

# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
RESUMEN.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA.....	3
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. RESULTADOS ESPERADOS.....	4
1.6. METODOLOGÍA.....	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. ALUMINIO.....	8
2.1.1. Aleaciones de aluminio.....	9
2.1.2. Aleaciones 2XXX.....	10
2.1.3. Aluminio secundario.....	11
2.2. SÓLIDOS CRISTALINOS.....	12
2.2.1. Sistemas cristalinos.....	12
2.2.2. Defectos cristalinos.....	13

2.2.3.	Defectos y deformación plástica.....	14
2.2.4.	Granos, orientación y límite de grano. ....	15
2.2.5.	Recuperación. ....	16
2.2.6.	Recristalización .....	17
2.3.	CONFORMADO DE METALES.....	17
2.3.1.	Trabajo de conformado en frío. ....	18
2.3.2.	Trabajo de conformado en caliente. ....	18
2.3.3.	Laminado.....	20
2.3.4.	Laminado roll former.....	20
2.4.	FRACTURA.....	21
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE FABRICACIÓN DE ALAMBRE.....		23
3.1.	MATERIAL BASE. ....	24
3.2.	PREPARACIÓN DEL MATERIAL BASE.....	24
3.3.	CONFORMADO DE ALAMBRES.....	25
3.3.1.	Base de la metodología de fabricación.....	27
3.3.2.	Metodología de conformado.....	31
3.3.3.	Laminado en caliente.....	34
3.4.	METODOLOGÍA ANÁLISIS MICRO/MACROESTRUCTURAL.....	34
3.5.	METODOLOGÍA ENSAYOS DE TRACCIÓN. ....	38
3.5.1.	Tratamiento térmico. ....	38
3.5.2.	Ensayo. ....	39
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAMINACIÓN EN FRÍO VS LAMINACIÓN EN CALIENTE. ....		40
4.1.	Procesamiento de alambres según variables de temperatura y tratamientos posteriores.....	41

4.2.	Observación macro en el proceso de elaboración de los alambres.....	41
4.2.1.	Análisis macroestructural de T1 Al-6Cu laminadas en frío y caliente.....	42
4.2.2.	Análisis macroestructural de T2 Al-8Cu laminado en frío y caliente. ....	47
4.3.	Observación metalográfica del alambre final. ....	52
4.3.1.	Análisis Microestructural de muestra T1 Al-6Cu laminada en frío y caliente. ...	53
4.3.2.	Análisis Microestructural de muestra T2 Al-8Cu laminada en frío y caliente. ...	54
4.4.	Ensayos de tracción. ....	55
4.4.1.	Resultados Ensayos de tracción para T1 Al-6Cu. ....	56
4.4.2.	Resultados ensayos de tracción para T2 Al-8Cu. ....	58
	CONCLUSIONES.....	60
	Bibliografía.....	62
5.	ANEXOS.....	64
5.1.	ANEXO 1: TABLA DE COMPOSICION COMPLETA TOCHO 1 Y 2.....	64
5.2.	ANEXO 2: PRUEBAS DE DESARROLLO DE ALMABRE. ....	65
	Pruebas 1: desarrollo experimental inicial o punto de partida.....	65
	Pruebas 2: Principales defectos en la producción de alambres. ....	68
	Pruebas 3: desarrollo arbitrario para observar la influencia de la distancia de rodillos y dimensiones del material inicial en la generación de gritas y rebabas. ....	72
	Pruebas 4: dimensiones de reducción real, número de pasadas por paso e influencia de la rebaba en el paso 9 laminación en frio tocho 2. ....	76
	Pruebas 5: Influencia de la rebaba en el paso 9, laminación en caliente tocho 2. ....	79
	Pruebas 6: Espesor inicial del material inicial en el paso 1.....	81
5.3.	ANEXO 3: GRAFICOS Y TABLAS DE RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCION.....	84
	Resultados del tocho 1 laminado en frío sin tratamiento térmico: ....	84
	Resultados del tocho 1 laminado en caliente sin tratamiento térmico:.....	86

Resultados del tocho 1 laminado en frío con tratamiento térmico: .....	88
Resultados del tocho 1 laminado en caliente con tratamiento térmico: .....	90
Resultados del tocho 2 laminado en frío sin tratamiento térmico: .....	92
Resultados del tocho 2 laminado en caliente sin tratamiento térmico:.....	94
Resultados de tocho 2 laminado en frío con tratamiento térmico: .....	96
Resultados de tocho 2 laminado en caliente con tratamiento térmico: .....	98
5.4. ANEXO 4: TABLA GENERAL DE RESULTADOS ENSAYO DE TRACCIÓN.	

