

SEDE SANTIAGO FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

# Diseño de uniones para sistema constructivo modular a partir de PLA (Ácido Poliláctico) y placas de contrachapado de madera

Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil

Alumno: Francisco Javier Miranda Medina. Profesor Guía: Andrés F. Vito Bahamonde

Santiago, Chile Enero, 2019

## CALIFICACIÓN DE LA MEMORIA

En Santiago, el... de..., los abajo firmantes dejan constancia que el alumno ..... de la carrera Ingeniería Civil ha aprobado la memoria para optar al título ...... con una nota de .....

Profesor:	Profesor:
Firma:	Firma:

Profesor:..... Firma:....

> Santiago, Chile Enero, 2019

Dedicatoria (breve, debe estar incorporada Para la entrega del borrador final)

## AGRADECIMIENTOS

Incluir sus agradecimientos.

### RESUMEN

En este estudio se propuso el diseño de uniones estructurales fabricadas mediante tecnología de impresión 3D utilizando PLA (ácido poli-láctico o polylactic acid) como materia prima. Estas uniones pretenden facilitar la utilización de placas de contrachapado de madera en la construcción de estructuras modulares, sin tener que recurrir necesariamente a mano de obra calificada y a otros materiales más costosos como el acero.

El procedimiento utilizado para el desarrollo del estudio inicio con una caracterización mecánica del PLA y del contrachapado. Posteriormente se diseñaron las uniones y se imprimieron mediante una impresora 3D. Se ensayaron probetas en tracción y compresión y con estos datos se crearon los modelos teóricos utilizando el software ANSYS. Finalmente, se realizaron ensayos de flexión de las uniones y se hizo un análisis comparativo de los resultados teóricos y experimentales.

Los resultados arrojaron que el PLA presenta un comportamiento poco dúctil y una resistencia baja por lo cual su uso estructural está acotada a estructuras con cargas bajas (estructuras modulares, estructuras temporales, etc.).

Palabras Clave: PLA, impresión 3D, ANSYS

## ABSTRACT

In this study was proposed the design of structural joints manufactured using 3D printing technology using PLA (polylactic acid) as a raw material. These unions aim to facilitate the use of plywood boards in the construction of modular structures, without necessarily having to resort to skilled workforce and to other more expensive materials such as Steel.

The procedure used for the development of the study began with a mechanical characterization of PLA and plywood. Subsequently, the joints were designed and printed using a 3D printer. Test pieces were tested in traction and compression and with these data the theoretical models were created using the ANSYS software. Finally, bending test of the joints was carried out and a comparative analysis of the theoretical and experimental results was made.

The results showed that the PLA presented a low ductile behavior and a low resistance, so its structural use is limited to structures with low loads (modular structures, temporary structures, etc.)..

Keywords: PLA, 3 printer, ANSYS

## INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INDICE DE CONTENIDO	7
INDICE DE FIGURAS	10
INDICE DE TABLAS	15
1. INTRODUCCIÓN	18
1.1. OBJETIVOS	21
1.2. ALCANCES	21
2. MARCO TEORICO	22
2.1. ESTADO DEL ARTE Y BENCHMARKING	22
2.2. IMPRESIÓN 3D	22
2.2.1. PROCESO DE EXTRUSIÓN	23
2.3. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	25
2.3.1. BIOPOLIMERO ACIDO POLILACTICO	25
2.3.2. PLANCHAS DE CONTRACHAPADO	33
3. CONTROL DE DEFORMACIÓN MODELO LINEAL	38
3.1. FORMULACION TEORICA LINEAL	39
3.1.1. CRITERIO DE RENDIMIENTO	39
3.2. DISEÑO DE LAS UNIONES	39
3.3. MODELO LINEAL	43
3.4. RESULTADOS MODELO LINEAL	46
3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS MODELO LINEAL	50
4. MODELO NO LINEAL Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL	51

	4.1.	FO	RMULACIÓN TEÓRICA NO LINEAL	52
	4.1	.1.	ANTECEDENTES SOBRE EL ANÁLISIS NO LINEAL	52
	4.1	.2.	MÉTODO NEWTON-RAPHSON	54
	4.1	.3.	CONTACTO	55
	4.1	.4.	SOLUCIÓN NO LINEAL	56
	4.2.	MC	DELO NO LINEAL	56
	4.3.	MC	DELO NO LINEAL CON PERNOS	60
	4.4.	PR	OCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	64
	4.4	.1.	EQUIPAMIENTO Y DISPOSICIÓN EXPERIMENTAL	64
	4.4	.2.	ENSAYO DE COMPRESIÓN	74
	4.4	.3.	ENSAYO A TRACCIÓN	78
	4.4	.4.	ENSAYO DE UNIONES A FLEXIÓN	81
5.	EN	ISAY	OS TRACCIÓN Y COMPRESIÓN	83
	5.1.	RE	SULTADOS ENSAYO DE COMPRESION AXIAL	83
	5.2.	AN	ÁLISIS DE RESULTADOS ENSAYO DE COMPRESIÓN AXIAL	87
	5.3.	RE	SULTADOS ENSAYO DE TRACCIÓN	92
	5.4.	AN	ÁLISIS DE RESULTADOS ENSAYO DE TRACCIÓN	93
6.	EN	ISAY	OS DE FLEXIÓN DE UNIONES	97
	6.1.	UN	IONES 100x100 [mm]	97
	6.1	.1.	RESULTADOS ENSAYO FLEXIÓN UNIONES 100x100 [mm]	97
	6.1	.2.	ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYO FLEXIÓN UNIONES 100X100.	99
	6.2.	UN	IONES 200X100 [mm]1	110
	6.2	2.1.	RESULTADOS ENSAYO FLEXIÓN UNIONES 200X100 [mm] 1	110
	6.2	2.2.	ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYO FLEXIÓN UNIONES 200X	100
	[mi	m]	111	

7.	AJ	JSTES PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN	118
7	7.1.	ANÁLISIS DEL ERROR	118
7	7.2.	EVALUACIÓN DE MODIFICACIONES	123
7	7.3.	RESULTADOS AJUSTES UNIONES 100X100	125
7	7.4.	RESULTADOS AJUSTES UNIONES 200X100 [mm]	133
8.	СС	NCLUSIONES	138
8	3.1.	TRABAJOS FUTUROS	142
BIE	BLIO	GRAFÍA	143
AN	EXC	9S	145
A.	AN	EXO 1	146
A	A.1. E	Especificaciones técnicas de la celda de carga	146
В.	AN	EXO 2	150
E	3.1. 7	Tablas de análisis lineal	150

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1.1: Contenedor de comida fabricado con PLA	19
Figura 1.2: Fibra textil fabricada con PLA	19
Figura 2.1: Proceso de extrusión material	24
Figura 2.2: Esquema producción PLA	26
Figura 2.3: Curva esfuerzo-deformación PLA puro con ciclo de carga	27
Figura 2.4: Pieza de estudio de PLA	27
Figura 2.5: Forma pieza según ASTM D638	28
Figura 2.6: Ejes de impresión y construcción de la pieza de PLA estudiada .	29
Figura 2.7: Curva de viscosidad del PLA a 180°C, mostrando la viscosidad d	cortante
como función de la razón de corte	31
Figura 2.8: Comportamiento de esfuerzo uniaxial de PLLA probado a una ve	locidad
de deformación de 0,01/s en dos direcciones ortogonales, y a dos temperat	uras 32
Figura 2.9: Respuesta experimentalmente determinada de PLLA en com	presión
uniaxial	33
Figura 2.10: Línea de producción planchas de contrachapado	34
Figura 2.11: Plancha de contrachapado	34
Figura 2.12: Orientación de fibras en planchas de contrachapado: a)	Fibras
paralelas; b) Fibras perpendiculares	37
Figura 3.1: Modelo 3D unión en ANSYS	40
Figura 3.2: Vista costado unión	41
Figura 3.3: Vista longitudinal unión	41
Figura 3.4: Mallado unión PLA	44
Figura 3.5: Mallado elementos de contrachapado	44
Figura 3.6 Superficie de contacto entre elemento de contrachapado y unión	PLA45
Figura 3.7: Punto de aplicación de la carga	46
Figura 3.8: Vista de empotramiento de extremos	46
Figura 3.9: Puntos de medición en elemento de contrachapado	49
Figura 3.10: Zona de medición de la deflexión máxima	49
Figura 3.11: Carga máxima PLA v/s largo elementos de contrachapado	50

Figura 3.12: Curva de deformación total v/s largo de los elementos	de
contrachapado	51
Figura 4.1: Ejemplo de curva esfuerzo-deformación de un metal	53
Figura 4.2: Relación entre carga y desplazamiento	54
Figura 4.3: Curva esfuerzo-deformación PLA (Wittbrodt & M. Pearce, 2015)	56
Figura 4.4: Curva esfuerzo-deformación PLA para análisis no lineal	57
Figura 4.5: Curva esfuerzo-deformación contrachapado para análisis no lineal.	58
Figura 4.6: Tipo de contacto friccional	58
Figura 4.7: Meshado de todos los elementos	59
Figura 4.8: Empotramiento en un extremo del elemento de contrachapado	59
Figura 4.9: Zona de aplicación de la carga	60
Figura 4.10: Vista conceptual perno y tuerca 1/2 pulgada	61
Figura 4.11: Vista frontal acotada unión 100x100 con perforaciones para per	mos.
Unidades en [mm]	61
Figura 4.12: Vista frontal acotada unión 200x100 con perforaciones para per	mos.
Unidades en [mm]	62
Figura 4.13: Empotramiento elementos de contrachapado	62
Figura 4.14: Superficie de aplicación de carga	63
Figura 4.15: Zona de contacto entre perno y tuerca	63
Figura 4.16: Imagen referencial de una celda de carga de bajo perfil	64
Figura 4.17: Imagen referencial cilindro hidráulico	64
Figura 4.18: Imagen referencial de un strain gage	65
Figura 4.19: 1) NI-9944 terminales de tornillo; 2) NI-9944 conector RJ50 hembr	ra 66
Figura 4.20: NI USB-9237 NATIONAL INSTRUMENTS	66
Figura 4.21: Puente de Wheatstone	67
Figura 4.22: Diferentes versiones de los circuitos de puente de Wheatstone	68
Figura 4.23: Configuración de puente completo	69
Figura 4.24: Configuración de cuarto de puente	70
Figura 4.25: Montaje y disposición de equipos para ensayo compresión axial	71
Figura 4.26: Montaje y disposición de equipos de ensayo en tracción	72
Figura 4.27: Forma de aplicación de la carga	73

Figura 4.28: Montaje y disposición de equipos	de ensayo en flexión de las uniones
	73
Figura 4.29: Montaje y disposición completa de	e los equipos para ensayo de flexión
Figura 4.30: a) probeta CH15; b) probeta CH60	) 75
Figura 4.31: a) probeta CV15; b) probeta CV60	)
Figura 4.32: Vista de strain gage instalados	77
Figura 4.33: Forma de aplicación de carga ens	ayo a compresión77
Figura 4.34: Vista frontal pieza para ensayo a t	racción. Unidades en [mm]78
Figura 4.35: Vista superior pieza para ensayo a	a tracción79
Figura 4.36: Soportes ramificados generados	automáticamente por programa de
impresión	
Figura 4.37: Vista de strain gages instalados e	n probetas para ensayo tracción 80
Figura 4.38: Marco de nivelado de ensayo a tra	acción 81
Figura 4.39: Posicionamiento de las piezas sol	ore la cama de impresión82
Figura 4.40: Strain gage instalado en elemento	de contrachapado83
Figura 5.1: Curvas esfuerzo-deformación p	robetas CH15 (izquierda) y CV15
(derecha)	
Figura 5.2: Curvas esfuerzo-deformación p	robetas CH60 (izquierda) y CV60
(derecha)	
Figura 5.3: Direcciones de análisis ensayo a co	ompresión85
Figura 5.4: Curva experimental y representativ	a probetas CH15 (izquierda) y CV15
(derecha)	
Figura 5.5: Curva experimental y representativ	a probetas CH60 (izquierda) y CV60
(derecha)	
Figura 5.6: a) Pieza impresa verticalmente; b) l	Pieza impresa horizontalmente 87
Figura 5.7: Formas de cargar las piezas	
Figura 5.8: Falla probeta CH60 a) Vista frontal;	b) Vista superior 89
Figura 5.9: Falla probeta CH15 a) Vista frontal;	b) Vista lateral 89
Figura 5.10: Falla probeta CV15 vista frontal	
Figura 5.11: Falla probeta CV60 a) Vista fronta	l; b) Vista lateral89

Figura 5.12: Líneas de tendencia probetas CH15 (izquierda) y CV15 (derecha	a) 90
Figura 5.13: Líneas de tendencia probetas CH60 (izquierda) y CV60 (derecha	a) 91
Figura 5.14: Curvas esfuerzo-deformación probetas TV15 (izquierda) y	TV60
(derecha)	92
Figura 5.15: a) falla en pieza con 15% de densidad; b) falla en pieza con 60	)% de
densidad	93
Figura 5.16: Desprendimiento de la parte superior de la pieza ensayada	93
Figura 5.17: Líneas de tendencia probetas TV15 (izquierda) y TV60 (derecha	) 94
Figura 5.18: curva esfuerzo-deformación probeta TV60 (azul) y CV60 (rojo)	95
Figura 5.19: Línea de tendencia conjunta probeta TV60 y CV60	96
Figura 6.1: Curva carga-deformación experimental unión U1	97
Figura 6.2: Curva carga-deformación experimental unión U2	97
Figura 6.3: Curva carga-deformación experimental unión U3	98
Figura 6.4: Curva carga-deformación teórica y experimental unión U1	99
Figura 6.5: Fallas U1: a) Primera falla; b) Segunda falla	100
Figura 6.6: Líneas de tendencia tramos de toma de carga unión U1	100
Figura 6.7: Curva carga-deformación teórica y experimental unión U2	101
Figura 6.8: Falla en unión U2	102
Figura 6.9: Líneas de tendencia tramos de toma de carga unión U2	102
Figura 6.10: Curva carga-deformación teórica y experimental unión U3	103
Figura 6.11: Líneas de tendencia tramos de toma de carga unión U3	104
Figura 6.12: Curva P-∆ teórico experimental unión U1	105
Figura 6.13: Medición de desplazamiento unión U1	105
Figura 6.14: Curva P- $\Delta$ teórico experimental unión U2	106
Figura 6.15: Medición de desplazamiento unión U2	106
Figura 6.16: Curva Ρ-Δ teórico experimental unión U3	107
Figura 6.17: Medición de desplazamiento unión U3	107
Figura 6.18: Formas de falla: a) unión U1; b) unión U3	108
Figura 6.19: Forma de falla unión U2: a) Vista inferior; b) Vista lateral	109
Figura 6.20: Curva carga-deformación experimental unión U4	110
Figura 6.21: Curva carga-deformación experimental unión U5	110

Figura 6.22: Curva carga-deformación teórica y experimental unión LI4	112
Figura 6.23: Falla unión 1/4	112
Figura 6.25: Líneas de tendencia teórico y experimental unión 114	113
Figura 6.25: Curva carga-deformación teórica y experimental unión U5	11/
Figura 6.26: Lineas de tendencia curvas experimental y teórica unión U5	11/
Figura 6.27: Cunya P-A teórico experimental unión UA	115
Figura 6.28: Medición de desplazamiento unión L/A	115
Figura 6.20: Formas do follo unión 114	117
Figura 6.29. Formas de falla unión U5: a) Vista inferior: b) Vista lateral	117
Figura 6.30. Formas de impresión y composición interno, do los unicoso	
Figura 6.31. forma de impresión y composición interna de las uniones	. 1 1 /
Figura 0.32. Par de lueizas generada en la union	. 1 10
Figure 7.1: Curves experimentales ensayes de flexión	. 1 19
Figura 7.2: Curvas experimentales ensayos de flexion	. 119
	. 120
Figura 7.4: Curvas P- $\Delta$ con regresion lineal union U3	. 121
Figura 7.5: Curvas P- $\Delta$ con regresión líneal unión U2	. 121
Figura 7.6: Curvas P- $\Delta$ con regresión lineal unión U4	. 121
Figura 7.7: Configuración de los apoyos para ensayo de flexión	. 122
Figura 7.8: Ejemplo de cálculo de deflexión por giro en los apoyos	. 123
Figura 7.9: Giro en apoyos modelo teórico	. 124
Figura 7.10: Grafico resumen curvas Ρ-Δ unión U1	. 125
Figura 7.11: Regresión lineal curvas Ρ-Δ unión U1	. 125
Figura 7.12: Grafico resumen curvas P-Δ unión U2	. 126
Figura 7.13: Regresión lineal curvas Ρ-Δ unión U2	. 127
Figura 7.14: Grafico resumen curvas P-Δ unión U3	. 128
Figura 7.15: Regresión lineal curvas P- $\Delta$ unión U3	. 128
Figura 7.16: Curva carga-deformación ajustada con giro en apoyos unión U1	. 129
Figura 7.17: Regresión lineal curva Ρ-ε ajustada unión U1	. 129
Figura 7.18: Curva carga-deformación ajustada con giro en apoyos unión U2	. 130
Figura 7.19: Regresión lineal curva Ρ-ε ajustada unión U2	. 131
Figura 7.20: Curva carga-deformación ajustada con giro en apoyos unión U3	. 132

Figura 7.21: Regresión lineal curva P-ε ajustada unión U3132
Figura 7.22: Grafico resumen curvas P- $\Delta$ unión U4
Figura 7.23: Regresión lineal curvas P- $\Delta$ unión U4
Figura 7.24: Curva carga-deformación ajustada con giro en apoyos unión U4 135
Figura 7.25: Regresión lineal curva Ρ-ε ajustada unión U4135
Figura 7.26: Curva carga-deformación ajustada con giro en apoyos unión U5 136
Figura 7.27: Regresión lineal curva Ρ-ε ajustada unión U5137
Figura 8.1: Esfuerzo PLA, valores positivos en tracción y negativos en compresión
Figura 8.2: Deformación PLA, valores positivos en tracción y negativos en
compresión139
Figura 8.3: Posicionamiento sobre cama de impresión140
Figura 8.4: Posicionamiento de uso y formas de carga: a) Compresión; b) Tracción
Figura A.1: Diagrama celda de carga147
Figura A.2: Dimensiones generales
Figura A.3: Modelos de celdas y sus capacidades148

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 2.1: Clasificación tecnologías de impresión 3D según ASTM F2792 -	- 12a 23
Tabla 2.2: Dimensión piezas según ASTM D638	28
Tabla 2.3: Propiedades mecánicas de PLA	29
Tabla 2.4: Propiedades térmicas PLA	30
Tabla 2.5: Especificaciones técnicas	35
Tabla 2.6: Propiedades mecánicas de las planchas de contrachapado,	Forestal
Tabla 2.6: Propiedades mecánicas de las planchas de contrachapado,Arauco	Forestal 36
Tabla 2.6: Propiedades mecánicas de las planchas de contrachapado,AraucoTabla 2.7: Hinchamiento planchas de contrachapado.	Forestal 36 37
<ul><li>Tabla 2.6: Propiedades mecánicas de las planchas de contrachapado,</li><li>Arauco</li><li>Tabla 2.7: Hinchamiento planchas de contrachapado</li><li>Tabla 3.1: Dimensiones variables de las uniones</li></ul>	Forestal 

