

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**

**TRABAJO ESTRUCTURADO DE MANERA INDEPENDIENTE**

**Previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico:**

**TEMA:**

---

**“ESTUDIO DE LA ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE  
FORMA CuAlNi PARA DETERMINAR SU APLICACIÓN INDUSTRIAL”.**

---

**AUTOR:**

**Egdo.** Luis Alberto Urbina Maldonado

**Tutor:** Ing. Mg. Segundo Espín Lagos

**Ambato – Ecuador**

**2015**

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

En mi calidad de tutor del trabajo de investigación sobre el tema: “ESTUDIO DE LA ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE FORMA CuAlNi PARA DETERMINAR SU APLICACIÓN INDUSTRIAL”, ejecutado por el señor LUIS ALBERTO URBINA MALDONADO, egresado de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, CERTIFICO que el presente trabajo de investigación reúne los requisitos para ser sometido a la evaluación de jurado examinador designado por el H. Consejo Directivo.

Ambato, 2015

EL TUTOR

.....  
Ing. Mg. Segundo Espín L.

## **AUTORÍA DEL TRABAJO DE GRADO**

Los criterios del trabajo de investigación bajo el tema:

“ESTUDIO DE LA ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE FORMA CuAlNi PARA DETERMINAR SU APLICACIÓN INDUSTRIAL”, como también sus opiniones e ideas, comentarios de resultados y análisis son de exclusiva responsabilidad de mi persona, como autor de este trabajo de grado.

Ambato, 2015

EL AUTOR

.....  
Luis Alberto Urbina Maldonado

180388032-5

## DEDICATORIA

*A mis amados padres Ángel Urbina y Cecilia Maldonado por ser el apoyo constante en mi vida y saber guiarme siempre con inefable amor por el camino del bien.*

*A mi hermano David por brindarme su apoyo y amistad incondicional.*

*A mis abuelitos por todo el cariño y amor que me dieron y dan cada día.*



## AGRADECIMIENTO

*A Dios por darme la vida, salud, sabiduría, fortaleza y paciencia para seguir siempre adelante a pesar de las dificultades.*

*Al Ingeniero Segundo Espín por guiarme con sus conocimientos durante el desarrollo de esta investigación.*

*A todos los docentes que aportaron con su grano de arena para mi formación profesional.*

*A mis amigos por acompañarme siempre en los buenos y malos momentos.*

## ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

### A: PÁGINAS PRELIMINARES

PÁGINA DE TÍTULO.....	I
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	II
AUTORÍA DEL TRABAJO DE GRADO.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XX
RESUMEN.....	XXII
SUMMARY.....	XXIII

### TEXTO

<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. TEMA DE INVESTIGACIÓN .....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.2.1. CONTEXTUALIZACIÓN .....	1
1.2.2. ANÁLISIS CRÍTICO .....	3
1.2.3. PROGNOSIS .....	3
1.2.4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.2.5. PREGUNTAS DIRECTRICES .....	4
1.2.6. DELIMITACIÓN .....	4
1.2.6.1. DELIMITACIÓN DE CONTENIDO .....	4
1.2.6.2. DELIMITACIÓN ESPACIAL .....	4
1.2.6.3. DELIMITACIÓN TEMPORAL.....	5
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.4. OBJETIVOS.....	6

1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	6
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>7</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
2.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS .....	7
2.2. FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA .....	8
2.3. FUNDAMENTACIÓN LEGAL .....	8
2.4. CATEGORÍAS FUNDAMENTALES.....	8
2.4.1. Materiales inteligentes .....	9
2.4.1.1. Clasificación de los materiales inteligentes .....	10
2.4.1.2. Aleaciones con memoria de forma .....	10
2.4.1.3. Transformación martensítica .....	11
2.4.1.4. Efecto memoria de forma.....	14
2.4.1.5. Efecto superelasticidad (SE).....	16
2.4.1.6. Condiciones para SME y SE.....	18
2.4.1.7. Aleaciones con memoria de forma base Cobre.....	19
2.4.1.8. Aleación CuAlNi .....	20
2.4.1.9. Comportamiento mecánico en monocristales vs policristales .....	20
2.4.1.10. Comportamiento en fractura .....	21
2.4.1.11. Propiedades del Cobre, Aluminio y Níquel .....	21
2.4.1.11.1. Cobre.....	21
2.4.1.11.2. Aluminio .....	22
2.4.1.11.2. Níquel.....	22
2.4.1.12. Tensión y deformación en metales .....	23
2.4.1.12.1. Deformación elástica y plástica .....	23
2.4.1.12.2. Ensayo de tracción .....	24
2.4.1.12.3. Esfuerzo y deformación ingenieriles .....	25
2.4.1.12.4. Propiedades obtenidas del ensayo de tensión .....	25
2.4.1.12.5. Resistencia a la Cedencia.....	25
2.4.1.12.6. Resistencia a la tensión .....	26
2.4.1.12.7. Propiedades elásticas .....	27

2.4.1.12.7.1. Módulo de elasticidad o módulo de Young (E).....	27
2.4.1.12.7.2. Módulo de resiliencia.....	28
2.4.1.12.8. Ductilidad.....	28
2.4.1.12.9. Esfuerzo real-deformación real.....	28
2.4.1.12. Dureza.....	29
2.4.1.12.1. Ensayos de dureza.....	30
2.4.1.12.2. Dureza Brinell.....	32
2.4.1.12.3. Dureza Rockwell.....	33
2.4.1.13. Ensayo de impacto.....	34
2.4.2. Procesos de fabricación.....	35
2.4.2.1. Procedimiento de conformación sin pérdida de material. Conformación por fusión y moldeo.....	35
2.4.2.1.1. Técnicas de moldeo.....	39
2.4.2.1.1.1. Moldeo por gravedad.....	39
2.4.2.1.1.2. Moldeo manual en arena.....	39
2.4.2.1.1.3. Materiales empleados para la fabricación de modelos.....	39
2.4.2.1.1.4. Proceso.....	40
2.5. HIPÓTESIS.....	41
2.5.1. UNIDADES DE OBSERVACIÓN.....	41
2.5.2. SEÑALAMIENTO DE VARIABLES DE LA HIPÓTESIS.....	42
2.5.3. TÉRMINO DE RELACIÓN.....	42
<b>CAPITULO III.....</b>	<b>43</b>
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>43</b>
3.1. ENFOQUE.....	43
3.2. MODALIDAD BÁSICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	43
3.2.1. Bibliográfica.....	43
3.2.2. Experimental.....	43
3.3. NIVEL O TIPO DE LA INVESTIGACIÓN.....	43
3.3.1. Exploratorio.....	43
3.3.2. Descriptiva.....	44
3.3.3. Correlacional.....	44

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA .....	44
3.4.1. Población.....	44
3.4.2. Muestra .....	44
3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	46
3.5.1. Variable independiente: .....	46
3.5.2. VARIABLE DEPENDIENTE:.....	47
3.6. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	48
3.7. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS .....	48
3.7.1. Plan de procesamiento de la información .....	48
3.7.2. Plan de análisis e interpretación de resultados.....	48
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>50</b>
<b>4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>50</b>
4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	50
4.1.1. Procedimiento a desarrollarse para el análisis e interpretación de resultados .....	50
4.1.2. Prueba 1 .....	50
4.1.2.1. Análisis químico de la prueba 1 .....	54
4.1.2.2. Análisis metalográfico de la prueba 1 .....	54
4.1.2.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 1 .....	56
4.1.2.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica mediante software .....	57
4.1.2.3. Dureza de la prueba 1 .....	58
4.1.2.3.1. Ensayo de dureza de la prueba 1 .....	59
4.1.2.4. Ensayo de tracción de la prueba 1.....	60
4.1.2.5. Ensayo de impacto de la prueba 1.....	60
4.1.2.6. Comprobación de memoria de forma de la prueba 1 .....	60
4.1.3. Prueba 2 .....	61
4.1.3.1. Análisis químico de la prueba 2.....	63
4.1.3.2. Análisis metalográfico de la prueba 2.....	63
4.1.3.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 2 .....	64
4.1.3.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica mediante software .....	65
4.1.3.3. Dureza de la prueba 2 .....	66

4.1.3.3.1. Ensayo de dureza de la prueba 2.....	66
4.1.3.4. Ensayo de tracción de la prueba 2.....	67
4.1.3.5. Ensayo de impacto de la prueba 2.....	67
4.1.3.6. Comprobación de memoria de forma de la prueba 2.....	67
4.1.4. Prueba 3 .....	69
4.1.4.1. Análisis químico de la prueba 3.....	70
4.1.4.2. Análisis metalográfico de la prueba 3.....	71
4.1.4.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 3 .....	72
4.1.4.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica mediante software .....	73
4.1.4.3. Dureza de la prueba 3 .....	74
4.1.4.3.1. Ensayo de dureza de la prueba 3.....	74
4.1.4.4. Ensayo de tracción de la prueba 3.....	75
4.1.4.5. Ensayo de impacto de la prueba 3.....	75
4.1.4.6. Comprobación de memoria de forma de la prueba 3.....	76
4.1.5. Prueba 4 .....	76
4.1.5.1. Análisis químico de la prueba 4.....	77
4.1.5.2. Análisis metalográfico de la prueba 4.....	78
4.1.5.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 4 .....	79
4.1.5.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica mediante software .....	80
4.1.5.3. Dureza de la prueba 4 .....	81
4.1.5.3.1. Ensayo de dureza de la prueba 4.....	81
4.1.5.4. Ensayo de tracción de la prueba 4.....	82
4.1.5.5. Ensayo de impacto de la prueba 4.....	82
4.1.5.6. Comprobación de memoria de forma de la prueba 4.....	82
4.1.6. Prueba 5 .....	83
4.1.6.1. Análisis químico de la prueba 5.....	84
4.1.6.2. Análisis metalográfico de la prueba 5.....	84
4.1.6.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 5 .....	85
4.1.6.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica mediante software .....	86
4.1.6.3. Dureza de la prueba 5 .....	87
4.1.6.3.1. Ensayo de dureza de la prueba 5.....	87
4.1.6.4. Ensayo de tracción de la prueba 5.....	88

4.1.6.5. Ensayo de impacto de la prueba 5.....	89
4.1.6.6. Comprobación de memoria de forma de la prueba 5.....	89
4.1.7. Prueba 6 .....	89
4.1.7.1. Análisis químico de la prueba 6.....	91
4.1.7.2. Análisis metalográfico de la prueba 6.....	92
4.1.7.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 6 sin temple.....	93
4.1.7.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica sin temple mediante software.....	94
4.1.7.3. Dureza de la prueba 6 sin temple.....	95
4.1.7.3.1. Ensayo de dureza de la prueba 6.....	95
4.1.7.4. Tratamiento térmico de la prueba 6: temple a 900°C.....	96
4.1.7.4.1 Tratamiento térmico de la prueba 6: temple a 900°C por una hora .....	97
4.1.7.4.2 Microestructura metalográfica de la prueba 6 templada.....	98
4.1.7.4.3. Análisis de la microestructura metalográfica templada mediante software.....	99
4.1.7.5. Dureza de la prueba 6 templada.....	100
4.1.7.5.1. Ensayo de dureza de la prueba 6 templada .....	100
4.1.7.6. Ensayo de tracción de la prueba 6.....	101
4.1.7.7. Ensayo de impacto de la prueba 6.....	101
4.1.7.8. Comprobación de memoria de forma de la probeta 6.....	101
4.1.8. Prueba 7 .....	102
4.1.8.1. Análisis químico de la prueba 7.....	103
4.1.8.2. Análisis metalográfico de la prueba 7.....	103
4.1.8.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 7 sin temple.....	104
4.1.8.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica sin temple mediante software.....	105
4.1.8.3. Dureza de la prueba 7 sin temple.....	106
4.1.8.3.1. Ensayo de dureza de la prueba 7.....	106
4.1.8.4. Tratamiento térmico de la prueba 7: temple a 900°C.....	107
4.1.8.4.1 Tratamiento térmico de la prueba 7: temple a 900°C por una hora ...	108
4.1.8.4.2 Microestructura metalográfica de la prueba 7 templada.....	109
4.1.8.4.3. Análisis de la microestructura metalográfica templada mediante software.....	110

4.1.8.5. Dureza de la prueba 7 templada.....	111
4.1.8.5.1. Ensayo de dureza de la prueba 7 templada .....	111
4.1.8.6. Ensayo de tracción de la prueba 7.....	112
4.1.8.7. Ensayo de impacto de la prueba 7.....	112
4.1.8.8. Comprobación de memoria de forma de la probeta 7.....	112
4.1.9. Prueba 8 .....	113
4.1.9.1. Análisis químico de la prueba 8.....	114
4.1.9.2. Análisis metalográfico de la prueba 8.....	114
4.1.9.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 8 sin temple.....	115
4.1.9.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica sin temple mediante software.....	116
4.1.9.3. Dureza de la prueba 8 sin temple .....	117
4.1.9.4. Tratamiento térmico de la prueba 8: temple a 850°C.....	118
4.1.9.4.1 Tratamiento térmico de la prueba 8: temple a 850°C por una hora ...	119
4.1.9.4.2 Microestructura metalográfica de la prueba 8 templada.....	120
4.1.9.4.3. Análisis de la microestructura metalográfica templada mediante software.....	121
4.1.9.5. Dureza de la prueba 8 templada.....	122
4.1.9.5.1. Ensayo de dureza de la prueba 8 templada .....	122
4.1.9.6. Ensayo de tracción de la prueba 8 templada.....	123
4.1.9.6.1 Ensayo de tracción de la prueba 8 templada.....	124
4.1.9.7. Ensayo de impacto de la prueba 8 templada.....	130
4.1.9.8. Comprobación de memoria de forma de la probeta 8.....	131
4.1.9.9. Determinación de la densidad de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi, prueba 8 .....	132
4.2. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	134
4.3. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	144
4.3.1 Análisis estadístico.....	145
4.3.1.1 Distribución t para el porcentaje de elongación de la prueba 8 .....	145
<b>CAPITULO V.....</b>	<b>148</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>148</b>
5.1 CONCLUSIONES .....	148
5.2 RECOMENDACIONES.....	151



<b>CAPITULO VI .....</b>	<b>152</b>
<b>6. PROPUESTA.....</b>	<b>152</b>
6.1 DATOS INFORMATIVOS .....	152
6.2 ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA.....	152
6.3 JUSTIFICACIÓN .....	153
6.4 OBJETIVOS .....	153
6.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	153
6.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	153
6.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD .....	153
6.6 FUNDAMENTACIÓN.....	154
6.7 METODOLOGÍA .....	154
6.7.1 Moldeo manual en arena.....	155
6.7.2 Preparación de la materia prima .....	160
6.7.3 Preparación y ajuste de parámetros del horno de inducción.....	160
6.7.4 Uso del equipo de seguridad y protección personal.....	161
6.7.5 Preparación del crisol.....	161
6.7.6 Carga del horno de inducción .....	162
6.7.7 Fundición del metal base (cobre) y adición del aluminio y níquel .....	162
6.7.8 Homogeneización de la colada .....	164
6.7.9 Vertido de la colada en el molde.....	165
6.7.10 Desmolde .....	166
6.7.11 Mecanizado de probetas.....	166
6.7.12 Temple de probetas .....	169
6.7.13 Ensayos químicos.....	171
6.7.14 Análisis metalográfico .....	172
6.7.15 Ensayos de dureza.....	178
6.7.16 Ensayos de tracción.....	182
6.7.17 Ensayos de impacto.....	184
6.7.18 Determinación de la densidad.....	186
6.7.19 Determinación de la aplicación industrial.....	187
6.8 ADMINISTRACIÓN.....	188
6.9 PREVISIÓN DE LA EVALUACIÓN.....	190

6.10 BIBLIOGRAFÍA .....	191
6.10.1 Libros .....	191
6.10.2 Páginas web.....	192

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Se muestra esquemáticamente en dos dimensiones, la transformación de austenita a martensita. (a) Siendo completamente austenita, (d) completamente martensita. En (c) a medida que la interfase avanza, cada capa de átomos se desplaza solo una pequeña distancia. ....	12
Figura 2. 2 Los dos mecanismos de acomodación a la forma del cambio debido al cortante atómico de la transformación martensítica. En deslizamiento (izquierda), la microestructura es dañada irreversiblemente. En el caso de maclado (derecha), la acomodación es reversible, pero no se pueden alcanzar cambios de volumen sustanciales. ....	13
Figura 2. 3 Forma gráfica de representación de los dos mecanismos de acomodación. ....	13
Figura 2. 4 a) Maclas de deformación, b) Placas de martensita .....	14
Figura 2. 5 Ciclo de temperaturas típico de un material SMA. ....	15
Figura 2. 6 Mecanismos del efecto memoria de forma.....	15
Figura 2. 7 Modelo esquematizado del proceso del efecto de forma. ....	16
Figura 2. 8 Comportamiento típico de una SMA en ensayos de tracción y aplicaciones de doblez: (a) curva tensión-deformación de un material con memoria de forma (martensita), (b) esquema de la aplicación de memoria de forma, (c) curva tensión-deformación de un material súper-elástico (austenita) en tensión, (d) comportamiento súper-elástico en una aplicación de doblez....	17
Figura 2. 9 Zona de superelasticidad en función de esfuerzo y temperatura... ..	18
Figura 2. 10 Máquina Universal para ensayos de tracción. ....	24
Figura 2. 11 Varios tipos de extremos para probetas cilíndricas estándar de tensión.....	24
Figura 2. 12 (a) Determinación de la resistencia a la cedencia con 0,2% de deformación convencional en el hierro colado gris y (b) puntos de cedencia superior e inferior de un acero al bajo carbono. ....	26
Figura 2. 13 Deformación localizada mediante el ensayo de tracción de un material dúctil produciendo una región de encuellamiento. ....	27
Figura 2. 14 Relación entre los diagramas de esfuerzo real-deformación unitaria real y el diagrama esfuerzo-deformación ingenieril. ....	29

Figura 2. 15	Diferentes ensayos para medir dureza.....	31
Figura 2. 16	Esquema básico de un ensayo de dureza Brinell.....	32
Figura 2. 17	Ensayos de dureza Brinell y Rockwell.....	33
Figura 2. 18	El ensayo de impacto: (a) Los ensayos Charpy e Izod, y (b) dimensiones de las probetas típicas. ....	34
Figura 2. 19	Elementos de un molde industrial. ....	36
Figura 2. 20	Etapas del proceso de moldeo. ....	37
Figura 2. 21	Procedimiento general para el moldeo de piezas. ....	38
Figura 4. 1	Horno de inducción, taller de fundición FICM - UTA.....	51
Figura 4. 2	Crisol de grafito DIAMANT/BRASIL A-6 (5 ¼”)......	52
Figura 4. 3	Crisol de grafito cubierto con manta cerámica.....	52
Figura 4. 4	Crisol con aleación en estado líquido dentro de la bobina del horno de inducción.....	53
Figura 4. 5	Probetas obtenidas después de desmoldar.....	54
Figura 4. 6	Microscopio para análisis metalográfico y computador para visualizar imágenes FICM-UTA. ....	55
Figura 4. 7	Probeta 1 para el análisis metalográfico.....	55
Figura 4. 8	Durómetro, Laboratorio de Materiales FICM - UTA.....	58
Figura 4. 9	Probeta 1 utilizada para el ensayo de dureza.....	58
Figura 4. 10	Probeta mecanizada con exceso de poros.....	60
Figura 4. 11	Viruta en forma original (prueba 1). ....	61
Figura 4. 12	Viruta deformada y rota por acción de fuerza externa (prueba 1). ....	61
Figura 4. 13	Probetas obtenidas en la prueba 2. ....	62
Figura 4. 14	Probeta 2 para el análisis metalográfico.....	63
Figura 4. 15	Probeta 2 utilizada para el ensayo de dureza.....	67
Figura 4. 16	Probeta con exceso de poros. ....	67
Figura 4. 17	Viruta en forma original (prueba 2). ....	68
Figura 4. 18	Viruta deformada por acción de fuerza externa (prueba 2).....	68
Figura 4. 19	Probetas de la prueba 3 extraídas del molde de arena. ....	70
Figura 4. 20	Probeta 3 para el análisis metalográfico.....	71
Figura 4. 21	Probeta 3 utilizada para el ensayo de dureza.....	75

Figura 4. 22	Probetas defectuosas extraídas del molde de arena.....	75
Figura 4. 23	Probeta de la prueba 4 extraída del molde de arena.....	77
Figura 4. 24	Probeta 4 para el análisis metalográfico.....	78
Figura 4. 25	Probeta 4 utilizada para el ensayo de dureza.....	82
Figura 4. 26	Probeta defectuosa con poros y rechupes.....	82
Figura 4. 27	Probeta de la prueba 5 extraída del molde de arena.....	84
Figura 4. 28	Probeta 5 para el análisis metalográfico.....	84
Figura 4. 29	Probeta 5 utilizada para el ensayo de dureza.....	88
Figura 4. 30	Identador de cono de diamante para medir dureza Rockwell C..	88
Figura 4. 31	Presencia de poros superficiales en la probeta de la prueba 5.....	89
Figura 4. 32	Probeta colada de la prueba 6.....	91
Figura 4. 33	Probeta 6 para el análisis metalográfico.....	92
Figura 4. 34	Probeta 6 utilizada para el ensayo de dureza.....	96
Figura 4. 35	Identador de esfera de acero de 1/16” utilizado para medir dureza Rockwell B. ....	96
Figura 4. 36	Probeta 6 utilizada para el ensayo de dureza.....	101
Figura 4. 37	Probeta 6 rota al sacarla del horno eléctrico de mufla. ....	101
Figura 4. 38	Probeta 7 utilizada para el ensayo de dureza.....	107
Figura 4. 39	Probeta 7 utilizada para el ensayo de dureza.....	112
Figura 4. 40	Probeta 7 rota al sacarla del horno eléctrico de mufla. ....	112
Figura 4. 41	Probeta 8 sin temprar utilizada para el ensayo de dureza.....	118
Figura 4. 42	Durómetro digital EQUOTIP del Taller Mecánico Industrial CELEC EP – HIDROAGOYÁN.....	118
Figura 4. 43	Probetas de la prueba 8 templadas utilizadas para el ensayo de dureza.....	123
Figura 4. 44	Probetas rotas de la prueba 8 después de realizado el ensayo de tracción.....	123
Figura 4. 45	Viruta deformada por acción de una fuerza externa (prueba 8).	131
Figura 4. 46	Viruta luego de ser calentada. ....	131
Figura 4. 47	Medición de la masa de la muestra. ....	132
Figura 4. 48	Medición del volumen de la muestra. ....	133
Figura 4. 49	Visualización gráfica de los valores de dureza. ....	140

Figura 4. 50 Visualización gráfica de los valores del límite de fluencia de la prueba 8.....	141
Figura 4. 51 Visualización gráfica de los valores de la resistencia ultima a la tracción de la prueba 8. ....	142
Figura 4. 52 Visualización gráfica de los valores del porcentaje de elongación de la prueba 8. ....	142
Figura 4. 53 Visualización gráfica de los valores de la resistencia al impacto de la prueba 8.....	143
Figura 4. 54 Gráfica de la verificación de la hipótesis mediante la distribución t de student. ....	147
Figura 6. 1 Caja para moldeo de arena. ....	155
Figura 6. 2 Preparación de la arena de moldeo.....	156
Figura 6. 3 Distribución de los modelos en la parte inferior de la caja. ....	156
Figura 6. 4 Primera capa de arena fina. ....	157
Figura 6. 5 Llenado de la caja con arena de relleno. ....	157
Figura 6. 6 Apisonado de la arena de relleno. ....	158
Figura 6. 7 Caja llena con arena hasta el mismo nivel del borde. ....	158
Figura 6. 8 Canales de conexión del molde abierto. ....	159
Figura 6. 9 Secado y calentado del molde con soplete. ....	159
Figura 6. 10 Crisol cubierto con manta cerámica. ....	162
Figura 6. 11 Cobre totalmente fundido en el crisol. ....	163
Figura 6. 12 Reacción exotérmica al mezclarse el cobre y el aluminio.....	163
Figura 6. 13 Adición del níquel a la colada. ....	164
Figura 6. 14 Colada agitada con la barra de grafito.....	165
Figura 6. 15 Colada vaciada en el molde abierto.....	165
Figura 6. 16 Lingote listo para ser retirado del molde.....	166
Figura 6. 17 Probeta mecanizada. ....	166
Figura 6. 18 Dimensiones y acabados de probetas cilíndricas para el ensayo de tracción, espécimen 1.....	167
Figura 6. 19 Lingote prismático del que se extrajeron las probetas para el ensayo de impacto.....	168

Figura 6. 20 Dimensiones para el mecanizado de probetas para el ensayo Charpy.....	168
Figura 6. 21 Probetas para ensayo Charpy mecanizadas bajo norma. ....	168
Figura 6. 22 Diagrama de fases Cu – Al.....	169
Figura 6. 23 Temperatura programada en el horno de mufla. ....	170
Figura 6. 24 Probetas calentadas en el horno eléctrico de mufla hasta 850°C. .....	170
Figura 6. 25 Temperatura del agua y enfriamiento de las probetas. ....	171
Figura 6. 26 Muestra para análisis químico.....	171
Figura 6. 27 Probetas cortadas con el Discotom.....	172
Figura 6. 28 Desbaste de probetas en el banco de lijas.....	173
Figura 6. 29 Probetas pulidas en la pulidora de paño. ....	173
Figura 6. 30 Reactivo utilizado para atacar aleaciones de cobre. ....	174
Figura 6. 31 Secado de las probetas luego del ataque químico. ....	174
Figura 6. 32 Microscopio metalográfico conectado a computadora.....	175
Figura 6. 33 Durómetro digital EQUOTIP. ....	178
Figura 6. 34 Probetas lijadas y pulidas para el ensayo de dureza.....	178
Figura 6. 35 Galga de calibración del durómetro digital EQUOTIP.....	179
Figura 6. 36 Durómetro programado para medir dureza en aleaciones de cobre. .....	179
Figura 6. 37 Medición de dureza de la probeta templada.....	180
Figura 6. 38 Ubicación de la probeta en el soporte. ....	184
Figura 6. 39 Martillo del péndulo asegurado en la posición superior.....	184
Figura 6. 40 Medición de la masa en la balanza electrónica. ....	186
Figura 6. 41 Medición del volumen de la muestra. ....	186

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1	Propiedades del cobre, aluminio y níquel.....	23
Tabla 2. 2	Comparación de ensayos de dureza típicos. ....	33
Tabla 2. 3	Porcentaje de los componentes de la arena de moldeo.....	39
Tabla 4. 1	Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 1.....	51
Tabla 4. 2	Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 1.....	53
Tabla 4. 3	Resultado del análisis químico de la prueba 1: porcentaje en peso de los elementos.....	54
Tabla 4. 4	Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 2.....	62
Tabla 4. 5	Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 2.....	62
Tabla 4. 6	Resultado del análisis químico de la prueba 2: porcentaje en peso de los elementos.....	63
Tabla 4. 7	Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 3.....	69
Tabla 4. 8	Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 3.....	69
Tabla 4. 9	Resultado del análisis químico de la prueba 3: porcentaje en peso de los elementos.....	71
Tabla 4. 10	Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 4.....	76
Tabla 4. 11	Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 4.....	77
Tabla 4. 12	Resultado del análisis químico de la prueba 4: porcentaje en peso de los elementos.....	78
Tabla 4. 13	Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 5.....	83
Tabla 4. 14	Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 5.....	83
Tabla 4. 15	Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 6.....	90
Tabla 4. 16	Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 6.....	90
Tabla 4. 17	Resultado del análisis químico de la prueba 6: porcentaje en peso de los elementos.....	91



Tabla 4. 18	Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 7.....	102
Tabla 4. 19	Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 7.....	102
Tabla 4. 20	Resultado del análisis químico de la prueba 7: porcentaje en peso de los elementos.....	103
Tabla 4. 21	Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 8.....	113
Tabla 4. 22	Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 8.....	113
Tabla 4. 23	Resultado del análisis químico de la prueba 8: porcentaje en peso de los elementos.....	114
Tabla 4. 24	Resumen de los elementos aleantes y componentes del análisis químico de cada prueba realizada. ....	134
Tabla 4. 25	Comparación gráfica entre elementos aleantes vs componentes-análisis químico. ....	135
Tabla 4. 26	Microestructuras metalográficas - Tamaño de grano. ....	137
Tabla 4. 27	Valores de dureza de cada prueba. ....	140
Tabla 4. 28	Resumen de resultados obtenidos de la prueba 8 .....	144
Tabla 6. 1	Cantidad de peso en gramos de cada elemento componente de la aleación 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni. ....	160
Tabla 6. 2	Parámetros de funcionamiento del horno de inducción.....	161
Tabla 6. 3	Especificación de dimensiones para mecanizado de probetas para ensayo de tracción, espécimen 1.....	167
Tabla 6. 4	Resultado del análisis químico de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi. ....	172
Tabla 6. 5	Rubros de gastos de recursos materiales. ....	188
Tabla 6. 6	Costos de recursos humanos.....	189
Tabla 6. 7	Tabla de costos de recursos varios.....	189
Tabla 6. 8	Tabla de costos de recursos económicos totales.....	190

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**RESUMEN**

En el presente trabajo de investigación se desarrolló el estudio de la aleación CuAlNi para determinar sus propiedades mecánicas, para lo cual se realizaron ocho pruebas, en cada una de las cuales se realizaron pruebas de fundición y vaciado en moldes de arena, ensayos para determinar la composición química de cada una de ellas, análisis metalográficos, tratamientos térmicos de temple, ensayos de tracción, ensayos de impacto y ensayos para determinar la dureza del material.

Después de analizar e interpretar los resultados obtenidos en todos los ensayos se llegó a la conclusión que la aleación 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni muestra un efecto de memoria de forma, la cual, al ser deformada por una fuerza externa recupera su forma original al aplicarle calor, es decir, es una aleación con memoria de forma térmica.

Finalmente se planteó como propuesta el procedimiento para la fabricación de la aleación inteligente con memoria de forma 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni, y de acuerdo a sus propiedades se propuso una aplicación industrial.

La investigación se llevó a cabo en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional de la ciudad de Quito y en el Taller Mecánico Industrial de CELEC EP Unidad de Negocios HIDROAGOYÁN.

**Palabras clave:** aleación inteligente con memoria de forma, tracción, composición química, impacto, horno de inducción, temple, fundición, análisis metalográfico, dureza.

**TECHNICAL UNIVERSITY OF AMBATO**  
**CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING FACULTY**  
**MECHANICAL ENGINEERING CAREER**

**SUMMARY**

The study of CuAlNi was developed in this research work to determine its mechanical properties, for which eight tests were conducted. For example: smelting and casting on sand molds, tests to determine chemical composition of each one of them, metallographic analysis, quenching, tension tests, impact and hardness tests.

After analyzing and interpreting the obtained results in every test, the conclusion was that 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni alloy shows a shape memory effect, which, when is deformed by an external force, it recovers its original shape under the effect of high temperatures i. e. it is a thermal shape memory alloy.

Finally it was established as a proposal the manufacturing procedure of 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni shape memory alloy, and according to its properties an industrial application was proposed.

The research was developed at the Mechanical Engineering Career Laboratories of the Technical University of Ambato, at the Stresses and Vibration Analysis Laboratory of the National Polytechnical School from Quito and at the Industrial Mechanical Workshop of CELEC EP Unidad de Negocios HIDROAGOYÁN.

**Key words:** shape memory alloy, tension, chemical composition, impact, induction oven, quenching, smelting, metallographic analysis, hardness.

## **CAPÍTULO I**

### **1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. TEMA DE INVESTIGACIÓN**

“ESTUDIO DE LA ALEACIÓN INTELIGENTE CON MEMORIA DE FORMA CuAlNi PARA DETERMINAR SU APLICACIÓN INDUSTRIAL”.

#### **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

##### **1.2.1. CONTEXTUALIZACIÓN**

Debido a sus propiedades especiales, las aleaciones inteligentes con memoria de forma están ocupando un lugar importante en la industria a nivel mundial debido al amplio rango de aplicaciones tecnológicas que éstas poseen comparadas con los materiales tradicionales. Entre las diversas aplicaciones que este tipo de materiales poseen, las más destacadas se encuentran en el área de la medicina, la odontología y las aplicaciones electrónicas, siendo la aleación NiTi (Nitinol) la más conocida y utilizada, especialmente en el campo de la medicina debido a su excelente compatibilidad biológica.

Dichas aleaciones experimentan transformaciones a nivel atómico al estar expuestas a estímulos externos tales como la variación de la temperatura o la aplicación de un campo magnético.

En Escocia, Reino Unido, en el departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad de Edimburgo, Graeme J. Ackland, A.P. Jones y R. Noble-Eddy, en el 2008, desarrollaron simulaciones dinámicas moleculares del proceso de transición de la fase martensítica para la aleación NiTi. Se presentaron simulaciones de la transición de la red cúbica centrada en el cuerpo (BCC) a la red hexagonal compacta (HCP) usando un nuevo potencial para circonio (Zr), el cual, por primera vez, representó apropiadamente la transición de fase. (Graeme, Jones, & Noble, 2008, págs 11-17)

En Barcelona, España, en el departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Politécnica de Catalunya, en el año 2005, Silvia de la Flor López, realizó el estudio sobre simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma. El objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar y adaptar los modelos constitutivos existentes para la caracterización termo mecánica de las aleaciones con memoria de forma de níquel-titanio (Ni-Ti) para permitir su uso en aplicaciones tecnológicas. (de la Flor López, 2005, pág. 14)

En San Carlos de Bariloche, Argentina, en la Universidad Nacional de Cuyo y C.N.E.A., en marzo del 2006, Eugenia Zelaya, estudió la estabilidad de fases bajo irradiación en aleaciones con memoria de forma base Cu, para lo cual se emplearon diferentes tipos de partículas y de energías en los experimentos de dicha irradiación. El primer tipo de irradiación fue llevado a cabo con electrones de 2.6MeV, el segundo con iones de Cu de 170keV y 300keV y el tercero con iones rápidos y pesados con energías entre 200MeV y 600Mev (Kr, Xe, Au) sobre aleaciones de Cu-Zn-Al y Cu-Zn-Al-Ni. (Zelaya, 2006)

En Chile, en agosto del 2008, en la Universidad de Chile, Pablo Cecil Salvador Gibson Torres, estudió la fabricación y caracterización de una aleación con memoria de forma CuZnAl considerada para disipadores sísmicos, cuyo 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 fue base Cu, 16,9 %p.Zn y 7,7 %p.Al, que corresponde a una aleación súper-elástica. Se fabricaron mediante fusión dos aleaciones de CuZnAl, cuyas composiciones resultaron ser: base Cu, 16.6 %p.Zn, 8.7 %p.Al y 0.1 %p.B y base Cu, 17.0 %p.Zn, 7.5 %p.Al y 0.1 %p.B. Para los diámetros de 12.7mm aquí empleados se obtuvo valores y patrones de evolución de parámetros clásicos y súper-elásticos similares a los encontrados por otros autores a menores diámetros en aleaciones similares. (Gibson Torres, 2008)

En Ecuador, en el 2012, en la Universidad Técnica de Ambato, Segundo Manuel Espín Lagos, ejecutó un estudio para obtener una aleación inteligente con memoria de forma

75%Cu - 18.71%Zn - 6.13%Al, calificada como súper-elástica, después de realizados los ensayos químicos, mecánicos y físicos, necesarios para determinar su aplicación industrial. (Espín, 2012)

En nuestro país, hasta el presente momento, no se conoce de ningún estudio realizado sobre materiales inteligentes con memoria de forma CuAlNi, razón por la cual he tomado la iniciativa en realizar ésta investigación, en el Laboratorio de Metalografía de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica, de la Universidad Técnica de Ambato.

### **1.2.2. ANÁLISIS CRÍTICO**

A causa de la reducida investigación y por ende el desconocimiento de las propiedades de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi (Cobre, Aluminio, Níquel) no se ha podido desarrollar nuevos productos y mucho menos aplicaciones industriales para este material en nuestro medio.

A pesar de las extensas aplicaciones que poseen este tipo de aleaciones, aún existen muchas limitaciones que hacen que sea necesario profundizar en el diseño y modernización de los materiales con memoria de forma.

Mediante el planteamiento del tema de investigación se buscó fabricar esta aleación para posteriormente determinar las propiedades mecánicas y de esta manera encontrar nuevas aplicaciones industriales.

Tecnológicamente fue factible la realización de esta investigación ya que los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato cuentan con los equipos necesarios para la elaboración del material y ejecución de todos los ensayos requeridos para este estudio.

### **1.2.3. PROGNOSIS**

En el caso de que no se lleve a cabo la investigación no se conocerá el procedimiento de fabricación adecuado, ni las propiedades mecánicas de la aleación con memoria de forma CuAlNi, limitando de esta manera la competitividad de la industria del país.

No se aportarán conocimientos al área de ingeniería de materiales, ni se sentarán bases con datos reales para futuras investigaciones.

#### **1.2.4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Se podrá mejorar la competitividad de la industria en nuestro medio mediante la determinación de parámetros en el proceso de fabricación y el análisis de las propiedades mecánicas de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi?

#### **1.2.5. PREGUNTAS DIRECTRICES**

- ¿Cuáles serán los parámetros más adecuados del proceso de fundición para la obtención de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi?
- ¿Permitirán las normas ASTM E3, E7-03 y E112 determinar las propiedades metalográficas de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi?
- ¿Permitirán la norma ASTM E8 determinar las propiedades mecánicas de tracción de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi?
- ¿Permitirá las normas ASTM E10 y E18 determinar la dureza Brinell y Rockwell de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi?
- ¿Permitirá la norma ASTM E23 determinar las propiedades mecánicas de impacto de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi?
- ¿Cuál será la composición química más apropiada para la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi?

#### **1.2.6. DELIMITACIÓN**

##### **1.2.6.1. DELIMITACIÓN DE CONTENIDO**

El presente estudio está enfocado a los Procesos de Fabricación, al área de Ciencia e Ingeniería de Materiales, dentro del campo de la Ingeniería Mecánica.

##### **1.2.6.2. DELIMITACIÓN ESPACIAL**

La presente investigación se realizó en los laboratorios de la Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

### **1.2.6.3. DELIMITACIÓN TEMPORAL**

Este proyecto fue ejecutado en el período comprendido entre septiembre del 2013 y febrero del 2014.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

A más de brindar un aporte científico al estudiar los materiales inteligentes con memoria de forma se buscó contribuir al desarrollo del campo metalúrgico del medio debido a que los usos potenciales de estos materiales, especialmente como actuadores, han ampliado el espectro de muchos campos investigativos.

Con el objeto de mejorar las futuras aplicaciones de este tipo de aleaciones, fue necesario prestar una especial atención a los procesos de fabricación, pues en ellos hay contaminantes comunes que pueden, tanto modificar la temperatura de transformación como degradar las propiedades mecánicas de la aleación, por lo que se trató de minimizar su cantidad en la muestra. De este modo, uno de los mayores retos consistió en el desarrollo de procesos de manufactura adecuados que dieron como resultado un material que posee las propiedades y características deseadas para la aplicación en cuestión.

Existió la factibilidad de realizar el estudio ya que los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato cuentan con los instrumentos y equipos necesarios para llevar a cabo la investigación. Los laboratorios disponen de equipos tanto para análisis metalográficos como para la realización de los ensayos necesarios que ayudaron a determinar la variación de las propiedades mecánicas de la aleación.

La originalidad del estudio radica en que ni en el país ni en la provincia existen estudios que evalúen el comportamiento que tiene la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi al variar los porcentajes de cada metal componente utilizando la tecnología de fundición con la cual contamos en el medio.



## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

Estudiar la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi para determinar su aplicación industrial.

### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar los parámetros más adecuados del proceso de fundición para la obtención de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi.
- Determinar las propiedades metalográficas de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi mediante la aplicación de las normas ASTM E3, E7-03 y E112.
- Determinar las propiedades mecánicas de tracción de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi bajo la norma ASTM E8.
- Determinar la dureza Brinell y Rocwell de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi utilizando las normas ASTM E10 y E18.
- Determinar las propiedades mecánicas de impacto de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi bajo la aplicación de la norma ASTM E23.
- Determinar la composición química más apropiada para la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Los primeros pasos en el descubrimiento del efecto memoria de forma tuvieron lugar, según Miyazaki y Otsuka en el año 1932, cuando A. Ölander descubrió el efecto súper-elástico en una aleación AuCd y más tarde, Greninger y Mooradian en 1938, observaron la aparición y desaparición de la fase martensita a medida que crecía y decrecía la temperatura en una aleación CuZn. Posteriormente, Chang y Read explicaron los fundamentos del efecto memoria gobernado por el comportamiento termoelástico de la martensita en 1951, así como también Kurdjumov y Khandros en 1959. Sin embargo, el descubrimiento más importante se realizó en 1962, cuando Buehler y sus colaboradores desarrollaron una aleación de Níquel y Titanio (NiTi) con un efecto de memoria de forma más evidente que el de la aleación AuCd, a la cual denominaron Nitinol por sus siglas en Inglés (Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory). El descubrimiento de Buehler abrió una gran puerta a la investigación en la búsqueda de nuevas aleaciones que presenten propiedades mecánicas similares. (de la Flor López, 2005, págs. 14-15)

Desde entonces se han investigado otras aleaciones que presentan un similar efecto de memoria de forma.

Aun cuando existe un gran número de este tipo de aleaciones, son muy pocas las que tienen un interés comercial. Solo aquellas que presentan una gran capacidad de recobrar tensión o generar una significativa fuerza son de utilidad para aplicaciones industriales. Un ejemplo de éstas son las aleaciones con memoria de forma NiTi y las de base cobre: CuZnAl y CuAlNi.

## **2.2. FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA**

La presente investigación está ubicada en el paradigma crítico - propositivo; crítico porque aportó a una realidad los avances tecnológicos del área de materiales y propositivo porque se buscó plantear una alternativa de solución a la escasa disponibilidad de materiales inteligentes, y aportar con conocimientos de sus propiedades a los ingenieros de diseño, para ampliar su aplicación industrial.

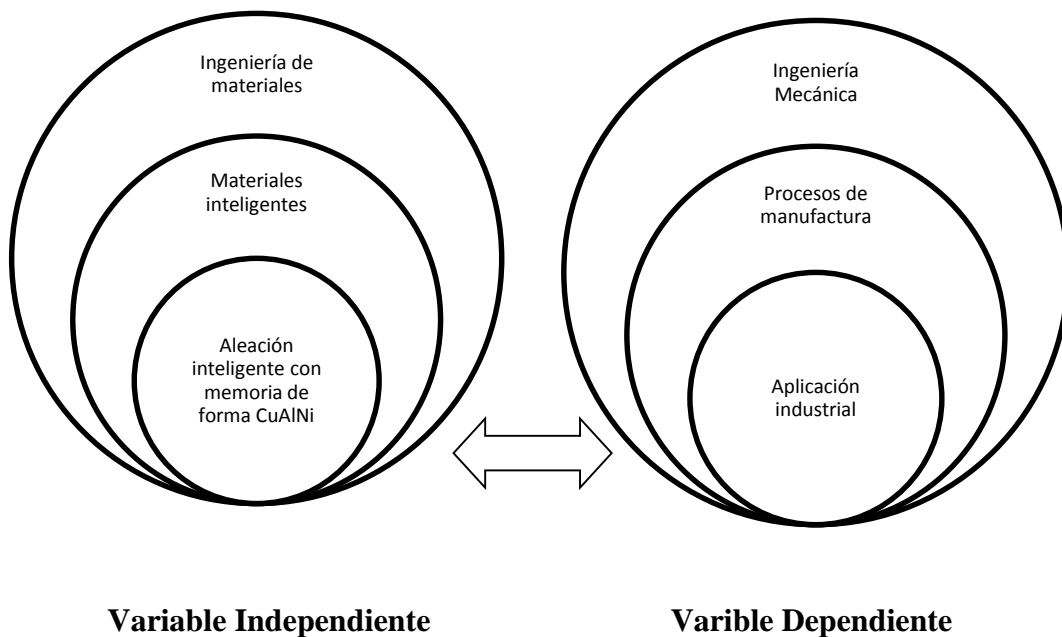
## **2.3. FUNDAMENTACIÓN LEGAL**

El presente estudio se desarrolló basado en las normas técnicas ASTM siguientes:

- ASTM E3: Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens.
- ASTM E7-03: Standard Terminology Related to Metallography.
- ASTM E112: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.
- ASTM E8: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric].
- ASTM E10: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.
- ASTM E18: Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials.
- ASTM E-23. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.

## **2.4. CATEGORÍAS FUNDAMENTALES**

Estudio de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi para determinar su aplicación industrial.



### 2.4.1. Materiales inteligentes

Definidos como materiales cuyas propiedades pueden ser modificadas de manera controlable en respuesta a los cambios producidos en su ambiente, los materiales inteligentes pueden convertir un tipo de energía en otro. Esto permite utilizarlos para ejecutar funciones complejas de sensores y activadores, a veces varias funciones simultáneamente, en un dispositivo que consiste esencialmente en una sola pieza de una sola sustancia.

Lo que todos los materiales inteligentes poseen en común es la capacidad de convertir un tipo de energía en otro. Los materiales piezoeléctricos pueden convertir la energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. Otros materiales inteligentes realizan la conversión entre otros tipos de energía. Una clave para las aplicaciones prácticas es el hecho de que esta conversión puede producirse de manera controlada. Los materiales que manifiestan esta propiedad de responder a los cambios producidos en el ambiente de un modo controlable, se denominan comúnmente materiales inteligentes. (Schwartz, 2002, págs. 921-922)

### **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 (Espín, 2012, págs. 15-16)

### **2.4.1.2. Aleaciones con memoria de forma**

Las aleaciones con memoria de forma, o shape memory alloys (SMA), son aquellos materiales que tienen la capacidad de regresar a su forma original después de haber sufrido una deformación. Dichas aleaciones experimentan transformaciones a nivel atómico al estar expuestas a estímulos externos tales como la variación de la temperatura o la aplicación de un campo magnético.

### **2.4.1.3. Transformación martensítica**

Un sólido lo podemos transformar de un estado a otro por transformación de difusión y por transformación de desplazamiento. La de difusión son aquellas en las que solo podemos formar otra fase distinta moviendo átomos aleatoriamente a distancias grandes. Como se parte de una matriz químicamente diferente, necesitaremos una difusión muy amplia. Las variables más relevantes son el tiempo y la temperatura debido a esta necesidad de difusión amplia.

Un sólido lo podemos transformar de un estado a otro por transformación de difusión y por transformación de desplazamiento. La de difusión son aquellas en las que solo podemos formar otra fase distinta moviendo átomos aleatoriamente a distancias grandes. Como se parte de una matriz químicamente diferente, necesitaremos una difusión muy amplia. Las variables más relevantes son el tiempo y la temperatura debido a esta necesidad de difusión amplia.

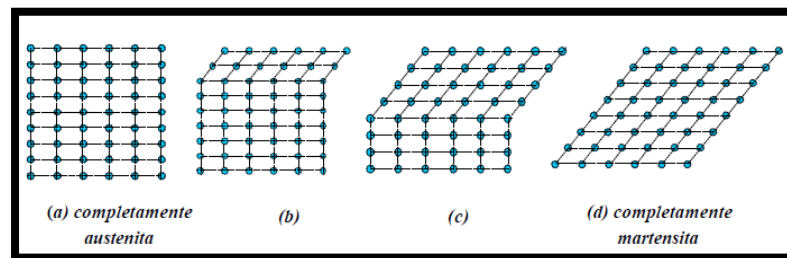
En la transformación de desplazamiento se mantiene la estructura química del material de partida inicial pero con distinta estructura cristalina, o sea que a través de movimientos de los átomos estos se reordenan. No dependen del tiempo, solamente de la temperatura. El movimiento de la interfase entre las dos fases es muy rápido. Las transformaciones martensíticas son normalmente de esta índole (transformaciones de desplazamiento) y aparecen por enfriamiento desde la fase origen que es austenita. Estas transformaciones no dependen de la difusión y se mantiene la relación de orientación entre la fase madre y la martensítica. Son transformaciones de primer orden ya que se libera calor en su formación, hay histéresis asociada a esa transformación y hay un rango de temperaturas en el que coexisten austenita y martensita. Es decir que al enfriar la austenita se forma martensita independientemente del tiempo pero si dependiendo de la temperatura que va bajando. Y esta transformación carece de difusión.

