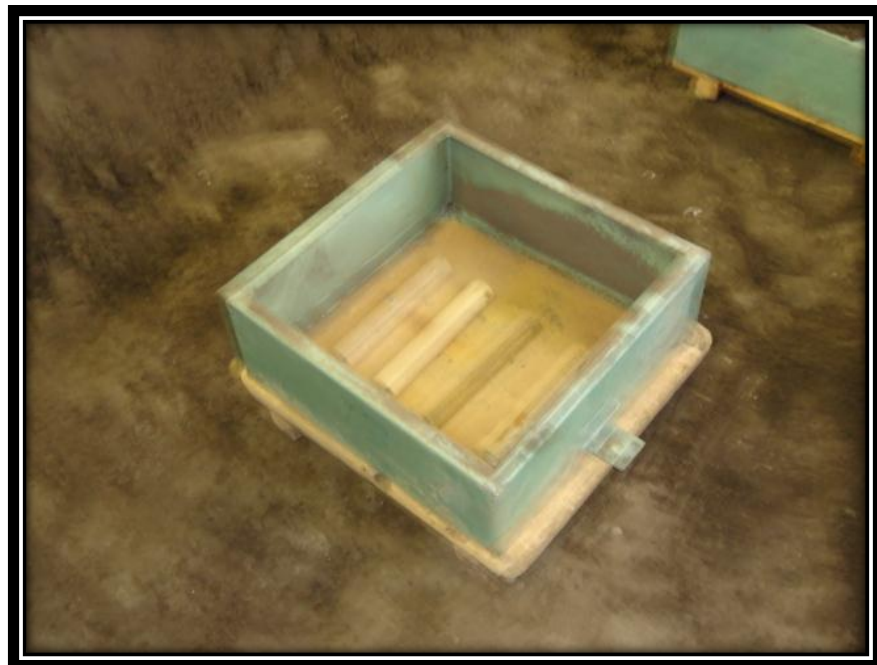


Figura 73. Disposición de los modelos de madera en la caja de moldeo. (Fuente: El autor)

6. Colocar arena fina o de recubrimiento sobre el modelo y comprimirla alrededor del mismo.
7. Completar la caja con arena de relleno.



Figura 74. Caja de moldeo llena de arena. (Fuente: El autor)

8. Atacar la arena suavemente en torno al modelo y más fuertemente alrededor de las paredes de la caja.



Figura 75. Atacado de la arena de moldeo. (Fuente: El autor)

9. Añadir arena hasta desbordar unos centímetros de la caja y apisonar otra vez fuertemente.
10. Aplanar la superficie superior de la caja arrastrando arena sobrante con un perfil plano.



Figura 76. Aplanado de la caja de Moldeo. (Fuente: El autor)

11. Dar vuelta la caja que se está moldeando con todo tablero de trabajo, para evitar desmoronamientos de la arena de la caja.
12. Descubrir los bordes del modelo.



Figura 77. Modelos descubiertos de arena. (Fuente: El autor)

13. Colocar arena fina sobre los modelos.



Figura 78. Colocación de arena fina sobre los modelos.

14. Colocar alrededor de los modelos la caja superior, dejándola bien centrada.

15. Colocar los bebederos.



Figura 79. Disposición de los bebederos en la caja de moldeo.

(Fuente: El autor)

16. Colocar arena fina y gruesa de relleno, atacarlos de la misma forma que se hizo con la caja inferior.



Figura 80. Atacado de la caja superior. (Fuente: El autor)

17. Dar vuelta la caja superior moldeada.

18. Extraer los modelos y bebederos.



Figura 81. Extracción de los modelos. (Fuente: El autor)

19. Elaborar los canales de distribución y entradas, que comunican el molde con los bebederos.



Figura 82. Elaboración de los canales de alimentación. (Fuente: El autor)

20. Reparar todas las partes que se hayan averiado al retirar los modelos.

21. Revisar la nitidez de los detalles y partes de las probetas.



Figura 83. Revisión de detalles. (Fuente: El autor)

22. Soplar los residuos de arena atrapados en el molde, bebederos y canales de alimentación.



Figura 84. Soplado de residuos de arena atrapados en los moldes.
(Fuente: El autor)

23. Secado de las cajas con un mechero a gas.



Figura 85. Secado de cajas de moldeo. (Fuente: El autor)

Unir la caja superior con la inferior y asegurarlas para que no se abran con la presión del metal líquido.

6.7.2. Preparación de la materia prima para la aleación CuZnAl

La materia prima para la Aleación Inteligente con memoria de forma CuZnAl fue chatarra de cobre, y aluminio electrolíticos con 99.9 % de pureza, ánodos de Zinc electrolítico con 99.9 % de pureza, que fueron comprados a la empresa GALVANO de la ciudad de Quito.

La chatarra de cobre electrolítico, fue auspiciado por las empresas ECUATRAN S.A de la Ciudad de Ambato, también por el departamento de electricidad del DIDEP de la Universidad Técnica de Ambato y por el Ing. Jorge López.

Antes de utilizar la chatarra se tiene que limpiarla bien y desengrasarla asegurándose que no contengan residuos de polvo, grasa u otros elementos extraños.

6.7.3. Preparación del horno de inducción

Para la fusión de la aleación CuZnAl se utilizó el horno de Inducción marca CALAMARI del Taller de Fundición de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), con asesoramiento del Ing. M.Sc. Mario Pastor y operación del horno por el Sr. Víctor Moreta.



Figura 86. Horno de Inducción FIM-ESPOCH. (Fuente: El autor)

Para asegurar su funcionamiento del mismo y del proceso, se cumplió con las siguientes condiciones.

1. Limpieza total de todas sus partes, principalmente del crisol, para evitar contaminaciones con posibles residuos existentes en el mismo.



Figura 87. Limpieza del horno de inducción. (Fuente: El autor)

2. Revisar que todas sus partes y elementos se encuentren en buen estado y funcione con normalidad.
3. Revisar que el breaker del panel y el de pared se encuentren desconectados.
4. Realizar inspección Visual interna del panel.
5. Activar la bomba de agua y esperar 5 minutos.
6. Revisar que no existan fugas de agua en el panel.
7. Activar los breaker de pared y de panel.
8. Hacer una prueba de aislamiento.
9. Poner el potenciómetro en posición "0".
10. Pulsar el botón Start y esperar 1 minuto.
11. Tomar datos de los parámetros eléctricos.

6.7.4 Precalentamiento del horno de inducción

Para asegurar un buen funcionamiento del horno de inducción y no haya contaminación por vapor de agua debido a humedad del crisol de grafito y el resto de partes, se debe precalentar el horno durante 1 hora como mínimo.

6.7.5 Carga del horno

Se procede a realizar la primera carga del horno con cobre y luego a taparlo.



Figura 88. Primera Carga del horno de inducción con cobre.
(Fuente: El autor)

6.7.6 Fusión del Cobre

Una vez realizada la primera carga del horno, se procede a incrementar la potencia para que alcance una temperatura de 1083°C produciéndose la fusión del cobre y esperamos que baje la carga conforme se va fundiendo para continuar añadiendo el cobre hasta completar las 60.16 libras prefijadas, para obtener 80 libras de aleación en total.

6.7.7 Adición del Zn y Al

Una vez que se encuentra fundido todo el cobre, procedemos a colocar las 15.79 libras de Zinc, con mucha precaución ya que como el Zinc tiene

bajo punto de fusión (419.5°C), se evapora inmediatamente formando una nube de vapor y óxido de Zinc.



Figura 89. Reacción del zinc al añadir al Cu líquido. (Fuente: El autor)

Posteriormente añadimos 5.93 libras de Aluminio, con sumo cuidado porque este tiende a producir una reacción exotérmica, lo que tiende a subir inmediatamente la temperatura de la colada y produce pequeños derramamientos de la colada, la cual después debe ser recuperada.



Figura 90. Reacción del Aluminio al añadir a la colada. (Fuente: El autor)



Figura 91. Recuperación de colada derramada. (Fuente: El autor)

6.7.8. Homogenización de la colada

Se tiene que verificar que se encuentren fundidos los tres elementos, posteriormente se baja la frecuencia del horno para que se produzca el auto mezclado.



Figura 92. Verificación de fusión completa. (Fuente: El autor)

Luego se procede a agitar la colada con un pedazo de madera para evitar contaminación con otro metal solo por seguridad.



Figura 93. Mezclado manual de la colada. (Fuente: El autor)

6.7.9 Vertido de la colada en la cuchara

Vaciamos la colada del horno en una cuchara recubierta con material refractario en su interior, previamente precalentada.



Figura 94. Vaciado de la colada en la cuchara. (Fuente: El autor)

6.7.10 Colado de las cajas

Procedemos al colado del metal líquido en las cajas de probetas moldeadas en arena.



Figura 95. Colado de cajas. (Fuente: El autor)

Luego apagamos el horno poniendo el potenciómetro en “0” y pulsando el botón Stop y desconectamos los breakers, dejamos enfriar el horno con circulación de agua forzada durante 3 horas.

6.7.11 Desmoldeo de las cajas de probetas

Procedemos al desmoldeo de las cajas, teniendo mucho cuidado de no romperlas o deformarlas.



Figura 96. Desmoldeo de cajas. (Fuente: El autor)

Posteriormente recuperamos todas las probetas y procedemos a limpiarlas.

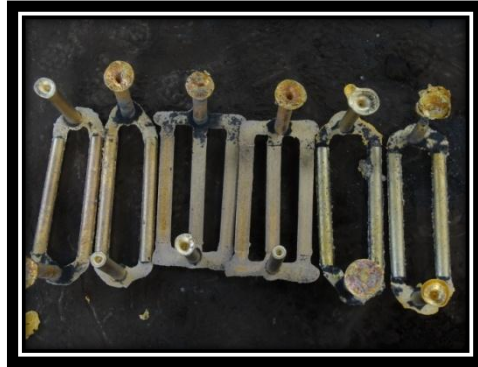


Figura 97. Recuperación de probetas. (Fuente: El autor)

6.7.12 Mecanizado de probetas

El mecanizado de las probetas se lo realizó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

El Torneado de las probetas para ensayo de Tracción según la norma ASTM E-8 especimen 1, y las probetas para ensayo de Fatiga según la norma ASTM E-606-92 (Reapproved 1998), se lo realizó en el taller del Sr. Germán Vargas.



Figura 98. Torneado de probeta ensayo de tracción. (Fuente: El autor)



Figura 99. Probeta para ensayo de tracción según norma ASTM E-8 espécimen 1. (Fuente: El autor)



Figura 100. Probeta para ensayo de Fatiga según norma ASTM E-606-92 (Reapproved 1998). (Fuente: El autor)



Figura 101. Probeta plana para ensayo de Fatiga. (Fuente: El autor)

6.7.13 Templado de probetas

Para que la aleación 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al se comporte como una aleación inteligente con memoria de forma hay que templarla. Este tratamiento térmico se lo realizó en el laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por encontrarse nuestro horno en reparación, bajo los siguientes parámetros:

Primero se determina el Zinc Equivalente (Zn_{equiv}), con la ecuación (1)

$$Zn_{equiv} = 100 - Cu\% \cdot \frac{100}{100 + X\%(k-1)}$$

Donde:

X = porcentaje del elemento de aleación, (6.13% Zn).

K = coeficiente de equivalencia en Zn.

Cu = 75%

Para el aluminio k = 6,

$$Zn_{equiv} = 100 - 75 \cdot \frac{100}{100 + 6.13\%(6-1)}$$

$$Zn_{equiv} = 42.53\%$$

Con el valor del zinc Equivalente de 42.53% trazamos una línea vertical color verde en el diagrama bifásico Cu-Zn, luego trazamos dos líneas horizontales desde las intersecciones de esta línea con las del diagrama que corresponden a las temperaturas de 700°C y 875°C respectivamente, y tomamos una temperatura de temple de 850°C, para asegurarnos de una perfecta transformación de fases, como se puede observar en la siguiente gráfica.

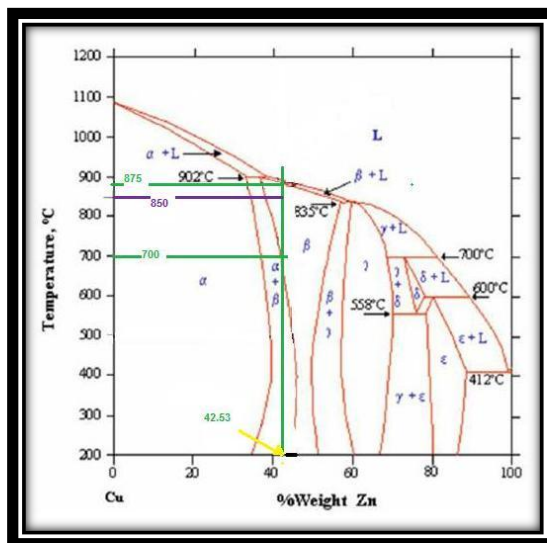


Figura 102. Determinación de la temperatura de temple de la aleación 75% Cu-18.71% Zn-6.13% Al, en función del Zinc Equivalente. (Fuente: El autor)

Como las probetas son de 1 pulgada de diámetro, se deja 1 hora a esa temperatura en el horno eléctrico de tratamientos térmicos, para posteriormente enfriarla en agua a temperatura ambiente (15°C).



Figura 103. Horno de tratamientos térmicos listo para el retiro de las probetas. FIM-ESPOCH. (Fuente: El autor)



Figura 104. Probetas de la aleación templadas a 850°C , con 1 hora de permanencia a esa temperatura y enfriada en agua a temperatura ambiente. (Fuente: El autor)

6.7.14 Análisis químico de la aleación

El análisis químico de la aleación se lo realizó en la empresa Ferro Aleaciones S.A (FALESA), de la Ciudad de Guayaquil con un espectrómetro de chispa de última tecnología, arrojando resultados exactos y confiables con relación a otros métodos. Se obtuvo los siguientes resultados:

Cu = 75%

Zn = 18.71%

Al = 6.13%

Otros = 0.16%

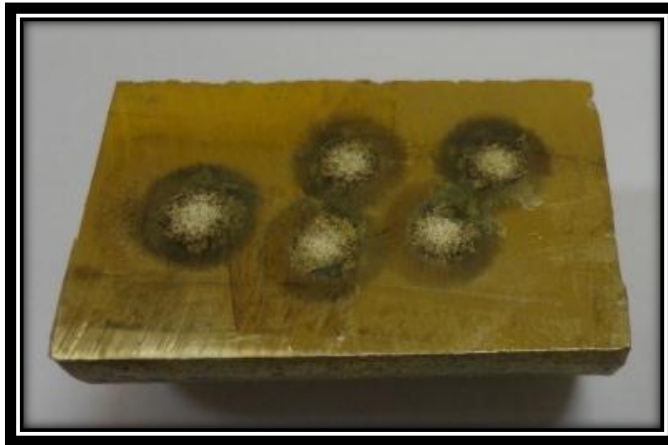


Figura 105. Análisis Químico aleación 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al superelástica, mediante Espectrómetro de chispa. FALESA. (Fuente: El autor)

6.7.15 Análisis Metalográfico

El análisis metalográfico de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl, se lo realizó en el laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Toma de la muestra, se procede a cortar un pedazo de una probeta cilíndrica de 1 pulgada de diámetro y 1 pulgada de longitud con la ayuda de un Discotom.



**Figura 106. Corte de probeta para el análisis metalográfico en el Discotom.
(Fuente: El autor).**

2. Desbastado de la probeta. Procedemos a desbastar la probeta en un banco de lijas que contiene 4 tipos de lijas de agua, 240, 320, 400 y 600 granos por pulgada cuadrada, para eliminar asperezas o marcas profundas que pueda existir en la misma.



Figura 107. Desbaste de probeta en el banco de lijas. (Fuente: El autor)

3. Pulido de la probeta. La probeta tiene que estar perfectamente pulida, sin irregularidades en la superficie y brillante como un espejo, para esto utilizamos una pulidora de disco que contiene un paño muy fino en el

mismo, sobre el cual se coloca la probeta, se añade una gota de alúmina de 5 μm para que ayude al pulido, se ejerce un poco de presión sobre la probeta y continuamos así, hasta que la probeta este perfectamente pulida.



Figura 108. Pulido de probeta en pulidora de disco. (Fuente: El autor)

4. Ataque Químico. Una vez que la probeta está perfectamente pulida y con la superficie brillante, la lavamos y secamos con flujo de aire, para posteriormente proceder a realizar el ataque químico de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl, con un reactivo químico que contiene 20 gr de FeCl_3 , 5 ml de HCl , 1 gr de CrO_2 , y 100 ml de agua destilada, se procede a atacarla durante 3 segundos; pasado los 3 segundos se detiene el ataque con alcohol, la lavamos bien con agua y la secamos con flujo de aire frío.



Figura 109. Ataque químico, reactivo 20 gr de FeCl_3 , 5 ml de HCl , 1 gr de CrO_2 , y 100 ml de agua destilada. (Fuente: El autor)

5. Observar la probeta al microscopio. Colocamos la probeta en el porta objetos del microscopio y procedemos a regular hasta que la imagen de la microestructura este bien clara y definida, luego tomamos la fotografía con la ayuda de un software que interrelaciona la imagen que se observa al microscopio con la computadora, y finalmente grabamos la imagen en extensión jpg o bmp.



Figura 110. Observación de la microestructura en el microscopio metalográfico, con proyección al monitor de la computadora.

(Fuente: El autor)

6. Evaluación de la Microestructura de la aleación inteligente con memoria de forma 75%Cu-18,71%Zn-6.13%Al sin templar y templada a 850°C por lapso de 1 hora y enfriada en agua a temperatura ambiente. En la microestructura de la figura 104 se observa que está formada por dos fases, la fase β como matriz y la fase α .



Figura 111. Microestructura Aleación 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al, sin temprar a 100X, atacado con reactivo químico (20 gr de FeCl_3 , 5 ml de HCl, 1 gr de CrO_2 , y 100 ml de agua destilada) durante 3 segundos, observamos una microestructura de dos fases β y α . (Fuente: El autor)

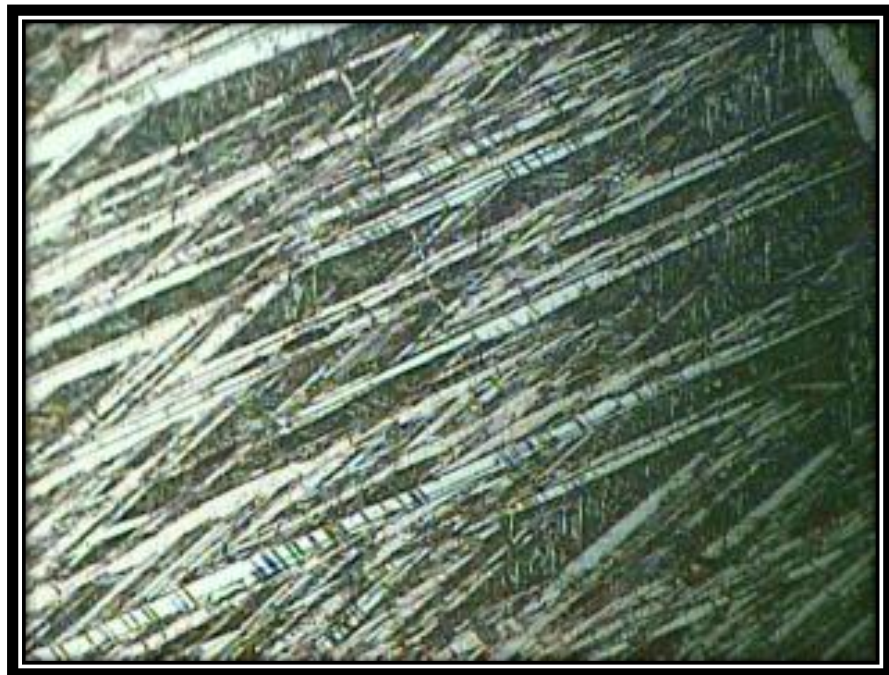


Figura 112. Microestructura Aleación 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al, templada a 100X, atacado con reactivo químico (20 gr de FeCl_3 , 5 ml de HCl, 1 gr de CrO_2 , y 100 ml de agua destilada) durante 3 segundos, observamos una microestructura de fases β y Martensita. (Fuente: El autor)

6.7.16 Ensayos Mecánicos

1. **Ensayo de Tracción.** El ensayo de tracción se lo realizó en la Máquina Universal del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Mecánica, de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por encontrarse la máquina universal de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, en proceso de calibración. Se obtuvo los siguientes resultados.

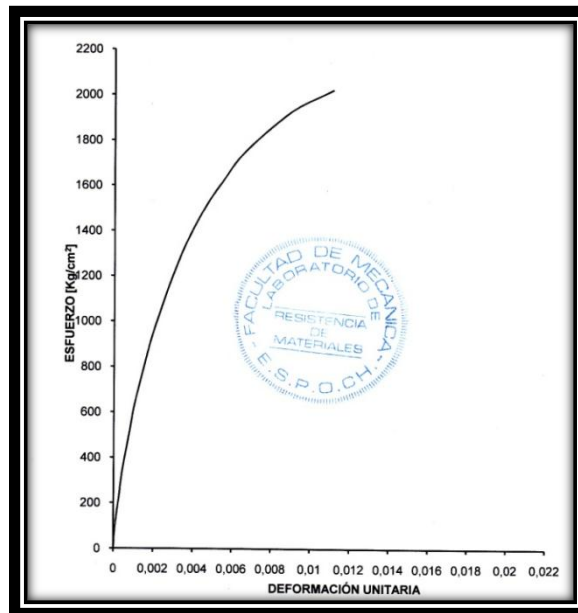


Figura 113. Curva esfuerzo – deformación aleación inteligente con memoria de forma 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al templada.

Tabla 23. Resultados del Ensayo de Tracción aleación inteligente con memoria de forma 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al templada, calificada como superelástica.

DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	PRUEBA 4.1 SIN TEMPLAR
Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)	7.4x10 ⁶
Carga de Fluencia (Kg)	1853
Esfuerzo de Fluencia (Kg/cm ²)	1440
Carga Máxima (Kg)	2600
Esfuerzo Máximo (Kg/cm ²)	2020.52
Porcentaje de Elongación (%)	3.65
Tipo de Falla	Irregular

2. **Ensayo de fatiga.** Para determinar la vida a fatiga de la aleación, se realizó el ensayo en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de 1 probeta por no disponer de más material, según la norma ASTM E-606-92 (Reapproved 1998), obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 24. Resultados del Ensayo de fatiga aleación inteligente con memoria de forma 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al templada, calificada como superelástica.

CARGA (Kg)	DIÁMETRO (mm)	ESFUERZO (Kg/mm²)	REVOLUCIONES (RPM)	HORAS DE VIDA
1	7.5	0.249	26964	7min, 35 s

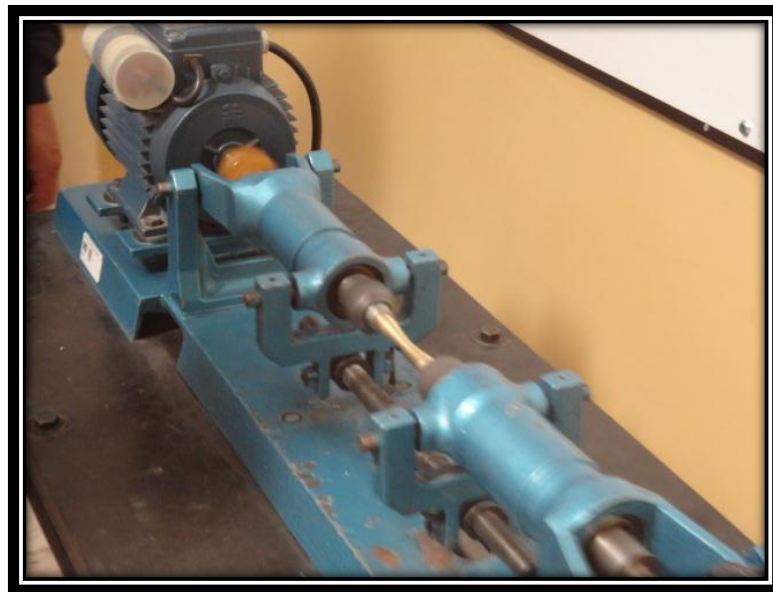
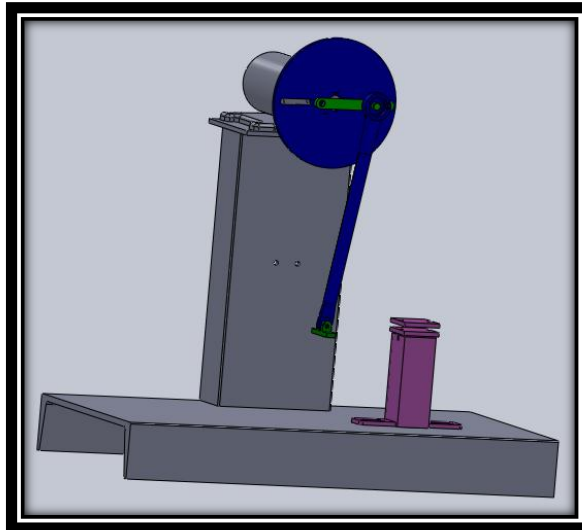


Figura 114. Máquina para ensayo de fatiga FIM-ESPOCH.

(Fuente: El autor)

También se procedió a realizar el ensayo a fatiga de 4 probetas planas, utilizando una máquina diseñada y construida por el Ing. Jorge Patricio Guamanquispe Toasa, según la norma ASTM B 593-96 (Reapproved 2003), obteniendo los siguientes resultados:



**Figura 115. Máquina para ensayo de fatiga para probeta plana.
(Fuente: Ing. Jorge Guamanquispe)**

Tabla 25. Resultados del Ensayo a fatiga con probeta plana, aleación inteligente con memoria de forma 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al templada, calificada como superelástica.

CARÁCTERÍSTICAS	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	ENSAYO 4
Material	Aleación CuZnAl	Aleación CuZnAl	Aleación CuZnAl	Aleación CuZnAl
Dimensiones	Probeta tipo b	Probeta tipo b	Probeta tipo b	Probeta tipo b
Tipo de carga	Flexión en cantiléver cíclica	Flexión en cantiléver cíclica	Flexión en cantiléver cíclica	Flexión en cantiléver cíclica
Módulo Elasticidad (MPa)	72569.21	72569.21	72569.21	72569.21
Carga (N)	190	156	130	56.6
Esfuerzo (MPa)	423.322	277.028	218.133	144.631
Espesor de la probeta (mm)	4.8	4.8	4.8	4.8
Deflexión (mm)	9	7.5	5.5	3.5
Número de ciclos hasta la falla	5565	35000	45445	52084
Tiempo de vida (min)	3.0	19.4	25.2	28.9

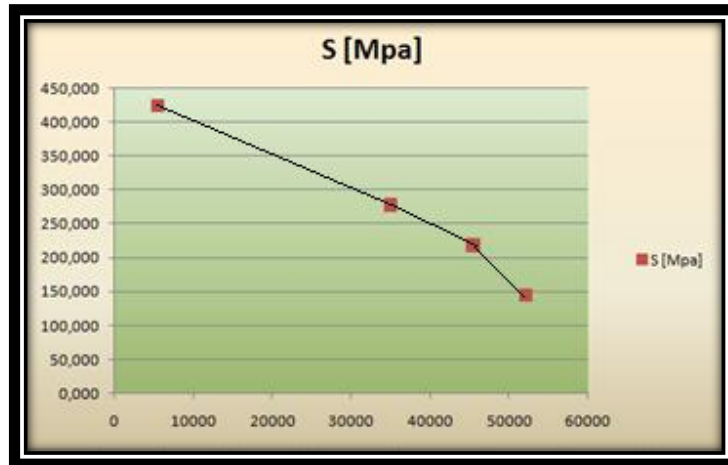


Figura 116. Diagrama Esfuerzo-Número de ciclos, aleación inteligente con memoria de forma 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al templada. (Fuente: El autor)

3. **Ensayo de dureza.** Para determinar la dureza se utilizó el Durómetro del Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, se aplicó la norma ASTM E-18, con escala de dureza Rockwell B (HRB), con esfera de 1/16", carga de 980 N, obteniendo los siguientes resultados para la aleación 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al.



Figura 117. Ensayo de Dureza aleación 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al. (Fuente: El autor)

Tabla 26. Valores de Dureza HRB aleación 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al sin Templar. (Fuente: El autor)

No. MEDICIÓN	DUREZA HRB
1	77.5
2	80.0
3	80.5
4	79.5
5	83.0
6	78.5
7	79.5
8	83.0
9	81.0
10	81.0
DUREZA PROMEDIO	80.4

Tabla 27. Valores de Dureza HRB aleación 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al Templada en agua a temperatura ambiente, desde 850°C después de 1 hora de permanencia a esta temperatura. (Fuente: El autor)

No. MEDICIÓN	DUREZA HRB
1	99.0
2	95.5
3	96.5
4	92.0
5	98.0
6	100.0
7	91.0
8	100.0
9	99.0
10	96.0
DUREZA PROMEDIO	96.7

6.7.17 Ensayos Físicos

1. Determinación de la Densidad de la aleación inteligente con memoria de forma 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al

Para el cálculo de la densidad utilizamos la ecuación (15):

$$\rho = \frac{m}{v}$$

La masa se determinó con la ayuda de una balanza electrónica dándonos un valor de 770.4 gr.

El volumen se determinó con la ayuda de un vaso graduado en el que colocamos 1400 cm³ de agua, luego introducimos la probeta de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl dentro del vaso con agua y leemos el volumen de agua desplazado, dándonos una lectura de 1501 cm³ en total procediendo a restar los 1400 cm³ iniciales, tenemos el valor de 101 cm³ de volumen desplazado, lo que equivaldría al volumen de la probeta.



Figura 118. Colocación de la probeta dentro del vaso graduado con agua.

(Fuente: El Autor)

Reemplazando en la ecuación 15 tenemos:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$\rho = \frac{770.4 \text{ gr}}{101 \text{ cm}^3}$$

$$\rho = 7.63 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

2. Ensayo de corrosión

El ensayo se desarrolló de acuerdo a la norma ASTM G1-03 para preparación, limpieza y evaluación de probetas ensayadas a corrosión y la norma ASTM B-117-02, que se aplica para corrosión acelerada a nivel de laboratorio, tal que permita simular ambientes corrosivos extremos de forma controlada, que nos permitan determinar la vida esperada de resistencia de los materiales bajo dichas condiciones. Se procedió de la siguiente manera el día 3 de abril del 2012:

1. Se preparó una probeta de la aleación Inteligente con memoria de forma CuZnAl de las siguientes dimensiones: 37.45x25.9x4.4 mm. Como se observa en la figura.



Figura 119. Probeta para ensayo de corrosión, material inteligente 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al. (Fuente: El autor)

2. Pesamos la probeta, determinando de esta manera el peso inicial, siendo de: 30 gr.
3. Preparamos el medio corrosivo. En un litro de agua se añade 35 gr de sal doméstica (ClNa al 87% de concentración), y la agitamos.