Tabla 3.3: Limites de deformación calculados	48
Tabla 3.4: Tabla resumen resultados modelo lineal	48
Tabla 4.1: Propiedades mecánicas PLA para análisis no-lineal	57
Tabla 4.2: Terminología probetas ensayo a compresión	75
Tabla 4.3: Datos de impresión probetas para ensayo en compresión	76
Tabla 4.4: Terminología probetas ensayo tracción	79
Tabla 4.5: Datos de impresión probetas para ensayo de tracción	79
Tabla 4.6: Descripción y denominación uniones	81
Tabla 4.7: Datos de impresión probetas para ensayo en flexión de las unione	s82
Tabla 5.1: Valores representativos de las curvas esfuerzo-deformación	85
Tabla 5.2: Resultados regresión lineal ensayo compresión axial	90
Tabla 5.3: Módulos de elasticidad en compresión axial	91
Tabla 5.4: Valores esfuerzo de falla ensayos a tracción	92
Tabla 5.5: Resultados regresión lineal ensayo a tracción	94
Tabla 5.6: Módulos de elasticidad en tracción	95
Tabla 6.1: Tabla resumen resultados Ρ-ε ensayo flexión uniones 100x100 [m	m].98
Tabla 6.2: Tabla resumen resultados P- $\Delta$ ensayo flexión uniones 100x100 [m	ım] 98
Tabla 6.3: Pendientes de tramos curva unión U1	100
Tabla 6.4: Resultados regresión lineal curva teórica U1	101
Tabla 6.5: Pendientes de tramos curva unión U2	102
Tabla 6.6: Resultados regresión lineal curva teórica U2	103
Tabla 6.7: Pendientes de tramos curva unión U3	104
Tabla 6.8: Resultados regresión lineal curva teórica U3	104
Tabla 6.9: Tabla resumen resultados Ρ-ε ensayo flexión uniones 200x100 [m	m]111
Tabla 6.10: Tabla resumen resultados P-Δ ensayo flexión uniones 200x100	) [mm]
	111
Tabla 6.11: Resultados regresión lineal curvas teórica y experimental unión U	J4 113
Tabla 6.12: Resultados regresión lineal curvas teórica y experimental unión L	J5 114
Tabla 7.1: Pendiente y porcentaje de error curvas carga-deformación	120
Tabla 7.2: Pendiente y porcentaje se error curvas P-Δ	122
Tabla 7.3: Valores de giros evaluados	124

Tabla 7.4: Tabla comparativa valores ajuste e iniciales unión U1 126
Tabla 7.5: Tabla comparativa valores ajuste e iniciales unión U2 127
Tabla 7.6: Tabla comparativa valores ajuste e iniciales unión U3
Tabla 7.8: Tabla comparativa valores ajuste e inicial curva Ρ-ε unión U1
Tabla 7.9: Tabla comparativa valores ajuste e inicial curva Ρ-ε unión U2
Tabla 7.10: Tabla comparativa valores ajuste e inicial curva P-ε unión U3 132
Tabla 7.11: Tabla comparativa valores ajuste e inicial curva P- $\Delta$ unión U4 134
Tabla 7.12: Tabla comparativa valores ajuste e inicial curva P-ε unión U4 136
Tabla 7.13: Tabla comparativa valores ajuste e inicial curva Ρ-ε unión U5 137
Tabla B.1: Resultados análisis lineal unión 100x100x1150
Tabla B.2: Resultados análisis lineal unión 200x100x1151
Tabla B.3: Resultados análisis lineal unión 500x100x1152
Tabla B.4: Resultados análisis lineal unión 100x100x2153
Tabla B.5: Resultados análisis lineal unión 200x100x2
Tabla B.6: Resultados análisis lineal unión 500x100x2155
Tabla B.7: Resultados análisis lineal unión 100x100x2.5156
Tabla B.8: Resultados análisis lineal unión 200x100x2.5
Tabla B.9: Resultados análisis lineal unión 500x100x2.5

## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la incorporación de nuevas formas de edificación y la utilización de distintos materiales ha tenido un gran impacto en la disminución de los costos y tiempos en el desarrollo de obras menores. Construcciones modulares utilizando tabiquería de acero galvanizado a reemplazando el uso de la madera y la albañilería como recursos más utilizados. Pero es importante destacar que Chile presenta un gran potencial forestal, siendo una de las principales actividades económicas del país. Este sector es el tercero en participación de exportaciones chilenas, representando un 8,7% del total nacional ((CORMA), 2017), por lo cual es un recurso que no se debe desaprovechar. Es por ello que el desafío está en incorporar el uso de nuevas tecnologías y materiales para facilitar la aplicabilidad de la madera en la construcción, sin perder el carácter de material renovable y ecológico, a diferencia de otras materias primas. Un material que cumple con ese requisito es el biopolímero Acido poli-láctico (PLA), polímero derivado del almidón.

En los últimos años ha habido un gran desarrollo del uso del PLA en termoformado rígido como una alternativa ecológica para el empaque de alimentos frescos (ver Figura 1.1). Conn, y otros, (1995) investigaron la seguridad del PLA en contacto con alimentos bajo diversas condiciones y estudiaron la migración de agentes dañinos sobre los productos alimenticios. Llegaron a la conclusión de que se puede esperar una migración muy limitada y el material en cuestión seria ácido láctico, o sus dímeros y oligómeros que serán posteriormente hidrolizados en un sistema acuoso a ácido láctico. El PLA posee amplias cualidades en este ámbito, tales como: reducción de los problemas de olor y sabor, buena resistencia a los aceites, dan una buena estética a los paquetes, tiene un sellado fuerte a bajas temperaturas, por lo cual es utilizado en paquetes abre fácil.



Figura 1.1: Contenedor de comida fabricado con *PLA* 

Otro uso en el cual se está trabajando es en la confección de fibras utilizadas en la industria textil (ver Figura 1.2) en la fabricación de toldos y cubiertas resistentes a los rayos ultra violeta o en telas empleadas en la tapicería, en la agricultura, en la industria automotriz, en la industria electrónica, entre otros.



Figura 1.2: Fibra textil fabricada con PLA

En la tecnología de impresión 3D el PLA tiene bastantes ventajas con respecto al ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), que es el polímero más utilizado por su alta resistencia al impacto y fácil obtención. El PLA es más denso que al ABS, tiene una mayor dureza, de 63.5 dentro de la escala de dureza shore, no presenta emisiones

de gases tóxicos, a diferencia del ABS que desprende gases que en concentraciones altas pueden ser nocivos. Sus desventajas frente al ABS son; Es más rígido, lo que dificulta su deformación ante cargas, tiene una menor resistencia a los impactos.

Los tableros de contrachapado son productos fabricados con láminas de madera encoladas, las fibras de estas quedan orientadas, generalmente, de forma perpendicular, esto permite una mayor resistencia. Existen dos maderas con las cuales se producen las planchas: Coníferas y latifoliadas. Los contrachapados de coníferas se utilizan para la construcción como cubiertas, cierres perimetrales, tabiques, almas de vigas mixtas, encofrados, entre otros, mientras que las latifoliadas son utilizadas para fabricar elementos decorativos, como muebles, revestimientos, carpintería, entre otros. (Pérez Galaz, 1995)

Es un material ideal para usos estructurales debido a que es ligero y posee una elevada resistencia. Por ejemplo presenta una buena resistencia a la flexión en las dos direcciones del plano, lo que lo hace un material conveniente como cubierta de pisos, de techumbre y de muros, esté paralelo o normal a las vigas que lo sostienen. (Pérez Galaz, 1995)

En este estudio se propone el diseño de una unión estructural fabricada mediante tecnología de impresión 3D utilizando PLA como materia prima. Estas uniones pretenden facilitar la utilización de la madera en la construcción de estructuras modulares, sin tener que recurrir necesariamente a obra de mano calificada.

### 1.1. OBJETIVOS

El objetivo general es realizar un estudio de factibilidad técnica del uso del polímero PLA como elemento estructural de uniones de un sistema constructivo modular

Los objetivos específicos son:

- Realizar la caracterización mecánica del PLA en base a un estudio bibliográfico.
- Caracterizar mecánicamente las planchas de contrachapado de madera utilizando el material bibliográfico disponible.
- Realizar el diseño de uniones de PLA y contrachapado
- Realizar modelo computacional lineal y no lineal de las uniones utilizando el software ANSYS.
- Realizar ensayos de probetas en tracción y en compresión, además de ensayar en flexión las uniones.

### 1.2. ALCANCES

- La caracterización mecánica de las planchas de contrachapado se realizara recopilando la información entregada por los catálogos de la maderera Arauco.
- Se realizaran 5 diseños de uniones, de las cuales 3 se unirán a los elementos de contrachapado por la fricción interna de la pieza y tendrán dimensiones de 100x100 [mm], 200x100 [mm] y 500x100 [mm]. A las otras 2 uniones se les agregaran 4 pernos, igualmente de PLA, con los cuales se unirán a los elementos de contrachapado y tendrán dimensiones de 100x100 [mm] y 200x100 [mm].

### 2. MARCO TEORICO

#### 2.1. ESTADO DEL ARTE Y BENCHMARKING

El PLA ha sido bastante criticado con respecto a la generación de dióxido de carbono y metano al descomponerse. Para su producción se utiliza, como fuente de energía, hidrocarburos. Además las materias primas, desde las cuales deriva el PLA son un elemento base en la industria alimentaria, por lo cual, al ser un producto requerido, se teme que los productores de las materias primas prefieran destinar sus cultivos a la producción de este polímero generando una posible escases en el sector alimenticio.

El PLA puro ha sido estudiado mayormente en aplicaciones en scaffolds biodegradable, que son estructuras de soporte biométricas para la regeneración cartilaginosa. Sin embargo, para mejorar sus propiedades como capacidad de carga, bioactividad y respuesta biológica se han hecho nanocompósitos de PLA. (Arriagada González, 2015)

A causa de las propiedades del PLA este es muy utilizado en el área de la confección de tejidos, y presenta una gran cantidad de estudios en aplicación parar nervios, piel, cartílagos y regeneración de hueso. Se han investigado sobre membranas de PLLA (poly-L-lactic acid) densas y porosas con diferentes tamaños de poro para potenciales aplicaciones como substratos para regeneración de piel. (Arriagada González, 2015)

#### 2.2. IMPRESIÓN 3D

Actualmente en el mercado existen diferentes tecnologías en la confección de piezas mediante impresión 3D. La ASTM (American Society for testing and Materials) clasifica en 7 distintas tecnologías como se observa en la Tabla 2.1:

Clasificación	Descripción				
Material jetting	Pequeñas gotas de material son				
	depositadas de manera selectiva				
Binder jetting	Un agente de unión es depositado de				
	manera selectiva para unir el polvo				
Directed energy deposition	Una fuente de energía derrite el				
	material al tiempo que es depositado				
Powder bed fusion	Una fuente de energía funde				
	selectivamente regiones de material en				
	polvo				
Sheet lamination	Diferentes capas de material se van				
	depositando en estado fundido				
Vat photopolimerymerization	Un fotopolímero líquido es curado				
	gracias a un foco de luz				
Material extrusion	Un material es dispensado y dispuesto				
	sobre una superficie de manera				
	selectiva a través de un inyector				

Tabla 2.1: Clasificación tecnologías de impresión 3D según ASTM F2792 – 12a

Fuente: (ASTM, 2012)

La tecnología utilizada más ampliamente es la Material extrusion (Extrusión de material), por lo cual esta será explicada a continuación.

#### 2.2.1. PROCESO DE EXTRUSIÓN

La tecnología utilizada en este proceso tiene su primera aparición en 1986 en EEUU con una patente llamada "Topology Fabrication Apparatus". En esta patente se definió la maquina con un cabezal inyector de plástico, el que se encuentra montado en un brazo el cual puede moverse sobre un carro móvil. El control de la maquina era realizado por ordenador.

La máquina tal y cual como se conoce actualmente fue creada por el ingeniero Crump en 1989 creando además un método llamado "Apparatus and Method for creating three-dimensional objects". En este proceso el material es empujado a través de un inyector, para luego depositarlo y conformar la figura. Al momento de extruir, el material debe estar en un estado semi-sólido al momento de salir por la boquilla del inyector, además al momento de ser depositado este debe solidificarse de forma acelerada para que pueda soportar las capas posteriores que conformarán la pieza final. La maquinaria utilizada en este proceso, la cual puede observarse en la Figura 2.1, tiene la capacidad de moverse en el plano horizontal, que es la dirección de impresión de la capa. Además, puede desplazarse verticalmente para ir construyendo las distintas capas del objeto final. Este desplazamiento puede ser realizado por la boquilla o por la base. (Relaño Pastor, 2013)



Figura 2.1: Proceso de extrusión material

Luego de la extrusión del material, comienza el proceso de endurecimiento, este se lleva a cabo mediante un cambio químico que genera la solidificación. Esto se realiza mediante el uso de un agente que activa el endurecimiento, una reacción con el aire o simplemente un proceso de secado. (Relaño Pastor, 2013)

### 2.3. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

#### 2.3.1. BIOPOLIMERO ACIDO POLILACTICO

#### 2.3.1.1. CARACTERIZACIÓN LINEAL

El PLA (polylactid acid) o ácido poliláctico, es un polímero biodegradable derivado del almidón. Su elaboración comienza con la obtención del monómero ácido láctico por medio de la síntesis química del almidón o por fermentación. Hay dos configuraciones ópticamente activas, los estereoisomeros L (+) y D (-) (isómero con igual fórmula molecular, cuadrícula y secuencia de átomos enlazados, pero con diferente orientación tridimensional de sus átomos en el espacio) son producidos por la fermentación bacterial (homofermentativa o heterofermentativa) de los carbohidratos. En la producción industrial el método más utilizado es la fermentación láctica, en especial con el uso de bacterias homofermentativas, puesto que la síntesis química posee muchas limitaciones, incluyendo capacidad limitada dada su dependencia a subproductos de otros procesos y a los altos costos de manufactura. (Datta & Henry, 2006). El proceso general que se lleva a cabo consiste en el uso de especies de lactobacillus genus tales como Lactobacillus delbrueckii, L. amylophilus, L. bulgaricus, y L. leichmanii, con un rango de Ph de 5.4 a 6.4, un rango de temperatura de 38 a 42° C, y una baja concentración de oxígeno. (Mehta, Kumar, Bhunia, & Upadhyay, 2005)



Figura 2.2: Esquema producción PLA Fuente: http://www.datuopinion.com/poliacido-lactico

Luego de la obtención del ácido poli-láctico como monómero existen tres formas para realizar la polimerización: polimerización por condensación directa, policondensación directa en una solución azeotrópica (mezcla de dos o más compuestos químicos en estado líquido, los que alcanzan el punto de ebullición a temperatura constante y actúan como si fuese un solo compuesto químico) y polimerización a través de la formación de lactida. La más utilizada de estas es la poli-condensación directa en una solución azeotrópica, la cual produce un polímero PLA de alto peso molecular, esta forma de producción se observa en la Figura 2.2. Grabow, y otros, (2005) estudió el comportamiento del PLA puro al ser sometido a ciclos de carga, como se aprecia en la Figura 2.3.



Figura 2.3: Curva esfuerzo-deformación PLA puro con ciclo de carga Fuente: (Grabow, y otros, 2005)

Inicialmente este presenta una respuesta lineal con moderada disipación de energía, seguido por una falla frágil con una deformación de entre 2.5 y 3.5% a una tensión de aproximadamente 35 [MPa]. Además posee una baja sensibilidad frente a las variaciones en la magnitud de la velocidad de aplicación de las cargas.

En comparación con lo anterior, Essentium, empresa comercializadora de filamentos de PLA para impresión 3D, ha realizado estudios de las propiedades mecánicas de piezas impresas con PLA de alto rendimiento. La Figura 2.4 y Figura 2.5 muestran la forma de las piezas que fueron objeto de análisis, además en la Tabla 2.2 se presentan las dimensiones de estas según (ASTM, 2002).



Figura 2.4: Pieza de estudio de PLA Fuente: (Essentium)



Figura 2.5: Forma pieza según ASTM D638

Dimensiones	Tipo II
W – ancho de sección estrecha [mm]	6
L – largo de sección estrecha [mm]	57
WO – ancho general mínimo [mm]	19
LO – largo general [mm]	183
G – longitud calibrada [mm]	50
D – distancia entre agarres [mm]	135
R – radio pequeño [°]	76

Tabla 2	2. Dimonsión	niezas	sogún	ACTN DE28
Tapia Z.	2. Dimension	piezas	segun	AS I NI D030

Fuente: (ASTM, 2002)

Las propiedades de la pieza impresa son: temperatura de la boquilla de 235°C, temperatura de la cama 50 °C, relleno de 100%, velocidad de aplicación de 30 [mm/s], altura de cada capa 3 [mm] y un diámetro de la boquilla de 1 [mm].

El análisis de las propiedades mecánicas se realizó tomando como referencia los ejes representados en la Figura 2.6. Considerando el eje XY como la dirección de impresión y el eje ZX la dirección de construcción.



En la Tabla 2.3 se presentan los valores obtenidos de los estudios especificando además la norma utilizada para la obtención de dicho valor.

		Propiedades impresión 3D			
Medida	Metodo	XY	YX	ZX	
Resistencia a la		61	51	12	
tracción [MPa]	ASTIN D050	01	JT	40	
Módulo de		0007	0407	0004	
elasticidad [MPa]	ASTIM D638	3387	3107	2024	
Resistencia a la		405	C 4	70	
flexión [MPa]	ASTM D790	105	64	73	
Módulo de flexión		0407	0007	0000	
[MPa]	ASTM D790	3167	2307	2696	
Impacto con		0.4	40	40	
muesca Izod [J/m]	ASTM D256	31	40	40	

Tabla 2.3: Propiedades mecánicas de PLA

Fuente: (Essentium)

Se consideró un módulo de Poisson de 0,33. Además de las propiedades mecánicas, el estudio de las características térmicas del PLA también es muy relevante. A continuación se presentan las más relevantes, como punto de fusión, temperatura de transición a vidrio, la cual define cuando el polímero termoestable pase de un estado rígido amorfo a un estado más flexible, y temperatura de deflexión térmica.

Medida	Método	Propiedades		
Punto de fusión °C	ASTM D3418	165-180		
Temperatura de transición a		55 60		
vidrio (Tg) °C	ASTN 23410	55-00		
Temperatura de deflexión		>100		
térmica °C	ASTIVI D040	~100		
Fuente: (Essentium)				

Tabla 2.4: Propiedades térmicas PLA

De la Tabla 2.4 se deduce que: por los rangos de temperatura de Tg el PLA presenta un comportamiento rígido. Pese a tener un punto de fusión entre 165 y 180 °C, la temperatura recomendable de extrusión es de entre 190-240 °C.

#### 2.3.1.2. CARACTERIZACIÓN NO LINEAL

El PLA exhibe un comportamiento newtoniano al ser sometido a velocidades bajas de cizallamiento (<10 s^-1), es decir, la curva que muestra la relación entre el esfuerzo y la velocidad de deformación es lineal, mientras que al ser sometido a velocidades elevadas de cizallamiento (>10 s^-1) exhibe un comportamiento no newtoniano, es decir, la curva que muestra la relación entre el esfuerzo y la velocidad de deformación es no-lineal. (Hamad, Kaseem, Yang, Deri, & Ko, 2014) Esto se puede apreciar en la Figura 2.7.



Figura 2.7: Curva de viscosidad del PLA a 180°C, mostrando la viscosidad cortante como función de la razón de corte Fuente: (Hamad, Kaseem, Yang, Deri, & Ko, 2014)

Todos los materiales termoplásticos, incluido PLA, sufren una deformación por creep (fluencia lenta) al ser sometidos a esfuerzos que son menores que el de fluencia. Aunque el comportamiento experimental de tensión-deformación observado en materiales termoplásticos se caracteriza por una respuesta viscoelástica lineal o elástica inicial, un comportamiento no lineal y viscoplástico se desarrolla a lo largo del tiempo. A medida que aumenta el esfuerzo aplicado ciertas partes del material entran en fluencia a tasas significativas causando una respuesta no lineal de tensión-deformación. Durante estos eventos, el material circundante ejercerá un esfuerzo de apoyo sobre las regiones que entraron en fluencia, causando un aumento adicional en la barrera de activación para el flujo viscoplástico. Cuando el material se descarga, estas tensiones de apoyo causan una respuesta de descarga altamente no lineal y una recuperación (S. Bergström & Hayman, 2015).

