



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DESARROLLO
DE ALAMBRE DE ALUMINIO SECUNDARIO POR
ROLL-FORMING PARA LA MANUFACTURA
ADITIVA”**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROF. GUÍA: CRISTÓBAL MONTALBA WEISSE

CARLOS DANTON CARVAJAL OSSES

**CURICÓ - CHILE
2023**

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular stamps and signatures. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' with a signature over it. The right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO' with a signature over it.

Curicó, 2023

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a todas las personas que han hecho posible este trabajo. En primer lugar, a mi profesor guía, Cristóbal Montalba, por darme la oportunidad de trabajar con él, por confiar en mí y apoyarme continuamente en el desarrollo de este trabajo, no podría haberlo hecho sin su apoyo y orientación.

También agradezco a la secretaria de escuela, Alejandra Cabrera, por aconsejarme y escucharme cuando pasaba por un mal momento y motivarme a seguir en la universidad.

Agradezco a Jaime Reyes y a Víctor Silva por su ayuda, por compartirme sus conocimientos y su buena disposición.

A Paulo Gutiérrez por su amistad, su continua compañía, por compartir y apoyarnos mutuamente a lo largo de toda esta etapa.

A Franco Sotomayor, mi amigo y compañero de casa en esta etapa, le agradezco por su compañía.

A mi Familia que algún modo ha contribuido en esta tesis con apoyo emocional, conocimientos y consejos.

Finalmente quiero agradecer a Alicia Muñoz mi principal fuente de motivación, por su amor incondicional, su paciencia y apoyo constante.

DEDICATORIA

Con cariño, a mis padres Carlos y Ana, a mis hermanos Camila y Ángel, y a Alicia, que me han amado tanto y han esperado este momento.

RESUMEN

Los productos de aluminio reciclado presentan impurezas como el hierro, y al ser un material fundido presenta formación de dendritas al solidificarse que afectan sus propiedades mecánicas dificultando su conformado en alambres siendo necesario realizar un proceso de fabricación especializado. Por tanto, en este trabajo se presenta una metodología para la fabricación de alambres de aluminio secundario (reciclado), la que define la forma y las dimensiones del material inicial, y las operaciones a realizar para reducir los defectos de fabricación como fracturas del material y formación de rebabas y tratamientos complementarios.

El análisis de resultados presenta análisis macro y microestructural, a través de observación por medio de una lupa estereoscópica y microscopio metalográfico, que muestran cómo los alambres fabricados en frío presentaron mayor cantidad de discontinuidades en su estructura a lo largo del proceso de conformado, y una baja calidad superficial en comparación con los alambres laminados en caliente, dificultando el proceso y afectando el producto final.

Finalmente, se presentaron ensayos de tracción realizados a alambres desarrollados a través de laminación en caliente y frío para cada uno de los materiales y tratados térmicamente para cada uno de los dos procesos. En este ítem se muestra como los alambres laminados en caliente presentan un comportamiento más homogéneo y soporta mayores cargas que los alambres laminados en frío; además, se muestra en qué medida los tratamientos térmicos aumentan la elasticidad de ambos materiales en cada proceso de conformado.

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.	

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 _{Ga} NP/GaP Y B _{Ga} 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

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El aluminio es un material de gran importancia en la industria debido a sus propiedades únicas, como su alta resistencia, ligereza, durabilidad, conductividad térmica y eléctrica, resistencia a la corrosión y facilidad de conformado. Estas propiedades, hacen que el aluminio sea altamente utilizado en la industria del transporte, la construcción, la fabricación de envases, embalajes y componentes electrónicos.

El aluminio se caracteriza como un material que se adapta muy bien a la economía circular, modelo económico y de producción el cual busca maximizar el uso de los recursos y minimizar el impacto ambiental a través del diseño de productos, la reutilización y el reciclaje de materiales. El aluminio, a consecuencia de su capacidad de reciclaje, presenta grandes ventajas: la primera, es que, según la Asociación Nacional de Reciclaje, ANIR(2021), el aluminio es 100% reciclable y a nivel país para el año 2021, habían 53.914 toneladas de aluminio como material disponible; la segunda ventaja está en su eficiencia energética, donde, la Asociación para el Reciclado de Productos de Aluminio, afirma que el reciclado del aluminio ahorra el 95% de la energía que se necesita para producir el mismo aluminio primario y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero que produce el proceso de obtención de aluminio a partir de bauxita, mineral natural de donde se extrae principalmente el aluminio.

En este contexto de aluminio y economía circular, se estudia la posibilidad de hacer alambres de aluminio secundario, los cuales podrían tener una amplia variedad de aplicaciones, desde conductores eléctricos, hasta filamentos de soldadura para manufactura aditiva, proceso de fabricación moderna que consiste en un conjunto de tecnologías donde el material, en el caso de los metales, es fundido y depositado capa a capa de manera controlada para la fabricación de piezas u objetos a partir de un modelo 3D de forma automatizada.

Dentro de la Universidad de Talca existe actualmente un equipo capaz de realizar manufactura aditiva WAAM (wire arc additive manufacturing) usando como materia prima el aluminio, a través de un equipo de soldadura GMAW(MIG/MAG) dado su beneficio económico en relación con un equipo TIG(GTAW). El equipo WAAM utiliza un mecanismo de transferencia de tipo corto circuito y hoy en día (2022) se realizan pruebas empleando como material de aporte filamentos de aluminio comercial 4043 de 0,9mm de espesor; esto provoca

Introducción

la oportunidad de hacer alambres de aluminio secundario que replacen el aluminio primario utilizado, lo que significaría un gran beneficio económico y energético en relación con la economía circular antes mencionado.

En adición a lo anteriormente mencionado, la Universidad de Talca ya cuenta con un proceso de fabricación de lingotes de aluminio secundario y una máquina laminadora roll-forming que consiste en un par de rodillos con una serie ranuras de diferentes tamaños para reducir el material gradualmente hasta conseguir alambres finos por medio de la presión ejercida por los rodillos al material.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Para lograr un procesamiento experimental óptimo en el desarrollo de alambres a partir de material reciclado para la manufactura aditiva, se deben seguir una serie de pasos que incluyen la selección y preparación del material, el procesamiento de los alambres, la evaluación y pruebas de los alambres, y los ajustes necesarios en el proceso para mejorar la calidad.

El aluminio secundario en sí presenta dos dificultades: la primera, al ser aluminio de reciclaje contiene impurezas, y de éstas, como explica Belov et al., (2002), la más importante y perjudicial en la mayoría de las aleaciones de fundición corresponde al hierro, elemento que presenta baja solubilidad con el aluminio y forma fases Al_xFe_y de forma acicular provocando concentraciones de esfuerzos en su estructura induciendo a que el material sea más frágil. La segunda dificultad está en que, al ser un aluminio de fundición, se debe tener especial cuidado con la solidificación de éste, ya que, según Davis (1993), la macroestructura de solidificación dendrítica es característica de todas las aleaciones de aluminio fundidas, lo que lo hace propenso a la formación de dendritas causando heterogeneidad en su composición química. Ello significa que el material tendría distintos comportamientos en cada parte de su estructura, por lo cual, para corregir esto se deben realizar tratamientos de homogenización.

1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA

Introducción

Se propone rediseñar las variables de fabricación de los alambres, para aleaciones de aluminio de la serie 2xxx con 6 y 8% de Cobre (Cu). Para esto es necesario comprender el comportamiento de dichas aleaciones al ser pasados por cada etapa del roll-forming, con el fin de obtener un alambre con las propiedades requeridas por el equipo de soldadura, y que utilice un reglaje similar al de un aluminio comercial para el uso del equipo de manufactura aditiva.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general.

Determinar los parámetros de deformación y tratamientos térmicos para obtener alambres de aluminio secundario óptimos para aplicación de manufactura tipo WAAM.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar los principales defectos en la producción de aluminio a través de roll-forming en su etapa inicial.
- Desarrollar una metodología experimental que permita fabricar alambres mediante roll-forming.
- Estudiar los efectos de la temperatura y deformación en el proceso con observaciones a nivel macro y microestructural de los alambres.
- Analizar las propiedades mecánicas en tracción de los alambres según distintas metodologías y procedimientos.

1.5. RESULTADOS ESPERADOS.

Se desea obtener una metodología de fabricación óptima para la producción de alambres de aluminio secundario procesados a través de roll-forming, observando los parámetros que modifican la calidad y las propiedades mecánicas de los alambres resultantes, para, finalmente, obtener alambres continuos de 0,9 mm que puedan ser evaluados en otro estudio para su uso en los procesos de manufactura aditiva tipo WAAM.

1.6. METODOLOGÍA.

Introducción

Como primera actividad está la realización de pruebas experimentales de desarrollo de alambres, que permitan observar los principales problemas que se presentan, posibles soluciones, y el comportamiento de los alambres a lo largo del proceso de fabricación.

El proceso de fabricación empezará a partir de la materia prima o tocho de aluminio 4% y 6% fundido en la Universidad de Talca. A esta se le extraerá una placa de entre 3 a 5mm de espesor en una cierra de cinta, y, luego, se cortan barras de sección transversal cuadrada, las cuales serán procesadas por conformación en la máquina Roll-Forming. Este equipo cuenta con nueve ranuras enumeradas de mayor a menor tamaño, las que serán detalladas en las siguientes secciones. La barra será deformada en cada uno de los pasos (ranuras) hasta obtener un alambre de 0,9 mm de diámetro.

A continuación, se realizará la estimación del tamaño inicial óptimo de cada material a través de las variaciones de espesor del material de inicio, desde 6mm a 4,5mm y de la observación del comportamiento de esta primera etapa de la máquina de roll-forming para los distintos tipos de materiales de trabajo y para laminación en frío y caliente.

La necesidad de procesos térmicos y el comportamiento del material al ser pasado por cada uno de los pasos del roll-forming será parte de lo que se estudiará en la presente memoria. El análisis visual del material deformado, su reducción y la acumulación de deformación permitirá determinar los pasos más críticos en el proceso de fabricación a través de observación y, por consiguiente, la necesidad de tratamientos térmicos.

La presente memoria contempla el estudio de norma ASTM E8 relacionadas a los ensayos a realizar y la aplicación de estos a los alambres finales para documentar sus propiedades mecánicas y efectuar comparaciones entre los alambres laminados en frío y caliente, como así también comparar alambres de características químicas similares de carácter primarios.

Se realizarán caracterizaciones de tipo óptico (macro y microestructural) en lo cual se considerará la preparación, observación y análisis de muestras metalográficas de alambres laminados en frío y caliente para cada una de sus variables.

Introducción

Finalmente, se realizarán pruebas mecánicas a partir de ensayos de tracción para alambres producidos a través de laminación en frío y en caliente, en cada tipo de material, y, además, de ensayos realizados a alambres laminados en frío y caliente con un tratamiento térmico posterior de 120 °C por 24 horas.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. ALUMINIO.

El aluminio es un metal que se encuentra en la naturaleza combinado con otros elementos. Gasque (2018) indica que es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno y el silicio. El aluminio se produce principalmente a partir de la bauxita, que es una roca que contiene aluminio en forma de óxido. La bauxita se procesa para extraer el aluminio, lo que involucra varios pasos químicos y energéticamente intensivos.

La gran mayoría de producción de aluminio a nivel industrial se basa en el proceso Hall-Héroult donde el aluminio es refinado a partir de bauxita. En resumen, este proceso se puede dividir en cinco etapas:

- Extracción de la bauxita: La bauxita se extrae de la tierra en minas de cielo abierto o a cielo cerrado. La bauxita se tritura y se somete a un proceso químico para eliminar el material no deseado.
- Tratamiento con sodio: La bauxita triturada se mezcla con sodio y otros productos químicos para convertir el óxido de aluminio en sodio aluminio.
- Electrólisis: El sodio aluminio se calienta y se somete a electrólisis para separar el aluminio del sodio. Esto se realiza en un horno llamado "horno de Hall-Héroult".
- Fundición: El aluminio líquido se vierte en moldes y se deja enfriar para formar bloques de aluminio.
- Laminado: Los bloques de aluminio se laminan y se dan forma para crear productos terminados.

Del tratamiento sodio aluminio hay que señalar que, durante el proceso de electrólisis para separar el aluminio del sodio, este último se calienta a una temperatura muy alta. La temperatura exacta depende de varios factores, como la composición exacta del sodio

Marco teórico

aluminio y la eficiencia del horno de Hall-Hérault. La temperatura puede estar en el rango de 600 a 900 grados Celsius. Es importante calentar el sodio aluminio a una temperatura lo suficientemente alta para que el aluminio se separe del sodio, pero no tanto como para dañar el horno o causar la degradación del aluminio.

El aluminio es muy ligero en comparación con otros metales comunes, como el hierro o el acero. Davis (2001) y Campbell (2008) dice que la densidad del aluminio es solo un tercio de la del hierro, y que es el metal más ligero que se encuentra en la naturaleza con una densidad relativa de $2,7 \text{ kg/m}^3$ y una baja temperatura de fusión de $655 \text{ }^\circ\text{C}$. A pesar de su bajo peso específico, el aluminio es muy resistente y duro, esto lo hace ideal para su uso en aplicaciones donde se requiere una alta resistencia con un bajo peso.

Tabla 2.1 "Propiedades del aluminio, Fuente: Alu-stock"

Nombre	Aluminio
N.º atómico	13
Densidad	3
Punto de ebullición	$2467 \text{ }^\circ\text{C}$
Punto de Fusión	$660 \text{ }^\circ\text{C}$
Calor específico	$0,9 \text{ J/gk}$
Conductividad eléctrica	$0,377 \text{ } 106/\text{cm}$
Conductividad termal	$2,37 \text{ W/cmK}$

2.1.1. Aleaciones de aluminio.

Las aleaciones de aluminio son mezclas de aluminio con otros elementos. Estas aleaciones se caracterizan por su ligereza, resistencia y conductividad térmica y eléctrica, dependiendo del material con el que se mezcla como puede ser cobre, zinc, magnesio, silicio y manganeso, lo que otorga una gran versatilidad usando el elemento aleante según las aplicaciones y propiedades necesitadas.

Marco teórico

Existen dos tipos de aleaciones de aluminio: las aleaciones laminadas y fundidas. Las aleaciones laminadas son aquellas que se producen mediante el proceso de laminado, en el cual el metal sufre un alargamiento y se reduce su espesor para darle la forma deseada. Por otro lado, las aleaciones fundidas son aquellas que se producen mediante el proceso de fundición, en el cual el metal se funde y se vierte en un molde para darle la forma deseada.

El sistema de nomenclatura de la asociación de aluminio es uno de los más reconocidos, el que usa un sistema de cuatro dígitos para producir una lista de familias de composición las cuales se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 "Nomenclatura para aleaciones laminadas de aluminio" Fuente: Alloying: Understanding the Basics (2001) pág. 353.

Nomenclatura	Composición
1xxx	Composición sin aleaciones.
2xxx	Aleaciones en las que el cobre es el elemento de aleación principal. Otros elementos, como el magnesio, pueden ser especificados.
3xxx	Aleaciones en las que el manganeso es el elemento de aleación principal.
4xxx	Aleaciones en las que el silicio es el elemento de aleación principal.
5xxx	Aleaciones en las que el magnesio es el elemento de aleación principal.
6xxx	Aleaciones en las que el magnesio y el silicio son los elementos de aleación principales.
7xxx	Aleaciones en las que el zinc es el elemento de aleación principal. Otros elementos, como el cobre, magnesio, cromo y circonio, pueden ser especificados.
8xxx	Aleaciones que caracterizan composiciones misceláneas. Las aleaciones de la serie 8xxx pueden contener cantidades apreciables de estaño, litio y/o hierro.
9xxx	Reservado para uso futuro.

2.1.2. Aleaciones 2XXX

Marco teórico

En las aleaciones 2xxx, el cobre es el principal elemento de aleación. Se utiliza para mejorar las propiedades mecánicas, incluida la resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga. Además, el cobre también ayuda a mejorar la conductividad térmica de la aleación. En general, cuanto mayor sea la cantidad de cobre, mayor será su resistencia mecánica. Sin embargo, Davis (2001) explica que las aleaciones de la serie 2xxx también tienen una menor resistencia a la corrosión en comparación con otras aleaciones de aluminio debido a la presencia de cobre en la aleación.

Las aleaciones de la serie 2xxx son comúnmente utilizadas como ruedas de camiones y aviones, partes de suspensión de camiones, pieles de fuselaje y alas de aviones, partes estructurales como menciona Davis (2001) para piezas y estructuras que requieren una relación alta resistencia-peso y que requieran buena resistencia a temperaturas de hasta 150°C.

Un elemento residual en las aleaciones de aluminio de la serie 2xxx es el hierro (Fe). Este mineral no se agrega intencionalmente como elemento de aleación, pueden provenir de diferentes fuentes durante el proceso de producción, puede estar contenido en la chatarra de aluminio, contaminación por el uso de herramientas de corte que contengan hierro, o por los equipos de fundición. El hierro se considera una impureza en las aleaciones de aluminio y se debe mantener a niveles bajos para evitar una disminución en las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión de la aleación

2.1.3. Aluminio secundario.

El aluminio secundario es aquel que se obtiene a partir de materiales que ya han sido utilizados previamente, es decir, que se reciclan. Estos materiales pueden ser desechos industriales, chatarra o residuos de construcción. El proceso de reciclaje del aluminio implica la fundición y purificación del metal, y suele ser menos costoso y contaminante que la producción de aluminio primario a partir de bauxita. Además, el aluminio es un material que se puede reciclar indefinidamente; la Asociación para el Reciclado de Productos de Aluminio (2013) afirma que en el reciclado del aluminio se ahorra el 95% de la energía

que necesitaríamos para producir el mismo aluminio a partir de la bauxita sin perder su calidad ni sus propiedades y, de este modo, su uso contribuye a reducir la necesidad de extraer nuevos recursos naturales y a disminuir la generación de residuos.

2.2. SÓLIDOS CRISTALINOS.

Al hablar de sólidos cristalinos, se refiere a la estructura atómica ordenada y periódica de los átomos en un metal cristalino. La mayoría de los metales son sólidos cristalinos y las propiedades de estos están directamente relacionados con su estructura cristalina.

Callister (2007) indica que los átomos de un material cristalino se encuentran situados en una disposición que, al solidificarse, se colocaran en un patrón repetitivo tridimensional formado por pequeños grupos de átomos.

2.2.1. Sistemas cristalinos.

Para describir estas estructuras cristalinas, es conveniente subdividirlas en pequeñas entidades repetitivas llamadas celdas unitarias que se muestran en la Figura 2.1. Callister (2007) define las celdas unitarias en la mayoría de las estructuras cristalinas como paralelepípedos o prismas con tres conjuntos de caras paralela que forman la unidad estructural básica -o bloque de construcción- de la estructura cristalina, y define la estructura cristalina por su geometría y las posiciones de los átomos dentro de ella.

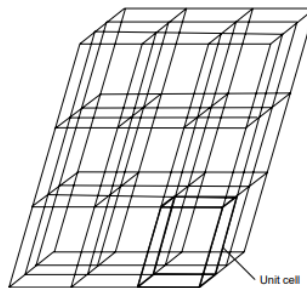


Figura 2.1 "Celda unitaria" Fuente: *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys* (2008),

pág. 9.

Marco teórico

La repetición de las celdas unitarias a lo largo del material genera una red, y dependiendo de las distancias y los ángulos formados por los átomos se distinguen siete sistemas cristalinos como se muestran en la figura 2.2.

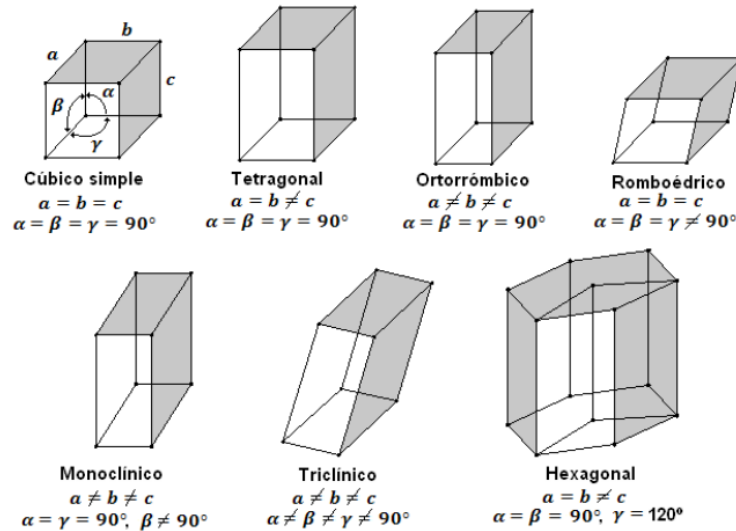


Figura 2.2 "Los siete posibles tipos de red con diferentes longitudes y ángulos de celda."

Fuente: Rosas (2013) ESTADOS INESTABLES DE LOS MATERIALES B GaNP/GaP Y B GaNAs/GaAs. pág. 10.

2.2.2. Defectos cristalinos.

Los defectos cristalinos son irregularidades en la estructura cristalina de un material. Al respecto, Callister (2007) indica que las propiedades de los materiales son profundamente sensibles a las desviaciones de la perfección cristalina, ya que todos los materiales contienen grandes cantidades de defectos o imperfecciones y no existe el sólido ideal con un orden perfecto; la influencia de estos defectos no siempre es adversa, y a menudo se crean características específicas mediante la introducción de cantidades controladas o números de defectos particulares.

Tabla 2.3" Clasificación de los defectos" Fuente: Elaborado a partir de Apuntes: Capítulo 18 solidos cristalinos USACH pág. 231 a 236 y Elements of Metallurgy and Engineering Alloys (2008) pág. 17 a 26.

Números de Dimensiones	Tipo	Definición
0	De punto	Irregularidad en la red asociada con un átomo faltante (vacante), un átomo extra (intersticial) o un átomo de impureza (sustitucional).
1	De línea	Irregularidades en la estructura cristalina que se presentan en forma de un plano extra o un plano faltante de átomos.
2	De superficie	Imperfecciones cristalinas en la superficie externa como pueden ser los límites de granos.
3	De volumen	Inclusiones de material extraño, como restos de escoria atrapada por el metal, o huecos o poros producidos por burbujas de gas que no pueden escapar a la superficie durante la solidificación.

2.2.3. Defectos y deformación plástica.

Campbell (2008) explica que, cuando a un material se le realiza una carga que permite que los enlaces entre los átomos se estiren y -luego- puedan volver a sus posiciones normales en la red cristalina, al retirar esta carga ocurre lo que se denomina deformación elástica; en cambio, si un metal dúctil se estira más allá de la capacidad elástica de los enlaces, cuando se retire la carga, no volverá a su forma original, sufriendo así una deformación plástica.

Los defectos de línea, especialmente las dislocaciones, tienen un papel importante en la deformación plástica de los metales. Cuando se aplica una carga mecánica a un metal, las dislocaciones se mueven y se deslizan a través de la estructura cristalina, lo que permite que el metal se deforme plásticamente en lugar de romperse, sin embargo, aumenta la energía interna del material y una alta densidad de dislocaciones puede debilitar el material, ya que las

dislocaciones pueden actuar como puntos de concentración de esfuerzos y provocar la fractura del material.

2.2.4. Granos, orientación y límite de grano.

Los granos son regiones cristalinas individuales que se han solidificado de manera independiente con orientaciones cristalinas diferentes. Estas orientaciones pueden ser aleatoria o de orientación preferencial, como se muestra en la figura 2.3.