Figura 120. Pesado en la balanza electrónica de 35 gr de sal al 87% de concentración. (Fuente: El Autor)

4. Colocamos la probeta en el medio corrosivo en un vaso de ensayo graduado y la dejamos ahí por un mes (720 Horas).
5. Transcurrido este tiempo, retiramos la muestra del vaso de ensayo, la limpiamos y procedemos a pesarla dándonos un valor de 29.99gr.
6. Finalmente procedemos a analizar la muestra y determinamos el tipo de corrosión si lo hubiera. En caso de corrosión uniforme, procedemos quitar toda la capa de óxido que se ha formado sobre la pieza. En el caso de corrosión por picado, procedemos a medir el tamaño de la picadura.
7. Determinamos la velocidad de corrosión utilizando la ecuación 16:

$$\frac{mm}{yr} = \frac{(87.6 W)}{(D.A.T)}$$

$$W = W_i - W_f = 30 \text{ gr} - 29.99\text{gr} = 0.01\text{gr} = 10\text{mgr}$$

$$A = 2(0.44\text{cm} \times 3.745\text{cm}) + 2(0.44\text{cm} \times 2.59\text{cm}) + 2(2.59\text{cm} \times 3.745\text{cm}) = 18,25 \text{ cm}^2$$

$$T = 30 \text{ días} = 720 \text{ horas}$$

Reemplazando en la ecuación 16 tenemos:

$$\frac{mm}{yr} = \frac{(87.6 \times 10)}{(7.63 \times 18.25 \times 720)}$$

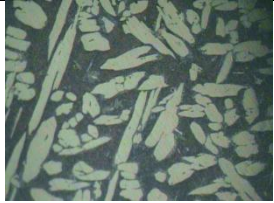
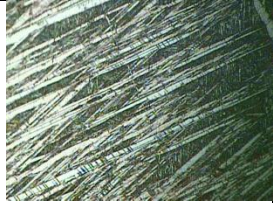
$$\frac{mm}{yr} = 0.0087$$

Como la velocidad de corrosión es de 0.0087 mm por año, se califica a la aleación inteligente con memoria de forma superelástica 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al, como un material sobresaliente en cuanto a corrosión se refiere.

6.7.18 Evaluación de resultados

En la siguiente tabla se presenta un resumen de todos los resultados de los ensayos realizados a la aleación 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al, y de acuerdo a esto se determina que es una aleación Inteligente con memoria de forma superelástica, la micro estructura resultante después del temple contiene fase β (matriz) y Martensita.

Tabla 28. Resultados de ensayos realizados a la aleación 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al.

No. PRUEBA	TIPO HORNO	ELEMENTOS AÑADIDOS (LBS)	COMPOSICIÓN QUÍMICA OBTENIDA (%)	DUREZA SIN TEMPLAR (HRB)	DUREZA DESPUÉS TEMPLE (HRB)	MICROESTRUCTURA OBTENIDA (100X)	MICROESTRUCTURA OBTENIDA DESPUÉS DEL TEMPLE EN AGUA 850°C 1H(100X)	DENSIDAD (gr/cm ³)
5	DE INDUCCIÓN CRISOL GRAFITO ESPOCH	Cu = 60.16 Zn = 15.79 Al = 5.93	Cu = 75 Zn = 18.71 Al = 6.13 Otros = 0.16	80.4	96.7			7.63

6.7.19 Determinación de la aplicación Industrial

Debido a que se consiguió obtener una aleación inteligente con memoria de forma cuya composición química es 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al superelástica, es decir que recupera su forma original una vez que se retira la carga o fuerza que lo deforma, una primera aplicación sería como resorte o muelle de ballesta, y para demostrarlo, utilizamos una probeta plana de la aleación inteligente con memoria de forma, la deformamos en forma de ballesta y para después templarla a 850⁰C con 1 hora de permanencia a esta temperatura y posteriormente la enfriamos en agua a temperatura ambiente. Luego de este proceso obtuvimos un resorte o muelle de ballesta de un material inteligente con memoria de forma superelástico, como se observa en la siguiente figura.



Figura 121. Muelle o Resorte de ballesta de material inteligente con memoria de forma 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al superelástico. (Fuente: El autor).

Para comprobar su comportamiento como muelle o resorte de ballesta, se realizó el ensayo de fatiga descrito anteriormente y además se utilizó la máquina universal, como se puede observar en las figuras 122 y 123.



Figura 122. Ubicación de la ballesta en la máquina universal FICM-UTA, para comprobación de elasticidad. (Fuente: El autor)

Procedemos a aplicarle carga con la máquina universal, simulando una carga externa que actúa sobre la ballesta y cuando se retira la carga, recupera su forma original, tal como se observa en la siguiente figura.



Figura 123. Ballesta de material inteligente con memoria de forma 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al superelástico, sometido a una carga en la Máquina Universal del Laboratorio de Materiales de Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la UTA, y luego de retirar la carga recupera su forma original.

(Fuente: El autor)

En la figura 124 se presenta una ballesta armada de tres hojas de material inteligente con memoria de forma superelástica.



Figura 124. Ballesta armada de tres hojas de material inteligente con memoria de forma 75%Cu, 18.71%Zn y 6.13%Al. (Fuente: El autor)

Una segunda aplicación sería, utilizando este mismo muelle pero de espesor menor, como simbras en los gatillos de carabinas o armas de fuego, cuya ventaja con las simbras de acero, sería su alta resistencia a la corrosión y su alta elasticidad.

Una tercera aplicación es como viga superelástica en una estructura de maquinaria o estructura en general, cuya función sería la de soportar una carga puntual o distribuida, que tendería a deformar la viga, pero una vez que se retira la carga recuperará su forma original.

En este caso con la ayuda de un software he realizado una simulación estática y no lineal para que sea más real, utilizando los datos de los ensayos realizados a este material inteligente con memoria de forma superelástico, y reemplazando en el programa, se obtuvo los siguientes resultados.

Considerando un análisis estático para una viga empotrada o soldada en los dos extremos de 194.7 mm de largo, 12.9 mm de ancho y 5 mm de espesor, se tiene una flecha de deformación máxima de 20 mm y soporta una carga máxima distribuida de 49 kg, y un esfuerzo

máximo de 141.138.192,0 N/m² (según Von Mises), como se puede observar en la figura 125.

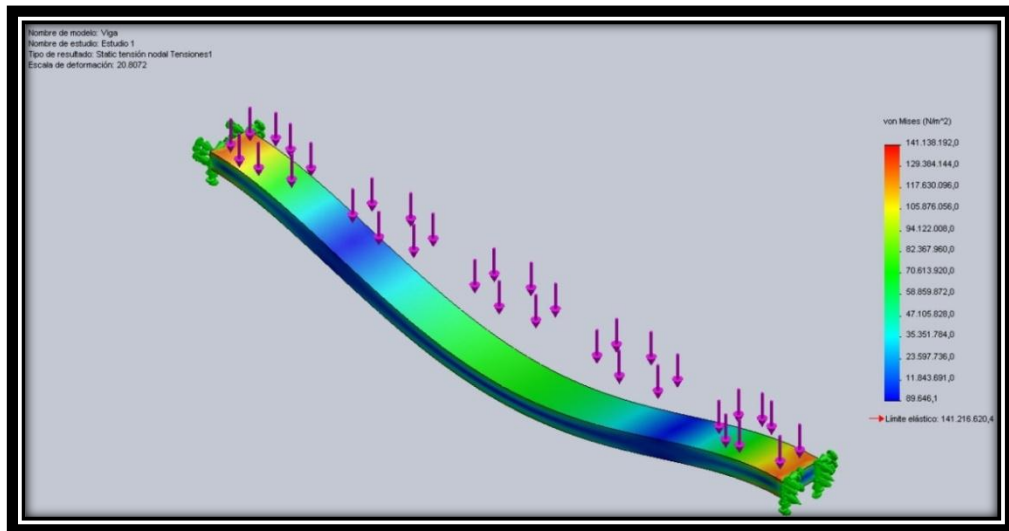


Figura 125. Simulación del análisis estático de una viga de 194.7x12.9x5mm de material inteligente con memoria de forma 75%Cu, 18.71%Zn y 6.13%Al.

(Fuente: El autor).

Realizando un análisis de la viga anterior, pero no lineal, para obtener datos más reales y considerando sólo la mitad de la viga por ser simétrica, se obtuvo los siguientes resultados.

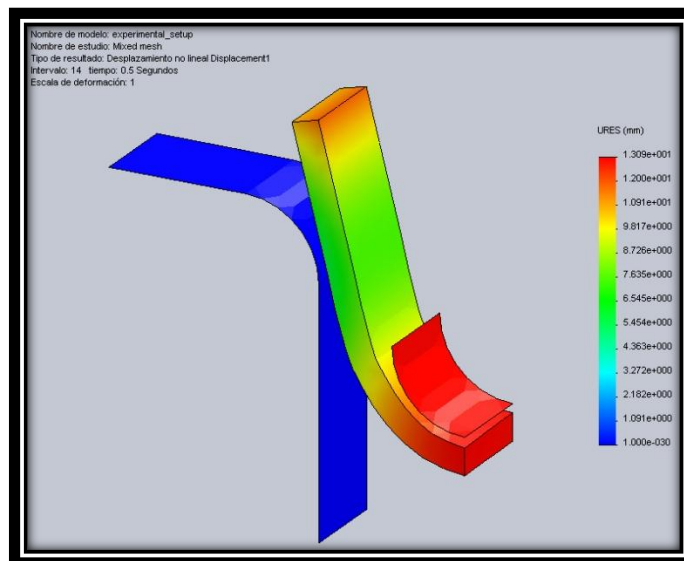


Figura 126. Simulación del análisis no lineal de una viga de 194.7x12.9x5mm de material inteligente con memoria de forma 75%Cu, 18.71%Zn y 6.13%Al.

(Fuente: El autor).

La carga distribuida máxima que puede soportar en el estudio no lineal es de 148 Kg, y tiene una deformación máxima de 13 mm, en un tiempo de 0.5 segundos.

Una cuarta aplicación sería como muelle de espiras de espesor delgado, debido a su alta elasticidad, y a demás como es una aleación base cobre electrolítico y contiene también aluminio electrolítico, se convierte en una aleación conductora del calor y la electricidad, por consiguiente se puede aplicarlo en el campo eléctrico como un actuador eléctrico.

Para esta aplicación necesitamos transformar la aleación en láminas finas de 0.1 a 0.3 mm de espesor, para posteriormente manufacturarle como resorte o muelle de espiras de sección rectangular y así aplicarle como actuador para cerrar y abrir un circuito eléctrico. Como nuestra Universidad no cuenta con un tren de laminación para laminar la aleación, utilizamos un torno para mediante desbaste, desprender láminas finas y luego manufacturarle como resorte como se puede observar en la figura.

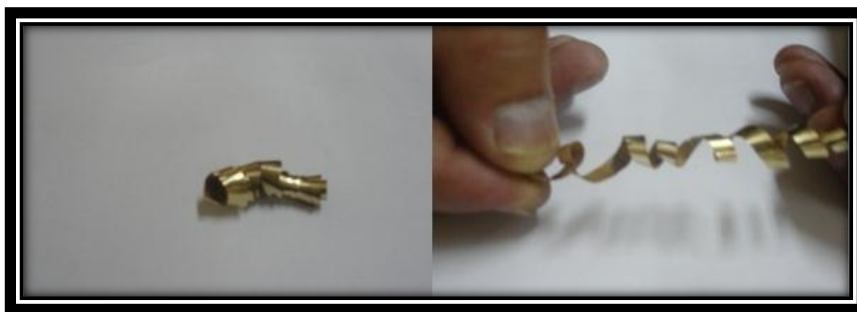


Figura 127. Resorte Manufacturado y deformado por fuerza externa.
(Fuente: El autor)

Otras aplicaciones de este material inteligente con memoria de forma superelástico, serían en forma de vigas en general, columnas y bases de estructuras antisísmicas por su comportamiento superelástico.

Este material inteligente con memoria de forma además de la superelasticidad, tiene otras ventajas, como su alta resistencia a la

corrosión, y su alta conductividad eléctrica y térmica lo que se lo categoriza de alta calidad, con relación a otros materiales.

6.8 Administración

A continuación se presenta los costos que fueron necesarios para el desarrollo del presente estudio.

Tabla 29. Rubros de gastos recursos materiales

RUBROS DE GASTOS (RECURSOS MATERIALES)			
CANTIDAD	DETALLE	PRECIO (Unit)	VALOR(USD)
30	Libras de Aluminio electrolítico	1.0	30.0
50	Libras de ánodos de Zinc	3.0	150.0
200	Libras de chatarra de cobre electrolítico auspiciado por ECUATRAN S.A	0.0	0.0
1	Pliego de lija N° 240	0.6	0.6
1	Pliego de lija N° 320	0.6	0.6
1	Pliego de lija N° 400	0.6	0.6
1	Pliego de lija N° 600	0.6	0.6
1	Reactivo químico	20.0	20.0
1/2	Libra de alúmina	160.0	80.0
12	Maquinado de probetas	10.0	120.0
12	Ensayo de tracción de probetas	40.0	480.0
3	Ensayo de fatiga	70.0	210.0
5	Análisis químico	60.48	302.4
		SUB TOTAL 1	1394.8

Tabla 30. Rubros de gastos recursos humanos.

RUBROS DE GASTOS (RECURSOS HUMANOS)			
CANTIDAD	DETALLE	PRECIO (Unit)	VALOR (USD)
1	Recolector de la información	50	50
1	Ayudante para la preparación de probetas	50	50
SUBTOTAL 2			100

Tabla 31. Rubros de gastos recursos varios

RUBROS DE GASTOS (RECURSOS VARIOS)			
CANTIDAD	DETALLE	PRECIO (Unit)	VALOR (USD)
3	Resmas de hojas	5.0	15.0
520	Impresiones	0.15	78.0
420	Copias	0.02	8.4
3	Anillados	3.0	9.0
3	Empastados	10.0	30.0
200	Horas Internet	0.8	160.0
	Transporte	100.0	100.0
SUBTOTAL 3			400.4
SUBTOTAL			1895.20
10% Imprevistos			189.52
TOTAL			2084.72

Cálculo de costo por kilo de aleación

Si consideramos únicamente los costos de producción de la aleación Inteligente con memoria de forma de la prueba 5, con composición química 75%Cu, 18.71%Zn, 6.13%Al, para obtener 80 libras de aleación tendremos:

Tabla 32. Rubros de gastos recursos materiales aleación inteligente con memoria de forma superelástica 75%Cu, 18.71%Zn, 6.13%Al. prueba 5. (Fuente: El autor)

RUBROS DE GASTOS (RECURSOS MATERIALES)			
CANTIDAD	DETALLE	PRECIO (Unit)	VALOR (USD)
5.93	Libras de Aluminio electrolítico	1.0	5.93
15.79	Libras de ánodos de Zinc	3.0	47.37
60.16	Libras de chatarra de cobre electrolítico. Suponiendo que se comprara.	3.0	180.48
1	Alquiler del horno de Inducción	200.0	200.0
1	Pago a operador	50.0	50.0
1	Análisis químico en FALESA	60.48	60.48
1	Ensayos de tracción y Fatiga	100.0	100.0
SUB TOTAL			644.26
COSTO KILO			17.7

6.9 Previsión de la evaluación

Una vez concluido el presente trabajo de investigación, el mismo que fue realizado en el laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica la Universidad Técnica de Ambato campus Huachi, en el Taller de Fundición, Laboratorio de Tratamientos Térmicos y Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, se sugiere tomar en cuenta todas las conclusiones y recomendaciones presentes en éste trabajo, para investigaciones futuras sobre este tema.

Con la finalización del presente trabajo de investigación se determina que la aleación 75%Cu-18.71%Zn-6.13%Al es una aleación superelástica, y que tiene varias aplicaciones en diversos campos.

Bibliografía

1. ASHBY, Michael, and Jones David. (1998). Engineering Materials I. Elsevier Butterworth – Heinemann. Oxford.
2. ASHBY, Michael, and Jones David. (1998). Engineering Materials II. Elsevier Butterworth – Heinemann. Oxford.
3. ASKELAND, Donal R. (1998). Ciencia e Ingeniería de Materiales. Tercera edición, International Thomson Editores.
4. Autores Varios, (2004). “ASM Handbook for Materials Research and Engineering, Tomo 2 : Applications”, Metallography and Microstructures.
5. Autores Varios, (2000). “ASM Metals Handbook for Mechanical Testing and Evolución, volumen 8.
6. GIBSON TORRES, Pablo Cecil Salvador. (2008). Fabricación y caracterización de una aleación con memoria de forma CuZnAl considerada para disipadores sísmicos, Santiago de Chile.
7. KALPIAJIAN, Scrope. (2002). Manufactura Ingeniería y Tecnología. Pearson Educación. México, México D.F.
8. LÓPEZ PAVON, Luis Alberto. (2011). Síntesis y caracterización de nanopartículas y películas delgadas por métodos físicos a partir de aleaciones con efecto de memoria de forma.
9. OTSUKA, K, and Wayman,C,M. (1998). Shape Memory Materials, Cambridge University Press, New York.

10. PALACIOS, Victor. (2009). Fabricación de Bronce al Manganeso UNS C86500 Según Norma ASTM B584 para Aplicaciones Marinas. Tesis de Grado ESPOL.
11. PANTOJA ROSERO, Lida Cielo. (2006). Determinación de parámetros óptimos del proceso de temple del acero SAE 6150 como alternativa para la manufactura de resortes. Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali.
12. PEÑA ANDRES, Francisco Javier. (2000). Caracterización de la cinética de crecimiento de grano, desgaste y corrosión en aleaciones inteligentes con memoria de forma base cobre para aplicaciones tecnológicas. Barcelona. Politécnica de Catalunya.
13. PERRY, Roberth. (2001), Manual del Ingeniero Químico, Fareso. España.
14. RASHMI Bhavsar, NITIN Vaidya y Otros. (2008). Artículo sobre Inteligencia en materiales Innovadores.
15. SEPULVEDA, Aquiles. (2007). Apuntes Curso ME-72I-I. Comportamiento Mecánico de los materiales. Departamento de Ingeniería Civil – Mecánica. Universidad de Chile.
16. SHIGLEY, Joseph & Mischke, Charles R. (2006). Mechanical Engineering Design. Eighth Edition. Budynas–Nisbett. Mc. Graw- Hill.
17. SMITH, William. (2005). Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. Concepción Fernández. España, Madrid.

18. ZELAYA, Eugenia. (2006). Estabilidad de fases bajo irradiación en aleaciones con memoria de forma base cobre. San Carlos de Bariloche.

Páginas Web

- <http://www.nanoudla.blogspot.com/2007/09/metales-inteligentes-futuros-materiales.html>
- http://www.ces.edu.co/Descargas/Publ_Med_Vol16_2/Pages_from_9_19.pdf
- <http://www.ing.unlp.edu.ar/quimica/memoria.htm>
- <http://www.monografias.com/trabajos82/nitinol-metal-inteligente/nitinol-metal-inteligente.shtml>.
 - <http://www.es.wikipedia.org/wiki/Nitinol>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Cobre>
- <http://worldwidescience.org/topicpages/multi/ES/d/dendrites.html>
- <http://www.google.com/search?q=aleacion+CuZnAl+en+el+mundo&tbs=clir%3A1%2Cclira%3A1%2Cclirs%3Aes&hl=es>
- <http://translate.google.com/translate?hl=es&sl=en&tl=es&u=http%3A%2F%2Fwww.informaworld.com%2Fsmpp%2F795497542-39242657%2Fcontent~db%3Dall~content%3Da755807973~frm%3Dtitlelink>
- <http://translate.google.com/translate?hl=es&sl=en&tl=es&u=http%3A%2F%2Fwww.slideworld.net%2Fonline-journal.aspx%2Fonline-journal.aspx%2FMicroestructural-evolution-in-a-CuZnAl-shape-memory-alloy-kinetics-and-morphological-aspects-ppt-50783>.
- <http://www.construcgeek.com/blog/resistencia-sismica-modelo-analiza-las-aleaciones-con-memoria-de-forma-shape-memory-alloy#ixzz1pOwgII9V>
- <http://translate.google.com/translate?hl=es&langpair=en%7Ces&u=http://www.aepiot.ro/world-search/cuznal>

- <http://translate.google.com/translate?hl=es&langpair=en%7Ces&u=http://www.aepiot.ro/world-search/cuznal>
- <http://translate.google.com/translate?hl=es&langpair=en%7Ces&u=http://www.aepiot.ro/world-search/cuznal>
- <http://tdd.elisava.net/coleccion/20/aliatges-amb-memoria-de-forma-una-filosofia-diferent-en-lenginyeria-i-el-disseny-amb-materials-es>
- <http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6065/TFJPA1de3.pdf?sequence=1>
- http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish08/su08/inteligencia_en_materiales.ashx
- <http://www.materiales%20inteligentes/disenan-una-nueva-tecnica-para-crear-metales-con-memoria.htm>
- http://www.materiales%20inteligentes/Efecto_t%C3%A9rmico_de_memoria_%28metales%29.htm
- <http://www.materiales%20inteligentes/materiales%20memoria.htm>
- <http://www.materiales%20inteligentes/Memoria%20Magn%C3%A9tica%20de%20Metal%20%28MMM%29%20%20%C2%AB%20IGP%20SRL.htm>
- <http://www.materiales%20inteligentes/metales-con-memoria.htm>
- http://www.materiales%20inteligentes/Nitinol%20%20metal%20con%200incre%C3%ADble%20memoria%20_%20en%20SOY%20GIK.htm

ANEXOS

ANEXO A

ANEXO A1

ANÁLISIS QUÍMICO PRUEBA 1




Matriz: Km. 7,8 Vía a Daule (lado izquierdo) Av. 12da. y Calle 3ra.
Tel: (04) 2252829 – 2251764 – 2250605 – 2250376 Fax: Ext. 116
Sucursal: Km. 1,5 Vía Durán-Tambo (lado derecho)
Tel: (04) 2801070 Telefax: 2801080
falesa@falesa.com • www.falesa.com
Casilla 2057 Guayaquil - Ecuador

Fecha de impresion: 3/26/2012
Hora de impresion: 10:50:39 AM

DEPARTAMENTO DE FUNDICION Ensayo de Analisis Quimico

FECHA : 3/26/2012
HORA : 10:40:26 AM
EMPRESA : SEGUNDO ESPIN
ATENCION : ING. ESPIN
MUESTRA : PRUEBA 1
PEDIDO : 4675
PROGRAMA: Cu-20-F

	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si	Mg	Cr	As
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Value	25.18	0.0700	0.0110	0.00610	<0.0005	0.371	0.0120	0.00740	0.00100	0.00080	0.0120
	Sb	Bi	Co	Al	S	Cu					
	%	%	%	%	%	%					
Value	0.0570	<0.0010	<0.0015	7.37	0.00370	66.9					


Responsable del Analisis
Carlos Montiel C.

Nota: Este análisis no podrá ser usado contra terceros

NOS ESPECIALIZAMOS EN ACCESORIOS PARA LA INDUSTRIA AGRÍCOLA

Garruchas Agrícolas • Vinchas, Ganchos y Platinas para funiculares • Separadores • Rodillos Transportadores • Calibradores Fijo y de Reloj • Comprobadores • Telecalibradores • Escaleras de Cosecha y Enfunde • Cunas • Curvos, Machetes y Podones • Peso Patrón • Aspersores SAEL y Acoples Rápidos de ½ y ¾ • Cañones • Torres para Riego • Válvulas: de Aire, de Bronce, de Mariposa, Hidrantes • Adaptadores • Reductores • Codos • Tees • Uniones • Cruces • Accesorios Flex • Guantes Industriales y Mandiles • Tubería de PVC, Aluminio y Manguera Flex • Empaques • **Otras Líneas:** Accesorios para Aluminio y Vidrio, Muebles de Oficina, Electrodomésticos, Avícolas • Fundimos bronce, aluminio, cobre, zinc, ánodos, bocines marinos • Sinterizamos bronce grafitado autolubricado • **Servicios:** Análisis de Espectrometría • Recuperación de Metales (lingoteado) • Electroerosión por Hilo y Penetración • Rectificación de Superficies Planas • Tornos Automáticos • Inyección de piezas en plástico, aluminio y caucho • Reparación de Garruchas, Aspersores 2014 – 3012 – 3023, Cañones 150 – 200, y Escaleras.

ANEXO A2

ANÁLISIS QUÍMICO PRUEBA 3



LABORATORIO DE ANÁLISIS
AMBIENTAL E INSPECCIÓN
LAB-CESTTA

CENTRO DE SERVICIOS TÉCNICOS Y
TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA AMBIENTAL

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS
Panamericana Sur Km. 1 ½
Telefax: (03) 2998-232
Riobamba - Ecuador

INFORME DE ENSAYO No: 0118
ST: 12 – 0002 ANÁLISIS DE QUÍMICOS

Nombre Peticionario: Sr. Segundo Espín
Atn. -
Dirección: Ambato; Tungurahua

FECHA: 23 de Enero del 2012
NUMERO DE MUESTRAS: 1
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB: 2012/01/16– 09:30
FECHA DE MUESTREO: 2012/01/14– 16:00
FECHA DE ANÁLISIS: 2012/01/16- 2012/01/23
TIPO DE MUESTRA: Aleación de Cu, Zn y Al *Prueba 3*
CÓDIGO LAB-CESTTA: LAB-Q 02-12
CÓDIGO DE LA EMPRESA: N.A
PUNTO DE MUESTREO: UTA
ANÁLISIS SOLICITADO: Cobre, Zinc y Aluminio
PERSONA QUE TOMA LA MUESTRA: Sr. Segundo Espín
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS: T máx.:21.0 °C. T mín.: 18.0°C


RESULTADOS ANALÍTICOS:

PARÁMETRO	PEE-CESTTA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LIMITE PERMISIBLE
Zinc	PEE/LAB-CESTTA/37 Absorción atómica	%	0,62	--
Aluminio	PEE /LAB-CESTTA/78 Absorción atómica	%	1,69	--
Cobre	PEE/LAB-CESTTA/22 Absorción atómica	%	98,02	--

OBSERVACIONES:

- Muestra receptada en laboratorio
- "SUPLEMENTO DEL INFORME NÚMERO 0038"

RESPONSABLES DEL INFORME:


Dr. Mauricio Alvarez
RESPONSABLE TÉCNICO

LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL
E INSPECCIÓN
LAB-CESTTA
ESPOCH


Dra. Nancy Veloz M.
JEFE DE LABORATORIO

FACULTAD DE CIENCIAS
Panamericana Sur Km. 1 ½
Telefax: (03)2968-912 Ext. 160, 164

Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación del laboratorio.
Los resultados arriba indicados se aplican únicamente a la muestra
MC2203-01

ANEXO A3

ANÁLISIS QUÍMICO PRUEBA 4.1



Matriz: Km. 7,8 Vía a Daule (lado izquierdo) Av. 12da. y Calle 3ra.
 Tel: (04) 2252829 – 2251764 – 2250605 – 2250376 Fax: Ext. 116
Sucursal: Km. 1,5 Vía Durán-Tambo (lado derecho)
 Tel: (04) 2801070 Telefax: 2801080
 falesa@falesa.com • www.falesa.com
 Casilla 2057 Guayaquil - Ecuador

Fecha de impresion: 3/2/2012

Hora de impresion: 10:59:18 AM

DEPARTAMENTO DE FUNDICION

Ensayo de Analisis Quimico

FECHA : 3/2/2012
 HORA : 10:58:40 AM
 EMPRESA : ESPIN LAGOS
 ATENCION : ING. ESPIN *Prueba 4.1*
 MUESTRA : ALE. CUZNAL
 PEDIDO : 4641
 PROGRAMA: Cu-20-F

	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si	Mg	Cr	As
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Value	23.49	0.0190	0.00560	0.00500	<0.0005	0.0110	0.00520	0.00630	0.00090	0.00060	0.0100
	Sb	Bi	Co	Al	S	Cu					
	%	%	%	%	%	%					
Value	0.0460	<0.0010	<0.0015	6.71	0.00250	69.7					

Responsable del Analisis
 Carlos Montiel C.

Nota: Este análisis no podra ser usado contra terceros

NOS ESPECIALIZAMOS EN ACCESORIOS PARA LA INDUSTRIA AGRÍCOLA

Garruchas Agrícolas • Vinchas, Ganchos y Platinas para funiculares • Separadores • Rodillos Transportadores • Calibradores Fijo y de Reloj • Comprobadores • Telecalibradores • Escaleras de Cosecha y Enfunde • Cunas • Curvos, Machetes y Podones • Peso Patrón • Aspersores SAEL y Acoples Rápidos de ½ y ¾ • Cañones • Torres para Riego • Válvulas: de Aire, de Bronce, de Mariposa, Hidrantes • Adaptadores • Reductores • Codos • Tees • Uniones • Cruces • Accesorios Flex • Guantes Industriales y Mandiles • Tubería de PVC, Aluminio y Manguera Flex • Empaques • **Otras Líneas:** Accesorios para Aluminio y Vidrio, Muebles de Oficina, Electrodomésticos, Avícolas • Fundimos bronce, aluminio, cobre, zinc, ánodos, bocines marinos • Sinterizamos bronce grafitado autolubricado • **Servicios:** Análisis de Espectrometría • Recuperación de Metales (lingoteado) • Electroerosión por Hilo y Penetración • Rectificación de Superficies Planas • Tornos Automáticos • Inyección de piezas en plástico, aluminio y caucho • Reparación de Garruchas, Aspersores 2014 – 3012 – 3023, Cañones 150 – 200, y Escaleras.

ANEXO A4

ANÁLISIS QUÍMICO PRUEBA 4.2



Matriz: Km. 7,8 Vía a Daule (lado izquierdo) Av. 12da. y Calle 3ra.
 Tel: (04) 2252829 – 2251764 – 2250605 – 2250376 Fax: Ext. 116
Sucursal: Km. 1,5 Vía Durán-Tambo (lado derecho)
 Tel: (04) 2801070 Telefax: 2801080
 falesa@falesa.com • www.falesa.com
 Casilla 2057 Guayaquil - Ecuador

Fecha de impresion: 3/26/2012

Hora de impresion: 10:50:47 AM

DEPARTAMENTO DE FUNDICION

Ensayo de Analisis Quimico

FECHA : 3/26/2012
 HORA : 10:50:23 AM
 EMPRESA : SEGUNDO ESPIN
 ATENCION : ING. ESPIN
 MUESTRA : PRUEBA 4.2
 PEDIDO : 4675
 PROGRAMA: Cu-20-F

	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si	Mg	Cr	As
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Value	23.53	0.0150	0.00450	0.00480	<0.0005	0.00800	0.00470	0.00470	0.00080	0.00050	0.00860
	Sb	Bi	Co	Al	S	Cu					
	%	%	%	%	%	%					
Value	0.0390	<0.0010	<0.0015	4.79	0.00220	71.6					

Responsable del Analisis
 Carlos Montiel C.

Nota: Este análisis no podrá ser usado contra terceros

NOS ESPECIALIZAMOS EN ACCESORIOS PARA LA INDUSTRIA AGRÍCOLA

Garruchas Agrícolas • Vinchas, Ganchos y Platinas para funiculares • Separadores • Rodillos Transportadores • Calibradores Fijo y de Reloj • Comprobadores • Telecalibradores • Escaleras de Cosecha y Enfunde • Cunas • Curvos, Machetes y Podones • Peso Patrón • Aspersores SAEL y Acoples Rápidos de ½ y ¼ • Cañones • Torres para Riego • Válvulas: de Aire, de Bronce, de Mariposa, Hidrantes • Adaptadores • Reductores • Codos • Tees • Uniones • Cruces • Accesorios Flex • Guantes Industriales y Mandiles • Tubería de PVC, Aluminio y Manguera Flex • Empaques • **Otras Líneas:** Accesorios para Aluminio y Vidrio, Muebles de Oficina, Electrodomésticos, Avícolas • Fundimos bronce, aluminio, cobre, zinc, ánodos, bocines marinos • Sinterizamos bronce grafitado autolubricado • **Servicios:** Análisis de Espectrometría • Recuperación de Metales (lingoteado) • Electroerosión por Hilo y Penetración • Rectificación de Superficies Planas • Tornos Automáticos • Inyección de piezas en plástico, aluminio y caucho • Reparación de Garruchas, Aspersores 2014 – 3012 – 3023, Cañones 150 – 200, y Escaleras.