Lo expresado anteriormente se puede apreciar de mejor manera en la Figura 2.8.



Figura 2.8: Comportamiento de esfuerzo uniaxial de PLLA probado a una velocidad de deformación de 0,01/s en dos direcciones ortogonales, y a dos temperaturas Fuente: (S. Bergström & Hayman, 2015)

En deformaciones muy grandes, antes de la falla, el esfuerzo puede aumentar a medida que la orientación inducida por la deformación en la microestructura reduce la entropía (grado de desorden molecular de un sistema) en el material. Este comportamiento se puede apreciar mejor en la Figura 2.9. (S. Bergström & Hayman, 2015)



Figura 2.9: Respuesta experimentalmente determinada de PLLA en compresión uniaxial. Fuente: (S. Bergström & Hayman, 2015)

En la Figura 2.9 además, se aprecia una caída significante del esfuerzo luego de alcanzar la fluencia en compresión uniaxial

#### 2.3.2. PLANCHAS DE CONTRACHAPADO

Las planchas de contrachapado se obtienen encolando chapas de madera de forma tal que las fibras de las chapas forman un ángulo, el que generalmente es recto como se observa en la Figura 2.11, pero también pueden ser con fibras paralelas, con la finalidad de equilibrar el tablero. El proceso completo de producción de las planchas de contrachapado se puede observar a continuación en la Figura 2.10.



Figura 2.10: Línea de producción planchas de contrachapado Fuente: JianZhong Wood machinery

Además para equilibrar por simetría la sección se utiliza un número impar de chapas. Dependiendo del uso y de las propiedades del tablero se utilizan distintos tipos de adhesivos, tales como, Urea formol (UF) para interiores, y Fenol formaldehído (PF) para exteriores. Es este caso en particular como se estudiaron las planchas de la maderera Arauco, el adhesivo que es utilizado en su fabricación es Fenol Formaldehído, tipo WBP (Wood Based Panels), de bajo nivel de emisión (E1; miligramos de formaldehído emitido por hora y por metro cuadrado de tablero, con un valor de 3.5 [mg/m^2h] )



Figura 2.11: Plancha de contrachapado Fuente: Sodimac

Cuando son utilizadas en la construcción de tabiques las planchas contribuyen a mejorar la aislación térmica, esto debido al bajo coeficiente de conductividad térmica que poseen (K=0.10 [Kcal-m/m<sup>2</sup> h<sup>o</sup>C]). Presentan, además, una estabilización de fábrica de la humedad de un 8 %. Las dimensiones con las cuales se comercializan los tableros son:

Largo: 2.44 [m] Ancho: 1.22 [m] Espesores: 7.5 - 9 - 12 -15 – 18 y 21 [mm] Tolerancias: espesor, +/- 0.65 [mm]; largo/ancho, + 0 [mm] /- 1.6 [mm]

En la Tabla 2.5 se presentan algunas especificaciones técnicas de las planchas de contrachapado obtenidas del catálogo de la forestal Arauco.

		Espesor	Peso promedio		
Espesor Nominal [mm]	[unidades]	Lámina caras [mm]	Kg/m^2	Kg/Tabl.	
7.5	3	2.54	4.0	12.0	
9	3	3.20	4.9	14.6	
12	5	2.54	6.5	19.4	
15	5	3.20	8.1	24.1	
18	7	2.54	9.7	2.9	
21	7	3.20	11.3	33.6	

Tabla	2.5:	Especificaciones	técnicas
-------	------	------------------	----------

Fuente: (ARAUCO)

Las propiedades mecánicas de las planchas varían dependiendo de los espesores de estas. El módulo de Poisson de las planchas es de 0,25. A continuación se presenta en la Tabla 2.6 un resumen con las principales propiedades para los espesores más utilizados y la forma en que están orientadas sus fibras.

Tipo de		9 n	nm	12 r	nm	15 r	nm	18 r	nm
solicitación	Unidad	<b>  </b> (1)	上(2)	<b>∥</b> (1)	上(2)	<b>∥</b> (1)	上(2)	<b>∥</b> (1)	上(2)
Tracción	Kg/cm2	299.1	311.1	368.5	330.2	406.7	452.3	319.0	363.2
Compresión	Kg/cm2	330.8	345.1	374.3	323.2	556.3	534.8	441.8	495.2
Módulo Rigidez	Kg/cm2	12777	12777	6102	6102	29350	29350	8994	8994
Flexión (en la cara)									
Límite Proporcional	Kg/cm2	439.4	943.1	427.2	358.1	630.2	480.1	305.0	621.9
Módulo Ruptura	Kg/cm2	582.5	1313.3	715.0	627.9	918.8	706.6	76.7	1051.2
Módulo Elasticidad	Kg/cm2	84455	164897	121752	173100	124613	252282	254230	181143

Tabla 2.6: Propiedades mecánicas de las planchas de contrachapado, Forestal Arauco

Fuente: (ARAUCO)

(1) orientación de las fibras en forma paralela

(2) orientación de las fibras en forma perpendicular




En la Figura 2.12 se aprecian las formas de orientación que pueden tener las fibras que componen los tableros de contrachapado.

Una importante característica es el hinchamiento, lo que puede variar las dimensiones de las planchas sustancialmente. Este proceso se debe a la transferencia de agua con el medio, tendiendo a buscar una condición de equilibrio higroscópico. La Tabla 2.7 muestra los distintos valores de hinchamiento para las planchas estudiadas.

Espesor nominal			Analas 0/
[mm]	Espesor %	Largo %	Ancno %
9	6.6	0.19	0.44
12	5.3	0.17	0.46
15	5.6	0.15	0.30
18	5.4	0.12	0.32
21	5.5	0.10	0.31

Tabla 2.7: Hinchamiento planchas de contrachapado

Fuente: (ARAUCO)

Por otra parte, si se expone madera con un cierto porcentaje de humedad en un ambiente seco esta libera agua y por consiguiente se contrae. Otra característica es su buena resistencia al fuego, con una clasificación F-15 (puede resistir más de 15 minutos expuesto al fuego pero menos de 30 minutos) (MINVU, 2014) igual a la clasificación de algunos tipos de tabiquerías en acero galvanizado. Por otro lado, comparado con el hormigón que presenta clasificaciones de F-90 hasta F-180 se encuentra muy por debajo. Al momento de quemarse las planchas solo presentan una descomposición química superficial, conservando las características mecánicas en su interior. Esto retrasa el tiempo de colapso de las obras en las cuales se han utilizado este material.

Visualmente las planchas de contrachapado poseen caras sin lijar y pueden aceptar defectos abiertos tales como nudos firmes e imperfectos de 40 [mm] de diámetro y grietas de hasta 20 [mm], en su cara visible y nudos de hasta 65 [mm] y grietas de hasta 25 [mm] en la trascara.

Dentro de los múltiples usos que se les da a las planchas, dentro de la construcción, están, cubiertas de techo y base de pisos, ampliaciones de viviendas y divisiones de interior (fabricación de tabiques), material para construcción de vigas y paneles, embalajes, cajones, etc.

## 3. CONTROL DE DEFORMACIÓN MODELO LINEAL

En la primera parte de este estudio se realizó la caracterización mecánica de los materiales a utilizar, el polímero PLA y las planchas de contrachapado. Para esto se llevó a cabo una recopilación de la información necesaria a partir de la bibliografía específica existente de cada material. Una correcta caracterización mecánica es esencial ya que esta información es la base para poder desarrollar un diseño óptimo. En segundo lugar se diseñó un grupo de uniones apoyado por el software AUTOCAD, enfocándose en la utilidad de diseño en tres dimensiones que ofrece el programa. Se diseñaron uniones con y sin pernos, estos también fueron diseñados en AUTOCAD. Además de las uniones, se diseñaron dos tipos de probetas, una para el ensayo de compresión axial y la otra para el ensayo a tracción.

En tercer lugar se realizó la modelaciones de las uniones utilizando el software ANSYS, además de la información recopilada en la caracterización mecánica. En

este paso se llevó acabo, inicialmente, un análisis lineal de las uniones para poder conocer el comportamiento general de estas, es decir, cual material llega a su falla primero, que controla esta falla, si la deformación o el esfuerzo.

### 3.1. FORMULACION TEORICA LINEAL

#### 3.1.1. CRITERIO DE RENDIMIENTO

El criterio de rendimiento se usa para relacionar el estado de esfuerzo multiaxial con el caso uniaxial. Un criterio de rendimiento común es el criterio de rendimiento de von Mises (también conocido como el criterio de esfuerzo de cizallamiento octaédrico o de energía de distorsión) (ANSYS, 2005). El estrés equivalente de von Mises se define con la expresión 3.1.1:

$$\sigma_0 = \sqrt{1/2[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]} \quad 3.1.1$$

## 3.2. DISEÑO DE LAS UNIONES

Se diseñaron un total de 9 uniones utilizando el software AUTOCAD versión 2016. Con la finalidad de disminuir la cantidad de PLA utilizado en las uniones, pero sin comprometer la resistencia de estas, se consideró un diseño de enrejado como se puede apreciar en la

Figura 3.1.



Figura 3.1: Modelo 3D unión en ANSYS

Este diseño, además, al ser simétrico permite una buena distribución de los esfuerzos a lo largo de la pieza. En la Figura 3.2 y Figura 3.3 se observa una vista en dos dimensiones de una unión, en la cual están representadas las dimensiones características de esta.



Figura 3.2: Vista costado unión



Figura 3.3: Vista longitudinal unión

Donde:

a= ancho de la unión

b= largo de la unión

c= espaciamiento longitudinal enrejado

d= espaciamiento vertical enrejado
H=altura de la unión
h= altura de los elementos de contrachapado
L= largo total de los elementos de contrachapado
e = sección típica de elemento
e<sub>contrachapado</sub> = espesor plancha de contrachapado

En el diseño de las uniones se mantuvieron como valor fijo las siguientes dimensiones: Altura de las planchas h=100 [mm], altura de las uniones de H=105 [mm], el ancho de las uniones de a=17 [mm], el espaciamiento vertical del enrejado de 14.5 [mm], la sección típica de elemento es e= 2.5 [mm] y el espesor de las planchas de contrachapado de  $e_{contrachapado}$  = 12 [mm]. En la Tabla 3.1 se especifican las dimensiones que fueron variadas:

Tabla 3.1: Dimensiones v	variables de l	las uniones
--------------------------	----------------	-------------

Unión	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b [mm]	100	100	100	200	200	200	500	500	500
L [m]	1	2	2,5	1	2	2,5	1	2	2,5
c [mm]	15.41	15.41	15.41	19.77	19.77	19.77	24.87	24.87	24.87

Cabe destacar que el largo máximo de 2.5 [m] fue seleccionado ya que en valores superiores a este las deformaciones eran demasiado altas y el programa ANSYS no permitía realizar un correcto análisis de esos modelos. A demás este largo considera dos piezas de contrachapado de igual dimensión, por ejemplo, para el caso L=1 [m] se consideró 2 planchas de largo igual a 0.5 [m] cada una.

### 3.3. MODELO LINEAL

Se realizaron 9 modelos (uno para cada unión), los cuales fueron analizados considerando un comportamiento lineal de los materiales, para esto se definieron como materiales isotrópicos, es decir que poseen las mismas propiedades físicas en todas las direcciones. En la Tabla 3.2 se observan los datos obtenidos de la caracterización mecánica de los materiales y que fueron utilizados para realizar el análisis lineal:

Tabla 3.2: Datos materiales
-----------------------------

Unidad	PLA	Contrachapado
E [MPa]	3145	14742 <sup>(1)</sup>
ט	0.33	0.25

(1) se consideró un promedio entre el valor de E para fibras paralelas y para fibras perpendiculares, con el fin de obtener resultados que puedan abarcar ambos tipos

Con:

E: Modulo de Young.

v: Coeficiente de Poisson.

En el análisis lineal se utilizó un mallado en forma automática para la unión y para los elementos de contrachapado se utilizó la opción de "body sizing" y se definió un tamaño de elemento de 15 [mm]. Este se puede observar en la Figura 3.4 y Figura 3.5. El mallado se utiliza para simplificar el análisis por elementos finitos. (Ñauta Ñauta & Vergara Idrovo, 2017)



Figura 3.4: Mallado unión PLA



Figura 3.5: Mallado elementos de contrachapado

En el modelación se consideró un contacto tipo "bonded" (contacto consolidado), el cual es un caso especial de análisis de contacto donde las dos superficies en contacto trabajan solidariamente. Una de las superficies se designa como la superficie objetivo, y la otra superficie se llama superficie de contacto. Este tipo de contacto permite soluciones más rápidas, ya que no hay problemas de convergencia de contactos, es conveniente para un análisis rápido y permite ejecutar análisis lineales y para los casos de deflexión pequeña y también permite análisis de gran deflexión (no lineal). (ANSYS R18.1, 2001)

En la Figura 3.6 se observan las superficies de contacto generadas por el software ANSYS, coloreadas de rojo para el elemento de contrachapado y de azul para la unión de PLA.



Figura 3.6 Superficie de contacto entre elemento de contrachapado y unión PLA

En los modelos se consideró una carga lineal aplicada sobre la unión entre ambas planchas de contrachapado, la cual está orientada de forma vertical, en este caso sobre el eje Z, tal y como se aprecia en la Figura 3.7.



Figura 3.7: Punto de aplicación de la carga

Además se consideró como condiciones de apoyo, empotramientos en los extremos del modelo (A y B) como se ilustra en la Figura 3.8.



Figura 3.8: Vista de empotramiento de extremos

## 3.4. RESULTADOS MODELO LINEAL

Dentro del análisis lineal, y con la finalidad de conocer la carga máxima con que la unión cumple con las condiciones de serviciabilidad (deflexiones) falla, se realizaron

iteraciones, variando el valor de la carga lineal aplicada. Como límite para estas iteraciones se realizó un control de deflexiones, en base a lo estipulado en la NCh 1198. Of 2006:

"La deformación máxima admisible de un elemento sometido a flexión se debe fijar, en general, de acuerdo al tipo de estructura, teniendo en cuenta la posibilidad de daño de los materiales de recubrimiento (tabiques, cielos, terminaciones, etc.) y las exigencias estéticas y funcionales. En ausencia de requisitos especiales para la deformación máxima admisible, se pueden adoptar los valores indicados en la Tabla 13". (INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2006)

En la tabla 13 de dicha norma se establece un límite de deformaciones como se observa en la expresión 4.1.1:

Donde:

L= luz efectiva de la viga

De lo anterior se calcularon 3 límites, uno por cada largo dando valores de: 2,78 [mm] para el largo de L=1 [m]; 5.56 [mm] para el largo de L=2 [m]; 6.94 [mm] para el largo de L=2.5 [m].

El valor de esfuerzo de fluencia ( $\sigma_y$ ) del contrachapado se obtuvo a partir de los datos provenientes de la caracterización mecánica, se utilizó un valor de 34,95[MPa] y 34,88 [MPa], en tracción ( $\sigma_{y+}$ ) y compresión ( $\sigma_{y-}$ ) respectivamente (estos valores representan el promedio entre los datos para fibras con orientación paralela y perpendicular para un espesor de 12 [mm] que presenta la Tabla 2.6). Con la finalidad de verificar que las uniones y elementos de contrachapado no superen la fluencia se realizó un chequeo de tensiones y deformaciones. Para el porcentaje de deformación de fluencia ( $\varepsilon_y$ ) se consideraron los siguientes valores:

• PLA: proveniente de la caracterización mecánica valores >0,025.

 Contrachapado: se calcularon considerando el módulo de elasticidad presentado en la Tabla 2.6, y para los esfuerzos de tracción y compresión se consideró los valores expuestos anteriormente. A continuación se presenta la expresión 3.4.1 utilizada en el cálculo:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \tag{3.4.1}$$

En la Tabla 3.3 se presentan los valores de deformación de fluencia calculados:

Tabla 3.3: Limites de deformación calculados

Orientación	Deformación
$\varepsilon_y$ +	0.00238
$\varepsilon_y$ -	0.00237

La Tabla 3.4 presenta un resumen de los resultados obtenidos en el análisis lineal. Para ver las tablas de resultados completas para cada unión ver anexo B.

			Unión PLA	4		Contra	achapado		
Unión	L [m]	P máx [kgf]	ε [mm/mm]	σ [MPa]	σx (+) [MPa]	σx (-) [MPa]	εx (+) [mm/mm]	εx (-) [mm/mm]	def. total [mm]
	1	360	0.0053	14.978	23.579	34.856	0.0016	0.0023	2.661
100x100	2	96	0.0021	5.717	11.413	18.331	0.00077	0.0011	5.079
	2.5	72	0.0018	5.194	10.559	14.509	0.00072	0.00099	7.297
	1	362,4	0.0048	11.8	23.694	34.88	0.0016	0.00228	2.651
200x100	2	108	0.0021	5.881	13.061	17.926	0.00088	0.0012	5.672
	2.5	72	0.0017	4.73	10.813	14.425	0.00073	0.00099	7.256
	1	366	0.0046	12.848	24.146	34.79	0.00161	0.00227	2.641
500x100	2	108	0.0022	5.734	13.146	17.779	0.00089	0.0012	5.598
	2.5	72	0.0015	4.729	10.573	14.323	0.00074	0.00098	7.166

Tabla 3.4: Tabla resumen resultados modelo lineal

El  $\sigma$  para la unión de PLA es el obtenido utilizando el criterio de rendimiento de Von-Mises (expresión 3.1.1). Por otro lado  $\sigma$ x (+-) es una tensión direccional y su valor es calculado utilizando la expresión 3.4.2.

$$\sigma_x = \varepsilon_x * E_x \qquad \qquad 3.4.2$$

En la Figura 3.9 y Figura 3.10 se aprecian los puntos y zonas en los cuales fueron medidos los valores presentados en la Tabla 3.4.



Figura 3.9: Puntos de medición en elemento de contrachapado



Figura 3.10: Zona de medición de la deflexión máxima

### 3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS MODELO LINEAL

En la Tabla 3.4 se aprecia que los elementos de contrachapado de largo 1 [m] alcanzaron su máximo esfuerzo y deformación en compresión, es decir, esos se encuentran en el mismo rango que el control de deformación. Los valores máximos en tracción estuvieron aproximadamente un 10% más bajo que el limite propio del material. En el resto de casos se aprecia claramente que los valores de  $\sigma x$  (+ -) y  $\epsilon x$  (+ -) están muy por debajo de los valores límites ( $\sigma y$  (+ -) y  $\epsilon y$ (+ -) ) establecidos anteriormente para el chequeo de tensión deformación.

Se observa que la carga máxima que puede soportar la unión de PLA, y con la cual se comporta dentro del rango del control de deformación, está directamente relacionada al largo de los elementos de contrachapado, a medida que se aumenta el largo, la carga disminuye. Si observamos por ejemplo, los valores de la unión 100x100 [mm], en cuyo caso la diferencia en el valor de la carga máxima entre los largos de 1 y 2.5 [m] es de aproximadamente un 80%. Este comportamiento se puede vislumbrar más claramente en la Figura 3.11.



Figura 3.11: Carga máxima PLA v/s largo elementos de contrachapado

También apreciamos en la Tabla 3.4 que a medida que el largo de los elemento de contrachapado aumenta, la deformación total también lo hace. Esto es algo esperable ya que al aumentar la distancia entre el apoyo y el punto de aplicación de la carga, aumento el valor del momento flector el cual se relaciona de forma directamente proporcional a la deformación. Esto se aprecia mejor en la Figura 3.12.