Para explicar la transformación de austenita a martensita nos fijamos en el punto de vista cristalográfico donde vamos a encontrar que se da:

1.- Deformación de la red cristalina con todos los movimientos necesarios de los átomos para crear la nueva estructura. Figura 2.1 donde la zona (a) es la austenita a la

transformación a martensita se produce desde la zona (b) a la zona (d). La unión de muchos pequeños desplazamientos coordinados de átomos consecutivos produce la martensita.

2.- La segunda parte de la transformación martensítica, llamada cizalladura invariante de la red, es un paso de acomodación: la estructura martensítica producida por el paso anterior es de diferente forma, y frecuentemente volumen, que la austenita circundante. La martensita de los aceros implica un cambio de volumen y forma, mientras que las aleaciones con memoria de forma, como por ejemplo Ni-Ti, básicamente tienen solo cambio de forma.

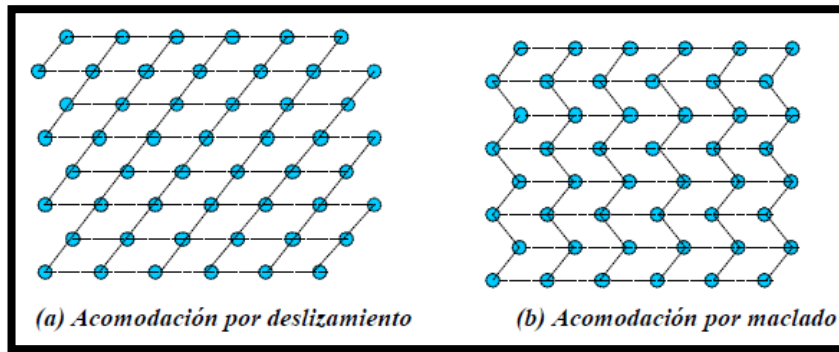


*Figura 2.1 Se muestra esquemáticamente en dos dimensiones, la transformación de austenita a martensita. (a) Siendo completamente austenita, (d) completamente martensita. En (c) a medida que la interfase avanza, cada capa de átomos se desplaza solo una pequeña distancia.*

*Fuente: (de la Flor, 2005, pág. 17)*

Tanto la nueva fase como la austenita que aun la rodea, deben ser alteradas para fijarse bien en la configuración recién adquirida. Esta acomodación se hace por deslizamiento o por maclado como podemos observar en la figura 2.2 (a) y en la figura 2.2 (b) respectivamente.

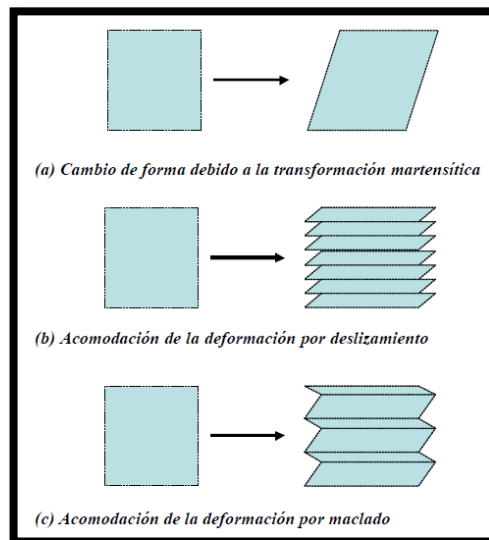
Vemos que cada celda individual o paralelogramo tiene una nueva estructura martensítica pero la forma en conjunto sigue manteniendo la de la austenita inicial. El problema del maclado es que no puede acomodar cambios de volumen, pero si puede con los cambios de forma de manera reversible. Estas acomodaciones por deslizamiento y por maclado deben darse de forma reversible para que el efecto de memoria de forma ocurra. El deslizamiento suele ser algo permanente por lo que el maclado será la vía principal que usarán las aleaciones inteligentes para recuperar su forma.



*Figura 2.2 Los dos mecanismos de acomodación a la forma del cambio debido al cortante atómico de la transformación martensítica. En deslizamiento (izquierda), la microestructura es dañada irreversiblemente. En el caso de maclado (derecha), la acomodación es reversible, pero no se pueden alcanzar cambios de volumen sustanciales.*

*Fuente: (de la Flor, 2005, pág. 18)*

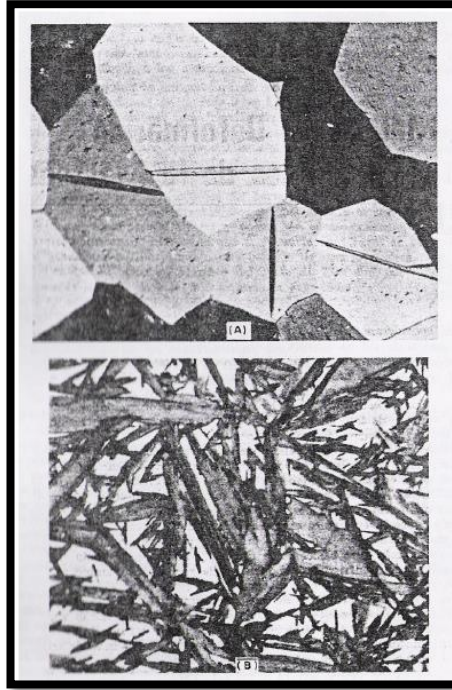
En la figura 2.3 podemos apreciar que se recupera la forma principal usando tan solo dos direcciones de cizalladura. Entonces gracias al mecanismo de formación de placas monocristales que son coherentes con el estado inicial en el proceso de la cizalladura se consigue dar el cambio martensítico. (de la Flor López, 2005, págs. 15-18)



*Figura 2.3 Forma gráfica de representación de los dos mecanismos de acomodación.*

*Fuente: (de la Flor, 2005, pág. 18)*





*Figura 2. 4 a) Maclas de deformación, b) Placas de martensita*

*Fuente: (Gibson Torres, 2008, pág. 5)*

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.

#### **2.4.1.4. 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.

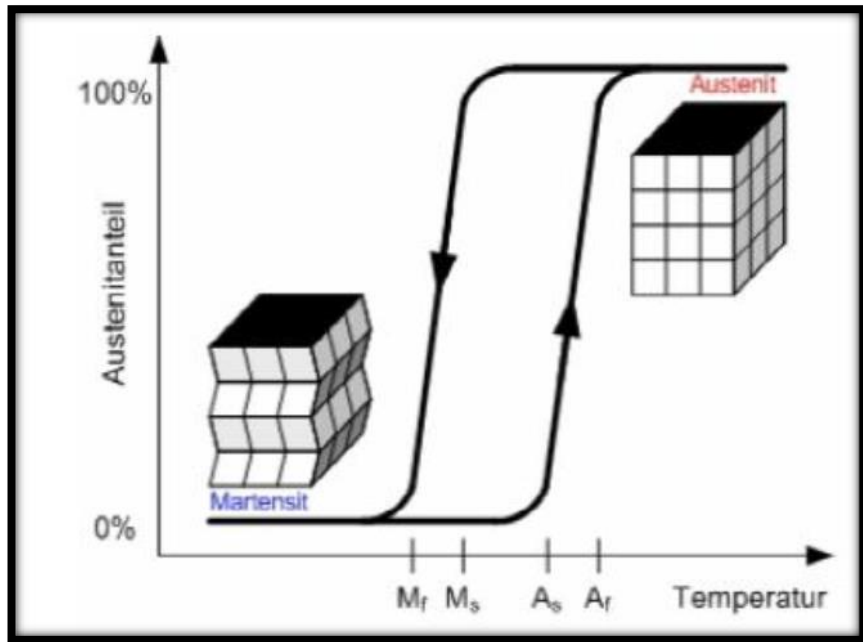


Figura 2.5 Ciclo de temperaturas típico de un material SMA.

Fuente: (Otsuka & Wayman, 1998).

Dependiendo del régimen de temperatura, el mecanismo del SME es ligeramente diferente, dicho mecanismo es esquematizado en la Figura 2.6.

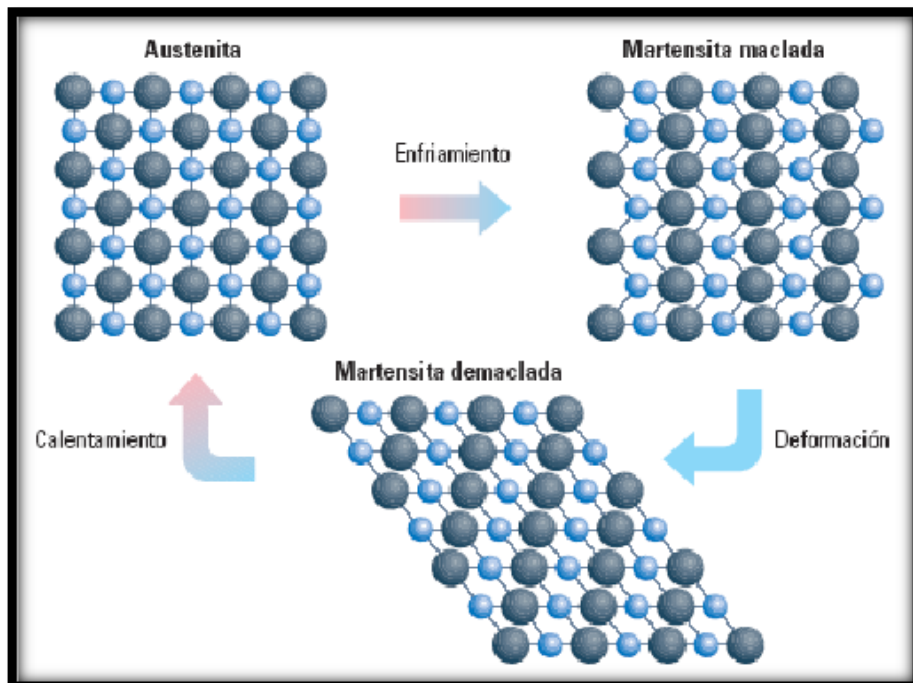


Figura 2.6 Mecanismos del efecto memoria de forma.

Fuente: (Rashmi Bhavsar, Nitim Vaidya y otros. 2008)

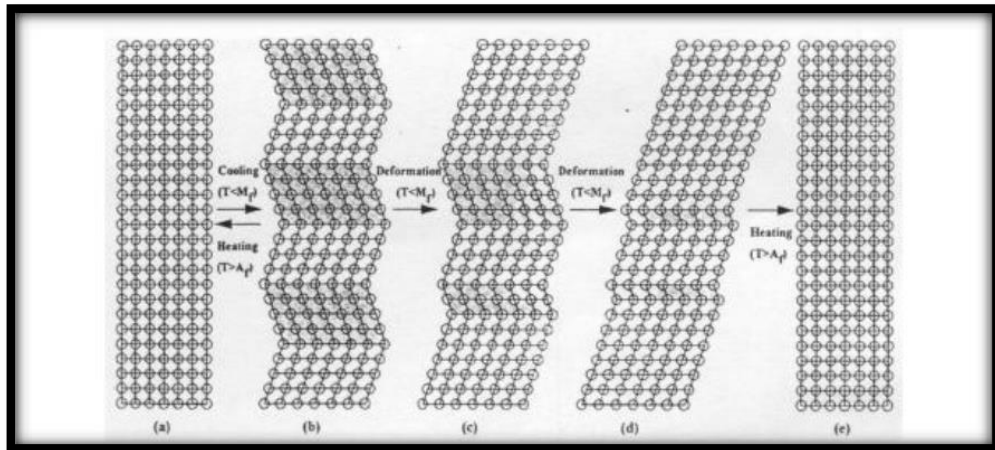


Figura 2.7 Modelo esquematizado del proceso del efecto de forma.

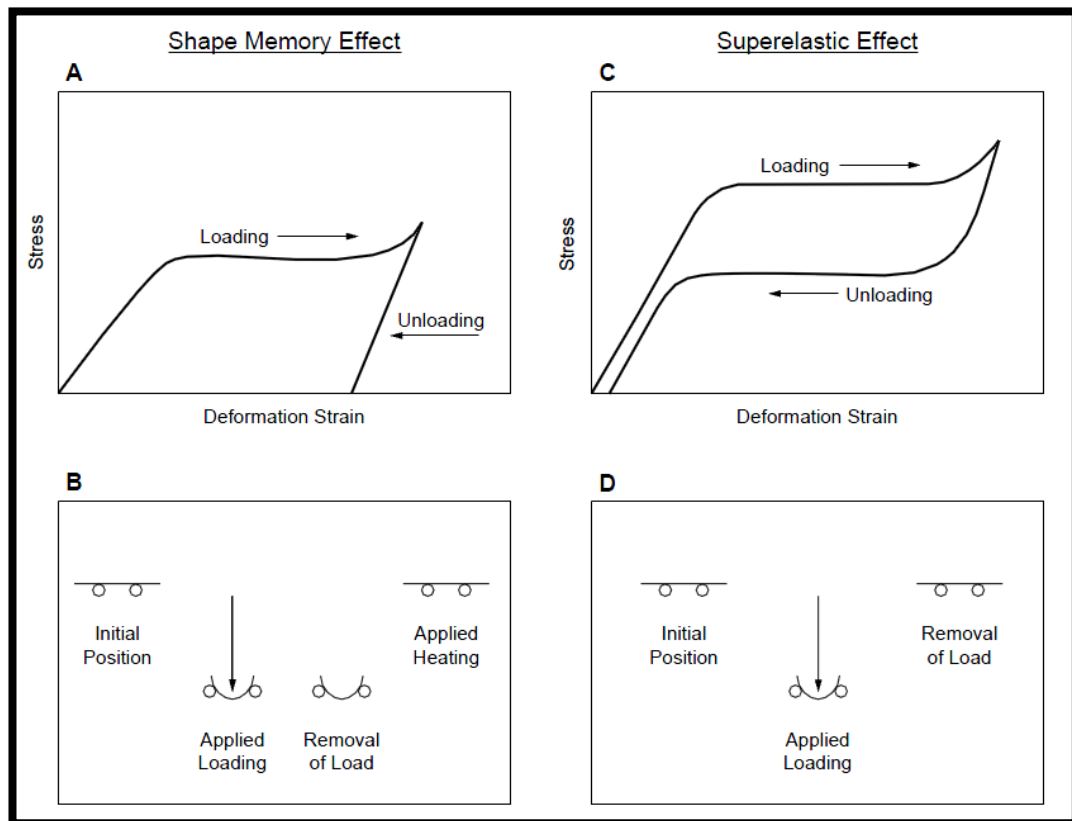
Fuente: (Otsuka & Wayman, 1998)

En la Figura 2.7 es posible observar un monocristal 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. (Espín, 2012, págs. 16-17)

#### 2.4.1.5. Efecto 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 8C. (Espín, 2012, págs. 17-18)



**Figura 2. 8 Comportamiento típico de una SMA en ensayos de tracción y aplicaciones de doblez: (a) curva tensión-deformación de un material con memoria de forma (martensita), (b) esquema de la aplicación de memoria de forma, (c) curva tensión-deformación de un material súper-elástico (austenita) en tensión, (d) comportamiento súper-elástico en una aplicación de doblez.**

*Fuente: (Schwartz, 2002, pág. 922)*

#### 2.4.1.6. Condiciones para SME y SE

Existe una relación entre SME y SE que se muestra en la Figura 2.9, 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.

En la Figura 2.9 se observa que SME ocurre bajo  $A_s$  (con posterior calentamiento sobre  $A_f$ ) y SE sucede sobre  $A_f$ , donde la martensita es totalmente inestable ante la ausencia de esfuerzo.

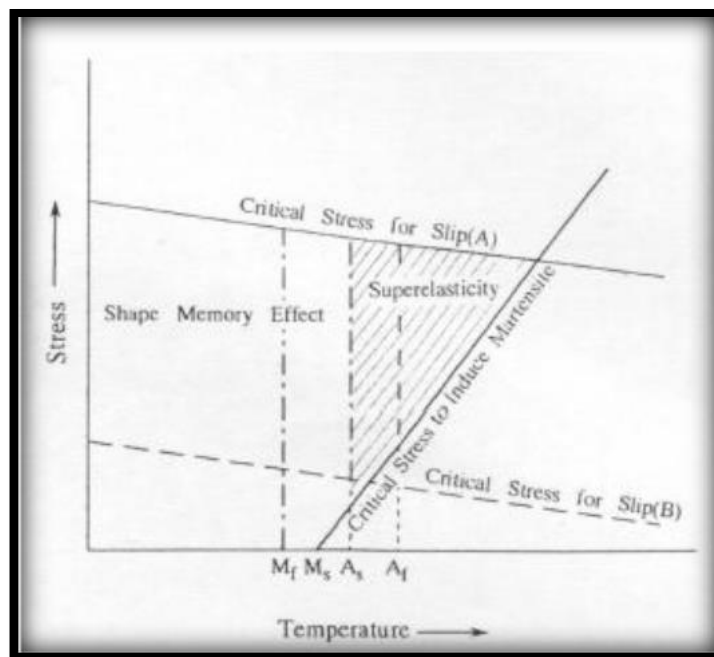


Figura 2. 9 Zona de superelasticidad en función de esfuerzo y temperatura.

Fuente: (Otsuka y Ren, 2004, pág. 589)

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.

Por lo expuesto anteriormente se espera 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. (Espín, 2012, págs. 20-21)

#### **2.4.1.7. Aleaciones con memoria de forma base Cobre**

Las aleaciones con memoria de forma base Cobre se derivan de los sistemas binarios CuZn, CuAl y CuSn. El rango de composición de estas aleaciones corresponde a la bien conocida fase  $\beta$ -Hume –Rothery. Sin embargo, las aleaciones con memoria de forma base Cobre más usadas actualmente son derivadas de los sistemas CuZn y CuAl, y se añaden otros elementos ternarios por varias razones metalúrgicas, como por ejemplo, para aumentar la temperatura de cambio de fase  $M_s$  y estabilizar la fase  $\beta$ .

Se conocen distintos elementos que pueden actuar como componentes ternarios y cuaternarios que junto a modificar las temperaturas de transformación sirven para afinar el grano. Ejemplo de estos elementos que son posibles de agregar en las aleaciones SMA, CuAl y CuZn son: Ni, Si, Be para modificar temperaturas de transformación, y Ti, Zr y B para afinar el tamaño de grano.

Estas aleaciones tienen algunas ventajas en comparación con las de NiTi, por ejemplo en conductividad eléctrica, conductividad térmica y deformabilidad, además de ser menos costosas.

Cabe destacar que 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. (Espín, 2012, págs. 21-23)

#### **2.4.1.8. Aleación CuAlNi**

Dado su bajo costo, facilidad de procesado y buenas propiedades de memoria de forma, las aleaciones de CuAlNi son adecuadas para su utilización entre 100 °C y 240 °C. Sin embargo, debido a su alta anisotropía elástica ( $A \approx 13$ ) y gran tamaño de grano, son frágiles y presentan pobres propiedades mecánicas. El método tradicional para obtener un tamaño de grano pequeño, con la consecuente mejora de propiedades mecánicas, es la adición de un cuarto elemento como afinador de grano, tales como el circonio, el titanio o el boro que presentan, no obstante, el inconveniente de afectar al comportamiento de la transformación martensítica.

Sin embargo, se han desarrollado métodos alternativos para obtener aleaciones con grano pequeño ( $<100 \mu\text{m}$ ), tales como la solidificación rápida y la pulvimetalurgia. (Pérez, y otros, 1998, pág. 329)

Las temperaturas características de la transformación martensítica de las aleaciones CuAlNi pueden encontrarse entre -200 y 200°C dependiendo del contenido de Al y Ni; la influencia del aluminio es más fuerte.

Las propiedades de memoria de forma de la aleación CuAlNi se basan en las propiedades de la fase de alta temperatura  $\beta$  de la aleación binaria CuAl, teniendo la estructura cúbica centrada en el cuerpo (BBC). El níquel en aleaciones ternarias reduce eficientemente la velocidad de difusión del cobre y aluminio. Con el incremento del contenido de Ni, aumenta la fragilidad de la aleación y el punto eutectoide se desplaza a mayores contenidos de aluminio. Por lo tanto, algunos investigadores coinciden en que la óptima composición química de la aleación con memoria de forma CuAlNi es de alrededor del 13%Al y 3-4,5%Ni en peso. Con el fin de garantizar el subenfriamiento necesario para hacer cumplir la transformación martensítica, en general, un tratamiento térmico es inevitable. Consiste en un recocido en el intervalo de temperatura de la fase estable  $\beta$  y consecuentemente de un temple al agua (temple  $\beta$ ). (Kneissl, y otros, pág. 92)

#### **2.4.1.9. 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. (Espín, 2012, pág. 26)

#### **2.4.1.10. 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 a 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. (Espín, 2012, pág. 27)

#### **2.4.1.11. Propiedades del Cobre, Aluminio y Níquel**

##### **2.4.1.11.1. Cobre**

Los metales de transición, también llamados elementos de transición es el grupo al que pertenece el cobre. En este grupo de elementos químicos al que pertenece este elemento, se encuentran aquellos situados en la parte central de la tabla periódica, concretamente en el bloque d. Entre las características que tiene el cobre, así como las del resto de metales de transición se encuentra la de incluir en su configuración electrónica el orbital d, parcialmente lleno de electrones. Propiedades de este tipo de metales, entre los que se encuentra el cobre son su elevada dureza, el tener puntos de ebullición y fusión elevados y ser buenos conductores de la electricidad y el calor.



El estado del cobre en su forma natural es sólido (diamagnético). El cobre es un elemento químico de aspecto metálico, rojizo y pertenece al grupo de los metales de transición. El número atómico del cobre es 29. El símbolo químico del cobre es Cu. El punto de fusión del cobre es de 1357.77 grados Kelvin o de 1084.62 grados Celsius. El punto de ebullición del cobre es de 3200 grados Kelvin o de 2926.85 grados Celsius. (Callón, 2002)

#### **2.4.1.11.2. Aluminio**

El aluminio pertenece al grupo de elementos metálicos conocidos como metales del bloque p que están situados junto a los metaloides o semimetales en la tabla periódica. Este tipo de elementos tienden a ser blandos y presentan puntos de fusión bajos, propiedades que también se pueden atribuir al aluminio, dado que forma parte de este grupo de elementos.

El estado del aluminio en su forma natural es sólido. El aluminio es un elemento químico de aspecto plateado y pertenece al grupo de los metales del bloque p. El número atómico del aluminio es 13. El símbolo químico del aluminio es Al. El punto de fusión del aluminio es de 933.47 grados Kelvin o de 660.32 grados Celsius. El punto de ebullición del aluminio es de 2792 grados Kelvin o de 2518.85 grados Celsius. (Callón, 2002)

#### **2.4.1.11.2. Níquel**

Los metales de transición, también llamados elementos de transición es el grupo al que pertenece el níquel. En este grupo de elementos químicos al que pertenece el níquel, se encuentran aquellos situados en la parte central de la tabla periódica, concretamente en el bloque d. Entre las características que tiene el níquel, así como las del resto de metales de transición se encuentra la de incluir en su configuración electrónica el orbital d, parcialmente lleno de electrones. Propiedades de este tipo de metales, entre los que se encuentra el níquel son su elevada dureza, el tener puntos de ebullición y fusión elevados y ser buenos conductores de la electricidad y el calor.

El estado del níquel en su forma natural es sólido (ferromagnético). El níquel es un elemento químico de aspecto lustroso metálico y pertenece al grupo de los metales de transición. El número atómico del níquel es 28. El símbolo químico del níquel es Ni.

El punto de fusión del níquel es de 1726.15 grados Kelvin o de 1453 grados Celsius. El punto de ebullición del níquel es de 3003.15 grados Kelvin o de 2730 grados Celsius. (Callón, 2002)

**Tabla 2. 1 Propiedades del cobre, aluminio y níquel.**

<b>PROPIEDADES</b>	<b>Cobre</b>	<b>Aluminio</b>	<b>Níquel</b>
Símbolo	Cu	Al	Ni
Número atómico	29	13	28
Peso molecular [gr/mol]	63,54	26,9815	58,71
Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]	8,96	2,70	8,9
Radio atómico [Å]	1,28	1,43	1,24
Estructura cristalina	FCC	FCC	FCC
Electronegatividad de Pauling	1,9	1.5	1.8
Punto de fusión [°C]	1084,62	660,32	1453
Punto de ebullición [°C]	2926,85	2518,85	2730
Módulo de elasticidad [GPa]	110-120	70	205
Conductividad eléctrica [S/m]	58,108*10 <sup>6</sup>	37,7*10 <sup>6</sup>	14,3*10 <sup>6</sup>
Conductividad térmica [W/(K*m)]	400	237	90,7
Calor específico [J/(K*kg)]	385	920	440

*Fuente: (Recuperado de <http://elementos.org.es>)*

#### **2.4.1.12. Tensión y deformación en metales**

##### **2.4.1.12.1. Deformación elástica y plástica**

Un material sometido a una tensión (fuerza) produce una deformación del mismo. Si al cesar la fuerza el material vuelve a sus dimensiones primitivas, diremos que ha experimentado una deformación elástica. Si la deformación es tal que no recupera por completo sus medidas originales es una deformación plástica.

### 2.4.1.12.2. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción mide la resistencia de un material a una fuerza estática o gradualmente aplicada. Se lo realiza en la Máquina Universal para ensayos de tracción (figura 2.10) aplicando la Norma ASTM E8.



Figura 2. 10 Máquina Universal para ensayos de tracción.

Fuente: (cortesía FICM-UTA)

Una probeta típica tiene un diámetro de 0.505pulg y una longitud calibrada de 2pulg. La probeta se coloca en la máquina de pruebas y se la aplica una fuerza  $F$ , que se conoce como carga. Para medir el alargamiento del material causado por la aplicación de fuerza en la longitud calibrada se utiliza un extensómetro. (Askeland, 2004, pág. 240)

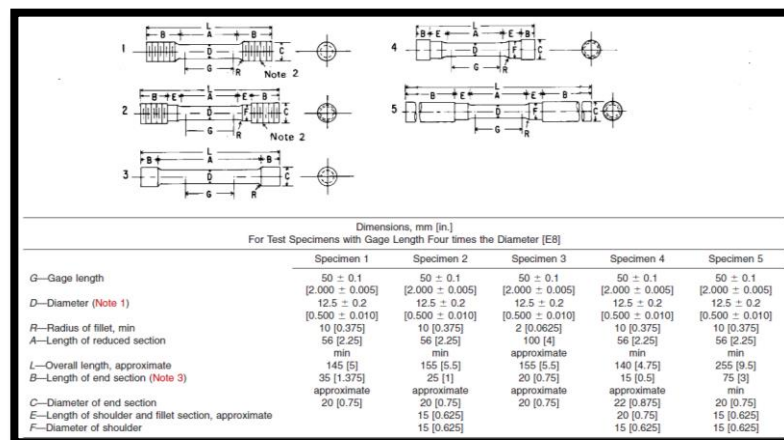


Figura 2. 11 Varios tipos de extremos para probetas cilíndricas estándar de tensión.

Fuente: (Norma ASTM E8/E8M – 09, pág. 7)

### 2.4.1.12.3. Esfuerzo y deformación ingenieriles

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 definen a través de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Esfuerzo ingenieril} = \sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$\text{Deformación ingenieril} = \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad \text{Ec. (2)}$$

Dónde:  $A_0$  es el área original de la sección transversal de la probeta antes de iniciarse el ensayo,  $l_0$  es la distancia original entre marcas calibradas y  $l$  es la distancia entre las mismas, después de haberse aplicado la fuerza  $F$ . (Askeland, 2004, pág. 242)

### 2.4.1.12.4. 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.

### 2.4.1.12.5. Resistencia a la Cedencia

Un material muestra primero una deformación elástica al ser sometido a un esfuerzo. Al eliminar el esfuerzo aplicado la deformación desaparece por completo. Sin embargo, si el esfuerzo sigue aumentando el material experimenta una deformación tanto elástica como plástica para finalmente ceder a la carga aplicada. El valor crítico del esfuerzo necesario para iniciar la deformación plástica se llama límite elástico del material. En los metales, es por lo general el esfuerzo requerido para que las dislocaciones se deslicen. El límite de proporcionalidad se define como el valor del esfuerzo arriba del cual la relación entre esfuerzo y deformación ingenieriles no es lineal.

En la mayoría de materiales, el límite elástico y el límite de proporcionalidad están bastante cercanos. Sin embargo, ni el valor del límite elástico ni el del límite de proporcionalidad se pueden determinar con precisión. Los valores medidos dependen de la sensibilidad del equipo. En consecuencia, se define un valor convencional de

deformación plástica (normalmente 0,002 o 0,2% pero no siempre). A continuación se traza una recta comenzando en este valor desplazado, paralela a la parte lineal de la curva esfuerzo-deformación ingenieril. El valor de esfuerzo que corresponde al cruce de esta recta y la curva de esfuerzo-deformación ingenieril se define como la resistencia a la cedencia y el procedimiento que se ha descrito para determinarlo se le conoce como criterio “offset” o de deformación plástica convencional. En la figura 2.12 (a) se muestra la resistencia de cedencia al 0,2% de deformación convencional del hierro colado gris, que es de 40000psi. En ingeniería, para fines de diseño, se prefiere usar el esfuerzo de cedencia.

En algunos materiales, la transición de deformación elástica a flujo plástico es abrupta. Esa transición se llama fenómeno de punto de fluencia. En esos materiales, al comenzar la deformación plástica, el valor del esfuerzo baja primero desde el punto de fluencia superior ( $\sigma_2$ ), figura 2.12 (b). El valor del esfuerzo sigue decreciendo y oscila en torno a un valor promedio que se define como punto de fluencia inferior ( $\sigma_1$ ). (Askeland, 2004, pág. 245)

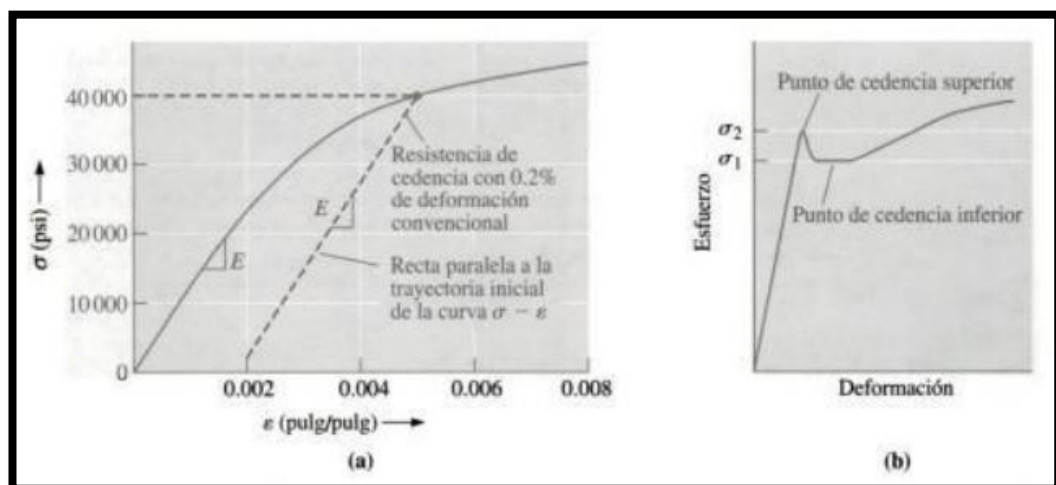


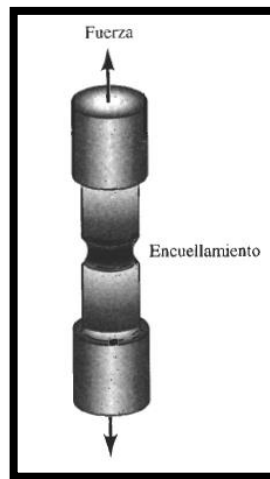
Figura 2. 12 (a) Determinación de la resistencia a la cedencia con 0,2% de deformación convencional en el hierro colado gris y (b) puntos de cedencia superior e inferior de un acero al bajo carbono.

Fuente: (Askeland.2004, pág 246)

#### 2.4.1.12.6. Resistencia a la tensión

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. Dado que el área de la sección transversal en este punto se hace más pequeña, se requiere una fuerza menor para continuar su deformación, y se reduce el esfuerzo ingenieril, calculado a partir del área original  $A_0$ . La resistencia a la tensión es el esfuerzo al cual se inicia este encuellamiento o estricción en materiales dúctiles, como se indica en la figura 2.13.



*Figura 2. 13 Deformación localizada mediante el ensayo de tracción de un material dúctil produciendo una región de encuellamiento.*

*Fuente: (Askeland, 1998, pág. 135)*

#### **2.4.1.12.7. Propiedades elásticas**

##### **2.4.1.12.7.1. 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, expresada mediante la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:  $E$  = módulo de elasticidad,  $\sigma$  = esfuerzo y  $\varepsilon$  = deformación.

El módulo de elasticidad es una medida de la rigidez del material. Un material rígido, con un alto módulo de elasticidad, conserva su tamaño y su forma incluso al ser sometido a una carga en la región elástica.

#### 2.4.1.12.7.2. Módulo de resiliencia

El módulo de resiliencia ( $E_r$ ), que es el área que aparece bajo la porción elástica de la curva esfuerzo-deformación, es la energía elástica que un material absorbe o libera durante la aplicación y liberación de la carga aplicada respectivamente. En el caso de un comportamiento elástico lineal: (Askeland, 2004, págs. 247-250)

$$E_r = \left(\frac{1}{2}\right) (\text{esfuerzo de cedencia})(\text{deformación a la cedencia}) \quad \text{Ec. (4)}$$

#### 2.4.1.12.8. Ductilidad

La ductilidad mide el grado de deformación que puede soportar un material sin romperse. Se puede medir la distancia entre las marcas calibradas en una probeta antes y después del ensayo. El % de elongación representa la distancia que la probeta se alarga plásticamente antes de la fractura:

$$\% \text{ de elongación} = \frac{l_f - l_o}{l_o} * 100 \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde:  $l_f$  es la distancia entre las marcas calibradas después de la ruptura del material y  $l_o$  es la distancia entre las marcas calibradas antes de iniciar el ensayo.

Un segundo método es calcular el cambio porcentual en el área de la sección transversal en el punto de fractura antes y después del ensayo. El % de reducción en área expresa el adelgazamiento sufrido por el material durante la prueba:

$$\% \text{ de reducción en área} = \frac{A_o - A_f}{A_o} * 100 \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde:  $A_f$  es el área de la sección transversal en la superficie de la fractura. (Askeland, 2004, pág. 250)

#### 2.4.1.12.9. Esfuerzo real-deformación real

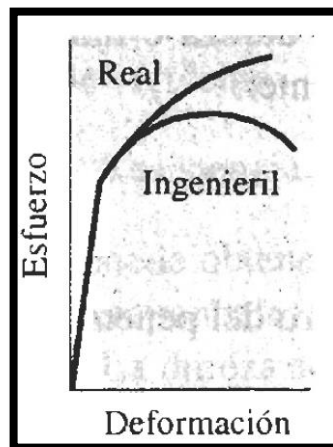
La reducción en el esfuerzo, más allá de la resistencia a la tensión ocurre en razón a nuestra definición de esfuerzo ingenieril. Se utilizó el área original  $A_o$  en los cálculos, pero esto no es correcto, porque dicha área se modifica continuamente. Se definen esfuerzo real y deformación real mediante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

$$\text{Esfuerzo real} = \sigma_r = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. (7)}$$

$$\text{Deformación real} = \int \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:  $A$  es el área real a la cual se le aplica la fuerza  $F$ . La expresión  $\ln\left(\frac{A_0}{A}\right)$  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 2.14. 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 requerido. (Askeland, 2004, págs. 252-253)



*Figura 2.14 Relación entre los diagramas de esfuerzo real-deformación unitaria real y el diagrama esfuerzo-deformación ingenieril.*

*Fuente: (Askeland, 2004, pág. 253)*

#### **2.4.1.12. Dureza**

La dureza es una condición de la superficie del material, no representa ninguna propiedad de la materia y está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas del



material. Si bien, es un término que nos da idea de solidez o firmeza, no existe una definición única acerca la dureza y se la suele definir arbitrariamente en relación al método particular que se utiliza para la determinación de su valor. De esta manera algunas definiciones son:

1. Resistencia a la indentación permanente bajo cargas estáticas o dinámicas (dureza por penetración).
2. Absorción de energía bajo cargas de impacto o dinámicas (dureza por rebote)
3. Resistencia a la abrasión (dureza por desgaste)
4. Resistencia al rayado (dureza por rayado).

Independientemente de las definiciones enumeradas, en general, se entiende por dureza la propiedad que tienen los materiales de resistir la penetración de un indentador bajo carga. En este sentido definiremos dureza como la resistencia de un material a la deformación plástica localizada. (Recuperado de: <http://190.105.160.51/~material/materiales/presentaciones/ApunteDureza.pdf>, s.f.)

#### **2.4.1.12.1. Ensayos de dureza**

Los diferentes métodos desarrollados para medir la dureza en general consisten en producir una deformación local, en el material que se ensaya, a través de un indentador. Los valores obtenidos son siempre dependientes del método y las condiciones en las que se ensaya por lo que para que un valor de dureza sea útil y permita su comparación debe estar acompañado de la indicación del método utilizado y las condiciones del ensayo.

Los diferentes métodos utilizados para obtener los valores de dureza se pueden clasificar en dos grandes grupos según la forma de aplicación de la carga:

- Ensayos estáticos en lo que la carga se aplica en forma estática o cuasi-estática. En este caso un indentador se presiona contra la superficie de ensayo con una carga que se aplica en forma relativamente lenta. En general la medida de dureza en este tipo de ensayo resulta del cociente de la carga aplicada y el área de la huella que deja el indentador en la superficie, como es el caso de los método Brinell, Vickers y Knoop, o bien es una medida de la profundidad de la indentación como en el ensayo Rockwell.

➤ Ensayos dinámicos en los que la carga se aplica en forma de impacto. En general el indentador es lanzado sobre la superficie a ensayar con energía conocida y el valor de dureza se obtiene a partir de la energía de rebote del penetrador luego de impactar en la muestra, como sucede en el método de Shore y en el de Leeb, ambos conocidos como métodos de dureza por rebote. Si bien se pueden clasificar en este grupo métodos como el de Poldi, o uno mucho más moderno como el UCI Ultrasonic Contact Impedance, los de rebote son los más representativos de los ensayos dinámicos de dureza. En los ensayos dinámicos los resultados obtenidos son dependientes de las propiedades elásticas del material que se ensaya y en general los valores son comparables entre materiales en los que dichas propiedades son iguales, o bien se requiere la calibración del instrumento antes de ensayar un material cuyo módulo elástico es desconocido.

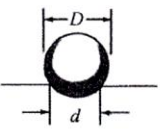

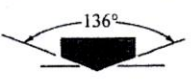

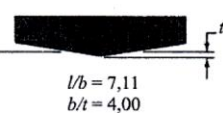
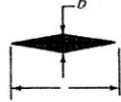
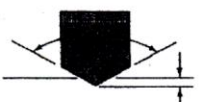





Forma de penetración					
Ensayo	Penetrador	Vista lateral	Vista en planta	Carga	Fórmula para el índice de dureza
Brinell	Esfera de 10 mm de acero o carburo de wolframio			$P$	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pirámide de diamante			$P$	$VHN = \frac{1,72P}{d_1^2}$
Microdureza de Knoop	Pirámide de diamante			$P$	$KHN = \frac{14,2P}{l^2}$
Rockwell					
A } C } D }	Cono de diamante			60 kg $R_A =$ 150 kg $R_C =$ 100 kg $R_D =$	100-500t
B } F } G }	Esfera de acero de $\frac{1}{16}$ pul de diámetro			100 kg $R_B =$ 60 kg $R_F =$ 150 kg $R_G =$	130-500t
E	Esfera de acero de $\frac{1}{8}$ pul de diámetro			100 kg $R_E =$	

Figura 2. 15 Diferentes ensayos para medir dureza..

Fuente: (Callister, 2007, pág 156)

En general se mide dureza cuando se ha establecido una correlación entre la dureza y alguna otra propiedad del material, como por ejemplo la resistencia a la abrasión o al desgaste, la resistencia a la tracción, etc. Sin embargo debe advertirse que dichas correlaciones son aplicables en forma muy cuidadosa sobre un rango acotado de materiales sobre los cuales se conoce, empíricamente, las condiciones en que se cumple la relación entre la propiedad buscada y el valor de la dureza. (Santos, Yenque, Rojas, & Rosales, 2001, págs. 73-80)

En general se puede utilizar la medición de dureza para:

- Evaluar la efectividad de un tratamiento térmico.
- Evaluar la resistencia al desgaste de un material.
- Evaluar la maquinabilidad del material.
- Obtener una idea de la resistencia a la tracción de un material.

#### 2.4.1.12.2. Dureza Brinell

En el ensayo de dureza Brinell, una esfera de acero duro se oprime sobre la superficie del material. Se mide el diámetro de la impresión con un microscopio y se calcula el número de dureza o índice de dureza Brinell (HB) a partir de la siguiente ecuación:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde:  $P$  es la carga aplicada en kilogramos,  $D$  es el diámetro del penetrador en mm, y  $d$  es el diámetro de la impresión en mm. (Askeland, 2004, pág. 257)

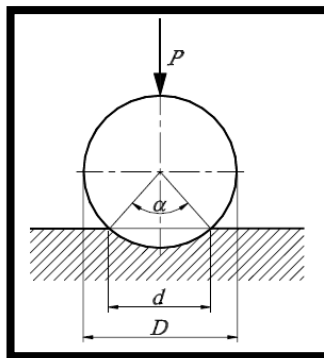


Figura 2. 16 Esquema básico de un ensayo de dureza Brinell.

Fuente:(Recuperado de: <http://190.105.160.51/~material/materiales/presentaciones/ApunteDureza.pdf>)

La carga se aplica en un tiempo estándar usualmente de 30s, y el diámetro de la indentación se mide con un macroscopio de baja.

### 2.4.1.12.3. Dureza Rockwell

El ensayo de dureza Rockwell utiliza una pequeña bola de acero para materiales blandos y un cono de diamante para materiales más duros. La profundidad de la penetración es medida automáticamente por el instrumento y se convierte a índice de dureza Rockwell (HR). Se utilizan diversas variantes del ensayo Rockwell, incluyendo las descritas en la tabla 2.2. La escala Rockwell C (HRC) se utiliza para aceros duros, en tanto que para medir la dureza del aluminio se selecciona la escala Rockwell F (HRF). (Askeland, 2004, pág. 258)

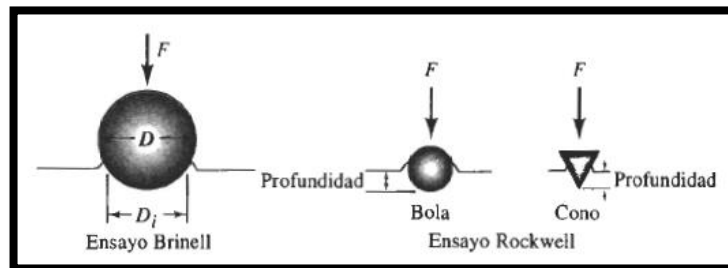


Figura 2. 17 Ensayos de dureza Brinell y Rockwell.

(Fuente: Askeland, 1998, pág. 258)

Tabla 2. 2 Comparación de ensayos de dureza típicos.

Ensayo	Penetrador	Carga	Aplicación
Brinell	Bola de 10 mm	3000 kg	Hierro y acero fundidos
Brinell	Bola de 10 mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono de diamante	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell B	Bola de 1/16 plg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono de diamante	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell D	Cono de diamante	100 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell E	Bola de 1/8 plg	100 kg	Materiales muy suaves
Rockwell F	Bola de 1/16 plg	60 kg	Aluminio, materiales suaves
Vickers	Pirámide de diamante	10 kg	Materiales duros
Knoop	Pirámide de diamante	500 g	Todos los materiales

Fuente: (Askeland, 1998, pág. 258)

### 2.4.1.13. Ensayo de impacto

Cuando se somete un material a un golpe súbito e intenso, en el cual la velocidad de aplicación del esfuerzo es extremadamente grande, el material puede tener un comportamiento más frágil comparado con el que se observa en el ensayo de tracción. El ensayo de impacto a menudo se utiliza para evaluar la fragilidad de un material bajo estas condiciones. Se han diseñado muchos procedimientos, incluyendo el ensayo Charpy y el ensayo Izod (figura 2.18). Este último generalmente se utiliza para materiales no metálicos. La probeta puede o no tener muesca; la que tiene muesca en V mide mejor la resistencia del material a la propagación de grietas.

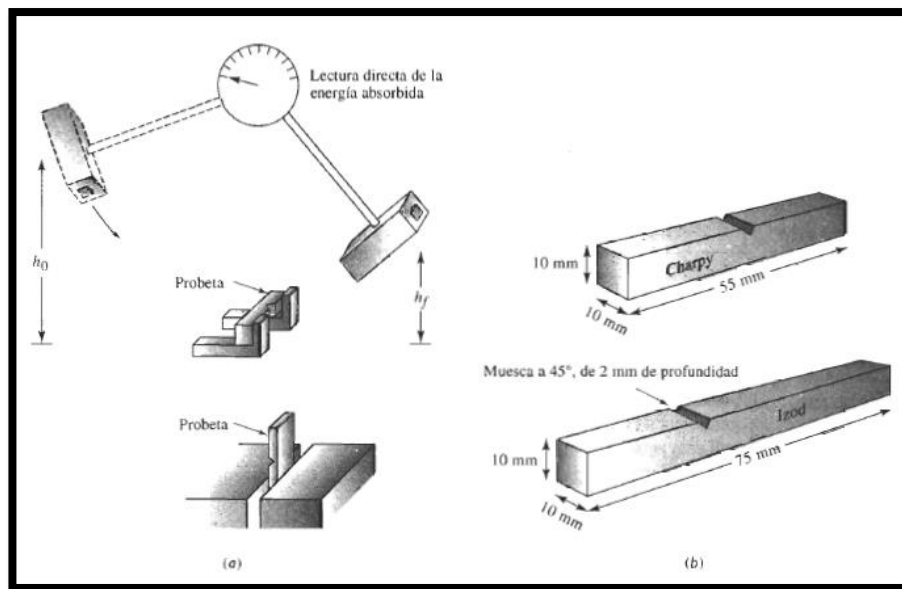


Figura 2. 18 El ensayo de impacto: (a) Los ensayos Charpy e Izod, y (b) dimensiones de las probetas típicas.

Fuente: (Askeland, 2004, pág. 261)

Durante el ensayo, un péndulo pesado, que inicia su movimiento desde una altura  $h_0$ , describe un arco y posteriormente golpea y rompe la probeta; llega a una altura final  $h_f$  menor. Si se conocen las alturas inicial y final del péndulo, se puede calcular la diferencia en su energía potencial. Esta diferencia es la energía de impacto absorbida durante la falla o ruptura de la probeta. En el caso del ensayo Charpy, la energía por lo general se expresa en libra-pie (lb\*pie) o en joules (J) donde 1 lb\*pie = 1.356 J. Los resultados del ensayo Izod se expresan en lb\*pie/pulg o J/m. La capacidad de un material para resistir cargas de impacto, a menudo se conoce como tenacidad del material. (Askeland, 2004, págs. 260-261)

## **2.4.2. Procesos de fabricación**

Los procesos de transformación consisten en una serie de operaciones que parten de un material en bruto y modifican su forma hasta convertirla en una pieza elaborada que tiene utilidad industrial.