ANEXO A5

ANÁLISIS QUÍMICO PRUEBA 5



Matriz: Km. 7,8 Vía a Daule (lado izquierdo) Av. 12da. y Calle 3ra.
Tel: (04) 2252829 – 2251764 – 2250605 – 2250376 Fax: Ext. 116
Sucursal: Km. 1,5 Vía Durán-Tambo (lado derecho)
Tel: (04) 2801070 Telefax: 2801080
falesa@falesa.com • www.falesa.com
Casilla 2057 Guayaquil - Ecuador

Fecha de impresion: 4/3/2012

Hora de impresion: 2:50:27 PM

DEPARTAMENTO DE FUNDICION

Ensayo de Analisis Quimico

FECHA : 4/3/2012
HORA : 2:17:57 PM
EMPRESA : SR. ESPIN
ATENCION : SR. ESPIN
MUESTRA : PRUEBA 5
PEDIDO : 4718
PROGRAMA: Cu-20-F

	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si	Mg	Cr	As
Value	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	18.71	0.0190	0.00730	0.00600	<0.0005	0.0110	0.00700	0.00180	0.00060	0.00050	0.0110
	Sb	Bi	Co	Al	S	Cu					
Value	%	%	%	%	%	%					
	0.0490	<0.0010	<0.0015	6.13	0.00270	75.0					

Responsable del Analisis
Carlos Montiel C.

Nota: Este análisis no podra ser usado contra terceros

NOS ESPECIALIZAMOS EN ACCESORIOS PARA LA INDUSTRIA AGRÍCOLA

Garruchas Agrícolas • Vinchas, Ganchos y Platinas para funiculares • Separadores • Rodillos Transportadores • Calibradores Fijo y de Reloj • Comprobadores • Telecalibradores • Escaleras de Cosecha y Enfunde • Cunas • Curvos, Machetes y Podones • Peso Patrón • Aspersores SAEL y Acoples Rápidos de ½ y ¾ • Cañones • Torres para Riego • Válvulas: de Aire, de Bronce, de Mariposa, Hidrantes • Adaptadores • Reductores • Codos • Tees • Uniones • Cruces • Accesorios Flex • Guantes Industriales y Mandiles • Tubería de PVC, Aluminio y Manguera Flex • Empaques • **Otras Líneas:** Accesorios para Aluminio y Vidrio, Muebles de Oficina, Electrodomésticos, Avícolas • Fundimos bronce, aluminio, cobre, zinc, ánodos, bocines marinos • Sinterizamos bronce grafitado autolubricado • **Servicios:** Análisis de Espectrometría • Recuperación de Metales (lingoteado) • Electroerosión por Hilo y Penetración • Rectificación de Superficies Planas • Tornos Automáticos • Inyección de piezas en plástico, aluminio y caucho • Reparación de Garruchas, Aspersores 2014 – 3012 – 3023, Cañones 150 – 200, y Escaleras.

ANEXO B

ANEXO B1

RESULTADOS ENSAYO TRACCIÓN PRUEBA 4.1 SIN TEMPLAR



esPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ENSAYO DE TRACCIÓN

MATERIAL: PROBETA DE ALEACIÓN DE COBRE, ZINC, ALUMINIO

TIPO DE MATERIAL: ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE FORMA DE COBRE, ZINC, AL.

SOLICITADO POR: ING. SEGUNDO ESPÍN

FECHA DE ENSAYO: 16-mar-12

RESULTADOS DEL ENSAYO:

MUESTRA N°	2
DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	Prueba 4.1 sin templar
CARACTERÍSTICA	PROBETA
DIÁMETRO [mm]	12,7
SECCION TRANSVERSAL [cm ²]	1,267
MODULO DE ELASTICIDAD [Kg/cm ²]	9,7,E+05
CARGA DE FLUENCIA [Kg]	3243
ESFUERZO DE FLUENCIA [Kg/cm ²]	2560
CARGA MAXIMA [Kg]	4030
ESFUERZO MAXIMO [Kg/cm ²]	3181,32
PORCENTAJE DE ELONGACION [%]	2,03
TIPO DE FALLA:	IRREGULAR

Riobamba, 16-mar-12

OBSERVACIONES:

Revisado por:

Ing. Anibal Viñán B. M.Sc.
PROFESOR RESPONSABLE, LABORATORIO
RESISTENCIA DE MATERIALES



ANEXO B2

CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN PRUEBA 4.1 SIN TEMPLAR



epoch

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECANICA

LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ENSAYO DE TRACCIÓN

DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN

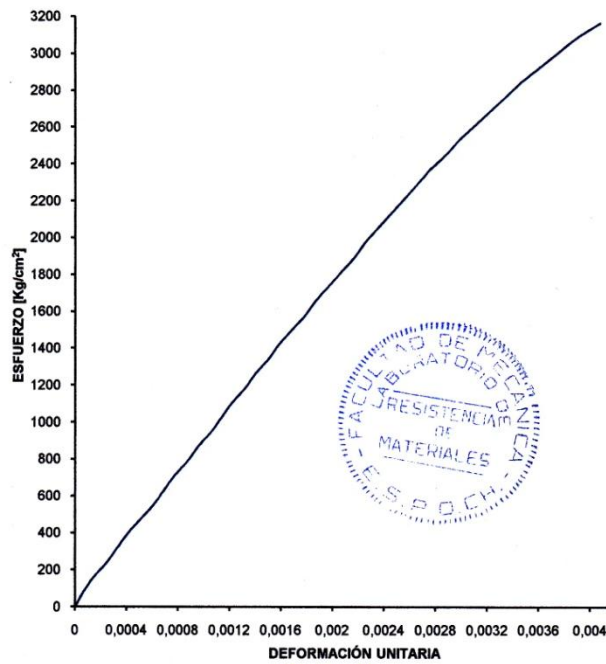
MUESTRA N°: 2

TIPO DE MATERIAL: ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE FORMA DE COBRE, ZINC, AL.

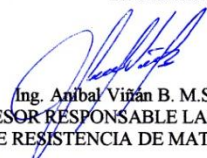
DESIGNACIÓN DEL MATERIAL: Prueba 4.1 sin templar

SOLICITADO POR: ING. SEGUNDO ESPÍN

FECHA DE ENSAYO: 16-mar-12



Aprobado por:


Ing. Anibal Viñan B. M.Sc
PROFESOR RESPONSABLE LABORATORIO
DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ANEXO B3

RESULTADOS ENSAYO TRACCIÓN PRUEBA 4.2 SIN TEMPLAR



epoch

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ENSAYO DE TRACCIÓN

MATERIAL: PROBETA DE ALEACIÓN DE COBRE, ZINC, ALUMINIO

TIPO DE MATERIAL: ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE FORMA DE COBRE, ZINC, AL.

SOLICITADO POR: ING. SEGUNDO ESPÍN

FECHA DE ENSAYO: 16-mar-12

RESULTADOS DEL ENSAYO:

MUESTRA N°	3
DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	Prueba 4.2 sin templar
CARACTERÍSTICA	PROBETA
DIÁMETRO [mm]	12,6
SECCION TRANSVERSAL [cm ²]	1,247
MODULO DE ELASTICIDAD [Kg/cm ²]	1,2,E+06
CARGA DE FLUENCIA [Kg]	2307
ESFUERZO DE FLUENCIA [Kg/cm ²]	1850
CARGA MÁXIMA [Kg]	4050
ESFUERZO MÁXIMO [Kg/cm ²]	3248,05
PORCENTAJE DE ELONGACION [%]	1,40
TIPO DE FALLA:	IRREGULAR

Riobamba, 16-mar-12

OBSERVACIONES:

Revisado por:


Ing. Anibal Viñan B. M.Sc.

PROFESOR RESPONSABLE, LABORATORIO
RESISTENCIA DE MATERIALES



ANEXO B4

CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN PRUEBA 4.2 SIN TEMPLAR



esPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECANICA

LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ENSAYO DE TRACCIÓN

DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN

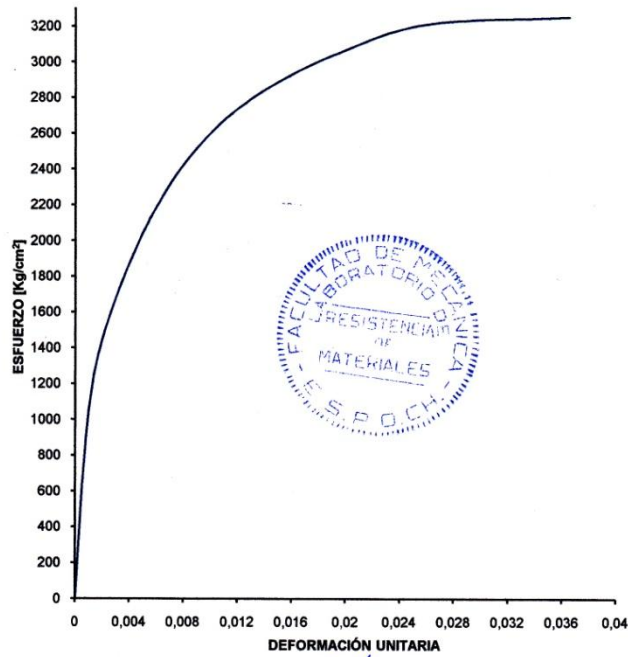
MUESTRA Nº: 3

TIPO DE MATERIAL: ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE FORMA DE COBRE, ZINC, AL.

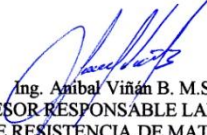
DESIGNACIÓN DEL MATERIAL: Prueba 4.2 sin templar

SOLICITADO POR: ING. SEGUNDO ESPÍN

FECHA DE ENSAYO: 16-mar-12



Aprobado por:


Ing. Anibal Viñan B. M.Sc
PROFESOR RESPONSABLE LABORATORIO
DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ANEXO B5

RESULTADOS ENSAYO DE TRACCIÓN PRUEBA 4.2 TEMPLADA



esPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ENSAYO DE TRACCIÓN


MATERIAL: PROBETA DE ALEACIÓN DE COBRE, ZINC, ALUMINIO
TIPO DE MATERIAL: ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE FORMA DE COBRE, ZINC, AL.
SOLICITADO POR: ING. SEGUNDO ESPÍN
FECHA DE ENSAYO: 16-mar-12
RESULTADOS DEL ENSAYO:

MUESTRA N°	1
DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	Prueba 4.2 templada
CARACTERÍSTICA	PROBETA
DIÁMETRO [mm]	12,6
SECCION TRANSVERSAL [cm ²]	1,247
MODULO DE ELASTICIDAD [Kg/cm ²]	7,7,E+05
CARGA DE FLUENCIA [Kg]	1621
ESFUERZO DE FLUENCIA [Kg/cm ²]	1300
CARGA MAXIMA [Kg]	2770
ESFUERZO MAXIMO [Kg/cm ²]	2221,51
PORCENTAJE DE ELONGACION [%]	4,23
TIPO DE FALLA:	IRREGULAR

Riobamba, 16-mar-12

OBSERVACIONES:

Revisado por:


Ing. Anibal Viñán B. M.Sc.
PROFESOR RESPONSABLE, LABORATORIO
RESISTENCIA DE MATERIALES



ANEXO B6

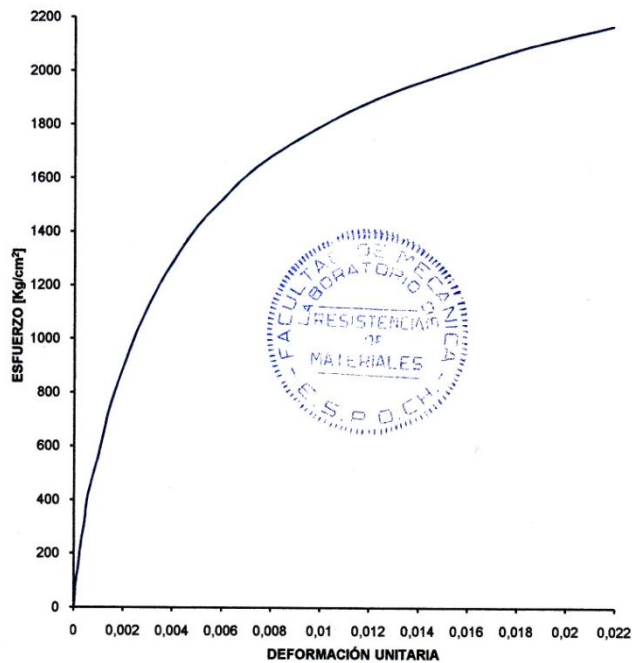
CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN PRUEBA 4.2 TEMPLADA




esPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECANICA
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES
ENSAYO DE TRACCIÓN
DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN

MUESTRA N°: 1
TIPO DE MATERIAL: ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE FORMA DE COBRE, ZINC, AL.
DESIGNACIÓN DEL MATERIAL: Prueba 4.2 templada
SOLICITADO POR: ING. SEGUNDO ESPIN
FECHA DE ENSAYO: 16-mar-12



Aprobado por:


Ing. Aníbal Viñán B. M.Sc.
PROFESOR RESPONSABLE LABORATORIO
DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ANEXO B7

RESULTADOS ENSAYO TRACCIÓN PRUEBA 5 SIN TEMPLAR



epoch

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECANICA
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ENSAYO DE TRACCIÓN

MATERIAL: PROBETA DE ALEACIÓN DE COBRE, ZINC, ALUMINIO

TIPO DE MATERIAL: ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE FORMA DE COBRE, ZINC, AL.

SOLICITADO POR: ING. SEGUNDO ESPÍN

FECHA DE ENSAYO: 21-may-12


RESULTADOS DEL ENSAYO:

MUESTRA N°	1
DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	Prueba 5 sin templar
CARACTERISTICA	PROBETA
DIÁMETRO [mm]	12,6
SECCION TRANSVERSAL [cm ²]	1,247
MODULO DE ELASTICIDAD [Kg/cm ²]	1,3,E+06
CARGA DE FLUENCIA [Kg]	2519
ESFUERZO DE FLUENCIA [Kg/cm ²]	2020
CARGA MAXIMA [Kg]	3420
ESFUERZO MAXIMO [Kg/cm ²]	2742,80
PORCENTAJE DE ELONGACION [%]	1,61
TIPO DE FALLA:	IRREGULAR

Riobamba, 21-may-12

OBSERVACIONES:

Revisado por:


Ing. Anibal Viñán B. M.Sc.
PROFESOR RESPONSABLE, LABORATORIO
RESISTENCIA DE MATERIALES



ANEXO B8

CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN PRUEBA 5 SIN TEMPLAR



esPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECANICA
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES
ENSAYO DE TRACCIÓN
DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN

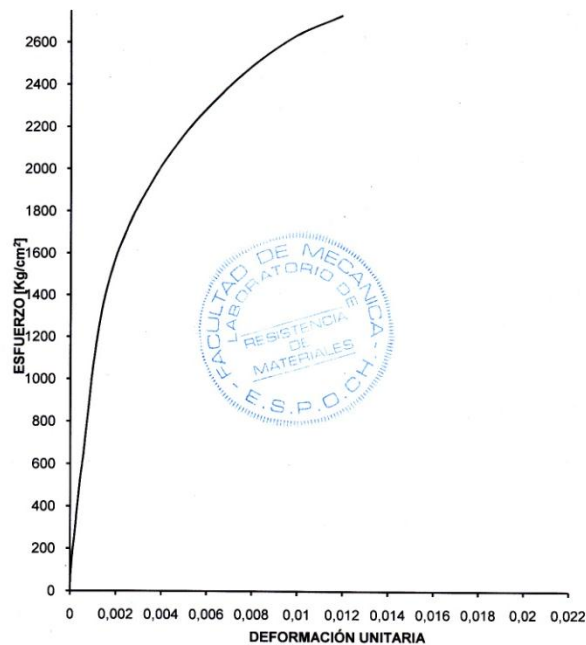
MUESTRA Nº: 1

TIPO DE MATERIAL: ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE FORMA DE COBRE, ZINC, A

DESIGNACIÓN DEL MATERIAL: Prueba 5 sin templar

SOLICITADO POR: ING. SEGUNDO ESPIN

FECHA DE ENSAYO: 21-may-12



Aprobado por:


Ing. Anibal Viñán B. M.Sc
PROFESOR RESPONSABLE LABORATORIO
DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ANEXO B9

RESULTADOS ENSAYO TRACCIÓN PRUEBA 5 TEMPLADA



esPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECANICA
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ENSAYO DE TRACCIÓN

MATERIAL: PROBETA DE ALEACIÓN DE COBRE, ZINC, ALUMINIO

TIPO DE MATERIAL: ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE FORMA DE COBRE, ZINC, AL.

SOLICITADO POR: ING. SEGUNDO ESPÍN

FECHA DE ENSAYO: 21-may-12


RESULTADOS DEL ENSAYO:

MUESTRA N°	2
DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	Prueba 5 templada
CARACTERISTICA	PROBETA
DIÁMETRO [mm]	12,8
SECCION TRANSVERSAL [cm ²]	1,287
MODULO DE ELASTICIDAD [Kg/cm ²]	7,4,E+05
CARGA DE FLUENCIA [Kg]	1853
ESFUERZO DE FLUENCIA [Kg/cm ²]	1440
CARGA MAXIMA [Kg]	2600
ESFUERZO MAXIMO [Kg/cm ²]	2020,52
PORCENTAJE DE ELONGACION [%]	3,65
TIPO DE FALLA:	IRREGULAR

Riobamba, 21-may-12

OBSERVACIONES:

Revisado por:


Ing. Anibal Viñán B. M.Sc.
PROFESOR RESPONSABLE, LABORATORIO
RESISTENCIA DE MATERIALES



ANEXO B10

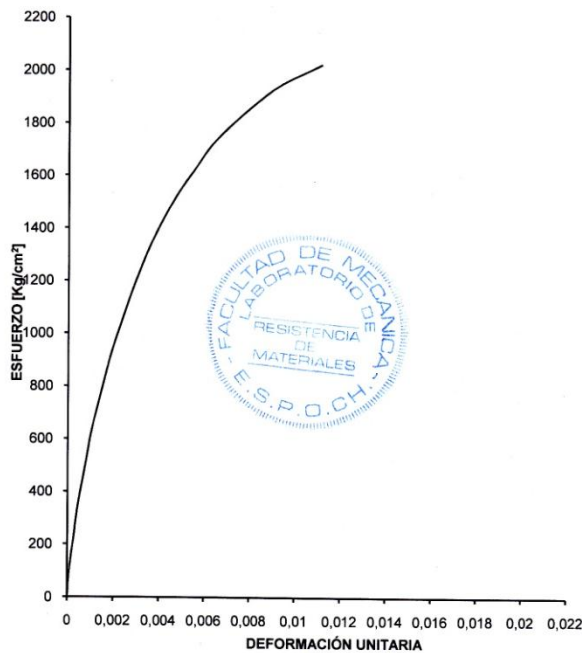
CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN PRUEBA 5 TEMPLADA



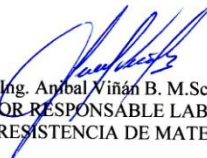
esPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECANICA
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES
ENSAYO DE TRACCIÓN
DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN

MUESTRA N°: 2
TIPO DE MATERIAL: ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE FORMA DE COBRE, ZINC, A
DESIGNACIÓN DEL MATERIAL: Prueba 5 templada
SOLICITADO POR: ING. SEGUNDO ESPÍN
FECHA DE ENSAYO: 21-may-12



Aprobado por:


Ing. Anibal Viñán B. M.Sc
PROFESOR RESPONSABLE LABORATORIO
DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ANEXO C



esPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECANICA
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ENSAYO DE FATIGA

MATERIAL: ALEACIÓN INTELIGENTE: Cu - Zn - Al

SOLICITADO POR: ING. SEGUNDO ESPÍN

OBRA: PROYECTO DE TESIS "ESTUDIO DE LA ALEACIÓN INTELIGENTE Cu-Zn-Al, PARA DETERMINAR SU APLICACIÓN INDUSTRIAL"

FECHA DE ENSAYO: 07 julio 2012

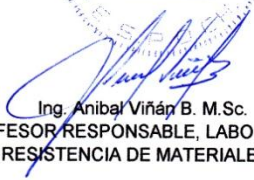
RESULTADOS DEL ENSAYO:

MUESTRA N°	1
CARACTERISTICA	Muestra templada
TIPO DE MATERIAL	Aleación Cu-Zn-Al
DIAMETRO [mm]	7,5
SECCION TRANSVERSAL [cm ²]	0,442
CARGA MAXIMA [Kg]	1
ESFUERZO MAXIMO [Kg/mm ²]	0,249
REVOLUCIONES [RPM]	26964
TIEMPO DE VIDA [HORAS-MINUTOS- SEGUNDOS]	00 - 07 - 35

Riobamba, 07 julio 2012

OBSERVACIONES:

Revisado por:


Ing. Anibal Viñan B. M.Sc.
PROFESOR RESPONSABLE, LABORATORIO
RESISTENCIA DE MATERIALES

ANEXO D



Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens¹

This standard is issued under the fixed designation G 1; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This practice covers suggested procedures for preparing bare, solid metal specimens for tests, for removing corrosion products after the test has been completed, and for evaluating the corrosion damage that has occurred. Emphasis is placed on procedures related to the evaluation of corrosion by mass loss and pitting measurements. (**Warning**—In many cases the corrosion product on the reactive metals titanium and zirconium is a hard and tightly bonded oxide that defies removal by chemical or ordinary mechanical means. In many such cases, corrosion rates are established by mass gain rather than mass loss.)

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* For specific precautionary statements, see 1 and 7.2.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- A 262 Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels²
- D 1193 Specification for Reagent Water³
- D 1384 Test Method for Corrosion Test for Engine Coolants in Glassware⁴
- D 2776 Test Methods for Corrosivity of Water in the Absence of Heat Transfer (Electrical Methods)⁵
- G 15 Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing⁶
- G 16 Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data⁶

- G 31 Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals⁶
- G 33 Practice for Recording Data from Atmospheric Corrosion Tests of Metallic-Coated Steel Specimens⁶
- G 46 Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion⁶
- G 50 Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals⁶
- G 78 Guide for Crevice Corrosion Testing of Iron Base and Nickel-Base Stainless Alloys in Seawater and Other Chloride-Containing Aqueous Environments⁶

3. Terminology

- 3.1 See Terminology G 15 for terms used in this practice.

4. Significance and Use

4.1 The procedures given are designed to remove corrosion products without significant removal of base metal. This allows an accurate determination of the mass loss of the metal or alloy that occurred during exposure to the corrosive environment.

4.2 These procedures, in some cases, may apply to metal coatings. However, possible effects from the substrate must be considered.

5. Reagents and Materials

5.1 *Purity of Reagents*—Reagent grade chemicals shall be used in all tests. Unless otherwise indicated, it is intended that all reagents conform to the specifications of the Committee on Analytical Reagents of the American Chemical Society where such specifications are available.⁷ Other grades may be used, provided it is first ascertained that the reagent is of sufficiently high purity to permit its use without lessening the accuracy of the determination.

5.2 *Purity of Water*—Unless otherwise indicated, references to water shall be understood to mean reagent water as defined by Type IV of Specification D 1193.

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G01 on Corrosion of Metals and is the direct responsibility of Subcommittee G01.05 on Laboratory Corrosion Tests.

Current edition approved October 1, 2003. Published October 2003. Originally approved in 1967. Last previous edition approved in 1999 as G 1 – 90 (1999)^{ε1}.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 01.03.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.01.

⁴ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.05.

⁵ *Discontinued*, replaced by Guide G 96. See 1990 *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.02.

⁶ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.02.

⁷ *Reagent Chemicals, American Chemical Society Specifications*, American Chemical Society, Washington, DC. For suggestions on the testing of reagents not listed by the American Chemical Society, see *Analar Standards for Laboratory Chemicals*, BDH Ltd., Poole, Dorset, U.K., and the *United States Pharmacopeia and National Formulary*, U.S. Pharmacopeial Convention, Inc. (USPC), Rockville, MD.

6. Methods for Preparing Specimens for Test

6.1 For laboratory corrosion tests that simulate exposure to service environments, a commercial surface, closely resembling the one that would be used in service, will yield the most meaningful results.

6.2 It is desirable to mark specimens used in corrosion tests with a unique designation during preparation. Several techniques may be used depending on the type of specimen and test.

6.2.1 *Stencil or Stamp*—Most metallic specimens may be marked by stenciling, that is, imprinting the designation code into the metal surface using hardened steel stencil stamps hit with a hammer. The resulting imprint will be visible even after substantial corrosion has occurred. However, this procedure introduces localized strained regions and the possibility of superficial iron contamination in the marked area.

6.2.2 Electric engraving by means of a vibratory marking tool may be used when the extent of corrosion damage is known to be small. However, this approach to marking is much more susceptible to having the marks lost as a result of corrosion damage during testing.

6.2.3 Edge notching is especially applicable when extensive corrosion and accumulation of corrosion products is anticipated. Long term atmospheric tests and sea water immersion tests on steel alloys are examples where this approach is applicable. It is necessary to develop a code system when using edge notches.

6.2.4 Drilled holes may also be used to identify specimens when extensive metal loss, accumulation of corrosion products, or heavy scaling is anticipated. Drilled holes may be simpler and less costly than edge notching. A code system must be developed when using drilled holes. Punched holes should not be used as they introduce residual strain.

6.2.5 When it is undesirable to deform the surface of specimens after preparation procedures, for example, when testing coated surfaces, tags may be used for specimen identification. A metal or plastic wire can be used to attach the tag to the specimen and the specimen identification can be stamped on the tag. It is important to ensure that neither the tag nor the wire will corrode or degrade in the test environment. It is also important to be sure that there are no galvanic interactions between the tag, wire, and specimen.

6.3 For more searching tests of either the metal or the environment, standard surface finishes may be preferred. A suitable procedure might be:

6.3.1 Degrease in an organic solvent or hot alkaline cleaner. (See also Practice G 31.)

NOTE 1—Hot alkalis and chlorinated solvents may attack some metals.

NOTE 2—Ultrasonic cleaning may be beneficial in both pre-test and post-test cleaning procedures.

6.3.2 Pickle in an appropriate solution if oxides or tarnish are present. In some cases the chemical cleaners described in Section 6 will suffice.

NOTE 3—Pickling may cause localized corrosion on some materials.

6.3.3 Abrade with a slurry of an appropriate abrasive or with an abrasive paper (see Practices A 262 and Test Method

D 1384). The edges as well as the faces of the specimens should be abraded to remove burrs.

6.3.4 Rinse thoroughly, hot air dry, and store in desiccator.

6.4 When specimen preparation changes the metallurgical condition of the metal, other methods should be chosen or the metallurgical condition must be corrected by subsequent treatment. For example, shearing a specimen to size will cold work and may possibly fracture the edges. Edges should be machined.

6.5 The clean, dry specimens should be measured and weighed. Dimensions determined to the third significant figure and mass determined to the fifth significant figure are suggested. When more significant figures are available on the measuring instruments, they should be recorded.

7. Methods for Cleaning After Testing

7.1 Corrosion product removal procedures can be divided into three general categories: mechanical, chemical, and electrolytic.

7.1.1 An ideal procedure should remove only corrosion products and not result in removal of any base metal. To determine the mass loss of the base metal when removing corrosion products, replicate uncorroded control specimens should be cleaned by the same procedure being used on the test specimen. By weighing the control specimen before and after cleaning, the extent of metal loss resulting from cleaning can be utilized to correct the corrosion mass loss.

NOTE 4—It is desirable to scrape samples of corrosion products before using any chemical techniques to remove them. These scrapings can then be subjected to various forms of analyses, including perhaps X-ray diffraction to determine crystal forms as well as chemical analyses to look for specific corrodants, such as chlorides. All of the chemical techniques that are discussed in Section 7 tend to destroy the corrosion products and thereby lose the information contained in these corrosion products. Care may be required so that uncorroded metal is not removed with the corrosion products.

7.1.2 The procedure given in 7.1.1 may not be reliable when heavily corroded specimens are to be cleaned. The application of replicate cleaning procedures to specimens with corroded surfaces will often, even in the absence of corrosion products, result in continuing mass losses. This is because a corroded surface, particularly of a multiphase alloy, is often more susceptible than a freshly machined or polished surface to corrosion by the cleaning procedure. In such cases, the following method of determining the mass loss due to the cleaning procedure is preferred.

7.1.2.1 The cleaning procedure should be repeated on specimens several times. The mass loss should be determined after each cleaning by weighing the specimen.

7.1.2.2 The mass loss should be graphed as a function of the number of equal cleaning cycles as shown in Fig. 1. Two lines will be obtained: AB and BC. The latter will correspond to corrosion of the metal after removal of corrosion products. The mass loss due to corrosion will correspond approximately to point B.

7.1.2.3 To minimize uncertainty associated with corrosion of the metal by the cleaning method, a method should be chosen to provide the lowest slope (near to horizontal) of line BC.

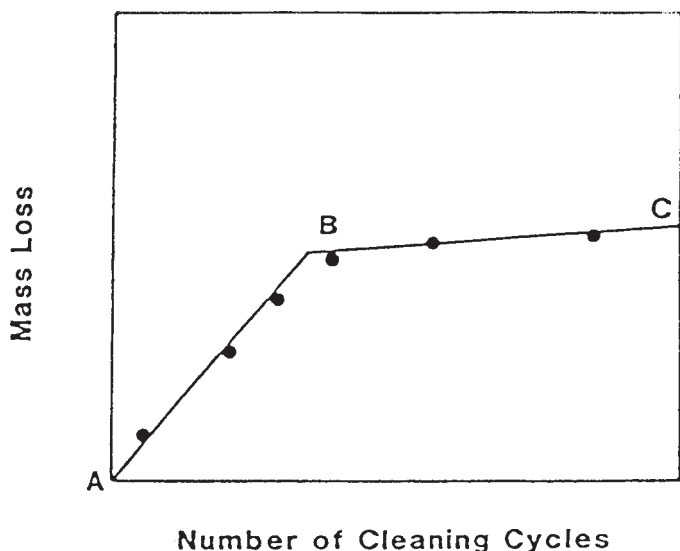


FIG. 1 Mass Loss of Corroded Specimens Resulting from Repetitive Cleaning Cycles

7.1.3 Repeated treatment may be required for complete removal of corrosion products. Removal can often be confirmed by examination with a low power microscope (for example, 7× to 30×). This is particularly useful with pitted surfaces when corrosion products may accumulate in pits. This repeated treatment may also be necessary because of the requirements of 7.1.2.1. Following the final treatment, the specimens should be thoroughly rinsed and immediately dried.

7.1.4 All cleaning solutions shall be prepared with water and reagent grade chemicals.

7.2 Chemical procedures involve immersion of the corrosion test specimen in a specific solution that is designed to remove the corrosion products with minimal dissolution of any base metal. Several procedures are listed in Table A1.1. The choice of chemical procedure to be used is partly a matter of trial and error to establish the most effective method for a specific metal and type of corrosion product scale. (**Warning**—These methods may be hazardous to personnel).

7.2.1 Chemical cleaning is often preceded by light brushing (non metallic bristle) or ultrasonic cleaning of the test specimen to remove loose, bulky corrosion products.

7.2.2 Intermittent removal of specimens from the cleaning solution for light brushing or ultrasonic cleaning can often facilitate the removal of tightly adherent corrosion products.

7.2.3 Chemical cleaning is often followed by light brushing or ultrasonic cleaning in reagent water to remove loose products.