Figura 3.12: Curva de deformación total v/s largo de los elementos de contrachapado

# 4. MODELO NO LINEAL Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

Se realizó un análisis no lineal el cual permite observar un comportamiento de los materiales más apegado a la realidad.

En segundo lugar se llevó a cabo la impresión de todas las piezas diseñadas utilizando una impresora 3D modelo GUIDER FLASHFORGE de impresión por extrusión y un filamento de PLA color blanco marca ESUN3D.

En tercer lugar se realizaron los ensayos de compresión, tracción, los que tienen como objetivo obtener una primera caracterización experimental y poder validar el comportamiento mecánico del material. Además se ensayaron las uniones, con el objetivo de validar el comportamiento linear elástico de estas, contrastando con los modelos teóricos. Todos los ensayos fueron desarrollados en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad San Sebastián.

En cuarto lugar se realizó el análisis de los resultados obtenidos, teóricamente de las modelaciones y experimentalmente de los ensayos.

Finalmente se realizó un ajuste a los modelos teóricos en base a los resultados obtenidos experimentalmente.

## 4.1. FORMULACIÓN TEÓRICA NO LINEAL

### 4.1.1. ANTECEDENTES SOBRE EL ANÁLISIS NO LINEAL

Existen 3 fuentes principales de no-linealidades:

1) No linealidades geométricas: La configuración geométrica cambiante de una estructura que experimenta grandes deformaciones, puede causar un comportamiento no lineal. (ANSYS, 2005)

2) No linealidades del material: Una relación no lineal de tensión y deformación es otra fuente de no linealidades, como la plasticidad del metal, la cual se puede apreciar en la Figura 4.1. (ANSYS, 2005)



Fuente: (ANSYS, 2005)

3) Contacto: Incluir efectos de contacto es un tipo de no linealidad de "estado cambiante", donde puede producirse un cambio abrupto en la rigidez cuando los cuerpos entran en contacto o no entran en contacto. (ANSYS, 2005)
En un análisis estático no lineal, la rigidez [K] es dependiente del desplazamiento {x}, esto se vislumbra en la expresión 4.1.1.

$$[K(x)]\{x\} = \{F\}$$
 4.1.1

En la expresión 4.1.1 la relación entre la fuerza (F) y la respuesta {x} se obtiene a través de un proceso iterativo, por lo cual no es conocida de antemano. La curva obtenida del proceso iterativo puede ser no lineal, por lo cual al duplicar la fuerza (F) no necesariamente se duplicara el valor del desplazamiento {x} y del esfuerzo. (ANSYS, 2005)

#### 4.1.2. MÉTODO NEWTON-RAPHSON

Las soluciones no lineales requieren de varias iteraciones, y en estas la relación real entre la carga y el desplazamiento (que se muestra con una línea amarilla punteada en la Figura 4.2) no se conoce de antemano. En consecuencia, se realiza una serie de aproximaciones lineales con correcciones, cabe destacar que esta es una explicación simplificada del método Newton-Raphson (se muestra como líneas rojas continuas en la Figura 4.2). (ANSYS, 2005)



Dentro de las aproximaciones lineales, la carga total Fa se aplica en la iteración 1 y el resultado es x1. A partir de los desplazamientos, se pueden calcular las fuerzas internas F1. Si Fa≠F1, entonces el sistema no está en equilibrio, por lo tanto, se calcula una nueva matriz de rigidez (pendiente de la línea roja) en función de las condiciones actuales. La diferencia entre Fa y F1 (Fa - F1) representa el desequilibrio o las fuerzas residuales. Estas fuerzas deben ser lo suficientemente pequeñas para que la solución converja. Todo el proceso iterativo se repite hasta que Fa=Fi (Fi es el valor de la fuerza interna en la iteración "i"), cuando sucede esto se alcanza el equilibrio y se dice que la solución es convergente. (ANSYS, 2005)

#### 4.1.3. CONTACTO

Los cuerpos en contacto físico no se penetran entre sí, por esta razón el programa debe establecer una relación entre las dos superficies para evitar que se atraviesen durante el análisis. ANSYS ofrece varias formulaciones de contacto diferentes para imponer la compatibilidad en la interfaz de contacto. A continuación se desarrollaran solo las utilizadas en este estudio, penalidad pura (pure penalty), que es la utilizada por defecto en ANSYS para contactos "pegados" (bonded), y lagrange aumentado (augmented lagrange), la cual es recomendada con contactos friccionales y sin fricción en problemas de grandes deformaciones. Ambas son formulaciones de contacto basadas en penalidades. La diferencia principal es que el método de lagrange aumentado aumenta el cálculo de la fuerza de contacto. (ANSYS, 2010) A continuación se presentan las relaciones que definen los métodos:

Penalidad pura
$$F_{normal} = K_{normal} * x_{penetración}$$
4.1.2Lagrange  
aumentado $F_{normal} = K_{normal} * x_{penetración+\lambda}$ 4.1.3

Con:

F = Fuerza de contacto

K = Rigidez de contacto

X = Distancia de penetración

En la expresión 4.1.3 el termino  $\lambda$  es calculado internamente, este tiene como finalidad aumentar la fuerza para reducir la sensibilidad a la rigidez de contacto. Debido a lo anterior el método de Lagrange aumentado debería producir menos penetración que el método de penalidad pura, pero podría llevar más iteraciones parar llegar a converger. Idealmente para una rigidez de contacto infinita, no habría penetración. Pero esto no es numéricamente posible utilizando métodos basados en penalidades, pero mientras la penetración sea pequeña, se obtendrán resultados precisos de la solución. (ANSYS, 2010)

#### 4.1.4. SOLUCIÓN NO LINEAL

La simulación generalmente resuelve todos los modelos no lineales con un paso de carga, pero si durante el transcurso del análisis la simulación presenta problemas para converger, esta dividirá la solución. Esto significa que la carga será aplicada en incrementos pequeños (sub-pasos) lo que facilita la convergencia de la respuesta. Por lo general, esto se repite hasta que se aplica el 10% de la carga total. Si la solución aún no converge, la simulación se detendrá y generará un mensaje de error.(ANSYS, 2005)

#### 4.2. MODELO NO LINEAL

Para el análisis no lineal se construyó una curva esfuerzo-deformación simplificada para el PLA, utilizando los datos de la Tabla 4.1. En la Figura 4.3 se presenta un ejemplo de una curva no simplificada de PLA.



Figura 4.3: Curva esfuerzo-deformación PLA (Wittbrodt & M. Pearce, 2015)

Tabla 4.1: Propiedades	mecánicas PLA para aná	lisis no-lineal
Esfuerzo ultimo	Esfuerzo de	Deformación

[MPa]

fluencia [MPa]

máxima [%]

PLA	16.538	15.96	0.61	

A continuación se presenta la curva esfuerzo-deformación (ver Figura 4.4) confeccionada con los datos ya mencionados. Para esta simplificación se consideró como valor limite el esfuerzo de fluencia, por lo cual para valores superiores el elemento se supone plastificado, contrario a esto, el elemento tiene un comportamiento lineal elástico antes de alcanzar el esfuerzo de fluencia.



Figura 4.4: Curva esfuerzo-deformación PLA para análisis no lineal

De la misma forma que para el PLA, para el contrachapado también se creó una curva esfuerzo-deformación (ver Figura 4.5). En este caso se consideraron los valores de la Tabla 2.6, para un espesor de 12 [mm].



Figura 4.5: Curva esfuerzo-deformación contrachapado para análisis no lineal

Se llevó a cabo el análisis de la unión completa, es decir, considerando los elementos de contrachapado y PLA. En este caso se consideraron contactos friccionales con un coeficiente de fricción de 0.2, como se aprecia en la Figura 4.6.



Figura 4.6: Tipo de contacto friccional

Para la unión de PLA y parar los elementos de contrachapado se utilizó el "meshado" automático que ofrece el software. En la Figura 4.7 se visualiza de mejor manera lo anteriormente expuesto.



Figura 4.7: Meshado de todos los elementos

Además se consideró como condiciones de apoyo empotramiento en los extremos, considerando una superficie de 10x10 [cm] para cada apoyo (ver Figura 4.8)



Figura 4.8: Empotramiento en un extremo del elemento de contrachapado

En los modelos se consideró una carga aplicada sobre una superficie de 2.5x10 [cm] en la parte central de las uniones, orientada de forma vertical, en este caso sobre el eje Z (ver Figura 4.9).



Figura 4.9: Zona de aplicación de la carga

## 4.3. MODELO NO LINEAL CON PERNOS

Parar que la unión fuera capaz de resistir esfuerzos de tracción se diseñaron pernos y tuercas de ½ pulgada (12.70 mm) tomando como medidas de referencia las entregadas por el catalogo técnico de productos de la empresa Reinike. (Reinike Hermanos S.A., pág. 7)

Para el dimensionamiento de las perforaciones en las uniones se utilizó una medida de 9/16 pulgadas (14.29 mm), este valor se extrajo de la tabla J3.3 del código AISC 360-10. (Aguirre Ahumada, 2010, pág. 198)

A continuación se presenta una vista conceptual en 3 dimensiones del perno y la tuerca en la Figura 4.10.



Figura 4.10: Vista conceptual perno y tuerca 1/2 pulgada

Para las uniones se consideraron las dimensiones que se aprecian en la Figura 4.11 y Figura 4.12. Cabe destacar que al momento de la impresión se optó por una densidad igual para todas las uniones de 60%, ya que una densidad de 15% es muy baja para ser utilizada en uniones de sistemas estructurales. A demás se consideró una dirección vertical de impresión.



Figura 4.11: Vista frontal acotada unión 100x100 con perforaciones para pernos. Unidades en [mm]



Figura 4.12: Vista frontal acotada unión 200x100 con perforaciones para pernos. Unidades en [mm]

Estas piezas fueron modeladas en ANSYS para tener datos teóricos con los cuales comparar los obtenidos en los ensayos experimentales. En esta modelación se consideraron superficies de 10x10 cm empotradas en los extremos de los elementos de contrachapado, como se muestra en la Figura 4.13.



Figura 4.13: Empotramiento elementos de contrachapado

Se consideró además un carga aplicada en una superficie de 2.5x10 cm, en el centro de las uniones de PLA (ver Figura 4.14)



Figura 4.14: Superficie de aplicación de carga

Paro la correcta modelación de los pernos estos se consideraron lisos. Los tipos de contactos entre las distintas superficies fueron: entre perno/tuerca y PLA, friccionales con un coeficiente de fricción de 0,2, entre perno/tuerca y contrachapado friccionales también con un coeficiente de 0,2 y entre perno y tuerca se consideró que estos están unidos de manera solidaria (bonded), ver Figura 4.15.



Figura 4.15: Zona de contacto entre perno y tuerca

## 4.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 4.4.1. EQUIPAMIENTO Y DISPOSICIÓN EXPERIMENTAL

Para la realización de los ensayos de compresión, tracción y de flexión de las probetas, se utilizaron distintos equipos de medición, los cuales serán detallados a continuación.

Con el fin de obtener los registros de las cargas aplicadas a las distintas probetas se utilizó una celda de carga modelo LCHD-50K (ver Figura 4.16), la que puede soportar cargas de hasta 50 [KLb] o 22.7 [tonf] (las especificaciones técnicas de la celda de carga se presentan en el ANEXO 1). Para la aplicación de las cargas se utilizó un cilindro hidráulico y una bomba (Figura 4.17), con una capacidad de hasta 10 [tonf].



Figura 4.16: Imagen referencial de una celda de carga de bajo perfil



Figura 4.17: Imagen referencial cilindro hidráulico

Para llevar a cabo la medición de las deformaciones en las probetas se utilizaron strain gages o galgas extensiométricas (Figura 4.18). Estos son sensores cuya resistencia varía con respecto a la fuerza aplicada sobre la superficie. El cambio resultante en la longitud debido a esta fuerza se refleja en la resistencia. Luego la deformación correspondiente se mide en términos de la resistencia eléctrica del alambre de aluminio, la cual varía linealmente con la tensión. Es de importancia que la lámina y el agente adhesivo trabajen juntos en la transmisión de la presión. (Omega, 2017)



Figura 4.18: Imagen referencial de un strain gage

Los strain gage presentan distintas configuraciones dependiente del estado de los esfuerzos, por ejemplo para esfuerzos biaxiales se utilizan strain gage de roseta, para esfuerzos uniaxiales se utilizan strain gage uniaxiales (Figura 4.18).

El strain gage más ampliamente utilizado es el confinado en papel metálico. Consiste en un cable muy fino o papel aluminio dispuesto en forma de grilla con el fin de maximizar la cantidad de metal sujeto a la deformación en la dirección paralela. La grilla está pegada a un fino respaldo llamado "carrier", el cual está sujeto directamente a la pieza que se desea medir. (San Martín Ayala , 2013)

Parar los ensayos se utilizaron strain gages tipo N11-FA-8-120-11 marca Showa, con las siguientes características: Largo de 8 [mm], resistencia de 120+-3% [ $\Omega$ ], factor del strain gage de 2.07+-1%. Cada uno de los strain gage se conectó a un adaptador NI 9944 (Figura 4.19) que es un módulo de cuarto de puente, este posee terminales de tornillo en un extremo y un conector RJ 50 hembra en el otro, Posee una resistencia interna de 120  $\Omega$ .



Figura 4.19: 1) NI-9944 terminales de tornillo; 2) NI-9944 conector RJ50 hembra

La celda de carga y el strain gage se conectaron a un dispositivo de entrada analógica de 4 canales NI USB-9237 (ver Figura 4.20), utilizando conectores RJ50. Este dispositivo posee una frecuencia máxima de muestreo de 51,2 kHz y voltajes de excitación de 2.5, 3.3, 5 y 10 [V].



Figura 4.20: NI USB-9237 NATIONAL INSTRUMENTS

Para la celda de carga se realizó una conexión de puente completo y para el strain gage una conexión de un cuarto de puente, ambos variaciones del puente de wheatstone el cual será detallado a continuación. El puente de Wheatstone desarrollado en 1843 por Sir Charles Wheatstone (1802 - 1875), es utilizado para medir diferencia en resistencias eléctricas, por lo cual es muy adecuado para medir las variaciones de resistencia en un strain gage. El puente está conformado por cuatro resistencias unidas en serie – paralelo, tres de ellas tienen valor conocido y están para completar el circuito, la otra puede ser un strain gage y su valor es determinado. (San Martín Ayala , 2013)



Figura 4.21: Puente de Wheatstone Fuente: (Horffmann)

En la Figura 4.21 se aprecia la forma del puente de Wheatstone. "Las cuatro ramas del puente están constituidas por las resistencias R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> y R<sub>4</sub>. Los nodos están numerados y codificados por color de acuerdo al estándar HBM para designación de conexiones de transductores e instrumentos. Si los nodos 2 y 3 – la llamada excitación diagonal - están conectados a un voltaje conocido U<sub>E</sub> (input del puente o voltaje de excitación), entonces el voltaje U<sub>A</sub> (voltaje de salida del puente) aparece entre los nodos 1 y 4, la llamada diagonal de medición. El valor del voltaje de salida depende de la relación entre las resistencias R<sub>1</sub>:R<sub>2</sub> y R<sub>4</sub>:R<sub>3</sub>." (Horffmann, pág. 1) En función de lo que se desea medir se pueden utilizar uno o más strain gages. Para cada arreglo existe una designación, puente completo, medio puente o cuarto de puente. Cabe mencionar que estas designaciones no son del todo correctas, ya que el circuito utilizado para la medición es siempre completo. (Horffmann) En la Figura 4.22 se aprecian las distintas variaciones de los puentes de

Wheatstone.



Figura 4.22: Diferentes versiones de los circuitos de puente de Wheatstone Fuente: (Horffmann)

La configuración de puente completo (Figura 4.23) está compuesta en su totalidad por strain gages los cuales poseen análogas características. "En esta configuración se asume que las conexiones dentro del puente son cortas y el efecto de interferencia es despreciable": (Horffmann, pág. 17). El puente completo es utilizado para realizar mediciones de cargas y deformaciones por flexión, deformaciones axiales y deformaciones por corte y torsión.



Figura 4.23: Configuración de puente completo

Para poder obtener el valor de la medición realizada por el strain gage se utiliza la expresión 4.4.1. La cual utiliza una relación entre las diferencias de voltaje producidas en el circuito.

$$strain = \frac{-2Vr}{GF[(v+1) - Vr(v-1)]}$$
 4.4.1

Donde:

Vr: Relación entre el voltaje medido y el voltaje de excitación.

GF: Factor del strain gage

Strain: Deformación o tensión

v: Módulo de poisson del material que se está midiendo

La configuración de cuarto de puente consta (Figura 4.24) de un strain gage en una de sus ramas, mientras que en el resto se utilizan resistencias pasivas de valor nominal idéntico al del strain gage en su estado no deformado. (Badiola, 2004). Sirve para medir deformaciones por flexión y axiales.



Figura 4.24: Configuración de cuarto de puente

Para poder obtener el valor de la medición realizada por el strain gage se utiliza la expresión 4.4.2 la cual utiliza una relación entre las diferencias de voltaje producidas en el circuito.

$$strain = -4 * \frac{Vr}{GF(1+2Vr)}$$
 4.4.2

Donde:

Vr: relación entre el voltaje medido y el voltaje de excitación.

GF: factor del strain gage

Strain: Deformación

Para el procesamiento de los datos provenientes de los dispositivos anteriormente mencionados se codifico utilizando el software MatLab. Dentro de esta codificación se consideró un tiempo máximo de mediciones de 60 [s], con un tiempo entre cada medición de 0.5 [s]. Para el procesamiento de los datos provenientes de la celda de carga se utilizó la expresión 4.4.3.

$$Load = -Vex * \left(\frac{50000}{30.060}\right) * 1000 * \left(dato - (-9e - 06)\right) * 0.4535924$$
 4.4.3

Con:

Vex: Voltaje de excitación.

30,060 [mVdc]: Sensibilidad de la celda de carga.

Dato: Valor medido del instrumento.

50000 [Lbs]: Capacidad máxima de la celda de carga.

0.4535924: Factor de conversión de [Lbs] a [kgf].

1000: Conversión de mili-volts a volts.

Para el cálculo de la deformación a partir de los datos entregados por el strain gage se utilizó la expresión 4.4.2.

Además se utilizó un medidor de desplazamiento digital Mitutoyo 543-690, y una cámara de video para registrar las mediciones de desplazamiento vertical.

A continuación se presenta la forma en que fueron montados los equipos para los distintos ensayos. En la Figura 4.25 se aprecia el montaje para el ensayo de compresión, en este se utilizó la viga de reacción como soporte de los equipos.



Figura 4.25: Montaje y disposición de equipos para ensayo compresión axial

Para el ensayo de tracción se diseñó un marco pequeño (en comparación al conformado por la viga de reacción) en base a 3 placas de acero. Una de estas se utilizó como punto de anclaje de la probeta y las otras dos se utilizaron para la transferencia de carga. En la Figura 4.26 se puede apreciar el esquema de la configuración del ensayo.



Figura 4.26: Montaje y disposición de equipos de ensayo en tracción

Finalmente para el ensayo en flexión de las uniones, se utilizó el mismo tipo de montaje que para el ensayo en compresión, agregando el medidor de desplazamiento, la cámara de video y una placa de acero de superficie 2.5x10 cm utilizada para obtener una distribución lo más homogénea posible de la carga sobre la unión, esto se puede apreciar en la Figura 4.27. Además por el largo de las uniones se utilizaron dos puntos de apoyo en los extremos de estas, y en los cuales por medio de placas de acero se empotraron.


