



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y**  
**CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN MADERAS Y**  
**SUS BIOMATERIALES**

---

**DESEMPEÑO DE TRES ADHESIVOS EN ELEMENTOS**  
**LAMINADOS DE MADERA DE *pinus radiata* (D.DON),**  
**REFORZADA CON FIBRAS DE CARBONO**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Ingeniero de la Madera

**ALBERTO ANDRES IBARRA LOPEZ**

Profesor Guía: Ing. Forestal, Sr. Alejandro Bozo

---

**Santiago, Chile**

**2018**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA**  
**CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN MADERAS Y**  
**SUS BIOMATERIALES**

**DESEMPEÑO DE TRES ADHESIVOS EN ELEMENTOS LAMINADOS DE**  
**MADERA DE *PINUS RADIATA* (D.DON) REFORZADA CON FIBRAS DE**  
**CARBONO**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Ingeniero de la Madera

**ALBERTO ANDRÉS IBARRA LÓPEZ**

Calificaciones	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Alejandro Bozo González	6,5	
Prof. Consejero Sr. Alejandro García Mora	6,0	
Prof. Consejero Sr. Javier González Molina	6,0	

*Para las estrellas que desde el cielo me cuidan y protegen*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi familia ya que sin ellos esta tesis jamás hubiera podido ver la luz. Sin el constante apoyo de mi madre y de mi hermana con su familia jamás hubiese podido siquiera empezar este proceso, y no solo el relacionado con la titulación, sino que toda mi vida universitaria. De corazón, gracias por el apoyo.

Gracias a ti Yaritza, por ser mi pilar durante los últimos años en la Universidad, y por animarme siempre a ser más en la vida. Infinitas gracias por estar siempre conmigo apoyándome en todas, y sé que nos seguiremos apoyando en los años venideros.

También me gustaría agradecer a toda la gente de la universidad que me brindó sus consejos y ayuda durante el desarrollo de esta memoria, partiendo por el Profesor Alejandro Bozo que tuvo una paciencia tremenda para responder mis dudas e inquietudes, además de dar consejos en los momentos necesarios. También gracias a Rodrigo Elgueta y Don Patricio por su ayuda en el desarrollo de los ensayos, quienes fueron pieza fundamental en el desarrollo de algunas etapas de este informe.

Mis agradecimientos también para el Profesor Ricardo Silva y para Magda Orell que constantemente facilitaron equipos necesarios para el desarrollo de los estudios. Gracias a esta última también por siempre brindar la buena onda necesaria en momentos de estrés. Tampoco puedo olvidar al profesor Alexis Rojas que me ayudó con la parte estadística, que sin su ayuda no podría haber siquiera comenzado.

Gracias al Centro Tecnológico de la Calidad SPA, y a los Ingenieros de la Madera de la Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM) Alexis Manzano González y Gino Correa Jara, por su ayuda con la realización de los ensayos, así como también variados consejos para el desarrollo de los estudios. Además, gracias al personal del taller de la Universidad, especialmente a don Patricio que me ayudó con todo el proceso de dimensionado de las muestras.

Finalmente quiero dedicar esta memoria al cielo, porque ustedes son los más felices viéndome terminar este proceso desde allá arriba. Lamentablemente ya no están acá, pero sé que me brindan su apoyo y me cuidan día a día. Para ustedes Papá y Tía.

## INDICE DE CONTENIDOS

INDICE DE CONTENIDOS .....	ii
INDICE DE CUADROS .....	iv
INDICE DE FIGURAS .....	vi
RESUMEN .....	vii
ABSTRACT .....	x
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	2
1.1.1 La Madera .....	2
1.1.2 Materiales compuestos .....	2
1.1.3 Refuerzo de fibra de carbono.....	3
1.1.4 Adhesivos.....	3
1.1.4.1 Definición de adhesivo .....	3
1.1.4.2 Teoría de la adhesión.....	3
1.1.4.3 Adhesivos orgánicos sintéticos.....	4
1.1.4.4 Tipos de adhesivos según condiciones de servicio .....	6
1.1.4.5 Factores que influyen en la calidad de la unión encolada (Madera).....	6
1.1.4.8 Porosidad de la madera .....	7
1.1.5 Ensayos mecánicos.....	7
1.1.5.1 Flexión estática.....	7
1.1.5.2 Delaminación .....	7
1.1.5.3 Cizalle .....	8
1.2 OBJETIVOS.....	9
1.2.1 Objetivo General .....	9
1.2.2 Objetivos Específicos .....	9
2. MATERIALES Y MÉTODO .....	10
2.1 Materiales y equipos .....	10
2.2 Método .....	10
2.2.1 Fabricación de las Probetas .....	10
2.2.2 Preparación de las muestras.....	11
2.2.3 Obtención de las láminas de fibra de carbono .....	11