La forma final de una pieza, debe cumplir una serie de requisitos imprescindibles para ser considerada realmente útil:

- Quedar lista para ser montada en un conjunto.
- Fiel al diseño previamente establecido.
- Coste razonable de material y energía.
- Superar el control de calidad que garantice su fiabilidad.

Para fabricar un elemento, además de realizar un diseño previo en el que se especifiquen dimensiones y materiales, es necesario elegir el procedimiento de fabricación más idóneo, con el fin de dar forma al material.

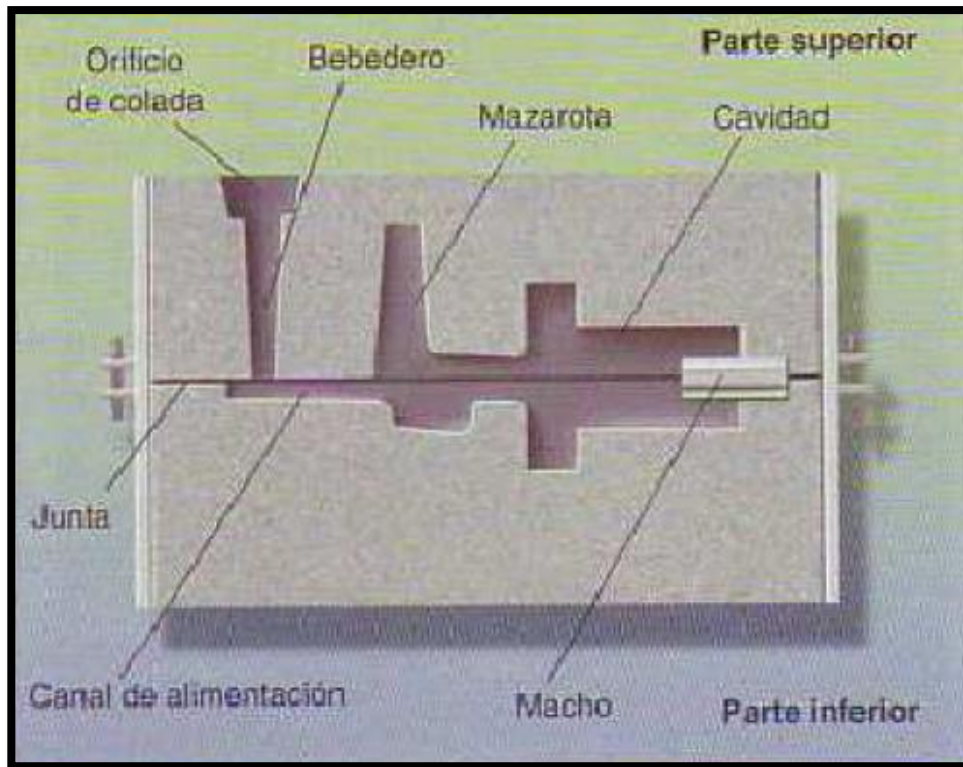
Las técnicas de fabricación más usuales, se clasifican en tres grandes grupos:

1. Procedimiento de fabricación por deformación o moldeo, también llamado procedimiento de conformación sin pérdida de material, ya que a lo largo de los procesos no se desperdicia ni se pierde parte alguna del material con el que se trabaja.
2. Procedimiento de fabricación por separación y corte, también llamado procedimiento de conformación con pérdida de material, ya que a lo largo de los procesos se desperdicia o pierde alguna parte del material con el que se trabaja.
3. Procedimiento de fabricación mediante unión de piezas. (Villalva, pág. 1)

### **2.4.2.1. Procedimiento de conformación sin pérdida de material. Conformación por fusión y moldeo**

Se realiza fundiendo el material y vertiéndolos en moldes que reproduzcan la forma de la pieza. Esta técnica se conoce también como fundición o colada. Se aplica esencialmente para metales, plásticos, vidrio, cemento, etc.

Un molde es un recipiente que presenta una cavidad en la que se introduce un material en estado de fusión que, al solidificarse, adopta la forma de la cavidad. Luego se deja enfriar el tiempo necesario hasta que se solidifique y se extrae del molde. Los moldes, en general, constan de dos piezas, perfectamente acopladas.



*Figura 2.19 Elementos de un molde industrial.*

*Fuente: (Villalva, pág. 1)*

Por medio de este método podemos fabricar y obtener piezas de formas muy diversas, siendo ampliamente utilizado en el campo de los recipientes de productos y carcasas de máquinas.

El moldeo es una técnica que consiste en calentar el material hasta su punto de fusión y, en ese momento, verterlo en un molde con la forma de la pieza que se pretende obtener.

El moldeo de piezas metálicas, aunque varía según el proceso, debe seguir unas etapas determinadas, que se recogen en el diagrama de bloques de la figura 2.20:

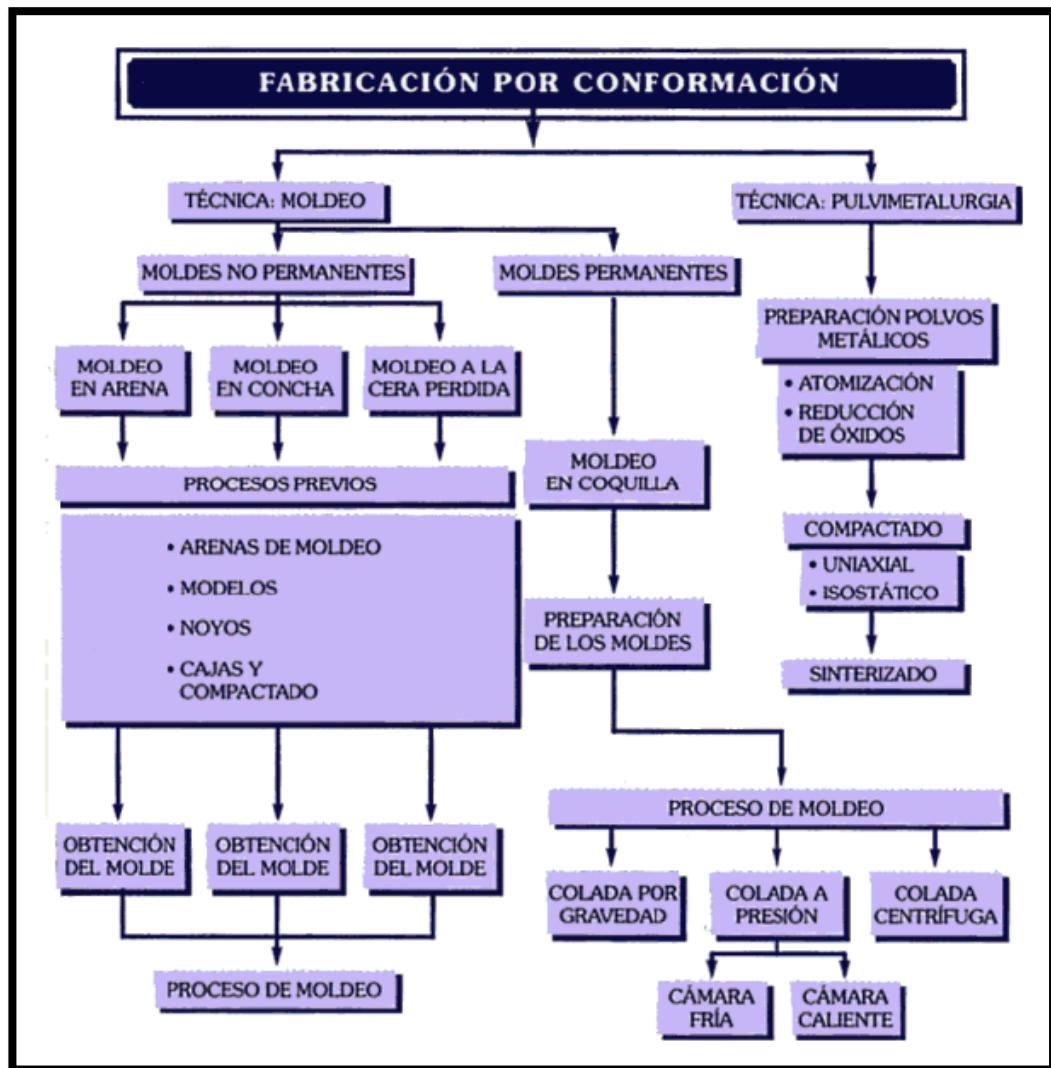
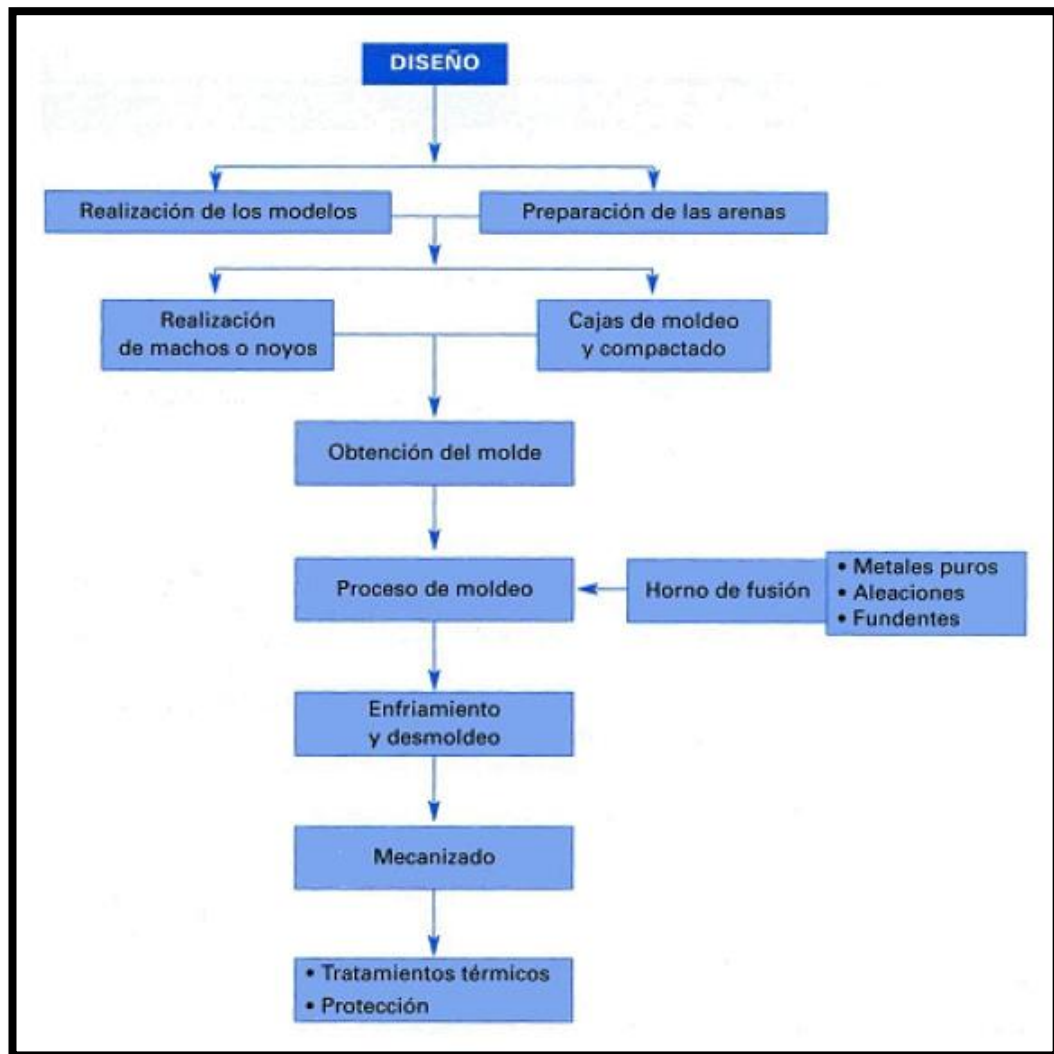


Figura 2. 20 Etapas del proceso de moldeo.

Fuente: (de Monroy, pág. 1)

Una vez que se ha realizado el diseño de la pieza que se desea fabricar, es necesario construir un modelo. Generalmente se elaboran en madera o yeso, de forma totalmente artesanal. A partir del modelo se construye el molde, que puede ser de arena o en coquilla; si la pieza es hueca es preciso fabricar también los machos o noyos, que son unas piezas que recubren los huecos interiores. En todos estos pasos se debe tener en cuenta el material elegido para la fabricación de la pieza. El proceso de llenado del molde se conoce como colada. El desmolde consiste en extraer la pieza del molde una vez solidificada. En muchos casos, y fundamentalmente cuando se requiere precisión, deben realizarse tratamientos de acabado sobre las piezas obtenidas.





*Figura 2. 21 Procedimiento general para el moldeo de piezas.*

*Fuente: (de Monroy, pág. 3)*

Los materiales con los que se construyen las piezas suelen ser metales y aleaciones, y deben poseer las siguientes características:

- Punto de fusión bajo (para ahorrar combustible).
- Baja tensión superficial (para reproducir fielmente el molde).
- Bajo coeficiente de dilatación en estado líquido (para que la contracción del metal sea pequeña).
- Bajo coeficiente de dilatación en estado sólido (para disminuir el peligro de formación de grietas durante el enfriamiento).
- Aptitud para el llenado del molde. (de Monroy, págs. 1-3)

### 2.4.2.1.1. Técnicas de moldeo

Los procesos de moldeo son diferentes según la naturaleza del molde y el método de vertido. Así, según la naturaleza del molde pueden ser: de molde permanente (de hierro colado, acero o grafito) o de molde perdido (arena y arcilla); y según el método de vertido, puede ser por gravedad o por presión.

#### 2.4.2.1.1.1. Moldeo por gravedad

Se realiza vertiendo el metal fundido sobre un molde, de manera que éste se desplace por su propio peso.

Se utiliza principalmente para fabricar piezas de fundición de acero, bronce, latón y distintas aleaciones de aluminio. Existen distintas técnicas: en arena, en coquilla y a la cera perdida.

#### 2.4.2.1.1.2. Moldeo manual en arena

Los moldes se fabrican con arenas compuestas fundamentalmente de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), cuyos granos se aglomeran con cierta cantidad de agua y arcilla.

**Tabla 2. 3 Porcentaje de los componentes de la arena de moldeo.**

Componentes de las arenas de moldeo	
Componente	Proporción
Sílice	75%
Arcilla	20%
Agua	5%

*Fuente: (de Monroy, pág. 2)*

#### 2.4.2.1.1.3. Materiales empleados para la fabricación de modelos

Los modelos se pueden realizar con una gran variedad de materiales, como madera, yeso, fundición de hierro, latón, aleaciones de aluminio y, modernamente, resinas plásticas.

El material más utilizado es la madera, ya que es fácil de trabajar, relativamente barata y de poco peso. El problema que presenta es su escasa resistencia a la humedad, que se puede paliar pintando los moldes. De todas formas, es probable que la madera se utilice siempre para la construcción de piezas aisladas o de pequeñas series.

#### **2.4.2.1.1.4. Proceso**

Es un procedimiento de molde perdido. Se emplea sílice (una arena muy pura) para hacer el molde, mezclada con arcilla y agua para aglomerar la arena. El proceso es el siguiente:

Parte inferior del molde:

- Se elabora un modelo de la pieza a fabricar (madera, resina, etc.) dividido en dos mitades exactamente iguales.
- Se introduce una mitad del modelo en la parte inferior del molde y se rellena con arena. Se introduce una pieza auxiliar que formará el canal de alimentación. Se comprime y compacta la arena alrededor del modelo. Se retiran el modelo y la pieza auxiliar. Así sus cavidades quedan marcadas en la arena.

Parte superior del molde:

- Se repiten los pasos anteriores, introduciendo las piezas que formarán el bebedero, el orificio de colada y los respiraderos (llamados mazarota, para que salgan los gases)
- Se unen las dos mitades del molde.
- Se colocan piezas en la parte superior para evitar que la presión de los gases pueda levantarla.
- Se vierte el material fundido por el orificio de colada
- Se deja enfriar hasta la temperatura ambiente
- Se rompe el molde y se extrae la pieza.
- Se eliminan las partes correspondientes al canal de alimentación, bebedero, para volver a fundirlas.
- Se limpia y mecaniza superficialmente si es necesario. (Villalva, págs. 2-3)

Como en la arena existe una cierta proporción de agua, puede emplearse de las siguientes maneras:

- Húmeda: esta técnica se conoce como moldeo en verde.
- Secada en la estufa, de esta forma, aumenta su cohesión.
- Flameada: sometida, simplemente, a un secado superficial.

La arena que se debe emplear para la elaboración de moldes y machos siempre ha de poseer las siguientes propiedades:

- Plasticidad en estado húmedo, para que pueda reproducir los detalles de los modelos.
- Permeabilidad, para permitir el paso a través de ella del aire y de los gases que se producen durante la colada.
- Refractariedad, manifestada en un punto de fusión lo suficientemente alto para resistir sin fundirse ni reblandecerse- las altas temperaturas de la colada.
- Cohesión, para que el molde y el macho conserven su forma al retirar el modelo.
- Conductividad calorífica adecuada, para que el metal o la aleación se enfríe en el molde a la velocidad deseada.
- Deformabilidad suficiente, que permita la contracción de la pieza al enfriarse.
- Tener un precio aceptable.

## **2.5. HIPÓTESIS**

**H<sub>0</sub>:** La caracterización de la aleación CuAlNi permitirá desarrollar nuevos productos para la industria.

**H<sub>1</sub>:** La caracterización de la aleación CuAlNi no permitirá desarrollar nuevos productos para la industria.

### **2.5.1. UNIDADES DE OBSERVACIÓN**

- Probetas de aleación con memoria de forma CuAlNi.
- Probetas para análisis metalográfico.
- Probetas para ensayo de análisis químico.
- Probetas para ensayo de tracción.

- Probetas para ensayo de dureza.
- Probetas para ensayo de tenacidad (Charpy).

### **2.5.2. SEÑALAMIENTO DE VARIABLES DE LA HIPÓTESIS**

#### **Variable Independiente:**

Aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi.

#### **Variable dependiente:**

Productos nuevos para la industria.

### **2.5.3. TÉRMINO DE RELACIÓN**

Desarrollar.

## **CAPITULO III**

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. ENFOQUE**

En la presente investigación se tuvo un enfoque cuantitativo porque se realizó una medición controlada de las propiedades mecánicas, tiempos y temperaturas de fundición de la aleación mediante parámetros numéricos, así como también un enfoque cualitativo porque se revisaron las estructuras metalográficas y se identificaron aspectos físicos.

#### **3.2. MODALIDAD BÁSICA DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **3.2.1. Bibliográfica**

La presente investigación necesitó emplear la modalidad bibliográfica ya que se requirió información de libros, artículos técnicos, tesis, publicaciones, páginas de internet, entre otros, para poder ampliar, profundizar y comparar los resultados.

##### **3.2.2. Experimental**

El estudio fue experimental porque se fabricaron probetas para realizar ensayos de tracción, dureza, metalográficos y de impacto en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

#### **3.3. NIVEL O TIPO DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **3.3.1. Exploratorio**

Este tipo de estudio se lo realiza cuando el tema no ha sido abordado antes o cuando el problema de investigación ha sido poco estudiado.

El nivel fue exploratorio ya que el tema ha sido poco estudiado en el campo de materiales en la Ingeniería Mecánica, se analizaron las propiedades mecánicas de la aleación con memoria de forma CuAlNi para determinar su aplicación industrial.

### **3.3.2. Descriptiva**

El propósito es describir situaciones y eventos que se manifiestan en determinados fenómenos.

Se buscó especificar las propiedades mecánicas de aleaciones CuAlNi con diferentes porcentajes de cada componente, describiendo con la mayor exactitud el proceso de fabricación y el porcentaje adecuado de cada elemento para obtener las características de memoria de forma deseadas.

### **3.3.3. Correlacional**

La investigación fue de tipo correlacional ya que se estimó el comportamiento de las variables en función de las variaciones apreciadas en las mismas.

## **3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA**

### **3.4.1. Población**

La población de la investigación fue:

Lingotes cilíndricos y prismáticos de aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi obtenidos en el horno de Inducción de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

### **3.4.2. Muestra**

Número de probetas de aleación inteligente con efecto memoria de forma CuAlNi:

<b>Aleación con efecto memoria de forma CuAlNi</b>	<b>Prueba 1 (84Cu-13.25Al- 2.75Ni)%wt</b>	Análisis metalográfico	3 probetas
		Análisis químico	1 probeta
		Tracción	5 probetas
		Dureza	1 probeta
		Impacto	3 probetas
	<b>Prueba 2 (84Cu-13Al- 3Ni)%wt</b>	Análisis metalográfico	3 probetas
		Análisis químico	1 probeta
		Tracción	5 probetas
		Dureza	1 probeta
		Impacto	3 probetas
	<b>Prueba 3 (84Cu-12Al- 4Ni)%wt</b>	Análisis metalográfico	3 probetas
		Análisis químico	1 probeta
		Tracción	5 probetas
		Dureza	1 probeta
		Impacto	3 probetas
	<b>Prueba 4 (80.5Cu-14.5Al- 5Ni)%wt</b>	Análisis metalográfico	3 probetas
		Análisis químico	1 probeta
		Tracción	5 probetas
		Dureza	1 probeta
		Impacto	3 probetas

Cincuenta y dos (52) probetas de aleación inteligente con efecto memoria de forma CuAlNi.



### 3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

#### 3.5.1. Variable independiente:

Aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi

LO ABSTRACTO		LO OPERATIVO		
CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍTEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
La aleación CuAlNi (cobre, aluminio, níquel) es una aleación con efecto memoria de forma, es decir que después de haber sufrido una deformación, tiene la capacidad de regresar a su forma original al estar expuesta a un estímulo externo, en este caso, a una variación de temperatura que provoca una transformación martensítica en su microestructura.	Elementos de la aleación: Cu, Al y Ni.	Porcentajes en peso de cada elemento	Cu: (80 - 90)% Al: (11-14.5)% Ni: (3 - 5)%	Observación directa Ficha de datos
	Fundición de la aleación	Temperatura	1085°C – 1500°C	Observación directa Ensayos de fundición Ficha de datos
	Agitación de la mezcla	Tipo Tiempo	Agitado manual (2-3)min	Observación directa Ficha de datos

### 3.5.2. VARIABLE DEPENDIENTE:

Productos nuevos para la industria

LO ABSTRACTO		LO OPERATIVO		
CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍTEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
La aplicación industrial de un material determinado depende directamente de las propiedades obtenidas en ensayos normalizados, tales como: composición química, propiedades mecánicas, físicas, etc.	Tracción	Módulo de elasticidad Esfuerzo de fluencia % de elongación	(5-20)x10 <sup>5</sup> Kg/cm <sup>2</sup> (1500-3000)Kg/cm <sup>2</sup> ( 1-8 )%	Ensayos de laboratorio Ficha de datos
	Dureza	Rockwell B, Brinell	(25-98)HRB (68-228)HB	Ensayos de laboratorio Ficha de datos
	Metalografía	Tamaño de grano Microestructura	Fino - grueso Fases	Ensayos de laboratorio Observación directa Ficha de datos
	Impacto	Energía de rotura	(0-50)J	Ensayos de laboratorio Ficha de datos

### **3.6. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN**

Se usaron las siguientes técnicas de investigación:

Observación directa, para los aspectos más superficiales como selección de materiales, revisión de equipos, adecuación del medio, seguimiento de la ejecución de cada ensayo.

Observación estructurada, ya que se registraron datos en cuadernos de notas o fichas de campo, los cuales sirvieron para analizar y comparar la información que se utilizó como guía en la investigación.

Documental, para la recolección de información de libros, publicaciones, artículos, estudios, fichas técnicas y tabulaciones.

### **3.7. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS**

#### **3.7.1. Plan de procesamiento de la información**

- Se revisó críticamente la información.
- Se seleccionó la información más importante y puntual.
- Se tabuló la información según las variables de la hipótesis.
- Se estudiaron estadísticamente datos para representación de resultados mediante gráficas.
- Se analizaron e interpretaron los resultados relacionándolos con las aferentes partes de la investigación.

#### **3.7.2. Plan de análisis e interpretación de resultados**

- Se revisó críticamente la información documental bibliográfica recogida.
- Se interpretaron los resultados basados en el marco teórico.
- Se ejecutaron los siguientes ensayos:
  - Análisis químico de cada muestra de aleación inteligente con efecto memoria de forma CuAlNi.
  - Análisis metalográfico de las diferentes probetas.
  - Ensayo de tracción de las diferentes probetas de la aleación.
  - Ensayo de dureza de las diferentes probetas de la aleación.

- Ensayo de impacto (Charpy).
- Se comprobó la hipótesis.
- Se establecieron conclusiones y recomendaciones.

## CAPITULO IV

### 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

##### 4.1.1. Procedimiento a desarrollarse para el análisis e interpretación de resultados

Se siguió el siguiente procedimiento para la ejecución del estudio de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi y posteriormente determinar una aplicación industrial de la misma.

- Determinar el porcentaje en peso de cada metal componente de la aleación.
- Fabricar la aleación mediante proceso de fundición en horno de inducción y posterior colado en moldes de arena.
- Realizar análisis químicos para determinar el porcentaje presente de cada componente en la aleación.
- Determinar propiedades físicas: volumen, peso, densidad, color.
- Determinar propiedades mecánicas: microestructura, tracción, impacto, dureza.
- Determinar una aplicación industrial.

##### 4.1.2. Prueba 1

La obtención de la primera probeta de aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi se ejecutó en el horno de inducción del taller de fundición de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, teniendo que controlarse diferentes parámetros en el horno anteriormente mencionado, los cuales son especificados en la tabla 4.1.

**Tabla 4. 1 Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 1.**

Tipo de parámetro	Condición de operación
Voltaje	220V
Operación	Automático
Presión de agua	0,2MPa
Flujo de agua	6L/min
Tiempo de calentamiento	20s
Tiempo de permanencia	20s
Tiempo de enfriamiento	10s
Amperaje	1100 – 1500A

*Fuente: (El autor)*



**Figura 4. 1 Horno de inducción, taller de fundición FICM - UTA.**

*Fuente: (El autor)*

Para la fundición del metal base y posterior mezcla con los otros elementos componentes de la aleación, se utilizó un crisol de grafito DIAMANT/BRASIL A-6 (5 ¼”) con capacidad para 5kg de colada. Es preciso mencionar que fue necesario cubrir el crisol con manta cerámica para impedir fuga de calor al exterior.



*Figura 4. 2 Crisol de grafito DIAMANT/BRASIL A-6 (5 ¼”).*

*Fuente: (El autor)*



*Figura 4. 3 Crisol de grafito cubierto con manta cerámica.*

*Fuente: (El autor)*

**Nota:** Fue necesario cortar el crisol ya que era más grande que la bobina del horno de inducción.

El cálculo de cantidades se realizó para 3kg de colada. Para todas las pruebas se utilizaron cobre electrolítico (Cu 99,9% de pureza), aluminio electrolítico (Al 99,9% de pureza), níquel (Ni 99,8% de pureza). Las cantidades en peso de cada componente se especifican en la tabla 4.2.

**Tabla 4. 2 Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 1.**

<b>Elemento</b>	<b>Peso en gramos</b>
Cu	2522,4g
Al	397,6g
Ni	82,7g
<b>Total:</b>	<b>3002,7g</b>

*Fuente: (El autor)*

Para obtener la aleación objeto de estudio primero se fundió el cobre, debido a que es el elemento base y el que entra en mayor cantidad. Posteriormente se agregó aluminio y finalmente el níquel. Para obtener una mezcla homogénea fue necesario agitar la colada con una barra de grafito.



*Figura 4. 4 Crisol con aleación en estado líquido dentro de la bobina del horno de inducción.*

*Fuente: (El autor)*

La colada fue vertida en un molde de arena para la obtención de las probetas requeridas.





*Figura 4.5 Probetas obtenidas después de desmoldar.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.2.1. Análisis químico de la prueba 1**

El primer análisis químico fue desarrollado en un **ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X EDX-720**, obteniéndose los siguientes resultados:

**Tabla 4.3 Resultado del análisis químico de la prueba 1: porcentaje en peso de los elementos.**

<b>Elemento</b>	<b>% en peso</b>
Cu	64,926
Al	32,251
Ni	2,753
Sc	0,069

*Fuente: (El autor)*

Como se puede observar en la tabla 4.3 existe presencia de escandio en la aleación posiblemente presente en el níquel, sin embargo la cantidad es muy pequeña.

#### **4.1.2.2. Análisis metalográfico de la prueba 1**

El análisis metalográfico se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, para lo cual se utilizó un microscopio metalográfico, el mismo que puede proyectar las imágenes a un computador y está conectado a un circuito cerrado de televisión.



*Figura 4. 6 Microscopio para análisis metalográfico y computador para visualizar imágenes FICM-UTA.*



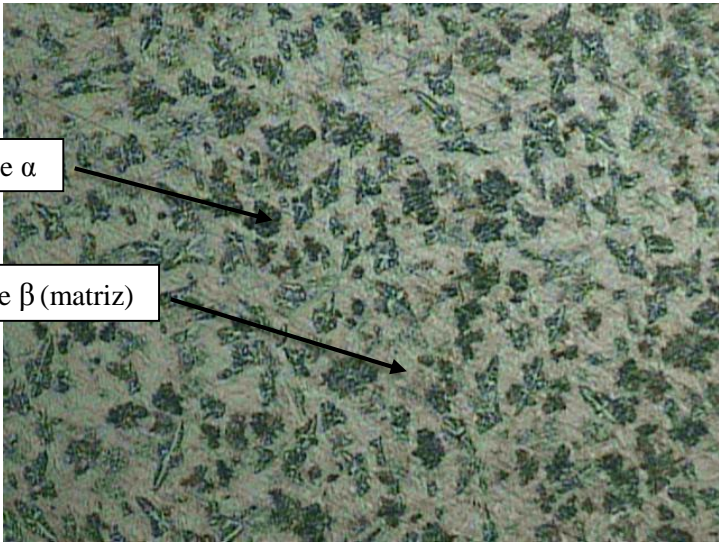
*Fuente: (El autor)*





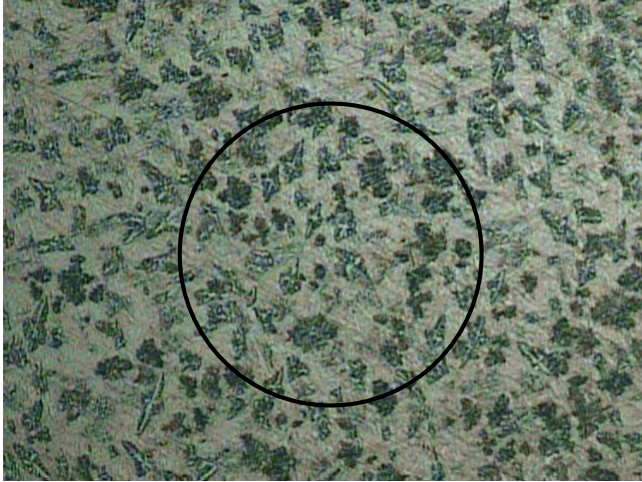
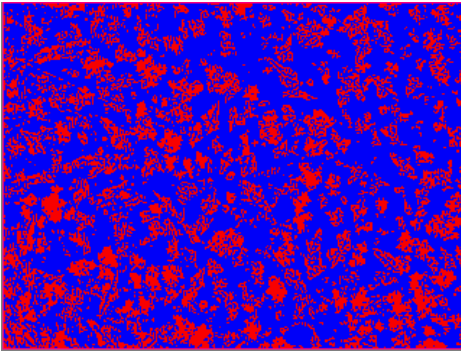
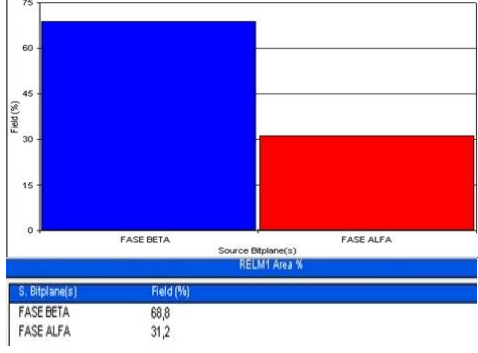
*Figura 4. 7 Probeta 1 para el análisis metalográfico.*

*Fuente: (El autor)*

#### 4.1.2.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 1

		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>			
<b>ANÁLISIS METALGRÁFICO</b>					
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>					
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	1		
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	20/01/2014		
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM				
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín		
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>					
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico				
<b>Temperatura ambiente:</b>	19,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,65 W/m <sup>2</sup>		
<b>Velocidad del aire:</b>	0,15 m/s	<b>Otros:</b>			
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALGRÁFICO:</b>					
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido mecánico				
<b>Temperatura de pulido:</b>	21 °C	<b>Tiempo de pulido:</b>	70 min		
<b>Reactivo químico:</b>	Aleaciones de cobre	<b>Tiempo de ataque:</b>	4s.		
<b>RESULTADO:</b>					
<b>FOTOGRAFÍA DE LA MICROESTRUCTURA</b>			<b>MAGNIFICACIÓN: 100X</b>		
					
<i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i>					

#### 4.1.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica mediante software

	<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>								
<b>ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA MEDIANTE SOFTWARE</b>									
<b>DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO</b>									
<b>Norma:</b>	ASTM E112-10	<b>Magnificación:</b>	100X						
<b>Microestructura:</b>	Aleación CuAlNi	<b>Método:</b>	Planimétrico						
<b>CÁLCULO</b>									
		$N_A = f \left( N_i + \frac{N_C}{2} \right)$ $f = 2 \text{ Jeffries a } 100X$ $N_A = 2 \left( 40 + \frac{19}{2} \right) = 99$							
$G = (3,321928 * \log_{10} N_A) - 2,954$ $G = (3,321928 * \log_{10} 99) - 2,954 = 3,67$									
<b>ANÁLISIS DE PORCENTAJES</b>									
		 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>S. Bitplane(s)</th> <th>Field (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>FASE BETA</td> <td>68,8</td> </tr> <tr> <td>FASE ALFA</td> <td>31,2</td> </tr> </tbody> </table>		S. Bitplane(s)	Field (%)	FASE BETA	68,8	FASE ALFA	31,2
S. Bitplane(s)	Field (%)								
FASE BETA	68,8								
FASE ALFA	31,2								
<b>RESULTADOS:</b>									
<b>Tamaño de grano ASTM:</b>	$G = 3,67 \approx 3,5$								
<b>Porcentaje de fase <math>\beta</math>:</b>	68,8%								
<b>Porcentaje de fase <math>\alpha</math>:</b>	31,2%								



#### 4.1.2.3. Dureza de la prueba 1

La determinación de la dureza se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, visualizando las medidas en la escala Rockwell C (HRC) del durómetro, para lo cual se utilizó el indentador de cono de diamante con una carga de 1471N.



*Figura 4. 8 Durómetro, Laboratorio de Materiales FICM - UTA.*


*Fuente: (El autor)*



*Figura 4. 9 Probeta 1 utilizada para el ensayo de dureza.*

*Fuente: (El autor)*

#### 4.1.2.3.1. Ensayo de dureza de la prueba 1

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	1
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	21/01/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM		
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	18,0 °C	<b>Radiación:</b>	1,75 W/m <sup>2</sup>
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA:</b>			
<b>Método:</b>	Rockwell C	<b>Norma aplicable:</b>	ASTM E-18
<b>Tipo de indentador:</b>	Cono de diamante		
<b>Carga aplicada:</b>	1471N	<b>Tiempo de ensayo:</b>	10 min.
<b>RESULTADO:</b>			
<b>N° de mediciones:</b>	<b>HRC</b>	<b>Dureza promedio</b>  <b>19,03 HRC</b>	
1	26,0		
2	22,5		
3	13,0		
4	20,5		
5	11,0		
6	15,5		
7	20,0		
8	18,8		
9	21,5		
10	21,5		
<b>Total:</b>	<b>190,3</b>		

#### **4.1.2.4. Ensayo de tracción de la prueba 1**

No fue posible realizar el ensayo de tracción porque las probetas tenían exceso de porosidades de gran tamaño. Debido a la alta dureza y a la gran cantidad de poros se hizo muy difícil el mecanizado de probetas normalizadas.



*Figura 4. 10 Probeta mecanizada con exceso de poros.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.2.5. Ensayo de impacto de la prueba 1**

El ensayo de impacto no se pudo realizar porque la cantidad de colada no fue la suficiente para vaciar en el molde y posteriormente realizar el mecanizado de las probetas normalizadas.

#### **4.1.2.6. Comprobación de memoria de forma de la prueba 1**

Para la ejecución de este ensayo se utilizó viruta obtenida al mecanizar en el torno el lingote obtenido en la fundición de la prueba 1.

El objetivo es deformar la viruta en frío (estado martensítico) mediante la aplicación de fuerza externa y al aplicarle calor para que recupere su forma original.



*Figura 4. 11 Viruta en forma original (prueba 1).*

*Fuente: (El autor)*



*Figura 4. 12 Viruta deformada y rota por acción de fuerza externa (prueba 1).*

*Fuente: (El autor)*

Resultado: no se comporta como material inteligente con memoria de forma, obteniendo como resultado la fractura del material.

#### **4.1.3. Prueba 2**

La segunda prueba se realizó también en el horno de inducción del taller de fundición de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato utilizando crisol de grafito DIAMANT/BRASIL A-6 (5 ¼”) con capacidad para 5kg de colada.



**Tabla 4. 4 Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 2**

<b>Tipo de parámetro</b>	<b>Condición de operación</b>
Voltaje	220V
Operación	Automático
Presión de agua	0,2MPa
Flujo de agua	6L/min
Tiempo de calentamiento	20s
Tiempo de permanencia	20s
Tiempo de enfriamiento	10s
Amperaje	870 – 1450A

*Fuente: (El autor)*

La cantidad de cada componente de la aleación utilizada en esta prueba se especifica en la siguiente tabla:

**Tabla 4. 5 Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 2.**

<b>Elemento</b>	<b>Peso en gramos</b>
Cu	2521,2g
Al	397,4g
Ni	82,5g
<b>Total:</b>	3001,2g

*Fuente: (El autor)*



*Figura 4. 13 Probetas obtenidas en la prueba 2.*

*Fuente: (El autor)*

#### 4.1.3.1. Análisis químico de la prueba 2

El segundo análisis químico fue desarrollado en un **ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X EDX-720**, obteniéndose los siguientes resultados:

**Tabla 4. 6 Resultado del análisis químico de la prueba 2: porcentaje en peso de los elementos.**

<b>Elemento</b>	<b>% en peso</b>
Cu	74,301
Al	22,334
Ni	3,311
Otros	0,054

*Fuente: (El autor)*

#### 4.1.3.2. Análisis metalográfico de la prueba 2



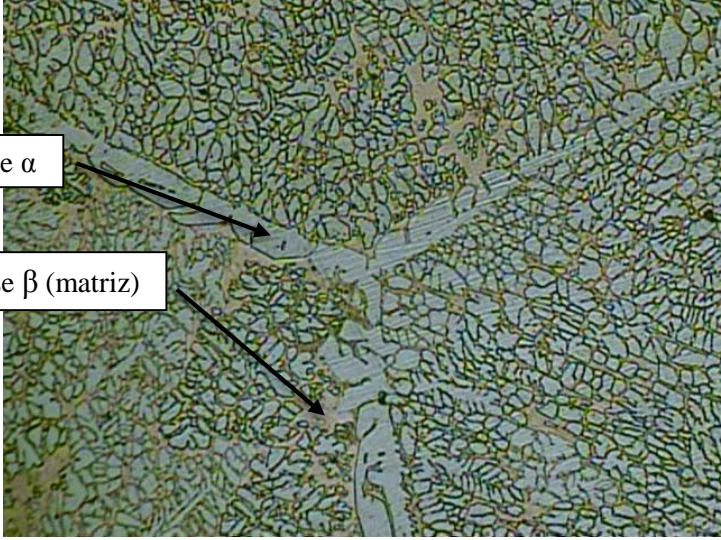
El análisis metalográfico se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.





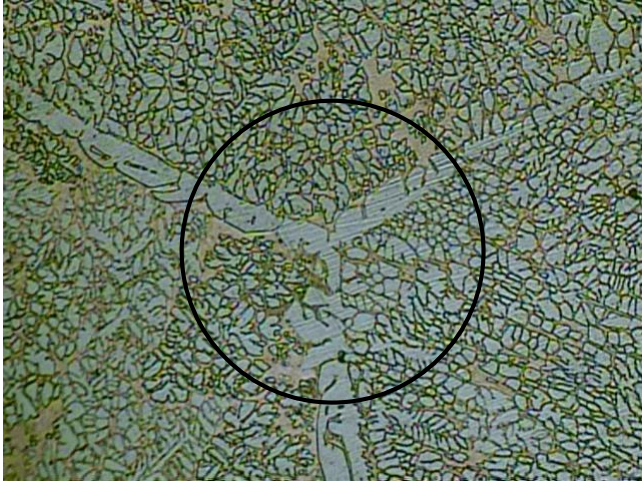
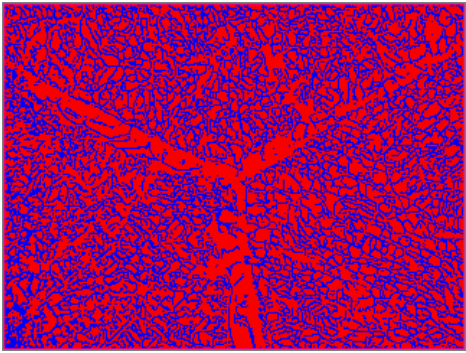
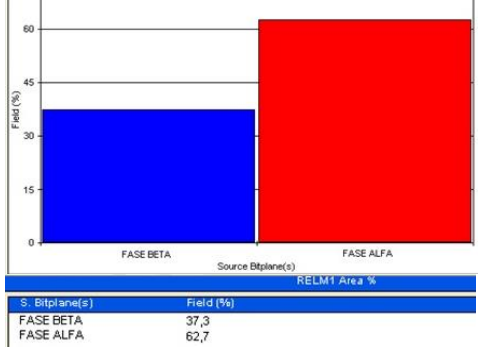
*Figura 4. 14 Probeta 2 para el análisis metalográfico.*

*Fuente (El autor)*

#### 4.1.3.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 2

		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>			
<b>ANÁLISIS METALGRÁFICO</b>					
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>					
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	2		
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	07/02/2014		
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM				
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín		
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>					
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico				
<b>Temperatura ambiente:</b>	17,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,7 W/m <sup>2</sup>		
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>			
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALGRÁFICO:</b>					
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido mecánico				
<b>Temperatura de pulido:</b>	20 °C	<b>Tiempo de pulido:</b>	60 min		
<b>Reactivo químico:</b>	Aleaciones de cobre	<b>Tiempo de ataque:</b>	4s.		
<b>RESULTADO:</b>					
<b>FOTOGRAFÍA DE LA MICROESTRUCTURA</b>			<b>MAGNIFICACIÓN: 100X</b>		
					
<i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i>					

#### 4.1.3.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica mediante software

		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>									
<b>ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA MEDIANTE SOFTWARE</b>											
<b>DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO</b>											
Norma:		ASTM E112-10	Magnificación:		100X						
Microestructura:		Aleación CuAlNi	Método:		Planimétrico						
<b>CÁLCULO</b>											
			$N_A = f \left( N_i + \frac{N_C}{2} \right)$ $f = 2 \text{ Jeffries a } 100X$ $N_A = 2 \left( 107 + \frac{36}{2} \right) = 250$								
$G = (3,321928 * \log_{10} N_A) - 2,954$ $G = (3,321928 * \log_{10} 250) - 2,954 = 5,011$											
<b>ANÁLISIS DE PORCENTAJES</b>											
			 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>S. Bitplane(s)</th> <th>Field (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>FASE BETA</td> <td>37,3</td> </tr> <tr> <td>FASE ALFA</td> <td>62,7</td> </tr> </tbody> </table>			S. Bitplane(s)	Field (%)	FASE BETA	37,3	FASE ALFA	62,7
S. Bitplane(s)	Field (%)										
FASE BETA	37,3										
FASE ALFA	62,7										
<b>RESULTADOS:</b>											
Tamaño de grano ASTM:			$G = 5,011 \approx 5$								
Porcentaje de fase $\beta$ :			37,3%								
Porcentaje de fase $\alpha$ :			62,7%								

#### 4.1.3.3. Dureza de la prueba 2

La determinación de la dureza se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, visualizando las medidas en la escala Rockwell C (HRC) del durómetro, para lo cual se utilizó el indentador de cono de diamante con una carga de 1471N.

##### 4.1.3.3.1. Ensayo de dureza de la prueba 2

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	2
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	07/02/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM		
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	17,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,7 W/m <sup>2</sup>
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA:</b>			
<b>Método:</b>	Rockwell C	<b>Norma aplicable:</b>	ASTM E-18
<b>Tipo de indentador:</b>	Cono de diamante		
<b>Carga aplicada:</b>	1471N	<b>Tiempo de ensayo:</b>	10 min.
<b>RESULTADO:</b>			
<b>N° de mediciones:</b>	<b>HRC</b>	<b>Dureza promedio</b>  <b>42,55 HRC</b>	
1	43,5		
2	44,0		
3	35,0		
4	43,5		
5	42,5		
6	44,5		
7	43,0		
8	43,0		
9	43,0		
10	43,5		
<b>Total:</b>	<b>425,5</b>		





*Figura 4. 15 Prueba 2 utilizada para el ensayo de dureza.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.3.4. Ensayo de tracción de la prueba 2**

Al igual que en la prueba 1 no se pudo realizar el ensayo de tracción debido al exceso de poros de gran tamaño presentes en las probetas luego de sacarlas del molde de arena.



*Figura 4. 16 Prueba con exceso de poros.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.3.5. Ensayo de impacto de la prueba 2**

El ensayo de impacto tampoco se pudo realizar porque la cantidad de colada no fue la suficiente para verter en el molde y posteriormente realizar el mecanizado de las probetas normalizadas.

#### **4.1.3.6. Comprobación de memoria de forma de la prueba 2**

Para la ejecución de este ensayo se utilizó viruta obtenida al mecanizar en el torno el lingote obtenido en la prueba 2.

El objetivo es deformar la viruta en frío (estado martensítico) mediante la aplicación de fuerza externa y al aplicarle calor para que recupere su forma original.



*Figura 4. 17 Viruta en forma original (prueba 2).*

*Fuente: (El autor)*



*Figura 4. 18 Viruta deformada por acción de fuerza externa (prueba 2).*

*Fuente: (El autor)*

Resultado: como se observa en las figuras anteriores tampoco se comporta como material inteligente con memoria de forma.

#### 4.1.4. Prueba 3

La tercera prueba se realizó en el horno de inducción del taller de fundición de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato utilizando también un crisol de grafito DIAMANT/BRASIL A-6 (5 ¼”) con capacidad para 5kg de colada el cual se cubrió con manta cerámica no combustible para minimizar las fugas de calor al exterior.

**Tabla 4. 7 Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 3.**

<b>Tipo de parámetro</b>	<b>Condición de operación</b>
Voltaje	220V
Operación	Automático
Presión de agua	0,2MPa
Flujo de agua	6L/min
Tiempo de calentamiento	20s
Tiempo de permanencia	20s
Tiempo de enfriamiento	10s
Amperaje	1100 – 1350A

*Fuente: (El autor)*

La cantidad de metales componentes de la aleación que se emplearon para esta prueba se detallan a continuación en la tabla:

**Tabla 4. 8 Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 3.**

<b>Elemento</b>	<b>Peso en gramos</b>
Cu	2520,7g
Al	397,8g
Ni	82,9g
<b>Total:</b>	<b>3001,4g</b>

*Fuente: (El autor)*





*Figura 4. 19 Probetas de la prueba 3 extraídas del molde de arena.*

*Fuente: (El autor)*

Como se puede observar las probetas están defectuosas ya que faltó colada para llenar completamente el molde de arena.