7.3 Electrolytic cleaning can also be utilized for removal of corrosion products. Several useful methods for corrosion test specimens of iron, cast iron, or steel are given in Table A2.1.

7.3.1 Electrolytic cleaning should be preceded by brushing or ultrasonic cleaning of the test specimen to remove loose, bulky corrosion products. Brushing or ultrasonic cleaning should also follow the electrolytic cleaning to remove any loose slime or deposits. This will help to minimize any redeposition of metal from reducible corrosion products that would reduce the apparent mass loss.

7.4 Mechanical procedures can include scraping, scrubbing, brushing, ultrasonic cleaning, mechanical shocking, and impact blasting (for example, grit blasting, water-jet blasting, and so forth). These methods are often utilized to remove heavily encrusted corrosion products. Scrubbing with a nonmetallic bristle brush and a mild abrasive-distilled water slurry can also be used to remove corrosion products.

7.4.1 Vigorous mechanical cleaning may result in the removal of some base metal; therefore, care should be exercised. These should be used only when other methods fail to provide adequate removal of corrosion products. As with other methods, correction for metal loss due to the cleaning method is recommended. The mechanical forces used in cleaning should be held as nearly constant as possible.

8. Assessment of Corrosion Damage

8.1 The initial total surface area of the specimen (making corrections for the areas associated with mounting holes) and the mass lost during the test are determined. The average corrosion rate may then be obtained as follows:

$$\text{Corrosion Rate} = (K \times W)/(A \times T \times D) \quad (1)$$

where:

- K = a constant (see 8.1.2),
- T = time of exposure in hours,
- A = area in cm^2 ,
- W = mass loss in grams, and
- D = density in g/cm^3 (see Appendix X1).

8.1.1 Corrosion rates are not necessarily constant with time of exposure. See Practice G 31 for further guidance.

8.1.2 Many different units are used to express corrosion rates. Using the units in 7.1 for T , A , W , and D , the corrosion rate can be calculated in a variety of units with the following appropriate value of K :

Corrosion Rate Units Desired	Constant (K) in Corrosion Rate Equation
mils per year (mpy)	3.45×10^6
inches per year (ipy)	3.45×10^3
inches per month (ipm)	2.87×10^2
millimetres per year (mm/y)	8.76×10^4
micrometres per year ($\mu\text{m}/\text{y}$)	8.76×10^7
picometres per second (pm/s)	2.78×10^6
grams per square meter per hour ($\text{g}/\text{m}^2\text{-h}$)	$1.00 \times 10^4 \times D$
milligrams per square decimeter per day (mdd)	$2.40 \times 10^6 \times D$
micrograms per square meter per second ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{-s}$)	$2.78 \times 10^6 \times D$

NOTE 5—If desired, these constants may also be used to convert corrosion rates from one set of units to another. To convert a corrosion rate in units X to a rate in units Y , multiply by K_Y/K_X ; for example:

$$15 \text{ mpy} = 15 \times (2.78 \times 10^6)/(3.45 \times 10^6) \text{ pm/s} \quad (2)$$

8.1.3 In the case of sacrificial alloy coatings for which there is preferential corrosion of a component whose density differs from that of the alloy, it is preferable to use the density of the corroded component (instead of the initial alloy density) for calculating average thickness loss rate by use of Eq 1. This is done as follows: (1) cleaning to remove corrosion products only and determine the mass loss of the corroded component; (2) stripping the remaining coating to determine the mass of the uncorroded component; (3) chemical analysis of the stripping solution to determine the composition of the uncorroded

component; (4) performing a mass balance to calculate the composition of the corroded component; (5) using the mass and density of the corroded component to calculate the average thickness loss rate by use of Eq 1. An example of this procedure is given in Appendix X2.

The procedure described above gives an average penetration rate of the coating, but the maximum penetration for a multiphase alloy may be larger when the corroded phase is not uniformly distributed across the surface. In such cases, it is generally considered good practice to obtain a cross section through the corroded surface for microscopic examination. This examination will reveal the extent of selective corrosion of particular phases in the coating, and help in understanding the mechanism of attack.

8.2 Corrosion rates calculated from mass losses can be misleading when deterioration is highly localized, as in pitting or crevice corrosion. If corrosion is in the form of pitting, it may be measured with a depth gage or micrometer calipers with pointed anvils (see Guide G 46). Microscopical methods will determine pit depth by focusing from top to bottom of the pit when it is viewed from above (using a calibrated focusing knob) or by examining a section that has been mounted and metallographically polished. The pitting factor is the ratio of the deepest metal penetration to the average metal penetration (as measured by mass loss).

NOTE 6—See Guide G 46 for guidance in evaluating depths of pitting.

NOTE 7—See Guide G 78 for guidance in evaluating crevice corrosion.

8.3 Other methods of assessing corrosion damage are:

8.3.1 *Appearance*—The degradation of appearance by rusting, tarnishing, or oxidation. (See Practice G 33.)

8.3.2 *Mechanical Properties*—An apparent loss in tensile strength will result if the cross-sectional area of the specimen (measured before exposure to the corrosive environment) is reduced by corrosion. (See Practice G 50.) Loss in tensile strength will result if a compositional change, such as dealloying taking place. Loss in tensile strength and elongation will result from localized attack, such as cracking or intergranular corrosion.

8.3.3 *Electrical Properties*—Loss in electrical conductivity can be measured when metal loss results from uniform corrosion. (See Test Methods D 2776.)

8.3.4 *Microscopical Examination*—Dealloying, exfoliation, cracking, or intergranular attack may be detected by metallographic examination of suitably prepared sections.

9. Report

9.1 The report should include the compositions and sizes of specimens, their metallurgical conditions, surface preparations, and cleaning methods as well as measures of corrosion damage, such as corrosion rates (calculated from mass losses), maximum depths of pitting, or losses in mechanical properties.

10. Precision and Bias

10.1 The factors that can produce errors in mass loss measurement include improper balance calibration and standardization. Generally, modern analytical balances can determine mass values to ± 0.2 mg with ease and balances are available that can obtain mass values to ± 0.02 mg. In general, mass measurements are not the limiting factor. However, inadequate corrosion product removal or overcleaning will affect precision.

10.2 The determination of specimen area is usually the least precise step in corrosion rate determinations. The precision of calipers and other length measuring devices can vary widely. However, it generally is not necessary to achieve better than ± 1 % for area measurements for corrosion rate purposes.

10.3 The exposure time can usually be controlled to better than ± 1 % in most laboratory procedures. However, in field exposures, corrosive conditions can vary significantly and the estimation of how long corrosive conditions existed can present significant opportunities for error. Furthermore, corrosion processes are not necessarily linear with time, so that rate values may not be predictive of the future deterioration, but only are indications of the past exposure.

10.4 Regression analysis on results, as are shown in Fig. 1, can be used to obtain specific information on precision. See Guide G 16 for more information on statistical analysis.

10.5 Bias can result from inadequate corrosion product removal or metal removal caused by overcleaning. The use of repetitive cleaning steps, as shown in Fig. 1, can minimize both of these errors.

10.5.1 Corrosion penetration estimations based on mass loss can seriously underestimate the corrosion penetration caused by localized processes, such as pitting, cracking, crevice corrosion, and so forth.

11. Keywords

11.1 cleaning; corrosion product removal; evaluation; mass loss; metals; preparation; specimens

ANNEXES
(Mandatory Information)
A1. CHEMICAL CLEANING PROCEDURES
TABLE A1.1 CHEMICAL CLEANING PROCEDURES FOR REMOVAL OF CORROSION PRODUCTS

Designation	Material	Solution	Time	Temperature	Remarks
C.1.1	Aluminum and Aluminum Alloys	50 mL phosphoric acid (H ₃ PO ₄ , sp gr 1.69) 20 g chromium trioxide (CrO ₃) Reagent water to make 1000 mL	5 to 10 min	90°C to Boiling	If corrosion product films remain, rinse, then follow with nitric acid procedure (C.1.2).
C.1.2		Nitric acid (HNO ₃ , sp gr 1.42)	1 to 5 min	20 to 25°C	Remove extraneous deposits and bulky corrosion products to avoid reactions that may result in excessive removal of base metal.
C.2.1	Copper and Copper Alloys	500 mL hydrochloric acid (HCl, sp gr 1.19) Reagent water to make 1000 mL	1 to 3 min	20 to 25°C	Deaeration of solution with purified nitrogen will minimize base metal removal.
C.2.2		4.9 g sodium cyanide (NaCN) Reagent water to make 1000 mL	1 to 3 min	20 to 25°C	Removes copper sulfide corrosion products that may not be removed by hydrochloric acid treatment (C.2.1).
C.2.3		100 mL sulfuric acid (H ₂ SO ₄ , sp gr 1.84) Reagent water to make 1000 mL	1 to 3 min	20 to 25°C	Remove bulky corrosion products before treatment to minimize copper redeposition on specimen surface.
C.2.4		120 mL sulfuric acid (H ₂ SO ₄ , sp gr 1.84) 30 g sodium dichromate (Na ₂ Cr ₂ O ₇ ·2H ₂ O) Reagent water to make 1000 mL	5 to 10 s	20 to 25°C	Removes redeposited copper resulting from sulfuric acid treatment.
C.2.5		54 mL sulfuric acid (H ₂ SO ₄ , sp gr 1.84) Reagent water to make 1000 mL	30 to 60 min	40 to 50°C	Deaerate solution with nitrogen. Brushing of test specimens to remove corrosion products followed by re-immersion for 3 to 4 s is recommended.
C.3.1	Iron and Steel	1000 mL hydrochloric acid (HCl, sp gr 1.19) 20 g antimony trioxide (Sb ₂ O ₃) 50 g stannous chloride (SnCl ₂)	1 to 25 min	20 to 25°C	Solution should be vigorously stirred or specimen should be brushed. Longer times may be required in certain instances.
C.3.2		50 g sodium hydroxide (NaOH) 200 g granulated zinc or zinc chips Reagent water to make 1000 mL	30 to 40 min	80 to 90°C	Caution should be exercised in the use of any zinc dust since spontaneous ignition upon exposure to air can occur.
C.3.3		200 g sodium hydroxide (NaOH) 20 g granulated zinc or zinc chips Reagent water to make 1000 mL	30 to 40 min	80 to 90°C	Caution should be exercised in the use of any zinc dust since spontaneous ignition upon exposure to air can occur.
C.3.4		200 g diammonium citrate (NH ₄) ₂ HCC ₆ H ₅ O ₇) Reagent water to make 1000 mL	20 min	75 to 90°C	Depending upon the composition of the corrosion product, attack of base metal may occur.
C.3.5		500 mL hydrochloric acid (HCl, sp gr 1.19) 3.5 g hexamethylene tetramine Reagent water to make 1000 mL	10 min	20 to 25°C	Longer times may be required in certain instances.
C.3.6		Molten caustic soda (NaOH) with 1.5–2.0 % sodium hydride (NaH)	1 to 20 min	370°C	For details refer to Technical Information Bulletin SP29-370, "DuPont Sodium Hydride Descaling Process Operating Instructions."
C.4.1	Lead and Lead Alloys	10 mL acetic acid (CH ₃ COOH) Reagent water to make 1000 mL	5 min	Boiling	...
C.4.2		50 g ammonium acetate (CH ₃ COONH ₄) Reagent water to make 1000 mL	10 min	60 to 70°C	...
C.4.3		250 g ammonium acetate (CH ₃ COONH ₄) Reagent water to make 1000 mL	5 min	60 to 70°C	...
C.5.1	Magnesium and Magnesium Alloys	150 g chromium trioxide (CrO ₃) 10 g silver chromate (Ag ₂ CrO ₄) Reagent water to make 1000 mL	1 min	Boiling	The silver salt is present to precipitate chloride.
C.5.2		200 g chromium trioxide (CrO ₃) 10 g silver nitrate (AgNO ₃) 20 g barium nitrate (Ba(NO ₃) ₂) Reagent water to make 1000 mL	1 min	20 to 25°C	The barium salt is present to precipitate sulfate.
C.6.1	Nickel and Nickel Alloys	150 mL hydrochloric acid (HCl, sp gr 1.19) Reagent water to make 1000 mL	1 to 3 min	20 to 25°C	...
C.6.2		100 mL sulfuric acid (H ₂ SO ₄ , sp gr 1.84) Reagent water to make 1000 mL	1 to 3 min	20 to 25°C	...
C.7.1	Stainless Steels	100 mL nitric acid (HNO ₃ , sp gr 1.42) Reagent water to make 1000 mL	20 min	60°C	...

TABLE A1.1 *Continued*

Designation	Material	Solution	Time	Temperature	Remarks
C.7.2		150 g diammonium citrate ($(\text{NH}_4)_2\text{HC}_6\text{H}_5\text{O}_7$) Reagent water to make 1000 mL	10 to 60 min	70°C	...
C.7.3		100 g citric acid ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) 50 mL sulfuric acid (H_2SO_4 , sp gr 1.84) 2 g inhibitor (diorthotolyl thiourea or quinoline ethyliodide or betanaphthol quinoline) Reagent water to make 1000 mL	5 min	60°C	...
C.7.4		200 g sodium hydroxide (NaOH) 30 g potassium permanganate (KMnO_4) Reagent water to make 1000 mL <i>followed by</i> 100 g diammonium citrate ($(\text{NH}_4)_2\text{HC}_6\text{H}_5\text{O}_7$) Reagent water to make 1000 mL	5 min	Boiling	...
C.7.5		100 mL nitric acid (HNO_3 , sp gr 1.42) 20 mL hydrofluoric acid (HF, sp gr 1.198–48 %) Reagent water to make 1000 mL	5 to 20 min	20 to 25°C	...
C.7.6		200 g sodium hydroxide (NaOH) 50 g zinc powder Reagent water to make 1000 mL	20 min	Boiling	Caution should be exercised in the use of any zinc dust since spontaneous ignition upon exposure to air can occur.
C.8.1	Tin and Tin Alloys	150 g trisodium phosphate ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) Reagent water to make 1000 mL	10 min	Boiling	...
C.8.2		50 mL hydrochloric acid (HCl, sp gr 1.19) Reagent water to make 1000 mL	10 min	20°C	...
C.9.1	Zinc and Zinc Alloys	150 mL ammonium hydroxide (NH_4OH , sp gr 0.90) Reagent water to make 1000 mL <i>followed by</i> 50 g chromium trioxide (CrO_3) 10 g silver nitrate (AgNO_3) Reagent water to make 1000 mL	5 min 15 to 20 s	20 to 25°C Boiling	... The silver nitrate should be dissolved in water and added to the boiling chromic acid to prevent excessive crystallization of silver chromate. The chromic acid must be sulfate free to avoid attack of the zinc base metal.
C.9.2		100 g ammonium chloride (NH_4Cl) Reagent water to make 1000 mL	2 to 5 min	70°C	...
C.9.3		200 g chromium trioxide (CrO_3) Reagent water to make 1000 mL	1 min	80°C	Chloride contamination of the chromic acid from corrosion products formed in salt environments should be avoided to prevent attack of the zinc base metal.
C.9.4		85 mL hydriodic acid (HI, sp gr 1.5) Reagent water to make 1000 mL	15 s	20 to 25°C	Some zinc base metal may be removed. A control specimen (3.1.1) should be employed.
C.9.5		100 g ammonium persulfate ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) Reagent water to make 1000 mL	5 min	20 to 25°C	Particularly recommended for galvanized steel.
C.9.6		100 g ammonium acetate ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) Reagent water to make 1000 mL	2 to 5 min	70°C	...

A2. ELECTROLYTIC CLEANING PROCEDURES

TABLE A2.1 ELECTROLYTIC CLEANING PROCEDURES FOR REMOVAL OF CORROSION PRODUCTS

Designation	Material	Solution	Time	Temperature	Remarks
E.1.1	Iron, Cast Iron, Steel	75 g sodium hydroxide (NaOH) 25 g sodium sulfate (Na_2SO_4) 75 g sodium carbonate (Na_2CO_3) Reagent water to make 1000 mL	20 to 40 min	20 to 25°C	Cathodic treatment with 100 to 200 A/m ² cur- rent density. Use carbon, platinum or stainless steel anode.

TABLE A2.1 *Continued*

Designation	Material	Solution	Time	Temperature	Remarks
E.1.2		28 mL sulfuric acid (H ₂ SO ₄ , sp gr 1.84) 0.5 g inhibitor (diorthotolyl thiourea or quinoline ethyliodide or betanaphthol quinoline) Reagent water to make 1000 mL	3 min	75°C	Cathodic treatment with 2000 A/m ² current density. Use carbon, platinum or lead anode.
E.1.3		100 g diammonium citrate ((NH ₄) ₂ HC ₆ H ₅ O ₇) Reagent water to make 1000 mL	5 min	20 to 25°C	Cathodic treatment with 100 A/m ² current density. Use carbon or platinum anode.
E.2.1	Lead and Lead Alloys	28 mL sulfuric acid (H ₂ SO ₄ , sp gr 1.84) 0.5 g inhibitor (diorthotolyl thiourea or quinoline ethyliodide or betanaphthol quinoline) Reagent water to make 1000 mL	3 min	75°C	Cathodic treatment with 2000 A/m ² current density. Use carbon, platinum or lead anode.
E.3.1	Copper and Copper Alloys	7.5 g potassium chloride (KCl) Reagent water to make 1000 mL	1 to 3	20 to 25°C	Cathodic treatment with 100 A/m ² current density. Use carbon or platinum anode.
E.4.1	Zinc and Cadmium	50 g dibasic sodium phosphate (Na ₂ HPO ₄) Reagent water to make 1000 mL	5 min	70°C	Cathodic treatment with 110 A/m ² current density. Specimen must be energized prior to immersion. Use carbon, platinum or stainless steel anode.
E.4.2		100 g sodium hydroxide (NaOH) Reagent water to make 1000 mL	1 to 2 min	20 to 25°C	Cathodic treatment with 100 A/m ² current density. Specimen must be energized prior to immersion. Use carbon, platinum or stainless steel anode.
E.5.1	General (excluding Aluminum, Magnesium and Tin Alloys)	20 g sodium hydroxide (NaOH) Reagent water to make 1000 mL	5 to 10 min	20 to 25°C	Cathodic treatment with 300 A/m ² current density. A S31600 stainless steel anode may be used.

APPENDICES

(Nonmandatory Information)

X1. DENSITIES FOR A VARIETY OF METALS AND ALLOYS

TABLE X1.1 DENSITIES FOR A VARIETY OF METALS AND ALLOYS

NOTE 1—All UNS numbers that include the letter X indicate a series of numbers under one category.

NOTE 2—An asterisk indicates that a UNS number not available.

Aluminum Alloys		
UNS Number	Alloy	Density g/cm ³
A91100	1100	2.71
A91199	1199	2.70
A92024	2024	2.78
A92219	2219	2.84
A93003	3003	2.73
A93004	3004	2.72
A95005	5005	2.70
A95050	5050	2.69
A95052	5052	2.68
A95083	5083	2.66
A95086	5086	2.66
A95154	5154	2.66
A95357	5357	2.69
A95454	5454	2.69
A95456	5456	2.66
A96061	6061	2.70
*	6062	2.70
A96070	6070	2.71
A96101	6101	2.70
A97075	7075	2.81
A97079	7079	2.75
A97178	7178	2.83
	Stainless Steels	
S20100	Type 201	7.94
S20200	Type 202	7.94
S30200	Type 302	7.94
S30400	Type 304	7.94

TABLE X1.1 *Continued*

Aluminum Alloys

UNS Number	Alloy	Density g/cm ³
S30403	Type 304L	7.94
S30900	Type 309	7.98
S31000	Type 310	7.98
S31100	Type 311	7.98
S31600	Type 316	7.98
S31603	Type 316L	7.98
S31700	Type 317	7.98
S32100	Type 321	7.94
S32900	Type 329	7.98
N08330	Type 330	7.98
S34700	Type 347	8.03
S41000	Type 410	7.70
S43000	Type 430	7.72
S44600	Type 446	7.65
S50200	Type 502	7.82
	Other Ferrous Metals	
F1XXXX	Gray cast iron	7.20
GXXXXX–KXXXXX	Carbon steel	7.86
*	Silicon iron	7.00
KXXXXX	Low alloy steels	7.85
	Copper Alloys	
C38600	Copper	8.94
C23000	Red brass 230	8.75
C26000	Cartridge brass 260	8.52
C28000	Muntz metal 280	8.39
*	Admiralty 442	8.52
C44300	Admiralty 443	8.52
C44400	Admiralty 444	8.52
C44500	Admiralty 445	8.52
C68700	Aluminum brass 687	8.33
C22000	Commercial bronze 220	8.80
C60800	Aluminum bronze, 5 % 608	8.16
*	Aluminum bronze, 8 % 612	7.78
*	Composition M	8.45
*	Composition G	8.77
C51000	Phosphor bronze, 5 % 510	8.86
C52400	Phosphor bronze, 10 % 524	8.77
*	85-5-5-5	8.80
C65500	Silicon bronze 655	8.52
C70600	Copper nickel 706	8.94
C71000	Copper nickel 710	8.94
C71500	Copper nickel 715	8.94
C75200	Nickel silver 752	8.75
	Lead	
L53305–53405	Antimonial	10.80
L5XXXX	Chemical	11.33
	Nickel Alloys	
N02200	Nickel 200	8.89
N04400	Nickel copper 400	8.84
N06600	Nickel chromium iron alloy 600	8.51
N06625	Nickel chromium molybdenum alloy 625	8.44
N08825	Iron nickel chromium alloy 825	8.14
N08020	Iron nickel chromium alloy 20 Cb-3	8.08
*	Iron nickel chromium cast alloy 20	8.02
N10665	Nickel molybdenum alloy B2	9.2
N10276	Nickel chromium molybdenum alloy C-276	8.8
N06985	Nickel chromium molybdenum alloy G-3	8.3
	Other Metals	
M1XXXX	Magnesium	1.74
R03600	Molybdenum	10.22
P04980	Platinum	21.45
P07016	Silver	10.49
R05200	Tantalum	16.60
L13002	Tin	7.30
R50250	Titanium	4.54
Z13001	Zinc	7.13
R60001	Zirconium	6.53

X2. CALCULATION OF AVERAGE THICKNESS LOSS RATE OF AN ALLOY WHEN THE DENSITY OF THE CORRODING METAL DIFFERS FROM THAT OF THE BULK ALLOY

X2.1 Example

X2.1.1 55% Al-Zn alloy coating on steel sheet exposed for 20.95 years at Point Reyes, CA. (As reported in H.E. Townsend and H.H.Lawson, “Twenty-One Year Results for Metallic-Coated Sheet in the ASTM 1976 Atmospheric Corrosion Tests”).⁸

X2.2 Measurements

X2.2.1 Initial aluminum content of coating, C_1 , as measured by stripping (Table A1.1, C.3.) and chemical analysis of uncorroded specimens.

$$C_1 = 55.0\% \text{ Al} \quad (\text{X2.1})$$

X2.2.2 Time of Exposure, T

$$T = 20.95 \text{ years} = 183\,648 \text{ hours} \quad (\text{X2.2})$$

X2.2.3 Specimen Area, A

$$A = 300 \text{ cm}^2 \quad (\text{X2.3})$$

X2.2.4 Initial Mass, W_1

$$W_1 = 79.3586 \text{ g} \quad (\text{X2.4})$$

X2.2.5 Mass after exposure and removal of corrosion products according to Table A1.1, C.9.3, W_2

$$W_2 = 78.7660 \text{ g} \quad (\text{X2.5})$$

X2.2.6 Mass after removal of remaining coating according to Table A1.1, C.3.5, W_3

$$W_3 = 75.0810 \text{ g} \quad (\text{X2.6})$$

X2.2.7 Aluminum content of remaining uncorroded coating by chemical analysis of the stripping solution, C_u

$$C_u = 57.7\% \text{ Al} \quad (\text{X2.7})$$

X2.3 Calculations

X2.3.1 Mass loss of corroded coating, W

$$W = W_1 - W_2 = 79.3586 - 78.7660 = 0.5926 \text{ g} \quad (\text{X2.8})$$

X2.3.2 Mass of remaining uncorroded coating, W_u

$$W_u = W_2 - W_3 = 78.7660 - 75.0810 = 3.6850 \text{ g} \quad (\text{X2.9})$$

X2.3.3 Total mass of original coating, W_t

$$W_t = W + W_u = 0.5926 + 3.6850 = 4.2776 \text{ g} \quad (\text{X2.10})$$

X2.3.4 Composition of corroded coating, C

$$CW + C_u W_u = C_1 W_t \quad (\text{X2.11})$$

Rearranging gives

$$C = (C_1 W_t - C_u W_u) / W \quad (\text{X2.12})$$

$$C = (55.0 \times 4.2776 - 57.7 \times 3.6850) / 0.5926 \quad (\text{X2.13})$$

$$C = 38.2\% \text{ Al} \quad (\text{X2.14})$$

X2.3.5 The density, D , of a 38.2 % Al-Zn alloy is 4.32 g/cm⁻³. In cases where alloy densities are not known, they can be estimated by linear interpolation of the component densities.

X2.3.6 Calculate the average thickness loss rate, L (corrosion rate per Eq 1).

$$L = (K \times W) / (A \times T \times D) \quad (\text{X2.15})$$

where K is given in 8.1.2 as 8.76×10^7

$$L = (8.76 \times 10^7 \times 0.5926) / (300 \times 183\,648 \times 4.32)$$

$$L = 0.218 \text{ micrometres per year}$$

⁸ Outdoor Atmospheric Corrosion, STP 1421, H. E. Townsend, Ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2002, pp. 284–291.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus¹

This standard is issued under the fixed designation B 117; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This practice covers the apparatus, procedure, and conditions required to create and maintain the salt spray (fog) test environment. Suitable apparatus which may be used is described in Appendix X1.

1.2 This practice does not prescribe the type of test specimen or exposure periods to be used for a specific product, nor the interpretation to be given to the results.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as standard. The inch-pound units in parentheses are provided for information and may be approximate.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

B 368 Method for Copper-Accelerated Acetic Acid-Salt Spray (Fog) Testing (CASS Test)²

D 609 Practice for Preparation of Cold-Rolled Steel Panels for Testing Paint, Varnish, Conversion Coatings, and Related Coating Products³

D 1193 Specification for Reagent Water⁴

D 1654 Test Method for Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosive Environments³

E 70 Test Method for pH of Aqueous Solutions with the Glass Electrode⁵

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁶

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G01 on Corrosion of Metals and is the direct responsibility of Subcommittee G01.05 on Laboratory Corrosion Tests.

Current edition approved October 1, 2003. Published October 2003. Originally approved in 1939. Last previous edition approved in 2002 as B 117 – 02.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 02.05.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 06.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 11.01.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.05.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

G 85 Practice for Modified Salt Spray (Fog) Testing⁷

3. Significance and Use

3.1 This practice provides a controlled corrosive environment which has been utilized to produce relative corrosion resistance information for specimens of metals and coated metals exposed in a given test chamber.

3.2 Prediction of performance in natural environments has seldom been correlated with salt spray results when used as stand alone data.

3.2.1 Correlation and extrapolation of corrosion performance based on exposure to the test environment provided by this practice are not always predictable.

3.2.2 Correlation and extrapolation should be considered only in cases where appropriate corroborating long-term atmospheric exposures have been conducted.

3.3 The reproducibility of results in the salt spray exposure is highly dependent on the type of specimens tested and the evaluation criteria selected, as well as the control of the operating variables. In any testing program, sufficient replicates should be included to establish the variability of the results. Variability has been observed when similar specimens are tested in different fog chambers even though the testing conditions are nominally similar and within the ranges specified in this practice.

4. Apparatus

4.1 The apparatus required for salt spray (fog) exposure consists of a fog chamber, a salt solution reservoir, a supply of suitably conditioned compressed air, one or more atomizing nozzles, specimen supports, provision for heating the chamber, and necessary means of control. The size and detailed construction of the apparatus are optional, provided the conditions obtained meet the requirements of this practice.

4.2 Drops of solution which accumulate on the ceiling or cover of the chamber shall not be permitted to fall on the specimens being exposed.

⁷ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.02.

4.3 Drops of solution which fall from the specimens shall not be returned to the solution reservoir for respraying.

4.4 Material of construction shall be such that it will not affect the corrosiveness of the fog.

4.5 All water used for this practice shall conform to Type IV water in Specification D 1193 (except that for this practice limits for chlorides and sodium may be ignored). This does not apply to running tap water. All other water will be referred to as reagent grade.

5. Test Specimens

5.1 The type and number of test specimens to be used, as well as the criteria for the evaluation of the test results, shall be defined in the specifications covering the material or product being exposed or shall be mutually agreed upon between the purchaser and the seller.

6. Preparation of Test Specimens

6.1 Specimens shall be suitably cleaned. The cleaning method shall be optional depending on the nature of the surface and the contaminants. Care shall be taken that specimens are not recontaminated after cleaning by excessive or careless handling.

6.2 Specimens for the evaluation of paints and other organic coatings shall be prepared in accordance with applicable specification(s) for the material(s) being exposed, or as agreed upon between the purchaser and the supplier. Otherwise, the test specimens shall consist of steel meeting the requirements of Practice D 609 and shall be cleaned and prepared for coating in accordance with the applicable procedure of Practice D 609.

6.3 Specimens coated with paints or nonmetallic coatings shall not be cleaned or handled excessively prior to test.

6.4 Whenever it is desired to determine the development of corrosion from an abraded area in the paint or organic coating, a scratch or scribed line shall be made through the coating with a sharp instrument so as to expose the underlying metal before testing. The conditions of making the scratch shall be as defined in Test Method D 1654, unless otherwise agreed upon between the purchaser and the seller.

6.5 Unless otherwise specified, the cut edges of plated, coated, or duplex materials and areas containing identification marks or in contact with the racks or supports shall be protected with a suitable coating stable under the conditions of the practice.

NOTE 1—Should it be desirable to cut test specimens from parts or from preplated, painted, or otherwise coated steel sheet, the cut edges shall be protected by coating them with paint, wax, tape, or other effective media so that the development of a galvanic effect between such edges and the adjacent plated or otherwise coated metal surfaces, is prevented.

7. Position of Specimens During Exposure

7.1 The position of the specimens in the salt spray chamber during the test shall be such that the following conditions are met:

7.1.1 Unless otherwise specified, the specimens shall be supported or suspended between 15 and 30° from the vertical and preferably parallel to the principal direction of flow of fog through the chamber, based upon the dominant surface being tested.

7.1.2 The specimens shall not contact each other or any metallic material or any material capable of acting as a wick.

7.1.3 Each specimen shall be placed to permit unencumbered exposure to the fog.

7.1.4 Salt solution from one specimen shall not drip on any other specimen.

NOTE 2—Suitable materials for the construction or coating of racks and supports are glass, rubber, plastic, or suitably coated wood. Bare metal shall not be used. Specimens shall preferably be supported from the bottom or the side. Slotted wooden strips are suitable for the support of flat panels. Suspension from glass hooks or waxed string may be used as long as the specified position of the specimens is obtained, if necessary by means of secondary support at the bottom of the specimens.

8. Salt Solution

8.1 The salt solution shall be prepared by dissolving 5 ± 1 parts by mass of sodium chloride in 95 parts of water conforming to Type IV water in Specification D 1193 (except that for this practice limits for chlorides and sodium may be ignored). Careful attention should be given to the chemical content of the salt. The salt used shall be sodium chloride with not more than 0.3 % by mass of total impurities. Halides (Bromide, Fluoride, and Iodide) other than Chloride shall constitute less than 0.1 % by mass of the salt content. Copper content shall be less than 0.3 ppm by mass. Sodium chloride containing anti-caking agents shall not be used because such agents may act as corrosion inhibitors. See Table 1 for a listing of these impurity restrictions. Upon agreement between the purchaser and the seller, analysis may be required and limits established for elements or compounds not specified in the chemical composition given above.