Figura 4.27: Forma de aplicación de la carga

En la Figura 4.28 se aprecia en detalle el montaje de los equipos y de las uniones y en la Figura 4.29 se observa el setup completo utilizado para el ensayo.



Figura 4.28: Montaje y disposición de equipos de ensayo en flexión de las uniones



Figura 4.29: Montaje y disposición completa de los equipos para ensayo de flexión

### 4.4.2. ENSAYO DE COMPRESIÓN

Este ensayo tiene como finalidad conocer cómo se comporta el elemento frente a un esfuerzo de compresión, comparando el esfuerzo aplicado contra la deformación, obteniéndose como resultado la curva esfuerzo-deformación del material.

Se confeccionaron 4 probetas de PLA rectangulares de dimensiones 2.5x2.5x10 [cm]. Dos de las probetas se imprimieron horizontalmente, es decir, se encontraban apoyadas sobre su cara mayor en la cama de impresión, ver Figura 4.30 . Las otras dos probetas fueron impresas verticalmente, es decir, se encontraban apoyadas sobre una de sus caras menores, como se aprecia en la Figura 4.31 . Además, para cada orientación se seleccionaron dos densidades distintas, de 15 y 60 %. El detalle de las probetas para ensayos a compresión se muestra en la Tabla 4.2.

Probeta	Descripción			
CV15	Probeta impresa verticalmente con un 15% de densidad			
CV60	Probeta impresa verticalmente con un 60% de densidad			
	Probeta impresa horizontalmente con un 15% de			
CHIS	densidad			
	Probeta impresa horizontalmente con un 60% de			
	densidad			

#### Tabla 4.2: Terminología probetas ensayo a compresión



a)

b)

Figura 4.30: a) probeta CH15; b) probeta CH60



Figura 4.31: a) probeta CV15; b) probeta CV60

Tabla 4.3: Datos	de impresión	probetas para	ensayo en	compresión
------------------	--------------	---------------	-----------	------------

Probeta	Tiempo impresión	Cantidad de filamento [m]
CV15	1 h 36 min	9.09
CV60	3 h 57 min	21.69
CH15	1 h 39 min	10.94
CH60	5 h 14 min	30.19

Los tiempos de impresión y cantidad de material utilizado en cada probeta se muestran en la Tabla 4.3.

A cada una de las probetas se le instaló sobre una de las caras y en la parte central un strain gage (ver Figura 4.32) Este se montó aplicando un pegamento llamado SG401 de secado instantáneo.



Figura 4.32: Vista de strain gage instalados

A todas las probetas se les aplicó la carga de forma paralela al largo mayor utilizando una placa de acero entre el gato hidráulico y la probeta en sí, para tener una buena distribución de las cargas. Esta además fue aplicada constantemente hasta alcanzar la fluencia del material. Lo anterior puede apreciarse en la Figura 4.33.



Figura 4.33: Forma de aplicación de carga ensayo a compresión

#### 4.4.3. ENSAYO A TRACCIÓN

En la Figura 4.34 y Figura 4.35 se aprecia un esquema de la pieza. Los elementos que se encuentran perforados en la parte superior e inferior de la pieza tienen como finalidad permitir el montaje de ésta a las placas de acero del equipo de ensayo, mediante la utilización de pernos de acero de 5/16 [in] y 2 [in] de largo. La zona media de la probeta presenta el mismo largo y sección que la probeta a compresión.



Figura 4.34: Vista frontal pieza para ensayo a tracción. Unidades en [mm]



Figura 4.35: Vista superior pieza para ensayo a tracción

Se imprimieron 2 probetas con densidades de 15% y 60 % cada una, dispuestas verticalmente sobre la cama de impresión. Solo se imprimieron de esta forma por el buen comportamiento que mostraron las probetas a compresión impresas de esta forma. El detalle de las piezas se aprecia en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Terminología probetas ensayo tracción

Probeta	Descripción
TV15	Probeta impresa verticalmente con un 15% de densidad
TV60	Probeta impresa verticalmente con un 60% de densidad

En la Tabla 4.5 se muestran los tiempos y cantidades de material empleados en las impresiones.

Tabla 4.5: Datos	de impresión	probetas para	ensayo de	tracción
------------------	--------------	---------------	-----------	----------

Probeta	Tiempo impresión	Cantidad de filamento [m]
TV15	10 h 24 min	43.41
TV60	19 h 25 min	91.38

Por la forma de la probeta se le tuvo que agregar apoyos a la parte superior para poder extruir las capas superiores que se encuentran en voladizo, como se ve en la Figura 4.36:



Figura 4.36: Soportes ramificados generados automáticamente por programa de impresión

A cada una de las piezas se le instaló sobre una de las caras, luego de prepararla con una lija al agua para homogenizar la superficie de contacto, un strain gage (ver Figura 4.37), de iguales características que los utilizados en el ensayo a compresión axial.



Figura 4.37: Vista de strain gages instalados en probetas para ensayo tracción

Para asegurar una correcta transferencia de la carga ejercida por el cilindro hidráulico sobre la probeta, se dejó el marco perfectamente simétrico y nivelado. Cabe destacar que el cilindro al ejercer carga sobre el marco provocaba un desplazamiento en éste, lo que a su vez traccionaba la pieza apernada en su parte superior como se observa en la Figura 4.38.



Figura 4.38: Marco de nivelado de ensayo a tracción

### 4.4.4. ENSAYO DE UNIONES A FLEXIÓN

Se ensayaron 5 uniones, sus características y denominación se presenta a continuación en la Tabla 4.6:

Denominación	Descripción		
U1	Unión 100x100 [mm]. Densidad 60% <sup>(1)</sup>		
U2	Unión 100x100 [mm]. Densidad 60% <sup>(2)</sup>		
U4	Unión 200x100 [mm]. Densidad 60% <sup>(1)</sup>		
U3	Unión 100x100 [mm] con pernos y		
	tuercas de ½ pulgada. Densidad 60% $^{(1)}$		
U5	Unión 200x100 [mm] con pernos y		
	tuercas de ½ pulgada. Densidad 60% <sup>(1)</sup>		

Tabla 4.6: Descripciór	ı y	denom	inación	uniones
------------------------	-----	-------	---------	---------

(1) Piezas impresas de la forma a) de la Figura 4.39

(2) Pieza impresa de la forma b) de la Figura 4.39



Figura 4.39: Posicionamiento de las piezas sobre la cama de impresión

En la Figura 4.39, a) representa a la pieza apoyada sobre una de las caras menores con enrejado, en b) se observa la pieza apoyada sobre una de las cara por la cual se introduce el elemento de contrachapado. En ambos casos el cabezal de impresión se desplaza en torno a los ejes x e y, y la cama de impresión se desplaza sobre el eje z.

A continuación en la Tabla 4.7 se presentan los datos de impresión de las uniones, tiempo y cantidad de material utilizado.

Probeta	Tiempo impresión	Cantidad de filamento [m]
U1	11h 22 min	18.77
U2	11 h 25 min	17.47
U4	23h 10 min	39.82
U3	11 h 9 min	19.31
U5	24 h 26 min	42.41
8 Pernos	4 h 16 min	3.52
8 Tuercas	1 h 28 min	19.96

Tabla 4.7: Datos de impresión probetas para ensayo en flexión de las uniones

Para poder medir las deformaciones se instaló un strain gage en uno de los elementos de contrachapado, a 5 cm de la unión de PLA, por el lado que estaría sometido a tracciones como se aprecia en la Figura 4.40. No se instalaron strain gages en la unión por la configuración propia de esta ya que no presentaba superficies planas de un tamaño tal que abarcara la dimensión total del strain gage.



Figura 4.40: Strain gage instalado en elemento de contrachapado

# 5. ENSAYOS TRACCIÓN Y COMPRESIÓN

## 5.1. RESULTADOS ENSAYO DE COMPRESION AXIAL

A continuación en la Figura 5.1, y Figura 5.2 se presentan las curvas obtenidas del ensayo de las cuatro probetas de PLA ensayadas en compresión axial.



Figura 5.1: Curvas esfuerzo-deformación probetas CH15 (izquierda) y CV15 (derecha)



Figura 5.2: Curvas esfuerzo-deformación probetas CH60 (izquierda) y CV60 (derecha)



Figura 5.3: Direcciones de análisis ensayo a compresión

En la Figura 5.3 se aprecian las orientaciones que se consideraron en el análisis. De los gráficos anteriores se extrajeron los valores más representativos, estos fueron, el esfuerzo último, el esfuerzo de fluencia, para el cual se utilizó como criterio de obtención el límite de proporcionalidad, que es la tensión para la cual la curva tensión-deformación deja de ser lineal, el valor de la deformación en el punto de esfuerzo último y la deformación de fluencia. Los valores anteriormente mencionados se encuentran presentados en la Tabla 5.1.

	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación
Probeta	ultimo	de fluencia	en el esfuerzo	de fluencia
	[MPa]	[MPa]	ultimo	
CV15	6.991	6.222	0.01962	0.01275
CV60	16.538	15.96	0.006096	0.005837
CH15	2.855	2.81	0.01255	0.01052
CH60	11.803	11.48	0.007204	0.006736

Tabla 5.1: Valores representativos de las curvas esfuerzo-deformación

En la Figura 5.4 y Figura 5.5 se presentan las curvas experimentales (azul) y las curvas representativas (naranjo), la cual fue creada graficando los puntos representativos mostrados en la Tabla 5.1, de cada probeta.



Figura 5.4: Curva experimental y representativa probetas CH15 (izquierda) y CV15 (derecha)



Figura 5.5: Curva experimental y representativa probetas CH60 (izquierda) y CV60 (derecha)

# 5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS ENSAYO DE COMPRESIÓN AXIAL

De la Tabla 5.1 se aprecia que la forma de impresión de las piezas está directamente relacionada con su resistencia. Las piezas que fueron impresas verticalmente presentaron resistencias mayores que las que fueron impresas de forma horizontal. Si se comparan piezas con una misma densidad, pero con una forma de impresión distinta, por ejemplo, las piezas de 60% tenemos diferencias en su resistencia de aproximadamente un 29%. Y si comparamos las piezas de densidad 15% la diferencia es aún mayor, alcanzando un 60% de diferencia en su resistencia. Esta diferencia se debe a la conformación interna que presenta cada pieza y a la posición en la que fueron cargadas durante el ensayo. Ambas, como se puede apreciar en la Figura 5.6, exhiben una estructura interna en forma de panal de abeja, la cual presenta una buena distribución de los esfuerzos, esto solo si son cargadas de una determinada forma (ver Figura 5.7)





a)

b)

Figura 5.6: a) Pieza impresa verticalmente; b) Pieza impresa horizontalmente



Figura 5.7: Formas de cargar las piezas

La probeta CH15 fue cargada de la forma b) como se aprecia en la Figura 5.7, esta tuvo un comportamiento de acuerdo a lo esperado, presentando los menores valores de resistencia. Además presentó una considerable variación en su altura, luego de colapsar algunas capas del material en la base como se puede apreciar en la Figura 5.9, esto en una primera instancia provocó el corte de los cables que unían el strain gage con el conector NI 9944, lo que no permitió el registro de datos, razón por la cual se realizó un segundo ensayo tomando en consideración lo ocurrido en la primera prueba. La probeta CH60 presento una deformación de algunas capas de material, como se aprecia en la Figura 5.8. La deformación pudo producirse por un pequeño desplazamiento de la probeta lo cual provoco una excentricidad en la carga.





Figura 5.9: Falla probeta CH15 a) Vista frontal; b) Vista lateral





a) b)

Figura 5.8: Falla probeta CH60 a) Vista frontal; b) Vista superior



Figura 5.11: Falla probeta CV60 a) Vista frontal; b) Vista lateral



Figura 5.10: Falla probeta CV15 vista frontal

La probeta CV60 presento una deformación en uno de los bordes superiores, producida por el expansión de alunas capas del material (curvaturas que se pueden

apreciar en la Figura 5.11) para liberar la presión interna. Esto produjo el desprendimiento de capas de material en el borde opuesto.

La probeta CV15 presento un comportamiento similar a la probeta CV60, pero en menor magnitud, debido a que estuvo sometida a cargas menores.

Se calculó el módulo de elasticidad en compresión axial de cada una de las piezas ensayadas, realizando una regresión lineal a los puntos de la curva esfuerzodeformación, considerando solo los que se encuentran bajo el límite de fluencia, es decir, dentro del rango elástico. Las ecuaciones y valores obtenidos de las regresiones lineales se presentan en la Tabla 5.2.

Drobata	Founda la resta	Coef. de determinación
Propeta	Ecuación de la recia	R <sup>2</sup>
CV15	y = 507.43x + 0.4836	0.9877
CV60	y = 2124.01x + 2.253	0.9844
CH15	y = 257.92x + 0.0492	0.994
CH60	y = 1654.60x - 0.4146	0.9791

Tabla 5.2: Resultados regresión lineal ensayo compresión axial

En la Figura 5.12 y Figura 5.13 se observan las líneas de tendencia graficadas en conjunto con la nube de puntos utilizada de cada ensayo.



Figura 5.12: Líneas de tendencia probetas CH15 (izquierda) y CV15 (derecha)



Figura 5.13: Líneas de tendencia probetas CH60 (izquierda) y CV60 (derecha)

Los valores de los coeficientes de determinación al ser muy cercanos a 1 indican que las dispersiones entre los puntos son pequeñas, por lo cual la línea de tendencia es una buena representación de la nube de puntos que conforman las curvas esfuerzo-deformación de cada ensayo. En las ecuaciones de la recta, la pendiente (valor que acompaña a "x") representa el módulo de elasticidad en compresión axial de cada probeta. Estos valores son presentados en la Tabla 5.3.

Probeta	E [MPa]
CV15	507.43
CV60	2124.01
CH15	257.92
CH60	1654.6

Tabla 5.3: Módulos de elasticidad en compresión axial

Estos valores están dentro de los rangos que se pueden encontrar en bibliografías relacionadas, entre 375 y 2240 [MPa] ( (Roa Sierra, 2017, págs. 75-76).

En las curvas de las probetas CV60 y CH60 (Figura 5.2) se observa un comportamiento poco dúctil, ya que al alcanzar la fluencia la probeta se deforma muy poco antes de fallar. Por otro lado al analizar las curvas de las probetas CV15

y CH15 (Figura 5.1) se observa una mayor ductilidad, pudiendo deformarse más al llegar a la fluencia.

## 5.3. RESULTADOS ENSAYO DE TRACCIÓN

En la Figura 5.14 se presentan las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de los ensayos a tracción de las piezas.



Figura 5.14: Curvas esfuerzo-deformación probetas TV15 (izquierda) y TV60 (derecha)

De los gráficos anteriores solo se puede extraer el valor del módulo de elasticidad y el esfuerzo máximo que alcanzo cada probeta, ya que estas fallaron antes de alcanzar la fluencia, por lo cual no es posible extraer los valores representativos de las curvas. En la Tabla 5.4 se detallan los valores del esfuerzo máximo que alcanzaron las probetas antes de fallar.

Probeta	Esfuerzo [MPa]
TV15	1.846
TV60	4.975

Tabla 5.4: Valores esfuerzo de falla ensayos a tracción

## 5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS ENSAYO DE TRACCIÓN

De igual forma que en el ensayo a compresión, la pieza que presentó mayor resistencia fue la impresa con una densidad de 60%.

Ambas piezas presentaron una falla frágil, sin haber alcanzado la fluencia, esto debido a que la falla se produjo por el desprendimiento de la parte superior de la pieza, como se puede apreciar en la Figura 5.16 y Figura 5.15, al desgarrarse algunas capas del material.



a)

b)

Figura 5.15: a) falla en pieza con 15% de densidad; b) falla en pieza con 60% de densidad



Figura 5.16: Desprendimiento de la parte superior de la pieza ensayada

Esta falla se puede explicar tomando en consideración la forma en que se imprime la pieza, ya que la impresora extruye el material en capas de aproximadamente 1 mm de altura y cada capa se une a la siguiente con una película muy fina de material, también extruido, por lo cual al traccionarlas es relativamente sencillo separar un capa de otra. Contrario a lo anterior, si se imprime con las capas orientadas paralelamente a la carga, será más complicada que se produzca un desprendimiento de una de las capas.

De la misma forma que con las curvas de los ensayos a compresión, se calculó el módulo de elasticidad en tracción realizando una regresión lineal a los puntos de la curva esfuerzo-deformación. Las ecuaciones y valores obtenidos de las regresiones lineales se presentan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: F	Resultados	regresión	lineal	ensayo	a tracción
--------------	------------	-----------	--------	--------	------------

Droboto	Ecuación línea de	Coef. de determinación
FIODela	tendencia	R <sup>2</sup>
TV15	y = 576.59x - 0.4609	0.9963
TV60	y = 1976.6x – 1.1498	0.997

En la Figura 5.17 se observan las líneas de tendencia graficadas en conjunto con la nube de puntos de los datos de cada ensayo.



Figura 5.17: Líneas de tendencia probetas TV15 (izquierda) y TV60 (derecha)

El valor de los módulos de elasticidad en tracción (pendiente de la línea de tendencia) se muestra a continuación en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Módulos de elasticidad en tracción

Probeta	E [MPa]
TV15	576.59
TV60	1976.60

Los valores de módulo de elasticidad en compresión y en tracción son muy parecidos, como se esperaría para este tipo de material. Esto se puede ver mejor graficando en conjunto las curvas en tracción y en compresión, como en la Figura 5.18 y Figura 5.19 y luego realizando una regresión lineal para observar la correlación entre el esfuerzo y la deformación.



Figura 5.18: curva esfuerzo-deformación probeta TV60 (azul) y CV60 (rojo)



Figura 5.19: Línea de tendencia conjunta probeta TV60 y CV60

De la regresión lineal se obtuvo el coeficiente de correlación lineal de Pearson, con un valor de r = 0.9914. Este al ser cercano a 1 indica que los puntos presentan una tendencia a disponerse alineadamente, es decir, presentan una dispersión pequeña. De lo anterior desprendemos que la línea de tendencia es una correcta representación de la curva esfuerzo-deformación conjunta (tracción-compresión). En la expresión 5.4.1 se presenta la ecuación que describe la línea de tendencia.

$$y = 2005.1x - 0.6064$$
 5.4.1

El valor de la pendiente de las curvas conjuntas se encuentra cercano al promedio entre la pendiente en tracción y en compresión.

# 6. ENSAYOS DE FLEXIÓN DE UNIONES

## 6.1. UNIONES 100x100 [mm]

### 6.1.1. RESULTADOS ENSAYO FLEXIÓN UNIONES 100x100 [mm]

A continuación en la Figura 6.1, Figura 6.2 y Figura 6.3 se presentan las curvas experimentales, obtenidas de los ensayos en flexión de las uniones.



Figura 6.1: Curva carga-deformación experimental unión U1



Figura 6.2: Curva carga-deformación experimental unión U2



Figura 6.3: Curva carga-deformación experimental unión U3

En la Tabla 6.1 se presentan los resultados obtenidos durante los ensayos de las uniones, resumiendo los principales valores para la curva P- $\epsilon$ .

Unión	Carga máx. [kgf]	Deformación máx.
U1	25.19	0.0006367
U2	34.54	0.0008359
U3	32.31	0.0002031

Tabla 6.1: Tabla resumen resultados P-ε ensayo flexión uniones 100x100 [mm]

En la Tabla 6.2 se presentan los principales valores de los resultados experimentales de las curvas P- $\Delta$ .