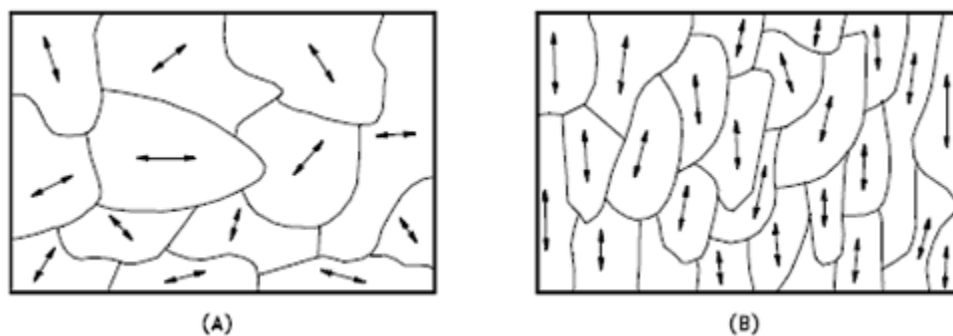


Figura 2.3 “Orientación de grano(A) Aleatorio (B)Preferencial.” Fuente: Fuente: DOE
FUNDAMENTALS HANDBOOK (1993), volumen 1 pág. 10.

Los límites de grano son las zonas o interfaz donde estos granos diferentes se encuentran, siendo este uno de los principales defectos de superficie.

Campbell (2008) expone que los límites de grano son el resultado del proceso de solidificación, y ocurren como resultado de la mal orientación de los granos a medida que se congelan en su posición; además, los átomos dentro de los límites de grano están altamente tensados y distorsionados por lo que los límites de grano son sitios de alta energía.

Los límites de grano tienen un gran impacto en las propiedades mecánicas y el comportamiento de los materiales policristalinos donde cualidades como orientación del grano, espesor, tamaño, densidad, estado de tensión y energía toman importancia.

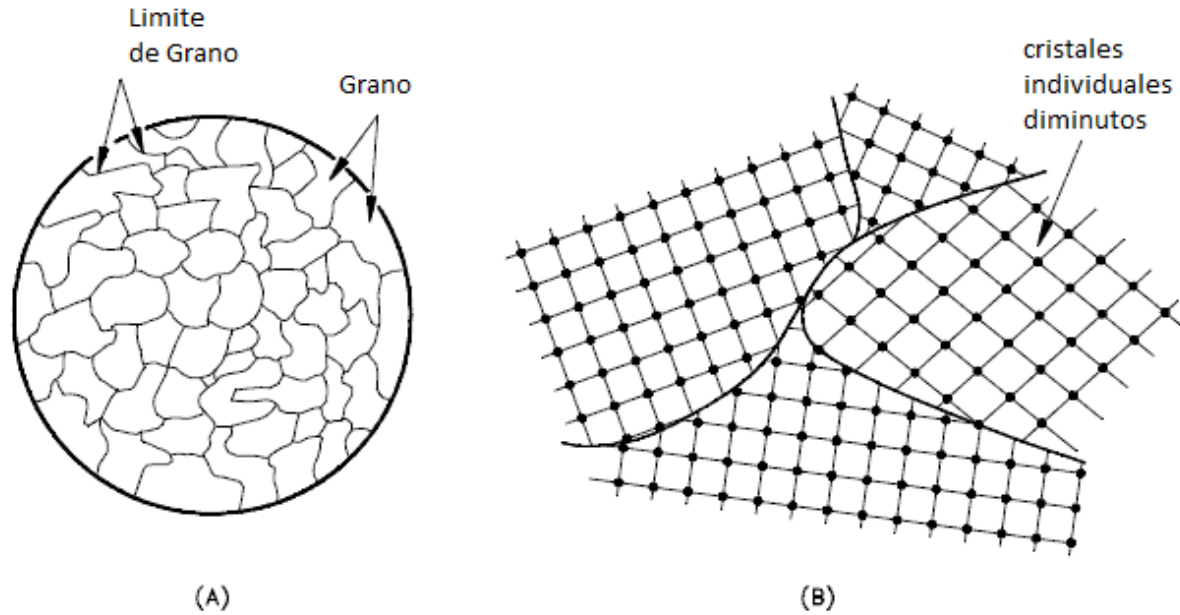


Figura 2.4 "Grano y límite de grano, (a)Microscopio (b)Atómico" Fuente: DOE
FUNDAMENTALS HANDBOOK (1993), volumen 1 pág. 10.

2.2.5. Recuperación.

La recuperación en metales es un proceso en el que se intenta eliminar las tensiones residuales que se han generado durante la deformación en frío del material aplicando un tratamiento térmico controlado. Durante el proceso de deformación en frío, los materiales experimentan un endurecimiento por deformación, lo que resulta en una mayor resistencia mecánica, provocar una disminución en la ductilidad del material y una mayor probabilidad de agrietamiento. Campbell (2008) explica que durante la recuperación ocurren tres procesos básicos, la aniquilación de defectos puntuales en exceso, la reorganización de las dislocaciones en configuraciones de menor energía, y la formación de subgranos que crecen y se entrelazan en sublímites.

2.2.6. Recristalización

La recristalización ocurre cuando un metal se calienta a una temperatura por encima de su punto de recristalización, que es la temperatura a la cual los granos del metal pierden su estructura original.

Nuevas orientaciones, tamaños de grano y formas de grano se forman durante la recristalización, Campbell (2008) explica que, durante la recristalización, los granos trabajados en frío que tienen una alta densidad de dislocaciones son reemplazados por nuevos granos que tienen una densidad de dislocaciones mucho menor.

2.3. CONFORMADO DE METALES.

El conformado de metales es un proceso de fabricación en el que se da forma a un metal utilizando herramientas y maquinaria especializadas para deformar plásticamente la pieza. Permite crear piezas y componentes de alta calidad y precisión, con una gran variedad de materiales de metal.

Algunas técnicas de conformado más comunes son:

- Laminado.
- Forjado.
- Extrusión.
- Trefilado.
- Plegado.
- Estirado.

Los procesos de conformación de metales se clasifican en dos categorías: procesos de trabajo en frío y procesos de trabajo en caliente.

2.3.1. Trabajo de conformado en frío.

Kutz (2002) define el conformado en frío como un proceso en el que se utiliza una presión moderada para dar forma a un material a temperatura ambiente, o cercana a ella, por debajo de su temperatura de recristalización.

DeGarmo et. al (2003) explica que el conformado en frío hace que los granos e inclusiones de cristal se distorsionen siguiendo el flujo del metal. Esto puede causar endurecimiento por trabajo y propiedades anisotrópicas del material. El endurecimiento por trabajo hace que el metal sea más duro, más rígido y fuerte, pero menos plástico, y puede causar grietas en la pieza.

2.3.2. Trabajo de conformado en caliente.

El conformado en caliente es un proceso en el que el material se calienta previamente a una temperatura específica, y luego se aplica presión para darle forma. El calor hace que el material sea más maleable y, por lo tanto, más fácil de conformar. Kutz (2002) define el conformado en caliente como la deformación plástica de los metales por encima de su temperatura de recristalización, a la cual, en términos generales, los cristales de un material metálico se reorganizan y vuelven a cristalizar después de haber sido deformados.

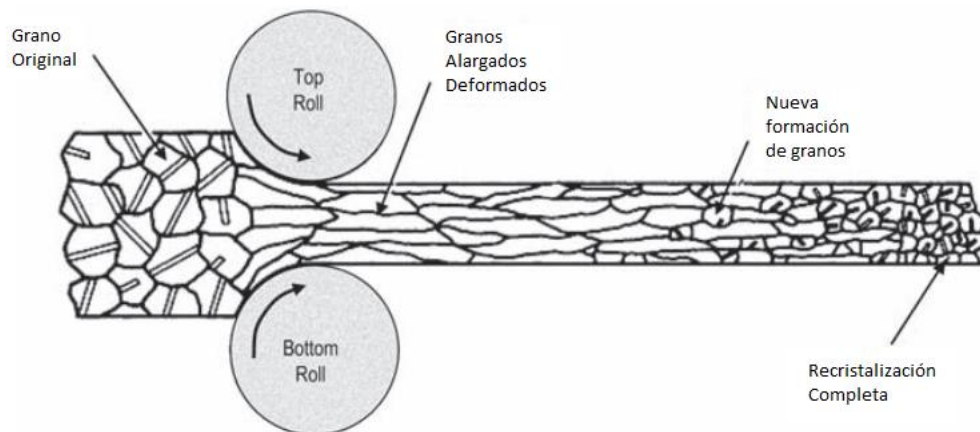


Figura 2.5 "Recristalización durante la laminación en caliente" Fuente: *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys* (2008) pág. 280.

Tabla 2.4 "Ventajas y desventajas del conformado en frío" fuente: *Handbook of material selection* (2002), pag.939.

Ventajas	Desventajas
No se requiere calentamiento	Se requieren fuerzas más altas para la deformación
Se obtiene un acabado de superficie mejor	Se requiere equipos más pesados y potentes
Se tiene un mayor control de las dimensiones	Se tiene menor ductilidad disponible
Se tiene mejor reproducibilidad e intercambiabilidad de las piezas	Las superficies metálicas deben estar limpias y libres de escama
Se mejoran las propiedades de resistencia	Ocurre endurecimiento por deformación (puede requerir recocidos intermedios)
Se pueden imprimir propiedades direccionales	Las propiedades direccionales imprimidas pueden ser perjudiciales
Se minimizan los problemas de contaminación	Puede producir tensiones residuales indeseables

El rango de temperatura homólogo es el rango de temperaturas en el que el material se encuentra en un estado plástico óptimo para el conformado en caliente. Para estimar la temperatura necesaria para realizar un conformado en caliente se suele utilizar las relaciones de la tabla 2.5

Tabla 2.5 "Rangos de temperatura homóloga para diferentes procesos" fuente: *Montalba(s.f.) Clase 4 – Procesos de conformado I.*

Proceso	T/T_m
Trabajado en frío	<0.3
Trabajado a temperatura media	0.3 a 0.5
Trabajado en caliente	>0.6

2.3.3. Laminado.

El laminado es una técnica de conformado la cual consiste en pasar el metal entre dos rodillos que giran en direcciones opuestas; el espacio entre los rodillos es un poco menor que el espesor del material de entrada, por lo que se logra una deformación del material por compresión.

S.L. Semiatin (2005) expone que los principales objetivos del proceso de laminación son reducir la sección transversal del material entrante mejorando sus propiedades y obtener la sección deseada a la salida de los rodillos. El proceso se puede realizar en caliente, tibio o en frío, según la aplicación y el material de que se trate.

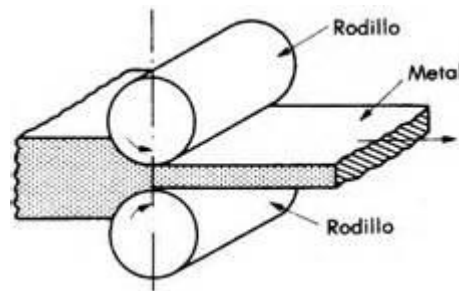


Figura 2.6 "Proceso de laminado" Fuente: *Fundamentos de conformado plástico* (2008) pág.

3.

2.3.4. Laminado roll former.

El laminado por Roll Forming es una variante del proceso de laminado donde una lámina de metal plana se transforma en una pieza con forma compleja mediante su paso a través de una serie de rodillos con formas específicas, según el resultado deseado, que gradualmente moldean la lámina.



Figura 2.7 "piezas producidas por roll-forming" Fuente: Nutechrollforming

Esta variante de laminado presenta las ventajas de que puede producir piezas con formas complejas y detalles precisos. Otra ventaja es su mayor eficiencia en la producción de piezas grandes y requiere menos operaciones de acabado. No obstante, el laminado por Roll Forming presenta algunas desventajas, como la necesidad de una maquinaria especializada, lo que supone un costo inicial más alto, y no produce piezas con tanta uniformidad de superficie como el laminado convencional.

El proceso es ideal para la producción de piezas estructurales de larga longitud y de alta complejidad, como perfiles de aluminio, canales, rieles, postes, entre otros.

2.4. FRACTURA.

Según Anderson (2005), un material se fractura cuando se le aplica una cantidad de tensión y trabajo a nivel atómico capaz de romper los enlaces que mantiene a los átomos unidos. Una fuerza de tensión es requerida para incrementar la distancia de separación de equilibrio de los átomos; la magnitud de la tensión debe exceder la fuerza de cohesión para cortar los enlaces completamente.

Son posibles dos modos de fractura: dúctil y frágil. Callister (2006) explica que los materiales dúctiles suelen presentar una deformación plástica sustancial con una alta absorción de energía antes de la fractura, y que en los materiales menos dúctiles normalmente no hay deformación plástica o hay poca deformación plástica con una absorción de energía baja acompañando a una fractura frágil.

La fractura dúctil se caracteriza por una extensa deformación plástica en las cercanías de una grieta en avance, suele ser gradual y progresiva, y se caracteriza por la presencia de áreas de

Marco teórico

deformación plástica en la zona de fractura. En cambio, la fractura frágil ocurre sin ninguna deformación apreciable y mediante una propagación rápida de la grieta y da como resultado una superficie de fractura relativamente plana. Ambos modos de fractura ocurren en dos pasos: la formación de una grieta y la propagación de ésta.

Callister (2007) dice que, para la mayoría de los materiales cristalinos frágiles, la propagación de la grieta corresponde a una fractura transgranular; esto debido a que las grietas de la fractura pasan a través de los granos, y se propaga rompiéndose sucesiva y repetidamente los enlaces atómicos. También Callister expone que, en algunas aleaciones la propagación de las grietas ocurre a lo largo del límite de grano y es denominada fractura intergranular.

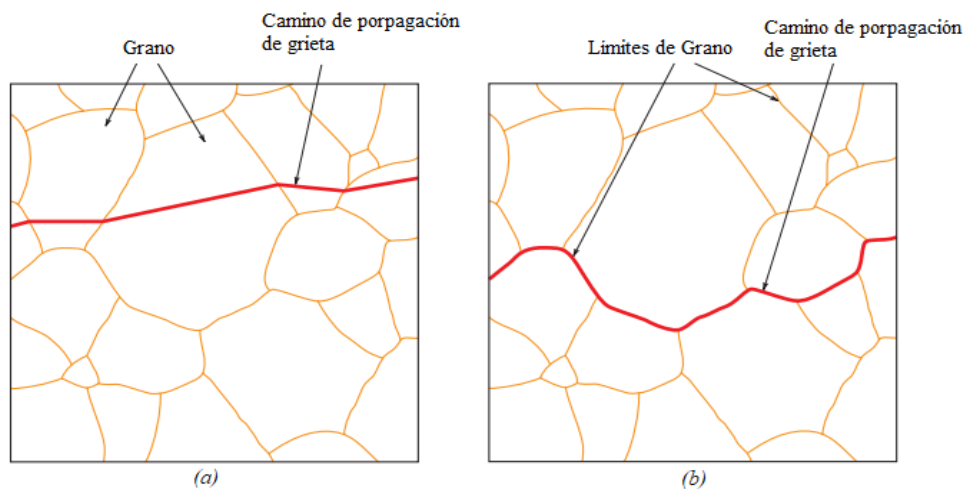


Figura 2.8 "Propagación de grieta en una fractura transgranular(a) e Intergranular(b)."

Fuente: Materials Science and Engineering (2007) pág. 213-214.

Una fractura intergranular se produce entre las diferentes estructuras cristalinas de un material, mientras que una fractura transgranular se produce a través de las estructuras cristalinas. Esto afecta la resistencia y la ductilidad del material, ya que una fractura intergranular puede ser más frágil y propensa a la propagación que una fractura transgranular. Además, el proceso de fractura también puede ser diferente, ya que una fractura intergranular puede ser causada por tensiones internas, mientras que una fractura transgranular puede ser causada por tensiones externas.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE FABRICACIÓN DE ALAMBRE.

3.1. MATERIAL BASE.

En la elaboración de los alambres se utilizaron dos tipos de materiales. Ambos fueron obtenidos a través de aluminio reciclado al cual se les incorporó una adición de cobre en porcentajes diferentes; la aleación aluminio-cobre resultante se obtuvo por medio de fusión y solidificados en moldes rectangulares de los cuales se obtuvieron dos bloques de material rectangular que a lo largo de este trabajo se hará referencia a ellos como “tochos” los que cuentan con la composición química de sus principales componentes mostrada en la Tabla 3.1 obtenida a través de un ensayo chispa.(tabla de todos los componentes en anexo 1).

Tabla 3.1 "Composición química de los tochos 1 y 2" Fuente: Elaboración propia.

Nomenclatura	Cu	Si	Fe	Mg	Al
T1 (Al-4Cu)	4,282%	0,424%	0,2175%	0,2735%	93,9 %
T2 (Al-7Cu)	7,01%	0,42%	0,17%	0,292%	91,2 %

3.2. PREPARACIÓN DEL MATERIAL BASE.

Del material base, tochos T1 y T2, se cortaron láminas con una sierra de cinta como se ve en la figura 3.1a. Posteriormente, estas láminas de aluminio fueron cortadas de forma manual en una prensa de banco con una sierra de mano obteniéndose varillas de aluminio de 4,6x125mm para ser laminadas como se muestra en la figura 3.1b. Tomando en consideración que la mayoría de los cortes fueron hechos de forma manual, al cortar las varillas de las láminas, las dimensiones variaban en espesor, siendo ajustadas a las medidas con una lima teniendo especial cuidado de no calentar el material para evitar alterar su estructura interna. Se realizaron varillas de aluminio para cada uno de los materiales.

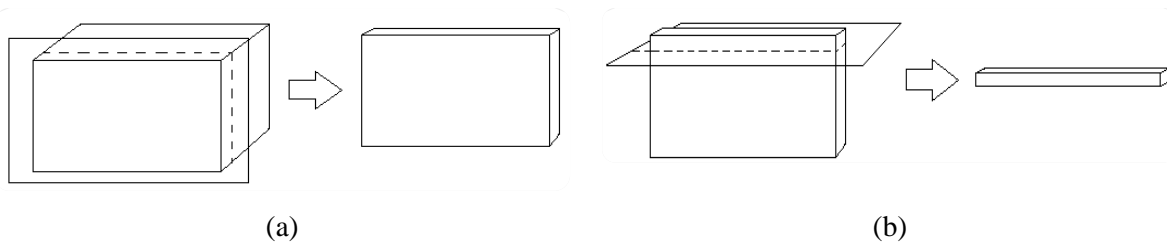


Figura 3.1 "Extracciones realizadas, (a) lamina del tocho, (b) varilla de la lámina. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.2 "Lamina cortada en varillas" Fuente: Elaboración propia.

3.3. CONFORMADO DE ALAMBRES.

Para el proceso de conformado de alambres se utilizó una laminadora automática de 130mm con reductor para lámina, alambre cuadrado, y 6 medidas de cañas que se muestra en la figura 3.3.



Figura 3.3 "Laminadora Roll-forming" Fuente: Elaboración propia.

Metodología de fabricación de alambre

Donde su información técnica es la siguiente:

- Relación de engranajes 4.75x1
- Rodillos de acero cementado (no acero inoxidable)
- Diámetro de rodillos: 65 mm
- Largo de rodillos: 130 mm
- La apertura máxima es: 6 mm
- Área plana: 70 mm
- 9 alambres cuadrados de: 1.0 / 1.5 / 1.75 / 2.0 / 2.25 / 2.5 / 3.0 / 3.5 / 4.0 mm
- Rodillos externos: 65 mm de diámetro por 30 mm de ancho
- 6 medidas de caña 3.5x1.25 / 2.5x1.25 / 2.0x1.0 / 1.5x1.0 / 1.25x1.0 / 1.0x0.8 mm
- Peso: 34.75 kg

A lo largo de este estudio se referirá a cada ranura del roll-forming como pasos y serán enumerados del 1 al 9 como se muestra en la figura 3.4.

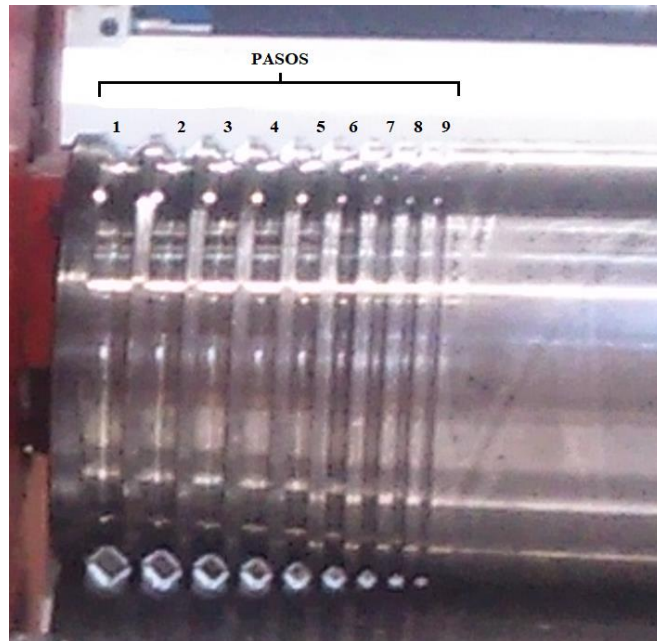


Figura 3.4 "Pasos del Roll-Forming" Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.2 "Medidas de los pasos" Fuente: Elaboración propia.

Paso	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Medida fabricante	4,0 mm	3,5 mm	3,0 mm	2,5 mm	2,25 mm	2,0 mm	1,75 mm	1,5 mm	1,0 mm

3.3.1. Base de la metodología de fabricación.

Para la obtención de la metodología de conformado de alambres se realizaron una serie de pruebas experimentales (detalladas en Anexo 2) para establecer los principales parámetros de fabricación a utilizar, dificultades y variables operacionales implicadas.

Con las pruebas realizadas se estableció como parámetro fijo una frecuencia de 30Hz en el variador de frecuencia del motor de la laminadora

De las pruebas realizadas se establecieron cinco parámetros para tener en cuenta:

- La forma del material
- Espesor del material
- Posición en que entra a la máquina
- Número de pasos por pasada
- Etapa final del paso 9
- Temperatura.

En primer lugar, para la forma del material de entrada se observó que los materiales con secciones transversales asimétricas o rectangulares sufrían torciones que provocaban fracturas como se muestra en la figura 3.5 y 3.6. Para un óptimo procesamiento se deben utilizar materiales de sección lo más cuadrada posible.



Figura 3.5 "Torsión del material en el Ensayo 2-1, paso 1" fuente: Elaboración propia.

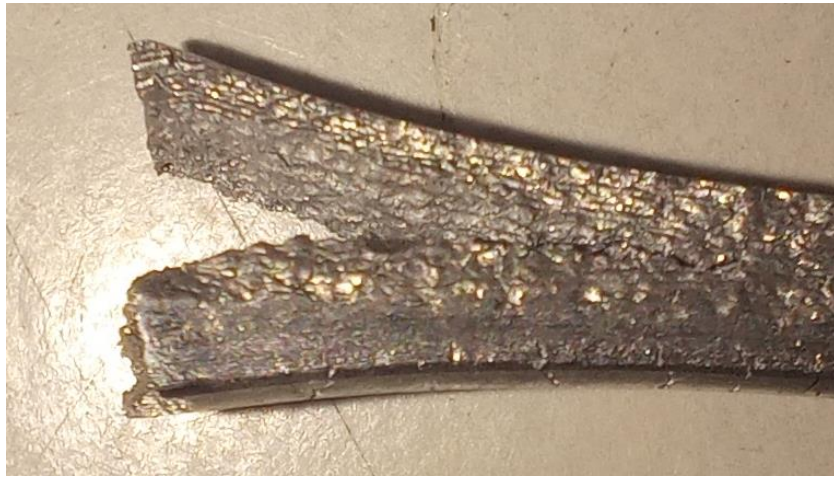


Figura 3.6 "Fractura del material en la zona de torsión en el ensayo 2-1, paso 3 primera pasada" fuente: Elaboración propia.