TABLE 1 Maximum Allowable Limits for Impurity Levels in Sodium Chloride^{A,B}

Impurity Description	Allowable Amount
Total Impurities	≤ 0.3 %
Halides (Bromide, Fluoride and Iodide) excluding Chloride	≤ 0.1 %
Copper	< 0.3 ppm
Anti-caking Agents	0.0 %

^A A common formula used to calculate the amount of salt required by mass to achieve a 5 % salt solution of a known mass of water is:

$$.053 \times \text{Mass of Water} = \text{Mass of NaCl required}$$

The mass of water is 1 g per 1 mL. To calculate the mass of salt required in grams to mix 1 L of a 5 % salt solution, multiply .053 by 1000 g (35.27 oz., the mass of 1 L of water). This formula yields a result of 53 g (1.87 oz.) of NaCl required for each liter of water to achieve a 5 % salt solution by mass.

The 0.053 multiplier for the sodium chloride used above is derived by the following:

$$1000 \text{ g (mass of a full L of water) divided by } 0.95$$

(water is only 95 % of the total mixture by mass) yields 1053 g

This 1053 g is the total mass of the mixture of one L of water with a 5 % sodium chloride concentration. 1053 g minus the original weight of the L of water, 1000 g, yields 53 g for the weight of the sodium chloride. 53 g of total sodium chloride divided by the original 1000 g of water yields a 0.053 multiplier for the sodium chloride.

As an example: to mix the equivalent of 200 L (52.83 gal) of 5 % sodium chloride solution, mix 10.6 kg (23.37 lb) of sodium chloride into 200 L (52.83 gal) of water. 200 L of water weighs 200,000 g. $200,000 \text{ g of water} \times .053$ (sodium chloride multiplier) = 10,600 g of sodium chloride, or 10.6 kg.

^B In order to ensure that the proper salt concentration was achieved when mixing the solution, it is recommended that the solution be checked with either a salimeter hydrometer or specific gravity hydrometer. When using a salimeter hydrometer, the measurement should be between 4 and 6 % at 25°C (77°F). When using a specific gravity hydrometer, the measurement should be between 1.0255 and 1.0400 at 25°C (77°F).

8.2 The pH of the salt solution shall be such that when atomized at 35°C (95°F) the collected solution will be in the pH range from 6.5 to 7.2 (Note 3). Before the solution is atomized it shall be free of suspended solids (Note 4). The pH measurement shall be made at 25°C (77°F) using a suitable glass pH-sensing electrode, reference electrode, and pH meter system in accordance with Test Method E 70.

NOTE 3—Temperature affects the pH of a salt solution prepared from water saturated with carbon dioxide at room temperature and pH adjustment may be made by the following three methods:

(1) When the pH of a salt solution is adjusted at room temperature, and atomized at 35°C (95°F), the pH of the collected solution will be higher than the original solution due to the loss of carbon dioxide at the higher temperature. When the pH of the salt solution is adjusted at room temperature, it is therefore necessary to adjust it below 6.5 so the collected solution after atomizing at 35°C (95°F) will meet the pH limits of 6.5 to 7.2. Take about a 50-mL sample of the salt solution as prepared at room temperature, boil gently for 30 s, cool, and determine the pH. When the pH of the salt solution is adjusted to 6.5 to 7.2 by this procedure, the pH of the atomized and collected solution at 35°C (95°F) will come within this range.

(2) Heating the salt solution to boiling and cooling to 35°C (95°F) and maintaining it at 35°C (95°F) for approximately 48 h before adjusting the pH produces a solution the pH of which does not materially change when atomized at 35°C (95°F).

(3) Heating the water from which the salt solution is prepared to 35°C (95°F) or above, to expel carbon dioxide, and adjusting the pH of the salt solution within the limits of 6.5 to 7.2 produces a solution the pH of which does not materially change when atomized at 35°C (95°F).

NOTE 4—The freshly prepared salt solution may be filtered or decanted before it is placed in the reservoir, or the end of the tube leading from the solution to the atomizer may be covered with a double layer of cheesecloth to prevent plugging of the nozzle.

NOTE 5—The pH can be adjusted by additions of dilute ACS reagent grade hydrochloric acid or sodium hydroxide solutions.

9. Air Supply

9.1 The compressed air supply to the Air Saturator Tower shall be free of grease, oil, and dirt before use by passing through well-maintained filters. (Note 6) This air should be maintained at a sufficient pressure at the base of the Air Saturator Tower to meet the suggested pressures of Table 2 at the top of the Air Saturator Tower.

NOTE 6—The air supply may be freed from oil and dirt by passing it through a suitable oil/water extractor (that is commercially available) to stop any oil from reaching the Air Saturator Tower. Many oil/water extractors have an expiration indicator, proper preventive maintenance intervals should take these into account.

9.2 The compressed air supply to the atomizer nozzle or nozzles shall be conditioned by introducing it into the bottom of a tower filled with water. A common method of introducing the air is through an air dispersion device (X1.4.1). The level of the water must be maintained automatically to ensure adequate humidification. It is common practice to maintain the temperature in this tower between 46 and 49°C (114–121°F) to offset the cooling effect of expansion to atmospheric pressure during the atomization process. Table 2 in 9.3 of this practice shows the temperature, at different pressures, that are commonly used to offset the cooling effect of expansion to atmospheric pressure.

9.3 Careful attention should be given to the relationship of tower temperature to pressure since this relationship can have

a direct impact to maintaining proper collection rates (Note 7). It is preferable to saturate the air at temperatures well above the chamber temperature as insurance of a wet fog as listed in Table 2.

TABLE 2 Suggested Temperature and Pressure guideline for the top of the Air Saturator Tower for the operation of a test at 35°C (95°F)

Air Pressure, kPa	Temperature, °C	Air Pressure, PSI	Temperature, °F
83	46	12	114
96	47	14	117
110	48	16	119
124	49	18	121

NOTE 7—If the tower is run outside of these suggested temperature and pressure ranges to achieve proper collection rates as described in 10.2 of this practice, other means of verifying the proper corrosion rate in the chamber should be investigated, such as the use of control specimens (panels of known performance in the test conducted). It is preferred that control panels be provided that bracket the expected test specimen performance. The controls allow for the normalization of test conditions during repeated running of the test and will also allow comparisons of test results from different repeats of the same test. (Refer to Appendix X3, Evaluation of Corrosive Conditions, for mass loss procedures).

10. Conditions in the Salt Spray Chamber

10.1 *Temperature*—The exposure zone of the salt spray chamber shall be maintained at 35 + 1.1 – 1.7°C (95 + 2 – 3°F). Each set point and its tolerance represents an operational control point for equilibrium conditions at a single location in the cabinet which may not necessarily represent the uniformity of conditions throughout the cabinet. The temperature within the exposure zone of the closed cabinet shall be recorded (Note 8) at least twice a day at least 7 h apart (except on Saturdays, Sundays, and holidays when the salt spray test is not interrupted for exposing, rearranging, or removing test specimens or to check and replenish the solution in the reservoir)

NOTE 8—A suitable method to record the temperature is by a continuous recording device or by a thermometer which can be read from outside the closed cabinet. The recorded temperature must be obtained with the salt spray chamber closed to avoid a false low reading because of wet-bulb effect when the chamber is open.

10.2 *Atomization and Quantity of Fog*—Place at least two clean fog collectors per atomizer tower within the exposure zone so that no drops of solution will be collected from the test specimens or any other source. Position the collectors in the proximity of the test specimens, one nearest to any nozzle and the other farthest from all nozzles. A typical arrangement is shown in Fig. 1. The fog shall be such that for each 80 cm² (12.4 in.²) of horizontal collecting area, there will be collected from 1.0 to 2.0 mL of solution per hour based on an average run of at least 16 h (Note 9). The sodium chloride concentration of the collected solution shall be 5 ± 1 mass % (Notes 9-11). The pH of the collected solution shall be 6.5 to 7.2. The pH measurement shall be made as described in 8.2 (Note 3).

NOTE 9—Suitable collecting devices are glass or plastic funnels with

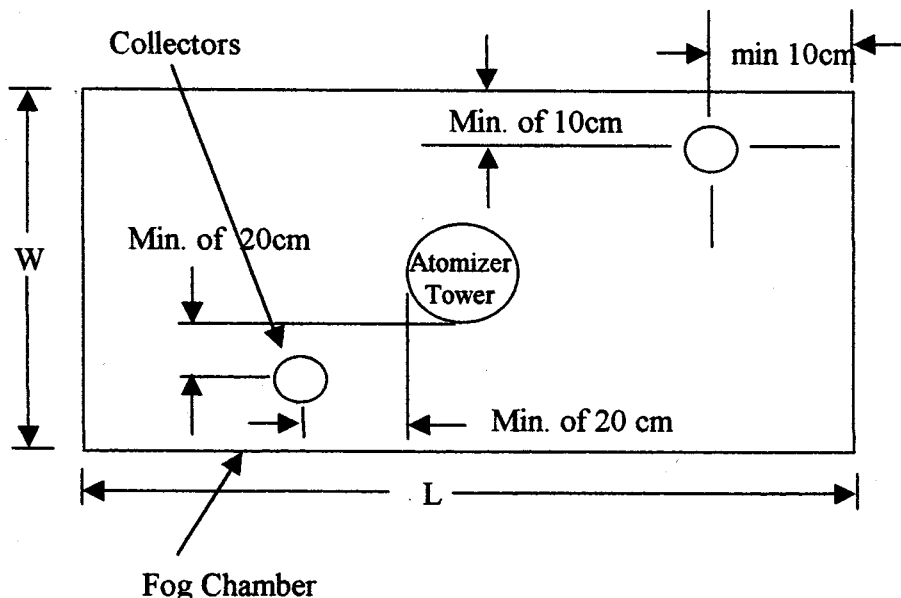


FIG. 1 Arrangement of Fog Collectors

NOTE—This figure shows a typical fog collector arrangement for a single atomizer tower cabinet. The same fog collector arrangement is also applicable for multiple atomizer tower and horizontal (“T” type) atomizer tower cabinet constructions as well.

the stems inserted through stoppers into graduated cylinders, or crystallizing dishes. Funnels and dishes with a diameter of 10 cm (3.94 in.) have an area of about 80 cm² (12.4 in.²).

NOTE 10—A solution having a specific gravity of 1.0255 to 1.0400 at 25°C (77°F) will meet the concentration requirement. The sodium chloride concentration may also be determined using a suitable salinity meter (for example, utilizing a sodium ion-selective glass electrode) or colorimetrically as follows. Dilute 5 mL of the collected solution to 100 mL with distilled water and mix thoroughly; pipet a 10-mL aliquot into an evaporating dish or casserole; add 40 mL of distilled water and 1 mL of 1 % potassium chromate solution (chloride-free) and titrate with 0.1 N silver nitrate solution to the first appearance of a permanent red coloration. A solution that requires between 3.4 and 5.1 mL of 0.1 N silver nitrate solution will meet the concentration requirements.

NOTE 11—Salt solutions from 2 to 6 % will give the same results, though for uniformity the limits are set at 4 to 6 %.

10.3 The nozzle or nozzles shall be so directed or baffled that none of the spray can impinge directly on the test specimens.

11. Continuity of Exposure

11.1 Unless otherwise specified in the specifications covering the material or product being tested, the test shall be continuous for the duration of the entire test period. Continuous operation implies that the chamber be closed and the spray operating continuously except for the short daily interruptions necessary to inspect, rearrange, or remove test specimens, to check and replenish the solution in the reservoir, and to make necessary recordings as described in Section 10. Operations shall be so scheduled that these interruptions are held to a minimum.

12. Period of Exposure

12.1 The period of exposure shall be as designated by the specifications covering the material or product being tested or as mutually agreed upon between the purchaser and the seller.

NOTE 12—Recommended exposure periods are to be as agreed upon between the purchaser and the seller, but exposure periods of multiples of 24 h are suggested.

13. Cleaning of Tested Specimens

13.1 Unless otherwise specified in the specifications covering the material or product being tested, specimens shall be treated as follows at the end of the test:

13.1.1 The specimens shall be carefully removed.

13.2 Specimens may be gently washed or dipped in clean running water not warmer than 38°C (100°F) to remove salt deposits from their surface, and then immediately dried.

14. Evaluation of Results

14.1 A careful and immediate examination shall be made as required by the specifications covering the material or product being tested or by agreement between the purchaser and the seller.

15. Records and Reports

15.1 The following information shall be recorded, unless otherwise prescribed in the specifications covering the material or product being tested:

15.1.1 Type of salt and water used in preparing the salt solution,

15.1.2 All readings of temperature within the exposure zone of the chamber,

15.1.3 Daily records of data obtained from each fog-collecting device including the following:

15.1.3.1 Volume of salt solution collected in millilitres per hour per 80 cm² (12.4 in.²),

15.1.3.2 Concentration or specific gravity at 35°C (95°F) of solution collected, and

15.1.3.3 pH of collected solution.

- 15.2 Type of specimen and its dimensions, or number or description of part,
- 15.3 Method of cleaning specimens before and after testing,
- 15.4 Method of supporting or suspending article in the salt spray chamber,
- 15.5 Description of protection used as required in 6.5,
- 15.6 Exposure period,
- 15.7 Interruptions in exposure, cause, and length of time, and

15.8 Results of all inspections.

NOTE 13—If any of the atomized salt solution which has not contacted the test specimens is returned to the reservoir, it is advisable to record the concentration or specific gravity of this solution also.

16. Keywords

16.1 controlled corrosive environment; corrosive conditions; determining mass loss; salt spray (fog) exposure

APPENDIXES

(Nonmandatory Information)

X1. CONSTRUCTION OF APPARATUS

X1.1 Cabinets

X1.1.1 Standard salt spray cabinets are available from several suppliers, but certain pertinent accessories are required before they will function according to this practice and provide consistent control for duplication of results.

X1.1.2 The salt spray cabinet consists of the basic chamber, an air-saturator tower, a salt solution reservoir, atomizing nozzles, specimen supports, provisions for heating the chamber, and suitable controls for maintaining the desired temperature.

X1.1.3 Accessories such as a suitable adjustable baffle or central fog tower, automatic level control for the salt reservoir, and automatic level control for the air-saturator tower are pertinent parts of the apparatus.

X1.1.4 The size and shape of the cabinet shall be such that the atomization and quantity of collected solution is within the limits of this practice.

X1.1.5 The chamber shall be made of suitably inert materials such as plastic, glass, or stone, or constructed of metal and lined with impervious plastics, rubber, or epoxy-type materials or equivalent.

X1.1.6 All piping that contacts the salt solution or spray should be of inert materials such as plastic. Vent piping should be of sufficient size so that a minimum of back pressure exists and should be installed so that no solution is trapped. The exposed end of the vent pipe should be shielded from extreme air currents that may cause fluctuation of pressure or vacuum in the cabinet.

X1.2 Temperature Control

X1.2.1 The maintenance of temperature within the salt chamber can be accomplished by several methods. It is generally desirable to control the temperature of the surroundings of the salt spray chamber and to maintain it as stable as possible. This may be accomplished by placing the apparatus in a constant-temperature room, but may also be achieved by surrounding the basic chamber of a jacket containing water or air at a controlled temperature.

X1.2.2 The use of immersion heaters in an internal salt solution reservoir or within the chamber is detrimental where

heat losses are appreciable because of solution evaporation and radiant heat on the specimens.

X1.3 Spray Nozzles

X1.3.1 Satisfactory nozzles may be made of hard rubber, plastic, or other inert materials. The most commonly used type is made of plastic. Nozzles calibrated for air consumption and solution-atomized are available. The operating characteristics of a typical nozzle are given in Table X1.1.

X1.3.2 It can readily be seen that air consumption is relatively stable at the pressures normally used, but a marked reduction in solution sprayed occurs if the level of the solution is allowed to drop appreciably during the test. Thus, the level of the solution in the salt reservoir must be maintained automatically to ensure uniform fog delivery during the test.⁸

X1.3.3 If the nozzle selected does not atomize the salt solution into uniform droplets, it will be necessary to direct the spray at a baffle or wall to pick up the larger drops and prevent them from impinging on the test specimens. Pending a complete understanding of air-pressure effects, and so forth, it is important that the nozzle selected shall produce the desired

⁸ A suitable device for maintaining the level of liquid in either the saturator tower or reservoir of test solution may be designed by a local engineering group, or may be purchased from manufacturers of test cabinets as an accessory.

TABLE X1.1 Operating Characteristics of Typical Spray Nozzle

Siphon Height, cm	Air Flow, dm ³ /min				Solution Consumption, cm ³ /h			
	Air Pressure, kPa				Air Pressure, kPa			
	34	69	103	138	34	69	103	138
10	19	26.5	31.5	36	2100	3840	4584	5256
20	19	26.5	31.5	36	636	2760	3720	4320
30	19	26.5	31.5	36	0	1380	3000	3710
40	19	26.6	31.5	36	0	780	2124	2904

Siphon Height, in.	Air Flow, L/min				Solution Consumption, mL/h			
	Air Pressure, psi				Air Pressure, psi			
	5	10	15	20	5	10	15	20
4	19	26.5	31.5	36	2100	3840	4584	5256
8	19	26.5	31.5	36	636	2760	3720	4320
12	19	26.5	31.5	36	0	1380	3000	3710
16	19	26.6	31.5	36	0	780	2124	2904

condition when operated at the air pressure selected. Nozzles are not necessarily located at one end, but may be placed in the center and can also be directed vertically up through a suitable tower.

X1.4 Air for Atomization

X1.4.1 The air used for atomization must be free of grease, oil, and dirt before use by passing through well-maintained filters. Room air may be compressed, heated, humidified, and washed in a water-sealed rotary pump if the temperature of the water is suitably controlled. Otherwise cleaned air may be introduced into the bottom of a tower filled with water through a porous stone or multiple nozzles. The level of the water must be maintained automatically to ensure adequate humidification. A chamber operated in accordance with this method and Appendix X1 will have a relative humidity between 95 and 98 %. Since salt solutions from 2 to 6 % will give the same results (though for uniformity the limits are set at 4 to 6 %), it is preferable to saturate the air at temperatures well above the chamber temperature as insurance of a wet fog. Table X1.2 shows the temperatures, at different pressures, that are required to offset the cooling effect of expansion to atmospheric pressure.

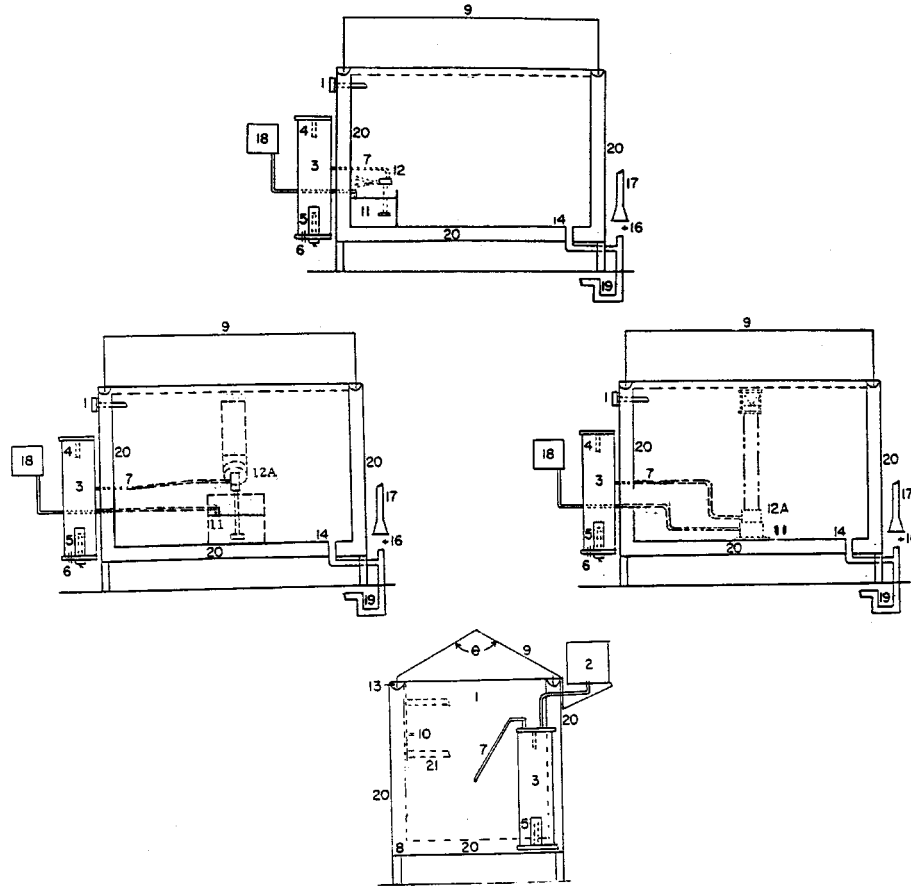
TABLE X1.2 Temperature and Pressure Requirements for Operation of Test at 95°F

	Air Pressure, kPa			
	83	96	110	124
Temperature, °C	46	47	48	49
	Air Pressure, psi			
	12	14	16	18
Temperature, °F	114	117	119	121

X1.4.2 Experience has shown that most uniform spray chamber atmospheres are obtained by increasing the atomizing air temperature sufficiently to offset heat losses, except those that can be replaced otherwise at very low-temperature gradients.

X1.5 Types of Construction

X1.5.1 A modern laboratory cabinet is shown in Fig. X1.1. Walk-in chambers are usually constructed with a sloping ceiling. Suitably located and directed spray nozzles avoid ceiling accumulation and drip. Nozzles may be located at the ceiling, or 0.91 m (3 ft) from the floor directed upward at 30 to 60° over a passageway. The number of nozzles depends on type and capacity and is related to the area of the test space. An 11 to 19 L (3 to 5-gal) reservoir is required within the chamber, with the level controlled. The major features of a walk-in type cabinet, which differs significantly from the laboratory type, are illustrated in Fig. X1.2. Construction of a plastic nozzle, such as is furnished by several suppliers, is shown in Fig. X1.3.

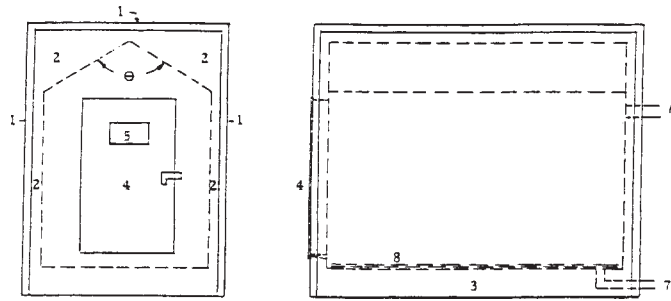


NOTE 1— θ —Angle of lid, 90 to 125°

- 1—Thermometer and thermostat for controlling heater (Item No. 8) in base
- 2—Automatic water leveling device
- 3—Humidifying tower
- 4—Automatic temperature regulator for controlling heater (Item No. 5)
- 5—Immersion heater, nonrusting
- 6—Air inlet, multiple openings
- 7—Air tube to spray nozzle
- 8—Heater in base
- 9—Hinged top, hydraulically operated, or counterbalanced
- 10—Brackets for rods supporting specimens, or test table
- 11—Internal reservoir
- 12—Spray nozzle above reservoir, suitably designed, located, and baffled
- 12A—Spray nozzle housed in dispersion tower located preferably in center of cabinet (typical examples)
- 13—Water seal
- 14—Combination drain and exhaust. Exhaust at opposite side of test space from spray nozzle (Item 12), but preferably in combination with drain, waste trap, and forced draft waste pipe (Items 16, 17, and 19).
- 16—Complete separation between forced draft waste pipe (Item 17) and combination drain and exhaust (Items 14 and 19) to avoid undesirable suction or back pressure.
- 17—Forced draft waste pipe
- 18—Automatic leveling device for reservoir
- 19—Waste trap
- 20—Air space or water jacket
- 21—Test table or rack, well below roof area

NOTE 2—This figure shows the various components including alternate arrangements of the spray nozzles and solution reservoir.

FIG. X1.1 Typical Salt Spray Cabinet



NOTE—The controls are the same, in general as for the smaller laboratory type cabinet (Fig. X1.1), but are sized to care for the larger cube. The chamber has the following features:

- θ—Angle of ceiling, 90 to 125°
- 1—Heavy insulated outer panels
- 2—Air space
- 3—Low-watt density heaters, or steam coils
- 4—Single- or double-, full-opening door (refrigeration type), with inward sloping door sill
- 5—Viewing window/s
- 6—Inner chamber vent
- 7—Inner chamber drain
- 8—Duct boards on floor

FIG. X1.2 Walk-in Chamber, 1.5 by 2.4 m (5 by 8 ft) and Upward in Overall Size

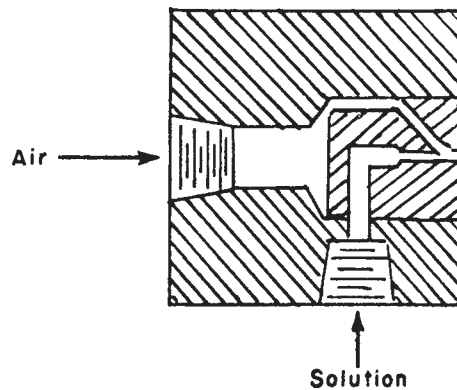


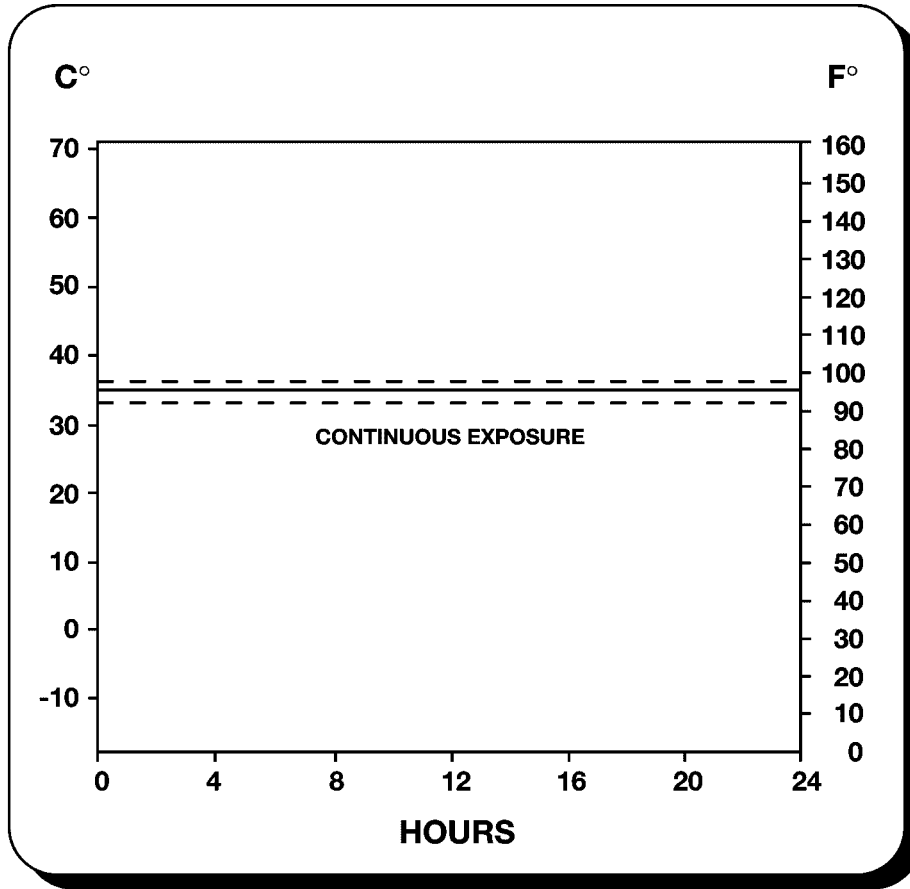
FIG. X1.3 Typical Spray Nozzle

X2. USE OF THE SALT SPRAY (FOG) TEST IN RESEARCH

X2.1 This practice is primarily used for process qualification and quality acceptance. Regarding any new applications, it is essential to correlate the results of this practice with actual field exposure results. (See Fig. X2.1.)

X2.2 The salt spray has been used to a considerable extent for the purpose of comparing different materials or finishes. It should be noted there is usually not a direct relation between salt spray (fog) resistance and resistance to corrosion in other media, because the chemistry of the reactions, including the formation of films and their protective value, frequently varies greatly with the precise conditions encountered. Informed personnel are aware of the erratic composition of basic alloys, the possibility of wide variations in quality and thickness of plated items produced on the same racks at the same time, and the consequent need for a mathematical determination of the

number of specimens required to constitute an adequate sample for test purposes. In this connection it is well to point out that Practice B 117 is not applicable to the study or testing of decorative chromium plate (nickel-chromium) on steel or on zinc-base die castings or of cadmium plate on steel. For this purpose Method B 368 and Practice G 85 are available, which are also considered by some to be superior for comparison of chemically treated aluminum (chromated, phosphated, or anodized), although final conclusions regarding the validity of test results related to service experience have not been reached. Practice B 117 and Practice G 85 are considered to be most useful in estimating the relative behavior of closely related materials in marine atmospheres, since it simulates the basic conditions with some acceleration due to either wetness or temperature, or both.



- (1) Salt Solution: 5 ± 1 parts by mass of sodium chloride (NaCl) in 95 parts by mass of Specification D 1193 Type IV water.
- (2) pH 6.5 to 7.2 of collected solution.
- (3) The exposure zone of the salt spray chamber shall be maintained at $35 + 1.1 - 1.7^{\circ}\text{C}$ ($95 + 2 - 3^{\circ}\text{F}$). Each set point and its tolerance represents an operational control point for equilibrium conditions at a single location in the cabinet which may not necessarily represent the uniformity of conditions throughout the cabinet.
- (4) Fog at a rate of 1.0 to 2.0 mL/hr per 80 cm² of horizontal collection area.

Note: Dashed chart lines indicate temperature tolerance limits.
 Note: Reprinted with permission.

FIG. X2.1 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus

X3. EVALUATION OF CORROSIVE CONDITIONS

X3.1 General—This appendix covers test panels and procedures for evaluating the corrosive conditions within a salt spray cabinet. The procedure involves the exposure of steel test panels and the determination of their mass losses in a specified period of time. This may be done monthly or more frequently to ensure consistent operation over time. It is also useful for correlating the corrosive conditions among different cabinets.

X3.2 Test Panels—The required test panels, 76 by 127 by 0.8 mm (3.0 by 5.0 by .0315 in.), are made from SAE 1008 commercial-grade cold-rolled carbon steel (UNS G10080).

X3.3 Preparation of Panels Before Testing—Clean panels before testing by degreasing only, so that the surfaces are free of dirt, oil, or other foreign matter that could influence the test results. After cleaning, weigh each panel on an analytical balance to the nearest 1.0 mg and record the mass.

X3.4 Positioning of Test Panels—Place a minimum of two weighed panels in the cabinet, with the 127-mm (5.0 in.) length supported 30° from vertical. Place the panels in the proximity of the condensate collectors. (See Section 6.)

X3.5 Duration of Test—Expose panels to the salt fog for 48 to 168 h.

X3.6 Cleaning of Test Panels After Exposure—After removal of the panels from the cabinet, rinse each panel immediately with running tap water to remove salt, and rinse in reagent grade water (see Specification D 1193, Type IV). Chemically clean each panel for 10 min at 20 to 25°C in a fresh solution prepared as follows:

Mix 1000 mL of hydrochloric acid (sp gr 1.19) with 1000 mL reagent grade water (D 1193, Type IV) and add 10 g of hexamethylene tetramine. After cleaning, rinse each panel with reagent grade water (Type IV) and dry (see 13.2).