Tabla 6.2: Tabla resumen resultados P-∆ ensayo flexión uniones 100x100 [mm]

Unión	Desplazamiento [mm]	Carga [kgf]
U1	11.25	9.41
U2	12.47	9.29
U3	10,23	9.55

#### 6.1.2. ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYO FLEXIÓN UNIONES 100X100

A partir del procesamiento de los datos obtenido en la experimentación se crearon las curvas carga-deformación de cada una de las uniones, y estas se contrastaron con las obtenidas de la modelación no lineal de las uniones realizada en ANSYS.



Figura 6.4: Curva carga-deformación teórica y experimental unión U1

Analizando la curva experimental U1 (Figura 6.4) vemos inicialmente un comportamiento lineal hasta aproximadamente los 9.58 [kgf] momento en el cual se produce la primera falla en el material (Figura 6.5 a) ), luego viene otro tramo lineal de toma de carga, con una menor pendiente producto de que con menores aumentos de carga hay una mayor deformación, hasta alcanzar 22.31 [kgf] instante en que ocurre la segunda falla (Figura 6.5 b) ), la unión vuelve a tomar carga, disminuyendo la pendiente, hasta alcanzar la máxima de 25.19 [kgf] y luego ocurre el proceso de descarga. Las variaciones en las pendientes se pueden apreciar mejor calculándolas a través de una regresión lineal de los puntos de cada tramo, como se aprecia en la Figura 6.6 y en la Tabla 6.3.



a)

b)

Figura 6.5: Fallas U1: a) Primera falla; b) Segunda falla



Figura 6.6: Líneas de tendencia tramos de toma de carga unión U1

Tramos	Pendientes
1	110429
2	71392
3	45157

Tabla	6 2.	Dondiontoo	da	tromoo	0,000	unión	11	11
i apia	0.3	Penalentes	ae	tramos	curva	union	υ	1

También se realizó una regresión lineal a la curva teórica obteniéndose los siguientes valores:

Tabla 6.4: Resultados regresión linea	al curva teórica U1
Pendiente	474848
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,9999

Comparando la curva teórica con la curva experimental vemos una clara diferencia en su forma, esto se puede corroborar comparando los valores de las pendientes de la Tabla 6.3 con la pendiente de la Tabla 6.4. Por ejemplo, la diferencia entre la pendiente teórica y la pendiente del tramo 1 es de 76.74%, y es aún mayor en los otros tramos.



Figura 6.7: Curva carga-deformación teórica y experimental unión U2

Analizando la curva experimental U2 (Figura 6.7) se aprecian 3 tramos característicos, el primero muestra un comportamiento lineal hasta una carga de 19.28 [kgf], el segundo tramo representa la falla (Figura 6.8) y el tercero es un tramo

en el cual la unión vuelve a tomar carga, presentando una mayor deformación por lo cual su pendiente es menor, el tramo tiene como límite el máximo de carga de 34.54 [kgf]. Para observar las diferencias en las pendientes de los tramos se realizó una regresión lineal, obteniéndose los resultados que se muestran en la Figura 6.9 y en la Tabla 6.5.



Figura 6.8: Falla en unión U2



Figura 6.9: Líneas de tendencia tramos de toma de carga unión U2

Tramos	Pendientes
1	129761
2	46199

Tabla 6.5: Pendientes de tramos curva unión U2

En la Tabla 6.5 vemos que le segundo tramo presenta una pendiente un 64,4% menor que la del primer tramo.

De igual forma se realizó una regresión lineal a la curva teórica obteniéndose los siguientes valores:

Tabla 6.6: Resultados regresion lineal o	curva teorica U2
Pendiente	438778
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,9967

El valor de la pendiente de la curva experimental, presentado en la Tabla 6.6 está muy por encima de los valores experimentales presentados en la Tabla 6.5.



Figura 6.10: Curva carga-deformación teórica y experimental unión U3

Analizando la curva experimental U3 (Figura 6.10) se observa un primer tramo en el cual la deformación disminuye, esto representa una compresión en el elemento de contrachapado, esto sucede hasta alcanzar una carga de 8.23 [kgf] momento en el cual se produce la primera falla. En el tercer tramo la unión vuelve a tomar carga hasta 24.05 [kgf], alcanzada esta carga se produce una pequeña falla y vuelve a

variar el comportamiento del contrachapado hasta una carga de 29.85 [kgf], en este momento se produce la falla final y se aprecia una gran deformación con una variación de carga mínima de 0.03 [kgf], finalmente se alcanza la carga máxima de 32.31 [kgf]. Para observar la diferencia en los comportamientos del elemento de contrachapado, se realizó una regresión lineal a los puntos de cada tramo descrito anteriormente, los resultados se pueden apreciar en la Figura 6.11 y en la Tabla 6.7.



Figura 6.11: Líneas de tendencia tramos de toma de carga unión U3

Tramos	Pendientes
1	-233244
2	334488
3	-301149

Tabla 6.7: Pendientes d	e tramos curva unión U3
-------------------------	-------------------------

De igual forma se realizó una regresión lineal a la curva teórica obteniéndose los siguientes valores:

Tabla 6.8: Resultados regresión lineal curva teórica U3

Pendiente	193112
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.9999

Las curvas  $P-\Delta$ , que se presentan a continuación, fueron creadas con los datos del medidor de desplazamiento obtenidos del análisis de los videos y del contraste con los datos experimentales de carga.



Figura 6.12: Curva P-∆ teórico experimental unión U1



Figura 6.13: Medición de desplazamiento unión U1

En la Figura 6.12 se aprecia que al final de la curva experimental hay una sección con pendiente cercana a 0 y vemos que el desplazamiento sigue aumentando. Esto se explica porque en ese valor de carga se produce la primera falla de la unión.



Figura 6.14: Curva P-∆ teórico experimental unión U2



Figura 6.15: Medición de desplazamiento unión U2

En la Figura 6.15 se aprecia una captura del video con el cual se registraron los valores de desplazamiento, además se observa el punto en el cual fueron medidos.



Figura 6.16: Curva P-∆ teórico experimental unión U3



Figura 6.17: Medición de desplazamiento unión U3

En la Figura 6.17 se observa que el punto de medición del desplazamiento estaba alejado del centro de la pieza, donde se esperarían las mayores deflexiones, esto debido a la configuración del ensayo.

Del análisis de los datos y las curvas se tiene que:

- En la Tabla 6.1 se aprecia que la mayor parte de las uniones alcanzaron un carga máxima de falla muy similar, independiente si es que presentaban o no pernos.
- A partir de las curvas teóricas se aprecia que claramente las uniones fallaron antes de alcanzar la fluencia. Las uniones U1 y U3 presentaron una falla por el desprendimiento del material en los costados, como se aprecia a

continuación en la Figura 6.18. Esto se debió a que las tres uniones fueron impresas de la forma a) que se muestra en la Figura 4.39, por lo cual en estos puntos de falla la unión no estaba formada por un filamento continuo, si no, por capas de material, las que al ser sometidas a cargas se desprenden con relativa facilidad.



b)

Figura 6.18: Formas de falla: a) unión U1; b) unión U3

a)

 Por otro lado la unión U2 presentó un tipo de falla por tracción, comportamiento que era el esperado por la forma de carga. Esta falla se concentró en la zona central de las uniones, lugar en que se concentra la mayor parte del esfuerzo. Lo anterior se puede visualizar mejor en la Figura 6.19.


a)

b)

Figura 6.19: Forma de falla unión U2: a) Vista inferior; b) Vista lateral

- Las uniones que presentaron los mayores valores de deformación en el contrachapado fueron U1 y U2, esto debido a que al tener una dimensión menor y no presentar pernos gran parte de la carga fue tomada por los elementos de contrachapado
- En la Figura 6.12, Figura 6.14 y Figura 6.16 se aprecia una clara diferencia entre los desplazamientos medidos experimentalmente y los obtenidos de los modelos teóricos. Hay varias causas que pueden explicar esta diferencia, entre las cuales una de las principiales es que se haya producido un giro y/o desplazamiento en los apoyos al momento de realizar los ensayos. Esto pudo generarse porque los apoyos no fueron lo suficientemente rígidos, ya sea porque las superficies de contacto no eran lo suficientemente homogéneas, o por la diferencia de material entre los que conformaban los apoyos, cubos de hormigón como soporte y placas de acero para realizar la sujeción.

### 6.2. UNIONES 200X100 [mm]

### 6.2.1. RESULTADOS ENSAYO FLEXIÓN UNIONES 200X100 [mm]

En la Figura 6.20 y Figura 6.21 se presentan las curvas P-ε experimentales.



Figura 6.20: Curva carga-deformación experimental unión U4



Figura 6.21: Curva carga-deformación experimental unión U5

En la Tabla 6.9 se observan los valores principales de las curvas P- $\epsilon$ , obtenidos durante los ensayos.

Unión	Carga máx. [kg]	Deformación máx.
U4	40.24	0,0001835
U5	40.17	0,0002788

Tabla 6.9: Tabla resumen resultados P-ε ensayo flexión uniones 200x100 [mm]

En la Tabla 6.10 se presentan los principales valores de los resultados experimentales de las curvas  $P-\Delta$ .

Tabla 6.10: Tabla resumen resultados P-∆ ensayo flexión uniones 200x100 [mm]

Unión	Desplazamiento [mm]	Carga [kg]
U4	12.66	19.8
U5	_(1)	_(1)

(1) al momento de llevar a cabo este ensayo no se disponía del equipo de medición de desplazamiento

## 6.2.2. ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYO FLEXIÓN UNIONES 200X100 [mm]

De igual forma que con las uniones de 100x100 [mm], mediante el procesamiento de los datos experimentales se crearon las curvas carga-deformación de cada una de las uniones, y estas se compararon con las curvas teóricas obtenidas de las modelaciones.



Figura 6.22: Curva carga-deformación teórica y experimental unión U4

Analizando la curva experimental U4 de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** no se aprecian muchas variaciones en su pendiente, esto debido a que se produjo una sola falla al llegar a la carga máxima que pudo resistir la unión, la cual se puede observar en la Figura 6.23. Realizando, además un análisis cualitativo de ambas curvas (teórico-experimental) se observa que son muy similares, ambas presentan un comportamiento lineal. Para corroborar lo anterior se realizó una regresión lineal a ambas curvas, dando los resultados que se presentan en la Figura 6.24 y en la Tabla 6.11.



Figura 6.23: Falla unión U4



Figura 6.24: Líneas de tendencia teórico y experimental unión U4

Tabla 6.11: Resultados regresión lineal curvas teórica y experimental unión U4

Curva	Pendiente	Coef. De determinación
Teórica	95449	1
Experimental	129535	0.9868

En la Tabla 6.11 observamos que las pendientes tiene valores muy cercanos, con una diferencia de un 26.31% y que el valor del coeficiente de determinación experimental es casi 1 por lo cual hay una baja dispersión en los puntos y la línea de tendencia es una representación acertada de la curva, esto valida el uso de las pendientes como medio comparativo.



Figura 6.25: Curva carga-deformación teórica y experimental unión U5

Analizando la curva experimental U5 de la Figura 6.25 observamos que presenta un comportamiento lineal, hasta alcanzar la carga en la cual se produjo la falla de la unión. Para obtener el valor de las pendientes de las curvas experimental y teórica e realizo una regresión lineal a los puntos de estas.



Figura 6.26: Lineas de tendencia curvas experimental y teórica unión U5

Tabla 6.12: Resultados regresión lineal curvas teórica y experimental unión U5

Curva	Pendiente	Coef. De determinación
Teórica	106057	0.9999
Experimental	133100	0.9953

En la Tabla 6.12 observamos que el valor de R<sup>2</sup> de la curva experimental demuestra la poca dispersión de los puntos, lo que denota que la unión se comportó linealmente, como se esperaba en base al comportamiento teórico. La diferencia entre las pendientes es muy baja de un 20.32% y esta se puede deber al comportamiento que tuvo la unión durante el ensayo, por montaje de la pieza, lugar de medición de la deformación, entre otras cosas.

En este caso solo se creó la curva P- $\Delta$  de la unión U4, ya que la unión U5 no posee los datos experimentales necesarios.



Figura 6.27: Curva P-∆ teórico experimental unión U4



Figura 6.28: Medición de desplazamiento unión U4

En la Figura 6.28 se observa una captura del video en el cual se registraron los valores de deflexión, además se observa el punto en el cual fueron medidos dichos valores.

Del análisis de los datos y las curvas se tiene que:

- En la Tabla 6.9 se observa que ambas uniones alcanzar valores virtualmente iguales de carga, pero con deformaciones en los elementos de contrachapado distintos. Esto se debe a que como la unión U5 tiene pernos, estos aumentan la participación del contrachapado, provocando que este tome un mayor porcentaje de la carga, contrario a lo que sucede en la unión U3.
- De igual forma que en las uniones de 100x100 [mm], las de 200x100 [mm] tampoco alcanzaron la fluencia del PLA. La unión U4 presentó una falla por el desprendimiento de una de sus secciones como se ve en la Figura 6.29. Esto está directamente relacionado con la composición interior de la unión, la que como se observa en la Figura 6.31 está conformada por capas las que pueden separarse con facilidad. Al cargar la pieza en la zona central, en los extremos de la unión los elementos de contrachapado ejercen una fuerza opuesta a la carga, lo que se transmite a la parte superior de la unión y en la zona cercana a la carga por la deflexión de las planchas se ejerce una fuerza sobre toda la superficie inferior de la unión (ver Figura 6.32), provocando la separación de las capas de material. Por otro lado, la unión U5 presentó una falla por tracción como se observa en la Figura 6.30, esta se produce en la zona central de la pieza por la concentración de esfuerzo en dicho sector. Esta falla es la esperada en este tipo de ensayo.



Figura 6.29: Formas de falla unión U4



a)

b)

Figura 6.30: Formas de falla unión U5: a) Vista inferior; b) Vista lateral



Figura 6.31: forma de impresión y composición interna de las uniones



Figura 6.32: Par de fuerzas generada en la unión

# 7. AJUSTES PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN

## 7.1. ANÁLISIS DEL ERROR

Para analizar el error en las curvas carga deformación, se calcularon las pendientes de las curvas teóricas y experimentales por medio de regresión lineal, y se evaluó el porcentaje de error. En la Figura 7.2 se observan todas las curvas experimentales y en la Figura 7.1 las curvas teóricas.



Figura 7.2: Curvas experimentales ensayos de flexión



Figura 7.1: Curvas teóricas ensayos de flexión

Los valores de las pendientes de las curvas teóricas y experimentales fueron calculados en el capítulo N°6 secciones 6.1.2 y 6.1.3 y estos serán presentados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. El porcentaje de error representa la relación entre las pendientes.

#### Tabla 7.1: Pendiente y porcentaje de error curvas carga-deformación

Lloián	Pendiente curva	Pendiente curva	% orror
Onion	experimental	teórica	70 en or
U1	110429	474848	76.74
U2	129761	438778	70.43
U3	334488	193112	73.21
U4	129353	95449	35.52
U5	133100	106057	25.49

Lo mismo se hizo con las curvas P- $\Delta$ , en estas la pendiente se entiende como el coeficiente de rigidez del material, el cual representa la relación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento generado por esta, como se aprecia en la expresión 7.1.1. En la

#### Tabla 7.2 se presentan los valores

$$K = \frac{F}{\Delta}$$
 7.1.1

A continuación se presentan las curvas  $P-\Delta$  de cada unión con la línea de tendencia, de la cual se obtuvieron las pendientes.



Figura 7.3: Curva P-A con regresión lineal unión U1



Figura 7.5: Curvas P-∆ con regresión lineal unión U2



Figura 7.4: Curvas P-∆ con regresión lineal unión U3



Figura 7.6: Curvas P-∆ con regresión lineal unión U4

Unión	Pendiente curva	Pendiente curva	% error
	experimental	teórica	
U1	0.97	3.21	69.78
U2	0.76	3.16	75.95
U3	0.96	3.37	71.51
U4	0.98	3.38	71.01
U5	-	-	-

#### Tabla 7.2: Pendiente y porcentaje se error curvas $P-\Delta$

De la

Tabla 7.2 se aprecia que el porcentaje de error en todas las uniones es bastante elevado. Este se debe principalmente a un giro y/o desplazamiento en los apoyos, debido a la poca rigidez de estos (ver Figura 7.7). El efecto de un giro en un extremo de la pieza ensayada por muy pequeño que sea tiene un alto impacto en los desplazamientos.



Figura 7.7: Configuración de los apoyos para ensayo de flexión

Por ejemplo si se genera un giro de 2° en el apoyo como se observa en la Figura 7.8, tendremos que:



Figura 7.8: Ejemplo de cálculo de deflexión por giro en los apoyos

Aplicando semejanza de triángulos:

$$\frac{2}{100} = \frac{x}{500} \to x = \frac{2 * 500}{100} = 10 \ [mm]$$

Donde:

500 = Largo elemento de contrachapado

- 100 = Largo del apoyo
- 2 = Giro en el apoyo
- x = Desplazamiento en el centro de la unión

Como se observa en el ejemplo el giro de 2° en el apoyo aumentaría en 10 [mm] la deflexión en el centro de la unión.

### 7.2. EVALUACIÓN DE MODIFICACIONES

Solo se evaluó el agregar un giro en los apoyos del modelo teórico, con el fin de aumentar el desplazamiento y así acercar las curvas P- $\Delta$  experimental y teóricas. En la Figura 7.9 se aprecian estos giros en color amarillo. Se consideraron magnitudes iguales pero con sentidos contrarios, y producidos en torno al eje y. Se evaluaron varios valores, descartando los mayores ya que provocaban que las uniones entraran en fluencia lo que no sucedió en la experimentación. En la Tabla 7.3 se presentan los valores evaluados y por qué se descartaron.

Giro (°)	Descripción
0.5	Descartado por bajo ajuste de las curvas
1.0	Descartado por bajo ajuste de las curvas
1.5	Descartado por bajo ajuste de las curvas
2.0	Seleccionado
2.5	Descartado por provocar la fluencia en la unión
3.0	Descartado por provocar la fluencia en la unión
3.5	Descartado por provocar la fluencia en la unión
4.0	Descartado por provocar la fluencia en la unión

Tabla 7.3: Valores de giros evaluados



Figura 7.9: Giro en apoyos modelo teórico

### 7.3. RESULTADOS AJUSTES UNIONES 100X100



Para el ajuste final de los modelos se consideró un giro de 2° en los extremos. A

continuación se presentan las curvas ajustadas P- $\Delta$ . Primero en la Figura 7.10 se presenta un gráfico con las 3 curvas, teórica, teórica ajustada y experimental.



Figura 7.10: Grafico resumen curvas P-∆ unión U1

Analizando cualitativamente la curva teórica ajustada de la Figura 7.11 observamos que esta se acerca mucho más a la curva experimental. Esto se puede apreciar *Figura 7.11: Regresión lineal curvas P-Δ unión U1*  mejor al comparar las pendientes de las curvas teóricas y los porcentajes de error entre la curva experimental y la teórica. Dichos valores se presentan en la Tabla 7.4:

Curva	Pendiente	% de Error
Teórica	3.21	69.78
Teórica ajustada	1.35	27.98
Experimental	0.97	-

Tabla 7.4: Tabla comparativa valores ajuste e iniciales unión U1

En la Tabla 7.4 podemos observar una disminución de un 57.94% en el valor de la pendiente, y un ajuste en el error de 41.8%.

En la Figura 7.12 se presenta un grafica resumen con las curvas P- $\Delta$  y en la Figura 7.13 se observa el análisis de regresión lineal realizado a las curvas.



Figura 7.12: Grafico resumen curvas P-∆ unión U2



Figura 7.13: Regresión lineal curvas P-∆ unión U2

En la Tabla 7.5 se presentan los valores de las pendientes y de los porcentajes de error, ajustados e iniciales.