En segundo lugar, el espesor inicial del material es uno de los factores más influyentes en la formación de grietas y fracturas del material en las primeras etapas, donde en las pruebas, materiales con espesores superiores a 4,6mm se fracturaban completamente en el paso 1 o 2 de la máquina; por tanto, se recomienda utilizar materiales de inicio de hasta 4,6 mm de espesor.



Figura 3.7 "Fracturas paso 1 prueba 1-1 de un material de 5,75x5,75mm" fuente: Elaboración propia.

En tercer lugar, con las pruebas se observó que el material, al ser deformado en rodillos circulares, muchas veces se curvaba formando arcos; esto obligaba a tener especial cuidado a la hora de proceder con el siguiente paso debido a que, en muchas ocasiones, el material al entrar con su curvatura cóncava hacia abajo hacía contacto con la placa de la máquina provocando una fractura por flexión del material como se muestra en la figura 3.8 y 3.9. Por ello, en estos casos, siempre que el material se curve, se recomienda introducirlo con su curvatura cóncava hacia arriba o de lado de ser necesario.



Figura 3.8 "Fractura ensayo 1-4" fuente: Elaboración propia.

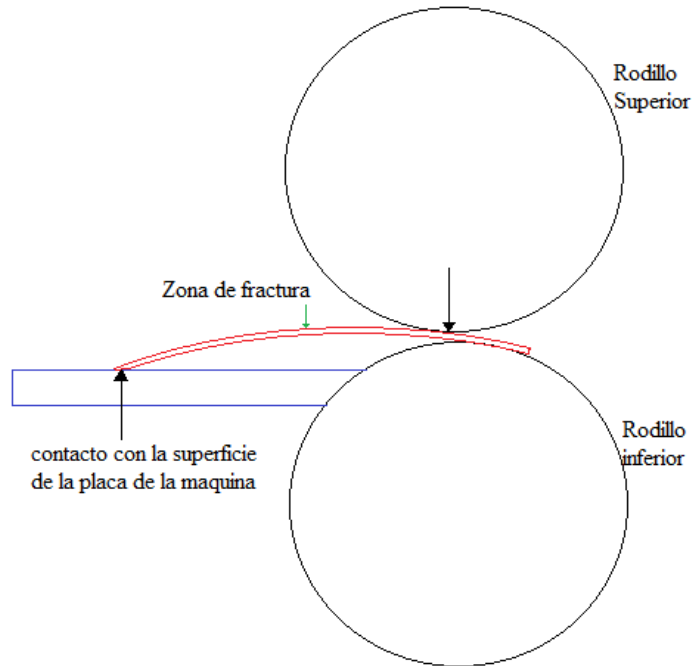


Figura 3.9 “Entrada cóncava hacia abajo que provoca fractura al contacto con la placa de la máquina” Fuente: Elaboración propia

En cuarto lugar, se estimó desde las pruebas que dos pasadas por paso de la laminadora era más que suficiente para obtener la reducción máxima de cada paso y así a minimizar la posibilidad de daño del material por errores de operación.

En quinto lugar, de las pruebas se pudo observar que el proceso avanzaba con éxito hasta el paso 8. En el paso 8 y 9, el material comenzaba a formar rebaba; y en el paso 9, la rebaba podía ser dañina para el material si se aplastaba y se incrustaba. Por ello, en la metodología se tiene en cuenta un proceso hasta el paso 8, y una variante para el paso 9.

Finalmente, las pruebas realizadas en laminación en caliente mostraban una disminución casi total de las grietas en los primeros pasos en comparación con las laminadas en frío, facilitando el proceso de fabricación.

3.3.2. Metodología de conformado

En primer lugar, la máquina es parametrizada a 30Hz, el material inicial -las varillas de hasta 4,6mm de espesor- son introducidas en las ranuras(pasos) de la máquina y se gira 90 grados para la segunda pasada como se muestra en la figura 3.10. De esta manera, el material se va reduciendo y alargando desde el paso 1 hasta el 8.

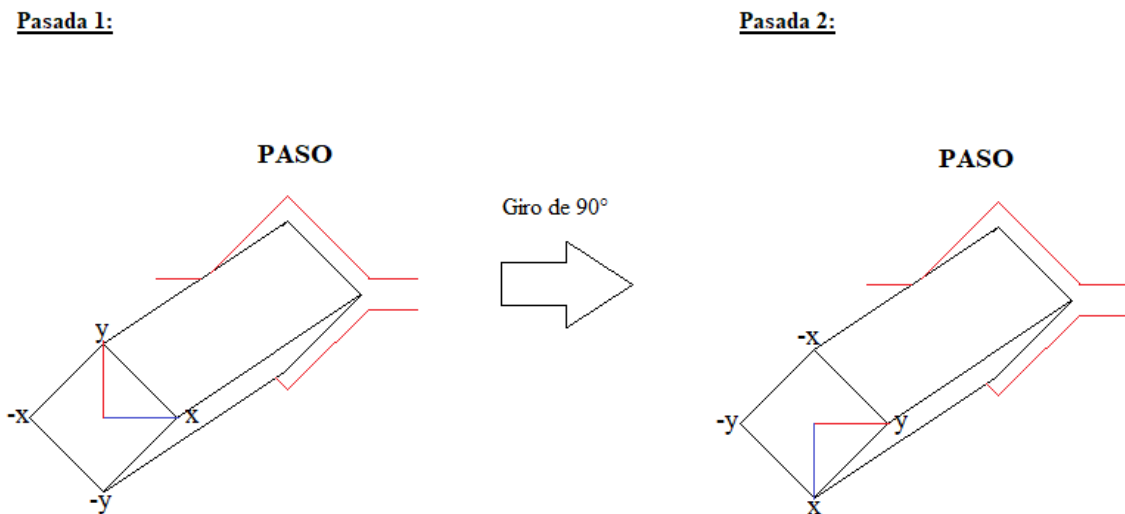


Figura 3.10 "Giro del material en la segunda pasada" Fuente: Elaboración propia.

Debido a la dificultad que presenta el paso 9, de si se continúa la formula anterior, el material al pasarlo la primera vez genera rebaba, y al pasarlo la segunda vez -con el material girado 90 grados- la rebaba se aplasta por efecto de la laminación y se incrusta en el material generado, lo que da como resultado que el alambre producido resulte quebradizo y fracturado. Para evitar esta dificultad, en esta etapa se opta por realizar una operación diferente.



Figura 3.11 "Alambre con incrustaciones de rebaba" Fuente: Elaboración propia.

En efecto, luego de haber terminado la etapa del paso 8 entra en el paso 9 la primera vez en un sentido y la segunda pasada, el material vuelve a pasar en el mismo sentido, sin girarse, por la etapa 8. Se limpia la rebaba de forma manual, y esto se repite tres veces o las veces que sean necesarias hasta que la mayor parte de esa rebaba se reduzca y se quiebre. Cuando se obtenga un material en su mayor parte libre de rebaba, se procede a realizar una pasada por el paso 9 con el material girado 90 grados con el fin de darle la forma semicircular al alambre como se muestra en la figura 3.12.

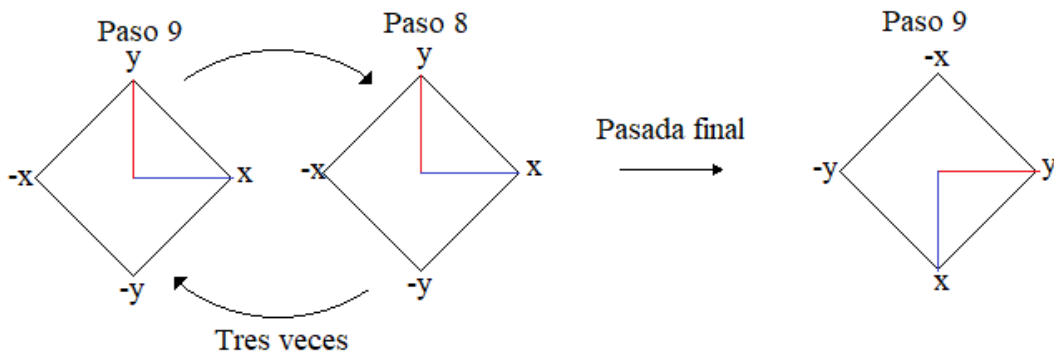


Figura 3.12 "Proceso del paso 9" fuente: Elaboración propia.

Metodología de fabricación de alambre

Muchas veces esta última pasada presenta la dificultad de que el material se gire al estar pasando por la máquina; es recomendable, entonces, pasarlo dos veces, una en un sentido y la otra en el sentido opuesto como se muestra en la figura 3.13.

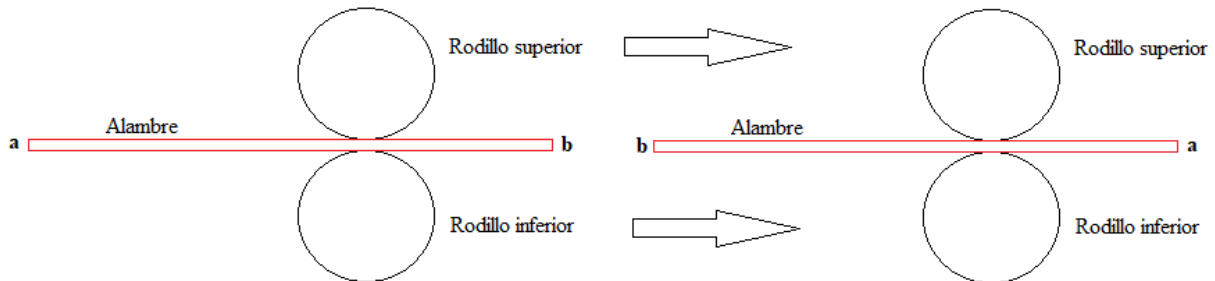


Figura 3.13 "Cambio de sentido en la pasada final" Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3 "Metodología de fabricación de alambres especializada" Fuente: elaboración propia.

Etapas	Paso	Numero de pasadas	Observaciones
1	Paso 1	2 pasadas	Girar 90° para la segunda pasada
2	Paso 2	2 pasadas	Girar 90° para la segunda pasada
3	Paso 3	2 pasadas	Girar 90° para la segunda pasada
4	Paso 4	2 pasadas	Girar 90° para la segunda pasada
5	Paso 5	2 pasadas	Girar 90° para la segunda pasada
6	Paso 6	2 pasadas	Girar 90° para la segunda pasada
7	Paso 7	2 pasadas	Girar 90° para la segunda pasada
8	Paso 8	2 pasadas	Girar 90° para la segunda pasada
9	Paso 9	1 pasadas	
10	Paso 8	1 pasadas	Sin girar, pasar igual que en la etapa anterior
11	Paso 9	1 pasadas	Sin girar, pasar igual que en la etapa anterior
12	Paso 8	1 pasada	Sin girar, pasar igual que en la etapa anterior
13	Paso 9	1 pasada	Sin girar, pasar igual que en la etapa anterior
14	Paso 8	1 pasada	Sin girar, pasar igual que en la etapa anterior
15	Paso 9	2 pasadas	Girar 90° con respecto a la etapa anterior, invertir sentido en la segunda pasada

3.3.3. Laminado en caliente.

Para la laminación en caliente se debe considerar una temperatura de trabajo donde para el aluminio al tener una temperatura de fusión de 660°C, se obtiene que para poder realizar una laminación en caliente la temperatura de trabajo debe ser mayor a 396 °C (Tabla 3.4).

Debido a que el proceso de laminación en caliente se realiza a temperatura ambiente lo que provoca una disminución de la temperatura con el tiempo se opta por realizar un laminado a una temperatura superior, 500 °C, considerando un delta para alcanzar a realizar la laminación en caliente en al menos dos pasadas.

Tabla 3.4 "Temperaturas de trabajos para el aluminio en relación atabla 2.5" fuente: Elaboración propia.

Tipo de trabajo	Temperatura de trabajo
Trabajo en frío	<198°C
Trabajo a temperatura media	198 a 330°C
Trabajo en caliente	> 396°C

3.4. METODOLOGÍA ANÁLISIS MICRO/MACROESTRUCTURAL.

En la elaboración de muestras se extraen recortes del material laminado con dimensiones de 10mm de largo desde el paso 1 hasta el 9, y en el paso 9 se extrajeron dos muestras (una para la sección longitudinal del alambre y otra para la sección transversal). En total se extrajeron diez recortes por cada tipo de material (T1(Al-6Cu) y T2(Al-8Cu)) y por cada proceso (laminación en frío y caliente), dando un total de 40 recortes, cada uno con su etiqueta donde se explicita el tipo de material, la etapa del proceso, de dónde se obtuvo y el tipo de laminación que le fue aplicada.

Las muestras fueron ubicadas en moldes circulares elaborados a partir de impresión 3D, colocándose hasta tres muestras longitudinales por molde, y una muestra de la sección

Metodología de fabricación de alambre

transversal del alambre final. Estos moldes fueron rellenos con resina epoxica en una composición de 1:2 de endurecedor-resina.

Las muestras fueron pulidas en una pulidora rotativa de franela Ecomet II Grinder, que utiliza un cabezal rotativo en el cual se puede intercambiar entre lijas de distinto tamaño de grano. En el proceso de elaboración de las muestras se utilizaron lijas al agua desde grano 50 a 1200 y, posteriormente, pulidas con un paño y una solución de alúmina para lograr el pulido espejo.



Figura 3.14 "Pulidora Ecomet II Grinder" Fuente: Elaboración propia.

Se elaboraron un set de 12 encapsulados para el tocho 1 y otras 12 para el tocho 2, en las cuales se distribuyó de manera que quedaran 3 muestras de material (Figura 4.3a) por encapsulado, a excepción del encapsulado que de las muestras de los pasos 7-8-9 donde se le agregó una muestra para observar la sección transversal del alambre como se observa en la figura 4.3b



Figura 3.15 "Set de muestras" Fuente: Elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 3.16 "Caras principales de las muestras. (a) Disposición general. (b) Muestras pasos 7 a 9 con sección transversal" Fuente: ELaboración propia.

Para el análisis macroestructural, las muestras son observadas a través de un lupa estereoscópico de alta calidad Leica EZ4 E con una ampliación variable de 8x a 35x y fotografías digitalmente a través del software Leica LAS EZ.



Figura 3.17 "Leica EZA E" Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis microestructural las muestras fueron atacadas químicamente siguiendo en lo posible la norma ASTM E407, buscando revelar su estructura general y observadas en un microscopio metalográfico.

Tabla 3.5 "Reactivos para ataque químico de metales" Fuente: norma ASTM E407.

Aluminio base	Grabadores	usos
2000 series	3, 2, 1a 8a, 6,7	Estructura general Identificación de fases
Grabador		
3	2 mL HF 3 mL HCl 5 mL HNO ₃ 190 mL agua	(a) Sumerja 10–20s. Lave en un chorro de agua tibia. Revela la estructura general (b) Diluir con 4 partes de componentes de acuarelas—mezclar fresco.



Figura 3.18 "Microscopio metalográfico" Fuente: Elaboración propia.

3.5. METODOLOGÍA ENSAYOS DE TRACCIÓN.

Las muestras fueron obtenidas de alambres fabricados para T1 y T2. Se extrajeron 10 muestras de alambres fabricados a través de laminación en frío y en caliente 500 °C por una hora y media en las primeras etapas del proceso de fabricación.

3.5.1. Tratamiento térmico.

A cada tipo de muestra se le extrajeron 5 de las 10 muestras a las que se le realizó un tratamiento térmico de 120°C por 24 horas para homogeneizar la composición química y eliminar tensiones internas producto de la laminación.

3.5.2. Ensayo.

En total se fabricaron 20 muestras:

- 5 muestras de laminación en frío sin tratamiento térmico.
- 5 muestras de laminación en caliente sin tratamiento térmico.
- 5 muestras de laminación en frío con tratamiento térmico.
- 5 muestras de laminación en caliente con tratamiento térmico.

Cada muestra tiene 300mm de longitud con sección transversal circular de diámetro 1mm lo que equivale a un área de $0,78 \text{ mm}^2$ son ensayadas en un equipo zwick roell z005 con sistemas de extensometría para medir la deformación usando como base la norma ASTM B557.



Figura 3.19 "Maquina de traccion Zwick/ Roell Z005" Fuente: Zwickroell.com

**CAPÍTULO 4. ANALISIS DE RESULTADOS DE
LAMINACIÓN EN FRÍO VS LAMINACIÓN EN
CALIENTE.**

Laminación en frío vs laminación en caliente.

4.1. PROCESAMIENTO DE ALAMBRES SEGÚN VARIABLES DE TEMPERATURA Y TRATAMIENTOS POSTERIORES.

En la presente sección se muestran los resultados de las metodologías anteriormente vistas, aplicadas a los dos materiales en estudio, tocho 1(Al-6Cu) y tocho 2(Al-8Cu), considerando 2 tipos de conformado, en frío y en caliente.

La temperatura considerada para el conformado en caliente fue de 500°C, basado en que la temperatura de trabajo en caliente para aluminio debe ser superior a 396°C y se establece 500°C para asegurar 2 pasadas a temperatura ambiente, donde las muestras estuvieron expuestas por 90 minutos; luego de esto, el material es retirado del horno uno a la vez e inmediatamente se comienza el proceso de laminado con la metodología de conformado de alambre definida en el capítulo anterior. Debido a que el material está expuesto a la temperatura ambiente, la laminación en caliente se cumple para los primeros pasos, ya que se considera como temperatura al inicio del procesamiento, la que luego desciende. Este procedimiento no considera controlar la variación de la temperatura de la muestra inicialmente en caliente, ya que el interés principal para esta investigación eran dos propósitos: primero, realizar un tratamiento de homogenización a la muestra; y posteriormente, realizar una deformación en el paso 1 y 2 en caliente, considerando que estos son los pasos más críticos, y los que mayor cantidad de grietas posee.

4.2. Observación macro en el proceso de elaboración de los alambres.

Los siguientes análisis de observación macro se realizaron en los dos tipos de aleaciones T1(Al-4Cu) y T2(Al-7Cu), donde para cada uno se efectuó el proceso tanto de laminación en frío como en caliente con el propósito de obtener una comparación visual de los distintos procesos.

Las muestras de cada una de las aleaciones fueron elaboradas mediante la metodología de elaboración de muestras definida en el capítulo 3 y preparadas a través de desbaste y pulido fino. Esto para observar de mejor forma la superficie y después poder corroborar lo observado mediante microscopio óptico.

Laminación en frío vs laminación en caliente.

4.2.1. Análisis macroestructural de T1 Al-4Cu laminadas en frío y caliente.

A continuación, se muestra una serie de imágenes comparativas de laminación en frío y caliente correspondientes al tocho T1(Al-4Cu).

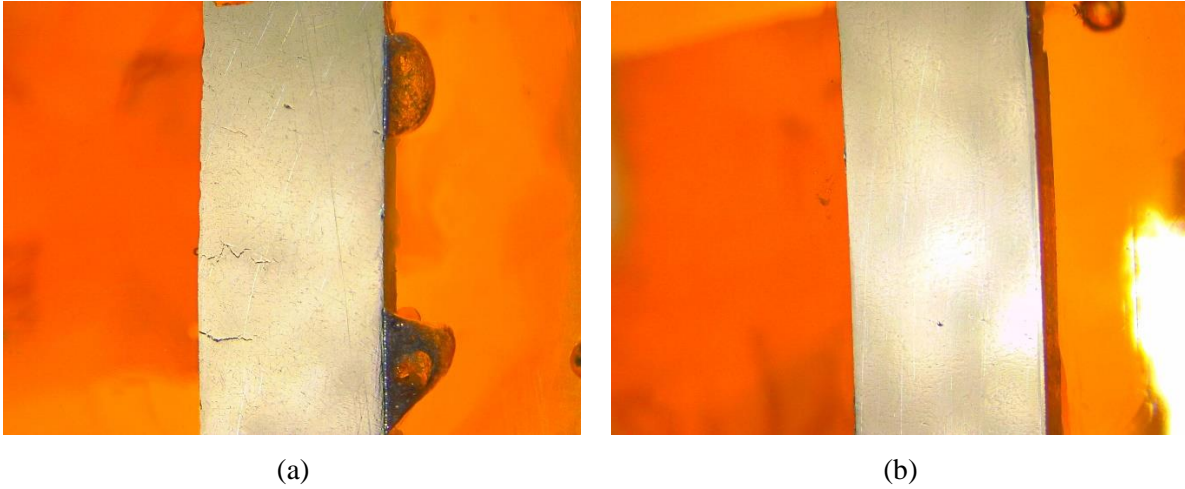


Figura 4.1 “Tocho 1 paso 1 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8.” Fuente: Elaboración propia.

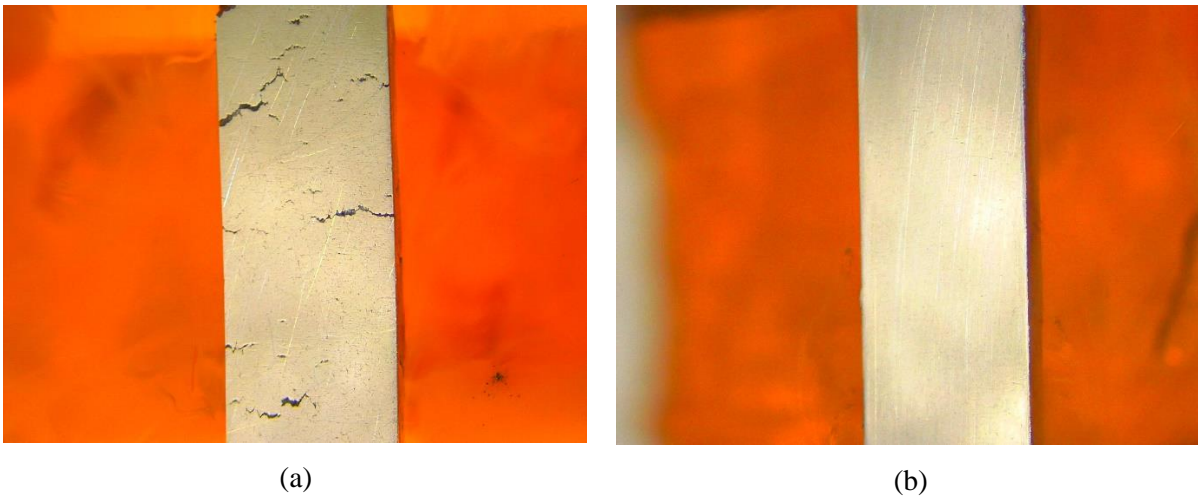


Figura 4.2 “Tocho 1 paso 2 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8” Fuente: Elaboración propia.