#### **4.1.4.1. Análisis químico de la prueba 3**

El tercer análisis químico fue desarrollado en un **ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X EDX-720**, obteniéndose los siguientes resultados:

**Tabla 4. 9 Resultado del análisis químico de la prueba 3: porcentaje en peso de los elementos.**

<b>Elemento</b>	<b>% en peso</b>
Cu	76,661
Al	18,045
Ni	3,216
Si	1,807
Ca	0,170
S	0,100

*Fuente: (El autor)*

Al leer la tabla 4,9 se observa contaminación de la aleación con 1,807% de silicio (valor significativo), 0,17% de calcio y 0,1% de azufre. Se estima que la contaminación se produjo por un pedazo de manta cerámica que se utilizó como tapa, en la cual se encontraban restos de óxido de zinc y otros compuestos generados durante la evaporación y oxidación del zinc.

#### **4.1.4.2. Análisis metalográfico de la prueba 3**

El análisis metalográfico se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.





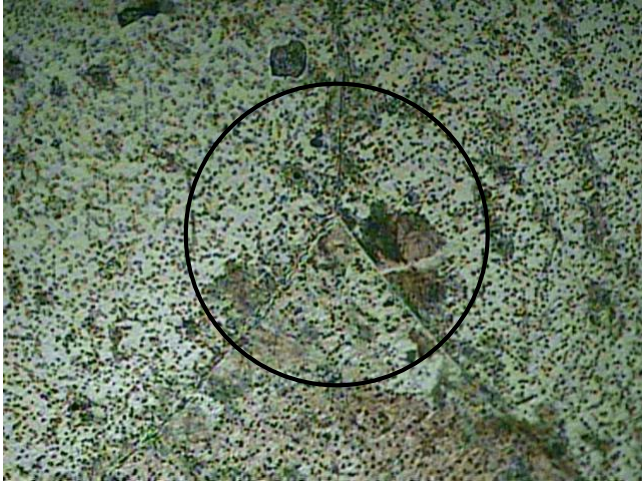
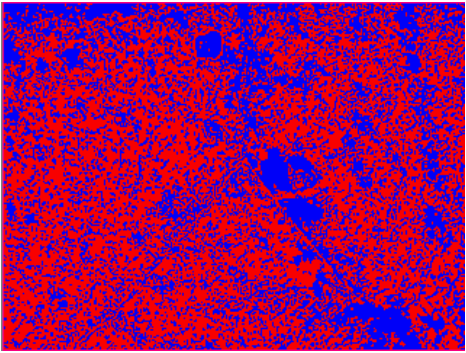
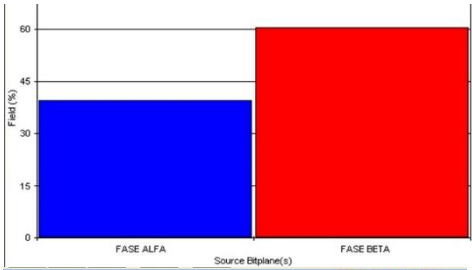
*Figura 4. 20 Probeta 3 para el análisis metalográfico.*

*Fuente: (El autor)*

#### 4.1.4.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 3

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>			
<b>ANÁLISIS METALGRÁFICO</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	3
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	07/02/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM		
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	17,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,7 W/m <sup>2</sup>
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALGRÁFICO:</b>			
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido mecánico		
<b>Temperatura de pulido:</b>	20 °C	<b>Tiempo de pulido:</b>	45 min
<b>Reactivo químico:</b>	Aleaciones de cobre	<b>Tiempo de ataque:</b>	4s.
<b>RESULTADO:</b>			
<b>FOTOGRAFÍA DE LA MICROESTRUCTURA</b>		<b>MAGNIFICACIÓN: 100X</b>	
			
<p><i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i></p>			

#### 4.1.4.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica mediante software

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>									
<b>ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA MEDIANTE SOFTWARE</b>									
<b>DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO</b>									
<b>Norma:</b>	ASTM E112-10	<b>Magnificación:</b>	100X						
<b>Microestructura:</b>	Aleación CuAlNi	<b>Método:</b>	Planimétrico						
<b>CÁLCULO</b>									
		$N_A = f \left( N_i + \frac{N_C}{2} \right)$ $f = 2 \text{ Jeffries a } 100X$ $N_A = 2 \left( 0 + \frac{3}{2} \right) = 3$							
$G = (3,321928 * \log_{10} N_A) - 2,954$ $G = (3,321928 * \log_{10} 3) - 2,954 = -1,36$									
<b>ANÁLISIS DE PORCENTAJES</b>									
		 <table border="1" style="margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th>S. Bitplane(s)</th> <th>Field (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>FASE ALFA</td> <td>39,6</td> </tr> <tr> <td>FASE BETA</td> <td>60,4</td> </tr> </tbody> </table>		S. Bitplane(s)	Field (%)	FASE ALFA	39,6	FASE BETA	60,4
S. Bitplane(s)	Field (%)								
FASE ALFA	39,6								
FASE BETA	60,4								
<b>RESULTADOS:</b>									
<b>Tamaño de grano ASTM:</b>	$G = -1,36 \approx 00$								
<b>Porcentaje de fase <math>\beta</math>:</b>	60,4%								
<b>Porcentaje de fase <math>\alpha</math>:</b>	39,6%								



### 4.1.4.3. Dureza de la prueba 3

Al igual que las pruebas anteriores la determinación de dureza se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, registrando la dureza en la escala Rockwell C (HRC) del durómetro, para lo cual se utilizó el indentador de cono de diamante con una carga de 1471N.

#### 4.1.4.3.1. Ensayo de dureza de la prueba 3

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	3
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	07/02/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>		Laboratorio de Materiales - FICM	
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	17,0 ° C	<b>Radiación:</b>	0,7 W/m <sup>2</sup>
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA:</b>			
<b>Método:</b>	Rockwell C	<b>Norma aplicable:</b>	ASTM E-18
<b>Tipo de indentador:</b>		Cono de diamante	
<b>Carga aplicada:</b>	1342N	<b>Tiempo de ensayo:</b>	12 min.
<b>RESULTADO:</b>			
<b>N° de mediciones:</b>	<b>HRC</b>	<b>Dureza promedio</b>  <b>31,20 HRC</b>	
1	32,0		
2	33,0		
3	28,5		
4	29,0		
5	31,5		
6	31,0		
7	29,5		
8	31,0		
9	33,0		
10	33,5		
<b>Total:</b>	<b>312</b>		



*Figura 4. 21 Probeta 3 utilizada para el ensayo de dureza.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.4.4. Ensayo de tracción de la prueba 3**

Como se mencionó anteriormente faltó colada para llenar el molde de arena, razón por la cual no fue posible mecanizar las probetas normalizadas.



*Figura 4. 22 Probetas defectuosas extraídas del molde de arena.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.4.5. Ensayo de impacto de la prueba 3**

El ensayo de impacto no se pudo realizar porque la cantidad de colada fue insuficiente para llenar el molde y posteriormente realizar el mecanizado de las probetas normalizadas.

#### 4.1.4.6. Comprobación de memoria de forma de la prueba 3

En esta prueba no se pudo realizar la comprobación de la memoria de forma ya que no se pudo mecanizar la probeta y por consiguiente no fue posible obtener viruta o una porción de la aleación con un espesor lo suficientemente bajo para que sea manipulable con facilidad.

#### 4.1.5. Prueba 4

La prueba 4 se desarrolló en el horno de inducción del taller de fundición de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato utilizando crisol de grafito DIAMANT/BRASIL A-6 (5 ¼”) con capacidad para 5kg de colada.

**Tabla 4. 10 Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 4.**

<b>Tipo de parámetro</b>	<b>Condición de operación</b>
Voltaje	220V
Operación	Automático
Presión de agua	0,2MPa
Flujo de agua	6L/min
Tiempo de calentamiento	20s
Tiempo de permanencia	20s
Tiempo de enfriamiento	10s
Amperaje	950 – 1370A

*Fuente: (El autor)*

Debido a que en la prueba 3 faltó colada para llenar completamente el molde de arena fue necesario recalcular las cantidades de los elementos componentes de la aleación para 2kg de colada.

Fue necesario considerar: por un lado la capacidad del crisol, y por otro lado la seguridad personal, ya que es muy difícil manipular el crisol con gran peso y a temperaturas extremadamente altas.

En la tabla 4.11 se especifican las cantidades de cada elemento que se utilizó para la realización de la prueba 4:

**Tabla 4. 11 Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 4.**

Elemento	Peso en gramos
Cu	1680,3g
Al	265,1g
Ni	55,3g
<b>Total:</b>	<b>2000,7g</b>

*Fuente: (El autor)*



*Figura 4. 23 Probeta de la prueba 4 extraída del molde de arena.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.5.1. Análisis químico de la prueba 4**

Al igual que los anteriores el análisis químico de la prueba 4 se llevó a cabo en un **ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X EDX-720**, obteniéndose los siguientes resultados:



**Tabla 4. 12 Resultado del análisis químico de la prueba 4: porcentaje en peso de los elementos.**

<b>Elemento</b>	<b>% en peso</b>
Cu	79,005
Al	16,934
Ni	3,357
Si	0,531
Ca	0,172

*Fuente: (El autor)*

Como se puede observar en la tabla todavía se encuentran silicio (Si) y calcio (Ca) en proporciones considerables, especialmente el silicio. Igual que en la prueba 3, la causa probable para esta contaminación es el uso de manta cerámica contaminada como tapa.

#### **4.1.5.2. Análisis metalográfico de la prueba 4**



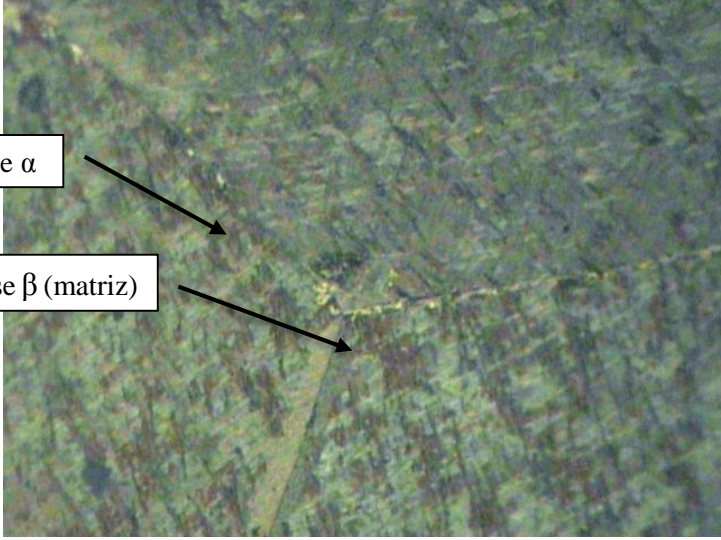
El análisis metalográfico se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.





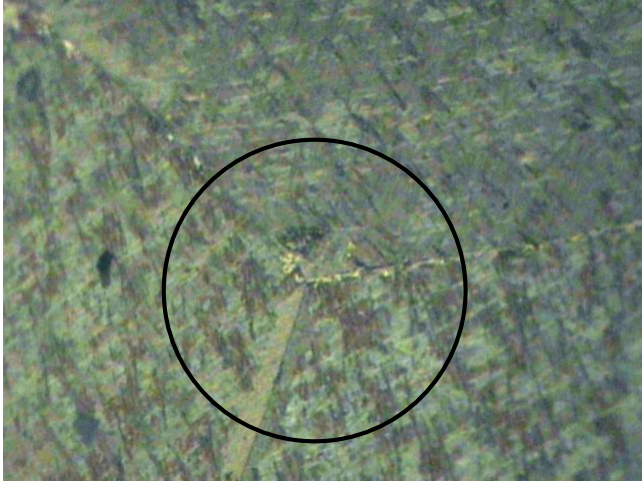
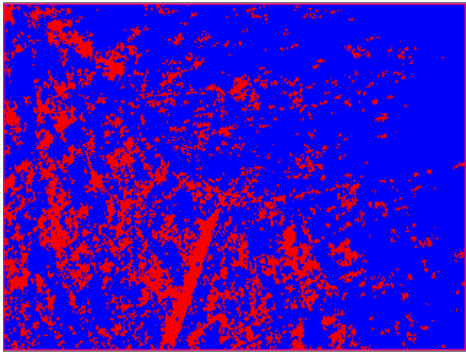
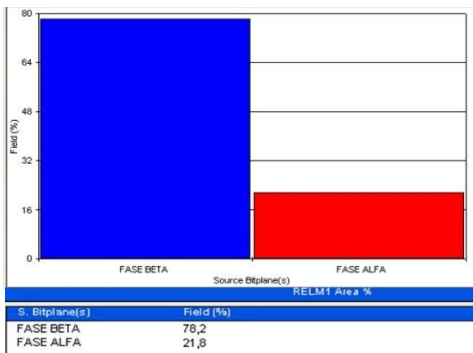
*Figura 4. 24 Probeta 4 para el análisis metalográfico.*

*Fuente: (El autor)*

#### 4.1.5.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 4

		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>			
<b>ANÁLISIS METALGRÁFICO</b>					
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>					
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	4		
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	12/02/2014		
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM				
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín		
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>					
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico				
<b>Temperatura ambiente:</b>	19,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,63 W/m <sup>2</sup>		
<b>Velocidad del aire:</b>	0,13 m/s	<b>Otros:</b>			
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALGRÁFICO:</b>					
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido mecánico				
<b>Temperatura de pulido:</b>	21 °C	<b>Tiempo de pulido:</b>	50 min		
<b>Reactivo químico:</b>	Aleaciones de cobre	<b>Tiempo de ataque:</b>	4s.		
<b>RESULTADO:</b>					
<b>FOTOGRAFÍA DE LA MICROESTRUCTURA</b>			<b>MAGNIFICACIÓN: 100X</b>		
					
<i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i>					

#### 4.1.5.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica mediante software

	<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>							
<b>ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA MEDIANTE SOFTWARE</b>								
<b>DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO</b>								
<b>Norma:</b>	ASTM E112-10	<b>Magnificación:</b> 100X						
<b>Microestructura:</b>	Aleación CuAlNi	<b>Método:</b> Planimétrico						
<b>CÁLCULO</b>								
		$N_A = f \left( N_i + \frac{N_C}{2} \right)$ $f = 2 \text{ Jeffries a } 100X$ $N_A = 2 \left( 0 + \frac{3}{2} \right) = 3$						
$G = (3,321928 * \log_{10} N_A) - 2,954$ $G = (3,321928 * \log_{10} 3) - 2,954 = -1,36$								
<b>ANÁLISIS DE PORCENTAJES</b>								
	 <table border="1" style="margin-top: 5px; border-collapse: collapse; width: 100%;"> <thead> <tr style="background-color: #4F81BD; color: white;"> <th>S. Bitplane(s)</th> <th>Field (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>FASE BETA</td> <td>78,2</td> </tr> <tr> <td>FASE ALFA</td> <td>21,8</td> </tr> </tbody> </table>		S. Bitplane(s)	Field (%)	FASE BETA	78,2	FASE ALFA	21,8
S. Bitplane(s)	Field (%)							
FASE BETA	78,2							
FASE ALFA	21,8							
<b>RESULTADOS:</b>								
<b>Tamaño de grano ASTM:</b>	$G = -1,36 \approx 00$							
<b>Porcentaje de fase <math>\beta</math>:</b>	78,2%							
<b>Porcentaje de fase <math>\alpha</math>:</b>	21,8%							

#### 4.1.5.3. Dureza de la prueba 4

De forma similar, la medición de dureza se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, visualizando las medidas en la escala Rockwell C (HRC) del durómetro, para lo cual se utilizó el indentador de cono de diamante con una carga de 1471N.

##### 4.1.5.3.1. Ensayo de dureza de la prueba 4

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	4
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	12/02/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM		
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	19,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,63 W/m <sup>2</sup>
<b>Velocidad del aire:</b>	0,13 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA:</b>			
<b>Método:</b>	Rockwell C	<b>Norma aplicable:</b>	ASTM E-18
<b>Tipo de indentador:</b>	Cono de diamante		
<b>Carga aplicada:</b>	1471N	<b>Tiempo de ensayo:</b>	15 min.
<b>RESULTADO:</b>			
<b>N° de mediciones:</b>	<b>HRC</b>	<b>Dureza promedio</b>  <b>24,0 HRC</b>	
1	30,0		
2	17,0		
3	23,5		
4	23,0		
5	25,0		
6	24,0		
7	25,0		
8	25,5		
9	21,5		
10	25,5		
<b>Total:</b>	<b>240</b>		



*Figura 4. 25 Probeta 4 utilizada para el ensayo de dureza.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.5.4. Ensayo de tracción de la prueba 4**

El ensayo de tracción de la prueba 4 no se pudo realizar porque la probeta tenía gran cantidad de porosidades y rechupes, por tal motivo no se pudo mecanizar las probetas normalizadas.



*Figura 4. 26 Probeta defectuosa con poros y rechupes.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.5.5. Ensayo de impacto de la prueba 4**

El ensayo de impacto no se pudo realizar debido a que la placa base tenía exceso de poros y rechupes, lo que imposibilitaba el maquinado.

#### **4.1.5.6. Comprobación de memoria de forma de la prueba 4**

En esta prueba tampoco se pudo realizar la comprobación de la memoria de forma ya que no se pudo obtener viruta o una porción de la aleación con un espesor lo suficientemente bajo para poder manipularlo fácilmente.

#### 4.1.6. Prueba 5

De manera semejante, esta prueba se realizó en el taller de fundición de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato utilizando el horno de inducción y un crisol de grafito DIAMANT/BRASIL A-6 (5 ¼") con capacidad para 5kg de colada cubierto con manta cerámica no combustible para minimizar las fugas de calor al exterior.

**Tabla 4. 13 Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 5.**

<b>Tipo de parámetro</b>	<b>Condición de operación</b>
Voltaje	220V
Operación	Automático
Presión de agua	0,2MPa
Flujo de agua	6L/min
Tiempo de calentamiento	20s
Tiempo de permanencia	20s
Tiempo de enfriamiento	10s
Amperaje	870 – 1410A

*Fuente: (El autor)*

Para esta prueba se utilizaron cantidades similares a las utilizadas en la prueba 4.

Las cantidades de cada elemento utilizado para 2 kg de colada durante la realización de la prueba 5 se muestran en la tabla 4.14:

**Tabla 4. 14 Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 5.**

<b>Elemento</b>	<b>Peso en gramos</b>
Cu	1680,2g
Al	265,1g
Ni	55,0g
<b>Total:</b>	<b>2000,3g</b>

*Fuente: (El autor)*



*Figura 4. 27 Probeta de la prueba 5 extraída del molde de arena.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.6.1. Análisis químico de la prueba 5**

El análisis químico de la prueba 5 no se realizó debido a que los componentes utilizados para la fabricación de la probeta normalizada entraron en las mismas cantidades en peso que para la prueba 4.

#### **4.1.6.2. Análisis metalográfico de la prueba 5**

El análisis metalográfico, al igual que las pruebas anteriores, se efectuó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.



*Figura 4. 28 Probeta 5 para el análisis metalográfico.*

*Fuente: (El autor)*




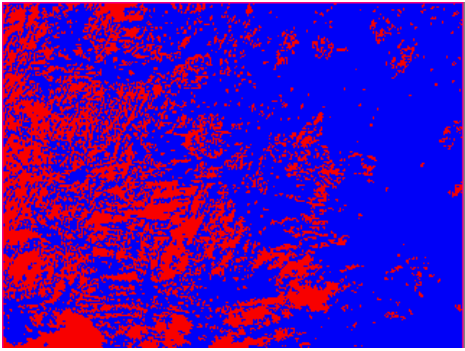
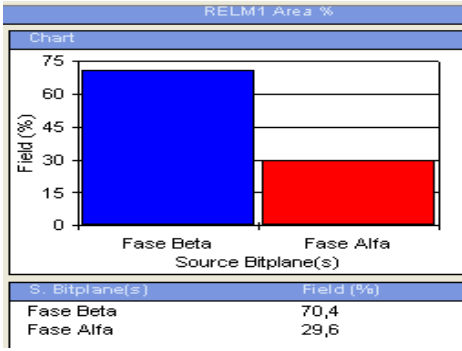


#### 4.1.6.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 5

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>			
<b>ANÁLISIS METALOGRAFICO</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	5
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	19/02/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM		
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	20,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,65 W/m <sup>2</sup>
<b>Velocidad del aire:</b>	0,13 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRAFICO:</b>			
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido mecánico		
<b>Temperatura de pulido:</b>	22 °C	<b>Tiempo de pulido:</b>	60 min
<b>Reactivo químico:</b>	Aleaciones de cobre	<b>Tiempo de ataque:</b>	4s.
<b>RESULTADO:</b>			
<b>FOTOGRAFÍA DE LA MICROESTRUCTURA</b>		<b>MAGNIFICACIÓN: 200X</b>	
			
<i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i>			



#### 4.1.6.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica mediante software

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>									
<b>ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA MEDIANTE SOFTWARE</b>									
<b>DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO</b>									
<b>Norma:</b>	ASTM E112-10	<b>Magnificación:</b>	200X						
<b>Microestructura:</b>	Aleación CuAlNi	<b>Método:</b>	Planimétrico						
<b>CÁLCULO</b>									
		$N_A = f \left( N_i + \frac{N_C}{2} \right)$ $f = 8 \text{ Jeffries a } 200X$ $N_A = 8 \left( 4 + \frac{4}{2} \right) = 48$							
$G = (3,321928 * \log_{10} N_A) - 2,954$ $G = (3,321928 * \log_{10} 48) - 2,954 = 2,63$									
<b>ANÁLISIS DE PORCENTAJES</b>									
		 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>S. Bitplane(s)</th> <th>Field (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fase Beta</td> <td>70,4</td> </tr> <tr> <td>Fase Alfa</td> <td>29,6</td> </tr> </tbody> </table>		S. Bitplane(s)	Field (%)	Fase Beta	70,4	Fase Alfa	29,6
S. Bitplane(s)	Field (%)								
Fase Beta	70,4								
Fase Alfa	29,6								
<b>RESULTADOS:</b>									
<b>Tamaño de grano ASTM:</b>	$G = 2,63 \approx 2,5$								
<b>Porcentaje de fase <math>\beta</math>:</b>	70,4%								
<b>Porcentaje de fase <math>\alpha</math>:</b>	29,6%								

#### 4.1.6.3. Dureza de la prueba 5

Al igual que las probetas anteriores, el ensayo de dureza fue ejecutado en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, cuyas medidas se visualizaron en la escala Rockwell C (HRC) del durómetro, para lo cual se utilizó el indentador de cono de diamante con una carga de 1471N.

##### 4.1.6.3.1. Ensayo de dureza de la prueba 5

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	5
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	19/02/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>		Laboratorio de Materiales - FICM	
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	20,0 ° C	<b>Radiación:</b>	0,65 W/m <sup>2</sup>
<b>Velocidad del aire:</b>	0,13 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA:</b>			
<b>Método:</b>	Rockwell C	<b>Norma aplicable:</b>	ASTM E-18
<b>Tipo de indentador:</b>		Cono de diamante	
<b>Carga aplicada:</b>	1471N	<b>Tiempo de ensayo:</b>	15 min.
<b>RESULTADO:</b>			
<b>N° de mediciones:</b>	<b>HRC</b>	<b>Dureza promedio</b>  <b>33,65 HRC</b>	
1	33,0		
2	26,5		
3	35,0		
4	35,0		
5	32,0		
6	35,0		
7	37,0		
8	35,0		
9	33,0		
10	35,0		
<b>Total:</b>	<b>336,5</b>		



*Figura 4.29 Probeta 5 utilizada para el ensayo de dureza.*

*Fuente: (El autor)*



*Figura 4.30 Identador de cono de diamante para medir dureza Rockwell C.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.6.4. Ensayo de tracción de la prueba 5**

Como se puede observar en las figuras 4.28 y 4.29 los poros existentes en el centro de la muestra son de gran tamaño lo cual dificultó el mecanizado de probetas normalizadas para el ensayo de tracción, por esta razón no se pudo ejecutar dicho ensayo. Además en la figura 4.30 se puede observar la existencia de poros superficiales de gran tamaño.



*Figura 4. 31 Presencia de poros superficiales en la probeta de la prueba 5.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.6.5. Ensayo de impacto de la prueba 5**

El ensayo de impacto no se pudo realizar porque la cantidad de colada no fue suficiente para obtener la placa base para el mecanizado de las probetas normalizadas.

#### **4.1.6.6. Comprobación de memoria de forma de la prueba 5**

No se pudo realizar la comprobación de la memoria de forma ya que no se pudo obtener viruta o una porción de la aleación con un espesor que hiciera factible la verificación de esta condición.

La alta dureza y el exceso de poros hicieron que el mecanizado de la probeta normalizada no se complete.

El material desprendido durante el mecanizado de dicha probeta era una especie de polvo metálico.

#### **4.1.7. Prueba 6**

La prueba 6, al igual que las anteriores se desarrolló en el horno de inducción del taller de fundición de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato para lo cual se utilizó un crisol de grafito DIAMANT/BRASIL A-6 (5 ¼”) con capacidad para 5kg de colada.

**Tabla 4. 15 Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 6.**

<b>Tipo de parámetro</b>	<b>Condición de operación</b>
Voltaje	220V
Operación	Automático
Presión de agua	0,2MPa
Flujo de agua	6L/min
Tiempo de calentamiento	20s
Tiempo de permanencia	20s
Tiempo de enfriamiento	10s
Amperaje	930– 1350A

*Fuente: (El autor)*

Después de revisar los resultados del ensayo químico de la prueba 4 se realizó un nuevo cálculo para modificar los porcentajes de cada componente.

Se puede observar la presencia de elementos como el silicio (Si) o el calcio (Ca) que pueden modificar las propiedades mecánicas y el comportamiento de la aleación. Se presume que la colada se contaminó con estos elementos por desprendimiento de las paredes del crisol al momento de mezclar.

En la tabla 4.14 se indican las cantidades en peso de cada elemento que se usó para la realización de la prueba 6.

**Tabla 4. 16 Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 6.**

<b>Elemento</b>	<b>Peso en gramos</b>
Cu	1786,5g
Al	207,5g
Ni	45,6g
<b>Total:</b>	2039,6g

*Fuente: (El autor)*



*Figura 4. 32 Probeta colada de la prueba 6.*

*Fuente: (El autor)*

Como se puede observar en la figura 4.32 el molde de arena se fabricó solo en la parte inferior quedando de esta manera la parte superior de la aleación expuesta al ambiente para facilitar la salida de gases de la colada y reducir el número de poros internos.

#### **4.1.7.1. Análisis químico de la prueba 6**

El análisis químico de la prueba 6 se realizó, de igual manera que las pruebas anteriores, en un **ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X EDX-720**.

Los resultados se presentan a continuación en la tabla 4.17:

**Tabla 4. 17 Resultado del análisis químico de la prueba 6: porcentaje en peso de los elementos.**

<b>Elemento</b>	<b>% en peso</b>
Cu	83,107
Al	13,162
Ni	2,726
Ca	0,388
Si	0,309
Tb	0,238
S	0,070

*Fuente: (El autor)*

En los resultados de la tabla 4.17 se observa que la muestra está contaminada con calcio (Ca), silicio (Si), terbio (Tb) y azufre (S) en pequeñas proporciones,

posiblemente por desprendimiento de las paredes del crisol al momento de agitar la colada con la barra de grafito o desprendimiento de trozos de la manta cerámica utilizada como tapa.

Es necesario mencionar que con el objeto de modificar la microestructura metalográfica de la aleación de la prueba 6 esta fue sometida a un tratamiento térmico de temple hasta conseguir martensita para que este tipo de material pueda comportarse como una aleación inteligente con memoria de forma.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las probetas estudiadas sin realizar el tratamiento térmico anteriormente mencionado.

#### **4.1.7.2. Análisis metalográfico de la prueba 6**

El análisis metalográfico de la prueba 6 se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.



*Figura 4. 33 Probeta 6 para el análisis metalográfico.*

*Fuente: (El autor)*



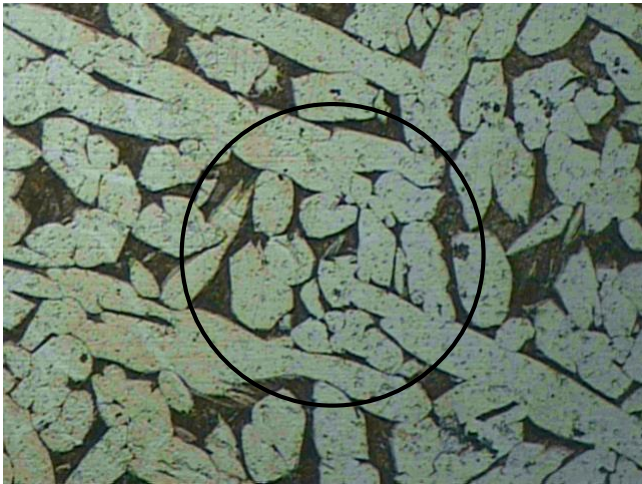
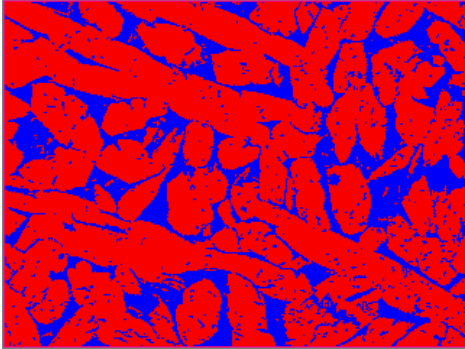
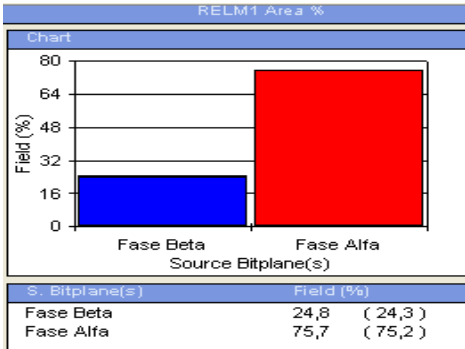


#### 4.1.7.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 6 sin templar

		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>			
<b>ANÁLISIS METALGRÁFICO</b>					
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>					
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	6		
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	12/03/2014		
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM				
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín		
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>					
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico				
<b>Temperatura ambiente:</b>	17,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,70 W/m <sup>2</sup>		
<b>Velocidad del aire:</b>	0,15 m/s	<b>Otros:</b>			
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALGRÁFICO:</b>					
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido mecánico				
<b>Temperatura de pulido:</b>	19 °C	<b>Tiempo de pulido:</b>	50 min		
<b>Reactivo químico:</b>	Aleaciones de cobre	<b>Tiempo de ataque:</b>	4s.		
<b>RESULTADO:</b>					
<b>FOTOGRAFÍA DE LA MICROESTRUCTURA</b>			<b>MAGNIFICACIÓN: 100X</b>		
					
<i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i>					




4.1.7.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica sin templar mediante software

	<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>							
<b>ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA MEDIANTE SOFTWARE</b>								
<b>DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO</b>								
<b>Norma:</b>	ASTM E112-10	<b>Magnificación:</b>	100X					
<b>Microestructura:</b>	Aleación CuAlNi	<b>Método:</b>	Planimétrico					
<b>CÁLCULO</b>								
		$N_A = f \left( N_i + \frac{N_C}{2} \right)$ $f = 2 \text{ Jeffries a } 100X$ $N_A = 2 \left( 13 + \frac{12}{2} \right) = 38$						
$G = (3,321928 * \log_{10} N_A) - 2,954$ $G = (3,321928 * \log_{10} 38) - 2,954 = 2,29$								
<b>ANÁLISIS DE PORCENTAJES</b>								
	 <table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>S. Bitplane(s)</th> <th>Field (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fase Beta</td> <td>24,8 (24,3)</td> </tr> <tr> <td>Fase Alfa</td> <td>75,7 (75,2)</td> </tr> </tbody> </table>		S. Bitplane(s)	Field (%)	Fase Beta	24,8 (24,3)	Fase Alfa	75,7 (75,2)
S. Bitplane(s)	Field (%)							
Fase Beta	24,8 (24,3)							
Fase Alfa	75,7 (75,2)							
<b>RESULTADOS:</b>								
<b>Tamaño de grano ASTM:</b>	$G = 2,29 \approx 2,5$							
<b>Porcentaje de fase <math>\beta</math>:</b>	24,8%							
<b>Porcentaje de fase <math>\alpha</math>:</b>	75,2%							

#### 4.1.7.3. Dureza de la prueba 6 sin temple

El presente ensayo de dureza se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, cuyas medidas se visualizaron en la escala Rockwell B (HRB) del durómetro, para lo cual se utilizó el indentador de esfera de acero de 1/16 de pulgada con una carga de 980N.

##### 4.1.7.3.1. Ensayo de dureza de la prueba 6

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
ENSAYO DE DUREZA			
DATOS INFORMATIVOS:			
Tipo de estudio:	De laboratorio	Muestra N°:	6
Solicitado por:	Alberto Urbina	Fecha:	12/03/2014
Centro de estudio y análisis:	Laboratorio de Materiales - FICM		
Realizado por:	Alberto Urbina	Supervisado por:	Ing. S. Espín
PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:			
Lugar:	UTA, campus Huachi Chico		
Temperatura ambiente:	17,0 °C	Radiación:	0,70 W/m <sup>2</sup>
Velocidad del aire:	0,15 m/s	Otros:	
PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA:			
Método:	Rockwell B	Norma aplicable:	ASTM E-18
Tipo de indentador:	Esfera de acero 1/16"		
Carga aplicada:	980N	Tiempo de ensayo:	15 min.
RESULTADO:			
N° de mediciones:	HRB	<b>Dureza promedio</b>  <b>73,65 HRB</b>	
1	73,0		
2	75,0		
3	73,5		
4	75,5		
5	75,0		
6	72,5		
7	75,0		
8	72,0		
9	73,0		
10	72,0		
<b>Total:</b>	<b>736,5</b>		



*Figura 4.34 Probeta 6 utilizada para el ensayo de dureza.*

*Fuente: (El autor)*





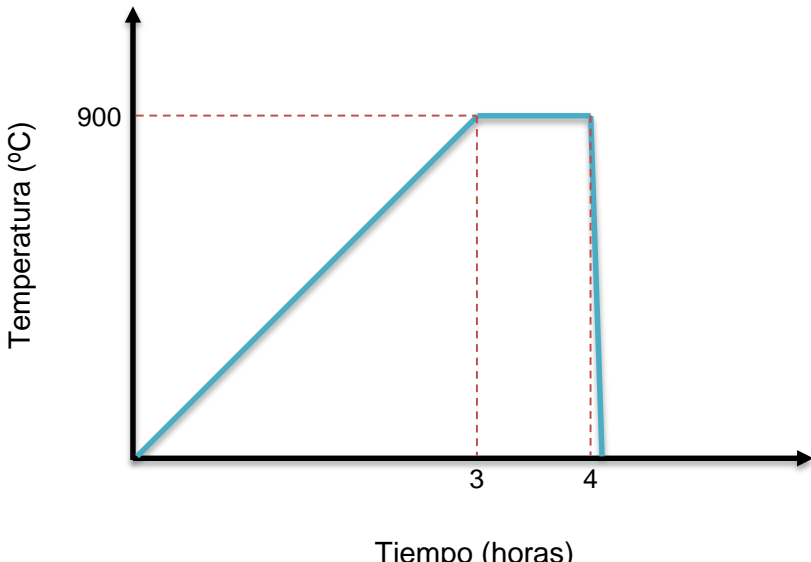
*Figura 4.35 Identador de esfera de acero de 1/16" utilizado para medir dureza Rockwell B.*

*Fuente: (El autor)*



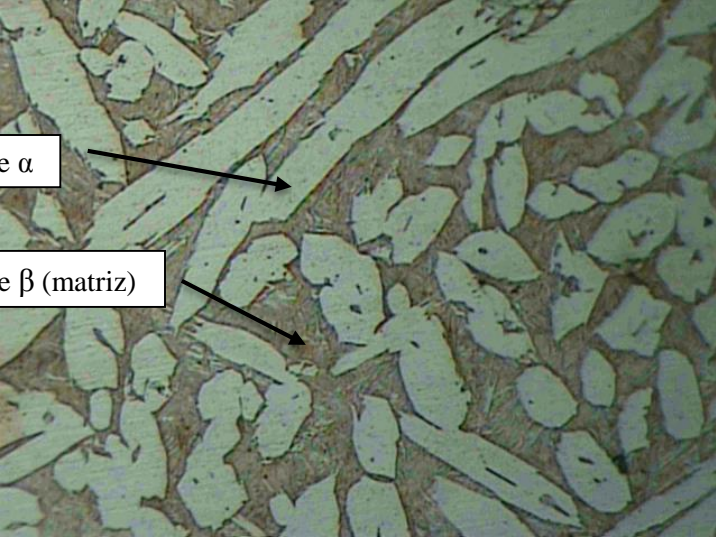
#### **4.1.7.4. Tratamiento térmico de la prueba 6: temple a 900°C**

El temple de la prueba 6 se desarrolló en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, empleando para tal objetivo un horno eléctrico de mufla. Se seleccionó la temperatura antes mencionada para realizar el tratamiento térmico de temple con base en investigaciones anteriores realizadas sobre este tipo de aleaciones.

#### 4.1.7.4.1 Tratamiento térmico de la prueba 6: temple a 900°C por una hora



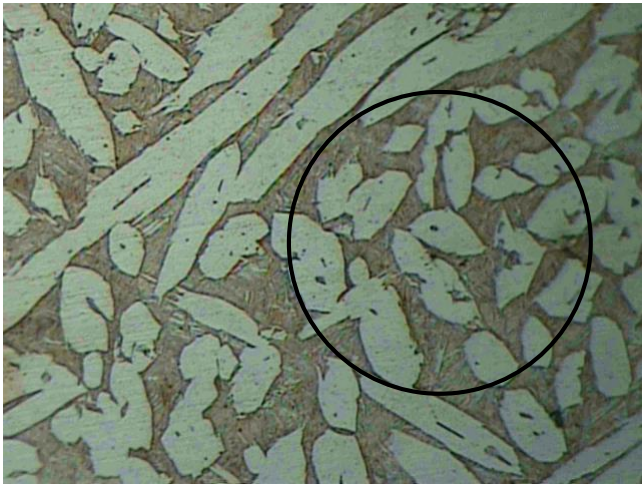
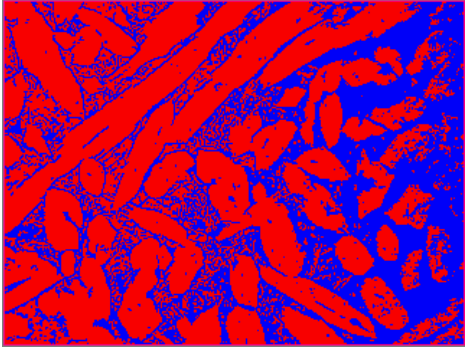
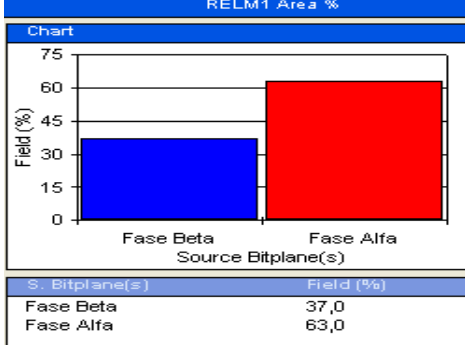
 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>TRATAMIENTO TÉRMICO</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	24/05/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM		
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	19,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,65 W/m <sup>2</sup>
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO:</b>			
<b>Tratamiento térmico:</b>	Temple	<b>Temperatura:</b>	900°C
<b>Tipo de probeta:</b>	Eje		
<b>Diámetro de la probeta:</b>	25mm		
<b>Tiempo de permanencia en el horno:</b>	1 hora		
<b>Tipo de enfriamiento:</b>	Rápido	<b>Medio de enfriamiento:</b>	Agua a 87°C
 <p>El gráfico muestra un calentamiento lineal de la temperatura desde 0°C hasta 900°C en un tiempo de 3 horas. Durante este tiempo, la temperatura se mantiene constante en 900°C hasta las 4 horas, momento en el que se inicia un enfriamiento rápido.</p>			

#### 4.1.7.4.2 Microestructura metalográfica de la prueba 6 templada

		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>			
<b>ANÁLISIS METALOGRAFICO</b>					
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>					
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	6		
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	28/05/2014		
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM				
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín		
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>					
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico				
<b>Temperatura ambiente:</b>	18,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,65 W/m <sup>2</sup>		
<b>Velocidad del aire:</b>	0,15 m/s	<b>Otros:</b>			
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRAFICO:</b>					
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido mecánico				
<b>Temperatura de pulido:</b>	21 °C	<b>Tiempo de pulido:</b>	150 min		
<b>Reactivo químico:</b>	Aleaciones de cobre	<b>Tiempo de ataque:</b>	4s.		
<b>RESULTADO:</b>					
<b>FOTOGRAFÍA DE LA MICROESTRUCTURA</b>			<b>MAGNIFICACIÓN: 100X</b>		
					
<i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i>					



4.1.7.4.3. Análisis de la microestructura metalográfica templada mediante software

	<p><b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b>  <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b>  <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b></p>								
<b>ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA MEDIANTE SOFTWARE</b>									
<b>DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO</b>									
<b>Norma:</b>	ASTM E112-10	<b>Magnificación:</b>	100X						
<b>Microestructura:</b>	Aleación CuAlNi	<b>Método:</b>	Planimétrico						
<b>CÁLCULO</b>									
		$N_A = f \left( N_i + \frac{N_c}{2} \right)$ $f = 2 \text{ Jeffries a } 100X$ $N_A = 2 \left( 7 + \frac{8}{2} \right) = 22$							
$G = (3,321928 * \log_{10} N_A) - 2,954$ $G = (3,321928 * \log_{10} 22) - 2,954 = 1,5054$									
<b>ANÁLISIS DE PORCENTAJES</b>									
		 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>S. Bitplane(s)</th> <th>Field (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fase Beta</td> <td>37,0</td> </tr> <tr> <td>Fase Alfa</td> <td>63,0</td> </tr> </tbody> </table>		S. Bitplane(s)	Field (%)	Fase Beta	37,0	Fase Alfa	63,0
S. Bitplane(s)	Field (%)								
Fase Beta	37,0								
Fase Alfa	63,0								
<b>RESULTADOS:</b>									
<b>Tamaño de grano ASTM:</b>	$G = 1,5054 \approx 1,5$								
<b>Porcentaje de fase <math>\beta</math>:</b>	37,0%								
<b>Porcentaje de fase <math>\alpha</math>:</b>	63,0%								

#### 4.1.7.5. Dureza de la prueba 6 templada

El ensayo de dureza de la prueba 6 se desarrolló en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, cuyas medidas se visualizaron en la escala Rockwell B (HRB) del durómetro, para lo cual se utilizó el indentador de esfera de acero de 1/16 de pulgada con una carga de 980N.

##### 4.1.7.5.1. Ensayo de dureza de la prueba 6 templada

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	6
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	28/05/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>		Laboratorio de Materiales - FICM	
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	18,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,65 W/m <sup>2</sup>
<b>Velocidad del aire:</b>	0,15 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA:</b>			
<b>Método:</b>	Rockwell B	<b>Norma aplicable:</b>	ASTM E-18
<b>Tipo de indentador:</b>		Esfera de acero 1/16"	
<b>Carga aplicada:</b>	980N	<b>Tiempo de ensayo:</b>	15 min.
<b>RESULTADO:</b>			
<b>N° de mediciones:</b>	<b>HRB</b>	<b>Dureza promedio</b>  <b>85,55 HRB</b>	
1	86,0		
2	82,0		
3	86,0		
4	86,0		
5	85,5		
6	84,0		
7	86,0		
8	87,0		
9	85,5		
10	87,5		
<b>Total:</b>	<b>855,5</b>		



*Figura 4. 36 Probeta 6 utilizada para el ensayo de dureza.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.7.6. Ensayo de tracción de la prueba 6**

El ensayo de tracción de la prueba 6 no se pudo realizar porque las probetas se rompieron al momento de sacarlas del horno de mufla para realizar el temple.



*Figura 4. 37 Probeta 6 rota al sacarla del horno eléctrico de mufla.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.7.7. Ensayo de impacto de la prueba 6**

El ensayo de impacto no se pudo ejecutar debido a que la placa base se rompió al momento de sacarla del horno eléctrico de mufla.

#### **4.1.7.8. Comprobación de memoria de forma de la probeta 6**

Debido a que las probetas se rompieron durante el tratamiento térmico no fue posible el mecanizado de probetas normalizadas y mucho menos obtener viruta o una parte de la aleación con un espesor adecuado para este objetivo.



#### 4.1.8. Prueba 7

El ensayo 7 se realizó en el horno de inducción del taller de fundición de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato para lo cual se utilizó un crisol de grafito DIAMANT/BRASIL A-6 (5 ¼”) con capacidad para 5kg de colada, cortado para que se ajuste al tamaño de la bobina del horno.

**Tabla 4. 18 Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 7.**

Tipo de parámetro	Condición de operación
Voltaje	220V
Operación	Automático
Presión de agua	0,2MPa
Flujo de agua	6L/min
Tiempo de calentamiento	20s
Tiempo de permanencia	20s
Tiempo de enfriamiento	10s
Amperaje	910– 1320A

*Fuente: (El autor)*

La cantidad de componentes de la aleación en peso utilizados para la elaboración de la prueba 7 se detallan en la siguiente tabla:

**Tabla 4. 19 Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 7.**

Elemento	Peso en gramos
Cu	1786,6g
Al	207,8g
Ni	45,4g
<b>Total:</b>	<b>2039,8g</b>

*Fuente: (El autor)*

#### 4.1.8.1. Análisis químico de la prueba 7

El análisis químico de la prueba 7 se llevó a cabo en un **ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X EDX-720**, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 4.20:

**Tabla 4. 20 Resultado del análisis químico de la prueba 7: porcentaje en peso de los elementos.**

<b>Elemento</b>	<b>% en peso</b>
Cu	82,682
Al	13,607
Ni	2,757
Si	0,440
Ca	0,239
Tb	0,214
S	0,061

*Fuente: (El autor)*

De acuerdo a los resultados del análisis químico todavía se observa la presencia de calcio (Ca), silicio (Si), terbio (Tb) y azufre (S) cuya presencia posiblemente se debe al desprendimiento de las paredes del crisol al momento de la agitación de la colada con la barra de grafito.



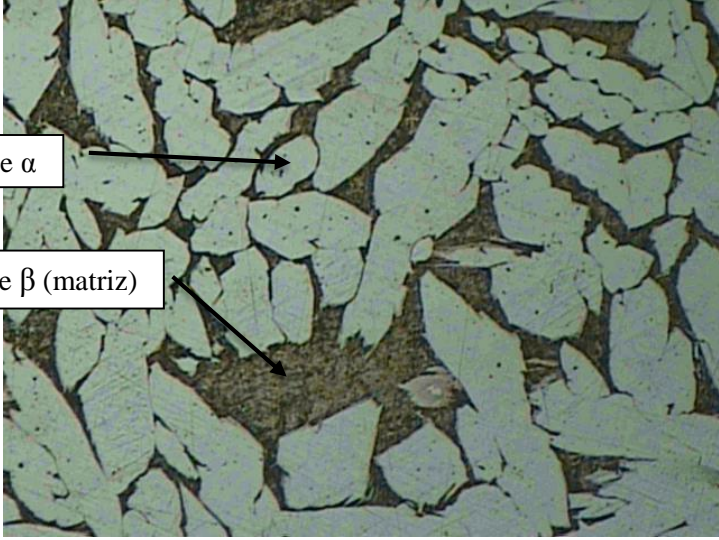
Al igual que la prueba 6, la prueba 7 también fue sometida a un tratamiento térmico de temple para modificar la microestructura metalográfica con el objetivo de obtener martensita.