Curva	Pendiente	% de Error
<b></b>	0.40	75.05
leorica	3.16	75.95
Teórica aiustada	1.51	36.06
,		
Experimental	0.96	_
Experimental	0.00	

Tabla 7.5: Tabla comparativa valores ajuste e iniciales unión U2

En este caso la disminución en el valor de la pendiente es levemente menor que en la unión U1, pero aun así es considerable, de un 52.51%. Por otro lado el ajuste en el porcentaje de error fue de un 39.89%.

A continuación en la Figura 7.14 se presenta una gráfica con las tres curvas  $P-\Delta$  de la unión U3.y en la Figura 7.15 se observa el análisis de regresión lineal.



Figura 7.14: Grafico resumen curvas P-Δ unión U3



Figura 7.15: Regresión lineal curvas P-∆ unión U3

En la Tabla 7.6 se aprecia que el ajuste el porcentaje de error es menor que en los casos anteriormente mencionados, de un 21.87% y la disminución en el valor de la pendiente es de 55.19%

Tabla 7.6: Tabla comparativa	valores ajuste e	e iniciales	unión U3
------------------------------	------------------	-------------	----------

Curva	Pendiente	% de Error
Teórica	3.37	71.51
Teórica ajustada	1.51	49.64
Experimental	0.76	-

A continuación se presentan las curvas teóricas ajustadas de carga-deformación y estas se compararon con las curvas teóricas iniciales (Figura 7.16). Se calculó el valor de la pendiente de las curvas ajustada a través de una regresión lineal como se aprecia en la Figura 7.17.



Figura 7.16: Curva carga-deformación ajustada con giro en apoyos unión U1



Figura 7.17: Regresión lineal curva P-ɛ ajustada unión U1

En la Tabla 7.7 se presentan los valores de las pendientes de la curva ajustada y de los porcentajes de error para poder comparar con los valores iniciales.

Curva	Pendiente	% de error
Teórica	474848	76.74
Teórica ajustada	189666	41.78
Experimental	110429	-

Tabla 7.7: Tabla comparativa valores ajuste e inicial curva P-ε unión U1

Se aprecia un ajuste en el porcentaje de error de aproximadamente un 34.96%, esto comparando la pendiente de la curva teórica ajustada con la pendiente del primer tramo de la curva U1, con un valor de 110429.



Figura 7.18: Curva carga-deformación ajustada con giro en apoyos unión U2

Para el cálculo de la pendiente de la curva ajustada se consideró el tramo inicial que llega hasta una carga aproximada de 25 [kgf], ya que es el que presenta un comportamiento lineal, como se puede apreciar en la Figura 7.18.



Figura 7.19: Regresión lineal curva P-ε ajustada unión U2

En la Tabla 7.8 se presentan los valores de las pendientes de la curva ajustada, obtenidos del análisis de regresión lineal (Figura 7.19), y de la curva original, además de los porcentajes de error.

Curva	Pendiente	% de error
Teórica	438778	70.43
Teórica ajustada	261602	50.39
Experimental	129761	-

Tabla 7.8: Tabla comparativa valores ajuste e inicial curva P-ε unión U2

En la Tabla 7.8 se pude observar que el ajuste de la curva P-ε fue bastante reducido de un 20.04%. Esto es apreciable analizando cualitativamente las curvas.

Para el análisis de regresión lineal se consideró el tramo lineal de la curva ajustada, él que llega hasta una carga de 22.72 [kgf], tramo con pendiente positiva como se aprecia en la Figura 7.20.



Figura 7.20: Curva carga-deformación ajustada con giro en apoyos unión U3



Figura 7.21: Regresión lineal curva P-ɛ ajustada unión U3

Curva	Pendiente	% de error
Teórica	193112	73.21
Teórica ajustada	462182	27.63
Experimental	334488	-

Tabla 7.9: Tabla comparativa valores ajuste e inicial curva P-ε unión U3

En la Tabla 7.9 apreciamos un ajuste considerable en el porcentaje de error, con un valor de 45.58%, quedando un error entre la pendiente de la curva teórica ajustada

y la pendiente de la curva experimental de un 27.63%, el más bajo entre las uniones de 100x100 [mm].

Las diferencias que aún se aprecian entre los modelos teóricos y experimentales se pueden deber a que el programa ANSYS considera, al momento de evaluar, las uniones como elementos continuos y no considera fallas locales (por separación de capas de material) como sucedió en los ensayos.

### 7.4. RESULTADOS AJUSTES UNIONES 200X100 [mm]

De igual forma que en las uniones de 100x100 [mm], se agregó a los modelos un giro en los apoyos de 2° en torno al eje y. Las curvas P- $\Delta$  y carga-deformación ajustadas se presentan a continuación en la Figura 7.22:



Figura 7.22: Grafico resumen curvas P-∆ unión U4



Figura 7.23: Regresión lineal curvas P-∆ unión U4

Cualitativamente se aprecia un ajuste considerable en la curva si se compara con la curva origina, como se observa en la Figura 7.23. Para corroborar esto, se compararan los valores de las pendientes y los porcentajes de error. Dichos valores se presentan en la

Curva	Pendiente	% de error
Teórica	3.38	71.01
Teórica ajustada	1.57	37.52
Experimental	0.98	-

Tabla 7.10: Tabla comparativa valores ajuste e inicial curva P-∆ unión U4

En la Tabla 7.10 observamos una reducción de un 53.55 por ciento en el valor de la pendiente teórica.



Figura 7.24: Curva carga-deformación ajustada con giro en apoyos unión U4

Analizando cualitativamente la curva teórica ajustada (Figura 7.24) observamos que el giro provoco que el elemento de contrachapado se deformara mucho menos a una misma carga, esto se debe a que el giro en el apoyo al permitir una mayor deflexión libera tensiones en las zonas más cercanas al punto de aplicación de la carga. En este caso el valor del error aumento un 25.94% como se aprecia en la Tabla 7.11.



Figura 7.25: Regresión lineal curva P-ɛ ajustada unión U4

Curva	Pendiente	% de error
Teórica	95449	35.52
Teórica ajustada	336211	61.46
Experimental	129535	-

Tabla 7.11: Tabla comparativa valores ajuste e inicial curva P-ε unión U4

El valor de la pendiente aumento aproximadamente un 250% lo que está directamente ligado al aumento en el porcentaje de error, el que como se mencionó anteriormente representa la relación entre la pendiente teórica y la pendiente experimental.

De igual manera que en la unión U4, la curva teórica ajustada de la unión U5, que se aprecia en la Figura 7.26, aumento su pendiente considerablemente, esto debido a que le aumento en la deflexión provocado por el giro en los apoyos disminuyo la deformación interna del elemento de contrachapado en la zona en la cual se instaló el strain gage y se realizaron las mediciones.



Figura 7.26: Curva carga-deformación ajustada con giro en apoyos unión U5



Figura 7.27: Regresión lineal curva P-ε ajustada unión U5

Tabla 7.12: Tabla comparativa valores ajuste e inicial curva P-ε unión U5

Curva	Pendiente	% de error
Teórica	106057	25.49
Teórica ajustada	684011	80.54
Experimental	133100	-

En la

Tabla 7.12 observamos un gran aumento en el valor de la pendiente, corroborando lo que se expresó anteriormente.

## 8. CONCLUSIONES

- El PLA es un material poco dúctil, que presenta una falla de tipo frágil. Posee una resistencia de aproximadamente unos 165 [kgf/cm<sup>2</sup>] para una densidad de un 60%, por lo cual su uso estructural esta reducido a estructuras con cargas bajas, como por ejemplo estructuras modulares, estructuras temporales.
- De los ensayos de tracción y compresión se obtuvieron los valores de módulo de elasticidad los que se encuentran en un rango que va desde 260 [MPa] hasta unos 2120 [MPa], para una densidad de 15% y 60% respectivamente. En comparación en la bibliografía los valores fluctúan entre los 2000 [MPa] y los 3500 [MPa] siendo este el valor más común, como se puede observar en la Tabla 2.3. Cabe destacar que estos valores son obtenidos de piezas impresas con una densidad de un 100% por lo cual extrapolando los valores experimentales estos deberían estar cercanos a este valor.
- Pese a que en el ensayo de tracción no se alcanzaron los valores máximos de resistencia producto de la falla de la pieza, por el análisis del comportamiento de las uniones en los modelos teóricos, en los cuales los valores de los esfuerzos y deformaciones en tracción y en compresión eran siempre muy similares, como se puede apreciar en la Figura 8.2y Figura 8.1, y por el estudio bibliográfico, se puede concluir que dichos valores deben ser similares a los del ensayo en compresión, de aproximadamente 16.54 [MPa] para una densidad de 60% y 6.99 [MPa] para una densidad de 15%.



Figura 8.1: Esfuerzo PLA, valores positivos en tracción y negativos en compresión



Figura 8.2: Deformación PLA, valores positivos en tracción y negativos en compresión

 La resistencia que pueda tener una pieza impresa utilizando PLA dependerá, en primer lugar, de las características de impresión, densidad de la pieza, altura y cantidad de capas, una mayor altura de capas disminuirá la cantidad de estas y le dará mayor homogeneidad a la pieza, aumentando su resistencia. En segundo lugar, dependerá de la orientación de impresión y de la posterior forma de carga, por ejemplo, si se imprime un pieza rectangular y al momento de la impresión se apoya sobre su cara mayor como se aprecia en la Figura 8.3, pero al utilizarla la apoyara sobre una de sus caras menores, tendré, como se observa en la Figura 8.4, dos posibilidades: a) si la comprimo presentara una baja resistencia como se explica en la sección 5.2); b) si la someto a tracción podrá resistir más (ver sección 5.4).



Figura 8.3: Posicionamiento sobre cama de impresión



Figura 8.4: Posicionamiento de uso y formas de carga: a) Compresión; b) Tracción

- Durante la realización de los ensayos se observaron distintos tipos de fallas. La primera se visualizó al ensayar las probetas en compresión, en especial la CH15, en cuyo caso al cargarla se produjo el colapso de las capas inferiores como se aprecia en la Figura 5.9. La segunda falla se observó en el ensayo de las probetas en tracción, en cuyo caso ambas fallaron por el desprendimiento de capas de material en la zona superior, tal como se puede observar en la Figura 5.15 y Figura 5.16. Esto también sucedió con las uniones U1, U3, y U4 (Figura 6.18 y Figura 6.29). El ultimo tipo de falla se observó en las uniones U2 y U4, en cuyo caso ambas presentaron una falla por tracción, la que se produce en la zona con mayor concentración de esfuerzo, que en este caso fue al medio de las uniones como se observa en la Figura 6.8 y en la Figura 6.19. Esta era la falla que se esperaba en el ensayo a flexión.
- A partir del análisis de los resultados obtenidos con el ajuste realizado a los modelos teóricos, se confirma la posibilidad de que se hayan producido giros en los apoyos durante el desarrollo de los ensayos, debido a su baja rigidez.
- En los ensayos de las uniones los elementos de contrachapado no alcanzaban a entrar en fluencia, se mantenían con un comportamiento lineal y tampoco llegaban a fallar por fluencia.
- Una de las desventajas que presenta la utilización del PLA y de la impresión 3D es el tiempo de fabricación de las piezas, si se observan las uniones de mayor tamaño, presentaron tiempos de impresión sobre las 24 horas sumándole los pernos y las tuercas, considerando además que las uniones por su conformación no utilizan tanto material.

### 8.1. TRABAJOS FUTUROS

- Se debe realizar más ensayos de probetas sometidas a tracción para obtener un comportamiento más preciso del material, conocer los límites de fluencia y de resistencias ultimas
- Considerar el diseño y modelación de uniones con distintas geometrías que puedan presentar un comportamiento mecánico más óptimo.
- Si se desea realizar un seguimiento de este estudio se recomienda incorporar los costos económicos asociados a la producción de las piezas.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- (CORMA), C. C. (3 de Octubre de 2017). CORMA. Obtenido de http://www.corma.cl/perfil-del-sector/aportes-a-la-economia
- Aguirre Ahumada, C. (2010). *Especificación ANSI/AISC 360-10 para Construcciones de Acero (version en español).* Asociación Latinoamericana del Acero (Alacero).

ANSYS . (2010). Costumer Training Material - Lecture 3 Introduction to Contact.

- ANSYS. (2005). Ansys training manual, Chapter 2, Nonlinear Structural.
- ANSYS R18.1. (30 de Octubre de 2001). INTRODUCTION TO ANSYS 6.0 PART 2.

ARAUCO. (s.f.). Terciado Arauco estructural. Chile.

- Arriagada González, P. A. (2015). DESARROLLO DE COMPÓSITOS DE ÁCIDO POLILÁCTICO Y DERIVADOS. Santiago: Universidad de Chile - .
- ASTM. (2002). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM D 638 02a. ASTM International.
- ASTM. (2012). Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, in Active ASTM F2792 12a2012. ASTM International.
- Badiola, V. (2004). Diseño de Maquinas I. Universidad publica de Navarra.
- Conn, R., Kolstad, J., Borzelleca, J., & Pariza, M. (1995). Safety Assessment of Polylactide (PLA) for Use as a Food-contact Polymer. Food and chemical toxicology : an international journal published for the British Industrial Biological Research Association.
- Datta, R., & Henry, M. (2006). *Lactid acid: recent advances in products, processes and technologies: a review.* Journal of Chemical Technology & Biotechnology.
- Essentium. (s.f.). Technical Data Sheet; Essentium High Performance PLA. Essentium materials.
- Grabow, N., Schlun, M., Sternberg, K., Hakansson, N., Kramer, S., & Schmitz, K.-P. (2005). Mechanical properties of laser cut poly(L-lactide) micro-specimens: implications for stent design, manufacture, and sterilization. Journal of Biomechanical Engineering.

- Hamad, K., Kaseem, M., Yang, H., Deri, F., & Ko, Y. (2014). *Properties and medical applications of polylactic acid:*. Budapest: Budapest University of Technology.
- Horffmann, K. (s.f.). *Aplying the Wheatstone Bridge Circuit.* Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (2006). Madera Construccions en madera Cálculo. NCh1198: of 2006. Santiago, Chile.
- Mehta, R., Kumar, V., Bhunia, H., & Upadhyay, S. (2005). *Synthesis of poly(lactic acid): a review.* Journal of Macromolecular Science.
- Nauta Nauta, A. E., & Vergara Idrovo, M. R. (2017). Simulacion de termofluidos de PLA natural y ABS en el proceso de impresion en 3D. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Omega. (04 de 12 de 2017). OMEGA. Obtenido de https://es.omega.com/prodinfo/galgas-extensiometricas.html

Reinike Hermanos S.A. (s.f.). Catalogo Tecnico de Productos. Reinike.

- Relaño Pastor, A. (2013). Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposicion fundida. Universidad Carlos III de Madrid.
- S. Bergström, J., & Hayman, D. (2015). *An Overview of Mechanical Properties and Material Modeling of Polylactide (PLA) for Medical Applications.* Needham: Versyst Enginnering.
- San Martín Ayala , E. (2013). *Determinación del estado de esfuerzo plano para una viga en voladizo mediante mediciones de deformación.* Concepción: Universidad del Bio-Bio.
- Wittbrodt, B., & M. Pearce, J. (2015). *The Effects of PLA Color on Material Propierties of 3-D Printed Components.* Houhton: Michigan Technological University.
ANEXOS

## A. ANEXO 1

#### A.1. Especificaciones técnicas de la celda de carga

ESPECIFICACIONES Excitación: 10 Vcc (15 V máx.) Salida (salida a escala completa): ≤25 lb/10 kgf: 2 mV/V ±0,25% ≥50 lb/20 kgf: 3 mV/V ±0,25% Calibración de 5 puntos (en tensión): 0%, 50%, 100%, 50%, 0% Linealidad: ≤25 lb/10 kgf: ±0,20% FSO ≥50 lb/20 kgf: ±0,10% FSO Histéresis: ≤25 lb/10 kgf: ±0,10% FSO ≥50 lb/20 kgf: ±0,08% FSO Repetibilidad: ≤25 lb/10 kgf: ±0,1% FSO ≥50 lb/20 kgf: ±0,03% FSO Balance cero: ±1% de salida a escala completa Rango de temp. de funcionamiento: -54 a 121 °C (-65 a 250 °F) Rango de temp. compensada: 16 a 71 °C (60 a 160 °F) Efectos térmicos: Cero: 0,0036% salida a escala completa/ °C Intervalo: 0,0036% salida a escala completa/ °C Sobrecarga segura: 150% de capacidad Sobrecarga máxima: 300% de capacidad Resistencia de entrada:  $350 \pm 10 \Omega$ Resistencia de salida:  $350 \pm 10 \Omega$ Desviación a escala completa: 0,025 a 0,076 mm (0,001 a 0,003") típica Construcción: Acero inoxidable 17-4 PH Eléctrica: ≤5000 lb/2000 kgf: DT02H-10-6P >5000 lb/2500 kgf: MS3102E-14S-6P (o equiv.) Conector de acoplamiento (incluido): ≤5000 lb/2000 kgf: PT06F-10-6S equiv)

La Figura A.1 muestra un diagrama con la geometría general de las celdas de carga, indicando además algunos de sus componentes.



Figura A.1: Diagrama celda de carga

En la Figura A.2 se presentan las dimensiones en mm (pulg) de las celdas.

CAPACIDAD	D	Н	F	G	K	Т	Α	В	С
			M	DELOS	IMPERL	AL			
5 a 25 lb	64 (2,5)	20 (0,80)	6	51 (2,0)	4,6 (0,18)	%-28 UNF	24 (0,94)	19 (0,75)	32 (1,25)
50 a 1K lb	76 (3,0)	25 (1,0)	6	57 (2,25)	7,1 (0,28)	%-24 UNF	24 (0,94)	19 (0,75)	32 (1,25)
2K a 5K lb	89 (3,5)	25 (1,0)	6	67 (2,63)	8,6 (0,34)	½-20 UNF	24 (0,94)	19 (0,75)	32 (1,25)
7,5K a 15K lb	140 (5,5)	46 (1,8)	8	114 (4,5)	10 (0,40)	1-14 UNS	32 (1,25)	38 (1,5)	51 (2,0)
20K a 50K lb	152 (6,0)	46 (1,8)	8	124 (4,88)	13 (0,53)	1%-12 UNF	32 (1,25)	38 (1,5)	51 (2,0)
75K a 100K lb	229 (9,0)	64 (2,5)	12	197 (7,75)	17 (0,66)	2-12 UN	32 (1,25)	38 (1,5)	51 (2,0)
150K a 200K lb	279 (11)	76 (3,0)	12	241 (9,5)	20 (0,78)	2%-12 UN	32 (1,25)	38 (1,5)	51 (2,0)
300K a 500K lb	356 (14)	108 (4,25)	12	298 (11,75)	25 (1,0)	3%-8 UN	32 (1,25)	38 (1,5)	51 (2,0)

Figura /	A.2:	Dimensiones	general	les
----------	------	-------------	---------	-----

Los rangos de capacidades que poseen las celdas de carga además de la denominación del modelo se aprecian en la Figura A.3.