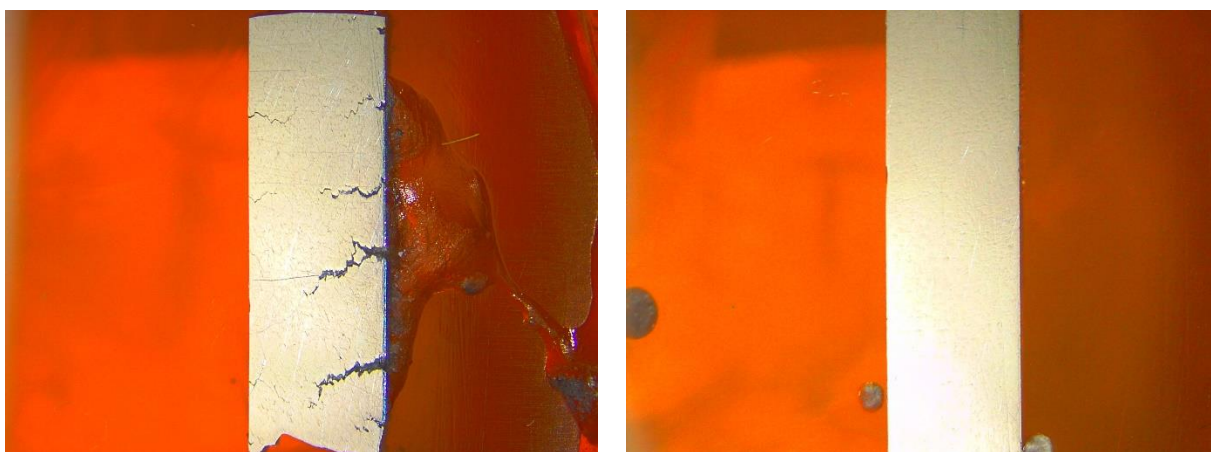
Laminación en frío vs laminación en caliente.



(a)

(b)

Figura 4.3 “Tocho 1 paso 3 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”

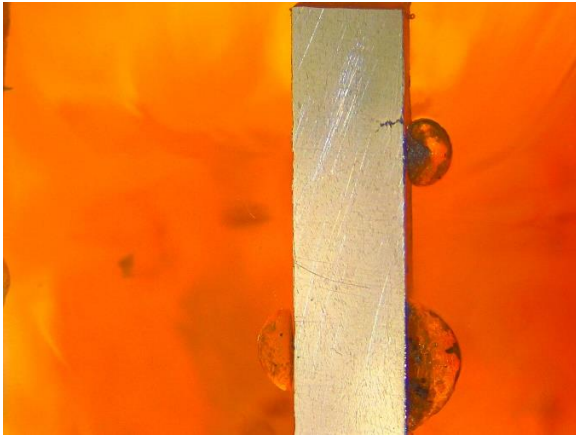


(a)

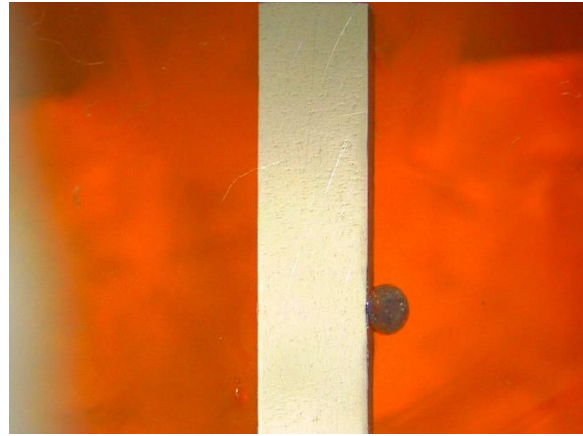
(b)

Figura 4.4 “Tocho 1 paso 4 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”

Laminación en frío vs laminación en caliente.

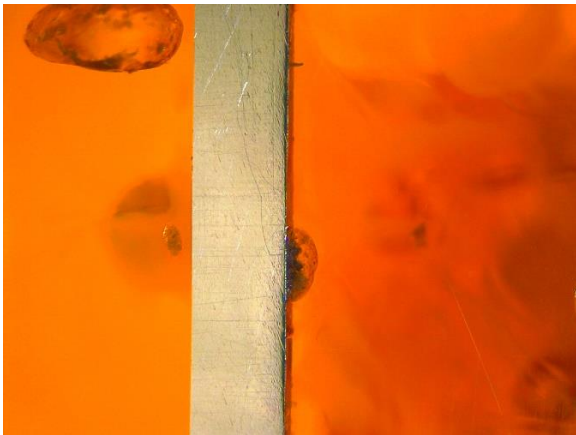


(a)

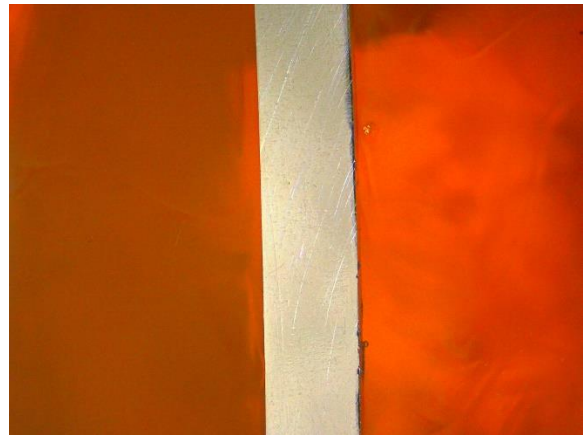


(b)

Figura 4.5 “Tocho 1 paso 5 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”



(a)



(b)

Figura 4.6 “Tocho 1 paso 6 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”



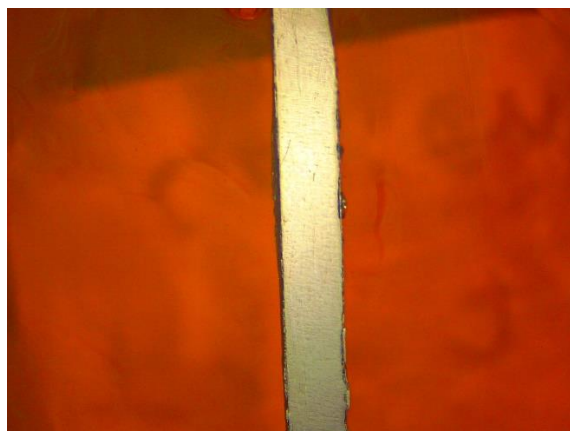
(b)

Laminación en frío vs laminación en caliente.

Figura 4.7 “Tocho 1 paso 7 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”



(a)



(b)

Figura 4.8 “Tocho 1 paso 8 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”



(a)



(b)

Figura 4.9 “Tocho 1 paso 9 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”

Laminación en frío vs laminación en caliente.

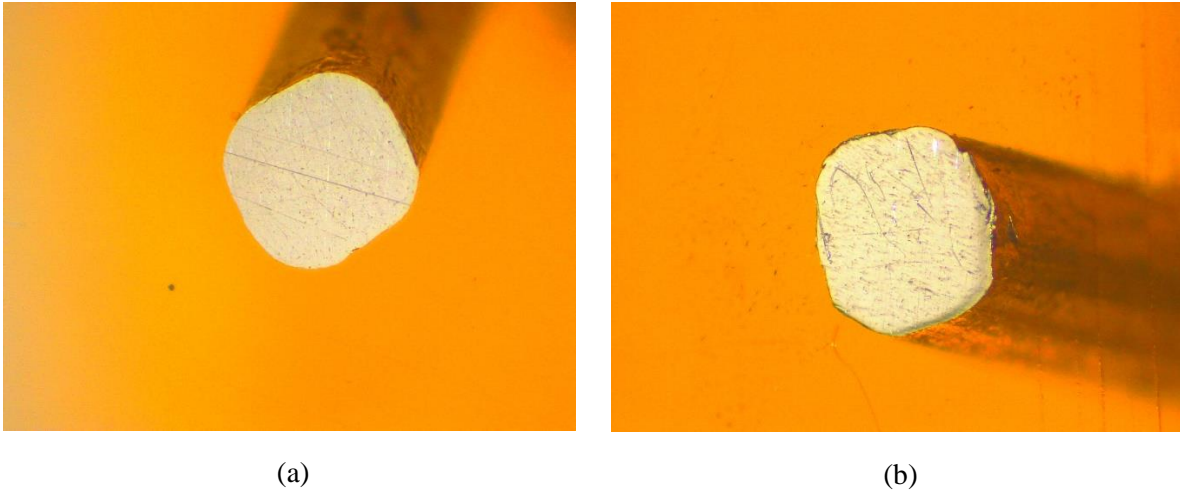


Figura 4.10 “Sección transversal paso 9, laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x35”

Las muestras presentan similitud en cuanto a sus espesores, pero diferencias notorias en cuanto a su calidad superficial y contenido de discontinuidades. Las muestras procesadas en frío presentan agrietamiento que llegan al centro de la muestra y además una calidad superficial con ciertas discontinuidades hasta el paso cuatro como se puede observar en la figura 4.7.

En el paso 5 (Figura 4.5) se observa una disminución considerable de las grietas, que ya en el paso 6 (Figura 4.6) no son apreciables. Hasta el paso 9 se observa que las muestras, tanto en caliente como en frío, presentan similitud; y en este paso en particular, figura 4.9, se observa una clara diferencia en la superficie exterior de las muestras, donde las muestras laminadas en frío presentan más irregularidades.

Considerando que el trabajo en frío en las reducciones acumula mayor energía y dislocaciones, trae consigo la generación de grietas que permiten aliviar la energía interna en el material. Su contraparte en caliente no presenta discontinuidades y una excelente calidad superficial.

Laminación en frío vs laminación en caliente.

4.2.2. Análisis macroestructural de T2 Al-7Cu laminado en frío y caliente.

A continuación, se muestra una serie de imágenes comparativas de laminación en frío y caliente correspondientes a él tocho T2(Al-7Cu).

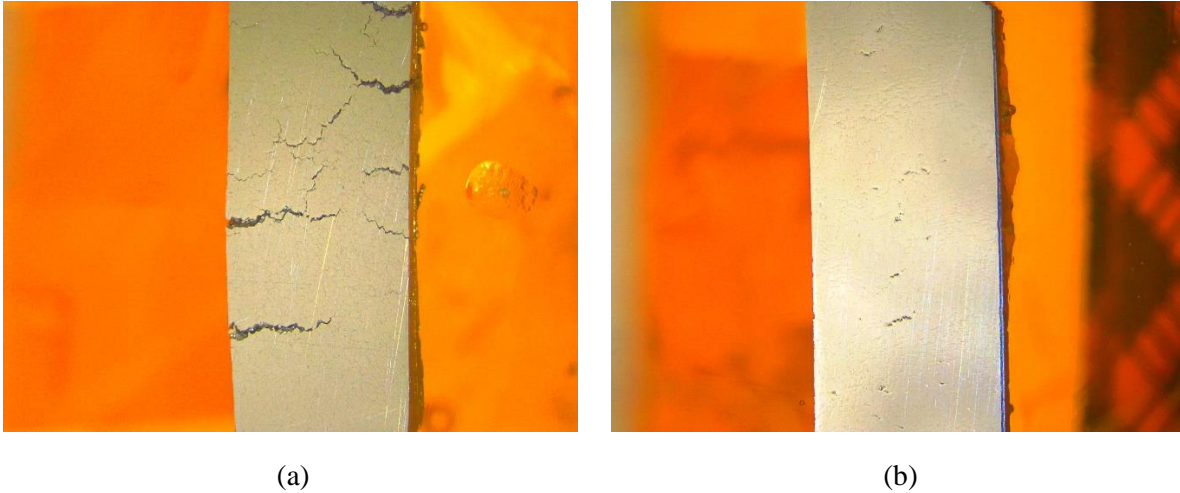


Figura 4.11 “Tocho 2 paso 1 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”

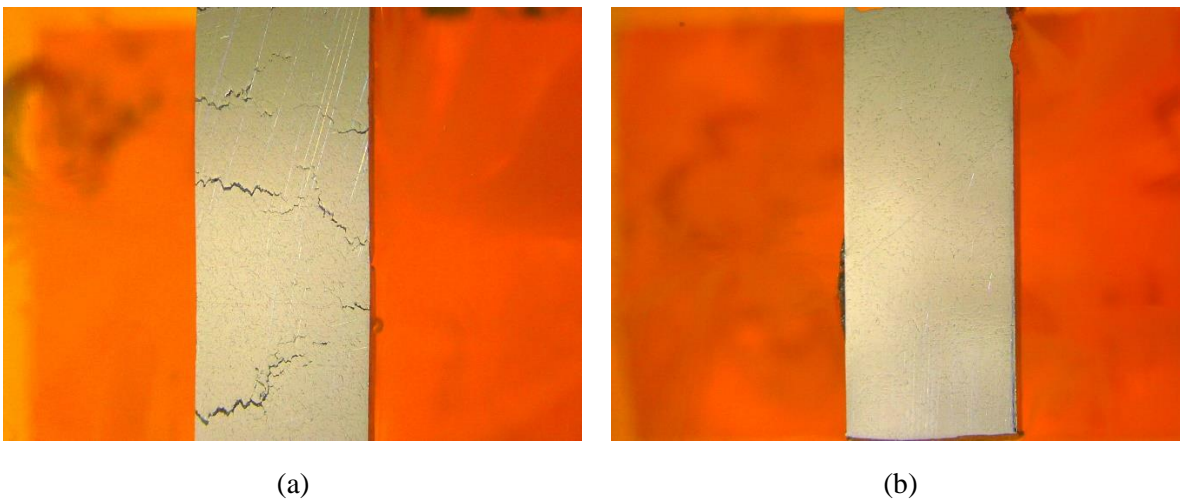
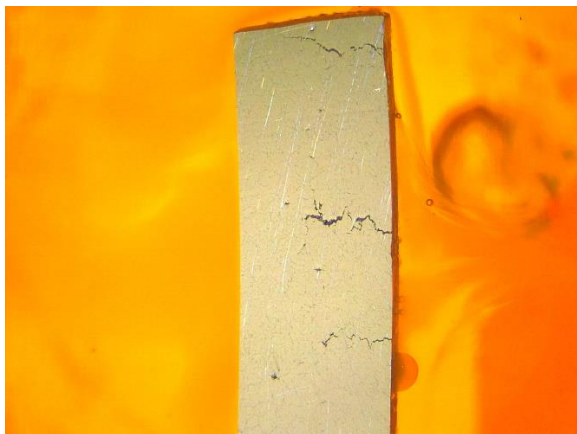
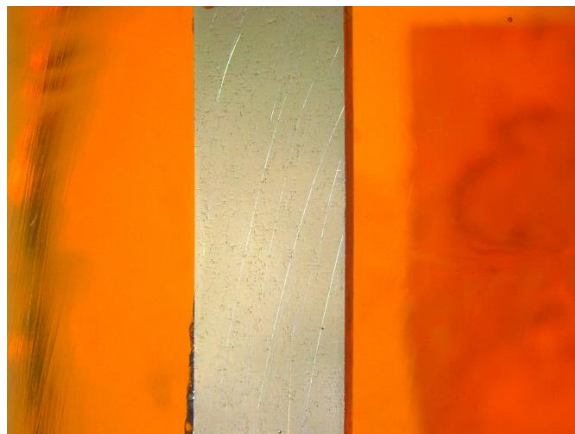


Figura 4.12 “Tocho 2 paso 2 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”

Laminación en frío vs laminación en caliente.

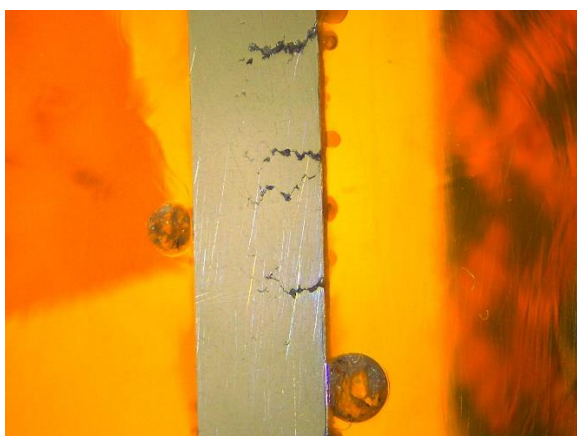


(a)

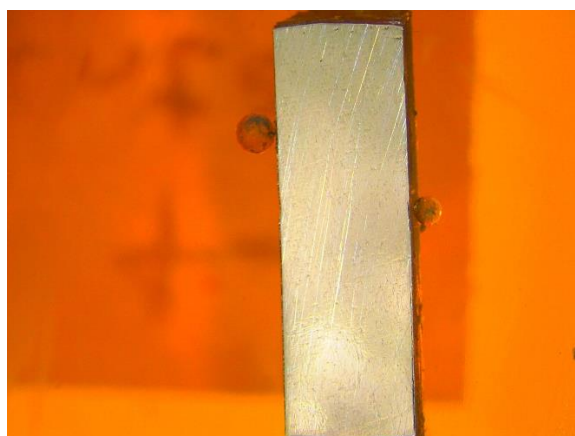


(b)

Figura 4.13 “Tocho 2 paso 3 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”



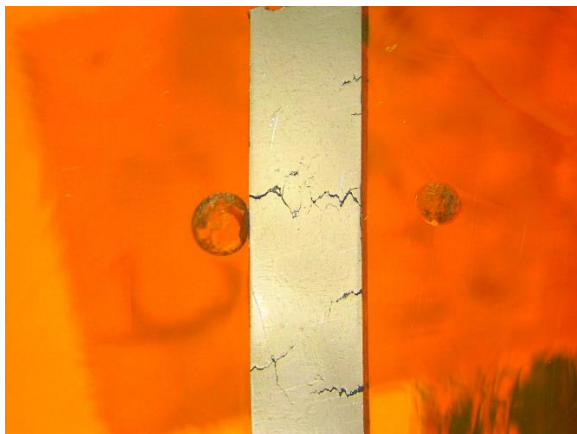
(a)



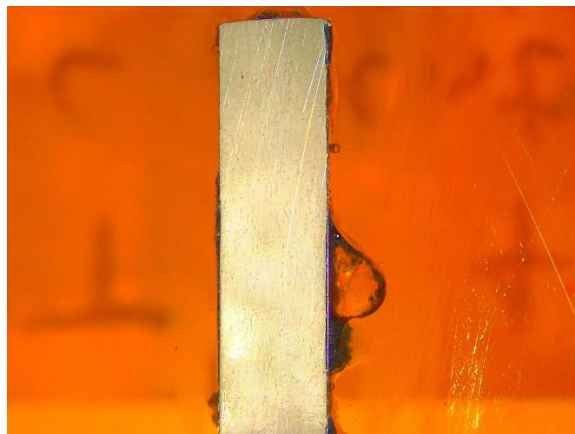
(b)

Figura 4.14 “Tocho 2 paso 4 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”

Laminación en frío vs laminación en caliente.



(a)

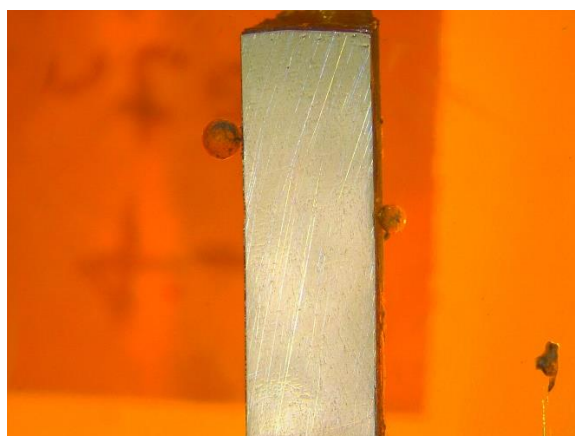


(b)

Figura 4.15 “Tocho 2 paso 5 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”



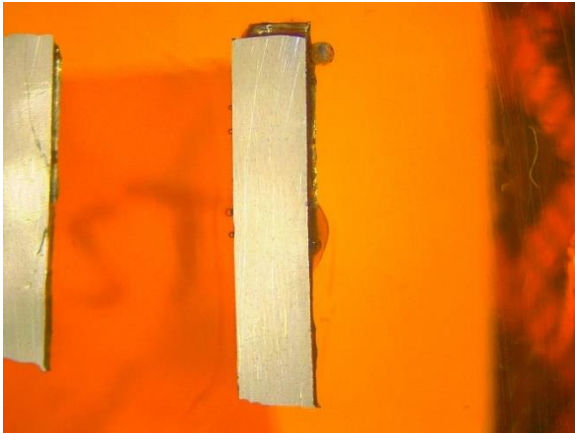
(a)



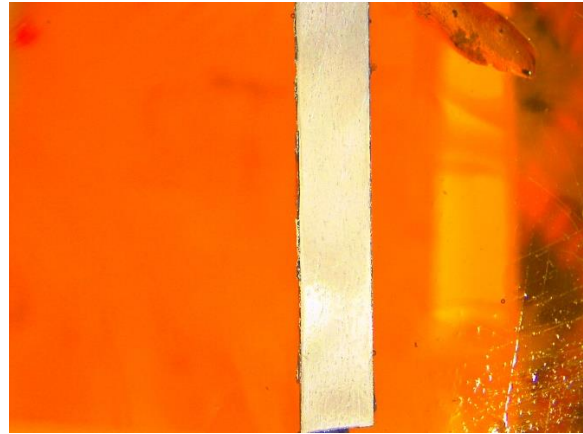
(b)

Figura 4.16 “Tocho 2 paso 6 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”

Laminación en frío vs laminación en caliente.



(a)



(b)

Figura 4.17 “Tocho 2 paso 7 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”



(a)



(b)

Figura 4.18 “Tocho 2 paso 8 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”

Laminación en frío vs laminación en caliente.

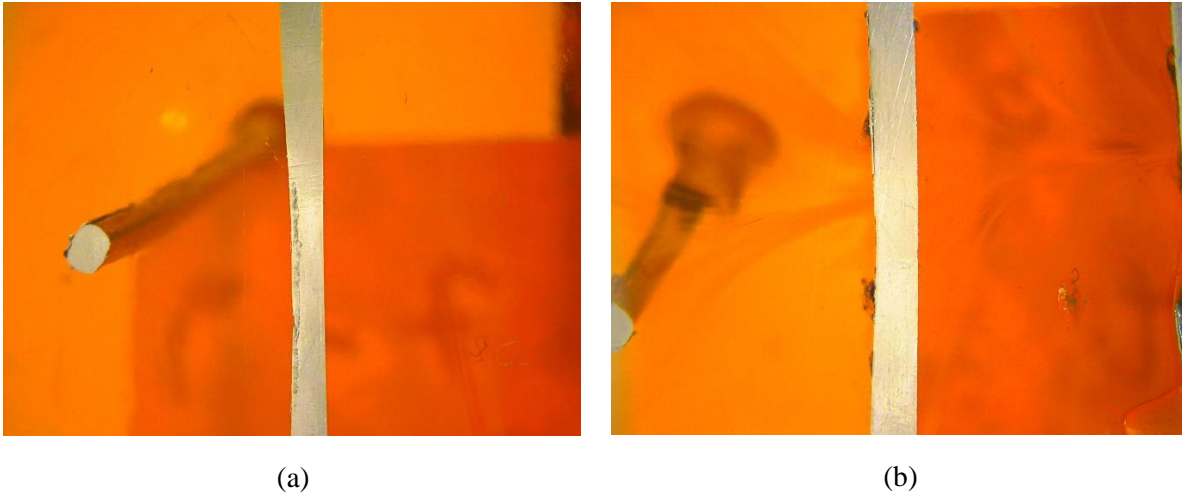


Figura 4.19 “Tocho 2 paso 9 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”

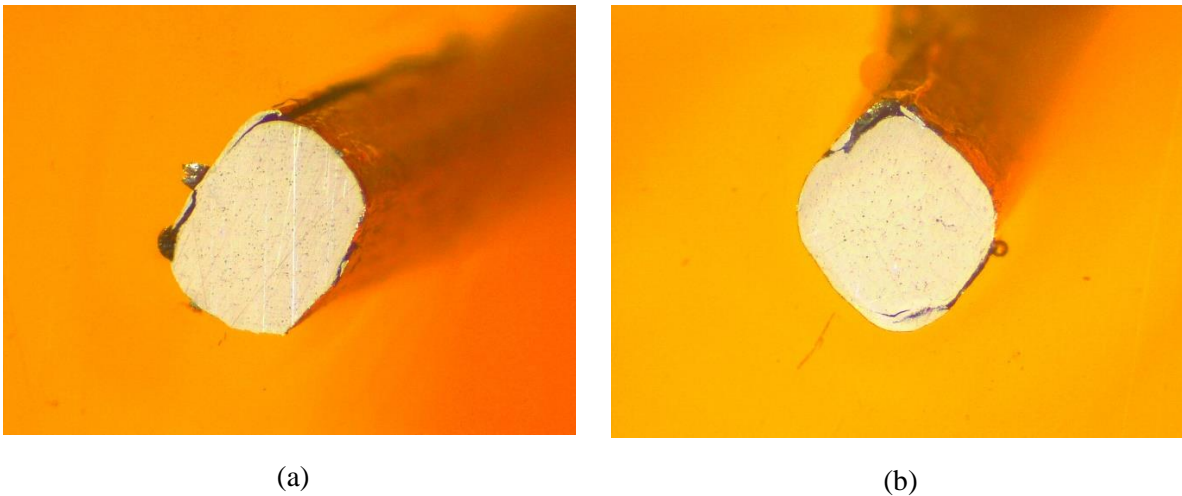


Figura 4.20 “Tocho 2 paso 10 laminación en frío(a) y caliente(b) con aumento de x8”

De igual forma, en caso del material T2, las muestras presentan similitudes en su espesor a lo largo de todo el proceso, pero en algunas etapas se presentan diferencias notorias en la calidad superficial y contenido de discontinuidades, como se puede observar en las muestras laminadas en frío, desde el paso 1(Figura 4.11a) hasta la mayor amplitud de las grietas en el paso 3(Figura 4.13a). Luego, se aprecia una disminución de las grietas en el paso 4, pero aún se encuentran presentes hasta el paso 6(Figura 4.16a). Su contraparte en caliente evidencia nuevamente una mejor calidad superficial y no manifiesta discontinuidades.