2.2.4	Fabricación de probetas.....	11
2.2.5	Dimensionado de las Probetas .....	12
2.3	Realización de ensayos .....	13
2.3.1	Flexión estática. ....	13
2.3.2	Cizalle .....	16
2.3.3	Delaminación .....	18
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
3.1	Resultados de los ensayos.....	20
3.1.1	Cizalle .....	20
3.1.2	Flexión estática .....	26
3.1.3	Delaminación .....	33
4.	CONCLUSIONES.....	38
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	39
APENDICE 1	.....	41
CANTIDAD DE ADHESIVO USADO EN LOS LAMINADOS	.....	41
APENDICE 2	.....	45
ESTUDIOS ANOVAS REALIZADOS EN EL INFORME	.....	45
APÉNDICE 3.	.....	48
VALORES EN DETALLE OBTENIDOS EN EL ESTUDIO	.....	48

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Prueba de Tukey realizada para ensayo de cizalle.....	25
Cuadro 2: Promedios de deformación para cada una de las probetas en flexión .....	26
Cuadro 3: Valores de los módulos de elasticidad y de rotura para probetas con refuerzo pegadas con Poliuretano .....	27
Cuadro 4: Valores de los módulos de elasticidad y de rotura para probetas testigo pegadas con Poliuretano .....	27
Cuadro 5: Valores de los módulos de elasticidad y de rotura para probetas con refuerzo pegadas con Sikadur .....	28
Cuadro 6: Valores de los módulos de elasticidad y de rotura para probetas testigo pegadas con Sikadur.....	28
Cuadro 7: Valores de los módulos de elasticidad y de rotura para probetas con refuerzo pegadas con Resorcinol .....	29
Cuadro 8: Valores de los módulos de elasticidad y de rotura para probetas testigo pegadas con Resorcinol.....	29
Cuadro 9: Prueba de Tukey realizada en el programa Minitab 2017 para el ensayo de Flexión estática, para los valores del MOR. ....	33
Cuadro 10: Prueba de Tukey realizada en el programa Minitab 2017 para el ensayo de Delaminación, para los 3 adhesivos estudiados. ....	36
Cuadro 11: Gráfico de promedios de los 3 ensayos realizados para las probetas en estudio. ....	37
Cuadro 12: Tabla que facilita cual es el adhesivo que mejor se comportó en relación a su importancia .....	37
Cuadro 13: Pesos de los sandwiches y cantidad de adhesivo aplicado a cada una de las probetas testigo utilizando el adhesivo Poliuretano. ....	42
Cuadro 14: Pesos de los sandwiches y cantidad de adhesivo aplicado a cada una de las probetas testigo utilizando el adhesivo Poliuretano. ....	42
Cuadro 15: Pesos de los sandwiches y cantidad de adhesivo aplicado a cada una de las probetas testigo con refuerzo utilizando el adhesivo sikadur 30. ....	43
Cuadro 16: Pesos de las muestras y cantidad de adhesivo aplicado a las muestras Sikadur testigo.....	43
Cuadro 17: Pesos de los sandwiches y cantidad de adhesivo aplicado a cada una de las probetas con refuerzo utilizando el adhesivo Resorcinol. ....	43
Cuadro 18: Pesos de los sandwiches y cantidad de adhesivo aplicado a cada una de las probetas testigo pegadas con adhesivo resorcinol.....	44
Cuadro 19: Estudio ANOVA realizado para las tensiones máximas de cizalle. ....	46
Cuadro 20: Estudio ANOVA desarrollado para delaminación.....	46
Cuadro 21: Estudio ANOVA desarrollado para el ensayo de Flexión, más específicamente el relacionado con el MOE. ....	46
Cuadro 22: Estudio ANOVA desarrollado para el ensayo de Flexión, más específicamente el relacionado con el MOR .....	47
Cuadro 23: Datos entregados luego del ensayo de las probetas con refuerzo pegadas con el adhesivo Loctite Poliuretano, con sus respectivos promedios de contenido de humedad de cada una de sus caras.....	49