CA	PACIDAD	N.º DE MODELO	MEDIDORES COMPATIBLES
		MODELOS IM	PERIAL
5 lb	2,3 kgf	LCHD-5	DPIS, DP41-S, DP25B-S
10 lb	4,5 kgf	LCHD-10	DPIS, DP41-S, DP25B-S
25 lb	11 kgf	LCHD-25	DPiS, DP41-S, DP25B-S
50 lb	23 kgf	LCHD-50	DPIS, DP41-S, DP25B-S
100 lb	45 kgf	LCHD-100	DPIS, DP41-S, DP25B-S
250 lb	114 kgf	LCHD-250	DPIS, DP41-S, DP25B-S
500 lb	227 kgf	LCHD-500	DPIS, DP41-S, DP25B-S
1K lb	455 kgf	LCHD-1K	DPIS, DP41-S, DP25B-S
2K lb	909 kgf	LCHD-2K	DPIS, DP41-S, DP25B-S
3K lb	1361 kgf	LCHD-3K	DPIS, DP41-S, DP25B-S
4K lb	1815 kgf	LCHD-4K	DPIS, DP41-S, DP25B-S
5K lb	2269 kgf	LCHD-5K	DPIS, DP41-S, DP25B-S
7,5K lb	3403 kgf	LCHD-7,5K	DPIS, DP41-S, DP25B-S
10K lb	4537 kgf	LCHD-10K	DPIS, DP41-S, DP25B-S
15K lb	6806 kgf	LCHD-15K	DPIS, DP41-S, DP25B-S*
20K lb	9074 kgf	LCHD-20K	DPIS, DP41-S, DP25B-S*
30K lb	13.612 kgf	LCHD-30K	DPIS, DP41-S, DP25B-S*
50K lb	22.686 kgf	LCHD-50K	DPIS, DP41-S, DP25B-S*
75K lb	34.029 kgf	LCHD-75K	DPIS, DP41-S, DP25B-S*
100K lb	45.372 kgf	LCHD-100K	DPIS, DP41-S, DP25B-S*
150K lb	68.058 kgf	LCHD-150K	DPIS, DP41-S, DP25B-S*
200K lb	90.744 kgf	LCHD-200K	DPIS, DP41-S, DP25B-S*
300K lb	136.116 kgf	LCHD-300K	DPIS, DP41-S, DP25B-S*
400K lb	181.488 kgf	LCHD-400K	DPIS, DP41-S, DP25B-S*
500K lb	226.860 kgf	LCHD-500K	DPIS, DP41-S, DP25B-S*

Figura A.3: Modelos de celdas y sus capacidades

# **B.ANEXO 2**

### B.1. Tablas de análisis lineal

Tabla B.1: Resultados análisis lineal unión 100x100x1

		PLA Von	-Mises		P	ĽΑ			Encha	pado		
Р	NI/mm	3	σ	εx (+)	εx (-)	σx (+)	σx (-)	σx (+)	σx (-)	εx (+)	εx (-)	def. total
[kgf]	IN/111111	mm/mm	Мра	mm/mm	mm/mm	Мра	Мра	Мра	Мра	mm/mm	mm/mm	mm
120	100	0,0018	4,993	0,00075	0,001	2,265	3,321	7,859	11,619	0,0016	0,0006	0,887
132	110	0,0019	5,492	0,00082	0,0011	2,919	3,653	8,646	12,781	0,00052	0,00083	0,976
144	120	0,0021	5,991	0,00089	0,0012	3,185	3,985	9,432	13,942	0,00058	0,00091	1,065
156	130	0,0023	6,49	0,00097	0,0013	3,45	4,317	10,218	15,104	0,00063	0,00099	1,153
168	140	0,0025	6,989	0,0011	0,0014	3,716	4,649	11,004	12,26	0,00073	0,0011	1,242
180	150	0,0026	7,489	0,00112	0,0015	3,981	4,981	11,79	17,428	0,00078	0,00113	1,331
192	160	0,0028	7,988	0,0012	0,0016	4,246	5,313	12,576	18,589	0,00084	0,0012	1,419
204	170	0,0029	8,487	0,0013	0,0017	4,512	5,645	13,362	19,752	0,00089	0,0013	1,508
216	180	0,0032	8,987	0,00135	0,0018	4,777	5,977	14,148	20,913	0,00094	0,0014	1,597
228	190	0,0033	9,486	0,0014	0,0019	5,043	6,309	14,934	22,075	0,00099	0,00144	1,686
240	200	0,0035	9,985	0,0015	0,002	5,308	6,641	15,72	23,238	0,001	0,0015	1,774
252	210	0,0037	10,484	0,0016	0,0021	5,573	6,973	16,506	24,399	0,0011	0,0016	1,863
264	220	0,0039	10,984	0,0017	0,0022	5,839	7,305	17,291	25,561	0,0012	0,0017	1,952
276	230	0,0041	11,483	0,00172	0,0023	6,104	7,637	18,077	26,723	0,001203	0,0018	2,04
288	240	0,0042	11,982	0,0018	0,0024	6,369	7,969	18,863	27,885	0,0012	0,00182	2,129
300	250	0,0044	12,481	0,0019	0,0025	6,635	8,302	19,649	29,047	0,00131	0,0019	2,218
312	260	0,0046	12,981	0,002	0,0026	6,9	8,634	20,435	30,209	0,0014	0,002	2,307
324	270	0,0048	13,48	0,00202	0,0027	7,166	8,966	21,221	31,371	0,00141	0,0021	2,395
336	280	0,0049	13,979	0,0021	0,0028	7,431	9,298	22,007	32,532	0,0015	0,00212	2,484
348	290	0,0051	14,478	0,0022	0,0029	7,697	9,629	22,793	33,694	0,0015	0,0022	2,573
360	300	0,0053	14,978	0,0022	0,00303	7,962	9,962	23,579	34,85 <u></u> 6	0,0016	0,0023	2,661

		PLA Vor	n-Mises		Р	LA			Encha	pado		
P [kgf]	N/mm	ε mm/mm	σ Мра	εx (+) mm/mm	εx (-) mm/mm	σx (+) Μpa	σх (-) Мра	σx (+) Mpa	σx (-) Mpa	εx (+) mm/mm	εx (-) mm/mm	def. total mm
120	100	0,0016	3,907	0,00063	0,0012	2,173	3,936	7,846	11,55	0,00052	0,00075	0,878
132	110	0,0017	4,298	0,00069	0,0013	2,39	4,329	8,63	12,705	0,00057	0,00083	0,966
144	120	0,001	4,689	0,00076	0,0014	2,607	4,723	9,415	13,854	0,00063	0,0009	1,054
156	130	0,0021	5,079	0,00082	0,0015	2,825	5,117	10,2	15,015	0,00068	0,00098	1,141
168	140	0,0022	5,47	0,00089	0,0016	3,042	5,511	10,984	16,169	0,00073	0,001	1,339
180	150	0,0023	5,861	0,00095	0,0017	3,259	5,904	11,769	17,325	0,00078	0,0011	1,317
192	160	0,0025	6,252	0,001	0,0018	3,477	6,298	12,553	18,479	0,00084	0,0012	1,405
204	170	0,0026	6,643	0,0011	0,0019	3,694	6,692	13,338	19,635	0,00089	0,0013	1,493
216	180	0,0028	7,033	0,00113	0,002	3,911	7,085	14,122	20,789	0,00094	0,0014	1,58
228	190	0,003	7,424	0,0012	0,0022	4,128	7,479	14,907	21945	0,00099	0,00143	1,668
240	200	0,0032	7815	0,0013	0,0023	4,346	7,872	15,692	23,099	0,001	0,0015	1,756
252	210	0,0033	8,205	0,00133	0,0025	4,563	8,266	16,476	24,255	0,0011	0,0016	1,844
264	220	0,0335	8,596	0,0014	0,0026	4,78	8,659	17,261	25,409	0,0012	0,0017	1,932
276	230	0,0336	8,987	0,0015	0,0027	4,998	9,053	18,045	26,565	0,00121	0,00173	2,091
288	240	0,0037	9,378	0,00152	0,0028	5,215	9,447	18,83	27,719	0,0013	0,0018	2,107
300	250	0,0039	9,768	0,0016	0,0029	5,432	9,84	19,614	28,874	0,00131	0,0019	2,195
312	260	0,0041	10,159	0,0017	0,003	6,649	10,254	20,399	30,029	0,0014	0,00196	2,283
324	270	0,0042	10,55	0,00171	0,0032	5,867	10,628	21,184	31,185	0,00141	0,002	2,371
336	280	0,0044	10,941	0,0018	0,0033	6,084	11,021	21,968	32,339	0,0015	0,0021	2,458
348	290	0,0046	11,331	0,00184	0,0034	6,301	11,415	22,75	33,495	0,00152	0,0022	2,546
360	300	0,0047	11,722	0,0019	0,0035	6,518	11,809	23,537	34,649	0,00156	0,00226	2,634
362,4	302	0,0048	11,8	0,0019	0,0035	6,592	11,887	23,694	34,88	0,0016	0,00228	2,651

Tabla B.2: Resultados análisis lineal unión 200x100x1

		PLA Von	-Mises		Р	LA			Encha	apado		
P [kgf]	N/mm	ε mm/mm	σ Мра	εx (+) mm/mm	εx (-) mm/mm	σx (+) Μpa	σх (-) Мра	σx (+) Mpa	σx (-) Mpa	εx (+) mm/mm	εx (-) mm/mm	def. total mm
120	100	0,0015	4,213	0,00063	0,0011	2,152	3,661	7,917	11,409	0,00053	0,00074	0,866
132	110	0,0016	4,634	0,00069	0,0012	2,368	4,027	8,709	12,51	0,00057	0,00082	0,952
144	120	0,0018	5,055	0,00076	0,0013	2,583	4,393	9,5	13,692	0,00063	0,00089	10,39
156	130	0,0019	5,476	0,00082	0,0014	2,798	4,759	10,292	14,833	0,00068	0,00097	1,126
168	140	0,0021	5,898	0,00088	0,0015	3,013	5,125	11,084	15,974	0,00074	0,001	1,212
180	150	0,0022	6,319	0,00094	0,0017	3,229	5,491	11,875	17,115	0,00079	0,0011	1,299
192	160	0,0024	6,74	0,001	0,0018	3,444	5,857	12,667	18,256	0,00084	0,0012	1,386
204	170	0,0025	7,162	0,0011	0,0019	3,659	6,223	13,459	19,397	0,00089	0,0013	1,472
216	180	0,0027	7,583	0,00113	0,0021	3,874	6,589	14,25	20,538	0,00094	0,00134	1,558
228	190	0,0029	8,004	0,0012	0,0022	4,089	6,955	15,042	21,679	0,001	0,0014	1,645
240	200	0,003	8,425	0,0013	0,0023	4,305	7,321	15,834	22,819	0,0011	0,0015	1,732
252	210	0,0031	8,846	0,00132	0,0024	4,519	7,688	16,625	23,96	0,00111	0,0016	1,818
264	220	0,0033	9,268	0,0014	0,0025	4,735	8,054	17,417	25,102	0,0012	0,00164	1,905
276	230	0,0035	9,689	0,0015	0,0026	4,95	8,419	18,209	26,243	0,00121	0,0017	1,991
288	240	0,0036	10,11	0,00151	0,0027	5,166	8,786	19	27,383	0,0013	0,0018	2,078
300	250	0,0038	10,531	0,0016	0,0028	5,381	9,152	19,792	28,525	0,00132	0,0019	2,164
312	260	0,0039	10,952	0,00164	0,0029	5,596	9,518	20,584	29,666	0,0014	0,00193	2,251
324	270	0,0041	11,374	0,0017	0,0031	5,811	9,884	21,375	30,806	0,00142	0,002	2,338
336	280	0,0043	11,795	0,0018	0,0032	6,027	10,2	22,167	31,948	0,0015	0,0021	2,424
348	290	0,0044	12,216	0,00183	0,0033	6,242	10,616	22,959	33,089	0,00153	0,0022	2,511
360	300	0,0046	12,637	0,0019	0,0034	6,457	10,982	23,75	34,229	0,0016	0,00224	2,597
366	305	0,0046	12,848	0,002	0,0035	6,592	11,165	24,146	34,79	0,00161	0,00227	2,641

Tabla B.3: Resultados análisis lineal unión 500x100x1

		PLA Vor	n-Mises		PL	A		Enchapado				
P [kgf]	N/m m	ε mm/mm	σ Мра	εx (+) mm/mm	εx (-) mm/mm	σx (+) Mpa	σх (-) Мра	σx (+) Mpa	σх (-) Мра	εx (+) mm/mm	εx (-) mm/mm	def. total mm
12	10	0,00026	0,715	0,00012	0,00018	0,389	0,558	1,427	1,916	0,000096	0,00014	0,635
24	20	0,00052	1,429	0,00024	0,00036	0,778	1,116	2,853	3,833	0,00019	0,00028	1,269
36	30	0,00078	2,144	0,00035	0,00055	1,167	1,674	4,279	5,749	0,00029	0,00041	1,905
48	40	0,001	2,859	0,00047	0,00073	1,556	2,233	5,706	10,751	0,00038	0,00055	2,254
60	50	0,0013	3,573	0,00059	0,00092	1,945	2,791	7,133	9,582	0,00048	0,00069	3,174
72	60	0,0016	4,288	0,00071	0,0011	2,333	3,349	8,559	11,498	0,00057	0,00082	3,809
84	70	0,0018	5,003	0,00083	0,0013	2,722	3,907	9,986	13,415	0,00067	0,00097	4,444
96	80	0,0021	5,717	0,00095	0,0015	3,111	4,465	11,413	15,331	0,00077	0,0011	5,079

Tabla B.4: Resultados análisis lineal unión 100x100x2

		PLA Von	-Mises		Р	LA			Encha	pado		
Р	N/mm	3	σ	εx (+)	εx (-)	σx (+)	σx (-)	σx (+)	σx (-)	εx (+)	εx (-)	def. total
[kgf]	IN/111111	mm/mm	Мра	mm/mm	mm/mm	Мра	Мра	Мра	Мра	mm/mm	mm/mm	mm
12	10	0,00023	0,653	0,00011	0,00019	0,391	0,613	1,451	1,992	0,000098	0,00014	0,631
24	20	0,00047	1,307	0,00023	0,00038	0,782	1,227	2,903	3,984	0,00019	0,00027	1,261
36	30	0,0007	1,96	0,00034	0,00058	1,173	1,84	4,354	5,975	0,00029	0,00041	1,892
48	40	0,00094	2,614	0,00045	0,00077	1,564	2,454	5,805	7,967	0,00039	0,00055	2,522
60	50	0,0012	3,267	0,00056	0,00096	1,955	3,067	7,256	9,959	0,00049	0,00069	3,153
72	60	0,0014	3,921	0,00068	0,0012	2,346	3,681	8,708	11,951	0,00059	0,00082	3,784
84	70	0,0016	4,574	0,00079	0,0013	2,737	4,294	10,159	13,942	0,00068	0,00096	4,414
96	80	0,0019	5,228	0,0009	0,0015	3,128	4,908	11,61	15,934	0,00078	0,001	5,045
108	90	0,0021	5,881	0,001	0,0017	3,519	5,521	13,061	17,926	0,00088	0,0012	5,675

Tabla B.5: Resultados análisis lineal unión 200x100x2

		PLA Von	-Mises		F	PLA			Encha	apado		
Р	N/mm	3	σ	εx (+)	εx (-)	σx (+)	σx (-)	σx (+)	σx (-)	εx (+)	εх (-)	def. total
[kgf]	IN/111111	mm/mm	Мра	mm/mm	mm/mm	Мра	Мра	Мра	Мра	mm/mm	mm/mm	mm
12	10	0,00024	0,637	0,00012	0,00017	0,407	0,549	1,461	1,975	0,000098	0,00014	0,623
24	20	0,00048	1,274	0,00024	0,00034	0,814	1,099	2,921	3,951	0,00019	0,00027	1,244
36	30	0,00072	1,911	0,00036	0,00052	1,221	1,64	4,382	5,926	0,00029	0,00041	1,866
48	40	0,00096	2,549	0,00048	0,00069	1,628	2,198	5,843	6,069	0,00039	0,00054	2,488
60	50	0,0012	3,186	0,00061	0,00086	2,035	2,748	7,304	9,877	0,00049	0,00068	3,109
72	60	0,0014	3,823	0,00073	0,001	2,442	3,298	8,764	11,853	0,00059	0,00082	3,732
84	70	0,0017	4,46	0,00085	0,0012	2,849	3,847	10,225	13,829	0,00069	0,00095	4,354
96	80	0,0019	5,097	0,00097	0,0014	3,256	4,397	11,686	15,804	0,00078	0,0011	4,976
108	90	0,0022	5,734	0,0011	0,0016	3,663	4,947	13,146	17,779	0,00089	0,0012	5,598

Tabla B.6: Resultados análisis lineal unión 500x100x2

		PLA Vor	n-Mises		PLA				Enchapado			
P [kaf]	N/mm	3	σ Mna	εx (+)	εх (-)	σx (+)	σx (-)	σx (+)	σx (-)	εx (+)	εx (-)	def. total
i [ivgi]	1 N/111111	mm/mm		mm/mm	mm/mm	Мра	Мра	Мра	Мра	mm/mm	mm/mm	mm
12	10	0,0003	0,865	0,00015	0,00023	0,458	0,734	1,759	2,417	0,00012	0,00017	1,216
24	20	0,00061	1,73	0,00029	0,00045	0,916	1,468	3,519	4,835	0,00024	0,00033	2,432
36	30	0,00091	2,596	0,00044	0,00068	1,375	2,204	5,279	7,252	0,00036	0,00049	3,649
48	40	0,0012	3,461	0,00058	0,00091	1,833	2,937	7,039	9,669	0,00048	0,00066	4,865
60	50	0,0015	4,326	0,00073	0,0011	2,291	3,671	8,799	12,087	0,0006	0,00083	6,081
72	60	0,0018	5,191	0,00088	0,0014	2,749	4,408	10,559	14,504	0,00072	0,00099	7,297

Tabla B.7: Resultados análisis lineal unión 100x100x2.5

Tabla B.8: Resultados análisis lineal unión 200x100x2.5

		PLA Von	n-Mises			PLA			Enchapado			
P [kgf]	N/mm	ε mm/mm	σ Мра	εx (+) mm/mm	εx (-) mm/mm	σx (+) Mpa	σх (-) Мра	σx (+) Mpa	σх (-) Мра	εx (+) mm/mm	εx (-) mm/mm	def. total mm
12	10	0,00028	0,788	0,00014	0,00024	0,483	0,762	1,802	2,404	0,00012	0,00017	1,209
24	20	0,00056	1,577	0,00028	0,00047	0,967	1,523	3,604	4,808	0,00024	0,00033	2,419
36	30	0,00084	2,365	0,00042	0,00071	1,45	2,285	5,406	7,212	0,00037	0,00049	3,628
48	40	0,0011	3,153	0,00056	0,00095	1,834	3,046	7,209	9,616	0,00049	0,00066	4,837
60	50	0,0014	3,941	0,00069	0,0012	2,417	3,808	9,011	12,02	0,00061	0,00083	6,047
72	60	0,0017	4,73	0,00083	0,0014	2,9	4,569	10,813	14,425	0,00073	0,00099	7,256

		PLA Vo	n-Mises		Р	LA		Enchapado				
P [kgf]	N/mm	ε mm/mm	σ Мра	εx (+) mm/mm	εx (-) mm/mm	σx (+) Mpa	σх (-) Мра	σx (+) Mpa	σх (-) Мра	εx (+) mm/mm	εx (-) mm/mm	def. total mm
12	10	0,00025	0,788	0,00015	0,00021	0,49	0,679	1,812	2,387	0,00012	0,00016	1,194
24	20	0,0005	1,577	0,00029	0,0042	0,98	1,358	3,624	4,774	0,00025	0,00033	2,389
36	30	0,00075	2,365	0,00044	0,00063	1,47	2,036	5,437	7,162	0,00037	0,00049	3,583
48	40	0,001	3,153	0,00058	0,00084	1,961	2,715	7,249	9,549	0,00049	0,00066	4,778
60	50	0,0013	3,942	0,00073	0,0011	2,451	3,394	9,061	11,936	0,00061	0,00082	5,972
72	60	0,0015	4,729	0,00087	0,0013	2,941	4,073	10,873	14,323	0,00074	0,00098	7,166

#### Tabla B.9: Resultados análisis lineal unión 500x100x2.5