Laminación en frío vs laminación en caliente.

Se puede apreciar que las muestras laminadas en frío para ambos materiales presentan un tamaño de grano relativamente grande ya que la estructura es claramente visible sin la necesidad técnicas de observación más avanzadas y se puede apreciar la fractura intergranular que se producen en ambos materiales en los primeros pasos.

A su vez, se puede inferir que la recristalización que está ocurriendo en las muestras deformadas en caliente son fundamentales para iniciar el proceso de conformado de alambre para ambos materiales; esto evita que las grietas generadas en frío sigan creciendo desde el paso uno a los siguientes pasos, generando una discontinuidad del alambre, o un colapso debido a la fragilidad por toda la energía acumulada.

4.3. OBSERVACIÓN METALGRÁFICA DEL ALAMBRE FINAL.

Para los siguientes análisis metalográfico, las muestras fueron preparadas mediante desbaste y pulido fino, y se le aplicó -siguiendo en lo posible las recomendaciones de la norma ASTM E407, un reactivo químico para revelar estructura general en aluminios de la serie 2000, con una composición de 2 mL HF, 3 mL HCl, 5 mL HNO₃ y 190 mL agua durante 10 segundos. La muestra se lavó con agua y se secó utilizando un secador de convección forzada, que transfiere calor desde una resistencia eléctrica al aire para producir una corriente de aire caliente para secar las muestras.

Laminación en frío vs laminación en caliente.

4.3.1. Análisis Microestructural de muestra T1 Al-4Cu laminada en frío y caliente.

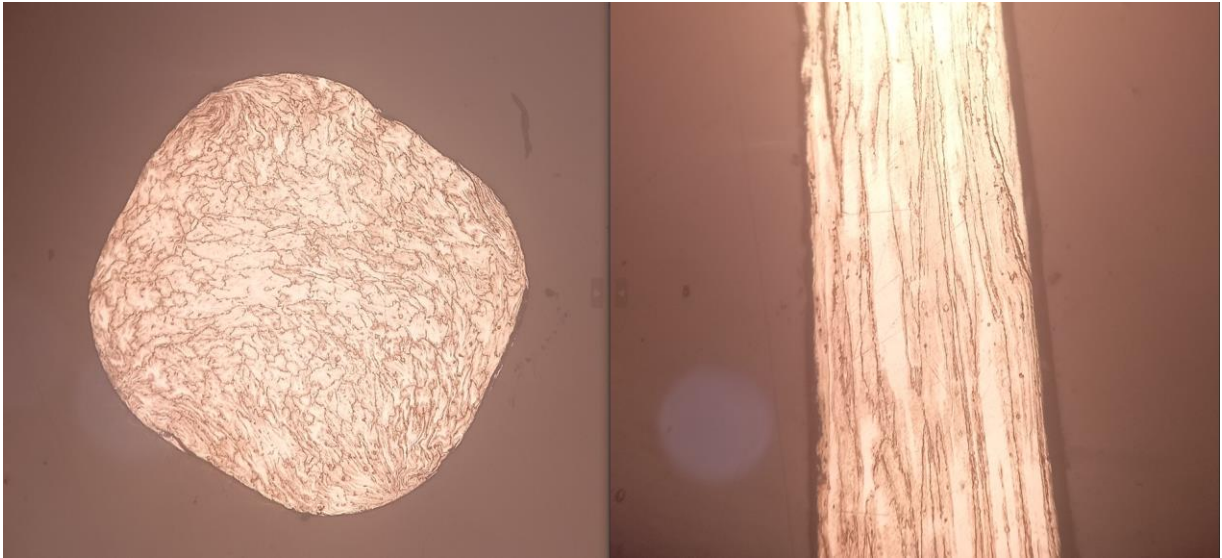


Figura 4.21 "Muestras metalográficas de Tocho T1 laminado en frío en x10"

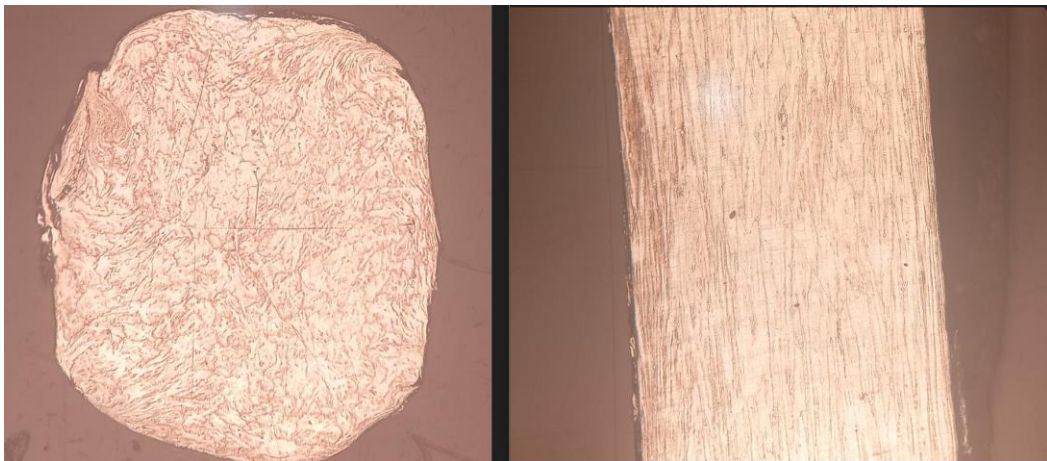


Figura 4.22 "Muestras metalográficas de Tocho T1 laminado en caliente en x10"

En primer lugar, es posible observar que ambas muestras presentan en su estructura longitudinal un grano alargado. Los granos alargados se forman cuando un material se somete a una deformación plástica unidireccional, lo que produce una estructura de grano con un sentido preferencial asociado a la deformación. Lo anterior significa que el material puede tener propiedades mecánicas diferentes en diferentes direcciones.

Laminación en frío vs laminación en caliente.

De igual forma se puede observar que las muestras de T1 Al-4Cu laminado en frío presentan un grano de mayor tamaño que su contraparte en caliente; de ello se puede inferir que en las muestras laminadas en caliente ha ocurrido un fenómeno parcial de recristalización debido a la temperatura superior en los primeros pasos. Un material con que posee estructura de grano no recristalizada (deformación en frío) puede ser más resistente a la deformación plástica, lo que significa que es más resistente a cargas aplicadas por la deformación acumulada, posee una menor plasticidad producto de esfuerzos superiores al esfuerzo de fluencia, por lo que tendería a ser más frágil y propenso a la fractura a menores deformaciones. Por otro lado, una muestra con granos que presenten recristalización tiende a ser más dúctil, pero también tienden a tener una resistencia mecánica más baja, traducido a un esfuerzo máximo en tensión menor en comparación al caso anterior.

4.3.2. Análisis Microestructural de muestra T2 Al-7Cu laminada en frío y caliente.



Figura 4.23 "Tocho 2 laminado en frío"

Laminación en frío vs laminación en caliente.



Figura 4.24 "Tocho 2 laminado en frío"

En las muestras del T2 Al-7Cu se presenta un caso similar al anterior, donde las laminadas en frío presentan a simple vista un grano más grande y ambas presentan en su estructura longitudinal un grano alargado. De esto, se puede inferir nuevamente que pueda existir una anisotropía mecánica (propiedades mecánicas diferentes en diferentes direcciones), y que el material laminado en caliente podría presentar una mayor resistencia y ductilidad en comparación de su contraparte en caliente.

4.4. ENSAYOS DE TRACCIÓN.

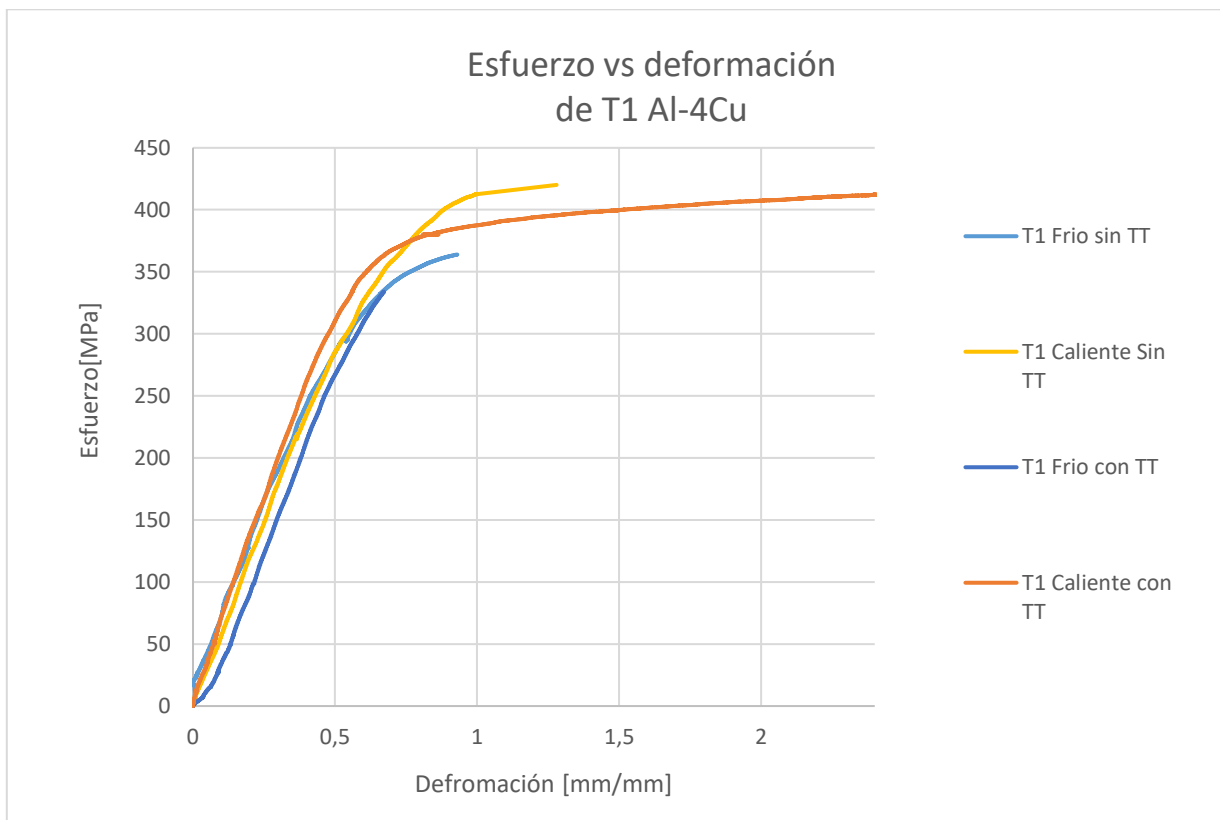
Para comparar los procesos de laminación en frío y caliente, e identificar diferencias en sus propiedades mecánicas, y evaluar la efectividad de un tratamiento térmico posterior, se realizaron ensayos de tracción para cada una de las aleaciones T1 y T2 laminadas en frío y en caliente con y sin tratamiento térmico.

Laminación en frío vs laminación en caliente.

4.4.1. Resultados Ensayos de tracción para T1 Al-4Cu.

A continuación, el gráfico 4.1 presenta el esfuerzo versus deformación para los resultados de los ensayos realizados en las probetas del material T1(Al-Cu) (ver completo en anexo 3), laminadas en frío, caliente y con el tratamiento térmico de 120 °C por 24 horas.

Gráfico 4.1 "Gráfico Esfuerzo vs deformación promedio de ensayos de T1 Al-4Cu" Fuente:
Elaboración propia.



Laminación en frío vs laminación en caliente.

Tabla 4.1 "Resultados ensayo de tracción de T1 Al-6Cu" Fuente: elaboración propia.

Ensayos	Módulo de Elasticidad (GPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación (mm/mm)
T1 - Laminado en frío	61.24 ± 3.99	367.19 ± 49.87	0.93 ± 0.18
T1 - Laminado en Caliente	61.28 ± 1.8	420.06 ± 25.84	1.28 ± 0.37
T1 - Laminado en frío, con tratamiento térmico	61.29 ± 3.23	331.16 ± 27.97	0.70 ± 0.16
T1 - Laminado en caliente, con tratamiento térmico	62.89 ± 4.19	414.78 ± 8.48	2.256 ± 1.15

Analizando los cuatro ensayos se puede decir que, en primer lugar, los cuatro ensayos tuvieron un módulo de elasticidad similar, lo cual sigue la lógica en que este valor es independiente de la microestructura y se asocia al enlace atómico; sin embargo, se puede observar una clara diferencia entre los esfuerzos soportados entre las probetas laminadas en frío versus las caliente, donde las probetas laminadas en caliente soportaron esfuerzos superiores. En segundo lugar, se puede notar una diferencia en la respuesta de las probetas al ensayo donde las probetas laminadas en frío eran más probables que tuviesen menor resistencia debido a discontinuidades o irregularidades en su superficie provocando concentración de esfuerzos y, por consiguiente, una desviación en los resultados mayor y una menor resistencia comparativa con los alambres ensayados en caliente. Como se puede evidenciar en la tabla 4.2, existe desviaciones mayores en la laminación en frío versus su contraparte en caliente.

Por lo anterior, se puede inferir que los materiales laminados en caliente tienen una estructura granular más homogénea, una calidad superficial superior, y presentan una mayor ductilidad en comparación con su contraparte en frío.

En cuanto al tratamiento térmico, con los resultados obtenidos se puede observar que, si bien los resultados de módulo de elasticidad y esfuerzos máximos fueron similares, se muestran menores desviaciones en los resultados de esfuerzos máximos lo que podría significar una mayor homogeneidad microestructural y química del material.

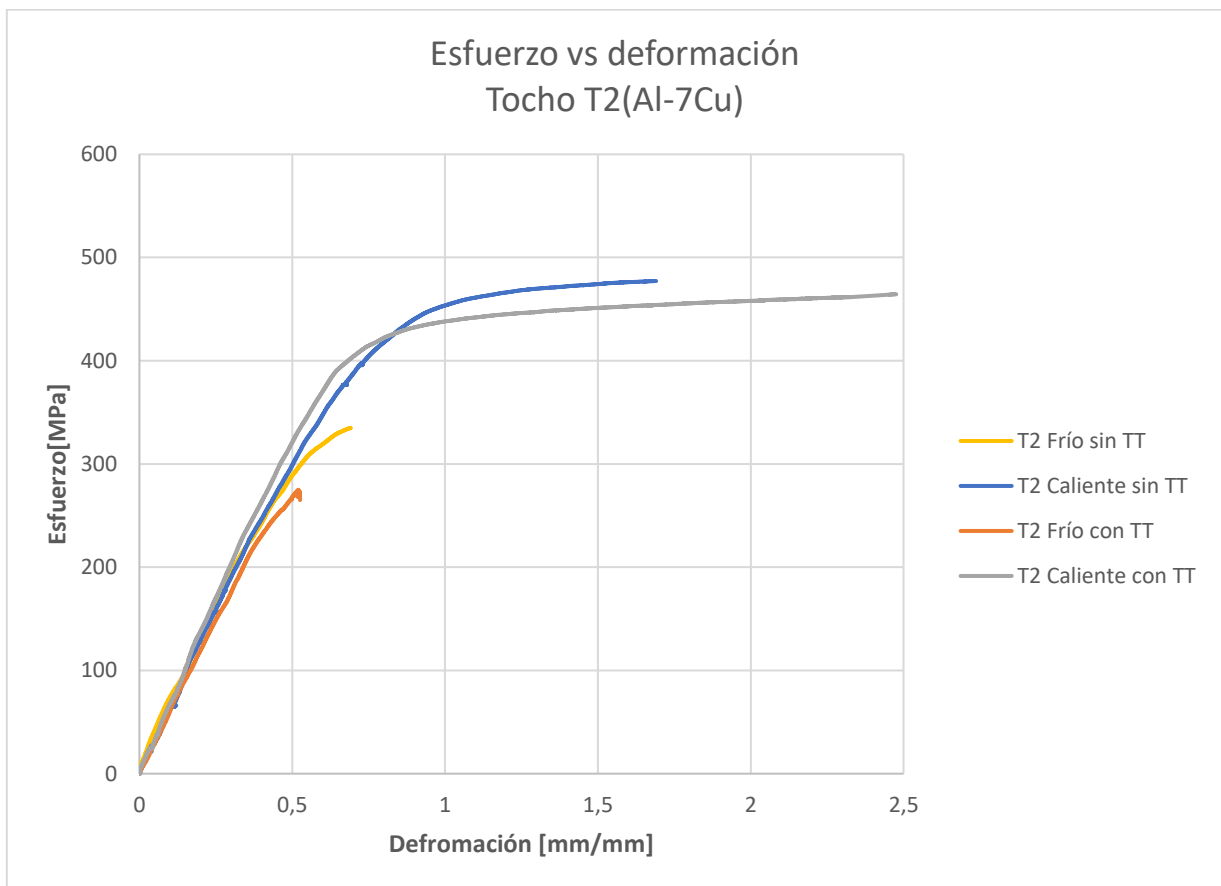
Laminación en frío vs laminación en caliente.

4.4.2. Resultados ensayos de tracción para T2 Al-7Cu.

A continuación, se presenta el gráfico 4.2 el cual muestra el comportamiento de las probetas del material T2 Al-7Cu que fueron sometidas a ensayos de tracción (ver completo en anexo 3), laminadas en frío, caliente y con el tratamiento térmico de 120 °C por 24 horas y una tabla (Tabla 4.3) de los resultados obtenidos de módulo de elasticidad, esfuerzo y deformación (Ver completa en Anexo 4).

Gráfico 4.2 "Gráfico promedio Esfuerzo vs deformación promedio de ensayos de T2 Al-7Cu"

Fuente: Elaboración propia.



Laminación en frío vs laminación en caliente.

Tabla 4.2 "Resultados ensayo de tracción de T2 Al-8Cu" Fuente: Elaboración propia.

Ensayos	Módulo de Elasticidad (GPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación (mm/mm)
T2 - Laminado en frío sin tratamiento térmico	60.86 ± 2.97	326.21 ± 34.3	0.78 ± 0.23
T2 - Laminado en Caliente sin tratamiento térmico	59.59 ± 6.24	477.56 ± 8.36	1.69 ± 0.39
T2 - Laminado en frío, con tratamiento térmico	61.27 ± 6.37	282.05 ± 52.10	0.66 ± 0.31
T2 - Laminado en caliente, con tratamiento térmico	64.31 ± 1.84	460.76 ± 35.21	2.57 ± 1.2

Se puede observar en la tabla que las probetas tratadas térmicamente presentan un aumento menor en su rigidez y más elásticas.

Se repite lo ocurrido en los casos anteriores de laminado en frío, donde la mayoría de las probetas no alcanzaron a soportar mayores esfuerzos para deformarse plásticamente debido a irregularidades en su calidad superficial. A causa de lo anterior ya mencionado se obtuvieron resultados con gran dispersión estadística lo que evidencia nuevamente para este tipo de material que las probetas laminadas en caliente tenían una microestructura y superficie más homogénea en comparación con las laminadas en frío.

Agregando a lo anterior, se puede evidenciar que en promedio las probetas laminadas en caliente soportan más carga antes de fracturarse que las laminadas en frío tanto en este caso de la materia T2 Al-7Cu y como en del material T1 Al-4Cu las probetas laminadas en caliente sin tratamiento térmico fueron las que soportaron la mayor carga antes de la fractura.

Finalmente, respecto al tratamiento térmico se puede mencionar que aportó en un aumento de la tenacidad de los materiales, pero disminuyó el esfuerzo máximo que llegaron a soportar en promedio ya que se eliminó energía acumulada asociada a dislocaciones.

CONCLUSIONES.

Al determinar los parámetros de deformación y tratamientos térmicos para obtener alambres de aluminio secundario óptimos para aplicación de manufactura tipo WAAM, objetivo general propuesto para este trabajo de memoria, es necesario evaluar su nivel de cumplimiento a través de los objetivos específicos. En uno de ellos, identificar los principales defectos en la producción de aluminio a través de roll-forming en su etapa inicial, se describe la formación de grietas en las etapas iniciales, las fracturas del material por operación y la generación de rebaba en las etapas finales del proceso. Estas dificultades estaban relacionadas con parámetros que fueron definidos como, la forma del material inicial, que debía ser un material inicial con una cara frontal cuadrada, el espesor del material donde se estableció que el materia inicial debía tener espesores menores a 4,6mm, la posición en que entra a la máquina definida y el número de pasos por pasada (dos pasos por pasada hasta el paso 8), y un proceso solución para la formación de rebaba en la etapa final que consistía en laminar la rebaba para endurecerla y hacerla más frágil con el fin desprenderla del material.

Teniendo esto en cuenta lo anterior, se logró desarrollar una metodología que permitió mejorar la calidad de los alambres de alambre de aluminio cumpliéndose así el segundo objetivo.

El tercer objetivo de esta memoria, estudiar los materiales y los efectos de temperatura a nivel macro y microestructural, fue logrado gracias a los resultados obtenidos de la elaboración de muestras de cada una de las etapas de fabricación de los alambres, y de los análisis realizados a esas muestras con lupa estereoscópica y metalografía. En ese punto se podía concluir y evidenciar que el laminado en caliente fue efectivo para evitar la formación y propagación de las grietas en las primeras etapas para cada uno de los materiales analizados.