100

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 "Celda unitaria" Fuente: Elements of Metallurgy and Engineering Alloys (2008), pág. 9. ....	12
Figura 2.2 "Los siete posibles tipos de red con diferentes longitudes y ángulos de celda." Fuente: Rosas (2013) ESTADOS INESTABLES DE LOS MATERIALES B <sub>Ga</sub> NP/GaP Y B <sub>Ga</sub> NAs/GaAs. pág. 10. ....	13
Figura 2.3 "Orientación de grano(A) Aleatorio (B)Preferencial." Fuente: Fuente: DOE FUNDAMENTALS HANDBOOK (1993), volumen 1 pág. 10. ....	15
Figura 2.4 "Grano y límite de grano, (a)Microscopio (b)Atómico" Fuente: DOE FUNDAMENTALS HANDBOOK (1993), volumen 1 pág. 10. ....	16
Figura 2.5"Recristalización durante la laminación en caliente" Fuente: Elements of Metallurgy and Engineering Alloys (2008) pág. 280.....	18
Figura 2.6 "Proceso de laminado" Fuente: Fundamentos de conformado plástico (2008) pág. 3. .....	20
Figura 2.7 "piezas producidas por roll-forming" Fuente: Nutechrollforming.....	21
Figura 2.8 "Propagación de grieta en una fractura transgranular(a) e Intergranular(b)." Fuente: Materials Science and Engineering (2007) pág. 213-214.....	22
Figura 3.1 "Extracciones realizadas, (a) lamina del tocho, (b) varilla de la lámina. Fuente: Elaboración propia.....	25
Figura 3.2 "Lamina cortada en varillas" Fuente: Elaboración propia. ....	25
Figura 3.3 "Laminadora Roll-forming" Fuente: Elaboración propia. ....	25
Figura 3.4 "Pasos del Roll-Forming" Fuente: Elaboración propia. ....	26
Figura 3.5 "Torsión del material en el Ensayo 2-1, paso 1" fuente: Elaboración propia. ....	28
Figura 3.6 "Fractura del material en la zona de torsión en el ensayo 2-1, paso 3 primera pasada" fuente: Elaboración propia.....	28
Figura 3.7 "Fracturas paso 1 prueba 1-1 de un material de 5,75x5,75mm" fuente: Elaboración propia.....	29
Figura 3.8 "Fractura ensayo 1-4" fuente: Elaboración propia.....	29
Figura 3.9 "Entrada cóncava hacia abajo que provoca fractura al contacto con la placa de la máquina" Fuente: Elaboración propia .....	30

Figura 3.10 "Giro del material en la segunda pasada" Fuente: Elaboración propia. ....	31
Figura 3.11 "Alambre con incrustaciones de rebaba" Fuente: Elaboración propia. ....	32
Figura 3.12 "Proceso del paso 9" fuente: Elaboración propia. ....	32
Figura 3.13 "Cambio de sentido en la pasada final" Fuente: Elaboración propia. ....	33
Figura 3.14 "Pulidora Ecomet II Grinder" Fuente: Elaboración propia. ....	35
Figura 3.15 "Set de muestras" Fuente: Elaboración propia. ....	36
Figura 3.16 "Caras principales de las muestras. (a) Disposición general. (b)Muestras pasos 7 a 9 con sección transversal" Fuente: ELaboración propia. ....	36
Figura 3.17 "Leica EZ4 E" Fuente: Elaboración propia. ....	37
Figura 3.18 "Microscopio metalográfico" Fuente: Elaboración propia. ....	38
Figura 3.19 "Maquina de traccion Zwick/ Roell Z005" Fuente: Zwickroell.com. ....	39
Figura 4.1 "Tocho 1 paso 1 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8." Fuente: Elaboración propia. ....	42
Figura 4.2 "Tocho 1 paso 2 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8" Fuente: Elaboración propia. ....	42
Figura 4.3 "Tocho 1 paso 3 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8" ....	43
Figura 4.4 "Tocho 1 paso 4 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8" ....	43
Figura 4.5 "Tocho 1 paso 5 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8" ....	44
Figura 4.6 "Tocho 1 paso 6 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8" ....	44
Figura 4.7 "Tocho 1 paso 7 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8" ....	45
Figura 4.8 "Tocho 1 paso 8 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8" ....	45
Figura 4.9 "Tocho 1 paso 9 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8" ....	45
Figura 4.10 "Sección transversal paso 9, laminación en frio(a) y caliente(b) con aumento de x35" ....	46
Figura 4.11 "Tocho 2 paso 1 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8" ....	47
Figura 4.12 "Tocho 2 paso 2 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8" ....	47
Figura 4.13 "Tocho 2 paso 3 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8" ....	48
Figura 4.14 "Tocho 2 paso 4 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8" ....	48
Figura 4.15 "Tocho 2 paso 5 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8" ....	49
Figura 4.16 "Tocho 2 paso 6 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8" ....	49
Figura 4.17 "Tocho 2 paso 7 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8" ....	50