En primer lugar se van a presentar los resultados obtenidos del estudio de las probetas sin el tratamiento térmico.




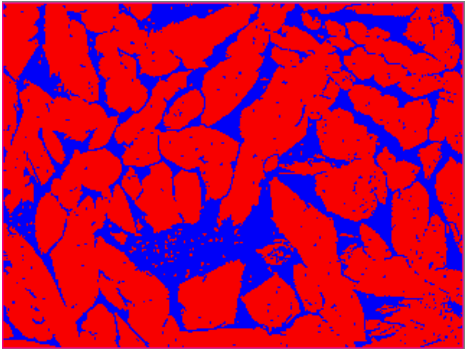
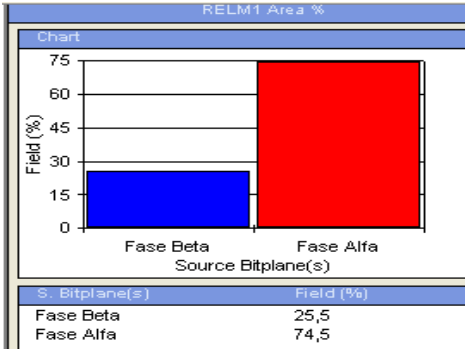
#### 4.1.8.2. Análisis metalográfico de la prueba 7

El análisis metalográfico de la prueba 7 se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

#### 4.1.8.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 7 sin templar

		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>			
<b>ANÁLISIS METALGRÁFICO</b>					
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>					
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	7		
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	13/03/2014		
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM				
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín		
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>					
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico				
<b>Temperatura ambiente:</b>	19,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,65 W/m <sup>2</sup>		
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>			
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALGRÁFICO:</b>					
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido mecánico				
<b>Temperatura de pulido:</b>	21 °C	<b>Tiempo de pulido:</b>	55 min		
<b>Reactivo químico:</b>	Aleaciones de cobre	<b>Tiempo de ataque:</b>	4s.		
<b>RESULTADO:</b>					
<b>FOTOGRAFÍA DE LA MICROESTRUCTURA</b>			<b>MAGNIFICACIÓN: 100X</b>		
					
<p><i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i></p>					

4.1.8.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica sin templar mediante software

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>									
<b>ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA MEDIANTE SOFTWARE</b>									
<b>DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO</b>									
<b>Norma:</b>	ASTM E112-10	<b>Magnificación:</b>	100X						
<b>Microestructura:</b>	Aleación CuAlNi	<b>Método:</b>	Planimétrico						
<b>CÁLCULO</b>									
		$N_A = f \left( N_i + \frac{N_c}{2} \right)$ $f = 2 \text{ Jeffries a } 100X$ $N_A = 2 \left( 6 + \frac{8}{2} \right) = 20$							
$G = (3,321928 * \log_{10} N_A) - 2,954$ $G = (3,321928 * \log_{10} 20) - 2,954 = 1,3679$									
<b>ANÁLISIS DE PORCENTAJES</b>									
		 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>S. Bitplane(s)</th> <th>Field (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fase Beta</td> <td>25,5</td> </tr> <tr> <td>Fase Alfa</td> <td>74,5</td> </tr> </tbody> </table>		S. Bitplane(s)	Field (%)	Fase Beta	25,5	Fase Alfa	74,5
S. Bitplane(s)	Field (%)								
Fase Beta	25,5								
Fase Alfa	74,5								
<b>RESULTADOS:</b>									
<b>Tamaño de grano ASTM:</b>	$G = 1,37 \approx 1,5$								
<b>Porcentaje de fase <math>\beta</math>:</b>	25,5%								
<b>Porcentaje de fase <math>\alpha</math>:</b>	74,5%								

#### 4.1.8.3. Dureza de la prueba 7 sin temple

El ensayo de dureza de la prueba 7 se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, cuyas medidas se visualizaron en la escala Rockwell B (HRB) del durómetro, para lo cual se utilizó el indentador de esfera de acero de 1/16 de pulgada con una carga de 980N.

##### 4.1.8.3.1. Ensayo de dureza de la prueba 7

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	7
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	13/03/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM		
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	19,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,65 W/m <sup>2</sup>
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA:</b>			
<b>Método:</b>	Rockwell B	<b>Norma aplicable:</b>	ASTM E-18
<b>Tipo de indentador:</b>	Esfera de acero 1/16"		
<b>Carga aplicada:</b>	980N	<b>Tiempo de ensayo:</b>	15 min.
<b>RESULTADO:</b>			
<b>N° de mediciones:</b>	<b>HRB</b>	<b>Dureza promedio</b>  <b>73,88 HRB</b>	
1	75,5		
2	73,5		
3	74,0		
4	76,0		
5	73,2		
6	75,0		
7	70,2		
8	74,0		
9	73,4		
10	74,0		
<b>Total:</b>	<b>738,8</b>		



*Figura 4. 38 Probeta 7 utilizada para el ensayo de dureza.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.8.4. Tratamiento térmico de la prueba 7: temple a 900°C**



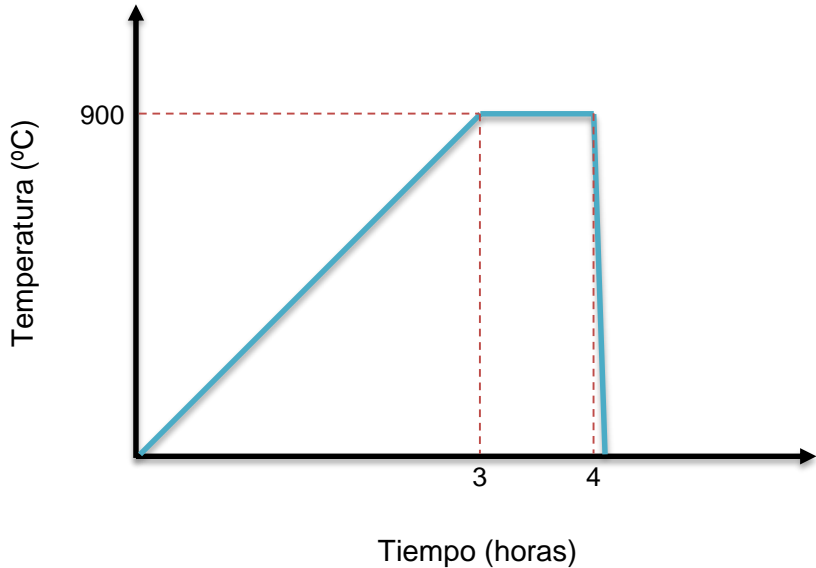
El temple de la prueba 7 se desarrolló en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, empleando para tal objetivo un horno eléctrico de mufla.

Este ensayo se realizó en forma simultánea con la prueba 6.

Al igual que la prueba 6, la probeta del presente ensayo se rompió al momento de ser extraída del horno eléctrico de mufla, sin embargo el temple si se pudo realizar ya que los pedazos fueron enfriados en agua a 87°C.



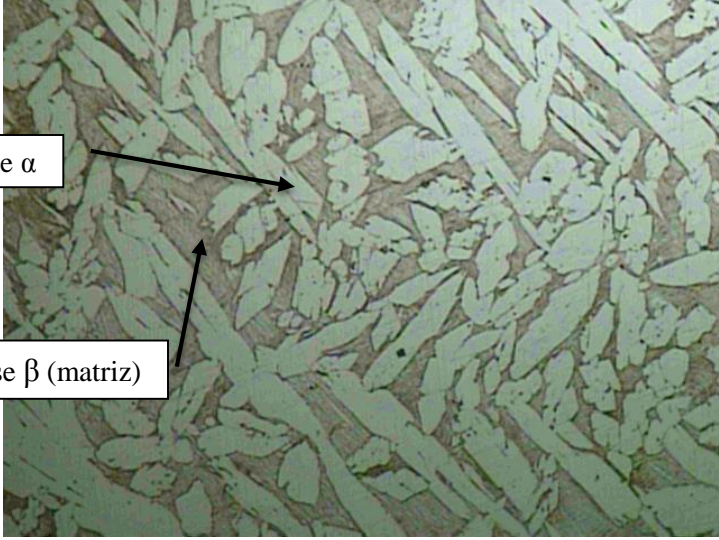
Después del temple se realizaron los ensayos metalográficos y de dureza de la prueba 7 para comparar con los resultados obtenidos anteriormente en los ensayos realizados a la prueba 6.

#### 4.1.8.4.1 Tratamiento térmico de la prueba 7: temple a 900°C por una hora

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>TRATAMIENTO TÉRMICO</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	24/05/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM		
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	19,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,65 W/m <sup>2</sup>
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO:</b>			
<b>Tratamiento térmico:</b>	Temple	<b>Temperatura:</b>	900°C
<b>Tipo de probeta:</b>	Eje		
<b>Diámetro de la probeta:</b>	25mm		
<b>Tiempo de permanencia en el horno:</b>	1 hora		
<b>Tipo de enfriamiento:</b>	Rápido	<b>Medio de enfriamiento:</b>	Agua a 87°C
 <p>Temperatura (°C)</p> <p>900</p> <p>3 4</p> <p>Tiempo (horas)</p>			



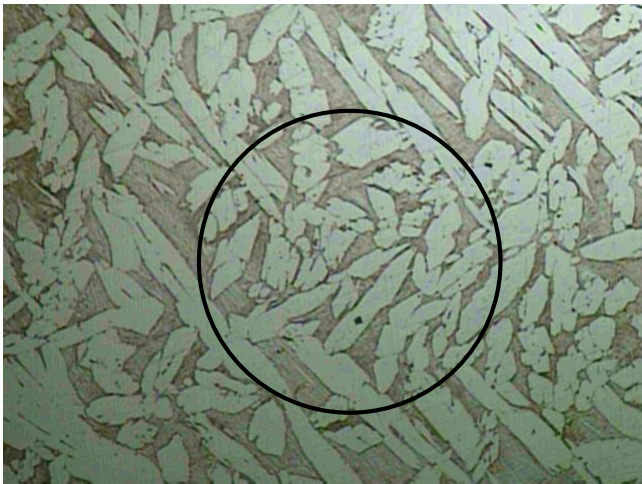
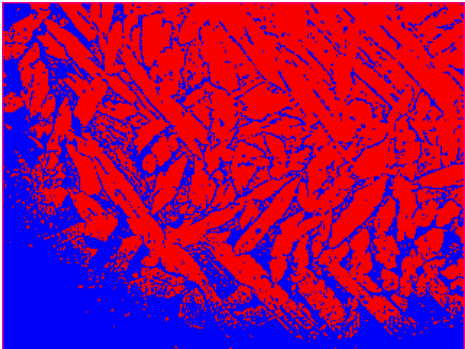
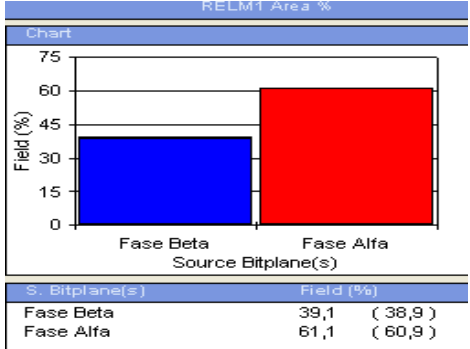


#### 4.1.8.4.2 Microestructura metalográfica de la prueba 7 templada

		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>			
<b>ANÁLISIS METALOGRAFICO</b>					
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>					
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	7		
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	31/05/2014		
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM				
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín		
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>					
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico				
<b>Temperatura ambiente:</b>	17,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,67 W/m <sup>2</sup>		
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>			
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRAFICO:</b>					
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido mecánico				
<b>Temperatura de pulido:</b>	19 °C	<b>Tiempo de pulido:</b>	155 min		
<b>Reactivo químico:</b>	Aleaciones de cobre	<b>Tiempo de ataque:</b>	4s.		
<b>RESULTADO:</b>					
<b>FOTOGRAFÍA DE LA MICROESTRUCTURA</b>			<b>MAGNIFICACIÓN: 100X</b>		
					
<p><i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i></p>					



4.1.8.4.3. Análisis de la microestructura metalográfica templada mediante software

	<p><b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b>  <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b>  <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b></p>								
<b>ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA MEDIANTE SOFTWARE</b>									
<b>DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO</b>									
<b>Norma:</b>	ASTM E112-10	<b>Magnificación:</b>	100X						
<b>Microestructura:</b>	Aleación CuAlNi	<b>Método:</b>	Planimétrico						
<b>CÁLCULO</b>									
		$N_A = f \left( N_i + \frac{N_c}{2} \right)$ $f = 2 \text{ Jeffries a } 100X$ $N_A = 2 \left( 22 + \frac{12}{2} \right) = 56$							
$G = (3,321928 * \log_{10} N_A) - 2,954$ $G = (3,321928 * \log_{10} 56) - 2,954 = 2,8533$									
<b>ANÁLISIS DE PORCENTAJES</b>									
		 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>S. Bitplane(s)</th> <th>Field (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fase Beta</td> <td>39,1 ( 38,9 )</td> </tr> <tr> <td>Fase Alfa</td> <td>61,1 ( 60,9 )</td> </tr> </tbody> </table>		S. Bitplane(s)	Field (%)	Fase Beta	39,1 ( 38,9 )	Fase Alfa	61,1 ( 60,9 )
S. Bitplane(s)	Field (%)								
Fase Beta	39,1 ( 38,9 )								
Fase Alfa	61,1 ( 60,9 )								
<b>RESULTADOS:</b>									
<b>Tamaño de grano ASTM:</b>	$G = 2,8533 \approx 3$								
<b>Porcentaje de fase <math>\beta</math>:</b>	39,1%								
<b>Porcentaje de fase <math>\alpha</math>:</b>	61,1%								

#### 4.1.8.5. Dureza de la prueba 7 templada

El ensayo de dureza de la prueba 7 se realizó en el Laboratorio de Metalografía de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato. Las medidas se visualizaron en la escala Rockwell B (HRB) del durómetro, utilizando el indentador de esfera de acero de 1/16 de pulgada con una carga de 980N.

##### 4.1.8.5.1. Ensayo de dureza de la prueba 7 templada

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	7
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	31/05/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>		Laboratorio de Materiales - FICM	
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	17,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,67 W/m <sup>2</sup>
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA:</b>			
<b>Método:</b>	Rockwell B	<b>Norma aplicable:</b>	ASTM E-18
<b>Tipo de indentador:</b>		Esfera de acero 1/16"	
<b>Carga aplicada:</b>	980N	<b>Tiempo de ensayo:</b>	15 min.
<b>RESULTADO:</b>			
<b>N° de mediciones:</b>	<b>HRB</b>	<b>Dureza promedio</b>  <b>84,05 HRB</b>	
1	84,5		
2	85,0		
3	82,5		
4	83,0		
5	85,5		
6	84,0		
7	83,5		
8	85,0		
9	84,5		
10	83,0		
<b>Total:</b>	<b>840,5</b>		



*Figura 4.39 Probeta 7 utilizada para el ensayo de dureza.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.8.6. Ensayo de tracción de la prueba 7**

No se pudo realizar el ensayo de tracción de prueba 7 porque al igual que la probeta de la prueba 6 se rompió al momento de sacarla del horno eléctrico de mufla.



*Figura 4.40 Probeta 7 rota al sacarla del horno eléctrico de mufla.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.8.7. Ensayo de impacto de la prueba 7**

El ensayo de impacto no se realizó porque no la colada no fue suficiente para obtener una placa base y maquinarse las probetas normalizadas para este propósito.

#### **4.1.8.8. Comprobación de memoria de forma de la probeta 7**

Tampoco se pudo realizar esta comprobación ya que las pruebas se rompieron durante el tratamiento térmico y no fue posible el mecanizado de probetas normalizadas y mucho menos obtener viruta para este propósito.

#### 4.1.9. Prueba 8

El ensayo 8, al igual que los demás se ejecutó en el horno de inducción del taller de fundición de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato para lo cual se utilizó un crisol de grafito DIAMANT/BRASIL A-6 (5 ¼”) con capacidad para 5kg de colada, cortado para que se ajuste al tamaño de la bobina del horno.

**Tabla 4. 21 Parámetros de funcionamiento del horno de inducción durante la prueba 8.**

<b>Tipo de parámetro</b>	<b>Condición de operación</b>
Voltaje	220V
Operación	Automático
Presión de agua	0,2MPa
Flujo de agua	6L/min
Tiempo de calentamiento	20s
Tiempo de permanencia	20s
Tiempo de enfriamiento	10s
Amperaje	850– 1350A

*Fuente: (El autor)*

La cantidad de componentes en peso de la prueba 8 empleados para la fabricación de la aleación se muestran en la tabla 4.22:

**Tabla 4. 22 Cantidad de peso en gramos de cada elemento, prueba 8.**

<b>Elemento</b>	<b>Peso en gramos</b>
Cu	1786,8g
Al	207,8g
Ni	45,4g
<b>Total:</b>	2040,0g

*Fuente: (El autor)*

#### 4.1.9.1. Análisis químico de la prueba 8

El análisis químico de la prueba 8 se realizó en un **ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X EDX-720**, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 4.23:

**Tabla 4. 23 Resultado del análisis químico de la prueba 8: porcentaje en peso de los elementos.**

<b>Elemento</b>	<b>% en peso</b>
Cu	83,369
Al	13,405
Ni	2,756
Otros	0,47

*Fuente: (El autor)*

Con la finalidad de obtener martensita, la presente prueba también fue sometida a un tratamiento térmico de temple para modificar la microestructura metalográfica.



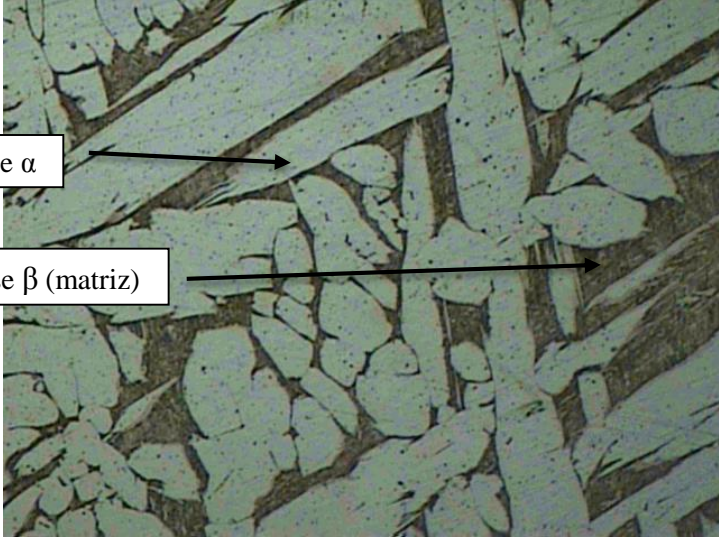
Fue necesario modificar las condiciones de enfriamiento ya que en las pruebas anteriores no se obtuvieron los resultados deseados.

A continuación se van a presentar primero los resultados obtenidos de las probetas sin temple y posteriormente los resultados del tratamiento térmico.



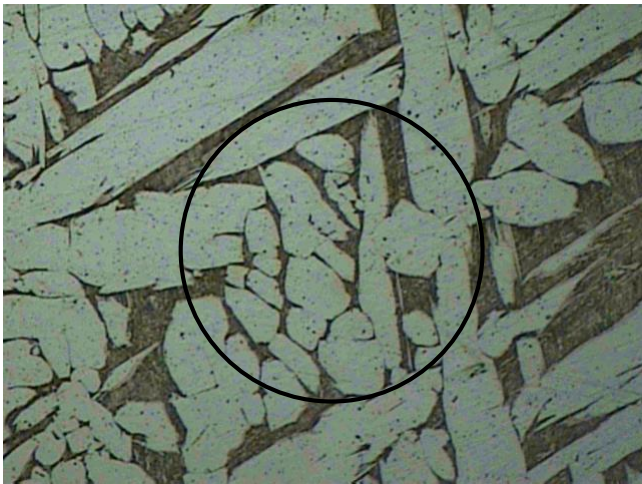
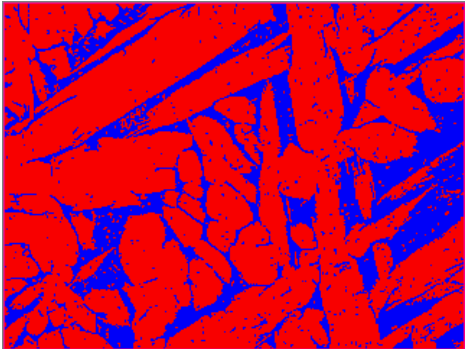
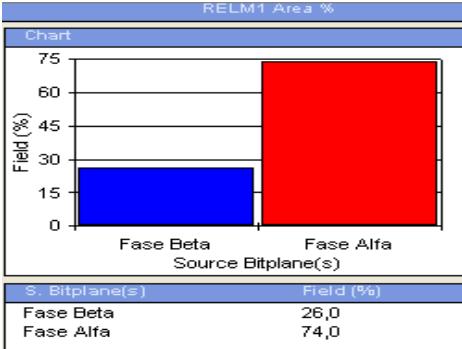
#### 4.1.9.2. Análisis metalográfico de la prueba 8

El análisis metalográfico de la prueba 8 se desarrolló en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

#### 4.1.9.2.1. Microestructura metalográfica de la prueba 8 sin templar

		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>			
<b>ANÁLISIS METALGRÁFICO</b>					
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>					
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	8		
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	07/06/2014		
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM				
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín		
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>					
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico				
<b>Temperatura ambiente:</b>	17,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,65 W/m <sup>2</sup>		
<b>Velocidad del aire:</b>	0,15 m/s	<b>Otros:</b>			
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALGRÁFICO:</b>					
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido mecánico				
<b>Temperatura de pulido:</b>	20 °C	<b>Tiempo de pulido:</b>	50 min		
<b>Reactivo químico:</b>	Aleaciones de cobre	<b>Tiempo de ataque:</b>	4s.		
<b>RESULTADO:</b>					
<b>FOTOGRAFÍA DE LA MICROESTRUCTURA</b>			<b>MAGNIFICACIÓN: 100X</b>		
					
<i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i>					

4.1.9.2.2. Análisis de la microestructura metalográfica sin templar mediante software

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>									
<b>ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA MEDIANTE SOFTWARE</b>									
<b>DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO</b>									
<b>Norma:</b>	ASTM E112-10	<b>Magnificación:</b>	100X						
<b>Microestructura:</b>	Aleación CuAlNi	<b>Método:</b>	Planimétrico						
<b>CÁLCULO</b>									
		$N_A = f \left( N_i + \frac{N_c}{2} \right)$ $f = 2 \text{ Jeffries a } 100X$ $N_A = 2 \left( 11 + \frac{5}{2} \right) = 27$							
$G = (3,321928 * \log_{10} N_A) - 2,954$ $G = (3,321928 * \log_{10} 27) - 2,954 = 1,8$									
<b>ANÁLISIS DE PORCENTAJES</b>									
		 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>S. Bitplane(s)</th> <th>Field (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fase Beta</td> <td>26,0</td> </tr> <tr> <td>Fase Alfa</td> <td>74,0</td> </tr> </tbody> </table>		S. Bitplane(s)	Field (%)	Fase Beta	26,0	Fase Alfa	74,0
S. Bitplane(s)	Field (%)								
Fase Beta	26,0								
Fase Alfa	74,0								
<b>RESULTADOS:</b>									
<b>Tamaño de grano ASTM:</b>	$G = 1,8 \approx 2$								
<b>Porcentaje de fase <math>\beta</math>:</b>	26,0%								
<b>Porcentaje de fase <math>\alpha</math>:</b>	74,0%								



#### 4.1.9.3. Dureza de la prueba 8 sin temple

El ensayo de dureza de la prueba 8 sin temple se realizó en el Taller Mecánico Industrial de CELEC EP Unidad de Negocios HIDROAGOYÁN, para el cual se utilizó un durómetro digital EQUOTIP y cuyos resultados se visualizaron en la escala de dureza Brinell.

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	8
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	06/12/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Taller Mecánico Ind. CELEC EP		
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. K. Zhañay
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	23,0 °C	<b>Radiación:</b>	N. A.
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA:</b>			
<b>Método:</b>	Brinell	<b>Norma aplicable:</b>	ASTM E-10
<b>Tipo de indentador:</b>	N. A.		
<b>Carga aplicada:</b>	N. A.	<b>Tiempo de ensayo:</b>	15 min.
<b>RESULTADO:</b>			
<b>N° de mediciones:</b>	<b>HB</b>	<b>Dureza promedio</b>  <b>95,4 HB ≈ 56,2 HRB</b>	
1	93		
2	89		
3	100		
4	91		
5	94		
6	98		
7	98		
8	100		
9	98		
10	93		
<b>Total:</b>	<b>954,0</b>		





*Figura 4. 41 Probeta 8 sin templar utilizada para el ensayo de dureza.*

*Fuente: (El autor)*





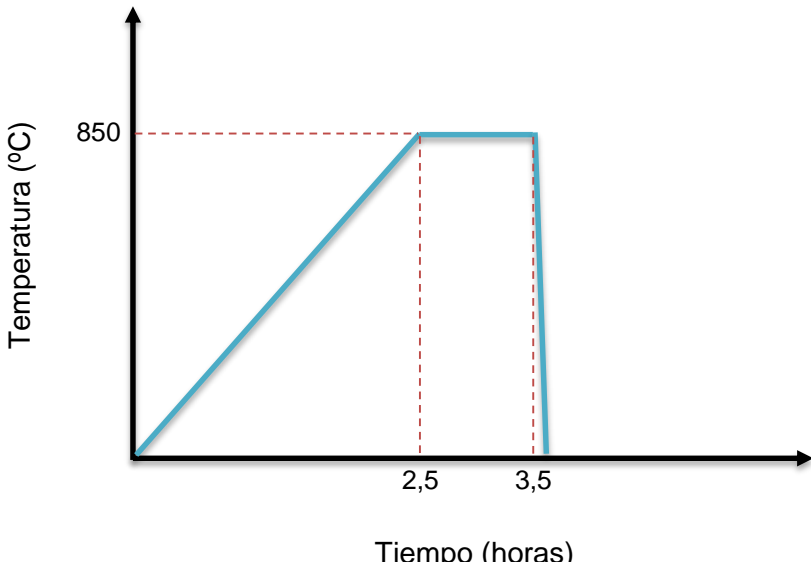
*Figura 4. 42 Durómetro digital EQUOTIP del Taller Mecánico Industrial CELEC EP – HIDROAGOYÁN.*

*Fuente: (El autor)*

#### **4.1.9.4. Tratamiento térmico de la prueba 8: temple a 850°C**

El temple de la prueba 8 se desarrolló en el horno eléctrico de mufla del Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.



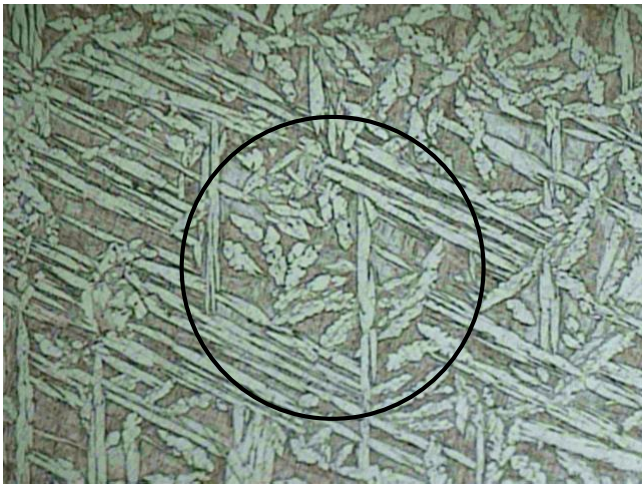
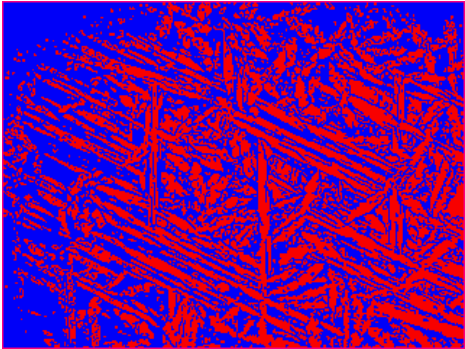
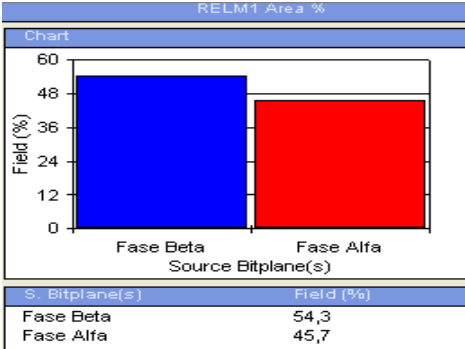
#### 4.1.9.4.1 Tratamiento térmico de la prueba 8: temple a 850°C por una hora

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>TRATAMIENTO TÉRMICO</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	23/08/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM		
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	18,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,63 W/m <sup>2</sup>
<b>Velocidad del aire:</b>	0,15 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO:</b>			
<b>Tratamiento térmico:</b>	Temple	<b>Temperatura:</b>	850°C
<b>Tipo de probeta:</b>	Eje		
<b>Diámetro de la probeta:</b>	25mm		
<b>Tiempo de permanencia en el horno:</b>	1 hora		
<b>Tipo de enfriamiento:</b>	Rápido	<b>Medio de enfriamiento:</b>	Agua a 14,4°C
 <p>El gráfico muestra un calentamiento lineal de la temperatura desde 0°C hasta 850°C en un tiempo de 2,5 horas. Se mantiene constante a 850°C durante 1 hora (hasta 3,5 horas). Después de 3,5 horas, se realiza un enfriamiento rápido.</p>			

#### 4.1.9.4.2 Microestructura metalográfica de la prueba 8 templada

		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>			
<b>ANÁLISIS METALGRÁFICO</b>					
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>					
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	7		
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	27/08/2014		
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM				
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín		
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>					
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico				
<b>Temperatura ambiente:</b>	18,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,65 W/m <sup>2</sup>		
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>			
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALGRÁFICO:</b>					
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido mecánico				
<b>Temperatura de pulido:</b>	20 °C	<b>Tiempo de pulido:</b>	160 min		
<b>Reactivo químico:</b>	Aleaciones de cobre	<b>Tiempo de ataque:</b>	4s.		
<b>RESULTADO:</b>					
<b>FOTOGRAFÍA DE LA MICROESTRUCTURA</b>			<b>MAGNIFICACIÓN: 100X</b>		
					
<p><i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i></p>					

4.1.9.4.3. Análisis de la microestructura metalográfica templada mediante software

	<p><b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b>  <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b>  <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b></p>								
<b>ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA MEDIANTE SOFTWARE</b>									
<b>DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO</b>									
<b>Norma:</b>	ASTM E112-10	<b>Magnificación:</b>	100X						
<b>Microestructura:</b>	Aleación CuAlNi	<b>Método:</b>	Planimétrico						
<b>CÁLCULO</b>									
		$N_A = f \left( N_i + \frac{N_c}{2} \right)$ $f = 2 \text{ Jeffries a } 100X$ $N_A = 2 \left( 32 + \frac{24}{2} \right) = 88$							
$G = (3,321928 * \log_{10} N_A) - 2,954$ $G = (3,321928 * \log_{10} 56) - 2,954 = 3,5054$									
<b>ANÁLISIS DE PORCENTAJES</b>									
		 <table border="1" style="margin-top: 10px; width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #4F81BD; color: white;"> <th>S. Bitplane(s)</th> <th>Field (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fase Beta</td> <td>54,3</td> </tr> <tr> <td>Fase Alfa</td> <td>45,7</td> </tr> </tbody> </table>		S. Bitplane(s)	Field (%)	Fase Beta	54,3	Fase Alfa	45,7
S. Bitplane(s)	Field (%)								
Fase Beta	54,3								
Fase Alfa	45,7								
<b>RESULTADOS:</b>									
<b>Tamaño de grano ASTM:</b>	$G = 3,5054 \approx 3,5$								
<b>Porcentaje de fase <math>\beta</math>:</b>	54,3%								
<b>Porcentaje de fase <math>\alpha</math>:</b>	45,7%								

#### 4.1.9.5. Dureza de la prueba 8 templada

El ensayo de dureza de la prueba 8 templada se realizó en el Taller Mecánico Industrial de CELEC EP Unidad de Negocios HIDROAGOYÁN, para el cual se utilizó un durómetro digital EQUOTIP y cuyos resultados se visualizaron en la escala de dureza Brinell.

##### 4.1.9.5.1. Ensayo de dureza de la prueba 8 templada

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	8
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	06/12/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Taller Mecánico Ind. CELEC EP		
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. K. Zhañay
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	23,0 °C	<b>Radiación:</b>	N. A.
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA:</b>			
<b>Método:</b>	Brinell	<b>Norma aplicable:</b>	ASTM E-10
<b>Tipo de indentador:</b>	N. A.		
<b>Carga aplicada:</b>	N. A.	<b>Tiempo de ensayo:</b>	15 min.
<b>RESULTADO:</b>			
<b>N° de mediciones:</b>	<b>HB</b>	<b>Dureza promedio</b>  <b>118,6 HB ≈ 69 HRB</b>	
1	132		
2	138		
3	107		
4	120		
5	124		
6	113		
7	108		
8	115		
9	118		
10	111		
<b>Total:</b>	<b>118,6</b>		





*Figura 4. 43 Probetas de la prueba 8 templadas utilizadas para el ensayo de dureza.*

*Fuente: (El Autor)*

#### **4.1.9.6. Ensayo de tracción de la prueba 8 templada**



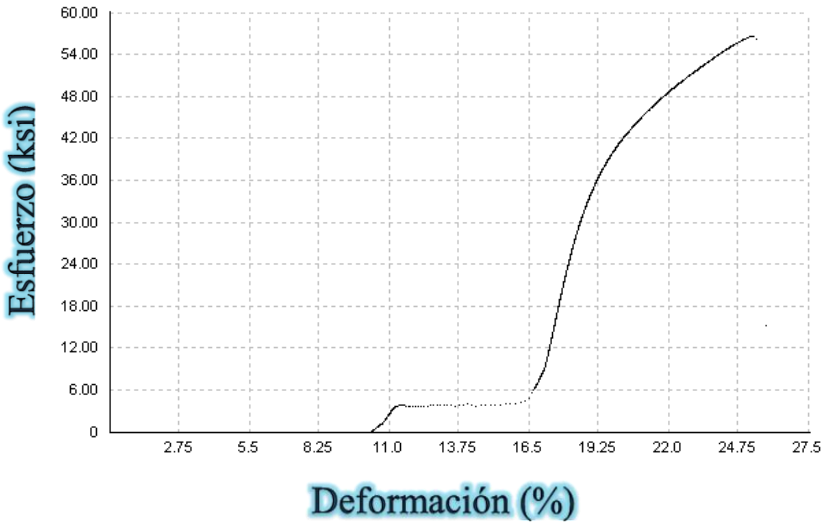
El ensayo de tracción de las probetas de la prueba 8 se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.



*Figura 4. 44 Probetas rotas de la prueba 8 después de realizado el ensayo de tracción.*

*Fuente: (El Autor)*

#### 4.1.9.6.1 Ensayo de tracción de la prueba 8 templada

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>ENSAYO DE TRACCIÓN</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Probeta N°:</b>	8.1	<b>Tratamiento térmico:</b>	Temple
<b>Temperatura de tratamiento térmico:</b>	850°C	<b>Tiempo del tratamiento térmico:</b>	1 hora
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha de ejecución:</b>	15/01/2015
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones EPN		
<b>Método aplicado:</b>	Deformación controlada		
<b>Diámetro de la probeta:</b>	½"	<b>Longitud de calibración:</b>	2"
<b>Norma:</b>	ASTM E8		
<b>RESULTADO:</b>			
<p><b>Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación</b></p> <p><b>Aleación CuAlNi temple: 850°C, enfriada en agua a 14,4°C</b></p> 			
<b>Diámetro promedio:</b>	12,51 mm		
<b>Carga máxima registrada:</b>	10790 lbf	47996 N	4893,42 kg
<b>Límite de fluencia (Sy):</b>	35,5 ksi	245,0 MPa	2495,47 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Resistencia a la tracción (Sut):</b>	56,6 ksi	390,5 MPa	3978,69 kg/cm <sup>2</sup>
<b>% de Elongación en 50 mm (ε):</b>	6,0%		
<b>Tipo de falla:</b>	Irregular		
<b>Observaciones:</b>	La probeta se rompió dentro de las marcas		



## ENSAYO DE TRACCIÓN

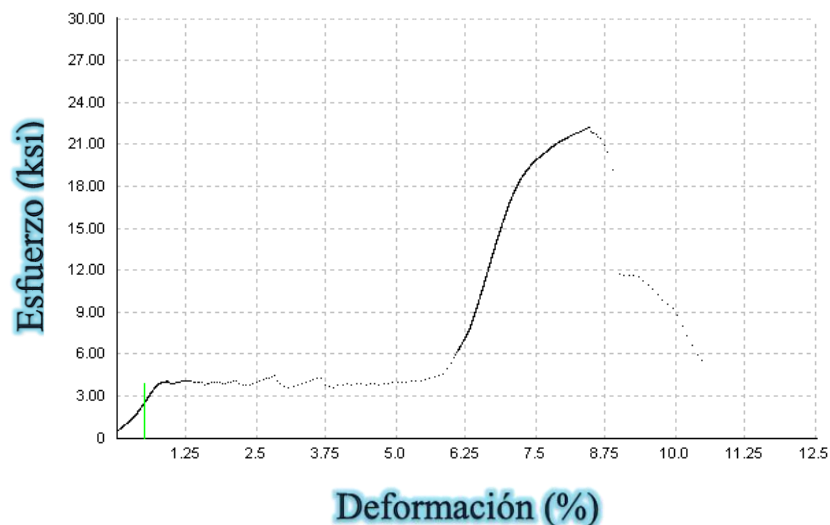
### DATOS INFORMATIVOS:

Probeta N°:	8.2	Tratamiento térmico:	Temple
Temperatura de tratamiento térmico:	850°C	Tiempo del tratamiento térmico:	1 hora
Solicitado por:	Alberto Urbina	Fecha de ejecución:	15/01/2015
Centro de estudio:	Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones EPN		
Método aplicado:	Deformación controlada		
Diámetro de la probeta:	1/2"	Longitud de calibración:	2"
Norma:	ASTM E8		

### RESULTADO:

#### Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación

Aleación CuAlNi temple: 850°C, enfriada en agua a 14,4°C



Diámetro promedio:	12,52 mm		
Carga máxima registrada:	4230 lbf	18816 N	1918.37 kg
Límite de fluencia (Sy):	19,7 ksi	136,2 MPa	1384,81 kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la tracción (Sut):	22,2 ksi	152,8 MPa	1560,54 kg/cm <sup>2</sup>
% de Elongación en 50 mm (ε):	6,2%		
Tipo de falla:	Irregular		
Observaciones:	La probeta se rompió dentro de las marcas		





## ENSAYO DE TRACCIÓN

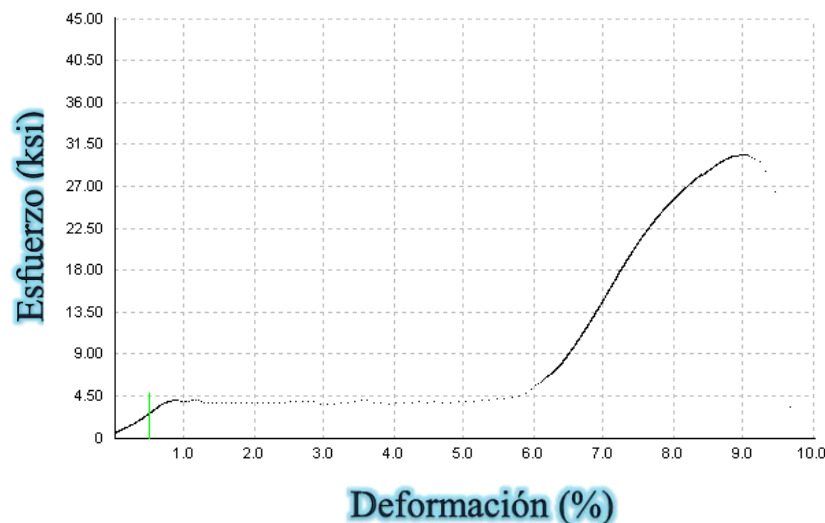
### DATOS INFORMATIVOS:

Probeta N°:	8.3	Tratamiento térmico:	Temple
Temperatura de tratamiento térmico:	850°C	Tiempo del tratamiento térmico:	1 hora
Solicitado por:	Alberto Urbina	Fecha de ejecución:	15/01/2015
Centro de estudio:	Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones EPN		
Método aplicado:	Deformación controlada		
Diámetro de la probeta:	1/2"	Longitud de calibración:	2"
Norma:	ASTM E8		

### RESULTADO:

#### Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación

Aleación CuAlNi temple: 850°C, enfriada en agua a 14,4°C



Diámetro promedio:	12,51 mm		
Carga máxima registrada:	5800 lbf	25800 N	2630,39 kg
Límite de fluencia (Sy):	26,8 ksi	184,9 MPa	1883,90 kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la tracción (Sut):	30,4 ksi	209,9 MPa	2136,97 kg/cm <sup>2</sup>
% de Elongación en 50 mm (ε):	4,9%		
Tipo de falla:	Irregular		
Observaciones:	La probeta se rompió dentro de las marcas		



## ENSAYO DE TRACCIÓN

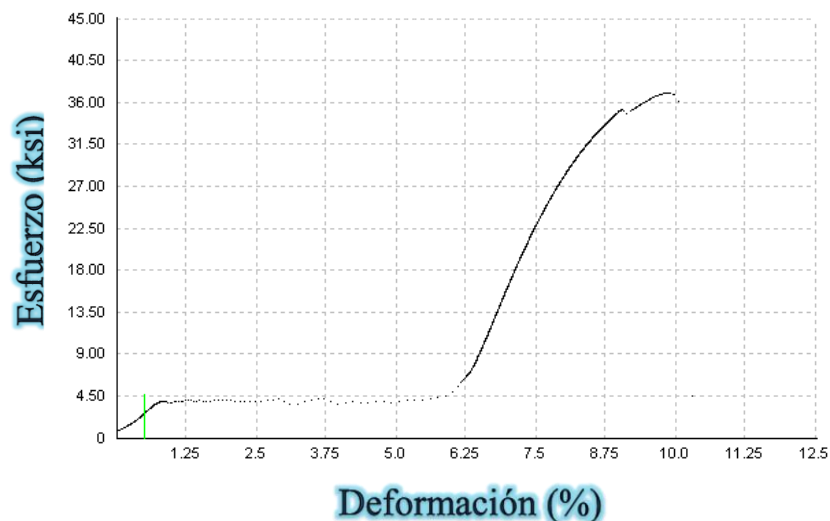
### DATOS INFORMATIVOS:

Probeta N°:	8.4	Tratamiento térmico:	Temple
Temperatura de tratamiento térmico:	850°C	Tiempo del tratamiento térmico:	1 hora
Solicitado por:	Alberto Urbina	Fecha de ejecución:	15/01/2015
Centro de estudio:	Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones EPN		
Método aplicado:	Deformación controlada		
Diámetro de la probeta:	1/2"	Longitud de calibración:	2"
Norma:	ASTM E8		

### RESULTADO:

#### Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación

Aleación CuAlNi temple: 850°C, enfriada en agua a 14,4°C



Diámetro promedio:	12,62 mm		
Carga máxima registrada:	7170 lbf	31894 N	3251,70 kg
Límite de fluencia (Sy):	30,8 ksi	212,4 MPa	2165,08 kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la tracción (Sut):	37,0 ksi	255,0 MPa	2600.91 kg/cm <sup>2</sup>
% de Elongación en 50 mm (ε):	2,6%		
Tipo de falla:	Irregular		
Observaciones:	La probeta se rompió fuera de las marcas		



## ENSAYO DE TRACCIÓN

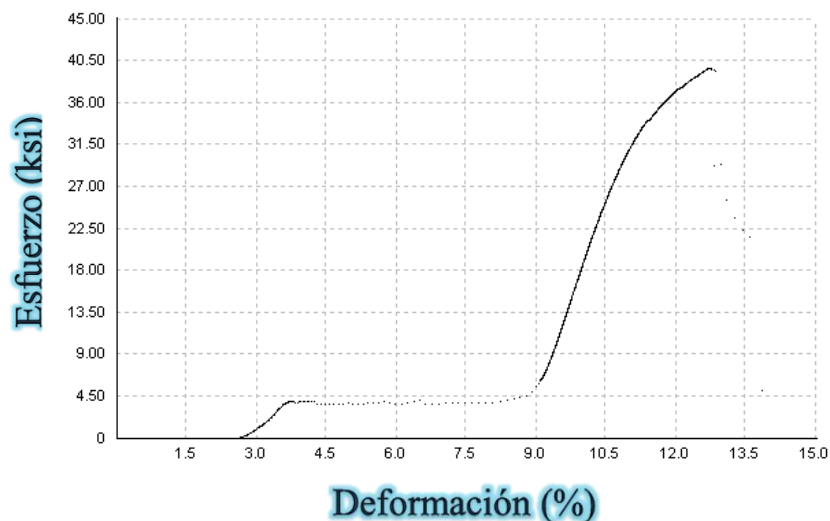
### DATOS INFORMATIVOS:

Probeta N°:	8.5	Tratamiento térmico:	Temple
Temperatura de tratamiento térmico:	850°C	Tiempo del tratamiento térmico:	1 hora
Solicitado por:	Alberto Urbina	Fecha de ejecución:	15/01/2015
Centro de estudio:	Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones EPN		
Método aplicado:	Deformación controlada		
Diámetro de la probeta:	1/2"	Longitud de calibración:	2"
Norma:	ASTM E8		

### RESULTADO:

#### Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación

Aleación CuAlNi temple: 850°C, enfriada en agua a 14,4°C



Diámetro promedio:	12,70 mm		
Carga máxima registrada:	7780 lbf	34607 N	3528,34 kg
Límite de fluencia (Sy):	33,9 ksi	233,5 MPa	2383,0 kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la tracción (Sut):	39,6 ksi	273,2 MPa	2783,68 kg/cm <sup>2</sup>
% de Elongación en 50 mm (ε):	6,3%		
Tipo de falla:	Irregular		
Observaciones:	La probeta se rompió dentro de las marcas		



**ENSAYO DE TRACCIÓN**

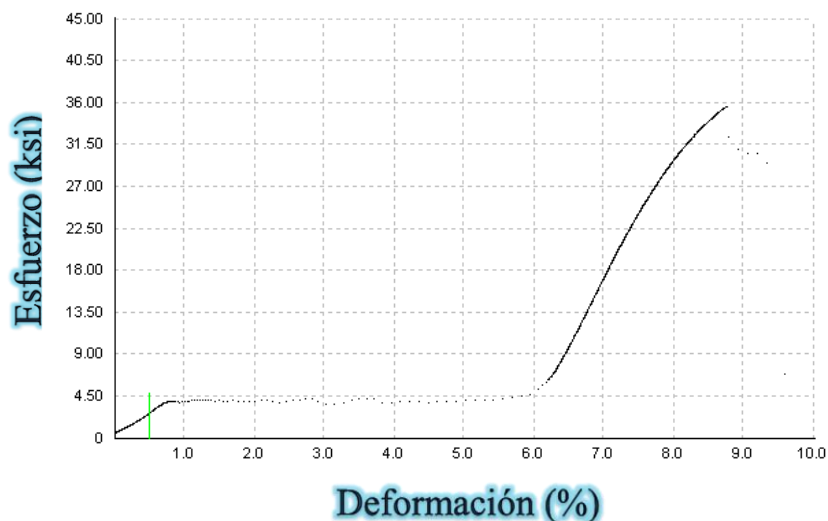
**DATOS INFORMATIVOS:**

<b>Probeta N°:</b>	8.6	<b>Tratamiento térmico:</b>	Temple
<b>Temperatura de tratamiento térmico:</b>	850°C	<b>Tiempo del tratamiento térmico:</b>	1 hora
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha de ejecución:</b>	15/01/2015
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones EPN		
<b>Método aplicado:</b>	Deformación controlada		
<b>Diámetro de la probeta:</b>	1/2"	<b>Longitud de calibración:</b>	2"
<b>Norma:</b>	ASTM E8		

**RESULTADO:**



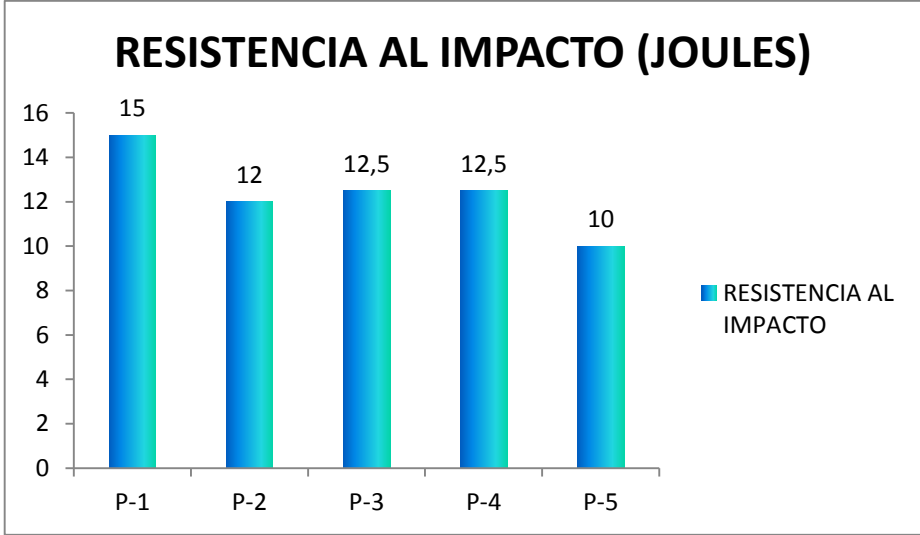
**Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación**

**Aleación CuAlNi temple: 850°C, enfriada en agua a 14,4°C**



<b>Diámetro promedio:</b>	12,60 mm		
<b>Carga máxima registrada:</b>	6870 lbf	30559 N	3115,65 kg
<b>Límite de fluencia (Sy):</b>	32,5 ksi	224,2 MPa	2284,59 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Resistencia a la tracción (Sut):</b>	35,5 ksi	245,1 MPa	2495,47 kg/cm <sup>2</sup>
<b>% de Elongación en 50 mm (ε):</b>	5,2%		
<b>Tipo de falla:</b>	Irregular		
<b>Observaciones:</b>	La probeta se rompió dentro de las marcas		

#### 4.1.9.7. Ensayo de impacto de la prueba 8 templada

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 															
<b>ENSAYO DE IMPACTO</b>															
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>															
<b>Probeta N°:</b>	P-1, P-2, P-3, P-4, P-5	<b>Tratamiento térmico:</b>	Temple												
<b>Temperatura de tratamiento térmico:</b>	850°C	<b>Tiempo del tratamiento térmico:</b>	1 hora												
<b>Norma aplicada:</b>	ASTM E23	<b>Fecha de ejecución:</b>	15/10/2014												
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Metalografía de Materiales FICM														
<b>Método aplicado:</b>	Ensayo Charpy														
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina														
<b>Temperatura ambiente:</b>	17°C	<b>Tiempo del ensayo:</b>	25 min.												
<b>RESULTADO:</b>															
 <p><b>RESISTENCIA AL IMPACTO (JOULES)</b></p> <table border="1"> <caption>Data for Impact Resistance Chart</caption> <thead> <tr> <th>Probeta</th> <th>Resistencia al Impacto (Joules)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P-1</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>P-2</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>P-3</td> <td>12,5</td> </tr> <tr> <td>P-4</td> <td>12,5</td> </tr> <tr> <td>P-5</td> <td>10</td> </tr> </tbody> </table>				Probeta	Resistencia al Impacto (Joules)	P-1	15	P-2	12	P-3	12,5	P-4	12,5	P-5	10
Probeta	Resistencia al Impacto (Joules)														
P-1	15														
P-2	12														
P-3	12,5														
P-4	12,5														
P-5	10														
Aleación CuAlNi, templada a 850°C y enfriada en agua a 14,4°C															
N° de probetas	Energía de rotura (Joules)	Promedio													
P-1	15	<b>12,5 Joules</b>													
P-2	12,5														
P-3	12,5														
P-4	12,5														
P-5	10														

#### **4.1.9.8. Comprobación de memoria de forma de la probeta 8**

Para la ejecución de este ensayo se utilizó viruta obtenida al mecanizar en el torno la probeta de la prueba 8.