De los ensayos de tracción realizados para cada tipo de alambres, cuarto objetivo de esta memoria, se expresan los efectos de la composición química, el tipo laminado (trabajado en caliente o frío), y los tratamientos térmicos aplicados en el comportamiento mecánico de los alambres fabricados. Aquí se pudo observar que las muestras laminadas en caliente soportaron

Conclusiones

la mayor carga y los tratamientos térmicos fueron efectivos para aumentar la tenacidad del material.

Del alcance de los logros de los objetivos específicos se puede señalar que, por medio de esta experiencia, los procesos de fabricación de los alambres aún pueden ser optimizados debido a que el estudio contempló un parámetro inicial fijo como la velocidad de los rodillos, y no considera variaciones de estudio para la temperatura y el tiempo de remojo de los alambres laminados en caliente. Asimismo, hay que precisar que el estudio fue realizado para las condiciones específicas de la máquina laminadora utilizada.

La importancia de esta investigación, y su aporte al conocimiento, radica en que establece una evidencia del efecto del trabajo de laminación en caliente por sobre el frío, y establece un punto base para el desarrollo de alambres de aluminio secundario dentro de la Universidad de Talca para futuras investigaciones y aplicaciones de estos.

BIBLIOGRAFÍA.

- Anderson, T. L. (2005). *FRACTURE MECHANICS Fundamentals and Applications*. New York: Tylor & Francis.
- ANIR. (2021). *Estudio del Material Disponible País y el reciclado de los productos prioritarios en Chile*. Santiago de Chile: Kyklos.
- Arpal. (2013). *Reciclado de aluminio Formación de formadores*. España: Arpal.
- ASTM International. (n.d.). *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. Estados Unidos.
- Belov, N. A., Aksenov, A. A., & Eskin, D. G. (2002). *Iron in Aluminum Alloys - impurity and alloying element*. Londres: Tylor & Francis.
- Belov, N. A., Korotkova, N. O., Akopyan, T. K., & Pesin, A. M. (2018). Phase composition and mechanical properties of Al-1.5% Cu-1.5% Mn- 0.35% Zr(Fe,Si) wire alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 735-746.
- Callister, W. D. (2007). *Materials Science and Engineering*. Wiley.
- Campbell, F. (2008). *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. ASM International.
- Castro, G. (2008). *Fundamentos de conformado plástico*. Departamento de ingeniería mecánica F.I.U.B.A.
- Davis, J. (1993). *Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM International.
- Davis, J. (2001). *Alloying: Understanding the Basics*. ASM International.
- Degarmo, E. P., Black, J. T., & KOHSER, R. A. (2003). *MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACIÓN*. Barcelona: Wiley.
- Departamento de Ingeniería Metalúrgica – Universidad de Santiago de Chile. (n.d.). *CAPÍTULO 18: SÓLIDOS CRISTALINOS*. Santiago: USACH.
- Dieter, G. E. (1961). *Metallurgy and Metallurgical engineering series*. Philadelphia: McGraw-hill.
- Gasque, L. (2003). *Educación Química - Aluminio*. Mexico.
- Kutz, M. (2002). *Handbook of Materials Selection*. New York.
- Montalba. (n.d.). *Rangos de temperatura homóloga para diferentes procesos*.

Bibliografía

- Qingru , Z., Zhao, Q., Xiaoli, C., Yuying, W., & Xiangfa, L. (2016). Influences of Fe, Si and homogenization on electrical conductivity and mechanical properties of dilute Al - Mg - Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 50-57.
- ROSAS, G. (2013). *ESTADOS INESTABLES DE LOS MATERIALES B GaNP/GaP Y B GaNAs/GaAs*. Ciudad de México: UNIDAD CULHUACAN.
- Semiatin, S. (2005). *Volume 14A Metalworking: Bulk Forming*. Ohio: ASM International.
- U.S. Department of Energy. (1993). *DOE FUNDAMENTALS HANDBOOK MATERIAL SCIENCE Volume 1 of 2*. Washington, D.C.

5. ANEXOS

5.1. ANEXO 1: TABLA DE COMPOSICION COMPLETA TOCHO 1 Y 2

Tabla 5.1 "composición química T1 y T2"

Co[%]	Ga[%]	In [%]	Li [%]	Na [%]	P [%]	Pb [%]	Sb [%]	Sn [%]	Sr [%]	V [%]	Zr [%]	Hg[%]	Al [%]	Observaciones
<0.0005	0,016	<0.0003	<0.0001	0,0029	>0.0084	0,0009	<0.0020	<0.0010	<0.0001	0,013	<0.0003	<0.0020	99	Muestra Fundición
<0.0005	0,016	<0.0003	<0.0001	0,0005	>0.0084	0,0021	<0.0020	0,002	<0.0001	0,01	<0.0003	<0.0020	92,9	Muestra Tocho 001
<0.0005	0,016	<0.0003	<0.0001	0,0009	>0.0084	0,0017	<0.0020	0,0014	<0.0001	0,0093	<0.0003	<0.0020	92,9	Muestra Tocho 001 repetición
<0.0005	0,015	<0.0003	<0.0001	0,0025	>0.0084	0,0017	<0.0020	0,0034	<0.0001	0,0095	<0.0003	<0.0020	91,2	Muestra Tocho 002

Otros Elementos [%]	Otros +Al [%]	Cu+otros [%]	Observaciones
1,0007	100,0007	-0,0007	Muestra Colada
0,9717	93,8717	6,1283	Muestra Tocho 001
1,0066	93,9066	6,0934	Muestra Tocho 001 repetición
0,9517	92,1517	7,8483	Muestra Tocho 002

5.2. ANEXO 2: PRUEBAS DE DESARROLLO DE ALMABRE.

Para contar con una base experimental en el desarrollo de alambres, familiarizarse con el proceso y establecer cuáles son las principales dificultades, defectos y variables implicadas se realizaron una serie de pruebas que serán abordadas en esta sección.

Pruebas 1: desarrollo experimental inicial o punto de partida.

El objetivo de estas pruebas es observar el comportamiento del material y establecer parámetros de inicio; se llevaron a cabo cuatro pruebas con los siguientes materiales y dimensiones:

*Tabla 5.2 "Dimensiones y tipo de trabajo del material inicial de la prueba 1" fuente:
Elaboración propia.*

	Material	Tipo de Laminación	Dimensiones del material [mm]
Ensayo 1-1	Tocho 2	Frío	5,75x5,75
Ensayo 1-2	Tocho 2	Frío	5,75x4,2
Ensayo 1-3	Tocho 2	Frío	5,75x3,2
Ensayo 1-4	Tocho 1	Frío	3,5x3,7

Las pruebas fueron realizadas a 30hz en el variador de frecuencia que controla la velocidad de la maquina y consistió en intentar producir un alambre continuo,

En el ensayo 1-1 material se agrietó y fracturó en múltiples puntos, quedando fragmentos pequeños y con fracturas en intervalos de 10mm aproximadamente, dificultando el agarre de estas para ser procesadas en el proceso inicial de roll forming para seguir con la prueba.



Figura 5.1 "fracturas paso 1 prueba 1-1" Fuente: Elaboración propia.

En el ensayo 1-2 se intentó replicar el procedimiento del ensayo 1-1 pero el material se agrietó considerablemente en el paso 1 como se puede observar en la figura 5.2, continuamente en el paso 2 y 3 se presentó el mismo caso.

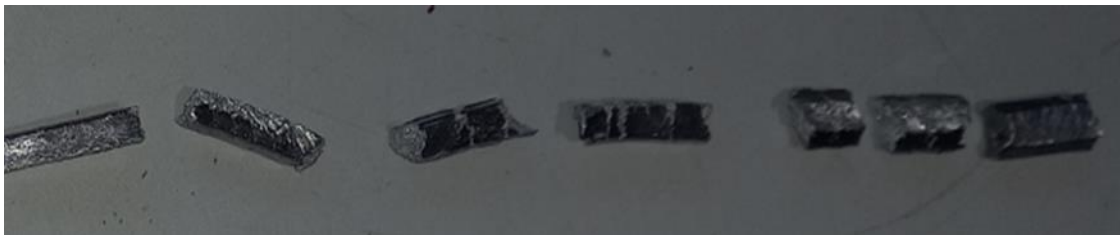


Figura 5.2 "Fracturas prueba 2" Fuente: Elaboración propia.

En el ensayo 1-3, el material no se deformó plásticamente en el paso 1 debido a que sus dimensiones son menores a la reducción de este paso, se prosiguió a dar cuatro pasadas por el paso 2 y 3, donde, en la segunda pasada del paso 4 ocurre una fractura en el material debido a que en la pasada anterior el material había tomado una forma curva que entró en contacto con la base de la máquina, se continuó trabajando con el material dando cuatro pasadas por paso hasta llegar al paso 9 donde en la sexta pasada se pasa a la sección de laminación de la máquina de roll-forming.



Figura 5.3 "Fractura prueba 3" Fuente: Elaboración propia.

En el ensayo 1-4 no se deforma en el paso 1, se dan cuatro pasadas por el paso 2 y 3, en la segunda pasada del paso 4 se fractura al quedar curvo y entrar cóncavo hacia abajo y presionarse con la base de la máquina de roll-forming, se continúa trabajando con el material dando 4 pasadas por cada paso hasta llegar al paso 9 donde en la sexta pasada se pasa a la laminadora.



Figura 5.4 "Fractura ensayo 1-4" Fuente: Elaboración propia.

De las pruebas se obtuvieron los siguientes resultados:

- Los alambres se fracturaron con mayor facilidad en los primeros pasos y en los materiales con mayores dimensiones.
- Los alambres que se saltaron los primeros pasos mostraron menos agrietamientos y fisuras
- Hay que tener especial cuidado cuando el alambre se dobla para que no se quiebre al entrar en una mala posición en el roll-forming, específicamente cóncavo hacia abajo como se muestra en la figura 5.5

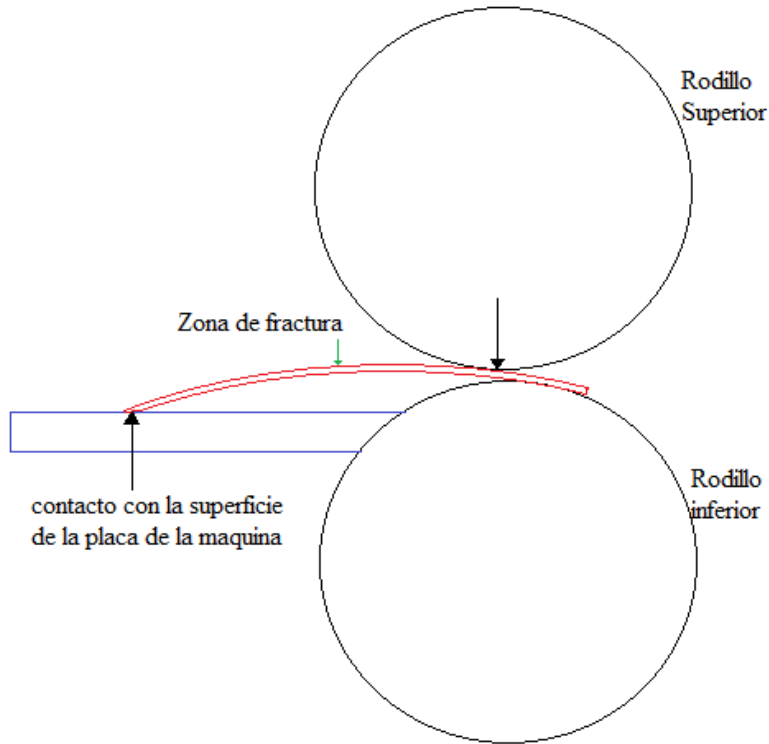


Figura 5.5 "Entrada cóncava hacia abajo que provoca fractura al contacto con la placa de la maquina" Fuente: Elaboración propia.

Pruebas 2: Principales defectos en la producción de alambres.

En esta prueba en continuación de la prueba 1 tiene como objetivo seguir con la producción de alambres continuos, establecer más dificultades y soluciones en la producción de los alambres con el fin de optimizar el proceso.

Tabla 5.3 "Dimensiones y tipo de trabajo del material inicial prueba 2"

	Material	Tipo de Laminación	Dimensiones [mm]
Ensayo 2-1	Tocho 2	Frio	5,75x2,65
Ensayo 2-2	Tocho 2	Frio	5,385x4

Anexos

Ensayo 2-3	Tocho 2	Frio	4,43x6,06
------------	---------	------	-----------

Del ensayo 2-1 se puede observar que los materiales con forma rectangular sufren una torsión al pasar por la máquina lo que provoca fracturas en el centro de la materia y que el material se abra en los pasos posteriores.

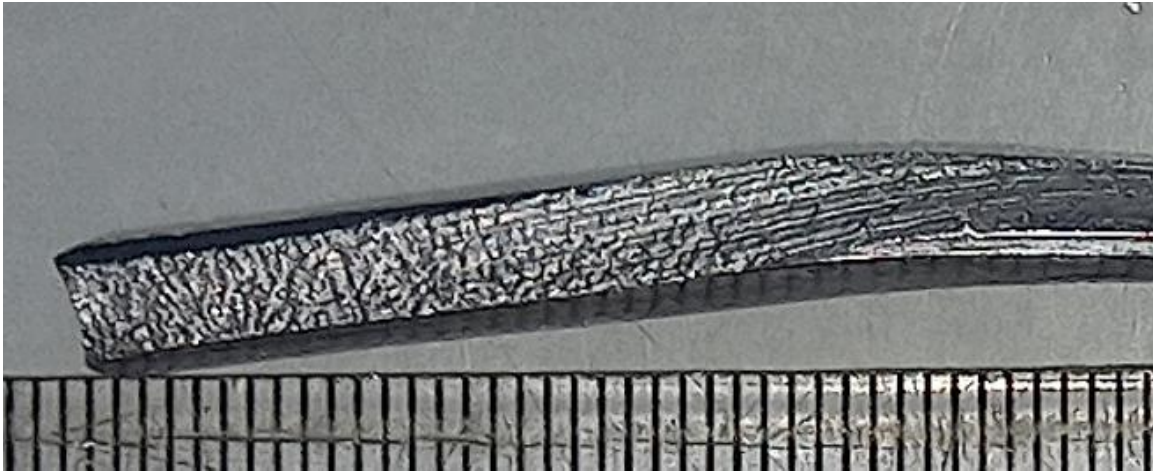


Figura 5.6 “Ensayo 2-1, paso 1” Fuente: Elaboración propia



Figura 5.7 “Ensayo 2-1, paso 3, primera pasada” Fuente: Elaboración propia

Si bien existe la aparición de grietas en el material en los primeros pasos estas se reducen a medida que se avanza en el proceso y se comprime el material, donde el principal problema que presenta la formación de grietas corresponde a que el material sea más propenso a fracturarse y se obtenga un alambre final más corto.

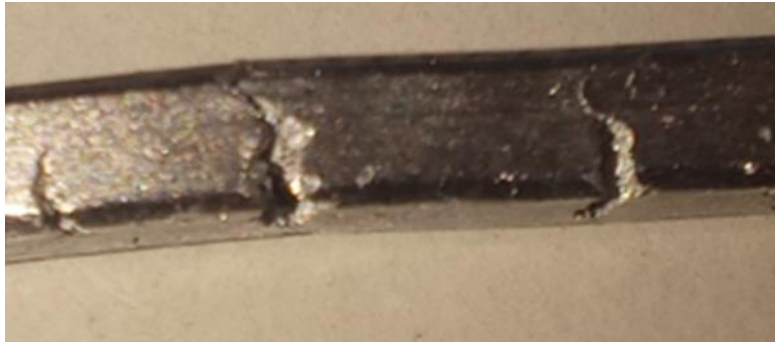


Figura 5.8 “Ensayo 2-1, paso 5” Fuente: Elaboración propia



Figura 5.9 “Ensayo 2-1, paso 6” Fuente: Elaboración propia

A partir del paso 8 empieza a formarse rebaba en la primera pasada, que se reduce de forma satisfactoria al dar dos pasadas por el mismo paso, en la etapa 9 no ocurre lo mismo afectando la calidad superficial del material.



Figura 5.10 “Ensayo 2-1, paso 8, primera pasada” Fuente: Elaboración propia



Figura 5.11 “Ensayo 2-1, paso 8, quinta pasada” Fuente: Elaboración propia

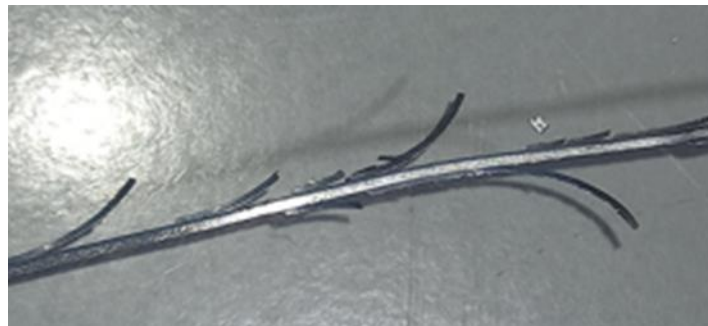


Figura 5.12 “Ensayo 2-1, paso 9, primera pasada” Fuente: Elaboración propia



Figura 5.13 “Ensayo 2-1, paso 9, pasada 25” Fuente: Elaboración propia

Debido a el exceso de rebaba en el paso 9, en el ensayo 2, se buscó una solución al problema por lo que se busca intentar reducir el espesor del alambre en el paso 8 pasándolo más veces

para reducir la formación de rebaba en el paso 9, por lo que, el alambre es pasado por el paso 8 repetidamente y medido por cada pasada y se obtuvieron los siguientes resultados:

*Tabla 5.4 “Medidas de espesor resultantes al volver al repasar el paso 8” Fuente:
Elaboración propia.*

Pasadas extra	Medida aproximada
2	1,28 mm
4	1,29 mm
6	1,27 mm
8	1,29 mm
10	1,28 mm
12	1,28 mm
14	1,29 mm

De los resultados obtenidos de la medición del espesor del alambre se puede deducir que no existe reducción significativa al volver a pasar el alambre en cada etapa y que basta con tan solo 2 pasadas para obtener la medida de reducción máxima del paso.

Finalmente, en el ensayo número 3 el material tenía medidas que fueron demasiado grandes, teniendo en cuenta que el material de inicio cuenta con una dimensión de su lado mayor de 6.06mm y el paso 1, el mayor, cuenta con una reducción a 4,0 mm por especificaciones del fabricante la máquina que no fue capaz de captarlo.

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.

En las pruebas realizadas anteriormente se observó que la mayoría de las grietas que ocasionaban fracturas en el material se producían en el paso 1, donde los materiales iniciales con mayores dimensiones eran los más afectados debido a que deben soportar un porcentaje de reducción mayor, por lo tanto, en estas pruebas se propuso utilizar materiales iniciales con

Anexos

menores dimensiones e intentar aplicar un tratamiento térmico a un material de mayor dimensión para observar su comportamiento.

Las pruebas realizadas fueron las siguientes:

Tabla 5.5 “Material de inicio Prueba 3” Fuente: Elaboración propia.

	Material	Tipo de Laminación	Dimensiones [mm]
Ensayo 3-1	Tocho 2	Frío	3,9x2,9
Ensayo 3-2	Tocho 2	Frío	2,95x2,25
Ensayo 3-3	Tocho 2	Frío	2,1x2,1
Ensayo 3-4	Tocho 2	Caliente	Aprox. 6x5
Ensayo 3-5	Tocho 1	Caliente	Aprox. 4x3

En la ensayo 3-1 los pasos 1 y 2 no reducían el material por lo que se comenzó en el paso 3 en donde se realizaron 5 pasadas , en el paso 4 se realizaron 5 pasadas y se observó la aparición de grietas en el material el cual también presento una curvatura, en los siguientes pasos 5, 6, 7, 8 se realizaron 8 pasadas, donde se pudo obtener un alambre con pequeñas grietas visibles pero sin fracturas, hubo una pequeña formación de rebaba en la etapa 8 pero se pudo corregir el acabado superficial, en el paso 9 en la primera pasada se observó la formación excesiva de rebaba.

Para el ensayo 3-2 se ajustó la distancia entre rodillos de la máquina para que no quedara espacio entre estos(<1mm), al tener un espesor menor que la reducción del paso 1, 2, 3 y 4, el material sufrió la a primeras reducciones al pasar por el paso 5, donde se fracturo al entrar cóncavo hacia abajo y chocar con la base de la máquina, se realizaron 5 pasadas, en el paso número 6 se empezaron a observar pequeñas grietas, los siguientes pasos fueron realizados y documentados en la tabla 3.5, con esta nuevo ajuste de la maquina se obtuvo un alambre con un diámetro de 0,9 y con una reducción de rebabas.

Tabla 5.6 “Número de pasadas prueba 3-2” Fuente: Elaboración propia.

Paso	Numero de pasadas
7	9
8	15
9	25

En el ensayo 3-3 se busca replicar la prueba anterior, donde en el paso número 9 se realizaron 30 pasadas para tratar de obtener un alambre de sección transversal circular con diámetro de 0,9.

Tabla 5.7 “Número de pasadas prueba 3-3” Fuente: Elaboración propia

paso	Numero de pasadas
5	5
6	6
7	8
8	8
9	30

Realizar un tratamiento térmico en el material inicial podría mejorar su calidad superficial y disminuir la cantidad de grietas que aparecían a medida que se reducía el material, esto se había hecho con anterioridad con materiales iniciales de aproximadamente 4-5mm de espesor, donde se obtuvo como resultado los alambres de la figura 5.14, los cuales presentaron una reducción considerable de la cantidad y tamaño de grietas a lo largo de su desarrollo, por lo que, se preparó para el ensayo 3-4 se preparó un material inicial del tocho 2 de aproximadamente 5,75 - 6 mm el cual al ser introducido con el ajuste de la distancia de rodillos que se tenía anteriormente (<1mm), no fue capaz de entrar en la máquina, posteriormente, se aumentó la distancia entre rodillos a una distancia que el material pudiera ser recibido por la máquina, pero este se fracturó completamente como se muestra en la figura 5.15.

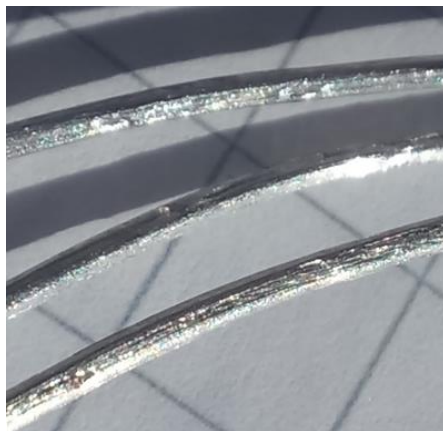


Figura 5.14 “alambre laminación en caliente 2/09/2022” Fuente: Elaboración propia



Figura 5.15 “Agrietamiento y fracturas del material prueba 3-4” Fuente: Elaboración propia

Debido a los resultados del ensayo 3-4 se optó por usar un material de menor espesor en la prueba 3-5 que se encontraba disponible, de entre 3 - 4mm de espesor aproximadamente del tocho T1 donde se pudo obtener un alambre continuo con el siguiente proceso:

Tabla 5.8 “Numero de pasadas por paso prueba 3-4” Fuente: Elaboración propia.

Paso	Numero de pasadas
4	8
5	8
6	8
7	8
8	8
9	25

Pruebas 4: dimensiones de reducción real, número de pasadas por paso e influencia de la rebaba en el paso 9 laminación en frío tocho 2.