X3.7 Determining Mass Loss—Immediately after drying, determine the mass loss by reweighing and subtracting panel mass after exposure from its original mass.

TABLE X3.1 Repeatability Statistics

NOTE—Based on two replicates in every test run. No. = number of different salt spray cabinets in test program; r = 95 % repeatability limits, g; C_v = S_r /avg, coefficient of variation, %; and S_r = repeatability standard deviations, g.

Materials	Test Duration, h	Average Mass Loss, g	S_r , g	C_v , %	r , g	No.
QP1	48	0.8170	0.0588	7.20	0.1646	12
QP1	96	1.5347	0.1048	7.28	0.2934	12
QP1	168	2.5996	0.2498	9.61	0.6994	12
AP	48	0.7787	0.0403	5.17	0.1128	10
AP	96	1.4094	0.0923	6.55	0.2584	10
AP	168	2.4309	0.1594	6.56	0.4463	10
QP2	48	0.8566	0.0686	8.01	0.1921	5
QP2	96	1.5720	0.0976	6.21	0.2733	5
QP2	168	2.7600	0.2588	9.38	0.7246	5

TABLE X3.2 Reproducibility Statistics

NOTE—No. = number of different salt spray cabinets in test program; R = 95 % reproducibility limits, g; C_v = S_R /avg, coefficient of variation, %; and S_R = reproducibility standard deviation, g.

Materials	Test Duration, h	Average Mass Loss, g	S_R , g	C_v , %	R , g	No.
QP1	48	0.8170	0.0947	11.58	0.2652	12
QP1	96	1.5347	0.2019	14.02	0.5653	12
QP1	168	2.5996	0.3255	12.52	0.9114	12
AP	48	0.7787	0.0805	10.33	0.2254	10
AP	96	1.4094	0.1626	11.54	0.4553	10
AP	168	2.4309	0.3402	14.00	0.9526	10
QP2	48	0.8566	0.1529	17.85	0.4281	5
QP2	96	1.5720	0.1319	8.39	0.3693	5
QP2	168	2.7600	0.3873	14.03	1.0844	5

X3.7.1 Data generated in the interlaboratory study using this method are available from ASTM as a Research Report.⁹

⁹ Available from ASTM Headquarters. Request RR No. G1-1003.

X3.8 Precision and Bias—Steel Panel Test:

X3.8.1 An interlaboratory test program using three different sets of UNS G10080 steel panels, 76 by 127 by 0.8 mm (3.0 by 5.0 by .0315 in.) has shown that the repeatability of the mass loss of the steel panels, that is, the consistency in mass loss results that may be expected when replicate panels are run simultaneously in a salt spray cabinet, is dependent upon exposure time and the panel lot or source. The interlaboratory program yielded repeatability standard deviations, S_r , from which 95 % repeatability limits, r , were calculated as follows (see Practice E 691):

$$r = 2.8 S_r \quad (X3.1)$$

The values of S_r and r are reported in Table X3.1. Note that the corrosion rate of steel in this environment is approximately constant over the exposure interval and that the ratio of the standard deviation to the average mass loss, the coefficient of variation, C_v , varies between 5 and 10 % with a weighted average of 7.4 % and an r of ± 21 % of the average mass loss.

X3.8.2 This interlaboratory program also produced results on the reproducibility of results, that is, the consistency of mass loss results in tests in different laboratories or in different cabinets in the same facility. This program yielded reproducibility standard deviations, S_R , from which 95 % reproducibility limits, R , were calculated as follows (See Practice E 691):

$$R = 2.8 S_R \quad (X3.2)$$

The values of S_R and R are reported in Table X3.2. Note that the ratio of standard deviation to the average mass loss, the coefficient of variation, C_v , varies between 8 to 18 % with a weighted average of 12.7 % and an R of ± 36 % of the average mass loss.

X3.8.3 The mass loss of steel in this salt spray practice is dependent upon the area of steel exposed, the temperature, time of exposure, salt solution make up and purity, pH, spray conditions, and the metallurgy of the steel. The procedure in Appendix X3 for measuring the corrosivity of neutral salt spray cabinets with steel panels has no bias because the value of corrosivity of the salt spray is defined only in terms of this practice.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

ANEXO E



Standard Test Method for Bending Fatigue Testing for Copper-Alloy Spring Materials¹

This standard is issued under the fixed designation B 593; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

^{e1} NOTE—Paragraph 1.2 was updated editorially in January 2004.

1. Scope*

1.1 This test method describes procedures for the determination of the reversed or repeated bending fatigue properties of copper alloy flat-sheet or strip-spring materials by fixed cantilever, constant amplitude of displacement-type testing machines. This method is limited to flat stock ranging in thickness from 0.005 to 0.062 in. (0.13 to 1.57 mm), to a fatigue-life range of 10^5 to 10^8 cycles, and to conditions where no significant change in stress-strain relations occurs during the test.

NOTE 1—This implies that the load-deflection characteristics of the material do not change as a function of the number of cycles within the precision of measurement. There is no significant cyclic hardening or softening.

1.2 *Units*—The values stated in inch-pound units are regarded as standard. The values given in parentheses are mathematical conversions to SI units that are provided for information purposes only and are not considered standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

E 206 Definitions of Terms Relating to Fatigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data²

E 468 Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials³

3. Terminology

3.1 For terminology relating to this test method, refer to Definitions E 206 and Practice E 468.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee B05 on Copper and Copper Alloys and is the direct responsibility of Subcommittee B05.06 on Methods of Test.

Current edition approved Apr. 10, 2003. Published June 2003. Originally approved in 1973. Last previous edition approved in 1996 as B593 – 96.

² Discontinued, see 1986 *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

4. Summary of Test Method

4.1 A prepared test specimen of a specific wrought copper alloy flat-sheet or strip-spring material is mounted into a fixed cantilever, constant-deflection type fatigue testing machine. The specimen is held at one end, acting as a cantilever beam, and cycled by flexure followed by reverse flexure until complete failure. The number of cycles to failure is recorded as a measure of fatigue-life.

5. Significance and Use

5.1 The flexural fatigue test described in this test method provides information on the ability of a copper alloy flat-spring material to resist the development of cracks or general mechanical deterioration as a result of a relatively large number of cycles (generally in the range 10^5 to 10^8) under conditions of constant displacement.

5.2 This test method is primarily a research and development tool which may be used to determine the effect of variations in materials on fatigue strength and also to provide data for use in selecting copper alloy spring materials for service under conditions of repeated strain cycling.

5.3 The results are suitable for direct application in design only when all design factors such as loading, geometry of part, frequency of straining, and environmental conditions are known. The test method is generally unsuitable for an inspection test or a quality control test due to the amount of time and effort required to collect the data.

6. Apparatus

6.1 *Testing Machine*—The fatigue testing machine is a fixed-cantilever, constant-deflection type. In this machine (Fig. 1) the test specimen shall be held as a cantilever beam in a clamp at one end and deflected by a concentrated load applied near the other end of the apex of the tapered section (Fig. 2). Either the clamp or the loading member may be adjusted so that the deflection of the free end of the cantilever is either completely reversed (mean displacement equal to zero) or greater in one direction of bending (mean displacement not equal to zero).

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

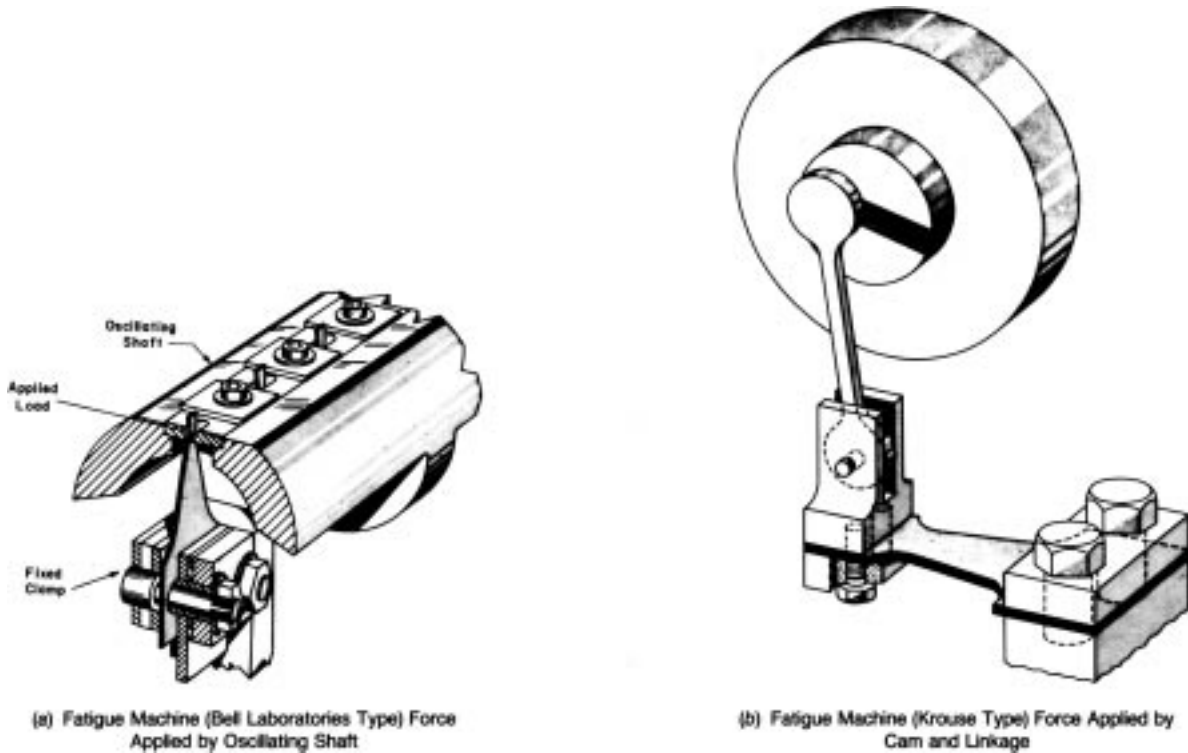


FIG. 1 Fatigue Machines

6.2 A suitable counter and monitoring circuit is required to provide a direct readout of the number of cycles to complete failure, that is, separation into two pieces.

7. Test Specimen

7.1 The test specimen shall be of the fixed-cantilever type. Several such specimens which have been used successfully are shown in Fig. 2.

7.2 It is important, therefore, that care be exercised in the preparation of test specimens, particularly in machining, to assure good workmanship. Improperly prepared test specimens cause unsatisfactory test results.

7.2.1 The specimens are best prepared by cross milling a stack, approximately 0.75 in. (19 mm) thick, including back-up plates, for which 0.12-in. (3-mm) thick brass sheet stock may be used.

7.2.1.1 It is necessary to ensure that any cutting or machining operation required to either rough cut the test specimen from the blank, or to machine it to size does not appreciably alter the metallurgical structure or properties of the material. All cuts taken in machining should be such as to minimize work hardening of the test specimen.

7.2.1.2 In selecting cutting speeds and feed rates, due regard should be paid to the test-specimen material, and for finishing cuts, to the quality of the surface finish required.

NOTE 2—It is not practicable to recommend a single procedure for feeds, speeds, and depth of cut, since this will vary with the material tested. The procedure used, however, should be noted in reporting test results, since differences in procedure may produce variability in test results among different laboratories.

7.3 The test specimen surface shall be in the as-received condition. The edges shall not be roughed or smoothed, since

this tends to give an apparent higher fatigue strength.⁴ Burrs, however, may be removed by light stoning.

7.4 Test specimens from material that is used in a thermally treated condition, such as precipitation hardened or stress relieved, shall be treated in a manner reflecting the way the material will be used. The procedure used should be noted in reporting test results.

8. Calculation of Stress

8.1 The maximum bending stress is calculated by using the simple beam equation:

$$S = 6PL/bd^2 \quad (1)$$

where:

S = desired bending stress, lb/in.²,

P = applied load at the connecting pin (apex of triangle), lb,

L = distance between the connecting pin and the point of stress, in.,

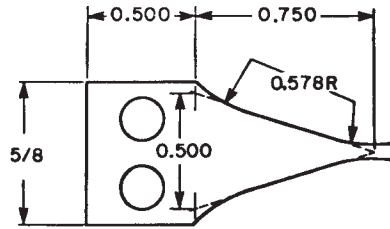
b = specimen width at length L from point of load application, in., and

d = specimen thickness, in.

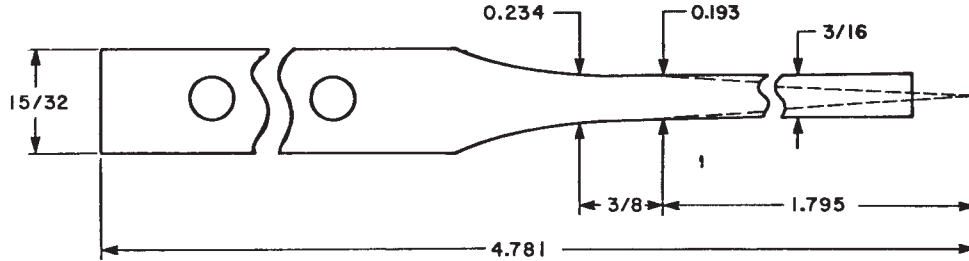
9. Machine Calibration

9.1 A loading fixture such as that shown in Fig. 3 may be used to determine the load-deflection characteristics of the specimen. In this fixture the specimen deflection and change in moment arm under load are measured with the two micrometers for a given load. The vertical micrometer measures the

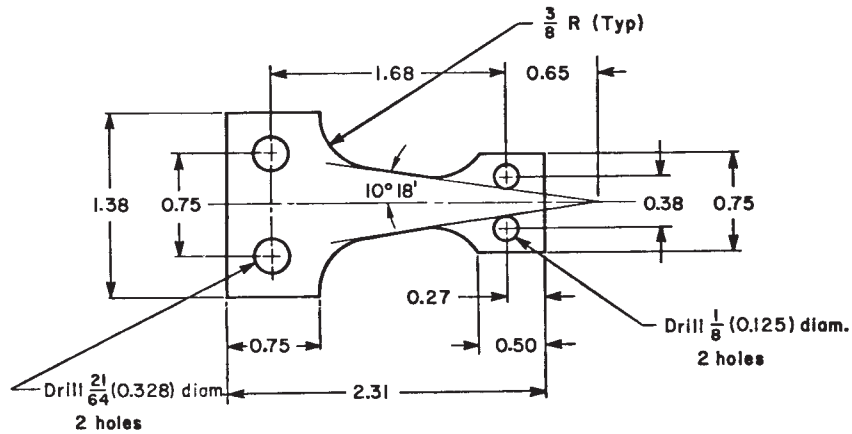
⁴ George, R. G., and Mantle, J. B., "The Effect of Edge Preparation on the Fatigue Life of Flat-Plate Specimens", *Materials Research and Standards*, MTRSA, Am. Soc. Testing Mats., December 1962, p. 1000.



(a) Sheet or Strip Fatigue Test Specimen (Bell Telephone Laboratories Type) for Thickness Ranging from 0.005 to 0.015 in. (0.127 to 0.381 mm)



(b) Sheet or Strip Fatigue Test Specimen (Bell Telephone Laboratories Type) for Thickness Ranging from 0.015 to 0.062 in. (0.381 to 1.575 mm)



(c) Sheet or Strip Fatigue Test Specimen (Krouse Type) for Thickness Ranging from 0.008 to 0.031 in. (0.203 to 0.787 mm)

(Gage length is increased for thicker material.)

NOTE 1—All dimensions are in inches: in. \times 25.4 = mm.

FIG. 2 Sheet or Strip Fatigue Test Specimens

deflection of loading pin, d , which follows the motion of the apex formed by the tapered sides. The horizontal micrometer, e , measures the foreshortening of the moment arm as applied to the same locus. An average load-deflection curve is then plotted from this corrected data. A minimum of three specimens should be used in this determination, representing the minimum, mean, and maximum thicknesses of the material.

9.1.1 Electrical resistance strain gages may be attached to the specimen for simultaneous strain measurement. Adequate

correction should be made, however, to compensate for gage thickness and possible stiffening of the test specimen, especially for thin stock.⁵

9.1.2 Measure the machine displacement under dynamic conditions. This may be accomplished by optical means. Use specimens having foil-type electrical resistance strain gages mounted on the tapered area to verify that static and dynamic strains gages mounted on the tapered area to verify that static and dynamic strains are identical for a given displacement. From the load-deflection curve, plot a stress versus deflection

⁵ Perry, C. C., and Lissner, H. R., *Strain Gage Primer*, McGraw-Hill, New York, NY.

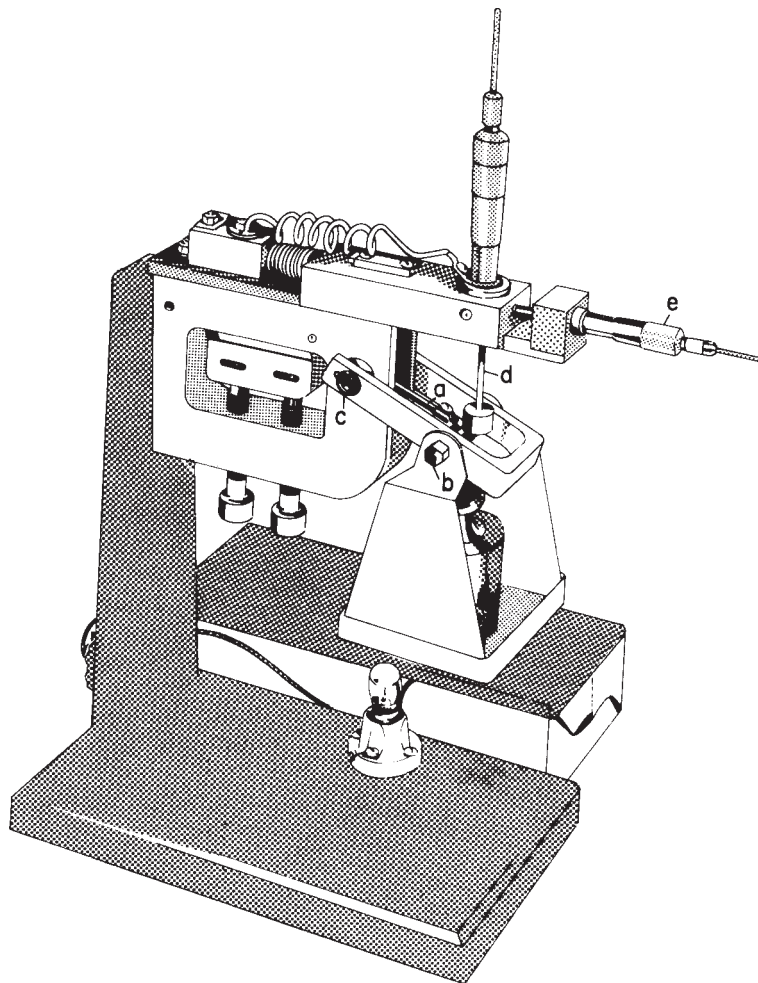


FIG. 3 Load deflection test fixture for standard Bell Telephone Laboratories sheet metal fatigue test specimen

curve using as an approximation the distance from the load point to the center of the tapered specimen area and the width at that point for L and b , respectively.

NOTE 3—Since the specimen normally fails in the tapered region which is designed to have a very nearly uniform outer fiber strain, the error between this calculated stress value and that at the point of failure is small.

10. Procedure

10.1 Mount the test specimens in the machine and flex to failure, that is, separation into two pieces. Determine the number of specimens and displacement levels required for a given sample by consulting ASTM STP 91-A.⁶

11. Report

11.1 Prepare reports in accordance with Practice E 468.

12. Precision and Bias

12.1 *Precision*—The following parameters are reported to impact upon the precision of this test method:

12.1.1 Characteristics of the specimen such as orientation of grains relative to the axial stress, grain size, residual stress, previous strain history, dimensions.

12.1.2 Testing conditions such as alignment of the specimen, temperature variations, conditions of test equipment, ratio of error in load to the range in load values.

12.2 *Bias*—A statement of bias of this method requires reference standard values for one or more materials based on many measurements or round robin test data.^{7,8} Such standard reference values or test data are presently not available.

13. Keywords

13.1 bending fatigue; bending fatigue testing; copper alloy flat strip; copper alloy spring; fatigue testing

⁶ A Guide for Fatigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data, Second Edition, ASTM STP 91-A, AST-TA, 1963.

⁷ Torrey, M. N., and Gohn, G. R., "A Study of the Statistical Treatments of Fatigue Data", *Proceedings ASTM*, Vol 56, p. 1091, 1956.

⁸ Torrey, M. N., Gohn, G. R., and Wilk, M. B., "A Study of The Variability in The Mechanical Properties of Alloy A Phosphor Bronze Strip", *Proceedings ASTM*, Vol 58, p. 893, 1958.

SUMMARY OF CHANGES

Committee B05 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (B 593-85 (1990)) that may impact the use of this standard.

- (1) Added Summary of Test Method and Keywords sections.
- (2) Revised other sections to accommodate current ASTM form and style requirements.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing¹

This standard is issued under the fixed designation E 606; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This practice covers the determination of fatigue properties of nominally homogeneous materials by the use of uniaxially loaded test specimens. It is intended as a guide for fatigue testing performed in support of such activities as materials research and development, mechanical design, process and quality control, product performance, and failure analysis. While this practice is intended primarily for strain-controlled fatigue testing, some sections may provide useful information for load-controlled or stress-controlled testing.

1.2 The use of this practice is limited to specimens and does not cover testing of full-scale components, structures, or consumer products.

1.3 This practice is applicable to temperatures and strain rates for which the magnitudes of time-dependent inelastic strains are on the same order or less than the magnitudes of time-independent inelastic strains. No restrictions are placed on environmental factors such as temperature, pressure, humidity, medium, and others, provided they are controlled throughout the test, do not cause loss of or change in dimension with time, and are detailed in the data report.

NOTE 1—The term *inelastic* is used herein to refer to all nonelastic strains. The term *plastic* is used herein to refer only to the time-independent (that is, noncreep) component of inelastic strain. To truly determine a time-independent strain the load would have to be applied instantaneously, which is not possible. A useful engineering estimate of time-independent strain can be obtained when the strain rate exceeds some value. For example, a strain rate of $1 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ is often used for this purpose. This value should increase with increasing test temperature.

1.4 This practice is restricted to the testing of axially loaded uniform gage section test specimens as shown in Fig. 1(a). Testing is limited to strain-controlled cycling. The practice may be applied to hourglass specimens, see Fig. 1(b), but the user is cautioned about uncertainties in data analysis and interpretation. Testing is done primarily under constant amplitude cycling and may contain interspersed hold times at repeated intervals. The practice may be adapted to guide testing for more general cases where strain or temperature may vary

according to application specific histories. Data analysis may not follow this practice in such cases.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- A 370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products²
- E 3 Methods of Preparation of Metallographic Specimens³
- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines³
- E 8 Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials³
- E 9 Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature³
- E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers³
- E 111 Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus³
- E 112 Test Methods for Determining Average Grain Size³
- E 132 Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature³
- E 157 Practice for Assigning Crystallographic Phase Designations in Metallic Systems³
- E 209 Practice for Compression Tests of Metallic Materials at Elevated Temperatures with Conventional or Rapid Heating Rates and Strain Rates³
- E 337 Test Method for Measuring Humidity with a Psychrometer (the Measurement of Wet- and Dry-Bulb Temperatures)⁴
- E 384 Test Method for Microhardness of Materials³
- E 399 Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials³
- E 466 Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials³
- E 467 Practice for Verification of Constant Amplitude Dynamic Loads on Displacements in an Axial Load Fatigue Testing System³
- E 468 Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials³
- E 739 Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life ($S-N$) and Strain-Life ($\epsilon-N$) Fatigue Data³
- E 1012 Practice for Verification of Specimen Alignment

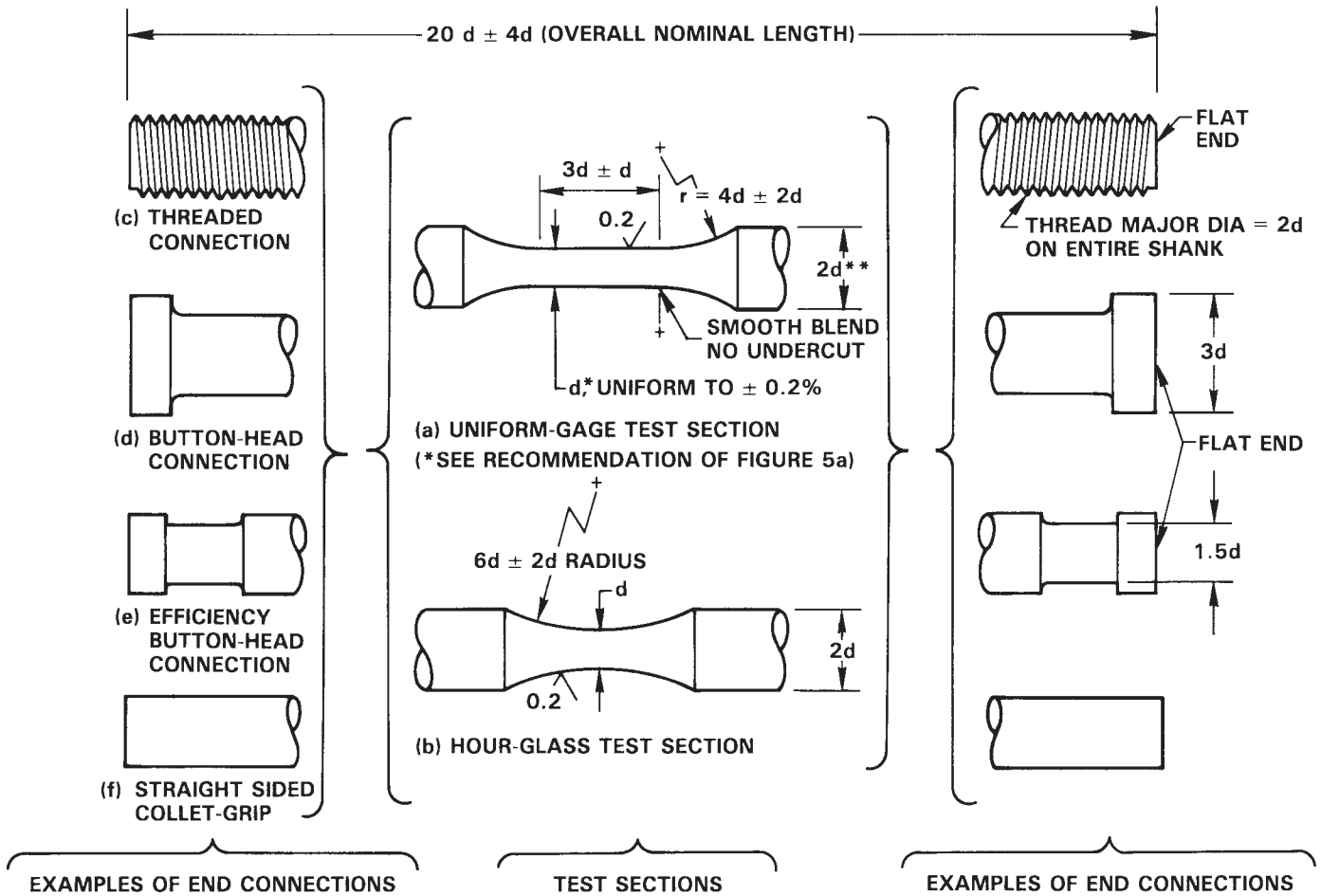
¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee E-8 on Fatigue and Fracture and is the direct responsibility of Subcommittee E08.05 on Cyclic Deformation and Fatigue Crack Formation.

Current edition approved Oct. 15, 1992. Published March 1993. Originally published as E 606 – 77 T. Last previous edition E 606 – 80.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.03.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 11.03.



NOTE 1—* Dimension d is recommended to be 6.35 mm (0.25 in.). See 7.1. Centers permissible. ** This diameter may be made greater or less than $2d$ depending on material hardness. In typically ductile materials diameters less than $2d$ are often employed and in typically brittle materials diameters greater than $2d$ may be found desirable.

FIG. 1 Recommended Low-Cycle Fatigue Specimens

Under Tensile Loading³

E 1049 Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis³

E 1150 Definitions of Terms Relating to Fatigue³

3. Terminology

3.1 The definitions in this practice are in accordance with Definitions E 1150.

3.2 Additional definitions associated with time-dependent deformation behavior observed in tests at elevated homologous temperatures are as follows:

3.2.1 *hold period*, τ_h —the time interval within a cycle during which the stress or strain is held constant.

3.2.2 *inelastic strain*, ϵ_{in} —the strain that is not elastic. For isothermal conditions, ϵ_{in} is calculated by subtracting the elastic strain from the total strain.

3.2.3 *total cycle period*, τ_t —the time for the completion of one cycle. The parameter τ_t can be separated into hold and nonhold components:

$$\tau_t = \Sigma\tau_h + \Sigma\tau_{nh} \quad (1)$$

where:

$\Sigma\tau_h$ = sum of all the hold portions of the cycle and

$\Sigma\tau_{nh}$ = sum of all the nonhold portions of the cycle.

τ_t also is equal to the reciprocal of the overall frequency when the frequency is held constant.

3.2.4 The following equations are often used to define the instantaneous stress and strain relationships for many metals and alloys:

$$\epsilon = \epsilon_{in} + \epsilon_e \quad (2)$$

$$\epsilon_e = \frac{\sigma}{E^*} \text{ (see Note 2)}$$

and the change in strain from any point (1) to any other point (3), as illustrated in Fig. 2, can be calculated as follows:

$$\epsilon_3 - \epsilon_1 = \left(\epsilon_{3in} + \frac{\sigma_3}{E^*} \right) - \left(\epsilon_{1in} + \frac{\sigma_1}{E^*} \right) \quad (3)$$

All strain points to the right of and all stress points above the origin are positive. The equation would then show an increase in inelastic strain from 1 to 3 or:

$$\epsilon_{3in} - \epsilon_{1in} = \epsilon_3 - \epsilon_1 + \frac{\sigma_1}{E^*} - \frac{\sigma_3}{E^*} \quad (4)$$

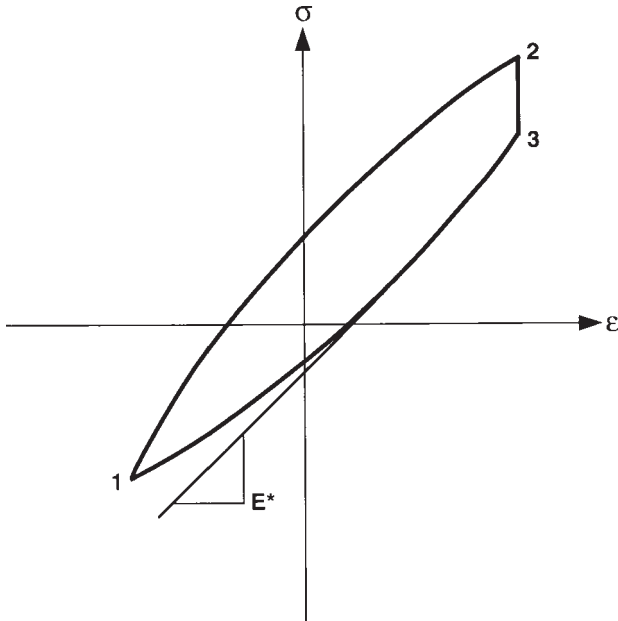


FIG. 2 Analyses of a Total Strain versus Stress Hysteresis Loop Containing a Hold Period

Similarly, during the strain hold period, the change in the inelastic strain will be equal to the change in the stress divided by E^* , or:

$$\epsilon_{3in} - \epsilon_{2m} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{E^*} \quad (5)$$

NOTE 2— E^* represents a material parameter that may be a function of environment and test conditions. It also may vary during a test as a result of metallurgical or physical changes in the specimen. In many instances, however, E^* is practically a constant quantity and is used rather extensively in isothermal, constant-rate testing, in the analysis of hysteresis loops. In such cases, a value for E^* can best be determined by cycling the specimen prior to the test at stress or strain levels below the elastic limit. E^* is NOT the monotonic Young's modulus.