El objetivo es deformar la viruta en frío (estado martensítico) mediante la aplicación de fuerza externa y posteriormente aplicarle calor para que recupere su forma original.



*Figura 4. 45 Viruta deformada por acción de una fuerza externa (prueba 8).*

*Fuente: (El autor)*



*Figura 4. 46 Viruta luego de ser calentada.*

*Fuente: (El autor)*

#### 4.1.9.9. Determinación de la densidad de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi, prueba 8

La determinación de la densidad de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi se realizó en el Laboratorio de Metalografía de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

En primer lugar se determinó la masa por medio de una balanza electrónica.



*Figura 4. 47 Medición de la masa de la muestra.*

*Fuente: (El Autor)*

Como se puede observar en la figura 4.47 el valor registrado por la balanza electrónica fue 74,5 gramos.

Posteriormente se midió el volumen de la muestra de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi introduciéndola en una probeta graduada con un volumen inicial de 60ml de agua. Entonces se procedió a dar lectura del volumen final que se desplazó al meter la muestra, marcando 70ml. Por lo tanto, el volumen útil (muestra) que se requiere para el cálculo de la densidad se lo obtuvo restando el volumen inicial del final:

$$(70 - 60)ml = 10ml$$

A continuación se procedió a calcular la densidad de la aleación mediante la ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad \text{Ec. (10)}$$

Donde:  $\rho$  es la densidad,  $m$  la masa y  $V$  el volumen desplazado.



*Figura 4. 48 Medición del volumen de la muestra.*

*Fuente: (El Autor)*

Al reemplazar los valores medidos en la ecuación 10 tenemos:

$$\rho = \frac{74,5g}{10cm^3}$$

$$\rho = 7,45 \frac{g}{cm^3}$$



## 4.2. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

**Tabla 4. 24 Resumen de los elementos aleantes y componentes del análisis químico de cada prueba realizada.**

PRUEBAS	ELEMENTOS INICIALES			COMPONENTES DEL RESULTADO DEL ANÁLISIS QUÍMICO			
	Cu (g)	Al(g)	Ni(g)	Cu (%)	Al (%)	Ni (%)	Otros (%)
Prueba 1	2522,4	397,6	82,7	64,926	32,251	2,753	0,069
Prueba 2	2521,2	397,4	82,5	74,301	22,334	3,311	0,054
Prueba 3	2520,7	397,8	82,9	76,661	18,045	3,216	2,077
Prueba 4	1680,3	265,1	55,3	79,005	16,934	3,357	0,703
Prueba 5	1680,2	265,1	55	79,005	16,934	3,357	0,703
Prueba 6	1786,5	207,5	45,6	83,107	13,162	2,726	1,005
Prueba 7	1786,6	207,8	45,4	82,682	13,607	2,757	0,954
Prueba 8	1786,8	207,8	45,4	83,369	13,405	2,756	0,47

*Fuente: (El autor)*

En la tabla 4. 24 se puede observar la cantidad de elementos iniciales o elementos aleantes que se utiliza para obtener la aleación Cu-Al-Ni y también se observa el porcentaje de cada uno de los elementos de la aleación obtenida.

En la tabla 4. 25 se representa gráficamente los elementos aleantes y los componentes del análisis químico, los cuales se encuentran en porcentajes, visualizando los siguientes resultados:

En la prueba 1, como elementos aleantes se tiene 84% Cu, 13.2% Al, 2.8 Ni, mientras que en el análisis químico tenemos 64.9% Cu, 32.3% Al, 2.8% Ni, 0.1 Otros

En la prueba 2, como elementos aleantes se tiene 84% Cu, 13.2% Al, 2.7 Ni, mientras que en el análisis químico tenemos 74.3% Cu, 22.3% Al, 3.3% Ni, 0.1 Otros.

En la prueba 3, como elementos aleantes se tiene 84% Cu, 13.3% Al, 2.8 Ni, mientras que en el análisis químico tenemos 76.7% Cu, 18.0% Al, 3.2% Ni, 2.1 Otros.

En la prueba 4, como elementos aleantes se tiene 84% Cu, 13.3% Al, 2.8 Ni, mientras que en el análisis químico tenemos 79.0% Cu, 16.9% Al, 3.4% Ni, 0.7 Otros.

En la prueba 5, como elementos aleantes se tiene 84% Cu, 13.3% Al, 2.7 Ni, mientras que en el análisis químico tenemos 79.0% Cu, 16.9% Al, 3.4% Ni, 0.7 Otros.

En la prueba 6, como elementos aleantes se tiene 87.6% Cu, 10.2% Al, 2.2 Ni, mientras que en el análisis químico tenemos 83.1% Cu, 13.2% Al, 2.7% Ni, 1.0 Otros.

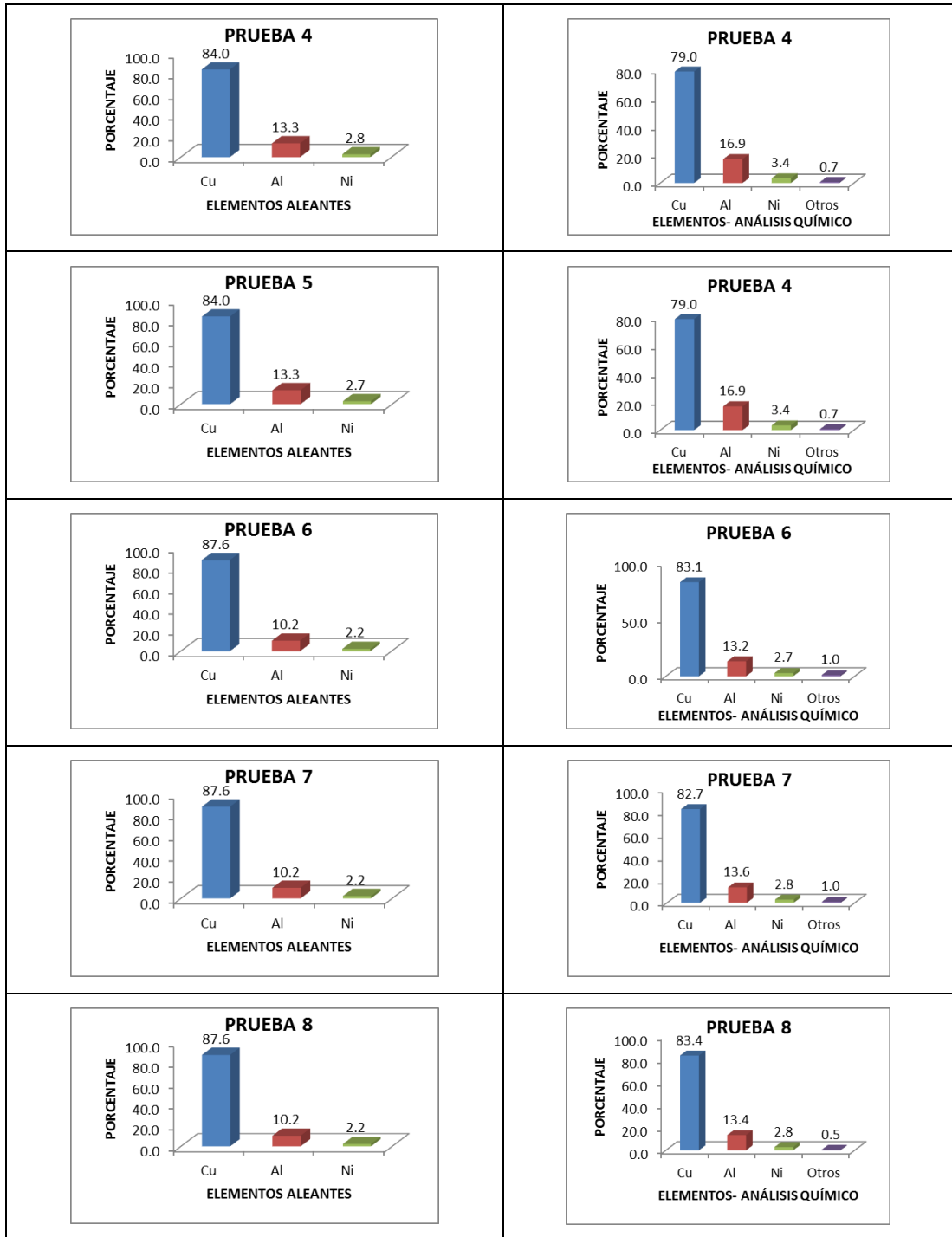
En la prueba 7, como elementos aleantes se tiene 87.6% Cu, 10.2% Al, 2.2 Ni, mientras que en el análisis químico tenemos 82.7% Cu, 13.6% Al, 2.8% Ni, 1.0 Otros.

En la prueba 8, como elementos aleantes se tiene 87.6% Cu, 10.2% Al, 2.2 Ni, mientras que en el análisis químico tenemos 83.4% Cu, 13.4% Al, 2.8% Ni, 0.5 Otros.

**Tabla 4. 25 Comparación gráfica entre elementos aleantes vs componentes- análisis químico.**

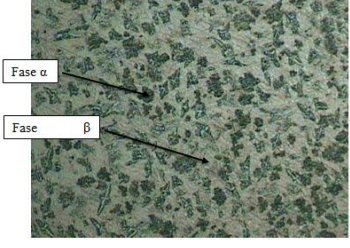
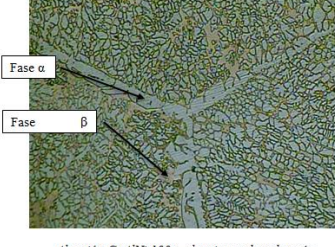
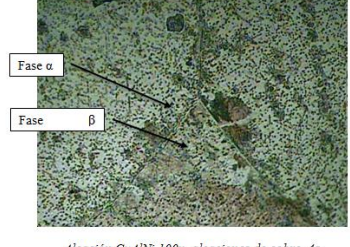
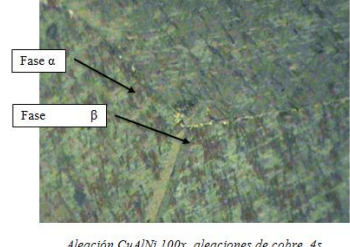
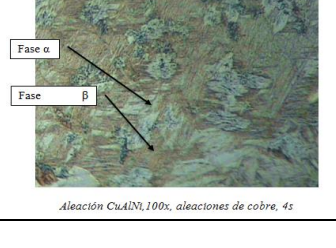
COMPARACIÓN DE ELEMENTOS ALEANTES VS COMPONENTES-ANÁLISIS QUÍMICO																			
ELEMENTOS ALEANTES	COMPONENTES - ANÁLISIS QUÍMICO																		
<p><b>PRUEBA 1</b></p> <table border="1"> <caption>Data for Prueba 1 - Elementos Aleantes</caption> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cu</td> <td>84.0</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>13.2</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>2.8</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Porcentaje	Cu	84.0	Al	13.2	Ni	2.8	<p><b>PRUEBA 1</b></p> <table border="1"> <caption>Data for Prueba 1 - Componentes - Análisis Químico</caption> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cu</td> <td>64.9</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>32.3</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>2.8</td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td>0.1</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Porcentaje	Cu	64.9	Al	32.3	Ni	2.8	Otros	0.1
Elemento	Porcentaje																		
Cu	84.0																		
Al	13.2																		
Ni	2.8																		
Elemento	Porcentaje																		
Cu	64.9																		
Al	32.3																		
Ni	2.8																		
Otros	0.1																		
<p><b>PRUEBA 2</b></p> <table border="1"> <caption>Data for Prueba 2 - Elementos Aleantes</caption> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cu</td> <td>84.0</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>13.2</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>2.7</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Porcentaje	Cu	84.0	Al	13.2	Ni	2.7	<p><b>PRUEBA 2</b></p> <table border="1"> <caption>Data for Prueba 2 - Componentes - Análisis Químico</caption> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cu</td> <td>74.3</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>22.3</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>3.3</td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td>0.1</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Porcentaje	Cu	74.3	Al	22.3	Ni	3.3	Otros	0.1
Elemento	Porcentaje																		
Cu	84.0																		
Al	13.2																		
Ni	2.7																		
Elemento	Porcentaje																		
Cu	74.3																		
Al	22.3																		
Ni	3.3																		
Otros	0.1																		
<p><b>PRUEBA 3</b></p> <table border="1"> <caption>Data for Prueba 3 - Elementos Aleantes</caption> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cu</td> <td>84.0</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>13.3</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>2.8</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Porcentaje	Cu	84.0	Al	13.3	Ni	2.8	<p><b>PRUEBA 3</b></p> <table border="1"> <caption>Data for Prueba 3 - Componentes - Análisis Químico</caption> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cu</td> <td>76.7</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>18.0</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>3.2</td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td>2.1</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Porcentaje	Cu	76.7	Al	18.0	Ni	3.2	Otros	2.1
Elemento	Porcentaje																		
Cu	84.0																		
Al	13.3																		
Ni	2.8																		
Elemento	Porcentaje																		
Cu	76.7																		
Al	18.0																		
Ni	3.2																		
Otros	2.1																		

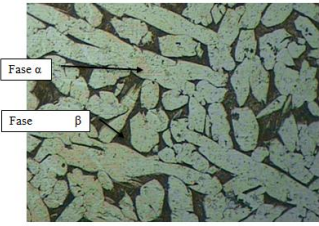
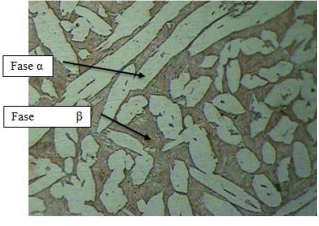
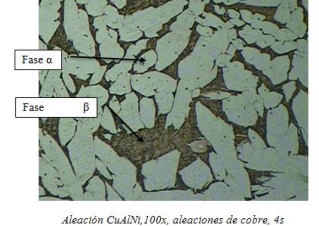
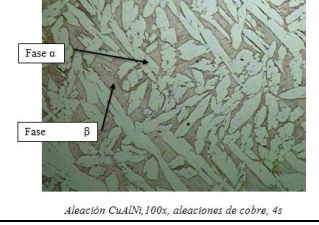
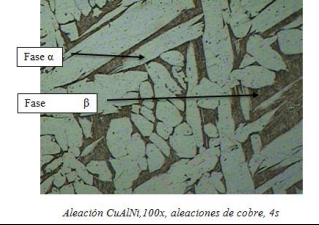
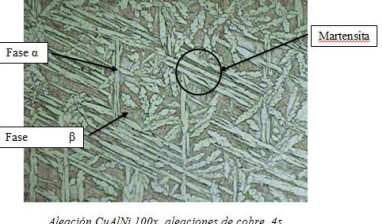
Continuación de la tabla 4.25



Fuente: (El autor)

**Tabla 4. 26 Microestructuras metalográficas - Tamaño de grano.**

<b>MICROESTRUCTURAS METALGRÁFICAS -TAMAÑO DE GRANO</b>	
<b>MICROESTRUCTURAS METALGRÁFICAS</b>	<b>TAMAÑO DE GRANO</b>
<b>PRUEBA 1</b>	
<p>Microestructura sin templar</p>  <p style="font-size: small; text-align: center;"><i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i></p>	$G = 3,5$
<b>PRUEBA 2</b>	
<p>Microestructura sin templar</p>  <p style="font-size: small; text-align: center;"><i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i></p>	$G = 5$
<b>PRUEBA 3</b>	
<p>Microestructura sin templar</p>  <p style="font-size: small; text-align: center;"><i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i></p>	$G = 00$
<b>PRUEBA 4</b>	
<p>Microestructura sin templar</p>  <p style="font-size: small; text-align: center;"><i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i></p>	$G = 00$
<b>PRUEBA 5</b>	
<p>Microestructura sin templar</p>  <p style="font-size: small; text-align: center;"><i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i></p>	$G = 2,5$

Continuación tabla 4.26	
PRUEBA 6	
<p>Microestructura sin templar</p>  <p>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</p>	$G = 2,5$
<p>Microestructura templada</p>  <p>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</p>	$G = 1,5$
PRUEBA 7	
<p>Microestructura sin templar</p>  <p>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</p>	$G = 1,5$
<p>Microestructura templada</p>  <p>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</p>	$G = 3$
PRUEBA 8	
<p>Microestructura sin templar</p>  <p>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</p>	$G = 2$
<p>Microestructura templada</p>  <p>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</p>	$G = 3,5$

Fuente: El autor.

En la tabla 4.26 se observa:

En la prueba 1, la microestructura metalográfica sin templar posee un tamaño de grano ASTM 3,5 con presencia de fase alfa y de fase beta.

En la prueba 2, la microestructura metalográfica sin templar posee un tamaño de grano ASTM 5 con presencia de fase alfa y de fase beta.

En la prueba 3, la microestructura metalográfica sin templar posee un tamaño de grano ASTM 00 con presencia de fase alfa y de fase beta.

En la prueba 4, la microestructura metalográfica sin templar posee un tamaño de grano ASTM 00 con presencia de fase alfa y de fase beta.

En la prueba 5, la microestructura metalográfica sin templar posee un tamaño de grano ASTM 2,5 con presencia de fase alfa y de fase beta.

En la prueba 6, la microestructura metalográfica sin templar posee un tamaño de grano ASTM 2,5 con presencia de fase alfa y de fase beta; mientras que la microestructura templada posee un tamaño de grano ASTM 1,5 con presencia de fase alfa y de fase beta.

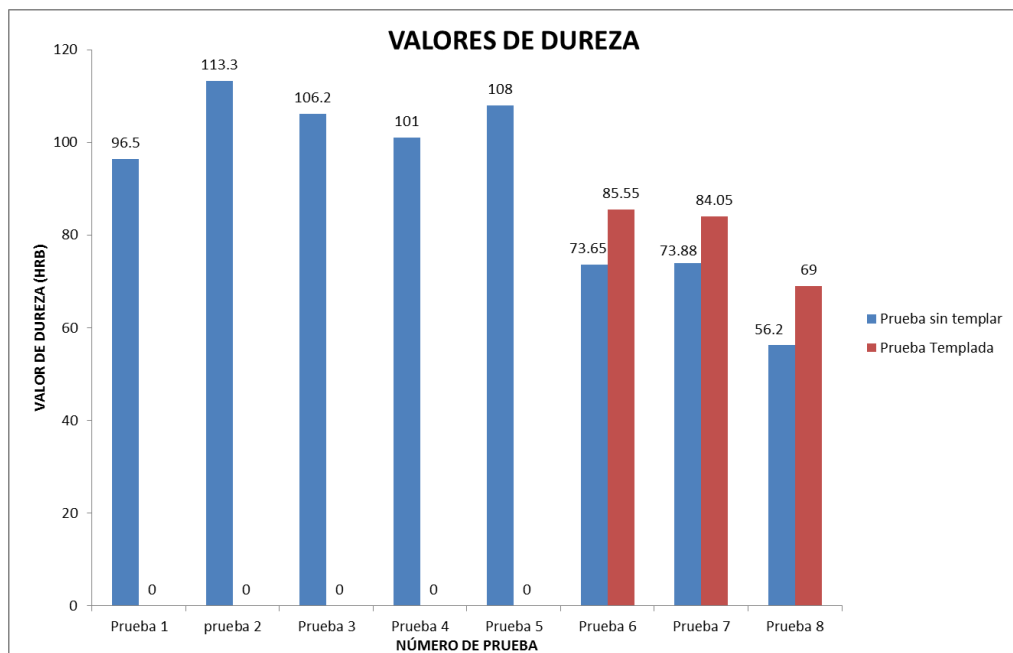
En la prueba 7, la microestructura metalográfica sin templar posee un tamaño de grano ASTM 1,5 con presencia de fase alfa y de fase beta; mientras que la microestructura templada posee un tamaño de grano ASTM 3 con presencia de fase alfa y de fase beta.

En la prueba 8, la microestructura metalográfica sin templar posee un tamaño de grano ASTM 2 con presencia de fase alfa y de fase beta; mientras que la microestructura templada posee un tamaño de grano ASTM 3,5 con presencia de fase alfa, de fase beta y martensita.

**Tabla 4. 27 Valores de dureza de cada prueba.**

N° Prueba	VALOR DE DUREZA (HRB)	
	Prueba sin templar	Prueba Templada
Prueba 1	96,5 HRB	-
Prueba 2	113,3 HRB	-
Prueba 3	106,2 HRB	-
Prueba 4	101 HRB	-
Prueba 5	108 HRB	-
Prueba 6	73,65 HRB	85,55 HRB
Prueba 7	73,88 HRB	84,05 HRB
Prueba 8	56,2 HRB	69 HRB

*Fuente: (El autor)*



**Figura 4. 49 Visualización gráfica de los valores de dureza.**

*Fuente: (El autor)*

En la figura 4. 49 se tiene los valores de dureza para cada una de las pruebas las cuales tienen los siguientes valores:

En la prueba 1, la probeta sin templar tiene una dureza de 96,5 HRB.

En la prueba 2, la probeta sin templar tiene una dureza de 113,3 HRB. (Siendo la dureza más alta de todo el estudio).

En la prueba 3, la probeta sin templar tiene una dureza de 106,2 HRB.

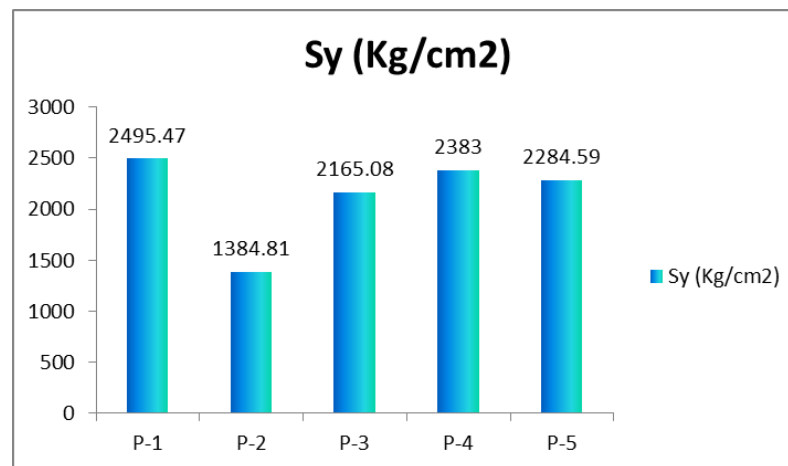
En la prueba 4, la probeta sin templar tiene una dureza de 101 HRB.

En la prueba 5, la probeta sin templar tiene una dureza de 108 HRB.

En la prueba 6, la probeta sin templar tiene una dureza de 73,65 HRB y mientras que en la probeta templada la dureza es de 85,55 HRB.

En la prueba 7, la probeta sin templar tiene una dureza de 73,88 HRB y mientras que en la probeta templada la dureza es de 84,05 HRB.

En la prueba 8, la probeta sin templar tiene una dureza de 56,2 HRB (Siendo la dureza menor de todo el estudio) y mientras que en la probeta templada la dureza es de 69 HRB.

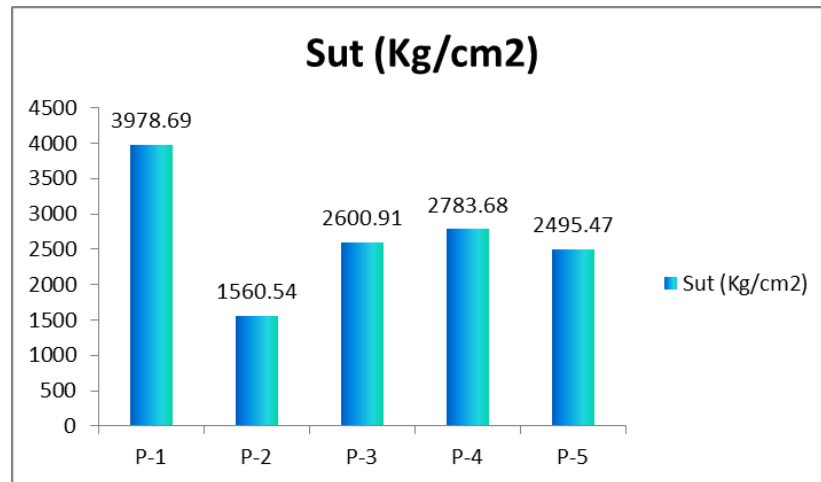


*Figura 4. 50 Visualización gráfica de los valores del límite de fluencia de la prueba 8.*

*Fuente: (El autor)*

En la figura 4.50, se observa los resultados del límite de fluencia para las probetas de la prueba 8, obteniendo un valor máximo de  $Sy = 2495.47 \text{ kg/cm}^2$  y un valor mínimo de  $Sy = 1384.81 \text{ kg/cm}^2$ .

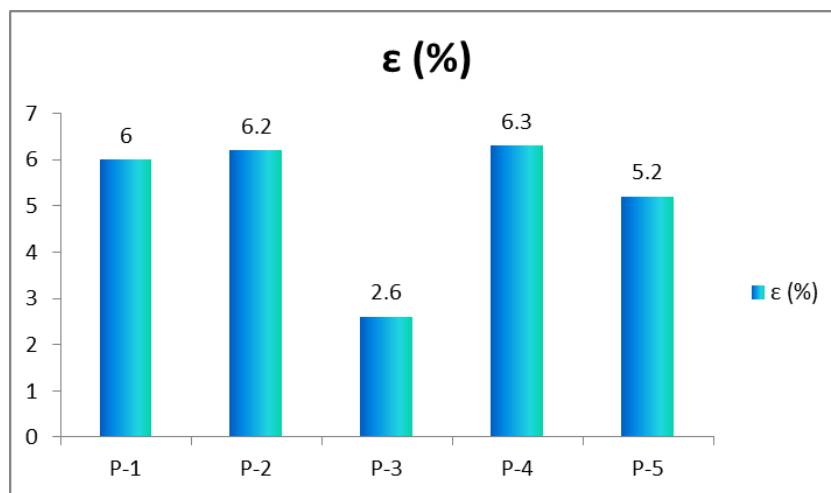




*Figura 4. 51 Visualización gráfica de los valores de la resistencia ultima a la tracción de la prueba 8.*

*Fuente: (El autor)*

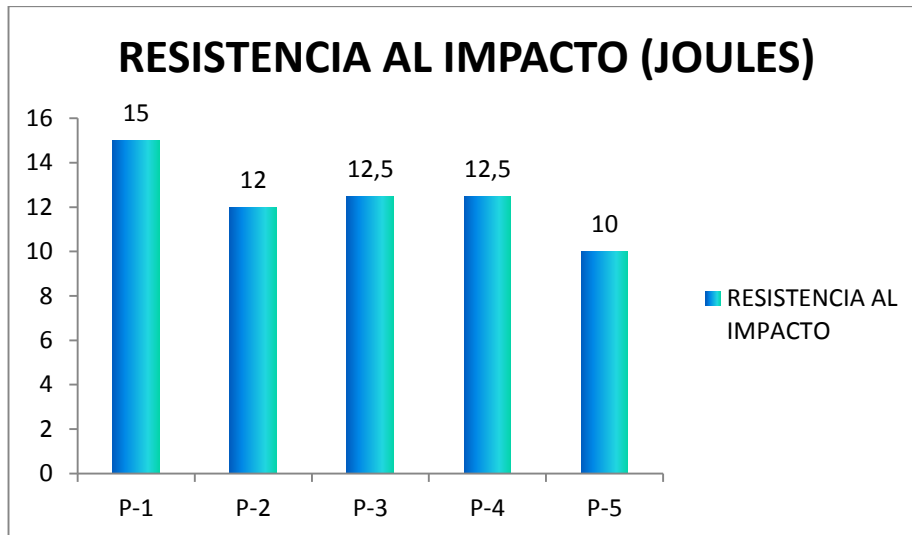
En la figura 4. 51, se observa los resultados de la resistencia ultima a la tracción para las probetas de la prueba 8, obteniendo un valor máximo de  $Sut = 3978.69 \text{ kg/cm}^2$  y un valor mínimo de  $Sut = 1560.54 \text{ kg/cm}^2$ .



*Figura 4. 52 Visualización gráfica de los valores del porcentaje de elongación de la prueba 8.*

*Fuente: (El autor)*

En la figura 4.52, se observa los resultados del porcentaje de elongación para las probetas de la prueba 8, obteniendo un valor máximo de  $\epsilon = 6.3\%$  y un valor mínimo de  $\epsilon = 2.6\%$ .



*Figura 4. 53 Visualización gráfica de los valores de la resistencia al impacto de la prueba 8.*

*Fuente: (El autor)*

En la figura 4.53, se observa los resultados de la resistencia al impacto para las probetas de la prueba 8, obteniendo un valor de resistencia al impacto máxima de 15 Joules y un valor de resistencia al impacto mínimo de 10 Joules.

### 4.3. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

**H<sub>0</sub>:** La caracterización de la aleación CuAlNi permitirá desarrollar nuevos productos para la industria.

**H<sub>1</sub>:** La caracterización de la aleación CuAlNi no permitirá desarrollar nuevos productos para la industria.

**Tabla 4. 28 Resumen de resultados obtenidos de la prueba 8**

<b>RESULTADOS PRUEBA 8</b>																			
<b>Elementos químicos de la aleación</b>																			
<b>Elementos aleantes antes de fundir</b>	<b>Resultado del análisis químico</b>																		
<p><b>PRUEBA 8</b></p> <p>Porcentaje vs. Elementos Aleantes</p> <table border="1"> <tr><th>Elemento</th><th>Porcentaje</th></tr> <tr><td>Cu</td><td>87.6</td></tr> <tr><td>Al</td><td>10.2</td></tr> <tr><td>Ni</td><td>2.2</td></tr> </table>	Elemento	Porcentaje	Cu	87.6	Al	10.2	Ni	2.2	<p><b>PRUEBA 8</b></p> <p>Porcentaje vs. Elementos - Análisis Químico</p> <table border="1"> <tr><th>Elemento</th><th>Porcentaje</th></tr> <tr><td>Cu</td><td>83.4</td></tr> <tr><td>Al</td><td>13.4</td></tr> <tr><td>Ni</td><td>2.8</td></tr> <tr><td>Otros</td><td>0.5</td></tr> </table>	Elemento	Porcentaje	Cu	83.4	Al	13.4	Ni	2.8	Otros	0.5
Elemento	Porcentaje																		
Cu	87.6																		
Al	10.2																		
Ni	2.2																		
Elemento	Porcentaje																		
Cu	83.4																		
Al	13.4																		
Ni	2.8																		
Otros	0.5																		
<b>Análisis metalográfico</b>																			
<b>Sin templar</b>	<b>Templada (850°C)</b>																		
<p>Fase <math>\alpha</math></p> <p>Fase <math>\beta</math></p> <p><i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i></p>	<p>Martensita</p> <p><i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i></p>																		
<b>Ensayo de dureza</b>																			
<b>Sin templar</b>	<b>Templada (850°C)</b>																		
56,2HRB	69HRB																		
<b>Análisis de tracción</b>																			
$\epsilon$ (%)	Sut (Kg/cm <sup>2</sup> )																		
5,26	2683,858																		
<b>Ensayo Charpy</b>																			
Resistencia al impacto: 12,5 Joules																			
<b>Ensayo de memoria de forma</b>																			



*Fuente: (El autor)*

Al observar los resultados de los ensayos químicos, análisis metalográficos, ensayos de dureza, análisis de tracción, ensayo Charpy y ensayo de memoria de forma se ha determinado que la aleación **83,369%Cu - 13,405%Al – 2,756%Ni correspondiente a la prueba 8 se comporta como una aleación inteligente con memoria de forma la cual recupera su forma original aplicándole calor.**

#### **4.3.1 Análisis estadístico**

Para realizar el análisis estadístico se empleó la distribución “t” de student, debido a que éste método estadístico es utilizado para la verificación de hipótesis cuando una investigación se basa en un muestreo pequeño (población < 30).

##### **4.3.1.1 Distribución t para el porcentaje de elongación de la prueba 8**

Se eligió el porcentaje de elongación por una de las propiedades más importantes que caracterizan a los materiales inteligentes con memoria de forma.

(Funakubo, 1987) realizó una comparación entre las aleaciones NiTi y CuZnAl en donde indica que el porcentaje de elongación de la aleación NiTi es de 8% mientras que el de la aleación CuZnAl es de 4%.

Además, según (Espín, 2012), el porcentaje de elongación de la aleación CuZnAl de la prueba 4.2 templada es de 4,23% y el de la prueba 4,5 templada es de 3,65%.

Adicionalmente, de acuerdo con (Ilbay, 2014), la aleación CuZnSn de la prueba 6 templada presenta un porcentaje de elongación de 3,75%.

El porcentaje de elongación de la aleación 83,369%Cu – 13,405%Ni – 2,756%Ni elaborada en esta investigación es de 5,26%; muy cercano a los citados anteriormente y por esta razón se realiza el análisis estadístico para verificar la hipótesis.

La verificación se realizará para un porcentaje de elongación de  $\mu = 4\%$

Resultados del porcentaje de elongación: 6%, 6,2%, 2,6%, 6,3%, 5,2%.

$$H_1 = 4\%$$

$$H_0 \neq 4\%$$

Nivel de significancia.

$\alpha = 0,05$  para proyectos de investigación

Grados de libertad: 4

Por lo tanto:

Si  $-2,1318 \leq t \leq 2,1318$  No se rechaza  $H_1$

Si  $t < -2,1318$  o  $t > 2,1318$  Se rechaza  $H_1$

Cálculos:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}} \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde:  $t$  es la Distribución  $t$  de Student,  $\bar{X}$  es la media,  $\mu$  es el valor a analizar,  $S_x$  es la desviación estándar y  $n$  es el tamaño de la muestra. (Abanto, Carrasco, & otros, 2013, pág. 16)

$$\bar{X} = 5,26$$

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = 1,5485$$

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}} = 1,8195$$

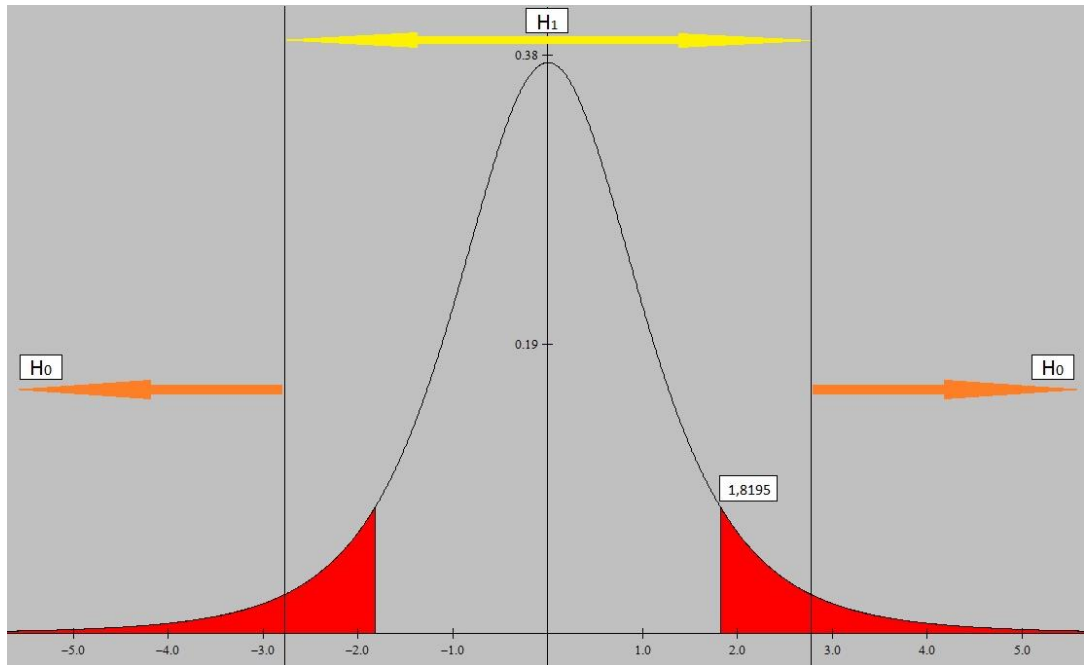


Figura 4. 54 Gráfica de la verificación de la hipótesis mediante la distribución t de student.

Fuente: (El autor)

Como  $-2,1318 \leq 1,8195 \leq 2,1318$  se acepta  $H_1$  con un nivel de significancia de 0,05.

Por todo lo expuesto anteriormente se verifica la hipótesis  $H_1$ .

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- Para la obtención de este tipo de aleación primero se debe fundir el cobre, posteriormente se debe añadir el aluminio para que se genere una reacción exotérmica y se eleve la temperatura bruscamente hasta alcanzar la temperatura de fusión del níquel para agregarlo al final.
- Para que el cobre se funda correctamente en el horno de inducción, fue necesario, en primer lugar, calentar el crisol sin colada, a 900°C en el horno eléctrico de mufla.
- Para conservar las altas temperaturas dentro del crisol fue necesario cubrirlo completamente con manta cerámica.
- Para que se mezclen correctamente todos los componentes de la aleación fue necesario agitar la colada con una barra de grafito para evitar la contaminación de la misma con otros elementos.
- En todos los ensayos realizados se evidenció pérdidas de aluminio y cobre debido a la oxidación de la colada en el momento de la reacción exotérmica.
- La aleación del ensayo 1 de composición química 64,926%Cu, 32,251%Al, 2,753%Ni y 0,069%Sc es una aleación con fase  $\beta$  (matriz), con tamaño de grano ASTM 3,5 y con una dureza promedio de 19,03 HRC, lo cual indica alta dureza pero demasiada fragilidad.
- La aleación del ensayo 2 de composición química 74,301%Cu, 22,334%Al, 3,311%Ni y 0,054%K es una aleación con fase  $\beta$  (matriz), con tamaño de grano ASTM 5, lo cual indica que el tamaño de grano se redujo en comparación con la prueba 1, y con una dureza promedio de 42,55 HRC, mucho más elevada que la de la prueba 1.
- La alta dureza de la prueba 1 y 2 dificultó el mecanizado de probetas normalizadas.

- A partir de la tercera prueba fue necesario primero fundir el aluminio para quitar la escoria debido a que el cable utilizado estaba sucio.
- La aleación del ensayo 3 de composición química 76,661%Cu, 18,045%Al, 3,216%Ni y 1,807%Si, 0,170%Ca y 0,1%S es una aleación con fase  $\beta$  (matriz), con tamaño de grano ASTM 00, lo cual indica que la aleación tiene un tamaño de grano extremadamente grande comparada con las pruebas anteriores, y con una dureza promedio de 31,20 HRC, al igual que las pruebas anteriores con alta dureza.
- En los resultados de los ensayos químicos de las pruebas 1, 2 y 3 se evidencia que la colada fue contaminada con elementos como el silicio (Si) o el calcio (Ca), que no deberían formar parte de la aleación, como resultado del desprendimiento de las paredes del crisol al momento de agitar la colada y de utilizar como tapa un trozo de manta cerámica contaminado con óxido de zinc y otros compuestos generados durante la evaporación y oxidación del zinc en otros procesos de fundición.
- La aleación del ensayo 4 de composición química 79,005%Cu, 16,934%Al, 3,357%Ni, 0,531%Si y 0,172%Ca, al igual que las anteriores, es una aleación con fase  $\beta$  (matriz), con tamaño de grano ASTM 00, lo cual indica que la aleación tiene un tamaño de grano extremadamente grande semejante a la prueba 3, y con una dureza promedio de 24,0 HRC, de alta dureza también.
- La aleación del ensayo 5 es una aleación con fase  $\beta$  (matriz), con tamaño de grano ASTM 2,5 lo cual indica que la aleación tiene un tamaño de grano grande, con una dureza promedio de 33,65 HRC, de alta dureza también.
- A pesar que la aleación 4 y 5 tienen la misma composición química, la microestructura, el tamaño de grano y la dureza variaron por el enfriamiento brusco en el molde de arena.
- La aleación del ensayo 6 de composición química 83,107%Cu, 13,162%Al, 2,726%Ni, 0,309%Si, 0,388%Ca, 0,238%Tb y 0,070%S al igual que las anteriores, es una aleación con fase  $\beta$  (matriz), con tamaño de grano ASTM 2,5 lo cual indica que la aleación tiene un tamaño de grano grande y con una dureza promedio de 73,65 HRB, más baja que las anteriores pruebas.
- Al realizar el temple de la probeta 6 no se logró obtener martensita, sin embargo la dureza aumentó a 85,55HRB y el tamaño de grano creció, es decir a ASTM 1,5.



- Se logró reducir la porosidad notablemente al verter la colada solo en la parte inferior del molde de arena y la parte superior quedó expuesta al aire libre.
- La aleación del ensayo 7 de composición química 82,606%Cu, 13,607%Al, 2,757%Ni, 0,440%Si, 0,239%Ca, 0,214%Tb y 0,061%S de igual manera es una aleación con fase  $\beta$  (matriz), con tamaño de grano ASTM 1,5 lo cual indica que la aleación tiene un tamaño de grano grande y con una dureza promedio de 73,88 HRB, similar a la de la prueba 6.
- Las probetas de la prueba 6 y 7 se rompieron cuando se estaba realizando el temple, al momento de sacarlas del horno eléctrico de mufla, por el propio peso de las mismas debido a que la aleación debió estar muy cercana a su punto de fusión.
- Al realizar el temple de la probeta 7 no se logró obtener martensita, sin embargo la dureza aumentó a 84,05HRB y el tamaño de grano disminuyó, es decir a ASTM 3.
- La aleación del ensayo 8 de composición química 83,369%Cu, 13,405%Al, 2,756%Ni, 0,47% otros, de igual manera es una aleación con fase  $\beta$  (matriz), con tamaño de grano ASTM 2, lo cual indica que la aleación tiene un tamaño de grano grande y con una dureza promedio de 56,2 HRB, más baja que las pruebas anteriores.
- Al realizar el temple de la prueba 8 se logró obtener martensita al realizar el temple a 850°C y el enfriamiento en agua a 14,4°C.
- La dureza aumentó a 69 HRB mientras que el tamaño de grano disminuyó a ASTM 3,5.
- La prueba 8 se comporta como aleación inteligente con memoria de forma al recuperar su forma al aplicarle calor.
- Como se puede observar en los resultados de los ensayos químicos los porcentajes de cada elemento son casi iguales, por lo tanto, para obtener la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi en el horno de inducción del Laboratorio de Metalografía de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, cada elemento debe entrar en las siguientes cantidades: 1786,8g de cobre (Cu), 207,8g de aluminio (Al) y 45,4g de níquel (Ni).