Tabla 5.9 “Material de inicio prueba 4” Fuente: Elaboración propia

	Material	Laminación	Dimensiones [mm]
Ensayo 4-1	Tocho 2	Frío	38x35
Ensayo 4-2	Tocho 2	Frío	38x42
Ensayo 4-3	Tocho 2	Frío	44x42

Para determinar las dimensiones de reducción real de la maquina en el ensayo 4-1 se procedió a desarrollar el alambre midiendo en cada pasada por cada paso de la máquina de roll-forming.

Se establece que es necesario realizar dos pasadas iniciales por paso debido a que se da una por cada par de cara del material.

Los resultados de la Ensayo 4-1 fueron se muestran en la tabla 3.9.

Tabla 5.10 “Resultados Prueba 4-1” Fuente: Elaboración propia.

Paso	Dimensiones con 2 pasadas [mm]	Dimensiones con 4 pasadas [mm]
1	Sin deformación	Sin deformación
2	Sin deformación	Sin deformación
3	3,2	3,2
4	2,9	2,9
5	2,5	2,5
6	2,1	2,1
7	1,7	1,7
8	1,3	1,3
9	0,9	0,9

Se pudo determinar con los ensayos que al dar más de dos pasadas en el material por paso es suficiente para alcanzar la máxima reducción del material. En el Ensayo 4-1 se pudo observar de igual forma que las pasadas extras después de dar dos pasadas solo afectaban negativamente al material, generando curvaturas y grietas en el material.

Anexos

En el ensayo 2 y 3 se volvió a medir para corroborar las dimensiones de reducción, donde los resultados se muestran en la tabla 5.11.

Tabla 5.11 “Dimensiones de espesor de alambre pruebas 2 y 3” Fuente: Elaboración propia.

Paso	Prueba 2 – Dimensiones [mm]	Prueba 3 – Dimensiones [mm]
1	Sin deformación	4,2
2	3,8	3,8
3	3,3	3,3
4	2,95	2,9
5	2,5	2,5
6	2,1	2
7	1,8	1,7
8	1,4	1,4
9	0,9	0,9

En el ensayo 4-1 el material en la primera pasada del paso 9 queda con rebaba (figura 5.16) y luego de diez pasadas por el paso número 9 el alambre resultante queda quebradizo, agrietado y casi inutilizable como se muestra en la figura 5.17. Se observa que el alambre tras la primera pasada del paso 9 si bien contenía rebaba el alambre en si se observaba a simple vista una buena calidad superficial al no contener discontinuidades visibles, por lo que en las siguientes pruebas se va a estudiar el efecto de la rebaba de la primera pasada del paso 9 en los siguientes pasos y en la calidad del alambre final.



Figura 5.16 “Prueba 4-1, paso 9, primera pasada” Fuente: Elaboración propia



Figura 5.17 “prueba 4-1, paso 9, decima pasada” Fuente: Elaboración propia

En el ensayo 4-2 se realizó el proceso completo del alambre dando dos pasadas por paso hasta llegar al paso 9 donde solo se pasa una vez, igual que sus predecesores con una formación de rebaba que se puede observar en la figura 5.18.



Figura 5.18 “prueba 4-2, paso 9, primera pasada” Fuente: Elaboración propia




Para en el ensayo 3 de la prueba 4 se realiza el proceso completo del alambre dando dos pasadas por paso hasta llegar al paso 9. donde igual que antes, se realiza una sola pasada obteniéndose el alambre de la figura 5.19. El alambre obtenido se divide en dos, uno que se limpia casi por completo de rebaba de forma manual (4-3.1T2LF (Prueba 4 – ensayo 3.1, T2 laminado en frío)) y otro que se limpia parcialmente de forma manual y se vuelve a pasar diez veces obteniéndose el alambre 4-3.2T2LF (Prueba 4 – ensayo 3.2, T2 laminado en frío)

Si bien el alambre 4-3.1T2LF cuenta con a simple vista una calidad superficial, libre de fracturas e incrustaciones, mejor que el alambre 4-3.1T2LF este es un alambre cuadrado de 0,9mm de espesor, pero en sus diagonales tiene 1.3mm en comparación con el alambre 4-3.2T2LF que presenta una forma más circular en su sección transversal.



Figura 5.19 “prueba 4-3, paso 9, primera pasada” Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.12 “Comparativa de Alambres paso 9 tocho 2, laminación en frío” Fuente: Elaboración propia.

4-3T2LF		A simple vista el material presenta irregularidades en su calidad superficial y presenta fracturas en algunos puntos
4-3.1T2LF		Se observa con una calidad superficial libre de grietas y fracturas.
4-3.2T2LF		Se observan defectos en los lugares donde quedaban rebabas, en general se observa libre de fracturas

Pruebas 5: Influencia de la rebaba en el paso 9, laminación en caliente tocho 2.

En la prueba 5 se realizó un proceso similar que en la prueba 4, esta vez, el material fue inicialmente calentado a 500°C por 2 horas para ser deformado en caliente en las primeras etapas del proceso.

Tabla 5.13 “Material de inicio prueba 5” Fuente: Elaboración propia.

	Material	Laminación	Dimensiones [mm]
Ensayo 5-1	Tocho 2	Caliente	3,8x4,4
Ensayo 5-2	Tocho 2	Caliente	3,6x4,4
Ensayo 5-3	Tocho 2	Caliente	4,7x3,5

Se observó una disminución casi total de las grietas en los primeros pasos. Se prosiguió con el procedimiento de dos pasadas por paso hasta llegar al paso 9 en las tres pruebas. El alambre resultante en la primera pasada del paso 9 contenía formación de rebaba como se ve en la figura 5.20 en las tres pruebas.



Figura 5.20 “Ensayo 5-3, alambre paso 9 primera pasada” Fuente: Elaboración propia

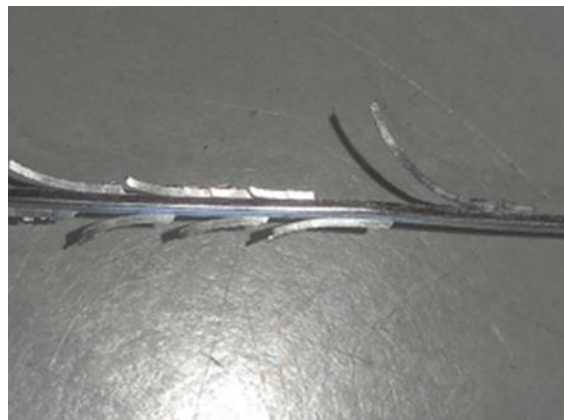





Figura 5.21 “Ensayo 5-1, Alambre paso 9 primera pasada” Fuente: Elaboración propia

En el ensayo 1 de esta prueba al alambre se le extrajeron las rebabas de mayor tamaño de forma manual, las cuales fueron dobladas hasta que se desprendieron, y se procedió a dar 10 pasadas extra obteniendo el alambre definido como 5-1 T2LC(Prueba 5 -ensayo 1, T2

Anexos

laminado en caliente); en la prueba dos el alambre se limpió de rebabas y no se siguió pasando (alambre 5-2T2LC(Prueba 5 – ensayo 2, T2 laminado en caliente)) y finalmente en la tercera prueba el alambre se limpió casi en su totalidad para obtener el alambre 5-3T2LC(prueba 5 - ensayo 3, T2 laminado en caliente.).

*Tabla 5.14 “Comparativa de Alambres paso 9 tocho 2, laminación en caliente” Fuente:
Elaboración propia.*

5-1T2LC		Alambre quebradizo
5-2T2LC		Buena calidad superficial, alambre cuadrado
5-3T2LC		En general su superficie se observa libre de fracturas, pero se observa una calidad inferior a su antecesor

Pruebas 6: Espesor inicial del material inicial en el paso 1.

Con las pruebas realizadas anteriormente donde se utilizaron material del orden de 5,75mm (Prueba 1 y 2) y 6mm (Prueba 2 y 3), se pudo observar que un parámetro en la formación de grietas en el desarrollo de los alambres estaba en el paso inicial. El material inicial de mayor

Anexos

tamaño se agrietaba más, esto debido a que el porcentaje de reducción al que estaba sometido el material es mayor para materiales de inicio superiores a 4,6mm

Por lo que en esta prueba numero 6 el objetivo es obtener un valor óptimo de espesor del material inicial para obtener alambres con la máxima continuidad posible, ya que, al tener un mayor espesor de material inicial se pueden obtener alambres más largos.

En primer lugar, se consideró importante establecer las medidas reales de los pasos en el ajuste de la máquina, debido a que se realiza de forma manual y puede variar a lo mostrado por el fabricante; Con las pruebas realizadas anteriormente se conoce la reducción real de cada uno de los pasos al medir el espesor del material inmediatamente después de superar cada paso, los resultados se muestran a continuación en la tabla 5.15.

*Tabla 5.15 “Medidas del material inmediatamente después de cada paso” Fuente:
Elaboración propia.*

Paso	Medida real [mm]
1	4,2
2	3,8
3	3,3
4	2,9
5	2,5
6	2,1
7	1,7
8	1,3
9	0,9

La tabla 5.15 muestra que el proceso tiene una reducción aproximada de 0.4mm en cada paso.

Finalmente se llevaron a cabo ensayos con materiales de sección cuadrada de 5.0, 4.8 y 4.6 milímetros. de espesor para establecer su comportamiento en el paso 1 laminado en frío y

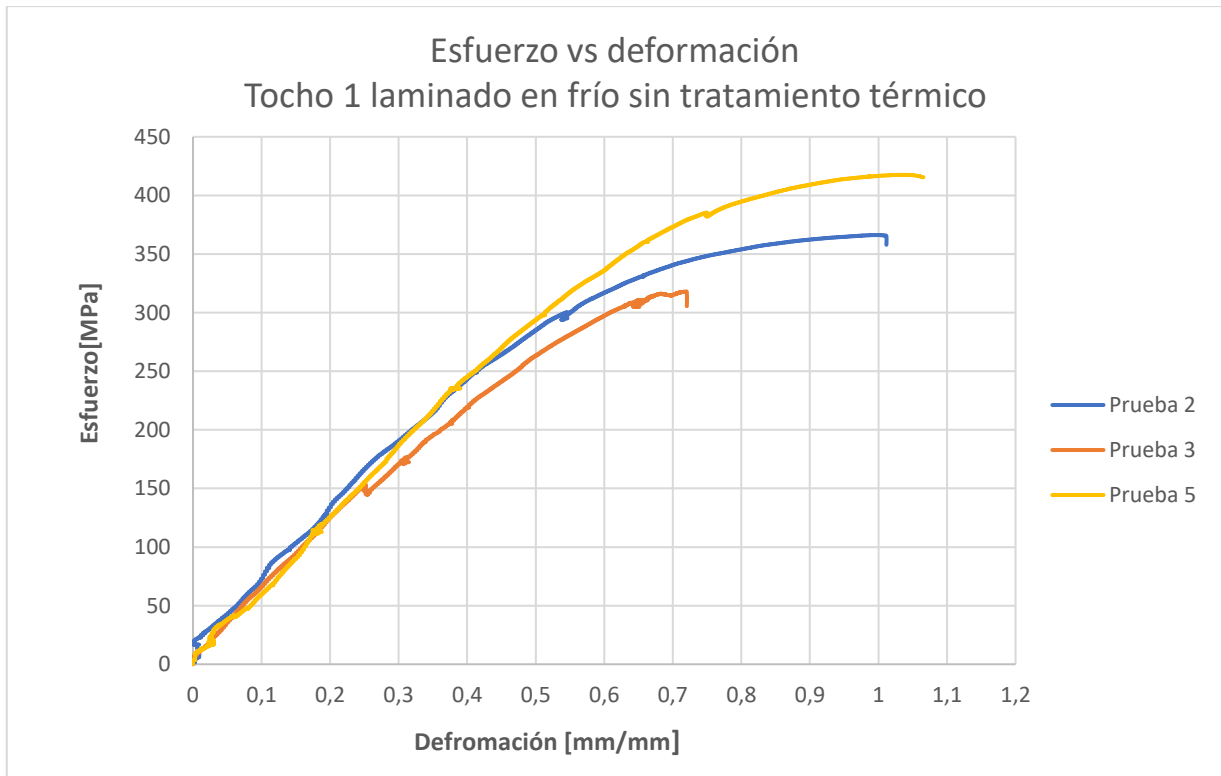
Anexos

caliente, parametrizada la maquina 30hz, Los materiales de 5mm se agrietaron por completo en el primer paso y se fracturaron sin posibilidad de continuar en el tercer paso. Los materiales de inicio de 4.8mm, tanto en caliente como en frío, presentaron problemas similares. Por otro lado, los materiales de 4.6mm se deformaron sin problemas importantes en caliente en el paso uno, aunque en frío presentaron agrietamiento, pero aun así se pudo continuar hasta el paso 9 casi sin problemas. Basándose en estos resultados, se establece que 4.6mm es la medida máxima para el material de inicio por lo que el material de inicio tiene que ser menor o igual a 4.6 debido que esta fue la medida mínima con la que se pudo llevar a cabo el proceso completo.

5.3. ANEXO 3: GRAFICOS Y TABLAS DE RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCION.

Resultados del tocho 1 laminado en frío sin tratamiento térmico:

Gráfico 5.1 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T1 laminado en frío sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.



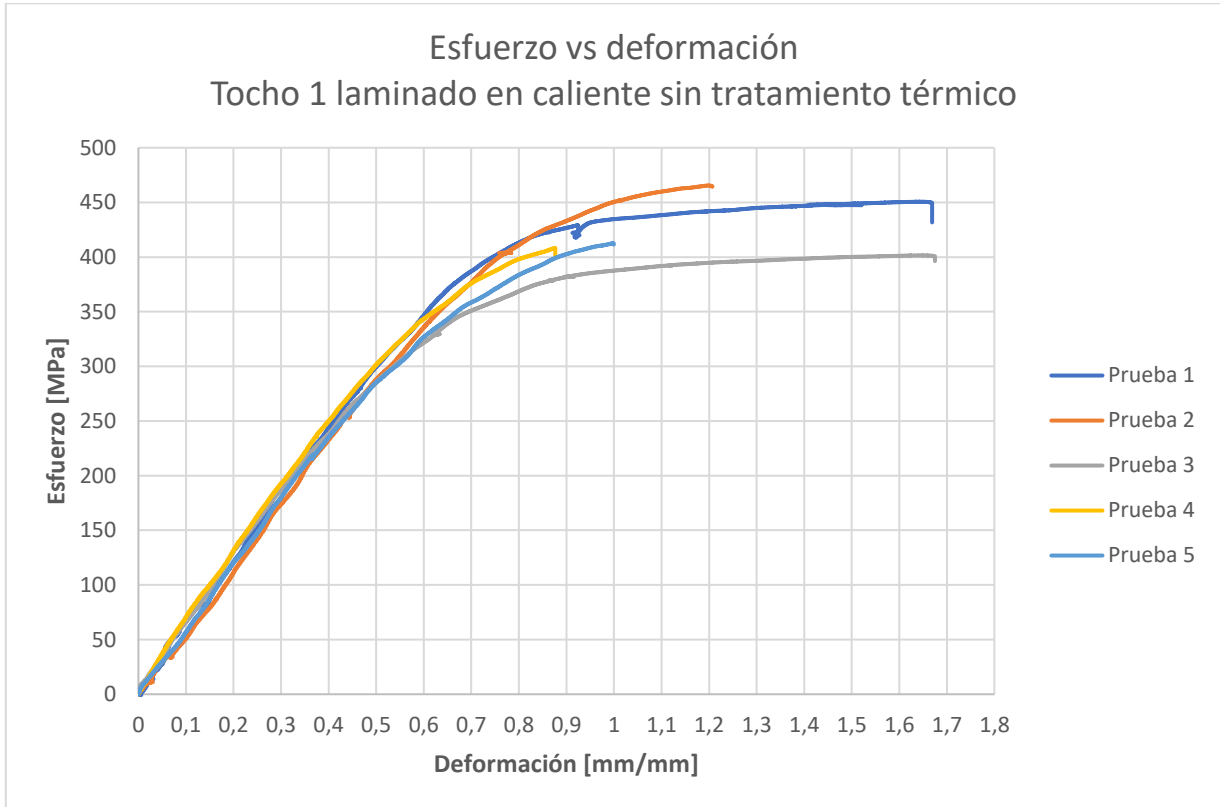
Anexos

Tabla 5.16 "Tabla de resultados T1 Laminado en frío sin tratamiento térmico" Fuente:
Elaboración propia.

Prueba	Módulo de elasticidad (Et)	Deformación	Esfuerzo máximo
	MPa	Mm/mm	MPa
2	59573.47	1.011	366.224
3	58356.37	0.720	317.815
5	65804.94	1.065	417.544
Media aritmética	61.24493 Gpa ± 3.99	0.932	367.194 MPa
Desviación media	3040	0.141	33.566
Desviación estándar	3995.7	0.185	49.871

Resultados del tocho 1 laminado en caliente sin tratamiento térmico:

Gráfico 5.2 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T1 laminado en caliente sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.



Anexos

Tabla 5.17 "Tabla de resultados T1 Laminado en caliente sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.

Prueba	Módulo de elasticidad	Deformación total	Esfuerzo máximo
	MPa	Mm/mm	MPa
1	59038.82	1.669	412.547
2	60781.7	1.206	465.598
3	64058.97	1.675	401.523
4	61263.11	0.876	408.123
5	61274.95	0.999	412.547

Media aritmética	61283.51 MPa	1.285	420.068 MPa
-------------------------	---------------------	--------------	--------------------

Desviación media	1110.18	0.309	18.212
Desviación estándar	1802.36	0.372	25.849

Resultados del tocho 1 laminado en frío con tratamiento térmico:

Gráfico 5.3 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T1 laminado en frío con tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.

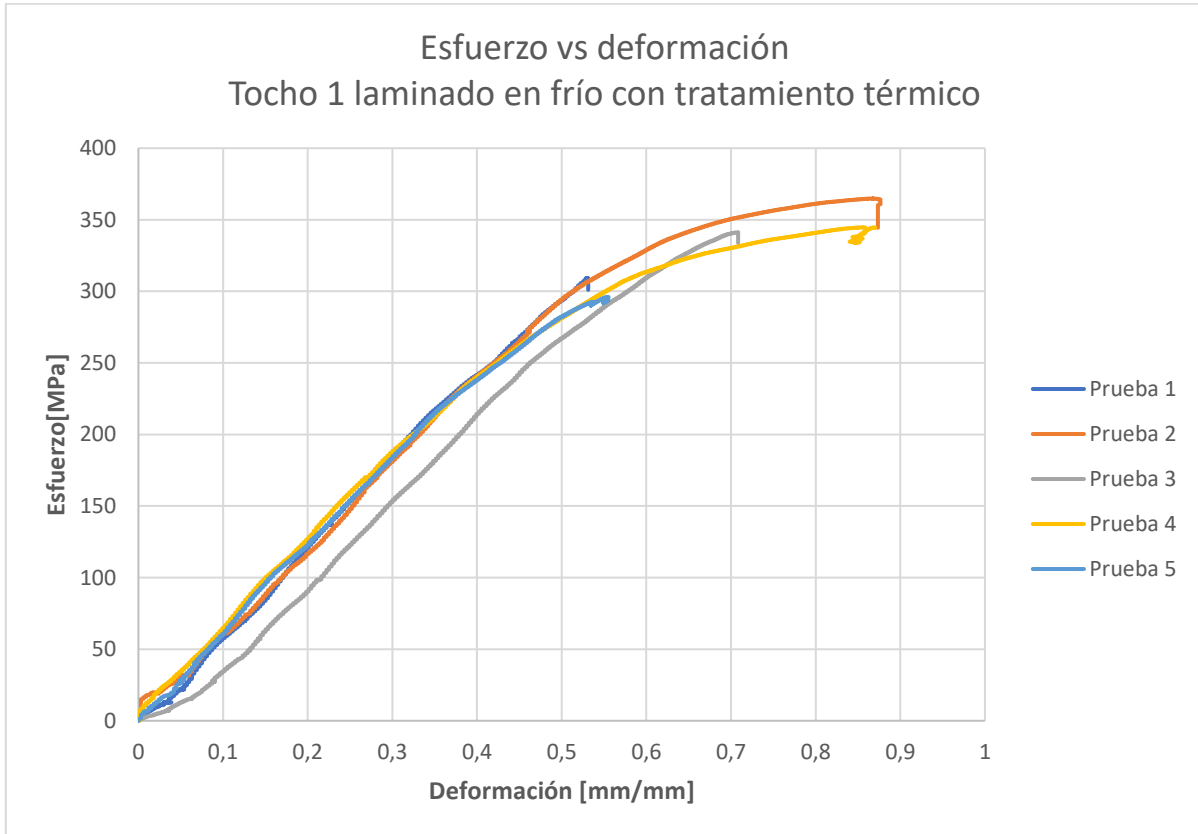


Tabla 5.18 "Tabla de resultados T1 Laminado en frío con tratamiento térmico" Fuente:
Elaboración propia.

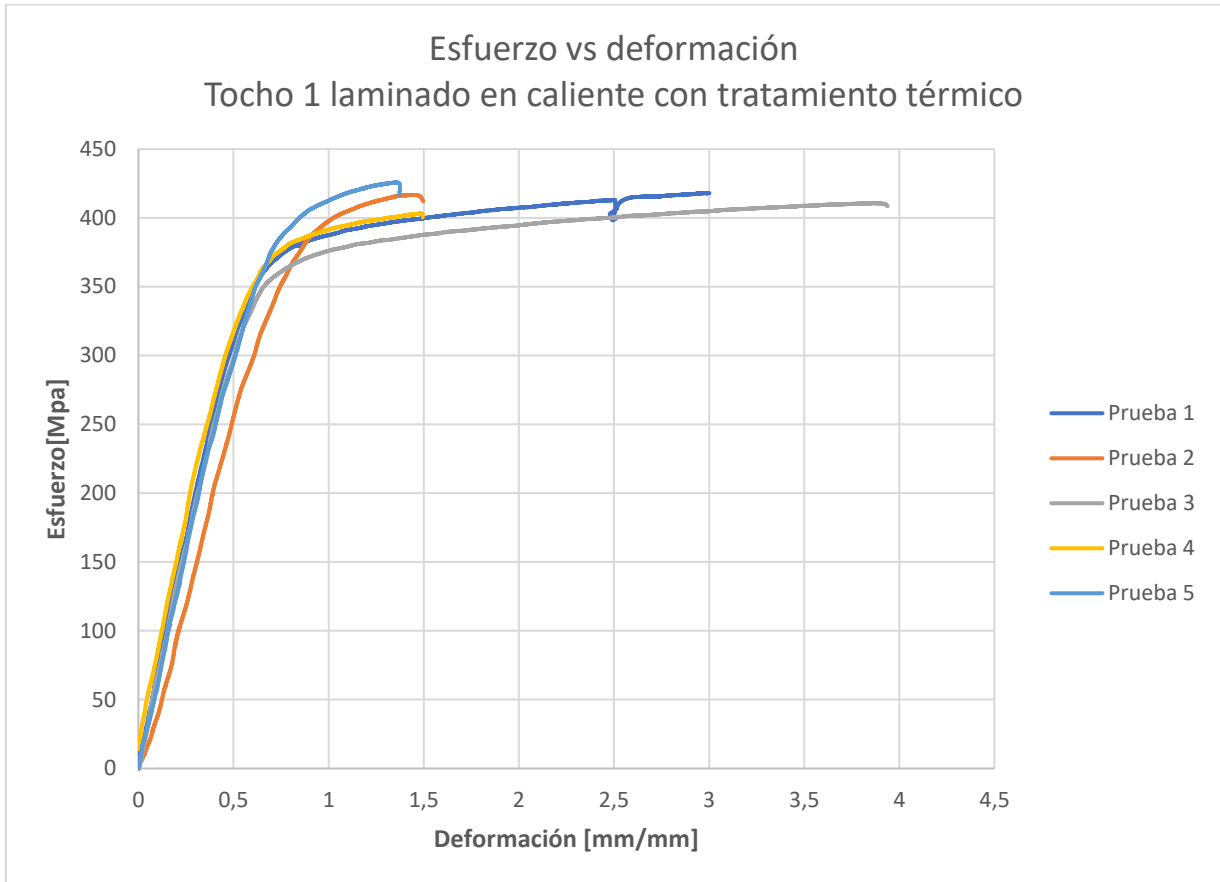
Prueba	Módulo de elasticidad	Deformación total	Esfuerzo máximo
	MPa	Mm/mm	MPa
1	66759.942	0.531	309.078
2	58677.127	0.873	364.794
3	59581.482	0.708	341.104
4	61581.894	0.870	344.749
5	59860.295	0.555	296.107

Media aritmética	61292.148 MPa	0.707	331.166 MPa
-------------------------	----------------------	--------------	--------------------

Desviación media	2303.016	0.131	22.859
Desviación estándar	3232.477	0.164	27.978

Resultados del tocho 1 laminado en caliente con tratamiento térmico:

Gráfico 5.4 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T1 laminado en caliente sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.