4. Significance and Use

4.1 Strain-controlled fatigue is a phenomenon that is influenced by the same variables that influence load-controlled fatigue. The nature of strain-controlled fatigue imposes distinctive requirements on fatigue testing methods. In particular, cyclic total strain should be measured and cyclic plastic strain should be determined. Furthermore, either of these strains typically is used to establish cyclic limits; total strain usually is controlled throughout the cycle. The uniqueness of this practice and the results it yields are the determination of cyclic stresses and strains at any time during the tests. Differences in strain histories other than constant-amplitude alter fatigue life as compared with the constant amplitude results (for example, periodic overstrains and block or spectrum histories). Likewise, the presence of nonzero mean strains and varying environmental conditions may alter fatigue life as compared with the constant-amplitude, fully reversed fatigue tests. Care must be exercised in analyzing and interpreting data for such cases.

4.2 Strain-controlled fatigue can be an important consideration in the design of industrial products. It is important for

situations in which components or portions of components undergo either mechanically or thermally induced cyclic plastic strains that cause failure within relatively few (that is, approximately $<10^5$) cycles. Information obtained from strain-controlled fatigue testing may be an important element in the establishment of design criteria to protect against component failure by fatigue.

4.3 Strain-controlled fatigue test results are useful in the areas of mechanical design as well as materials research and development, process and quality control, product performance, and failure analysis. Results of a strain-controlled fatigue test program may be used in the formulation of empirical relationships between the cyclic variables of stress, total strain, plastic strain, and fatigue life. They are commonly used in data correlations such as curves of cyclic stress or strain versus life and cyclic stress versus cyclic plastic strain obtained from hysteresis loops at some fraction (often half) of material life. Examination of the cyclic stress-strain curve and its comparison with monotonic stress-strain curves gives useful information regarding the cyclic stability of a material, for example, whether the values of hardness, yield strength, ultimate strength, strain-hardening exponent, and strength coefficient will increase, decrease, or remain unchanged (that is, whether a material will harden, soften, or be stable) because of cyclic plastic straining (1).⁵ The presence of time-dependent inelastic strains during elevated temperature testing provides the opportunity to study the effects of these strains on fatigue life and on the cyclic stress-strain response of the material. Information about strain rate effects, relaxation behavior, and creep also may be available from these tests. Results of the uniaxial tests on specimens of simple geometry can be applied to the design of components with notches or other complex shapes, provided that the strains can be determined and multiaxial states of stress or strain and their gradients are correctly correlated with the uniaxial strain data.

5. Functional Relationships

5.1 Empirical relationships that have been commonly used for description of strain-controlled fatigue data are given in Appendix X1. These relationships may not be valid when large time-dependent inelastic strains occur. For this reason original data should be reported to the greatest extent possible. Data reduction methods should be detailed along with assumptions. Sufficient information should be developed and reported to permit analysis, interpretation, and comparison with results for other materials analyzed using currently popular methods.

5.2 If use is made of hourglass geometries, original data should be reported along with results analyzed using the relationships in Appendix X2.

6. Methodology

6.1 *Testing Machine*—Testing should be conducted with a tension-compression fatigue testing machine that has been verified in accordance with Practices E 4 and E 467, unless more stringent requirements are called for in this specification.

⁵ The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

The testing machine, together with any fixtures used in the test program, must meet the bending strain criteria in 6.3.1. The machine should be one in which specific measures have been taken to minimize backlash in the loading train.

NOTE 3—Load measuring capability of 45 kN (approximately 10 kips) or greater would be sufficient for the recommended specimens (Section 7) and most test materials. The machine load capacity used for these specimens would not be required to exceed 110 kN (approximately 25 kips); however, large-capacity fatigue machines may be beneficial because of increased axial stiffness and decreased lateral deflection of these systems. Achieving a change in axial concentricity of less than or equal to 0.05 mm (0.002 in.) TIR (total indicator reading), as measured between the top and bottom specimen fixture under cyclic load, is a measure of success with respect to minimizing lateral deflection of the load train.

6.2 *Strain Control*—Testing machine controls should permit cycling between constant strain limits. If material behavior permits (for example, aging effects do not hinder), control stability should be such that the strain maximum and minimum limits are repeatable over the test duration to within 1 % of the range between maximum and minimum control limits.

NOTE 4—See 6.4.1 and 6.5 on use of load and strain transducers in relation to repeatability requirements.

NOTE 5—For strain control under long-life conditions it is sometimes advantageous to run a pseudostrain control test under load control. The test could be started in strain control and switched to load control after cyclic stabilization of the stress response occurs. In these cases strain should be monitored (directly or indirectly) and adjustments made in load control to maintain strain limits within 1 % of the range between maximum and minimum limits.

6.3 *Fixtures*:

6.3.1 To minimize bending strains, specimen fixtures should be aligned such that the major axis of the specimen closely coincides with the load axis throughout each cycle. It is important that the accuracy of alignment be kept consistent from specimen to specimen. Alignment should be checked by means of a trial test specimen with longitudinal strain gages placed at four equidistant locations around the minimum diameter. The trial test specimen should be turned about its axis, installed, and checked for each of four orientations within the fixtures. The maximum bending strains so determined should not exceed 5 % of the minimum axial strain range imposed during any test program. For specimens having a uniform gage length, it is advisable to place a similar set of gages at two or three axial positions within the gage section. One set of strain gages should be placed at the center of the gage length to detect misalignment that causes relative rotation of the specimen ends about axes perpendicular to the specimen axis. An additional set of gages should be placed away from the gage-length center to detect relative lateral displacement of the specimen ends. The lower the bending strain, the more repeatable the test results will be from specimen to specimen. This is especially important for materials with low ductility where much better alignment may be needed (that is, bending strains should not exceed 5 % of the minimum strain amplitude).

NOTE 6—This section refers to Practice E 1012 Type A tests.

NOTE 7—Four strain measurements, 90° opposed to each other, are required to ensure that bending strains are not large. Utilization of a single extensometer with dual axial outputs will allow for only two specimen loadings to gather the required four strain readings, without the necessity

of strain gaging specimens.

6.3.2 Several commonly used fixturing techniques are shown schematically in Fig. 3. The selection of any one fixturing technique depends primarily upon the user's specimen design. Fixtures should be constructed of hardened steel for high strength and abrasion resistance. The collet type grip shown, or other fixturing techniques that provide high precision lateral stiffness to hold precise alignment are acceptable. Fixtures not capable of high alignment may be coupled with the Woods metal pot (2, 3) of Fig. 4 or a similar device. Such a device may help to compensate for misalignment in the load train that would induce bending strains in the specimen during fixturing. Placement of the fixtures within die-set or flex bars reduces relative lateral motion of specimen ends and increases lateral stiffness that is important in machines that do not provide adequate safeguards against compressive buckling of the test specimen.

6.3.3 For elevated-temperature testing it is usually necessary to provide some means for cooling the fixtures to prevent damage to other load-train components such as load cells. One method commonly used employs water-cooling coils attached to the fixtures or to other appropriate locations in the load train. Care must be taken to avoid affecting the load cell calibration or the load-train alignment by the addition of cooling coils.

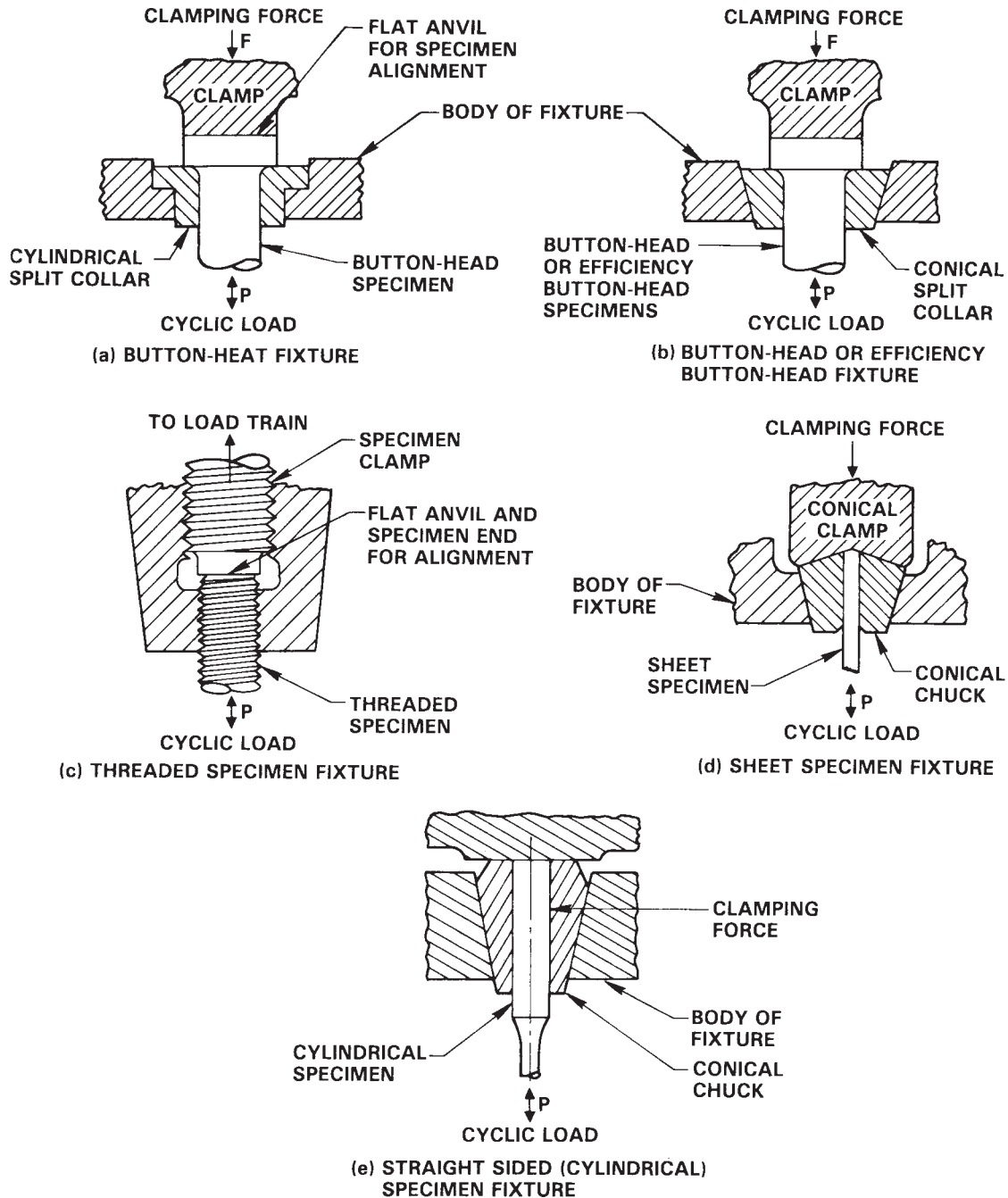
6.4 *Extensometers*—Extensometers should be employed for the purpose of measuring deformation in the gage section. They should be suitable for dynamic measurements over long periods of time.

6.4.1 The non-self contained extensometer may be of two major types: Contacting (for example, the more frequently used strain gage or LVDT type as shown in Fig. 5) or noncontacting (for example, optical types). The output of the extensometer or auxiliary device of the extensometer system should be suitable for control purposes, readout, and recording. The extensometers should qualify as Class B-2 or better in accordance with Practice E 83.

NOTE 8—For best results, the extensometer system (mechanical and electrical) should have a maximum nonlinearity of 0.3 % of full-scale range. Thus, the extensometer design should minimize sources of mechanical hysteresis. The more effective designs have a low activation force that eliminates slippage of the contacts and a low mass to provide high natural frequency for improved dynamic response characteristics.

6.4.2 Extensometers should measure longitudinal deformation when a uniform-gage specimen, such as shown in Fig. 1(a), is tested. Generally, these extensometers are attached as shown in Fig. 5(a).

NOTE 9—Care should be exercised when installing the longitudinal extensometer so as to prevent damage to the specimen surface and consequential premature fatigue failure at the contact points. It is very important to ensure a secure attachment of the extensometer to the test specimen. Damaged or worn contacts or flexure in the attachment apparatus can induce significant hysteresis errors in the measurement. Often, small strips of transparent tape, copper bondable strain gage terminals, or other such protective tabs are adhered to the specimens uniform section at the locations where extensometer tips would contact the material. Use of the tape or tabs tends to "cushion" the attachment. Another alternative is the use of quick-drying epoxy. Light force springs or small rubber bands are often employed to hold the extensometer to the specimen. Dulling the tips for softer material is also commonly done.



NOTE 1—The clamping force should be greater than the cyclic load to avoid backlash within the specimen fixture.

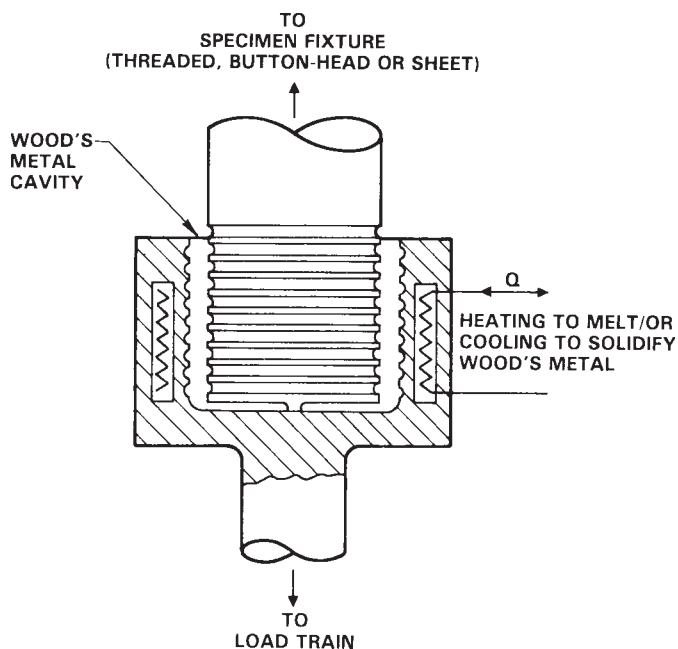
FIG. 3 Schematic Examples of Fixturing Techniques For Various Specimen Designs

Extensometer slippage can be observed after the first several cycles from X-Y traces or strip chart recordings by observing the stress-strain response. Unusual shifts in mean values of stress in response to imposed strain ranges is an indication of such slippage.

6.4.3 Extensometers should measure diametral deformations when specimens having hourglass profiles are tested. A typical method of diametral displacement measurement is shown schematically in Fig. 5(b). Curved extensometer tips, convex in the longitudinal plane, can provide point contact during testing. Care should be exercised during installation of

the diametral extensometer to prevent damage to the test specimen surface. Extensometer tips should be adjusted properly to minimize the force they impose on the specimen. When installing the extensometer, gently move its tip longitudinally along the specimen while watching the gage readout to find the minimum diameter. Calibration of extensometers should be conducted before and after each test program.

NOTE 10—Care should be taken in the measurement of diametral strains for materials such as cast materials that possess large grains or a



NOTE 1—Wood's metal pot is used to provide initially zero stress in the specimen during fixturing. This pot may be within a die-set to combine zero fixturing stress with rigid alignment.

FIG. 4 Schematic of Wood's Metal Pot Showing Principle of Operation

large degree of preferred orientation. These, as well as hexagonal close-packed materials, tend to be anisotropic and therefore may require special methods of strain measurement and interpretation because Poisson's ratio changes substantially with the orientation of the extensometer with respect to the crystallographic orientation of the specimen. Cyclic hardening or softening also might alter the apparent value of Poisson's ratio, thereby complicating data analyses and interpretation.

6.5 *Load Transducers*—A load transducer should be placed in series with the test specimen for the purpose of measuring magnitude and sense of the axial load transmitted through the specimen. Load transducer capacity should be selected to adequately cover the range of loads to be measured in the test being conducted, but not so large as to render larger errors (that is, greater than 1 % of the difference between maximum and minimum control limits). Load transducer calibration should be verified in accordance with Practices E 4 and E 467.

NOTE 11—The load transducer should be designed specifically for fatigue testing and possess the following characteristics: high resistance to bending; high axial stiffness; high linearity; accuracy and sensitivity; low hysteresis; high overturning moment stiffness; and high lateral stiffness. For best results, it is recommended that the maximum load transducer nonlinearity and hysteresis should not exceed 0.5 % and 0.3 % of full-scale range, respectively.

6.6 *Data Recording Systems*—Analog strip chart and X-Y recorders or their digital equivalent should be considered a minimum requirement for data collection.

NOTE 12—Accuracy of recording systems should be kept within 1 % of full scale. Analog/digital devices are available that include maximum and minimum limit detection, maximum-minimum memory, and underpeak detection.

NOTE 13—Data acquisition system characteristics such as sampling frequency and data skew between load and deformation (stress and strain)

channels can affect hysteresis loop presentation on an X-Y recorder used in digital recording systems. It is recommended that these characteristics be taken into consideration along with the strain rate or frequency of cycling to determine that the hysteresis plots are within the required error limits.

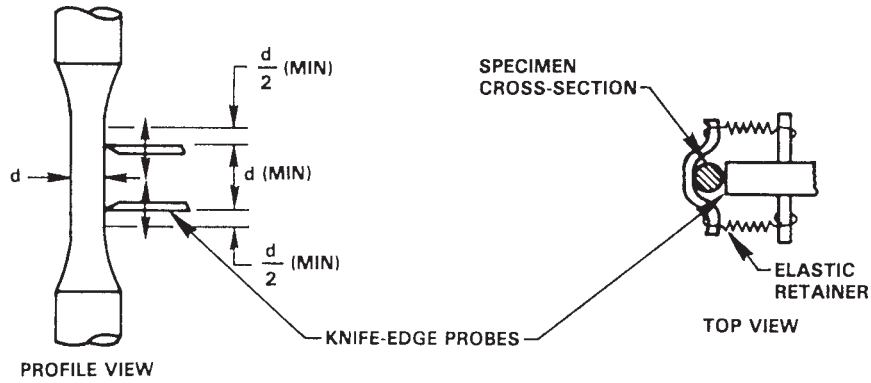
6.6.1 *X-Y Recording*—Some means of X-Y recording should be used for the purpose of recording hysteresis loops of load versus deformation or stress versus strain. A potentiometric X-Y recorder or an oscilloscope equipped with a camera are acceptable alternatives. The potentiometric X-Y recorder should be used only when the rate of cycling results in a pen velocity that is less than one-half of the recorder's slewing speed. At higher frequencies, the oscilloscope may be used. Alternative devices include: digital X-Y plotters for real time recording or to plot stored data and data logging devices that store data in a host computer system or transmit data to a printer.

6.6.2 If digital-type recording devices are used, it is recommended that a sufficient number of simultaneous data pairs (such as stress and strain) be taken for both the ascending segment and descending segment of the hysteresis loop to adequately determine the shape of the loop.

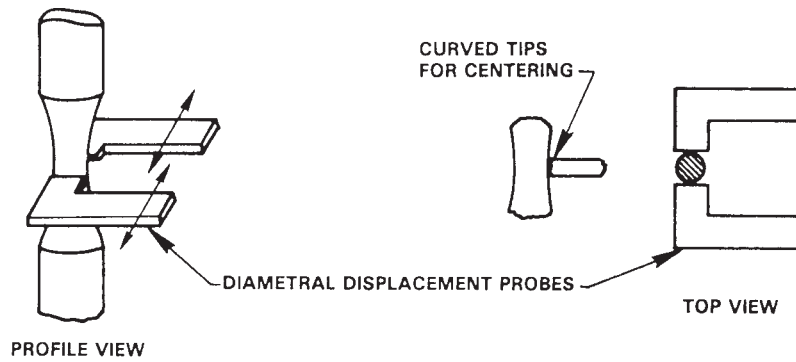
6.6.3 *Strip Chart Recording*—Strip chart recorders may be used to monitor load (or strain). If used, the frequency of the test should be such that the recording pen velocity never exceeds one-half of the recorder's slewing speed. It is recommended that these recorders be calibrated at the testing frequencies used. Storage oscilloscopes also may be used to record the load versus strain loops. Load or strain peaks also may be monitored by devices that detect, display, and retain maximums and minimums in memory or that reproduce these data at predetermined periods.

6.7 *Cycle Counter*—A cycle counter shall be used to indicate total accumulated cycles of loading or straining. An elapsed time indicator is a desirable adjunct to the cycle counter to provide an excellent check of both frequency and the current cycle count. Two types of counters are generally available, mechanical or electronic. A minimum requirement is that a counter have typically five or six digits and $\times 10$, $\times 100$, and $\times 1000$ range multipliers. Digital counters with 1 count resolution with 1 count resolution (no multipliers) are available. Counters are often equipped with a "preset count" feature that may be used to stop a test for examination of the specimen, to command a recorder to take data, or to end a test after a specific number of cycles.

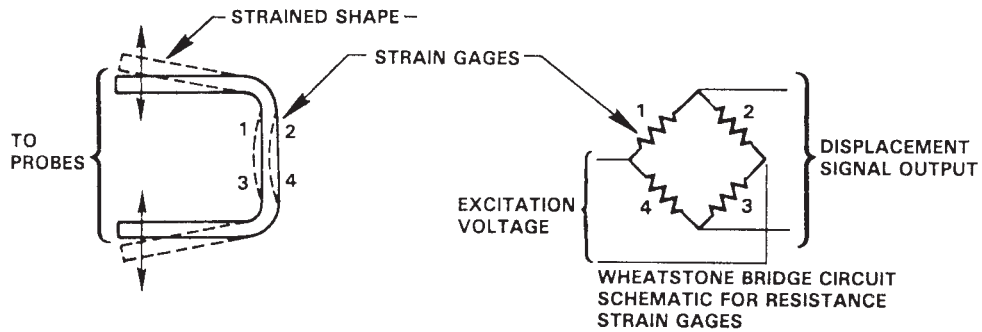
6.8 *Calibration*—The calibration interval of all electronic recording and transducer systems should be performed in accordance with the manufacturer's recommendations; in the absence of these, the interval should be no greater than six months and even more frequent if necessary to maintain required accuracy. Calibration should be checked whenever accuracy is in doubt. All calibrations should be traceable to the National Institute of Standards and Technology. When calibrating a transducer system, it is important that it be performed using the same setup and arrangement of components as used in the test. As an example, when calibrating a load transducer used on an automated system, it is necessary to calibrate the output from the computer, not from any intermediary electronics.



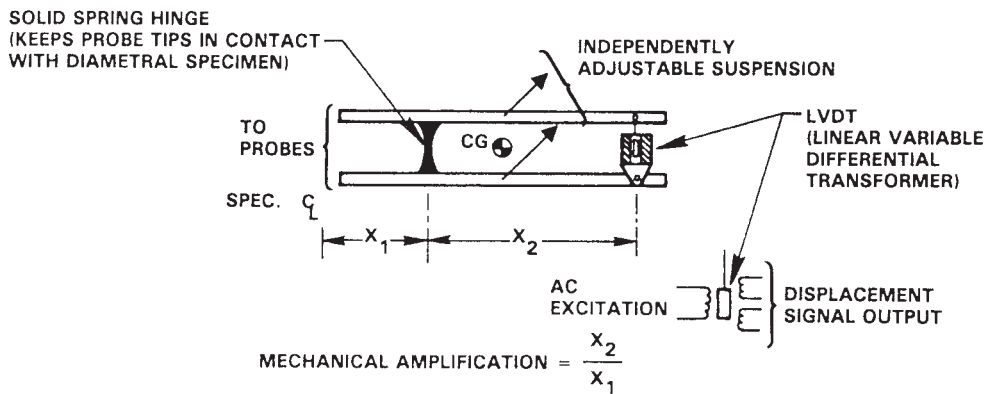
(a) LONGITUDINAL DISPLACEMENT MEASUREMENT FOR UNIFORM GAGE SPECIMEN OF FIGURE 1(a). (PROBES MAY BE ATTACHED TO EITHER TRANSDUCER 5(c) OR 5(d).)



(b) DIAMETRAL DISPLACEMENT MEASUREMENT FOR HOURGLASS SPECIMEN OF FIGURE 1(b). (PROBES MAY BE ATTACHED TO EITHER TRANSDUCER 5(c) OR 5(d).)



(c) STRAIN-GAGE DISPLACEMENT TRANSDUCER



(d) LVDT DISPLACEMENT TRANSDUCER
FIG. 5 Extensometer Schematic

6.9 *Strain Computer*—An analog (or digital) computer is recommended for use in low-cycle fatigue tests of hourglass specimens whenever appreciable cyclic hardening and softening occurs during the test. Such a computer is useful when used in the real-time mode with servocontrolled testing machines and can be used for limit control of screw-driven machines. The computer should be designed to convert diametral strain and axial load signals into an axial strain signal. See Appendix X2 for conversion relations. In the case of servocontrolled machines, this axial strain signal may be used as a feedback signal for control purposes, thus simulating axial strain control. A block diagram for the analog (or digital) computer program is shown in Fig. 6.

7. Specimens

7.1 *Specimen Design*—Fig. 1 shows two basic specimen configurations. Fig. 1(a) shows a recommended uniform-gage specimen. When the choice of an hourglass configuration is deemed necessary, the profile recommended is as shown in Fig. 1(b). Use of Fig. 1(b) should follow careful consideration of problems of data interpretation, and anisotropy and buckling (see Note 10 and Note 14). Both of these recommended specimens possess a solid circular cross section and minimum diameters of 6.35 mm (0.25 in.) in the test section. Specific cross-sectional dimensions are listed here only because they have been dominant in the generation of the low-cycle fatigue database that exists in the open literature. Specimens possessing other diameters or tubular cross sections may be tested successfully within the scope of this practice; however, crack growth rate, specimen grain size, and other considerations might preclude direct comparison with test results from the recommended specimens (see Note 15). While design of specimen end connections is primarily dependent upon user preference (see Note 16), a number of commonly used configurations are shown in Fig. 1(c), 1(d), 1(e) and 1(f). Care must be exercised in the machining of uniform-gage specimens to blend the shoulder radius at the specimen ends with minimum diameter so as to avoid undercutting. So that stress concentrations are minimized, shoulder radius should be as large as possible, consistent with limitations on specimen length.

NOTE 14—Lives determined using tubular specimens are less than those for solid specimens, the extent of which depends on the failure criteria and specimen configuration. Differences in excess of a factor of

two are not unusual for failure criteria based on separation, whereas for failure defined by crack lengths contained within the tube wall there will be much less difference.

NOTE 15—Selection of either the uniform-gage section or hourglass profile is commonly based upon the magnitude of strain range to be imposed. The recommended uniform gage specimen is frequently suitable for strain ranges up to about 2 %. Above 2 % hourglass specimens may be necessary. Soft materials or elevated temperatures may dictate lower strain ranges. The maximum strain range may be increased by appropriate lateral restraints and through the use of short load trains. Options to increase stiffness to avoid the use of hourglass specimens should be exhausted before adopting the configuration shown in Fig. 1(b). If these options fail, the recommended hourglass specimen possesses a profile ratio of 12:1 for radius-of-curvature to minimum radius-of-specimen. If the user wishes, different ratios between the limits of 8:1 and 16:1 may be employed. Lower limits will increase stress concentration and may affect fatigue life; higher ratios limit the specimen’s buckling resistance. For some materials tested in the low-life range, hourglass specimens might give different results from similarly stressed uniform-gage specimens. It is very difficult to determine axial strains from measurements of diametral strain in hourglass specimens for many anisotropic as well as cast materials.

NOTE 16—Design of specimen end connections is dependent upon user preference, fixturing, or availability of material, or a combination of all three; it is constrained principally by proper considerations of axial alignment and backlash. Button-head end connections, such as those shown in Fig. 1(d) and 1(e), permit precise alignment with a specimen end clamping preload (to avoid backlash in the grip). The threaded connection, shown in Fig. 1(c), is useful where the available material is not thick enough to provide for the larger diameter button-head ends. The efficiency button-head connection, shown in Fig. 1(e), provides the button-head preloading feature without requiring larger diameter ends. The button-head design is useful at elevated temperatures, as it does not suffer the “oxidation-sticking” experienced with threaded ends, but it may produce some specimen failures in the fixture when used at room temperatures. The design shown in Fig. 1(f) is convenient for use in collet-type hydraulic grips. This configuration eliminates long life thread failures often associated with Fig. 1(c) type specimens.

7.1.1 *Alternative Specimen Design for Sheet Specimens*—Often, it is desirable to obtain test specimens from sheet material that is less than 6.0 mm (0.24 in.) thick. In general, the considerations discussed in other sections apply equally to sheet testing. However, special specimen geometries and gripping arrangements, as well as more sensitive load and strain transducers, are necessary. It is strongly recommended that torsional loads introduced by actuator rod rotations be eliminated by use of rotational restraints or similar devices. Typical specimen designs that have been used successfully are shown in Fig. 7. The specimens in Fig. 7(a) have a rectangular cross section and are suitable up to strain amplitudes of at least 1 % applied to sheets as thin as 2.54 mm (0.10 in.). For higher strain amplitudes, antibuckling restraints can be adapted to the specific geometry and extensometer used. In using such restraints, care must be taken to avoid increased resistance to axial load influenced by the restraints. When restraints can not be adopted, it may be necessary to use the cylindrical cross section hourglass specimen in Fig. 7(b), see Ref (4) for other designs. The geometries that are adequate for resisting buckling and/or incremental bending collapse at short lives often will lead to grip failures at long lives. The investigator may find it convenient to employ two geometrically similar specimen designs for development of a strain-life curve.