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Utilizar un crisol que no sobrepase la altura de la bobina del horno de inducción para evitar fugas de calor al exterior.
- Usar gafas oscuras al momento de vaciar la colada en el molde debido al brillo excesivo causado por la reacción exotérmica.
- Utilizar el equipo completo de seguridad industrial para salvaguardar la integridad personal.
- Verificar que todos los parámetros del horno estén de acuerdo a los especificados anteriormente para la fabricación de este tipo de aleación.
- Agregar 10 gramos de Bórax a la colada para facilitar la escoriación y homogeneización de la misma.
- Exponer lo menos posible al ambiente la colada en el momento de agregar el aluminio al cobre fundido para evitar que ésta se oxide en grandes proporciones ocasionando una gran variación en los porcentajes componentes de la aleación.
- Para que no exista fuga de calor al exterior por la parte superior del crisol se recomienda utilizar como tapa un pedazo de manta cerámica nueva (limpia) para evitar que la colada se contamine con otros elementos.
- Las probetas para el ensayo metalográfico deben estar totalmente planas para que la fotografía salga nítida y no se presenten errores al momento de sacar los porcentajes de fases mediante software.
- Calcular la proporción adecuada de componentes para obtener la suficiente cantidad de colada para llenar completamente el molde.
- Secar completamente el molde de arena y calentarlo a la mayor temperatura posible para evitar en lo posible la generación de poros al momento de vaciar la colada ya que debido a la alta temperatura de la última, al entrar en contacto con la arena, se solidifica rápidamente, impidiendo que el aire salga al exterior formándose de esta manera gran cantidad de poros.
- Realizar el temple de las probetas de aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi en un recipiente de acero para evitar que éstas se rompan al sacarlas del horno.

## CAPITULO VI

### 6. PROPUESTA

**Desarrollar un procedimiento para la obtención de la aleación inteligente con memoria de forma 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni.**

#### 6.1 DATOS INFORMATIVOS

Existe poco conocimiento del proceso de manufactura y las propiedades de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi debido al reducido número de estudios realizados sobre este material.

Por el motivo explicado anteriormente, la presente investigación se ha basado en el proceso de obtención de la aleación inteligente con memoria de forma 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni, la misma que después de analizadas sus propiedades, se determinó que al ser deformada en frío por una fuerza externa, ésta recupera su forma original al aplicarle calor.

El estudio de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi se llevó a cabo en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, campus Huachi, cantón Ambato, provincia de Tungurahua, también en el Taller Mecánico Industrial de CELEC EP, Unidad de negocios HIDROAGOYÁN ubicada en el cantón Baños de Agua Santa y en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional de la ciudad de Quito.

#### 6.2 ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA

Anteriormente se han realizado estudios de aleaciones inteligentes con memoria de forma en base cobre tales como: CuZnAl, CuAlSn, CuAlBe o CuZn. Sin embargo, es muy difícil encontrar información específica acerca de las propiedades y aplicaciones industriales de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi, ya que, tanto la

composición química así como los tratamientos térmicos son diferentes, incluso los procesos de obtención de la aleación anteriormente mencionada son distintos.

### **6.3 JUSTIFICACIÓN**

El presente estudio se centra en establecer el procedimiento de obtención más adecuado de la aleación inteligente con memoria de forma 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni, porcentaje en peso de cada componente, la cual, luego de ser deformada, recupera su forma original al aplicarle calor.

Garantizar la conservación de la composición química y propiedades de la aleación estudiada al seguir dicho procedimiento.

### **6.4 OBJETIVOS**

#### **6.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Elaborar un procedimiento para la obtención de la aleación inteligente con memoria de forma 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni.

#### **6.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Detallar los pasos para obtener la aleación inteligente con memoria de forma 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni.
- Elaborar procedimientos para los ensayos metalográficos, de tracción, impacto, y dureza.
- Establecer su aplicación industrial.

### **6.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD**

La propuesta es factible de realizar ya que los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato cuentan con los equipos necesarios para ejecutar la mayoría de ensayos requeridos para la obtención y análisis de la aleación mencionada en la propuesta, entre los cuales se encuentran: horno de inducción, con 5kg de capacidad, para la obtención de la aleación, hornos de mufla para los tratamientos térmicos, microscopio y equipos para la preparación de probetas para los ensayos metalográficos, durómetro, máquina universal, torno y otros.

Además, también se cuenta con el talento humano como el autor y los ayudantes de laboratorio cuyo aporte hace factible el desarrollo de la propuesta.

## **6.6 FUNDAMENTACIÓN**

La información necesaria para el desarrollo de la presente propuesta se proporciona en los capítulos: II (marco teórico), IV (análisis e interpretación de resultados) y V (conclusiones y recomendaciones).

Es preciso señalar que los resultados de los diversos ensayos ejecutados y descritos en el análisis e interpretación de resultados son la base para el desarrollo de la propuesta.

## **6.7 METODOLOGÍA**

El procedimiento para la elaboración de la aleación consta de los pasos a continuación enlistados:

- Moldeo manual en arena.
- Preparación de materia prima.
- Preparación y ajuste de parámetros en el horno de inducción.
- Uso del equipo de seguridad y protección personal.
- Preparación del crisol.
- Carga del horno de inducción.
- Fundición del metal base (cobre) y adición del aluminio y níquel.
- Homogeneización de la colada.
- Vertido de la colada en el molde.
- Desmoldeo.
- Mecanizado de probetas.
- Temple de probetas.
- Análisis químico.
- Análisis metalográfico.
- Ensayos de dureza.
- Ensayos de tracción.
- Ensayos de impacto.
- Determinación de densidad.
- Determinación de la aplicación industrial.

### 6.7.1 Moldeo manual en arena

Para realizar el estudio de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi fueron necesarios fundir lingotes cilíndricos de 25mm de diámetro por 200mm de largo y lingotes prismáticos rectangulares de 100mm de ancho por 100mm de profundidad y 15mm de espesor.

El procedimiento para elaborar el molde de arena es el siguiente:

1. Construir la caja de moldeo de acuerdo al tamaño de las piezas que se desea obtener. Puede ser metálica, de madera o de fundición. Debe constar de dos partes (superior e inferior), cada una de las cuales debe tener 5 pulgadas de altura, guías para fijar la posición durante el moldeo y orejas para poder separar las partes de la caja.



*Figura 6.1 Caja para moldeo de arena.*

*Fuente: (El autor)*

2. Fabricar un modelo de la pieza que se desea moldear.
3. Preparar la arena de moldeo, para lo cual es necesario desmenuzarla, cernirla y humedecerla hasta que contenga 7,5% de humedad o en su lugar hacer la prueba del puño.



*Figura 6. 2 Preparación de la arena de moldeo.*

*Fuente: (El autor)*

4. Colocar la caja inferior con las guías y orejas hacia abajo, sobre una superficie lisa.
5. Poner los modelos que se desea obtener distribuidos adecuadamente dentro de la caja.



*Figura 6. 3 Distribución de los modelos en la parte inferior de la caja.*

*Fuente: (El autor)*

6. Espolvorear el modelo con talco o arena seca cernida para facilitar la extracción de éste posteriormente.

7. Añadir arena fina sobre el modelo y compactar.



*Figura 6. 4 Primera capa de arena fina.*

*Fuente: (El autor)*

8. Llenar la caja con arena de relleno y apisonar fuertemente para evitar que se desmorone al momento de extraer el modelo.



*Figura 6. 5 Llenado de la caja con arena de relleno.*

*Fuente: (El autor)*





*Figura 6. 6 Apisonado de la arena de relleno.*

*Fuente: (El autor)*

9. Agregar arena hasta que sobrepase unos dos o tres centímetros el borde de la caja y apisonar nuevamente hasta que la arena quede totalmente compactada.
10. Retirar el exceso de arena hasta que quede al nivel del borde de la caja.



*Figura 6. 7 Caja llena con arena hasta el mismo nivel del borde.*

*Fuente: (El autor)*

11. Girar la caja y retirar el modelo dando unos golpecitos cuidadosamente para no dañar el molde. Como se explicó en el capítulo IV se elaboró un molde abierto para facilitar el escape de los gases y reducir el número de poros.
12. Con un estilete o una espátula hacer cuidadosamente los canales de alimentación entre los modelos para que la colada llene por completo el molde.



*Figura 6. 8 Canales de conexión del molde abierto.*

*Fuente: (El autor)*

13. Limpiar completamente el molde de partículas sueltas de arena con un soplador. Este paso debe realizarse cuidadosamente para no dañar el molde.
14. Secar y calentar el molde con un quemador, aproximadamente unos seis minutos.



*Figura 6. 9 Secado y calentado del molde con soplete.*

*Fuente: (El autor)*

### 6.7.2 Preparación de la materia prima

La materia prima para la fabricación de la aleación inteligente con memoria de forma 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni es: cobre electrolítico de 99,9% de pureza, aluminio electrolítico de 99,9% de pureza y un lingote níquel de 99,9% de pureza comprado en la empresa GALVANO de la ciudad de Quito.

Procedimiento de la preparación de la materia prima:

1. Cortar cada uno de los elementos componentes de la aleación en pequeños pedazos para facilitar la carga en el crisol.
2. Pesar cada elemento de acuerdo a las medidas especificadas en la tabla 6.1 para obtener la aleación inteligente con memoria de forma 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni.

**Tabla 6. 1 Cantidad de peso en gramos de cada elemento componente de la aleación 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni.**

<b>Elemento</b>	<b>Peso en gramos</b>
Cu	1786,8g
Al	207,8g
Ni	45,4g
<b>Total:</b>	<b>2040,0g</b>

*Fuente: (El autor)*

### 6.7.3 Preparación y ajuste de parámetros del horno de inducción

1. Comprobar el estado de las conexiones eléctricas: cables, tomacorrientes, enchufes, etc.
2. Verificar ajustes de los acoples de la tubería de cobre de la bobina y de las mangueras del sistema de agua de enfriamiento del horno para que no existan fugas.
3. Encender la bomba para la circulación del agua de enfriamiento de acuerdo a los parámetros indicados en la tabla 6.2.

4. Configurar los tiempos de calentamiento, permanencia y enfriamiento. En la tabla 6.2 se especifican estos parámetros, adecuados para la obtención de la aleación 83,369% Cu – 13,405% Al – 2,756% Ni.
5. Encender el horno para verificar que no se active ninguna alarma.

**Tabla 6. 2 Parámetros de funcionamiento del horno de inducción**

<b>Tipo de parámetro</b>	<b>Condición de operación</b>
Voltaje	220V
Operación	Automático
Presión de agua	0,2MPa
Flujo de agua	6L/min
Tiempo de calentamiento	20s
Tiempo de permanencia	20s
Tiempo de enfriamiento	10s

*Fuente: (El autor)*

#### **6.7.4 Uso del equipo de seguridad y protección personal**

1. Utilizar el equipo completo de seguridad y protección personal: casco, gafas de seguridad, mascarilla, mandil y guantes de cuero, zapatos de seguridad.
2. Verificar el correcto funcionamiento de los equipos y herramientas que se van a utilizar.
3. Comprobar que el lugar esté libre de combustibles, materiales inflamables y humedad.
4. Verificar que los extintores estén listos para usarse en caso de emergencia.

#### **6.7.5 Preparación del crisol**

1. Precalentar el crisol lentamente hasta 900°C en el horno eléctrico de mufla o seguir las recomendaciones proporcionadas por el fabricante (en el caso que sea nuevo). Ver anexo A1.
2. Si la altura del crisol es mayor que el de la bobina del horno de inducción es necesario recortarlo para que quede alrededor de 10mm más abajo del borde

superior de la bobina. Este paso es necesario para evitar fugas de calor al exterior por las paredes del crisol y de esta manera optimizar el proceso de fundición.

3. Limpiar completamente las paredes del crisol para eliminar residuos contaminantes. Tener cuidado para no dañarlo.
4. Revisar que las paredes del crisol no presenten grietas.
5. Cubrir el crisol con manta cerámica para aislarlo térmicamente.



*Figura 6. 10 Crisol cubierto con manta cerámica.*

*Fuente: (El autor)*

6. Colocar el crisol dentro de la bobina del horno de inducción.

#### **6.7.6 Carga del horno de inducción**

1. Encender el horno a potencia media, la cual se regula de las perillas de poder de calor y conservación de calor, para precalentar el crisol y eliminar la humedad por unos 5 minutos.
2. Cargar el crisol con el metal base (cobre) e incrementar la potencia del horno.

#### **6.7.7 Fundición del metal base (cobre) y adición del aluminio y níquel**

1. Cargar el crisol con todo el metal base (cobre) una vez que se haya fundido la primera carga de éste. La temperatura de fusión del cobre es de 1084.62°C.
2. Tapar el crisol con un pedazo de manta cerámica o una tapa de grafito.
3. Esperar hasta que todo el cobre esté completamente fundido.



*Figura 6.11 Cobre totalmente fundido en el crisol.*

*Fuente: (El autor)*

4. Retirar la escoria cuidadosamente.
5. Agregar el aluminio (punto de fusión:  $660,32^{\circ}\text{C}$ ).
6. Agitar la colada cuidadosamente, con una barra de grafito, ya que al mezclarse el cobre y el aluminio se produce una reacción exotérmica incrementándose bruscamente la temperatura.



*Figura 6.12 Reacción exotérmica al mezclarse el cobre y el aluminio.*

*Fuente: (El autor)*

7. Retirar nuevamente la escoria. En este paso se oxida una parte de la colada, por lo que hay que retirar todo el material oxidado.
8. Añadir el níquel a la colada. El aumento brusco de la temperatura generado por la reacción exotérmica al añadir el aluminio permite alcanzar el punto de fusión del níquel que es de 1453°C.



*Figura 6.13 Adición del níquel a la colada.*

*Fuente: (El autor)*

### **6.7.8 Homogeneización de la colada**

1. Verificar que los tres elementos estén totalmente fundidos.
2. Agitar la mezcla con una barra de grafito para garantizar la mezcla homogénea de la colada. Se utiliza la barra de grafito para evitar contaminación de la colada.





*Figura 6.14 Colada agitada con la barra de grafito.*

*Fuente: (El autor)*

### **6.7.9 Vertido de la colada en el molde**

1. Usar gafas de seguridad oscuras debido al intenso brillo de la colada.
2. Vaciar la colada en el molde directamente del crisol, cuidadosamente, usando la pinza.



*Figura 6.15 Colada vaciada en el molde abierto.*

*Fuente: (El autor)*



3. Apagar el horno manteniendo encendido el sistema de refrigeración por unos 15 minutos aproximadamente.

#### **6.7.10 Desmoldeo**

1. Retirar los lingotes de la arena una vez que éstos se encuentren totalmente fríos.



*Figura 6. 16 Lingote listo para ser retirado del molde.*

*Fuente: (El autor)*

#### **6.7.11 Mecanizado de probetas**

1. Las probetas para el ensayo de tracción fueron mecanizadas en un torno, de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM E8 (Ver anexo B1).



*Figura 6. 17 Probeta mecanizada.*

*Fuente: (El autor)*

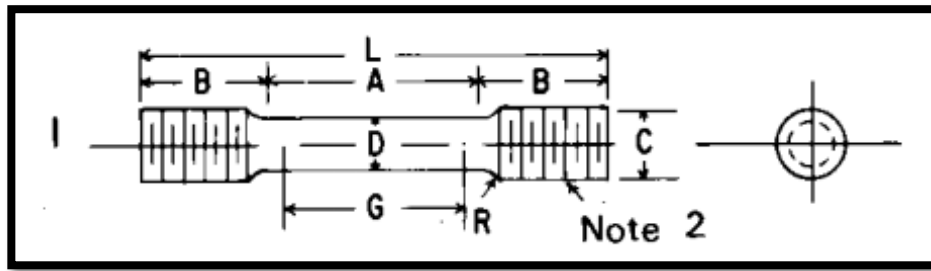


Figura 6. 18 Dimensiones y acabados de probetas cilíndricas para el ensayo de tracción, espécimen 1.

Fuente: (Norma ASTM E8-09, 2010, pág. 7)

Tabla 6. 3 Especificación de dimensiones para mecanizado de probetas para ensayo de tracción, espécimen 1.

Dimensiones, mm [in]	
Para probetas con longitud de calibre de cuatro veces el diámetro.	
G – Longitud de calibre	5 ± 0,1 [2,000 ± 0.005]
D – Diámetro	12,5 ± 0,2 [0,500 ± 0,010]
R – Radio de filete, min.	10 [0.375]
A – Longitud de la sección reducida	56 [2,25] min
L – Longitud total aproximada	145 [5]
B – Longitud de fin de sección	35 [1,375] aproximado
C – Diámetro de fin de sección	20 [0,75]

Fuente: (Norma ASTM E8-09, 2010, pág. 7)

- Las probetas para el ensayo de impacto (Charpy) fueron mecanizadas en una fresadora a partir de un lingote prismático rectangular, de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM E23 (Ver anexo B2).



Figura 6. 19 Lingote prismático del que se extrajeron las probetas para el ensayo de impacto.

Fuente: (El autor)

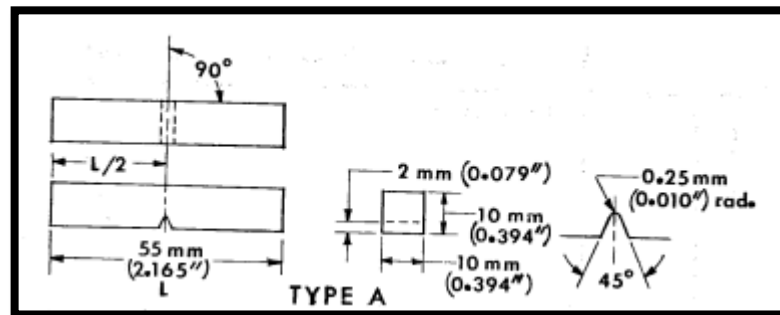


Figura 6. 20 Dimensiones para el mecanizado de probetas para el ensayo Charpy.

Fuente: (Norma ASTM E23-82, 1982, pág. 248)



Figura 6. 21 Probetas para ensayo Charpy mecanizadas bajo norma.

Fuente: (El autor)

### 6.7.12 Temple de probetas

Es necesario realizar el temple de la aleación 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni para obtener martensita en la microestructura y que la aleación se comporte como un material inteligente.

1. Determinar la temperatura a la que se va a realizar el tratamiento térmico utilizando un diagrama de fases Cu – Al. Con el porcentaje de aluminio se traza una vertical hasta llegar a la fase  $\beta$  para determinar la temperatura del tratamiento térmico. Al enfriar la aleación rápidamente (temple) se produce la transformación martensítica.

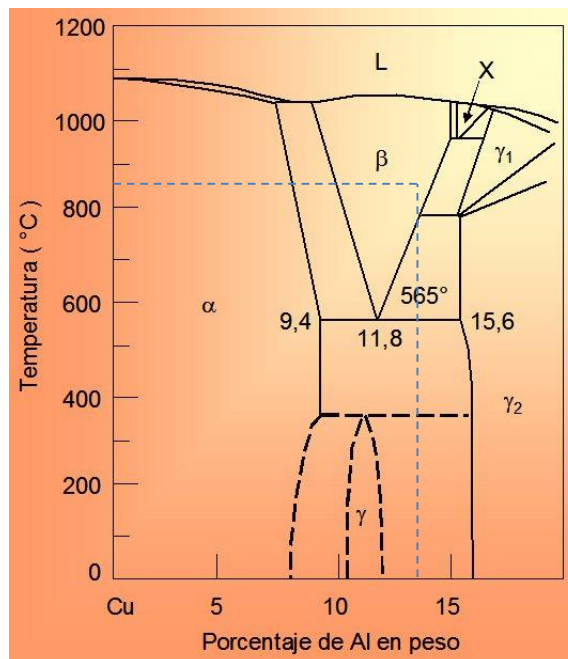


Figura 6. 22 Diagrama de fases Cu – Al.

Fuente: (Recuperado de: [http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13\\_3.html](http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13_3.html))

2. Calentar las probetas en el horno eléctrico de mufla de manera controlada hasta la temperatura de 850°C.



*Figura 6. 23 Temperatura programada en el horno de mufla.*

*Fuente: (El autor)*

3. Dejar que las probetas permanezcan en el horno el tiempo suficiente para que cada punto de la probeta llegue a la temperatura de 850°C. La probeta debe permanecer a la temperatura determinada, una hora por cada pulgada de diámetro en el caso de ejes y en el caso de planchas o placas, una hora por cada pulgada de espesor.



*Figura 6. 24 Probetas calentadas en el horno eléctrico de mufla hasta 850°C.*

*Fuente: (El autor)*

4. Enfriar las probetas en agua a 14,4°C. Para mayor comprensión revisar la curva del tratamiento térmico en el anexo A3.



*Figura 6. 25 Temperatura del agua y enfriamiento de las probetas.*

*Fuente: (El Autor)*

### **6.7.13 Ensayos químicos**

Pueden ser realizados en un ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X EDX-720.

1. Preparar una muestra para realizar el análisis químico de la aleación.



*Figura 6. 26 Muestra para análisis químico.*

*Fuente: (El autor)*



**Tabla 6. 4 Resultado del análisis químico de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi.**

<b>Elemento</b>	<b>% en peso</b>
Cu	83,369
Al	13,405
Ni	2,756
Otros	0,47

*Fuente: (El autor)*

#### **6.7.14 Análisis metalográfico**

El análisis metalográfico de la aleación inteligente con memoria de forma 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni, se llevó a cabo en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, tanto de la aleación sin templar como de la aleación templada, siguiendo los siguientes pasos:

1. Cortar una muestra manualmente o con la ayuda del Discotom. En ambos casos hay que tener cuidado de que la muestra no se sobrecaliente para que no se modifique su microestructura.



*Figura 6. 27 Probetas cortadas con el Discotom.*

*Fuente: (El Autor)*

2. Desbastar las probetas en el banco de lijas de la siguiente numeración: 240, 320, 400, 600 y 1500 granos por pulgada cuadrada, para eliminar imperfecciones superficiales o huellas profundas y dejar la superficie completamente plana.



*Figura 6. 28 Desbaste de probetas en el banco de lijas.*

*Fuente: (El autor)*

3. Pulir las probetas en la pulidora de paño a 250rpm, sin ejercer mucha presión sobre éstas, hasta que la superficie quede totalmente lisa y brillante como espejo. Para ayudar a este objetivo se utiliza alúmina de  $0,5\mu\text{m}$  suspendida en agua.



*Figura 6. 29 Probetas pulidas en la pulidora de paño.*

*Fuente: (El autor)*



4. Secar la probeta.
5. Realizar el ataque químico para poder observar la microestructura de la aleación en el microscopio. El reactivo empleado para este fin es el de aleaciones de cobre, el cual contiene 20g de  $\text{FeCl}_3$ , 5ml de  $\text{HCl}$ , 1g de  $\text{CrO}_2$  y 100ml de agua destilada. El tiempo del ataque fue de 4s tanto para la probeta sin templar como para la probeta templada. Para detener el ataque se introduce la probeta en el chorro de agua.



*Figura 6. 30 Reactivo utilizado para atacar aleaciones de cobre.*

*Fuente: (El autor)*

6. Secar nuevamente la probeta.



*Figura 6. 31 Secado de las probetas luego del ataque químico.*

*Fuente: (El autor)*

7. Observar la microestructura en el microscopio metalográfico. Colocar la probeta en el portaobjetos y regular hasta que la microestructura aparezca claramente en la pantalla de la computadora para tomar la fotografía y guardarla.





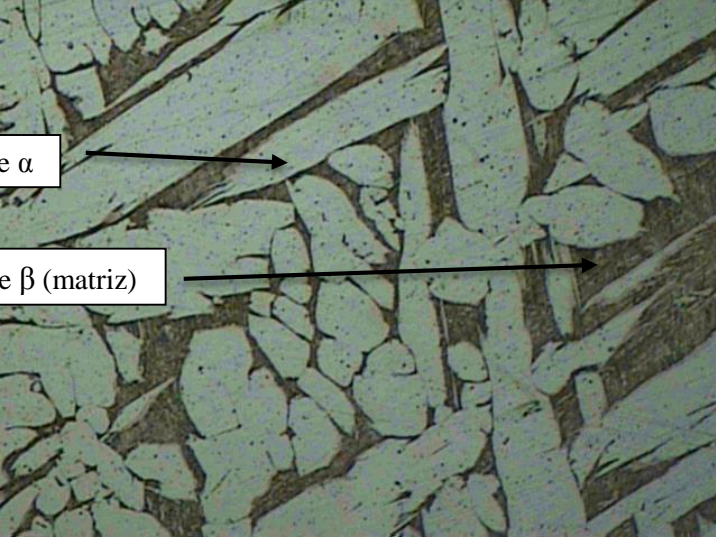
*Figura 6. 32 Microscopio metalográfico conectado a computadora.*

*Fuente: (El autor)*



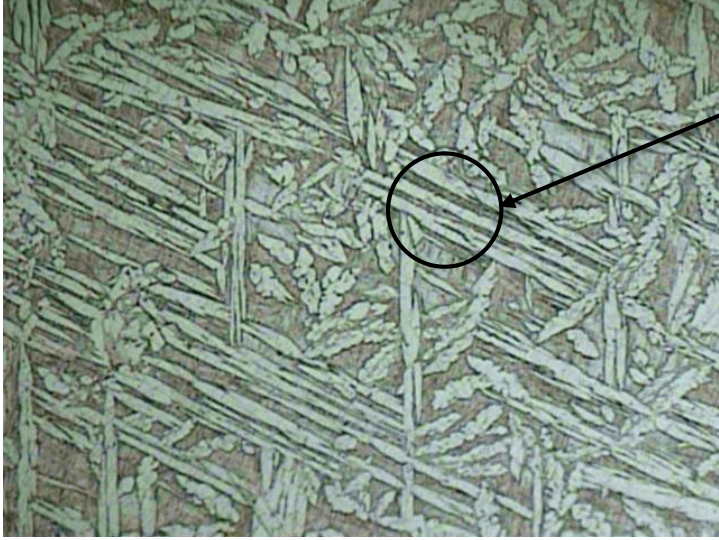
8. Analizar y evaluar la microestructura de la aleación inteligente con memoria de forma 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni.

Los resultados de los ensayos metalográficos de la aleación, tanto de la probeta sin templar como de la probeta templada se muestran a continuación:

## Microestructura metalográfica de la prueba 8 sin templar

		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>			
<b>ANÁLISIS METALGRÁFICO</b>					
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>					
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	8		
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	07/06/2014		
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM				
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín		
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>					
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico				
<b>Temperatura ambiente:</b>	17,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,65 W/m <sup>2</sup>		
<b>Velocidad del aire:</b>	0,15 m/s	<b>Otros:</b>			
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALGRÁFICO:</b>					
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido mecánico				
<b>Temperatura de pulido:</b>	20 °C	<b>Tiempo de pulido:</b>	50 min		
<b>Reactivo químico:</b>	Aleaciones de cobre	<b>Tiempo de ataque:</b>	4s.		
<b>RESULTADO:</b>					
<b>FOTOGRAFÍA DE LA MICROESTRUCTURA</b>			<b>MAGNIFICACIÓN: 100X</b>		
					
<p><i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i></p>					

## Microestructura metalográfica de la prueba 8 templada

		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>			
<b>ANÁLISIS METALGRÁFICO</b>					
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>					
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	7		
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	27/08/2014		
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Materiales - FICM				
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. S. Espín		
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>					
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico				
<b>Temperatura ambiente:</b>	18,0 °C	<b>Radiación:</b>	0,65 W/m <sup>2</sup>		
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>			
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALGRÁFICO:</b>					
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido mecánico				
<b>Temperatura de pulido:</b>	20 °C	<b>Tiempo de pulido:</b>	160 min		
<b>Reactivo químico:</b>	Aleaciones de cobre	<b>Tiempo de ataque:</b>	4s.		
<b>RESULTADO:</b>					
<b>FOTOGRAFÍA DE LA MICROESTRUCTURA</b>			<b>MAGNIFICACIÓN: 100X</b>		
					
<p><i>Aleación CuAlNi, 100x, aleaciones de cobre, 4s</i></p>					

### 6.7.15 Ensayos de dureza

Los ensayos de dureza de la aleación inteligente con memoria de forma 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni se realizaron en el Taller Mecánico Industrial de CELEC EP Unidad de Negocios HIDROAGOYÁN, para los cuales se utilizó un durómetro digital EQUOTIP y cuyos resultados se visualizaron en la escala de dureza Brinell.



*Figura 6. 33 Durómetro digital EQUOTIP.*

*Fuente: (El autor)*

1. Preparar las probetas para realizar el ensayo de dureza. Deben estar lijadas y pulidas.

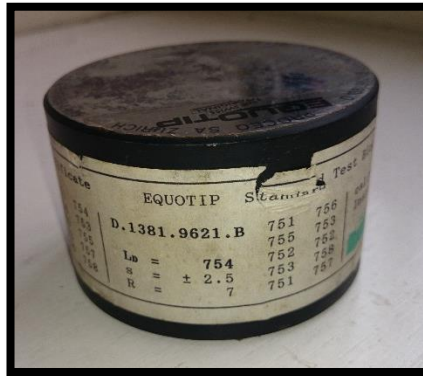


*Figura 6. 34 Probetas lijadas y pulidas para el ensayo de dureza.*

*Fuente: (El autor)*



2. Calibrar el durómetro con la galga de calibración. Realizar mediciones hasta que el durómetro marque la dureza de la galga.



*Figura 6. 35 Galga de calibración del durómetro digital EQUOTIP.*

*Fuente: (El autor)*

3. Programar el durómetro para medir dureza en aleaciones de cobre. Los resultados de las mediciones son proporcionados automáticamente por el equipo en la escala Brinell.



*Figura 6. 36 Durómetro programado para medir dureza en aleaciones de cobre.*

*Fuente: (El autor)*

4. Realizar por lo menos 10 mediciones de dureza para que los resultados sean confiables.





*Figura 6. 37 Medición de dureza de la probeta templada.*

*Fuente: (El autor)*

5. Tabular los resultados.
6. Promediar los resultados.
7. Analizar e interpretar los resultados.



Los resultados de los ensayos de dureza de la aleación, tanto de la probeta sin templar como de la probeta templada se muestran a continuación:

**Dureza de la aleación 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni sin temple**

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	8
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	06/12/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>		Taller Mecánico Ind. CELEC EP	
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. K. Zhañay
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	23,0 °C	<b>Radiación:</b>	N. A.
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA:</b>			
<b>Método:</b>	Brinell	<b>Norma aplicable:</b>	ASTM E-10
<b>Tipo de indentador:</b>		N. A.	
<b>Carga aplicada:</b>	N. A.	<b>Tiempo de ensayo:</b>	15 min.
<b>RESULTADO:</b>			
<b>N° de mediciones:</b>	<b>HB</b>	<b>Dureza promedio</b>  <b>95,4 HB ≈ 56,2 HRB</b>	
1	93		
2	89		
3	100		
4	91		
5	94		
6	98		
7	98		
8	100		
9	98		
10	93		
<b>Total:</b>	<b>954,0</b>		



**Dureza de la aleación inteligente con memoria de forma 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni templada**

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Muestra N°:</b>	8
<b>Solicitado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Fecha:</b>	06/12/2014
<b>Centro de estudio y análisis:</b>		Taller Mecánico Ind. CELEC EP	
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina	<b>Supervisado por:</b>	Ing. K. Zhañay
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES DEL LUGAR DURANTE EL ENSAYO:</b>			
<b>Lugar:</b>	UTA, campus Huachi Chico		
<b>Temperatura ambiente:</b>	23,0 °C	<b>Radiación:</b>	N. A.
<b>Velocidad del aire:</b>	0,16 m/s	<b>Otros:</b>	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA:</b>			
<b>Método:</b>	Brinell	<b>Norma aplicable:</b>	ASTM E-10
<b>Tipo de indentador:</b>		N. A.	
<b>Carga aplicada:</b>	N. A.	<b>Tiempo de ensayo:</b>	15 min.
<b>RESULTADO:</b>			
<b>N° de mediciones:</b>	<b>HB</b>	<b>Dureza promedio</b>  <b>118,6 HB ≈ 69 HRB</b>	
1	132		
2	138		
3	107		
4	120		
5	124		
6	113		
7	108		
8	115		
9	118		
10	111		
<b>Total:</b>	<b>118,6</b>		

### 6.7.16 Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional de la ciudad de Quito. Se presenta un formato lleno con los resultados del ensayo de tracción de una probeta de la aleación inteligente con memoria de forma 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni.



## ENSAYO DE TRACCIÓN

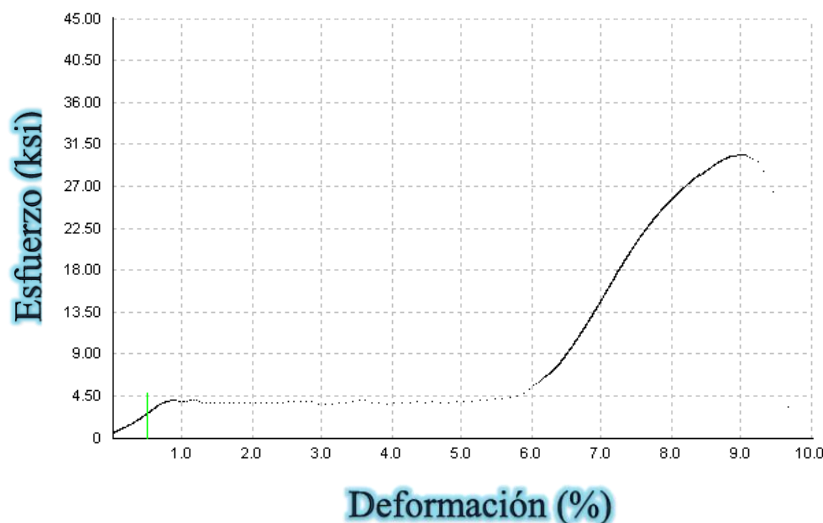
### DATOS INFORMATIVOS:

Probeta N°:	8.3	Tratamiento térmico:	Temple
Temperatura de tratamiento térmico:	850°C	Tiempo del tratamiento térmico:	1 hora
Solicitado por:	Alberto Urbina	Fecha de ejecución:	15/01/2015
Centro de estudio:	Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones EPN		
Método aplicado:	Deformación controlada		
Diámetro de la probeta:	1/2"	Longitud de calibración:	2"
Norma:	ASTM E8		

### RESULTADO:

#### Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación

Aleación CuAlNi temple: 850°C, enfriada en agua a 14,4°C



Diámetro promedio:	12,51 mm		
Carga máxima registrada:	5800 lbf	25800 N	2630,39 kg
Límite de fluencia (Sy):	26,8 ksi	184,9 MPa	1883,90 kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la tracción (Sut):	30,4 ksi	209,9 MPa	2136,97 kg/cm <sup>2</sup>
% de Elongación en 50 mm (ε):	4,9%		
Tipo de falla:	Irregular		
Observaciones:	La probeta se rompió dentro de las marcas		

### 6.7.17 Ensayos de impacto

Este ensayo se desarrolló en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

1. Colocar la probeta en la máquina para ensayos Charpy con la muesca en sentido opuesto al punto de impacto del martillo.



*Figura 6. 38 Ubicación de la probeta en el soporte.*

*Fuente: (El autor)*

2. Soltar el martillo del péndulo Charpy.



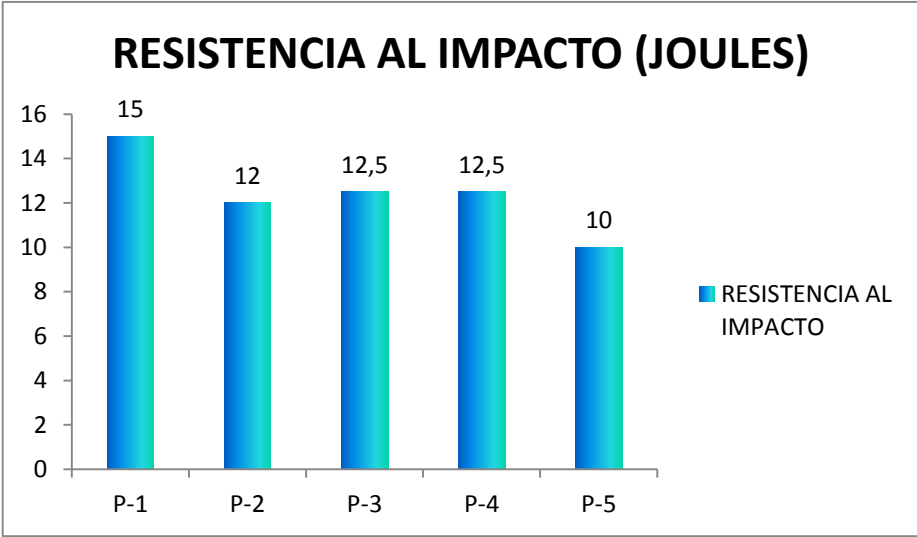


*Figura 6. 39 Martillo del péndulo asegurado en la posición superior*

*.Fuente: (El autor)*

3. Registrar y tabular los datos.

Formato lleno con los resultados del ensayo de impacto de la aleación inteligente con memoria de forma 83,369% Cu – 13,405% Al – 2,756% Ni.

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>ENSAYO DE IMPACTO</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Probeta N°:</b>	P-1, P-2, P-3, P-4, P-5	<b>Tratamiento térmico:</b>	Temple
<b>Temperatura de tratamiento térmico:</b>	850°C	<b>Tiempo del tratamiento térmico:</b>	1 hora
<b>Norma aplicada:</b>	ASTM E23	<b>Fecha de ejecución:</b>	15/10/2014
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Metalografía de Materiales FICM		
<b>Método aplicado:</b>	Ensayo Charpy		
<b>Realizado por:</b>	Alberto Urbina		
<b>Temperatura ambiente:</b>	17°C	<b>Tiempo del ensayo:</b>	25 min.
<b>RESULTADO:</b>			
 <p style="text-align: center;"><b>RESISTENCIA AL IMPACTO (JOULES)</b></p> <p style="text-align: center;">Aleación CuAlNi, templada a 850°C y enfriada en agua a 14,4°C</p>			
N° de probetas	Energía de rotura (Joules)	Promedio	
P-1	15	<b>12,5 Joules</b>	
P-2	12,5		
P-3	12,5		
P-4	12,5		
P-5	10		

### 6.7.18 Determinación de la densidad

La determinación de la densidad de la aleación inteligente con memoria de forma 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni se realizó en el Laboratorio de Metalografía de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

1. Determinar la masa por medio de una balanza electrónica. El valor registrado fue 74,5 gramos.



*Figura 6. 40 Medición de la masa en la balanza electrónica.*

*Fuente: (El Autor)*

2. Medir el volumen inicial de agua en la probeta graduada: 60ml de agua.
3. Introducir la muestra de la aleación en la probeta con agua.
4. Leer el volumen final que se desplazó al meter la muestra. El valor marcado fue 70ml.



*Figura 6. 41 Medición del volumen de la muestra.*

*Fuente: (El autor)*

5. Calcular el volumen útil (muestra) que se requiere para determinar la densidad, se lo obtuvo restando el volumen inicial del final:

$$(70 - 60)ml = 10ml$$

6. Calcular la densidad de la aleación mediante la ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ec. (10)}$$

Al reemplazar los valores medidos en la ecuación 10 tenemos:

$$\rho = \frac{74,5g}{10cm^3}$$

$$\rho = 7,45 \frac{g}{cm^3}$$

### **6.7.19 Determinación de la aplicación industrial**

De acuerdo con las propiedades obtenidas en el estudio de la aleación inteligente con memoria de forma 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni, este material se puede utilizar para la fabricación de breakers ya que recupera su forma a temperaturas más altas que las otras aleaciones inteligentes en base cobre.

## 6.8 ADMINISTRACIÓN

Todos los costos generados para el desarrollo de la presente investigación se detallan a continuación.

**Tabla 6. 5 Rubros de gastos de recursos materiales.**

<b>RECURSOS MATERIALES</b>			
<b>CANTIDAD</b>	<b>DETALLE</b>	<b>PRECIO (Unit)</b>	<b>Valor (USD)</b>
2	Crisol de grafito	55,00	110,00
50	Libras de chatarra de cobre	2,50	125,00
10	Libras de aluminio electrolítico	1,00	10,00
14	Kilogramos de níquel	32,43	454,00
3	Pliego de lija N° 240	0,60	1,80
3	Pliego de lija N° 320	0,60	1,80
3	Pliego de lija N° 400	0,60	1,80
3	Pliego de lija N° 600	0,60	1,80
3	Pliego de lija N° 1500	0,60	1,80
1	Mascarilla para gases	30,00	30,00
1	Mandil de cuero	7,50	7,50
1	Par de guantes de cuero	8,00	8,00
1	Gafas de seguridad	10,00	10,00
1	Frasco de reactivo químico	20,00	20,00
½	Libra de Alúmina	160,00	80,00
6	Maquinados de probeta de tracción	15,00	90,00
6	Ensayos de tracción	6,50	39,00
7	Maquinado de probeta ensayo Charpy	5,00	35,00
7	Análisis Químicos	0,00	0,00
1	Manta cerámica	100,00	100,00
<b>SUBTOTAL 1</b>			<b>1127,50</b>

*Fuente: (El autor)*

**Tabla 6. 6 Costos de recursos humanos.**

<b>RECURSOS HUMANOS</b>			
<b>CANTIDAD</b>	<b>DETALLE</b>	<b>PRECIO (Unit)</b>	<b>Valor (USD)</b>
1	Recolector de Información	70.00	70.00
1	Ayudante de preparación de probetas	50.00	50.00
		<b>SUBTOTAL 2</b>	<b>120.00</b>

*Fuente: (El autor)*

**Tabla 6. 7 Tabla de costos de recursos varios**

<b>RECURSOS VARIOS</b>			
<b>CANTIDAD</b>	<b>DETALLE</b>	<b>PRECIO (Unit)</b>	<b>Valor (USD)</b>
3	Resmas de Hojas	6,00	18,00
1000	Impresiones	0,15	150,00
400	Copias	0,02	8,00
5	Anillados	2,00	10,00
3	Empastados	15,00	45,00
200	Horas de Internet	0,80	160,00
1	Caja para guardar probetas	15,00	15,00
8	Recargas de celular	5,00	40,00
	Transporte	70,00	70,00
		<b>SUBTOTAL 3</b>	<b>516,00</b>

*Fuente: (El autor)*



**Tabla 6. 8 Tabla de costos de recursos económicos totales**

<b>RECURSOS ECONÓMICOS TOTALES</b>	
<b>DETALLE</b>	<b>VALOS (USD)</b>
RECURSOS MATERIALES	1127,50
RECURSOS HUMANOS	120,00
RECURSOS VARIOS	516,00
<b>SUMATORIA S1+S2+S3</b>	<b>1763,50</b>
<b>IMPREVISTOS 10%</b>	<b>176,35</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1939,85</b>

*Fuente: (El autor)*

## **6.9 PREVISIÓN DE LA EVALUACIÓN**

Una vez finalizado el presente trabajo de investigación, el mismo que fue desarrollado en su gran mayoría en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato y también en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional de la ciudad de Quito, se ha llegado a la conclusión de que la aleación 83,369%Cu – 13,405%Al – 2,756%Ni muestra un efecto de memoria de forma, la cual, al ser deformada por una fuerza externa recupera su forma original al aplicarle calor, es decir, es una aleación con memoria de forma térmica.

Se sugiere evaluar las propiedades de esta aleación al someterla a tratamientos térmicos a distintas temperaturas en futuras investigaciones tomando en cuenta las conclusiones y recomendaciones establecidas en este estudio.

## 6.10 BIBLIOGRAFÍA

### 6.10.1 Libros

1. Askeland, D. (2004). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. México D. F.: Cengage Learning Editores.
2. ASM International. (1992). *ASM HANDBOOK VOLUME 3 Alloy Phase Diagrams*. Estados Unidos.
3. ASTM. (2010). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic MAterials*. Pennsylvania: ASTM International.
4. Callister, W. J. (2007). *Materials Science and Engineering* (Séptima ed.). John Wiley & Sons. Inc.
5. Davis, H. E., Troxell, G. E., & Wiskocil, C. W. (1964). *Ensayo e Inspección de los Materiales en Ingeniería*. McGRAW-HILL.
6. de la Flor López, S. (2005). *Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma*. Catalunya, España.
7. de Monroy, C. (s.f.). *Conformación por moldeo*. I. E. S., Departamento de tecnología.
8. Espín, S. (2012). *Estudio de la aleación inteligente con memoria de forma CuZnAl para determinar su aplicación industrial*. Ambato, Tungurahua, Ecuador.
9. FARJADO Jorge, A. M. (2011). Diagnóstico del desarrollo tecnológico de la ciencia de materiales en las PYMES de la ciudadde Cuenca. *Ingenius No 6*.
10. Gibson Torres, P. C. (2008). *Fabricación y caracterización de una aleación con memoria de forma CuZnAl considerada para disipadores sísmicos*. Santiago de Chile.
11. Graeme, J. A., Jones, A. P., & Noble Eddy, R. (2008). Molecular dynamics simulations of the martensitic phase transition process. *Materials Science and Engineering: A*, 11-17.
12. Graeme, J. A., Jones, A. P., & R., N.-E. (2008). Molecular dynamics. *Materials Science and Engineering: A*, 11-17.
13. Kneissl, A. C., Unterweger, E., Bruncko, M., Logen, G., Mehrabi, K., & Scherngell, H. (s.f.). MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF NiTi AND CuAlNi SHAPE MEMORY ALLOYS. *MJoM*, 89-100.

14. Pérez, R., San Juan, J., Recarte, V., Nó, M., Caruana, G., & Ruano, O. (1998). Elaboración de aleaciones CuAlNi con efecto memoria de forma mediante pulvimetalurgia. *Revista de metalurgia*, 329-332.
15. SÁNCHEZ, M. E.-C. (2010). *Tecnología de materiales*. México, México: Trillas.
16. Santos, E., Yenque, D. J., Rojas, O., & Rosales, U. V. (2001). Acerca del ensayo de dureza, notas científicas. *INDUSTRIAL DATA*, 73-80.
17. Schwartz, M. (2002). *Encyclopedia of Smart Materials*. New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
18. Villalva, H. (s.f.). *Procedimientos de fabricación*. I. E. S.
19. Villalva, H. (s.f.). *Procedimientos de fabricación*. I. E. S., Departamento de Tecnología.
20. Zelaya, E. (2006). *Estabilidad de fases bajo irradiación en aleaciones con memoria de forma base cobre*. San Carlos de Bariloche.

#### **6.10.2 Páginas web**

1. Abanto, J., Carrasco, M., & otros, y. (21 de Noviembre de 2013). *slideshare*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/torimatcordova/distribucion-t-de-student-28545004>
2. Callón, J. (11 de Julio de 2002). *Elementos*. Recuperado el 1 de Agosto de 2013, de <http://elementos.org.es/cobre>
3. Callón, J. (11 de Julio de 2002). *Elementos*. Recuperado el 1 de Agosto de 2013, de <http://elementos.org.es/aluminio>
4. Callón, J. (11 de Julio de 2002). *Elementos*. Recuperado el 1 de Agosto de 2013, de <http://elementos.org.es/niquel>
5. <http://190.105.160.51/~material/materiales/presentaciones/ApunteDureza.pdf>. (s.f.).

# **ANEXOS**

## ANEXO A1: Instrucciones para el precalentamiento de crisoles.

### PRECALENTAMIENTO / PRIMER USO

**LOS HORNOS ELÉCTRICOS:** Los hornos eléctricos : crisol debe ser precalentado vacío y poder el máximo para lograr un color uniforme rojo (900 °C) y debe permanecer así durante 30 minutos esta es una condición previa para el recubrimiento. El crisol se puede cargar y luego se ajusta a la temperatura de funcionamiento.

**HORNOS PETRÓLEO Y GAS:** crisol debe ser precalentado vacío hasta un color rojo uniforme (alrededor de 900 °C) y debe permanecer así durante 30 minutos esta es una condición previa para el barniz. El crisol se puede cargar y luego se ajusta a la temperatura de funcionamiento.

El tiempo de calentamiento depende del tamaño del crisol. En el caso de los grandes crisoles y hornos con quemadores de gran alcance del aumento de la temperatura debe ser controlada en las primeras fases para minimizar los cambios bruscos de temperatura antes de aplicar la máxima potencia. Evite el contacto directo de la llama en la pared del crisol.