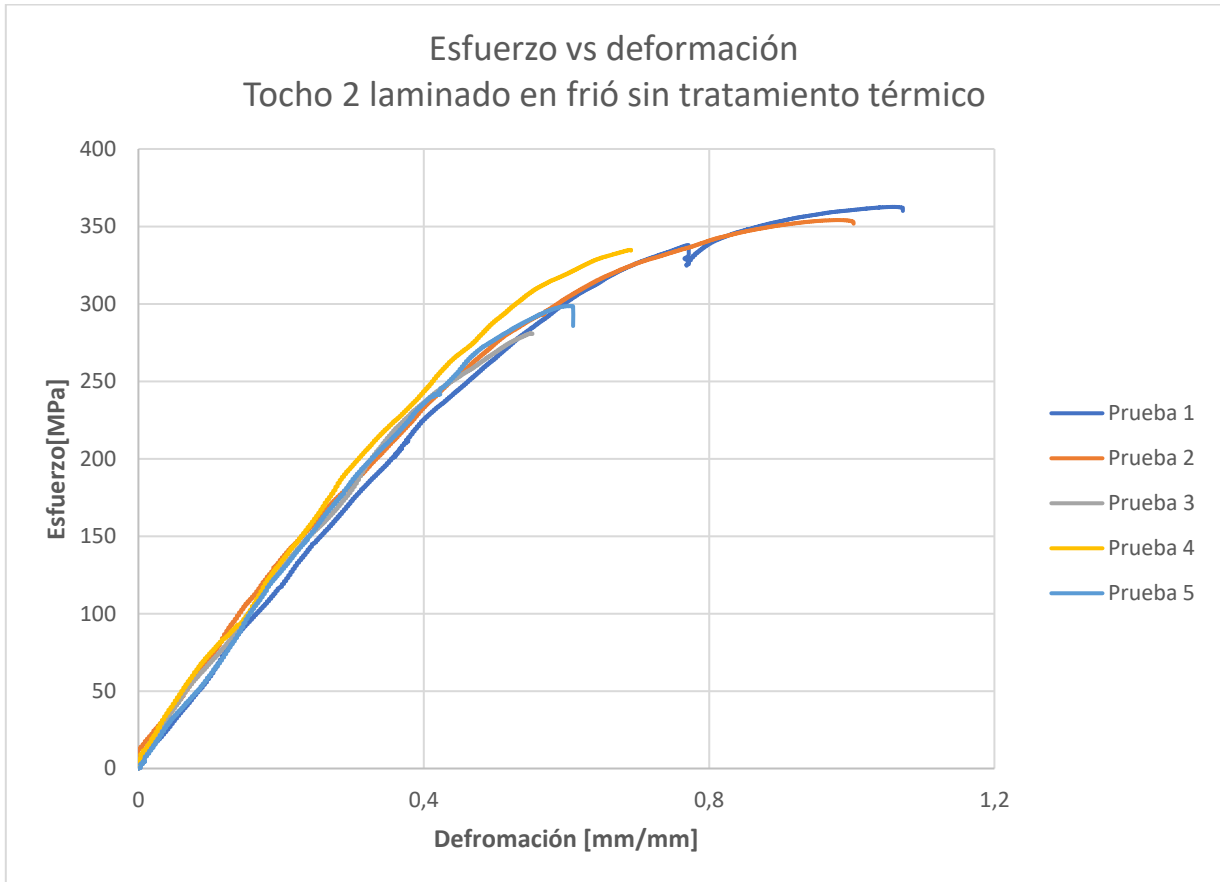
Anexos

*Tabla 5.19 "Tabla de resultados T1 Laminado en caliente con tratamiento térmico" Fuente:
Elaboración propia.*

Prueba	Módulo de elasticidad	Deformación	Esfuerzo máximo
	MPa	Mm/mm	MPa
1	64347.727	2.981	417.976
2	55517.433	1.497	416.611
3	65792.192	3.938	410.626
4	65026.266	1.494	403.014
5	63789.043	1.371	425.680
Media aritmética	62894.532 MPa	2.256	414.781 MPa
Desviación media	2950.839	0.962	6.369
Desviación estándar	4191.486	1.150	8.486

Resultados del tocho 2 laminado en frío sin tratamiento térmico:

Gráfico 5.5 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T2 laminado en frío sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.



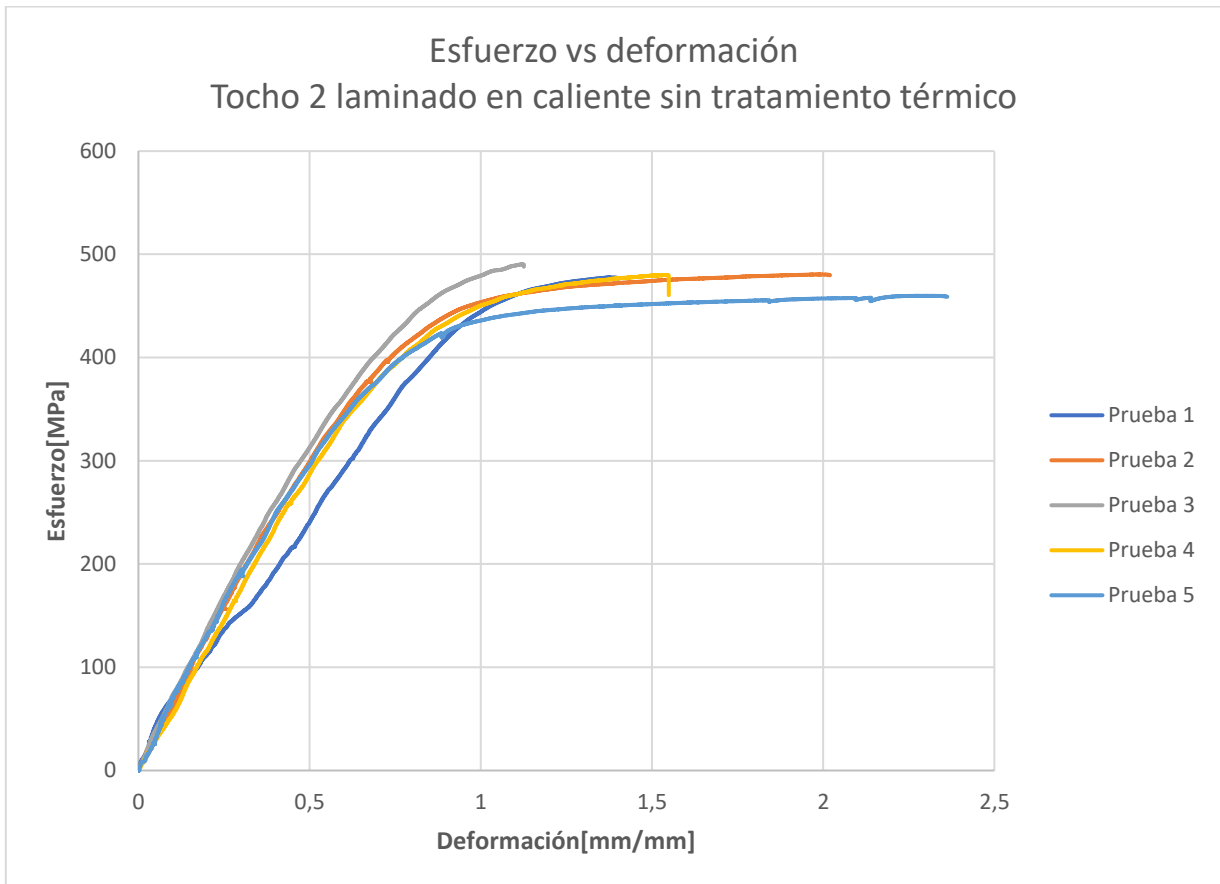
Anexos

Tabla 5.20 "Tabla de resultados T2 Laminado en frío sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.

Prueba	Módulo de elasticidad	Deformación	Esfuerzo máximo
	MPa	Mm/mm	MPa
1	56916.827	1.071	362.601
2	59591.58	1.002	354.116
3	60776.612	0.552	280.969
4	62060.615	0.690	334.837
5	64960.050	0.609	298.539
Media aritmética	60861.137 MPa	0.785	326.213 MPa
Desviación media	2119.356	0.201	29.166
Desviación estándar	2975.581	0.236	34.302

Resultados del tocho 2 laminado en caliente sin tratamiento térmico:

Gráfico 5.6 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T2 laminado en caliente sin tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.



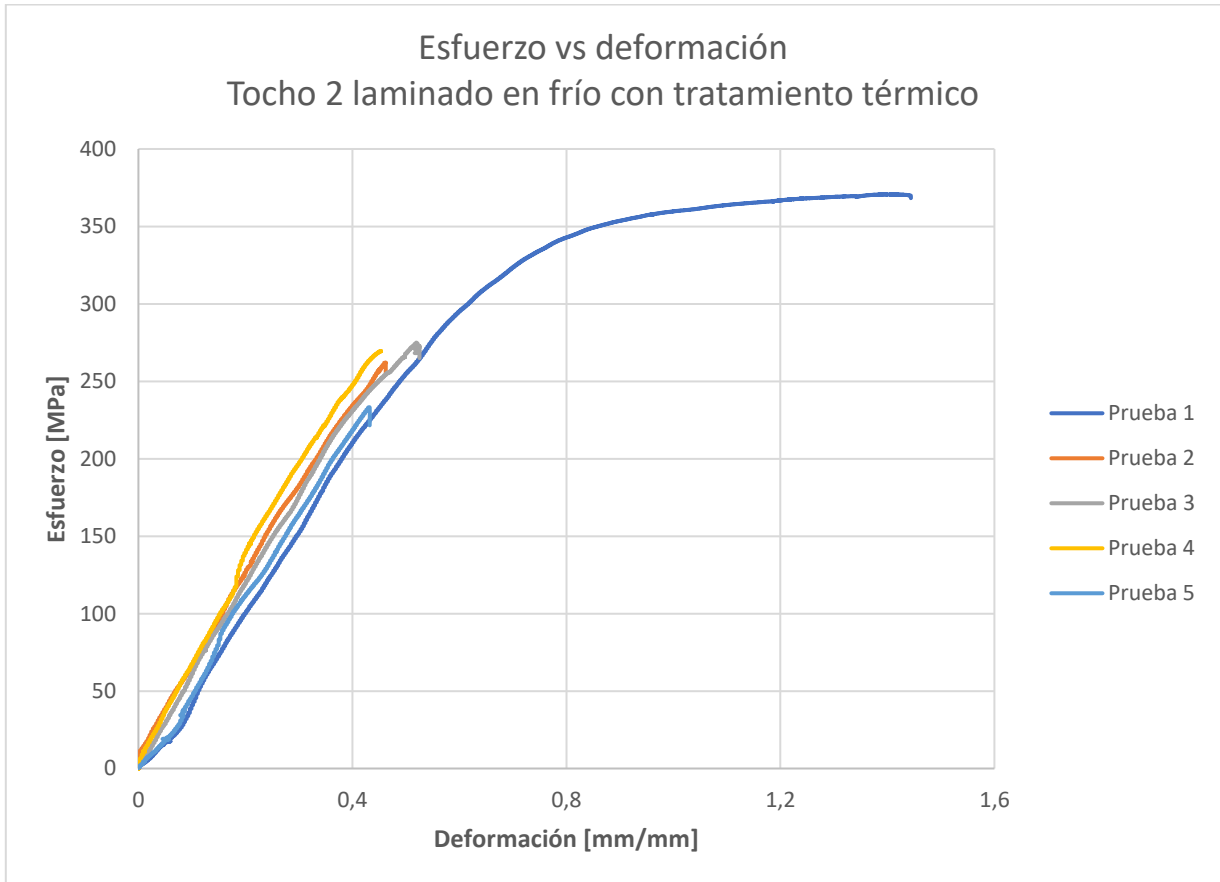
Anexos

*Tabla 5.21 "Tabla de resultados T2 Laminado en caliente sin tratamiento térmico" Fuente:
Elaboración propia.*

Prueba	Módulo de elasticidad	Deformación	Esfuerzo máximo
	MPa	Mm/mm	MPa
1	43990.662	1.401	477.543
2	68172.701	2.019	480.458
3	65124.865	1.125	490.256
4	60725.145	1.548	479.885
5	59979.179	2.362	459.701
Media aritmética	59598.510 MPa	1.691	477.569 MPa
Desviación media	7331.930	0.463	7.157
Desviación estándar	6243.139	0.399	8.367

Resultados de tocho 2 laminado en frío con tratamiento térmico:

Gráfico 5.7 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T2 laminado en frío con tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.



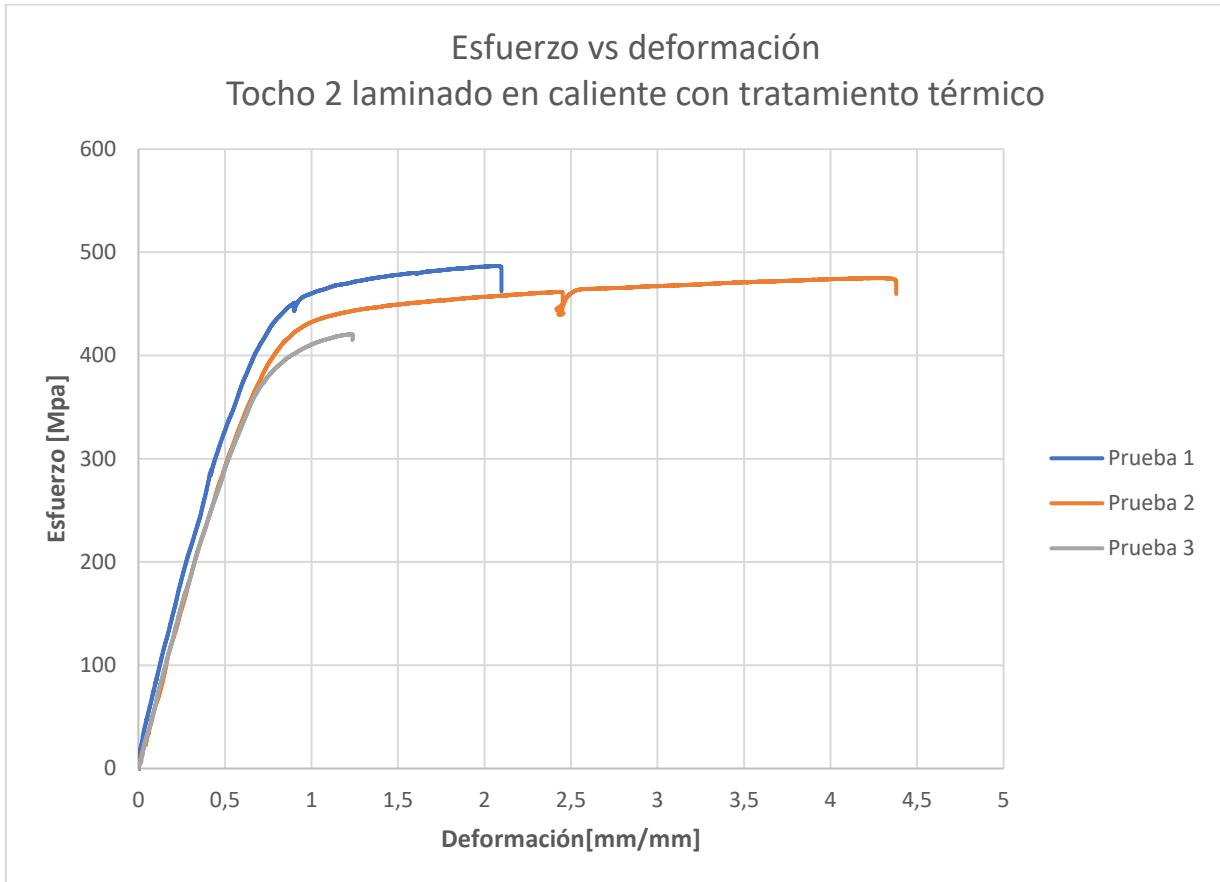
Anexos

*Tabla 5.22 "Tabla de resultados T2 Laminado en frío con tratamiento térmico" Fuente:
Elaboración propia.*

Prueba	Módulo de elasticidad	Deformación	Esfuerzo máximo
	MPa	Mm/mm	MPa
1	55264.915	1.443	370.669
2	61544.520	0.462	262.015
3	57714.317	0.525	275.024
4	71853.433	0.450	269.492
5	59988.43	0.432	233.067
Media aritmética	61273.124 MPa	0.662	282.053 MPa
Desviación media	4340.682	0.438	35.446
Desviación estándar	6372.415	0.312	52.108

Resultados de tocho 2 laminado en caliente con tratamiento térmico:

Gráfico 5.8 "Esfuerzo vs deformación del ensayo para T2 laminado en caliente con tratamiento térmico" Fuente: Elaboración propia.



Anexos

*Tabla 5.23 "Tabla de resultados T2 Laminado en caliente con tratamiento térmico" Fuente:
Elaboración propia.*

Prueba	Módulo de elasticidad	Deformación	Esfuerzo máximo(σ)
	MPa	Mm/mm	MPa
1	66174.556	2.098	486.625
2	64267.649	4.379	475.001
3	62483.867	1.236	420.657

Media aritmética	64308.691 MPa	2.571	460.761 MPa
-------------------------	----------------------	--------------	--------------------

Desviación media	1243.909	1.624	26.736
Desviación estándar	1845.686	1.205	35.21

5.4. ANEXO 4: TABLA GENERAL DE RESULTADOS ENSAYO DE TRACCIÓN.

Tabla 5.24 "Resultados ensayo de tracción"

	Nº. probeta	Fecha	E _t	σ _{x1}	σ _{x2}	σ _{x3}	σ _M	ε _M	σ _B	ε _B
			MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%
T1FSTT-2	2	20-01-2023	59573,4769	366,194395			366,224811	0,99960214	357,907721	1,01160932
T1FSTT-3	3	20-01-2023	58356,3696				317,815208	0,71743214	305,514719	0,72043395
T1FSTT-4	4	20-01-2023	45653,4285	402,968435			421,140221	1,24575043	419,785034	1,25775766
T1FSTT-5	5	20-01-2023	65804,9382	416,716861			417,544198	1,03562379	415,550487	1,06564188
T1LCSSTT-2	7	20-01-2023	60781,7042	450,604019			465,59846	1,19772148	464,293942	1,20672691
T1LCSTT-3	8	20-01-2023	64058,971	387,650903			401,523053	1,64799273	396,305833	1,67500901
T1LCSTT-4	9	20-01-2023	61263,1072				408,123671	0,87652797	399,598234	0,87652797
T1LCSTT-1	10	20-01-2023	59038,8216	434,749088			450,641859	1,64198911	431,734477	1,66900539
T1LCSTT-5	11	20-01-2023	61274,9515				412,547914	0,99660033	411,395284	0,99960214
T2FSTT-1	12	20-01-2023	56916,8271	360,575109			362,601937	1,05663645	359,986799	1,0716455
T2FSTT-2	13	20-01-2023	59591,5801	353,230875			354,11699	0,98159128	351,765102	1,00260389
T2FSTT-3	14	20-01-2023	60776,6121				280,969984	0,54933089	280,527548	0,5523327
T2FSTT-4	15	20-01-2023	62060,6152				334,83756	0,69041586	334,357064	0,69041586
T2FSTT-5	16	20-01-2023	64960,0509				298,539605	0,60336345	285,698354	0,60936707
T2LCSTT-1	17	20-01-2023	43990,663	444,503749			477,543902	1,38083172	476,277617	1,40184438
T2LCSTT-2	18	20-01-2023	68172,7013	453,541548	480,416749		480,458232	1,99320066	479,662419	2,01976657
T2LCSTT-3	19	20-01-2023	65124,865	479,378165			490,256791	1,11967444	487,899347	1,12567806
T2LCSTT-4	20	20-01-2023	60725,1455	450,459551			479,885259	1,5399276	460,399231	1,54893303
T2LCSTT-5	22	20-01-2023	59979,1796	435,916044	457,14426		459,701917	2,29037952	458,800376	2,36242294
T1FCTT-1	24	24-01-2023	66759,943				309,078899	0,53132004	301,009965	0,53132004
T1FCTT-2	25	24-01-2023	58677,1274				364,794204	0,86752254	344,395094	0,87352616
T1FCTT-3	26	24-01-2023	59581,4824				341,104363	0,70842671	333,67984	0,70842671
T1FCTT-4	27	24-01-2023	61581,894				344,749423	0,8555153	344,222106	0,87052435
T1FCTT-5	28	24-01-2023	59860,2955				296,107169	0,5523327	293,74788	0,55533451

Anexos

Continuación tabla resultados de ensayo de tracción:

	Nº. probeta	Fecha	E_t	σ_{x1}	σ_{x2}	σ_{x3}	σ_M	ϵ_M	σ_B	ϵ_B
			MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%
T1CCTT-3	31	24-01-2023	65792,19206	376,1003925	394,5716927	404,832331	410,6263587	3,869330645	408,4628462	3,938372374
T1CCTT-4	32	24-01-2023	65026,26602	391,4490968			403,0144316	1,479891419	400,2766246	1,494900465
T1CCTT-5	33	24-01-2023	63789,04332	412,5731765			425,6804502	1,356817245	416,7858803	1,371826291
T2FCTT-1	34	27-01-2023	55264,91542	359,7574544			370,6694922	1,395840764	368,2606029	1,44386971
T2FCTT-2	35	27-01-2023	61544,52093				262,0157026	0,462278455	255,1173499	0,462278455
T2FCTT-3	36	27-01-2023	57714,31725				275,0243849	0,519312799	264,9927276	0,525316417
T2FCTT-4	37	27-01-2023	71853,43385				269,4922741	0,453273028	269,1182833	0,450271219
T2FCTT-5	38	27-01-2023	59988,43274				233,0671048	0,432260364	221,5785153	0,432260364
T2CCTT-1	39	27-01-2023	66174,55617	460,0586067	486,0880036		486,6251754	2,06224227	462,1945808	2,098263979
T2CCTT-2	40	27-01-2023	64267,64947	432,3304117	456,8177992	467,138132	475,0019686	4,289583683	459,5455213	4,379638195
T2CCTT-3	41	27-01-2023	62483,86797	410,6275364			420,6574331	1,227739573	414,9123127	1,236745