Figura 4.18 “Tocho 2 paso 8 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8” .....	50
Figura 4.19 “Tocho 2 paso 9 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8” .....	51
Figura 4.20 “Tocho 2 paso 10 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8” .....	51
Figura 4.21 "Muestras metalográficas de Tocho T1 laminado en frío en x10" .....	53
Figura 4.22 "Muestras metalográficas de Tocho T1 laminado en caliente en x10" .....	53
Figura 4.23 "Tocho 2 laminado en frío" .....	54
Figura 4.24 "Tocho 2 laminado en frío" .....	55
Figura 5.1 "fracturas paso 1 prueba 1-1” Fuente: Elaboración propia. ....	66
Figura 5.2 "Fracturas prueba 2" Fuente: Elaboración propia. ....	66
Figura 5.3 "Fractura prueba 3" Fuente: Elaboración propia. ....	67
Figura 5.4 "Fractura ensayo 1-4" Fuente: Elaboración propia. ....	67
Figura 5.5 "Entrada cóncava hacia abajo que provoca fractura al contacto con la placa de la maquina" Fuente: Elaboración propia. ....	68
Figura 5.6 “Ensayo 2-1, paso 1” Fuente: Elaboración propia .....	69
Figura 5.7 “Ensayo 2-1, paso 3, primera pasada” Fuente: Elaboración propia .....	69
Figura 5.8 “Ensayo 2-1, paso 5” Fuente: Elaboración propia .....	70
Figura 5.9 “Ensayo 2-1, paso 6” Fuente: Elaboración propia .....	70
Figura 5.10 “Ensayo 2-1, paso 8, primera pasada” Fuente: Elaboración propia .....	70
Figura 5.11 “Ensayo 2-1, paso 8, quinta pasada” Fuente: Elaboración propia .....	71
Figura 5.12 “Ensayo 2-1, paso 9, primera pasada” Fuente: Elaboración propia .....	71
Figura 5.13 “Ensayo 2-1, paso 9, pasada 25” Fuente: Elaboración propia .....	71
Figura 5.14 “alambre laminación en caliente 2/09/2022” Fuente: Elaboración propia.....	75
Figura 5.15 “Agrietamiento y fracturas del material prueba 3-4” Fuente: Elaboración propia	75
Figura 5.16 “Prueba 4-1, paso 9, primera pasada” Fuente: Elaboración propia.....	77
Figura 5.17 “prueba 4-1, paso 9, decima pasada” Fuente: Elaboración propia.....	78
Figura 5.18 “prueba 4-2, paso 9, primera pasada” Fuente: Elaboración propia.....	78
Figura 5.19 “prueba 4-3, paso 9, primera pasada” Fuente: Elaboración propia.....	79
Figura 5.20 “Ensayo 5-3, alambre paso 9 primera pasada “Fuente: Elaboración propia .....	80
Figura 5.21 "Ensayo 5-1, Alambre paso 9 primera pasada" Fuente: Elaboración propia .....	80

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 "Grafico Esfuerzo vs deformación promedio de ensayos de T1 Al-6Cu" Fuente: Elaboración propia.....	56
Gráfico 4.2 "Grafico promedio Esfuerzo vs deformación promedio de ensayos de T2 Al-8Cu" Fuente: Elaboración propia.....	58
Gráfico 5.1 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T1 laminado en frío sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	84
Gráfico 5.2 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T1 laminado en caliente sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	86
Gráfico 5.3 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T1 laminado en frío con tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	88
Gráfico 5.4 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T1 laminado en caliente sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	90
Gráfico 5.5 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T2 laminado en frío sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	92
Gráfico 5.6 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T2 laminado en caliente sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	94
Gráfico 5.7 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T2 laminado en frío con tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	96
Gráfico 5.8 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T2 laminado en caliente con tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	98