7.2 *Specimen Preparation*—Specimens should be prepared by a specific set of procedures that is known to provide

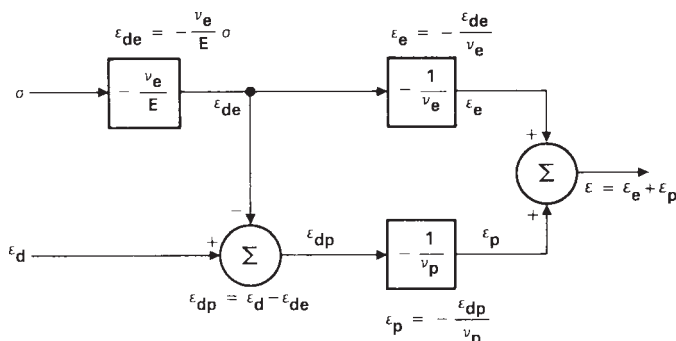
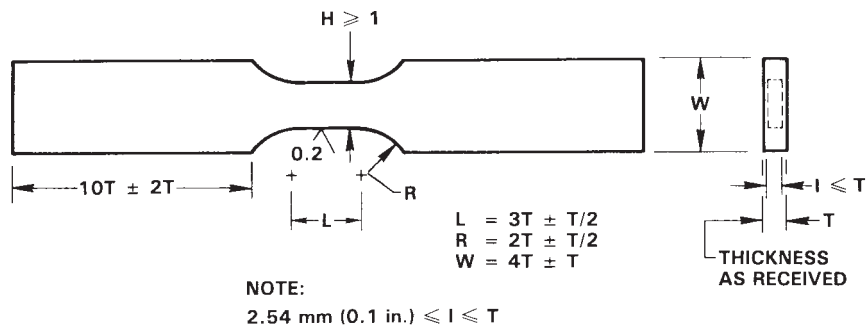
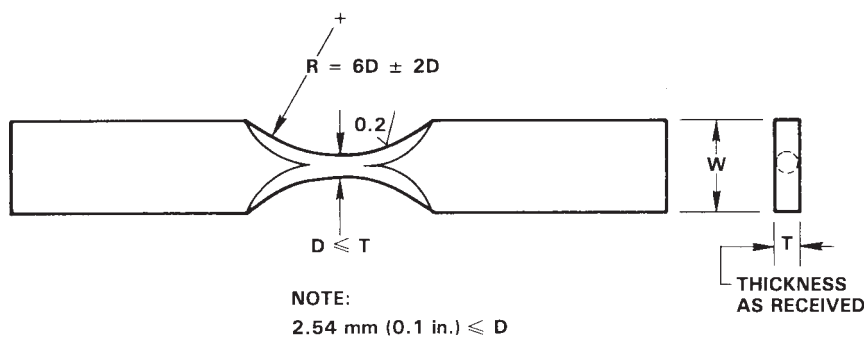


FIG. 6 Block Diagram of Strain Computer (See Appendix X2 for Discussion of Mathematical Relationship)



(a) FLAT-SHEET FATIGUE SPECIMEN WITH RECTANGULAR CROSS SECTION



(b) FLAT-SHEET FATIGUE SPECIMEN WITH CIRCULAR CROSS SECTION

FIG. 7 Sheet Fatigue Specimens—Alternative to Fig. 1 Specimens

consistent test results. Agreement between the testing organization and the user of the test results concerning preparation procedures should be obtained. The following provides recommended guidelines.

7.2.1 Specimen Coupons and Materials—Coupons from which specimens are machined should either be nominally homogeneous or sampled from the source material, or both, so as to be representative of the properties sought in the application of the material to its end use. Thus, when material requirements allow, specimens should be removed from the same material and product form that will be used in the fabricated component of interest. Any material orientations, such as rolling direction or casting direction, should be identified with respect to the orientation of the specimen axes. Orientation notation used in accordance with Test Method E 399 is acceptable such as L, T, S, LT, TL, ST, and the like.

7.2.2 Specimen Surface Preparation—Specimens prepared from coupons will possess a “surface preparation history” as a consequence of machining operations, heat treatments, and the effects of environment during the storage period prior to testing. Unless the purpose of testing is to determine the influence of specific surface conditions on fatigue life, it is recommended that specimen surface preparation be performed in a manner that will have a minimum influence upon the variability in fatigue lives exhibited by the specimen group tested. Ordinarily, this would be accomplished by:

7.2.2.1 consistently machining specimens to be as smooth and uniform in surface finish (in the gage region) as feasible for the subject material and the machining techniques available, and by employing as a final operation a machining or other

“finishing” procedure that would introduce minimal surface metal distortion (see Note 17), and by

7.2.2.2 ensuring, through the use of protective atmospheres, that surface attack, such as oxidation and corrosion, does not occur, either during heat treatments or during specimen storage, for all specimens within a program.

NOTE 17—Appendix X3 presents an example of a machining procedure that has been employed on some metals to minimize variability of machining and heat treatment influences upon fatigue life.

The exact procedure of specimen preparation and handling should be *clearly* and *carefully* documented. It also would be prudent to determine and record the surface residual stresses and the residual stress profile of at least one exemplary specimen.

7.3 Specimen Storage—Test specimens that may be susceptible to corrosion in moist room-temperature air should be protected immediately after preparation and stored until they are tested. Specimens may be stored in a suitable protective environment, such as dry inert gas (as might be conveniently employed in a laboratory desiccator) or a vacuum. The method of storage should be clearly and carefully documented.

7.4 Materials Description—A complete material description is desirable. It is recommended that the following microstructural and mechanical properties be obtained.

7.4.1 Microstructural Characteristics—Composition, grain size (see Test Methods E 112), crystallographic structure, preferred orientation if present, general shape of grains (that is, equiaxed or elongated), second-phase particles (see Practice E 157), heat treatment (whether at the mill, during fabrication, in the laboratory, or a combination of all three), position in

ingot or sheet roll, and specification designation (ASTM, ASME, AISI, Military, SAE, etc.).

7.4.2 Mechanical Properties—For purposes of performing the test and calculating results it is desirable to have available the following representative mechanical properties, obtained at the appropriate temperature and measured in accordance with the applicable standards such as Test Methods E 8, E 9, E 111, E 132 and Practice E 209; tensile or compressive yield strength or yield point, or both; ultimate tensile strength; percent elongation; percent reduction of area; Poisson's ratio; and Young's modulus. The following true stress-strain properties also may be desirable: true fracture strength, true fracture ductility, strain hardening exponent, and strength coefficient. Hardness also may be determined in accordance with Test Methods A 370 or E 384, or both.

8. Procedure

8.1 Test Environment:

8.1.1 Temperature:

8.1.1.1 For materials that are fatigue tested at temperatures other than ambient, all temperatures throughout the gage section (for uniform gage specimens this is the region with constant cross-sectional area) shall be:

$$T_n \pm \Delta T \quad (6)$$

where:

T_n = nominal test temperature in °C and

ΔT = 2°C or 1 %, whichever is greater.

NOTE 18—The temperature variability in the gage section can become a critical issue, particularly if material properties (for example, major alterations of strength, modulus of elasticity, ductility, etc.) or metallurgical stability (for example, microstructure, crystal structure, etc.) are affected significantly. For these reasons as well as others, the temperature variability within the gage section should be maintained as small as possible. Because temperature effects can be significant, the actual temperature variability should be reported with the test results, as should the heating method (induction heating, resistance heating, infrared lamp, etc.).

8.1.1.2 For the duration of the test, the controlled temperature of the specimen should be $T_n \pm 2^\circ\text{C}$.

NOTE 19—If the temperature cannot be maintained within limits mentioned above, then temperature deviations should be reported. If possible, the effect of temperature should be demonstrated throughout the range of test temperatures.

8.1.2 Elevated temperatures may be imposed by any of several methods: (1) high-frequency induction (Note 20), (2) resistance or radiant furnace, or (3) immersion in an inert heated gas or liquid. In (1) and (2) above, an enclosure is recommended to prevent air currents in the vicinity of the specimen from causing undesirable temperature gradients. Specimens tested at room temperature also should be in draft-free surroundings. Temperatures below room temperature may be imposed by placing the specimen and gripping apparatus in a refrigerated chamber that may be either of the liquid or gaseous type, depending on temperature requirements and other possible environmental considerations. Liquefied gases, such as liquid nitrogen, or solidified gases, such as dry ice placed in a liquid medium, provide possible means for low-temperature testing.

NOTE 20—When inductively heating magnetic materials (those materials having relative permeabilities significantly greater than unity), it should be recognized that a varying stress in the specimen can affect the distribution of eddy currents in the specimen and may change the temperature profile. This effect is influenced by the specimen material, design and heat transfer characteristics, the temperature magnitude, the stress magnitude and distribution, the cyclic waveform, and the testing frequency (strain rate). The most pronounced effect is generally produced when conducting tests at low frequencies or with tests containing hold periods. In any case the temperature profile of magnetic specimens should be evaluated throughout the straining cycle. When the effect is severe, it may be necessary to use a susceptor with the induction coil or to use an alternate heating method.

NOTE 21—Use of glass insulation may avoid difficulty with wires submerged in a cooling solvent.

8.1.3 If testing is performed in air, relative humidity may be measured in accordance with Test Method E 337, unless it has already been determined that moisture has little or no effect on fatigue life for the material under test. If an effect is present, relative humidity should be controlled; when uncontrolled it should be carefully monitored and reported.

8.2 Measurement of Test Specimen Dimensions—For the purpose of making an accurate determination of specimen cross-sectional area, measure the reduced section as follows:

8.2.1 Measure the diameter at the center of the gage section by means of an optical comparator or other optical means to an accuracy of 0.0125 mm (0.0005 in.) or better. A precision micrometer may be used in place of the optical comparator if its use does not damage the gage section surface in a way as to affect specimen performance. For uniform-gage specimens, check diameters for at least two other positions within the specimen gage length. The minimum cross-sectional areas should be used for computing the stresses in the specimen during the test. The area at temperature should be used in calculating stress. This area can be obtained by correcting the room-temperature result using the coefficient of thermal expansion.

8.3 Test Machine Control—It is necessary to control one (or more) variable(s) (for example, stress, strain, load, displacement, or other appropriate parameters) in a manner that is in keeping with the test objectives.

8.3.1 **Control Mode**—Total axial strain amplitude is the most commonly utilized control variable in a low-cycle fatigue test. Total axial strain is often controlled continuously throughout each fatigue cycle in a manner prescribed in 8.4. It also is acceptable to control only the limits of either total axial strain or plastic axial strain. In such cases, vary another variable, such as diametral strain, displacement, or load, between these limits in some cyclically consistent manner under either closed loop or other control means. For long-life fatigue tests that exhibit low levels of plastic strain, it is acceptable to control load while monitoring strain and making periodic adjustments of mean load and load range in order to maintain the desired strain limits. Similarly, tests may be initiated in strain control and switched to load control using the stabilized load peaks as limits. When time dependent effects are present, it may no longer be acceptable to control only the limits of the required strain. Continuous control of the parameter of interest may be necessary to obtain the desired intra-cycle response. For example, if the load is controlled between total axial strain

limits in this regime, a quite different material response will be produced than if the total axial strain is continuously controlled.

8.3.2 Closed Loop Method—Fatigue testing machines of the closed loop servocontrolled type often are capable of continuously controlling specific test variables such as load or displacement through appropriate selection of feedback signals. Application of scale factors to these signals thereby permits continuous control of stress or strain. Axial stress may be scaled directly from the load cell signal. Axial strain may be scaled directly from an axial extensometer signal when uniform-gage specimens are tested. When hourglass specimens are tested, an axial strain signal must be determined from a diametral extensometer signal and the force signal by means of a computer (see 6.9) if closed loop control of diametral strain changes during cycling hardening and softening. Additional precautions should be observed when hold times are employed and time-dependent inelastic strains are present. For example, a hold on diametral strain will permit the total axial strain to change during each cycle and will not produce correct relaxation information.

8.3.3 Other Control Methods—Fatigue testing machines that do not provide continuous closed loop control of either specimen load or specimen displacement generally have the capability to impose limits on the chosen test variable. However, they do not control that variable throughout the fatigue cycle. Limit control is a special case of closed loop control. Thus, load and displacement signals may be handled in a manner similar to that of 8.3.2 to determine strain limits. It is not necessary to use a computer for limit control of hourglass specimens if periodic adjustments are made to the diametral strain amplitude in such a manner as to maintain constant axial strain limits. These adjustments are necessary for materials that undergo significant cyclic hardening and softening because of attendant changes to the relationship between axial strain and induced diametral strain. The additional complications of complex waveforms and time-dependent inelastic strains severely curtail the acceptability of limit control techniques. If the technique of limit control is used, the intra-cycle and inter-cycle variation of the parameter of interest should be monitored, and if necessary, periodic adjustments should be made to the testing machine to produce the desired response. Such changes should be reported.

8.4 Waveform—The strain (or stress) versus time waveform should be identical throughout a test program unless test objectives are to determine waveform effects. In the absence of specific waveform requirements or equipment limitations, a triangular waveform for continuous cyclic tests and trapezoidal waveforms for hold period tests are preferred.

8.5 Strain Rate and Frequency of Cycling—Either strain rate or frequency of cycling should be held constant for the duration of each test as well as for the duration of a test program, unless the test objective is specifically to determine either strain rate or frequency effects, respectively.

NOTE 22—While constant strain rate testing is often preferred, constant frequency testing may be of greater practical significance to the fatigue analysis of certain machine components. On the other hand, constant strain rate testing may be experimentally more tractable than constant

frequency testing since long-life, small-strain tests in the former mode may be completed in shorter periods of time than tests conducted in the latter mode.

8.5.1 If nontriangular waveforms preclude constant strain rate testing because of equipment limitations and time limitations preclude constant-frequency testing, other means of rate control are available. One accepted procedure is to maintain constant average strain rate (twice the product of strain range and frequency) throughout each test and for the duration of the test program. Another acceptable procedure, one that is most convenient when testing under plastic strain limit control, is to maintain constant average plastic strain rate.

8.5.2 The selected range of strain rates or frequencies should be sufficiently low as to preclude specimen heating in excess of 2°C (3.6°F). In using a servocontrolled testing machine, make a comparison of the program and feedback signals to ensure that the selected rates or frequencies are and remain within system capabilities and accuracy requirements. Frequency response of extensometers (depending upon their design) is often a limiting factor in the system.

NOTE 23—Notwithstanding the need for constancy of rate, the testing rate may be reduced briefly in order to permit periodic recording operations if doing so does not change specimen behavior. An altered stress-strain response can be expected if the testing rate is reduced when time-dependent strain is present. In addition, a possible effect of the periodic reduction of rate on specimen life should be considered.

8.6 Test Commencement:

8.6.1 Begin all tests in the same direction of initial straining, tensile or compressive, unless the purpose of testing is to study initial loading effects. For some materials, it is acceptable to increase strain amplitude gradually and continuously over a period no greater than approximately 20 cycles or 2 % of anticipated life (whichever is less). Care should be taken in selecting the target strain for the initial cycle to avoid overshooting while minimizing the number of cycles to obtain the desired strain limits. Depending on the material, temperature, strain range, loading range, and dynamic response of the test systems, the peak strain of the initial cycle may vary. If overshooting does occur, the control limits should not be adjusted downward.

8.6.2 In reverse cyclic testing of thin sheet specimens it may be advisable to always begin in tension, particularly with coil products of materials where natural out-of-flatness occurs. In other materials such as flat sheet products, either tension or compression going starts are appropriate.

8.7 Number of Specimens—It is suggested that a minimum of ten specimens be used to generate a fatigue strain-life curve. It also is suggested that the replication guidelines given in STP 588 (5) be followed, especially if subsequent statistical analysis is planned. Reference also is made to Practice E 739.

8.8 Recording—Unless computerized data retrieval systems are employed continuously and it is convenient to record in logarithmic increments of fatigue life (that is, 1, 2, 5, 10, 20, 50, ...), record the initial series of hysteresis loops of axial stress (or load) versus total or plastic axial strain (versus total or plastic diametral strain if an axial strain signal is not available). Record hysteresis loops thereafter at successively larger increments of a cycle count. For tests of 100 cycles or

more, a minimum of ten additional hysteresis loops is desirable. When practical, continuously record the dependent variables (for example, axial stress and plastic axial strain in a total axial strain control test) as a function of time.

NOTE 24—When continuous recording is not practical either because of lengthy test durations or the limited availability of recorders, intermittent records or alternative sampling of the recorded variables is acceptable.

8.9 *Determination of Failure*—The definition of failure may vary with the ultimate use of the fatigue life information (see Note 25). Acceptable alternatives are as follows:

8.9.1 *Separation*—Total separation or fracture of the specimen into two parts at (1) some location within the uniform section of a uniform-gage specimen, or (2) the vicinity of the minimum diameter in an hourglass specimen. All failure locations should be recorded.

NOTE 25—A post-mortem failure analysis should be performed to uncover any unusual causes of failure. Reporting the actual failure location is important. Inclusions, voids, defects, etc., that are not representative of the bulk material or its application may render fatigue life determination invalid (see 8.11.3). Also, consistent failures at one position may signal alignment problems or “knife-edge” failures caused by extensometer attachment.

8.9.2 *Modulus Method*—For any specified number of cycles, N , during the test, the modulus for unloading following a peak tensile stress is defined as E_{NT} and the modulus for loading following a peak compression stress is E_{NC} (see Fig. 8). Failure is defined when the ratio:

$$Q_N = E_{NT}/E_{NC} \quad (7)$$

reaches one-half the value of Q for the first cycle (see Fig. 8).

$$Q_{N_f} = 0.5 Q_1 \quad (8)$$

The number of cycles where this occurs is designated as the number of cycles to failure, N_f . However, if total separation occurs first, as in 8.9.1, the life is N_f .

8.9.3 *Microcracking*—The existence of surface microcracks (for example, as observed optically or by replicas) that are larger than some preselected size consistent with test objectives.

8.9.4 *Load (Stress) Drop*—It is acceptable to define failure in a manner related to the ability to sustain a tensile load (stress). Failure is often defined as the point at which the maximum load (stress) or elastic modulus (as measured when unloading from a peak tensile stress) decreases by approximately 50 % because of a crack or cracks being present. The exact method and the percentage drop should be documented.

8.10 *Test Duration*—Conduct testing at least until failure and preferably until fracture when needs dictate and economics allow. Record total accumulated cycles to failure (and fracture) by means of a cycle counter and check against a measure of elapsed time.

8.11 *Analysis of Data*—While it is not the purpose of this practice to specify data analysis techniques, the following example represents a common procedure utilized when time dependent strains are insignificant.

8.11.1 *Determination of the Cyclic Stress-Strain Curve*—Generate a cyclic stress-strain curve from paired values of stress amplitude and strain amplitude typically at material half-life. When practical, assume a simplifying mathematical expression for the cyclic stress-strain relationship (6).

NOTE 26—See Appendix X1 for expressions.

8.11.2 *Determination of the Strain-Life Relationship*—Generate a strain-life curve from paired values of total strain versus life or plastic strain versus life and elastic strain versus life. When practical, assume a simplifying mathematical relationship.

8.11.3 *Post-Mortem Examinations*—Metallographic examination of the failed specimens is desirable for a variety of purposes depending in part on user interests. Of foremost importance is a fractographic examination of the two surfaces to determine any unusual causes of failure that might invalidate the test results. Dimensional instability of the specimen (unintentional changes in specimen geometry) may occur during the test as a result of time-dependent inelastic deformations. The post-mortem examination should include an evaluation of this occurrence.

8.11.3.1 *Scanning electron microscopy and transmission electron microscopy of fracture replicas* are two common methods used in such an investigation. Ref (7) provides a useful basis for fractographic analysis. The techniques of light metallography and transmission electron microscopy are frequently used when studying structural changes that occur during fatigue or the effects of metallurgical structure on fatigue behavior.

9. Report

9.1 The list of items of information that follows is suggested for inclusion in any report. When publishing results in the open literature, include as much information as possible, independent of the author’s purpose. Routine laboratory reports need include only information pertinent to the end use of the test data. Minimum recommended requirements are indicated by an asterisk (*).

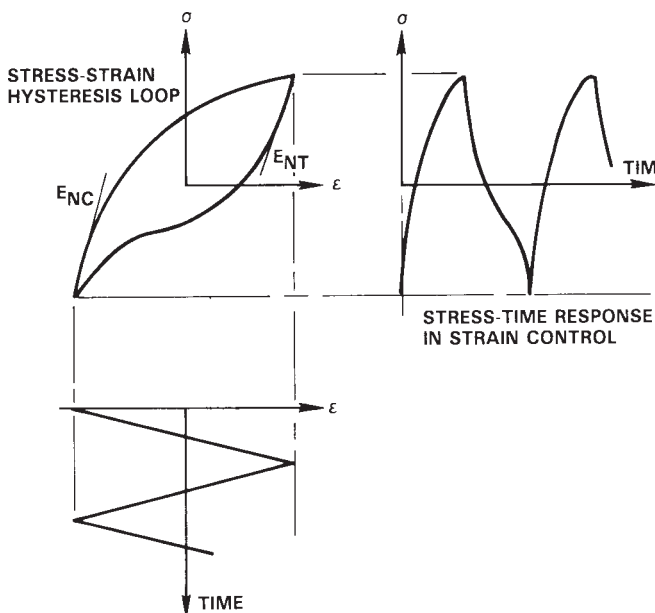


FIG. 8 Definitions of Tension and Compression Modulus for a Determination of Failure

9.1.1 *Specific Objective of Testing.*

9.1.2 *Specimen Materials Description (including processing) **.

9.1.2.1 All available mechanical properties including: yield strength or yield point, or both, ultimate tensile strength, percent elongation and gage length, percent reduction of area, Poisson's ratio, elastic modulus, true fracture strength, true fracture ductility, monotonic strain hardening exponent, monotonic strength coefficient, hardness number, and degree of cold work.

9.1.2.2 All available metallurgical characteristics: certified composition, grain size, crystallographic structure, preferred orientation with respect to specimen axis, general shape of grains (that is, equiaxed or elongated), second phase particles, and heat treatment. Include photomicrographs when possible to document the above properties.

9.1.3 *Specimen Description:*

9.1.3.1 Drawing of the specimen design, or reference to a geometry illustrated in this practice*.

9.1.3.2 Specimen fabrication and surface preparation procedures. If specimens were heat treated after fabrication, details must be provided*.

9.1.3.3 Deviations from recommended specimens configuration and specimen preparation procedures, if any.

9.1.4 *Description of Equipment:*

9.1.4.1 Specimen fixtures and the method used to maintain column rigidity during compression loading.

9.1.4.2 Testing machine.

9.1.4.3 Transducer system (that is, load transducer, deformation transducer).

9.1.4.4 Recorders and recording equipment.

9.1.5 *Description of Testing Environment:*

9.1.5.1 Gas, liquid, or vacuum; chemical composition of medium*.

9.1.5.2 Humidity of gaseous environment*.

9.1.5.3 Test temperature and temperature control method*.

9.1.5.4 Temperature sensing devices, location of temperature measurements, temperature variations in the gage section, any temperature variations in the cycle caused by adiabatic heating or magnetomechanical effects*.

9.1.6 *Testing Conditions and Procedures:*

9.1.6.1 Deviations from recommended procedures, if any.

9.1.6.2 Frequency of cycling (or cyclic strain rate) and description of waveform*.

9.1.6.3 Mode of control, that is, load or stress, continuous strain control, strain limit control, axial strain feedback, diametral strain feedback, etc*.

9.1.6.4 Ratio of axial strain limits (minimum and maximum) and total axial strain range*.

9.1.6.5 Procedure for maintaining constant axial strain limits.

9.1.6.6 Sign of strain at first quarter cycle, tensile or compressive.

9.1.7 *Test Results*—Tabulate the results for all test specimens. When used for purposes of structural analysis, the following three items are most important:

9.1.7.1 Initial, stabilized, or half-life values, or a combination of all three, of the dependent variables from the list of stress range, strain range, and inelastic strain range. Complete curves of these quantities throughout the specimen life. When complete curves are impractical, curves through intermittent values are acceptable*.

9.1.7.2 Relaxation or creep information also should be included for hold-time tests. This should include the values of the relaxed stress or of creep strain, the total amount of relaxation or creep, and the change in the amount of inelastic strain during the hold period. Periodic stress-time recordings obtained with an expanded time scale may be necessary to obtain the desired resolution and to fully characterize the relaxation or creep behavior*.

9.1.7.3 Total number of cycles to failure, N_f , and some additional life measure indicative of crack formation, including the definition used*.

9.1.8 *Results of Analysis for Cyclic Stress-Strain Properties*—If data analysis is performed by means of the relationships in Appendix X1, a tabulation of results should include the cyclic strain hardening exponent and the cyclic strength coefficient.

9.1.9 *Results of Analysis for Strain-Life Properties*—If data analysis is performed by means of the relationships in Appendix X1, a tabulation of results should include the fatigue strength exponent, the fatigue ductility exponent, the fatigue strength coefficient, and the fatigue ductility coefficient.

9.1.10 *Brief Description of the Fracture Characteristics*—Results of post-test metallography and scanning electron microscopy, identification of fracture mechanisms, and the relative degree of transgranular and intergranular cracking. Identify the mechanism or mode of cracking at the region of crack initiation, as well as in the region of crack growth, and note any differences.

APPENDIXES
(Nonmandatory Information)
X1. FUNCTIONAL RELATIONSHIPS

X1.1 For many metals, the following empirical relationships (8) have been used for a convenient description of low-cycle fatigue data. Please note that the subscript used is that for “plastic strain” rather than “inelastic strain.” They are used interchangeably in these fatigue equations.

X1.1.1 *Cyclic Stress-Strain Behavior:* The total strain amplitude for a completely reversed, strain-controlled test may be expressed as:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \quad (\text{X1.1})$$

Recognizing that:

$$\Delta\sigma/2 = K'(\Delta\epsilon_p/2)^{n'} \quad (\text{X1.2})$$

we may express the cyclic stress-strain curve by the constitutive equation:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{1/n'} \quad (\text{X1.3})$$

X1.1.2 *Fatigue-Life Relationships:*

$$\Delta\sigma/2 = \sigma'_f(2N_f)^b \quad (\text{X1.4})$$

$$\Delta\epsilon_p/2 = \epsilon'_f(2N_f)^c \quad (\text{X1.5})$$

$$\Delta\epsilon/2 = [\sigma'_f/E](2N_f)^b + \epsilon'_f(2N_f)^c \quad (\text{X1.6})$$

where the variables are:

$\Delta\sigma$ = true stress range,

$\Delta\epsilon$ = true strain range,

$\Delta\epsilon_p$ = true plastic strain range,

N_f = cycles to failure, and

$2N_f$ = reversals to failure;

and the constants are:

n' = cyclic strain hardening exponent,

b = fatigue strength exponent,

c = fatigue ductility exponent,

K' = cyclic strength coefficient,

σ'_f = fatigue strength coefficient,

ϵ'_f = fatigue ductility coefficient, and

E = Young's modulus (modulus of elasticity).

NOTE X1.1—The user is cautioned that the equations presented in these appendices are not readily amenable to direct use in conventional statistical analysis procedures. Care should be taken in transforming the variables to logarithmic base and in defining the dependent and independent variables.

X2. CONVERSION FROM DIAMETRAL STRAIN TO AXIAL STRAIN FOR ISOTROPIC MATERIALS AND UNIFORM STRAINS

X2.1 Conversion of diametral strain to axial strain requires first the separation of the elastic and plastic components from the total strain by:

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p \quad (\text{X2.1})$$

$$\epsilon_d = \epsilon_{de} + \epsilon_{dp} \quad (\text{X2.2})$$

where:

e = elastic component,

p = plastic component,

d = diametral component, and

ϵ = total axial strain.

Axial and diametral components of strain are related through Poisson's ratio, ν , as:

$$\epsilon_e = -\epsilon_{de}/\nu_e \text{ and } \epsilon_p = -\epsilon_{dp}/\nu_p \quad (\text{X2.3})$$

The above expressions may be rearranged to yield:

$$\epsilon_{dp} = -\epsilon_d/\epsilon_{de} \quad (\text{X2.4})$$

$$\epsilon = -\epsilon_{de}/\nu_e - (\epsilon_d - \epsilon_{de})/\nu_p \quad (\text{X2.5})$$

The diametral elastic strain, ϵ_{de} , is related to axial stress by means of Poisson's ratio and Young's modulus,

$$\epsilon_{de} = -(\nu_e\sigma)/E \quad (\text{X2.6})$$

Thus,

$$\epsilon = \sigma/E - \epsilon_d/\nu_p - (\nu_e\sigma)/(\nu_p)E \quad (\text{X2.7})$$

Assuming that plastic deformation occurs under a constant volume condition:

$$\nu_p = 1/2 \quad (\text{X2.8})$$

such that:

$$\epsilon = (\sigma/E)(1 - 2\nu_e) - 2\epsilon_d \quad (\text{X2.9})$$

In an experiment using a diametral strain gage and an axial load transducer, analogs of σ and ϵ_d are continuously available. Young's modulus, E , can be determined in accordance with Test Method E 111. The elastic portion of stress, σ , versus diametral strain, ϵ_d , provides σ/ϵ_{de} , which permits ν_e to be calculated.

X3. EXAMPLE OF MACHINING PROCEDURE

X3.1 The following procedure was developed for machining high-strength materials and results in minimal surface damage and alteration. It can also be applied to lower strength materials. As a conservative general measure, this procedure is recommended unless: (a) the experimental objective is to evaluate another given surface condition, or (b) it is known that the material under evaluation is relatively insensitive to surface condition.

X3.2 Procedure:

X3.2.1 In the final stages of machining to within 0.025 mm (0.001 in.) of the final diameter, remove small amounts of material and reduce the gage diameter 0.125 mm (0.005 in.) by cylindrical grinding at a rate of no more than 0.005 mm (0.0002 in.)/pass.

NOTE X3.1—Some cast materials will not benefit from successive removal of material in small amounts, although this procedure is probably not to their detriment.

X3.2.2 Remove the final 0.025 mm (0.001 in.) by polishing (see Note X3.2) longitudinally to impart a maximum of 0.2- μ m (8- μ in.) surface roughness.

NOTE X3.2—Extreme caution should be exercised in polishing to ensure that material is being properly removed rather than merely smeared

to produce a smooth surface. This is a particular danger in soft materials wherein material can be smeared over tool marks, thereby creating a potentially undesirable influence on crack initiation during testing.

X3.2.3 After polishing (see Note X3.2), all remaining grinding and polishing marks should be longitudinal. No circumferential machining should be evident when viewed at approximately 20 \times magnification under a light microscope.

X3.2.4 If specimen material is soft (for example, copper, aluminum, lead, etc.) at room temperature, final material removal can be performed by means of turning (rather than grinding) and subsequent polishing.

X3.2.5 Degrease the finished specimen. Caution should be exercised to assure that the degreasing agent does not alter material behavior (for example, methanol on titanium alloys).

X3.2.6 If heat treatment is necessary, conduct it before final machining or in such a manner as to avoid any surface damage; employ an inert protective atmosphere to eliminate surface oxidation.

X3.2.7 If surface observations are to be made, the test specimen may be electropolished in accordance with Methods E 3.

X3.2.8 Imprint specimen numbers on both ends of the test section in regions of low stress, away from grip contact surfaces.

REFERENCES

- (1) Mitchell, M. R., "Fundamentals of Modern Fatigue Analysis for Design," *Fatigue and Microstructures*, ASM Symp., St. Louis, MO, October 14–15, 1978, pp. 385–437.
- (2) Raske, D. T. and Morrow, JoDean, "Mechanics of Materials in Low Cycle Fatigue Testing," *Manual on Low Cycle Fatigue Testing*, ASTM STP 465, ASTM, 1969, pp. 1–25.
- (3) Feltner, C. E. and Mitchell, M. R., "Basic Research on the Cyclic Deformation and Fracture Behavior of Materials," *idem*, pp. 27–66.
- (4) Marsh, G. M., Robb, A. D., and Topper, T. H., "Techniques and Equipment for Axial Fatigue Testing of Sheet Steel," SAE Paper No. 730578, May 1973.
- (5) Little, R. E. and Jebe, E. H., *Manual on Statistical Planning and Analysis for Fatigue Experiments*, ASTM STP 588, ASTM, 1975. See also Little, R. E. and Jebe, E. H., *Statistical Design of Fatigue Experiments*, Applied Science Publishers, Ltd., London, 1975.
- (6) Landgraf, R. W., Morrow, JoDean, and Endo, T., "Determination of the Cyclic Stress-Strain Curve," *Journal of Materials (JMLSA)*, Vol 4, No. 1, March 1969, pp. 176–188.
- (7) "Fractography and Atlas of Fractographs," *Metals Handbook*, Am. Soc. Metals, Vol 9, Eighth Edition, 1974.
- (8) Ellis, J. R., "Results of an Interlaboratory Fatigue Testing Program Conducted on Alloy 800 at Room and Elevated Temperatures," *Journal of Testing and Evaluation (JTEVA)*, Vol 15, No. 5, September 1987, pp. 249–250.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).