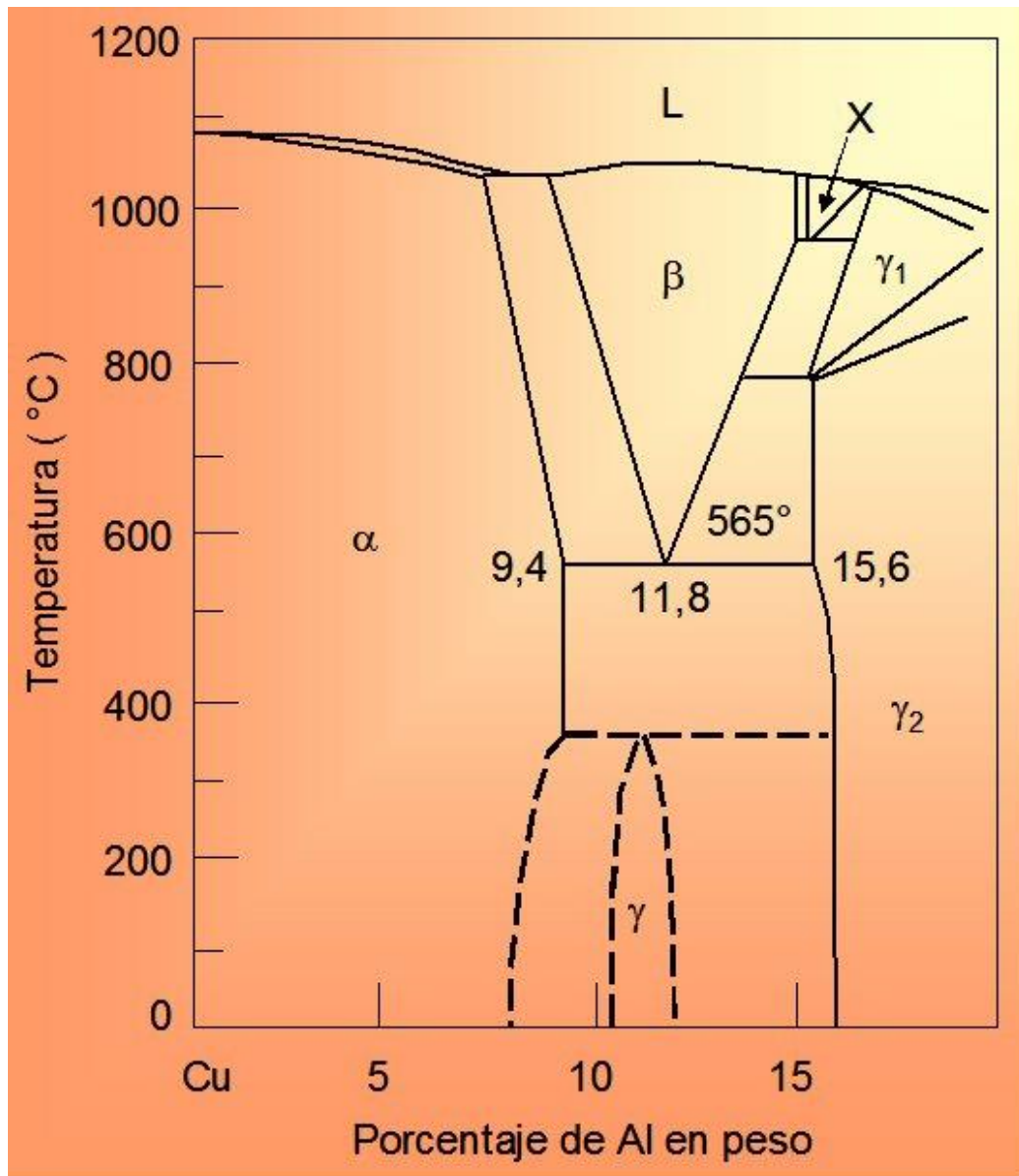
Con este procedimiento se llevó toda la humedad absorbida en el transporte, el almacenamiento y garantizar un esmalte con la máxima resistencia a la oxidación. Si el material refractario del horno fue reparado y no hay riesgo de cualquier crisol de absorber la humedad del horno debe calentarse lentamente a 200 °C para permanecer en esta temperatura para quitar toda la humedad.

En el caso de los crisoles que reciben carga neta es importante que la temperatura del crisol es igual o mayor que la carga para evitar cambios bruscos de temperatura

**HORNOS DE INDUCCIÓN:** El proceso de calentamiento depende de la frecuencia del horno, las dimensiones de la bobina y la resistencia del metal a ser fundido. Se recomienda siempre que sea posible para precalentar el crisol vacío. El horno debe estar vinculado inicialmente con el 20% de la potencia máxima hasta que lo crisol se convierte en rojo. Después de 30 minutos, el poder puede ser aumentado a 50% máximo. Carge suavemente con lo crisol de metal y mantener el poder en un 50% hasta el crisol está medio lleno de metal fundido. El poder puede ser aumentado hasta el máximo.

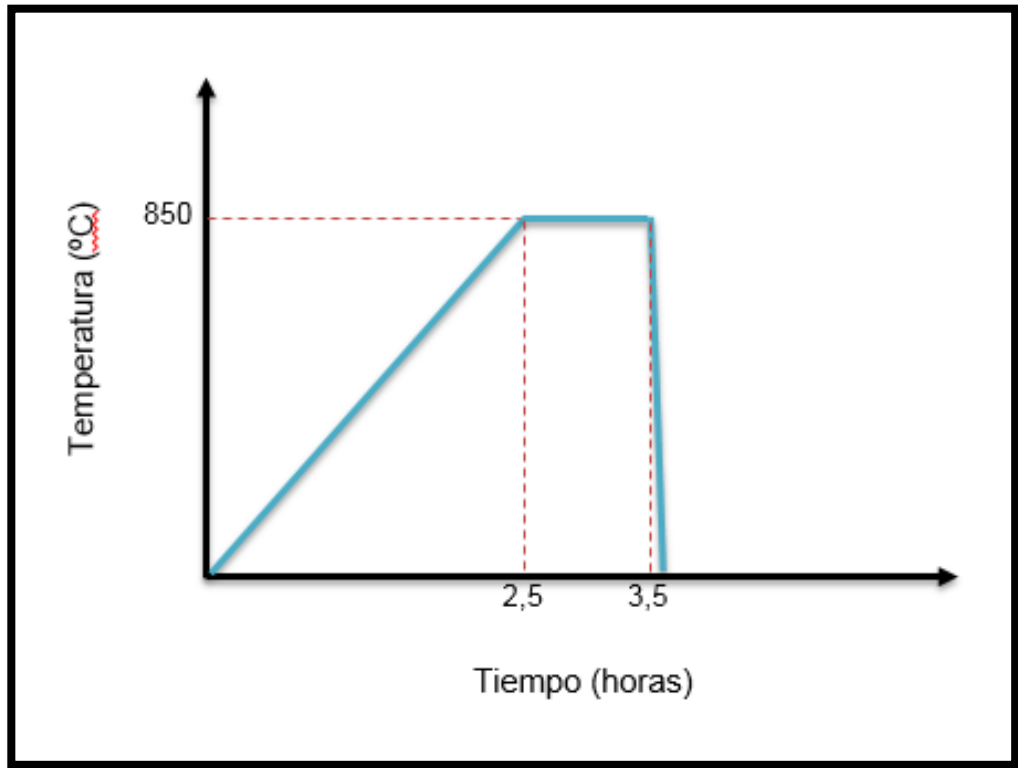
Fuente: (Catálogo de MAQUINARIA HENRÍQUES C.A.)

**ANEXO A2:** Diagrama de fases cobre aluminio.



**Fuente:** (Recuperado de: [http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13\\_3.html](http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13_3.html))

**ANEXO A3:** Curva para el tratamiento térmico de temple.

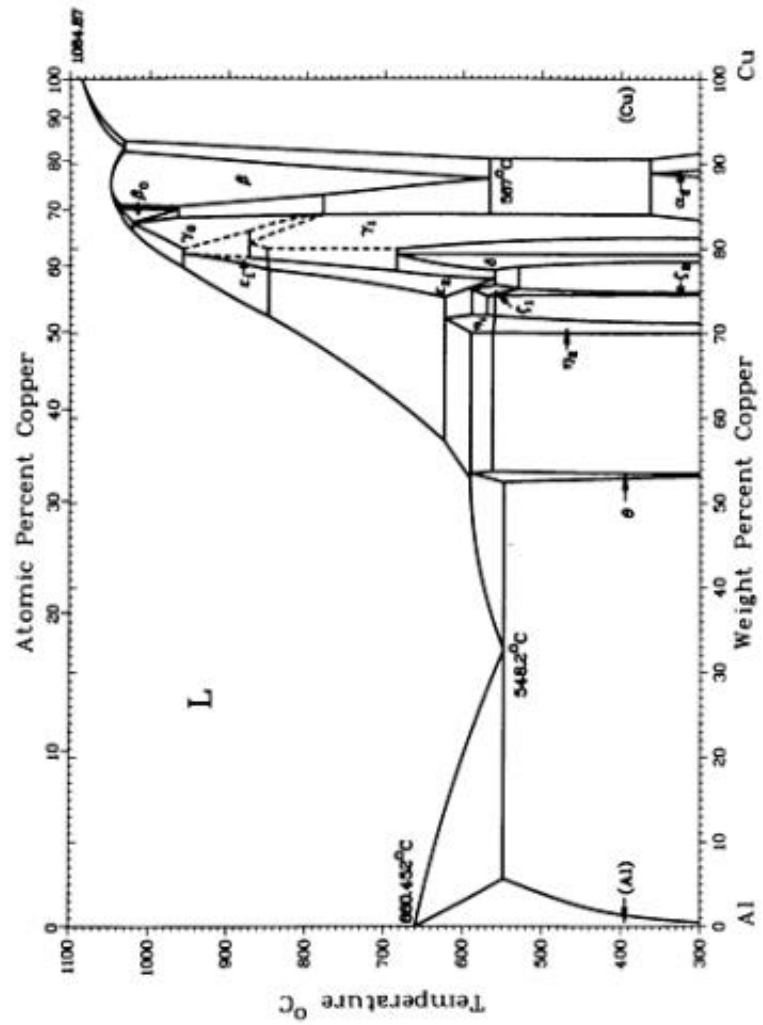


**Fuente:** (El autor)

ANEXO A4: Diagrama de equilibrio de fases Al - Cu

**Al-Cu (Aluminum - Copper)**

J.L. Murray, 1985

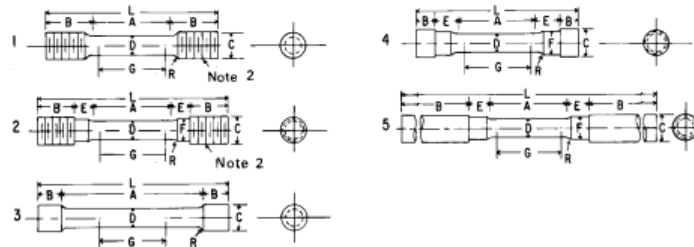


Fuente: (ASM International, 1992)



**ANEXO B1:** Extracto de la norma ASTM E8 – 09: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.

**E8/E8M – 09**



Dimensions, mm [in.]  
For Test Specimens with Gage Length Four times the Diameter [E8]

	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gage length	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	10 [0.375]	2 [0.0625]	10 [0.375]	10 [0.375]
A—Length of reduced section	56 [2.25] min	56 [2.25] min	100 [4] approximate	56 [2.25] min	56 [2.25] min
L—Overall length, approximate	145 [5]	155 [5.5]	155 [5.5]	140 [4.75]	255 [9.5]
B—Length of end section (Note 3)	35 [1.375] approximate	25 [1] approximate	20 [0.75] approximate	15 [0.5] approximate	75 [3] min
C—Diameter of end section	20 [0.75]	20 [0.75]	20 [0.75]	22 [0.875]	20 [0.75]
E—Length of shoulder and fillet section, approximate		15 [0.625]		20 [0.75]	15 [0.625]
F—Diameter of shoulder		15 [0.625]		15 [0.625]	15 [0.625]

Dimensions, mm [in.]  
For Test Specimens with Gage Length Five times the Diameter [E8M]

	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gage length	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	10 [0.375]	2 [0.0625]	10 [0.375]	10 [0.375]
A—Length of reduced section	75 [3] min	75 [3] min	75 [3] approximate	75 [3] min	75 [3] min
L—Overall length, approximate	145 [5]	155 [5.5]	155 [5.5]	140 [4.75]	255 [9.5]
B—Length of end section (Note 3)	35 [1.375] approximate	25 [1] approximate	20 [0.75] approximate	15 [0.5] approximate	75 [3] min
C—Diameter of end section	20 [0.75]	20 [0.75]	20 [0.75]	22 [0.875]	20 [0.75]
E—Length of shoulder and fillet section, approximate		15 [0.625]		20 [0.75]	15 [0.625]
F—Diameter of shoulder		15 [0.625]		15 [0.625]	15 [0.625]

NOTE 1—The reduced section may have a gradual taper from the ends toward the center with the ends not more than 1 % larger in diameter than the center.

NOTE 2—On Specimens 1 and 2, any standard thread is permissible that provides for proper alignment and aids in assuring that the specimen will break within the reduced section.

NOTE 3—On Specimen 5 it is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips.

NOTE 4—The values stated in SI units in the table for Fig. 9 are to be regarded as separate from the inch/pound units. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore each system must be used independently of the other.

**FIG. 9 Various Types of Ends for Standard Round Tension Test Specimens**

6.5.1 For material with a nominal thickness of 0.13 to 5 mm [0.005 to 0.1875 in.], use the sheet-type specimen described in 6.3.

6.5.2 For material with a nominal thickness of 5 to 12.5 mm [0.1875 to 0.500 in.], use either the sheet-type specimen of 6.3 or the plate-type specimen of 6.2.

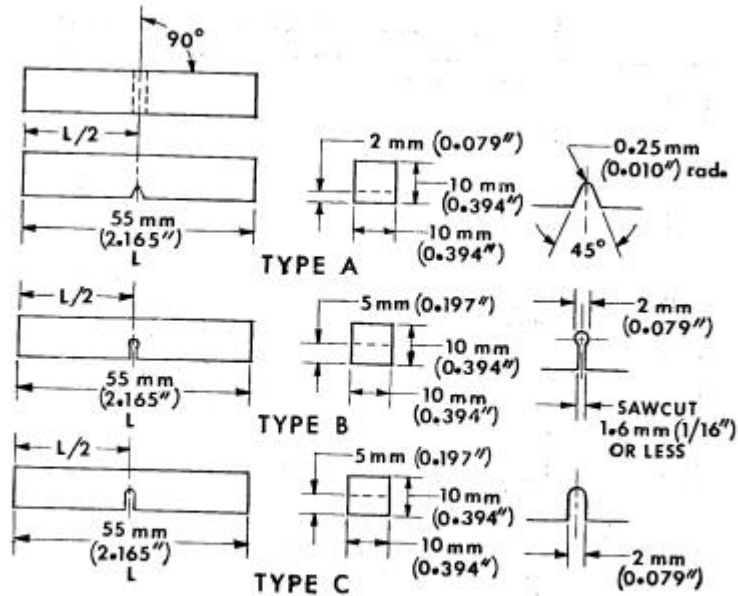
6.5.3 For material with a nominal thickness of 12.5 to 19 mm [0.500 to 0.750 in.], use either the sheet-type specimen of 6.3, the plate-type specimen of 6.2, or the largest practical size of round specimen described in 6.4.

6.5.4 For material with a nominal thickness of 19 mm [0.750 in.], or greater, use the plate-type specimen of 6.2 or the largest practical size of round specimen described in 6.4.

6.5.4.1 If the product specifications permit, material of a thickness of 19 mm [0.750 in.], or greater may be tested using a modified sheet-type specimen conforming to the configuration shown by Fig. 1. The thickness of this modified specimen must be machined to 10 ± 0.5 mm [0.400 ± 0.020 in.], and must be uniform within 0.1 mm [0.004 in.] throughout the

**ANEXO B2:** Extracto de la norma ASTM E23 – 82: Standard Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.

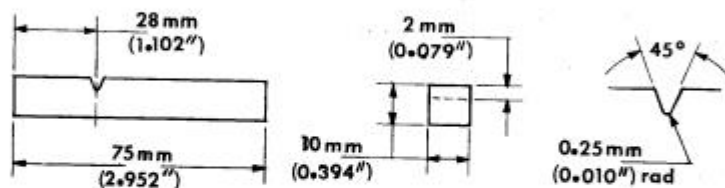
ASTM E 23



NOTE—Permissible variations shall be as follows:

Notch length to edge	$\pm 2^\circ$
Adjacent sides shall be at	$90^\circ \pm 10 \text{ min}$
Cross-section dimensions	$\pm 0.075 \text{ mm } (\pm 0.003 \text{ in.})$
Length of specimen ( $L$ )	$+0, -2.5 \text{ mm } (+0, -0.100 \text{ in.})$
Centering of notch ( $L/2$ )	$\pm 1 \text{ mm } (\pm 0.039 \text{ in.})$
Angle of notch	$\pm 1^\circ$
Radius of notch	$\pm 0.025 \text{ mm } (\pm 0.001 \text{ in.})$
Notch depth:	
Type A specimen	$\pm 0.025 \text{ mm } (\pm 0.001 \text{ in.})$
Types B and C specimen	$\pm 0.075 \text{ mm } (\pm 0.003 \text{ in.})$
Finish requirements	$2 \mu\text{m } (63 \mu\text{in.})$ on notched surface and opposite face; $4 \mu\text{m } (125 \mu\text{in.})$ on other two surfaces

FIG. 6 Charpy (Simple-Beam) Impact Test Specimens, Types A, B, and C



NOTE—Permissible variations shall be as follows:

Notch length to edge	$90 \pm 2^\circ$
Cross-section dimensions	$\pm 0.025 \text{ mm } (\pm 0.001 \text{ in.})$
Length of specimen	$+0, -2.5 \text{ mm } (\pm 0, -0.100 \text{ in.})$
Angle of notch	$\pm 1^\circ$
Radius of notch	$\pm 0.025 \text{ mm } (\pm 0.001 \text{ in.})$
Notch depth	$\pm 0.025 \text{ mm } (\pm 0.001 \text{ in.})$
Adjacent sides shall be at	$90^\circ \pm 10 \text{ min}$
Finish requirements	$2 \mu\text{m } (63 \mu\text{in.})$ on notched surface and opposite face; $4 \mu\text{m } (125 \mu\text{in.})$ on other two surfaces

FIG. 7 Izod (Cantilever-Beam) Impact Test Specimen, Type D

**Fuente:** (Norma ASTM E23-82, 1982, pág. 248)

## ANEXO B3: Extracto de la norma ASTM E112 – 96: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size

### ASTM E 112 – 96<sup>3</sup>

size of the specimen, as viewed at the magnification,  $M$ , instead of at the basic magnification,  $M_b$  (75X or 100X), to yield the true ASTM grain-size number. Thus, for a magnification of 25X, the true ASTM grain-size number is four numbers lower than that of the corresponding photomicrograph at 100X ( $Q = -4$ ). Likewise, for 400X, the true ASTM grain-size number is four numbers higher ( $Q = +4$ ) than that of the corresponding photomicrograph at 100X. Similarly, for 300X, the true ASTM grain-size number is four numbers higher than that of the corresponding photomicrograph at 75X.

10.8 The small number of grains per field at the coarse end of the chart series, that is, size 00, and the very small size of the grains at the fine end make accurate comparison ratings difficult. When the specimen grain size falls at either end of the chart range, a more meaningful comparison can be made by changing the magnification so that the grain size lies closer to the center of the range.

10.9 The use of transparencies<sup>5</sup> or prints of the standards, with the standard and the unknown placed adjacent to each other, is to be preferred to the use of wall chart comparison with the projected image on the microscope screen.

10.10 No particular significance should be attached to the fact that different observers often obtain slightly different results, provided the different results fall within the confidence limits reasonably expected with the procedure used.

10.11 There is a possibility when an operator makes repeated checks on the same specimen using the comparison method that they will be prejudiced by their first estimate. This disadvantage can be overcome, when necessary, by changes in magnification, through bellows extension, or objective or eyepiece replacement between estimates (1).<sup>6</sup>

10.12 Make the estimation of macroscopically-determined grain sizes (extremely coarse) by direct comparison, at a magnification of 1X, of the properly prepared specimen, or of a photograph of a representative field of the specimen, with photographs of the standard grain series shown in Plate I (for untwinned material) and Plates II and III (for twinned material). Since the photographs of the standard grain size series were made at 75 and 100 diameters magnification, grain sizes estimated in this way do not fall in the standard ASTM grain-size series and hence, preferably, should be expressed either as diameter of the average grain or as one of the macro-grain size numbers listed in Table 3. For the smaller macroscopic grain sizes, it may be preferable to use a higher magnification and the correction factor given in Note 3, particularly if it is desirable to retain this method of reporting.

NOTE 3—If the grain size is reported in ASTM macro-grain size numbers, it is convenient to use the relationship:

<sup>3</sup> Transparencies of the various grain sizes in Plate I see available from ASTM Headquarters. Order Adjunct: ADJE1127S for the set. Transparencies of individual grain size groupings are available on request. Order Adjunct: ADJE011205T (Grain Size 00), ADJE11206T (Grain Size 0), ADJE11207T (Grain Size 0.5), ADJE11208T (Grain Size 1.0), ADJE11209T (Grain Size 1.5), ADJE11210T (Grain Size 2.0), ADJE11211T (Grain Size 2.5), ADJE11212T (Grain Sizes 3.0, 3.5, and 4.0), ADJE11213T (Grain Sizes 4.5, 5.0, and 5.5), ADJE11214T (Grain Sizes 6.0, 6.5, and 7.0), ADJE11215T (Grain Sizes 7.5, 8.0, and 8.5), and ADJE11216T (Grain Sizes 9.0, 9.5, and 10.0). Charts illustrating grain size numbers 00 to 10 are on 8½ by 11 in. (215.9 by 279.4 mm) film. Transparencies for Plates II, III, and IV are not available.

<sup>6</sup> The boldface numbers in parentheses refer to the list of references appended to these test methods.

$$Q_m = 2 \log_2 M \quad (3)$$

$$= 6.64 \log_{10} M$$

where  $Q_m$  is a correction factor that is added to the apparent grain size of the specimen, when viewed at the magnification  $M$ , instead of at 1X, to yield the true ASTM macro-grain size number. Thus, for a magnification of 2X, the true ASTM macro-grain size number is two numbers higher ( $Q = +2$ ), and for 4X, the true ASTM macro-grain size number is four numbers higher ( $Q = +4$ ) than that of the corresponding photograph.

10.13 The comparison procedure shall be applicable for estimating the austenite grain size in ferritic steel after a McQuaid-Ehn test (see Annex A3, A3.2), or after the austenite grains have been revealed by any other means (see Annex A3, A3.3). Make the grain-size measurement by comparing the microscopic image, at magnification of 100X, with the standard grain size chart in Plate IV, for grains developed in a McQuaid-Ehn test (see Annex A3); for the measurement of austenite grains developed by other means (see Annex A3), measure by comparing the microscopic image with the plate having the most nearly comparable structure observed in Plates I, II, or IV.

10.14 The so-called "Shepherd Fracture Grain Size Method" of judging grain size from the appearance of the fracture of hardened steel (2), involves comparison of the specimen under investigation with a set of standard fractures.<sup>7</sup> It has been found that the arbitrarily numbered fracture grain size series agree well with the correspondingly numbered ASTM grain sizes presented in Table 4. This coincidence makes the fracture grain sizes interchangeable with the austenitic grain sizes determined microscopically. The sizes observed microscopically shall be considered the primary standard, since they can be determined with measuring instruments.

### 11. Planimetric (or Jeffries') (3) Procedure

11.1 In the planimetric procedure inscribe a circle or rectangle of known area (usually 5000 mm<sup>2</sup> to simplify the calculations) on a micrograph or on the ground-glass screen of the metallograph. Select a magnification which will give at least 50 grains in the field to be counted. When the image is focused properly, count the number of grains within this area. The sum of all the grains included completely within the known area plus one half the number of grains intersected by the circumference of the area gives the number of equivalent whole grains, measured at the magnification used, within the area. If this number is multiplied by the Jeffries' multiplier,  $f$ , in the second column of Table 5 opposite the appropriate magnification, the product will be the number of grains per square millimetre  $N_A$ . Count a minimum of three fields to ensure a reasonable average. The number of grains per square millimetre at 1X,  $N_A$ , is calculated from:

$$N_A = f \left( N_{\text{Inside}} + \frac{N_{\text{Intercepted}}}{2} \right) \quad (4)$$

where  $f$  is the Jeffries' multiplier (see Table 5),  $N_{\text{Inside}}$  is the number of grains completely inside the test circle and  $N$

<sup>7</sup> A photograph of the Shepherd standard fractures can be obtained from ASTM Headquarters. Order Adjunct: ADJE011224.



TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. G	N <sub>v</sub> Grains/Unit Area		A Average Grain Area		d̄ Average Diameter		λ̄ Mean Intercept		N <sub>L</sub> No./mm
	No./in. <sup>2</sup> at 100X	No./mm <sup>2</sup> at 1X	mm <sup>2</sup>	μm <sup>2</sup>	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.95	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	166.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

TABLE 5 Relationship Between Magnification Used and Jeffries' Multiplier, f, for an Area of 5000 mm<sup>2</sup> (a Circle of 79.8-mm Diameter) (f = 0.0002 M<sup>2</sup>)

Magnification Used, M	Jeffries' Multiplier, f to Obtain Grains/mm <sup>2</sup>
1	0.0002
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75 <sup>A</sup>	1.125
100	2.0
150	4.5
200	8.0
250	12.5
300	18.0
500	50.0
750	112.5
1000	200.0

<sup>A</sup> At 75 diameters magnification, Jeffries' multiplier, f, becomes unity if the area used is 5625 mm<sup>2</sup> (a circle of 84.5-mm diameter).

Intercepted is the number of grains that intercept the test circle. The average grain area,  $\bar{A}$ , is the reciprocal of  $N_v$ , that is,  $1/N_v$ , while the mean grain diameter,  $\bar{d}$ , as listed on Plate III (see 10.2.3), is the square root of  $\bar{A}$ . This grain diameter has no physical significance because it represents the side of a square grain of area  $\bar{A}$ , and grain cross sections are not square.

11.2 To obtain an accurate count of the number of grains completely within the test circle and the number of grains intersecting the circle, it is necessary to mark off the grains on the template, for example, with a grease pencil or felt tip pen. The precision of the planimetric method is a function of the number of grains counted (see Section 19). The number of grains within the test circle, however, should not exceed about 100 as counting becomes tedious and inaccurate. Experience suggests that a magnification that produces about 50 grains

within the test circle is about optimum as to counting accuracy per field. Because of the need to mark off the grains to obtain an accurate count, the planimetric method is less efficient than the intercept method (see Section 12).

11.3 Fields should be chosen at random, without bias, as described in 5.2. Do not attempt to choose fields that appear to be typical. Choose the fields blindly and select them from different locations on the plane of polish.

11.4 By original definition, a microscopically-determined grain size of No. 1 has 1,000 grains/in.<sup>2</sup> at 100X, hence 15,500 grains/mm<sup>2</sup> at 1X. For areas other than the standard circle, determine the actual number of grains per square millimetre,  $N_A$ , and find the nearest size from Table 4. The ASTM grain size number, G, can be calculated from  $N_A$  (number of grains per mm<sup>2</sup> at 1X) using (Eq 1) in Table 6.

TABLE 6 Grain Size Equations Relating Measured Parameters to the Microscopically Determined ASTM Grain Size, G

NOTE 1—Determine the ASTM Grain Size, G, using the following equations:

NOTE 2—The second and third equations are for single phase grain structures.

NOTE 3—To convert micrometres to millimetres, divide by 1000.

NOTE 4—A calculated G value of -1 corresponds to ASTM G = 00.

Equation	Units
$G = (3.321928 \log_{10} N_A) - 2.954$	$N_A$ in mm <sup>-2</sup>
$G = (6.643856 \log_{10} N_A) - 3.288$	$N_A$ in mm <sup>-1</sup>
$G = (6.643856 \log_{10} P_L) - 3.288$	$P_L$ in mm <sup>-1</sup>
$G = (-6.643856 \log_{10} \bar{d}) - 3.288$	$\bar{d}$ in mm

Fuente: (Norma ASTM E112-96, págs. 7-8)

**ANEXO C1:** Informe técnico de los resultados de los ensayos de tracción de las probetas de la prueba 8 templada.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**LABORATORIO DE ANÁLISIS**  
**DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES**



## INFORME TÉCNICO

LAEV – DIC.26

Quito, 15 de enero de 2015

**TRABAJO SOLICITADO POR:** **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
Sr. Luis Alberto Urbina Maldonado

**ORDEN DE TRABAJO Nº 0002505**

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en probetas de sección circular pertenecientes al Sr. Luis Alberto Urbina Maldonado para el desarrollo del proyecto de titulación “Estudio de la aleación inteligente con memoria de forma CuAlNi para determinar su Aplicación Industrial”. Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

### RESULTADOS

**1. MUESTRAS:** Seis (6) probetas de sección circular para ensayo de tracción de acuerdo a la norma ASTM E8.

### 2. ENSAYO DE TRACCIÓN DE ACUERDO A LA NORMA ASTM E8

En la tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas.



LAEV-EPN  
Orden Nº: 0002505



Página 1 de 5

Tabla 1. Resistencia a la tracción, límite de fluencia y elongación medidas en las muestras.

Id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
T1	12,51	10.790	47.996	35,5	245,0	56,6	390,5	6,0
T2	12,52	4.230	18.816	19,7	136,2	22,2	152,8	6,2
T3	12,51	5.800	25.800	26,8	184,9	30,4	209,9	4,9
T4	12,62	7.170	31.894	30,8	212,4	37,0	255,0	2,6*
T5	12,70	7.780	34.607	33,9	233,5	39,6	273,2	6,3
T6	12,60	6.870	30.559	32,5	224,2	35,5	245,1	5,2

\*Falla fuera de las marcas

Las curvas de esfuerzo vs. porcentaje de deformación se muestran en el anexo. El porcentaje de deformación que se puede observar en las curvas corresponde al desplazamiento del cabezal de la máquina universal de ensayos.

  
 Salvatore Reina M.Sc.  
 JEFE DEL LABORATORIO DE  
 ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
  
 ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

**ANEXO C2:** Gráficas de los diagramas Esfuerzo – Deformación de los ensayos de tracción de las probetas de la prueba 8 templada.

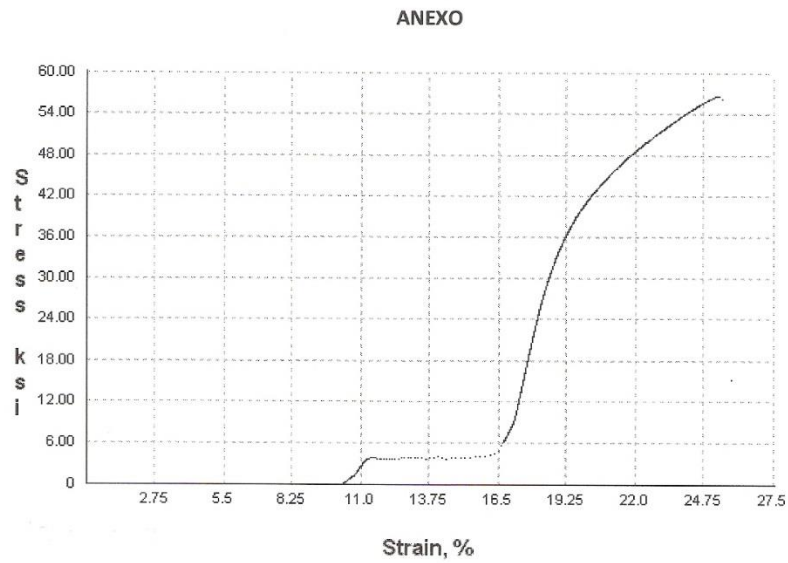


Figura 1. Curva de esfuerzo vs. porcentaje de deformación correspondiente a la probeta T1.

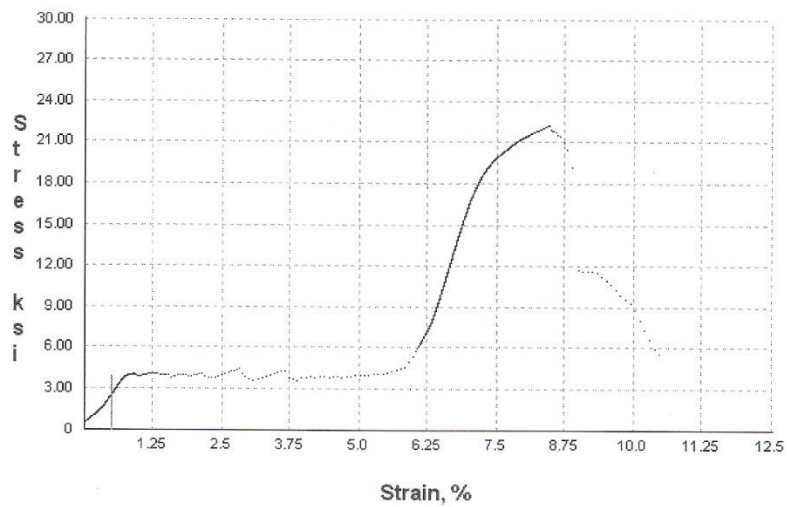


Figura 2. Curva de esfuerzo vs. porcentaje de deformación correspondiente a la probeta T2.



LAEV-EPN  
Orden N°: 0002505



Página 3 de 5

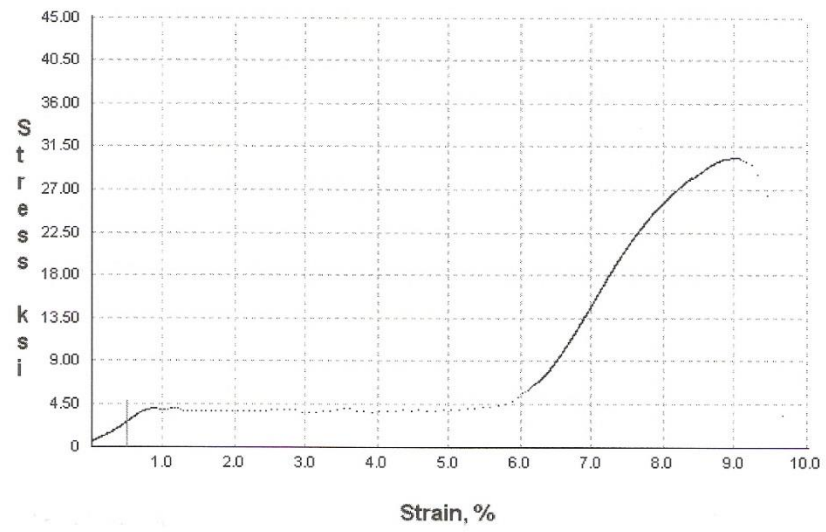


Figura 3. Curva de esfuerzo vs. porcentaje de deformación correspondiente a la probeta T3.

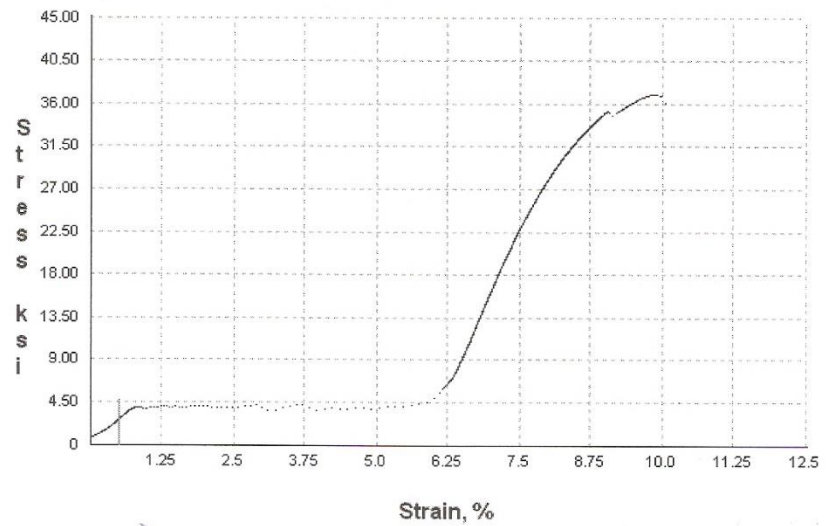


Figura 4. Curva de esfuerzo vs. porcentaje de deformación correspondiente a la probeta T4.





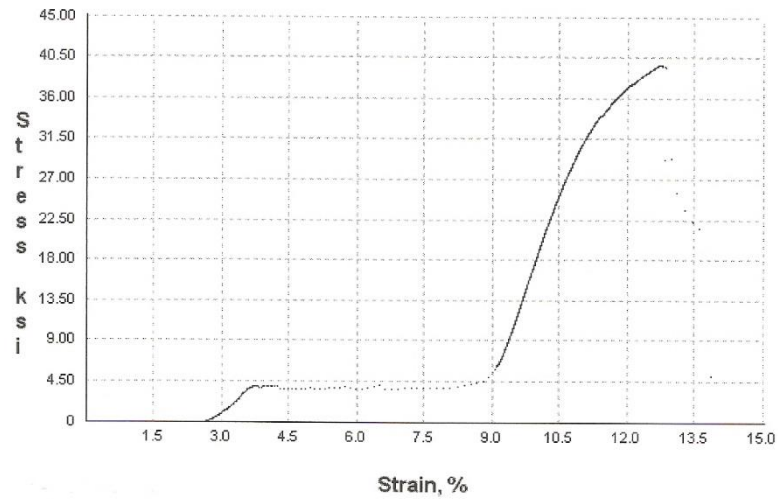


Figura 5. Curva de esfuerzo vs. porcentaje de deformación correspondiente a la probeta T5.

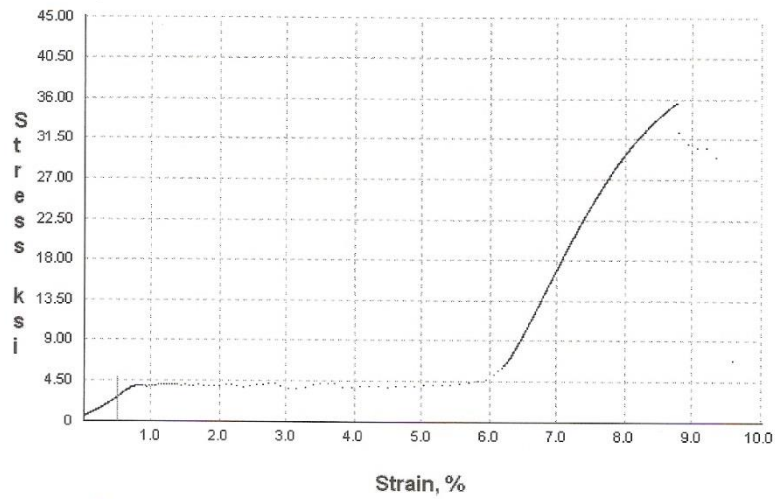


Figura 6. Curva de esfuerzo vs. porcentaje de deformación correspondiente a la probeta T6.



LAEV-EPN  
Orden N°: 0002505



Página 5 de 5

ANEXO C2: Tablas de conversiones de dureza.

Zugfestigkeit Tensile strength	Vickershärte Vickers hardness (F>98N)	Kugel-eindruck Ball indentation (d <sup>2</sup> )	Brinellhärte <sup>1)</sup> Brinell hardness <sup>2)</sup>	Rockwellhärte Rockwell hardness			Zugfestigkeit Tensile strength	Vickershärte Vickers hardness (F>98N)	Kugel-eindruck Ball indentation (d <sup>2</sup> )	Brinellhärte <sup>1)</sup> Brinell hardness <sup>2)</sup>	Rockwellhärte Rockwell hardness		
N/mm <sup>2</sup>	HV	mm	HB	HRB	HRC		N/mm <sup>2</sup>	HV	mm	HB	HRB	HRC	
200	63	7,32	60				690	215	4,22	204	94		
210	65	7,22	62				700	219	4,19	208			
220	69	7,04	66				705	220	4,18	209	95		
225	70	6,99	67				710	222	4,16	211	95,5		
230	72	6,95	68				720	225	4,13	214	96		
240	75	6,82	71				730	228	4,11	216			
250	79	6,67	75				740	230	4,08	219	96,5		
255	80	6,63	76				750	233	4,07	221	97		
260	82	6,56	78				755	235	4,05	223			
270	85	6,45	81	41			760	237	4,03	225	97,5		
280	88	6,35	84	45			770	240	4,01	228	98		
285	90	6,28	86	48			780	243	3,98	231		21	
290	91	6,25	87	49			785	245	3,97	233			
300	94	6,19	89	51			790	247	3,95	235	99		
305	95	6,16	90	52			800	250	3,93	238	99,5	22	
310	97	6,10	92	54			810	253	3,91	240			
320	100	6,01	95	56			820	255	3,89	242		23	
330	103	5,93	98	58			830	258	3,87	245			
335	105	5,87	100	59			835	260	3,85	247		24	
340	107	5,83	102	60			840	262	3,84	249			
350	110	5,75	105	62			850	265	3,82	252			
360	113	5,70	107	63,5			860	268	3,80	255		25	
370	115	5,66	109	64,5			865	270	3,78	257			
380	119	5,57	113	66			870	272	3,77	258		26	
385	120	5,54	114	67			880	275	3,76	261			
390	122	5,50	116	67,5			890	278	3,74	264			
400	125	5,44	119	69			900	280	3,72	266		27	
410	128	5,38	122	70			910	283	3,70	269			
415	130	5,33	124	71			915	285	3,69	271			
420	132	5,32	125	72			920	287	3,68	273		28	
430	135	5,26	128	73			930	290	3,66	276			
440	138	5,20	131	74			940	293	3,64	278		29	
450	140	5,17	133	75			950	295	3,63	280			
460	143	5,11	136	76,5			960	299	3,61	284			
465	145	5,08	138	77			965	300	3,60	285			
470	147	5,05	140	77,5			970	302	3,59	287		30	
480	150	5,00	143	78,5			980	305	3,57	290			
490	153	4,96	145	79,5			990	308	3,55	293			
495	155	4,93	147	80			995	310	3,54	295		31	
500	157	4,90	149	81			1000	311	3,53	296			
510	160	4,86	152	81,5			1010	314	3,52	299			
520	163	4,81	155	82,5			1020	317	3,50	301		32	
530	165	4,78	157	83			1030	320	3,49	304			
540	168	4,74	160	84,5			1040	323	3,47	307			
545	170	4,71	162	85			1050	327	3,45	311		33	
550	172	4,70	163	85,5			1060	330	3,44	314			
560	175	4,66	166	86			1070	333	3,43	316			
570	178	4,62	169	86,5			1080	336	3,41	319		34	
575	180	4,59	171	87			1090	339	3,40	322			
580	181	4,58	172				1095	340	3,39	323			
590	184	4,54	175	88			1100	342	3,38	325			
595	185	4,53	176				1110	345	3,36	328		35	
600	187	4,51	178	89			1120	349	3,35	332			
610	190	4,47	181	89,5			1125	350	3,34	333			
620	193	4,44	184	90			1130	352	3,33	334			
625	195	4,43	185				1140	355	3,32	337		36	
630	197	4,40	187	91			1150	358	3,31	340			
640	200	4,37	190	91,5			1155	360	3,30	342			
650	203	4,34	193	92			1160	361	3,29	343			
660	205	4,32	195	92,5			1170	364	3,28	346		37	
670	208	4,29	198	93			1180	367	3,26	349			
675	210	4,27	199	93,5			1190	370	3,25	352			
680	212	4,25	201				1200	373	3,24	354		38	

Zugfestigkeit Tensile strength	Vickershärte Vickers hardness (F>98N)	Kugel-eindruck Ball indentation Ø¹)	Brinellhärte²) Brinell hardness²)	Rockwellhärte Rockwell hardness			Zugfestigkeit Tensile strength	Vickershärte Vickers hardness (F>98N)	Kugel-eindruck Ball indentation Ø¹)	Brinellhärte²) Brinell hardness²)	Rockwellhärte Rockwell hardness	
				HRB	HRC						HRB	HRC
N/mm²	HV	mm	HB	HRB	HRC		N/mm²	HV	mm	HB	HRB	HRC
1210	376	3,23	357				1770	539				
1220	380	3,21	361				1775	540	2,70	(513)		
1230	382	3,20	363		39		1780	541		(514)		
1240	385	3,19	366				1790	544	2,69	(517)		52
1250	388	3,18	369				1800	547		(520)		
1255	390	3,17	371				1810	550	2,88	(523)		
1260	392		372		40		1820	553	2,67	(525)		
1270	394	3,16	374				1830	556		(528)		
1280	397	3,14	377				1840	559	2,66	(531)		
1290	400	3,13	380				1845	560		(532)		53
1300	403	3,12	383		41		1850	561	2,65	(533)		
1310	407	3,10	387				1860	564		(536)		
1320	410	3,09	390				1870	567	2,64	(539)		
1330	413	3,08	393		42		1880	570		(542)		
1340	417	3,07	396				1890	572	2,63	(543)		
1350	420	3,06	399				1900	575	2,62	(546)		
1360	423	3,05	402		43		1910	578		(549)		54
1370	426	3,04	405				1920	580	2,61	(551)		
1380	429		408				1930	583	2,60	(554)		
1385	430	3,02	409				1940	586		(557)		
1390	431		410				1950	589	2,59	(560)		
1400	434	3,01	413		44		1955	590		(561)		
1410	437	3,00	415				1960	591		(562)		
1420	440	2,99	418				1970	594	2,58	(564)		
1430	443	2,98	421				1980	596		(567)		55
1440	446	2,97	424		45		1990	599	2,57	(569)		
1450	449	2,96	427				1995	600		(570)		
1455	450		428				2000	602	2,56	(572)		
1460	452	2,95	429				2010	605		(575)		
1470	455	2,94	432				2020	607	2,55	(577)		
1480	458	2,93	435		46		2030	610		(580)		
1485	460		437				2040	613	2,54	(582)		
1490	461	2,92	338				2050	615		(584)		56
1500	464	2,91	441				2060	618	2,53	(587)		
1510	467	2,90	444				2070	620		(589)		
1520	470	2,89	447				2080	623	2,52	(592)		
1530	473		449		47		2090	626		(595)		
1540	476	2,88	452				2100	629	2,51	(598)		
1550	479	2,87	455				2105	630		(599)		
1555	480		(456)				2110	631		(600)		
1560	481	2,86	(457)				2120	634	2,50	(602)		
1570	484	2,85	(460)		48		2130	636		(604)		
1580	486		(462)				2140	639	2,49	(607)		57
1590	489	2,84	(465)				2145	640		(608)		
1595	490	2,83	(466)				2150	641		(609)		
1600	491		(467)				2160	644	2,48	(612)		
1610	494	2,82	(470)				2170	647	2,47	(615)		
1620	497		(472)		49		2180	650		(618)		
1630	500		(475)				2190	653		(620)		
1640	503	2,80	(478)				2200	655	2,46	(622)		58
1650	506	2,79	(481)					675				59
1660	509		(483)					698				60
1665	510	2,78	(485)					720				61
1670	511		(486)					745				62
1680	514	2,77	(488)		50			773				63
1690	517	2,76	(491)					800				64
1700	520	2,75	(494)					829				65
1710	522		(496)					864				66
1720	525	2,74	(499)					900				67
1730	527		(501)		51			940				68
1740	530	2,73	(504)									
1750	533	2,72	(506)									
1760	536	2,71	(509)									

1) Stahlkugel 10 mm Durchmesser  
1) Steel ball with 10mm diameter  
2) Errechnet aus: HB=0.95 HV  
2) Calculated from HB=0.95 HV

Fuente: (Recuperado de: [http://sulfinuzargentina.com.ar/imagenes/esc\\_dureza5.jpg](http://sulfinuzargentina.com.ar/imagenes/esc_dureza5.jpg))