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 "Propiedades del aluminio, Fuente: Alu-stock"	9
Tabla 2.2 "Nomenclatura para aleaciones laminadas de aluminio" Fuente: Alloying: Understanding the Basics (2001) pág. 353.	10
Tabla 2.3" Clasificación de los defectos" Fuente: Elaborado a partir de Apuntes: Capitulo 18 solidos cristalinos USACH pág. 231 a 236 y Elements of Metallurgy and Engineering Alloys (2008) pág. 17 a 26.	14
Tabla 2.4 "Ventajas y desventajas del conformado en frio" fuente: Handbook of material selection (2002), pag.939.	19
Tabla 2.5 "Rangos de temperatura homóloga para diferentes procesos" fuente: Montalba(s.f.) Clase 4 – Procesos de conformado I.	19
Tabla 3.1 "Composición química de los tochos 1 y 2" Fuente: Elaboración propia.	24
Tabla 3.2 "Medidas de los pasos" Fuente: Elaboración propia.	27
Tabla 3.3 "Metodología de fabricación de alambres dedicada" Fuente: elaboración propia.	33
Tabla 3.4 "Temperaturas de trabajos para el aluminio" fuente: Elaboración propia.	34
Tabla 3.5 "Reactivos para ataque químico de metales" Fuente: norma E 407 – 99.	37
Tabla 4.1 "Resultados ensayo de tracción de T1 Al-6Cu" Fuente: elaboración propia.	57
Tabla 4.2 "Resultados ensayo de tracción de T2 Al-8Cu" Fuente: Elaboración propia.	59
Tabla 5.1 "composición química T1 y T2"	64
Tabla 5.2 "Dimensiones y tipo de trabajo del material inicial de la prueba 1" fuente: Elaboración propia.	65
Tabla 5.3 "Dimensiones y tipo de trabajo del material inicial prueba 2"	68
Tabla 5.4 "Medidas de espesor resultantes al volver al repasar el paso 8" Fuente: Elaboración propia.	72
Tabla 5.5 "Material de inicio Prueba 3" Fuente: Elaboración propia.	73
Tabla 5.6 "Número de pasadas prueba 3-2" Fuente: Elaboración propia.	74
Tabla 5.7 "Número de pasadas prueba 3-3" Fuente: Elaboración propia	74
Tabla 5.8 "Numero de pasadas por paso prueba 3-4" Fuente: Elaboración propia.	75
Tabla 5.9 "Material de inicio prueba 4" Fuente: Elaboración propia.	76
Tabla 5.10 "Resultados Prueba 4-1" Fuente: Elaboración propia.	76

Tabla 5.11 “Dimensiones de espesor de alambre pruebas 2 y 3” Fuente: Elaboración propia.	77
Tabla 5.12 “Comparativa de Alambres paso 9 tocho 2, laminación en frío” Fuente: Elaboración propia.....	79
Tabla 5.13 “Material de inicio prueba 5” Fuente: Elaboración propia.....	80
Tabla 5.14 “Comparativa de Alambres paso 9 tocho 2, laminación en caliente” Fuente: Elaboración propia.....	81
Tabla 5.15 “Medidas del material inmediatamente después de cada paso” Fuente: Elaboración propia.....	82
Tabla 5.16 "Tabla de resultados T1 Laminado en frío sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	85
Tabla 5.17 "Tabla de resultados T1 Laminado en caliente sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	87
Tabla 5.18 "Tabla de resultados T1 Laminado en frío con tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	89
Tabla 5.19 "Tabla de resultados T1 Laminado en caliente con tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	91
Tabla 5.20 "Tabla de resultados T2 Laminado en frío sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	93
Tabla 5.21 "Tabla de resultados T2 Laminado en caliente sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	95
Tabla 5.22 "Tabla de resultados T2 Laminado en frío con tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	97
Tabla 5.23 "Tabla de resultados T2 Laminado en caliente con tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.....	99
Tabla 5.24 "Resultados ensayo de tracción" .....	100