Cuadro 24: Carga de Rotura y Contenido de Humedad (CH%) para cada muestra con refuerzo pegada con el adhesivo Loctite Poliuretano. ....	50
Cuadro 25: Carga de Rotura y Contenido de Humedad (CH%) para cada muestra con refuerzo pegada con el adhesivo Loctite Poliuretano. ....	51
Cuadro 26: Datos de Flexión estática para las muestras con refuerzo pegadas con adhesivo Loctite Poliuretano. ....	52
Cuadro 27: Dimensiones de las probetas con refuerzo y adhesivo Poliuretano. ....	53
Cuadro 28: Datos de Flexión estática para las probetas testigo asignadas a Poliuretano. ....	53
Cuadro 29: Dimensiones probetas testigo. ....	54
Cuadro 30: Datos de Flexión estática para las muestras con refuerzo pegadas con adhesivo Sikadur 30. ....	54
Cuadro 31: Dimensiones y Contenido de Humedad (CH%) para las muestras con refuerzo y usando adhesivo Sikadur 30. ....	55
Cuadro 32: Datos de Flexión estática para las muestras testigo asignadas al adhesivo Sikadur 30. ....	55
Cuadro 33: Dimensiones y Contenido de Humedad (CH%) para probetas testigo asignadas a Sikadur 30. ....	56
Cuadro 34: Datos de Flexión estática para las muestras con refuerzo pegadas con adhesivo Resorcinol. ....	56
Cuadro 35: Dimensiones y Contenido de Humedad (CH%) para las muestras con refuerzo pegadas con adhesivo Loctite Poliuretano. ....	57
Cuadro 36: Datos de Flexión estática para las muestras testigo asignadas al adhesivo Resorcinol. ....	57
Cuadro 37: Dimensiones y Contenido de Humedad (CH%) de probetas testigo asignadas al adhesivo Resorcinol. ....	58



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Preparación adhesivo Sikadur 30 (Parte A+B).....	11
Figura 2: Prensado muestras pegadas con Sikadur 30.....	12
Figura 3: Prensado muestras pegadas con Sikadur 30 desde otro ángulo.....	12
Figura 4: Laminados ya terminado el proceso de prensado.....	13
Figura 5: Muestras de cizalle sobre maderas pegadas con refuerzo de fibra de carbono.....	13
Figura 6: Luz de ensayo de flexión estática para las probetas del estudio.....	15
Figura 7: Deformación de las probetas durante el ensayo.....	15
Figura 8: Probeta testigo pegada con adhesivo Poliuretano.....	16
Figura 9: Máquina de ensayo en donde se realizó el estudio de cizalle.....	17
Figura 10: Probeta con refuerzo pegada con Poliuretano para ensayo de delaminación.....	18
Figura 11: Probeta pegada con Poliuretano desde otro ángulo.....	18
Figura 12: Cilindro de impregnación con válvula en la parte superior, donde se conectará con el compresor.....	19
Figura 13: Resultados Cizalle.....	21
Figura 14: Medias de datos de los 3 adhesivos estudiados.....	21
Figura 15: Interacciones entre los 3 adhesivos ensayados.....	21
Figura 16: Probeta ensayada con el adhesivo Resorcinol testigo.....	22
Figura 17: Probeta con refuerzo y pegada con resorcinol.....	23
Figura 18: Probeta con refuerzo pegada con poliuretano.....	23
Figura 19: Probeta testigo pegada con poliuretano.....	24
Figura 20: Probeta testigo resorcinol 11, con falla en madera y no en línea de cola.....	25
Figura 21: Deformación vs carga durante el ensayo de flexión.....	26
Figura 22: Diagrama de caja para MOE en todos los ensayos, donde C significa con refuerzo y S corresponde a las testigo.....	30
Figura 23: Interacciones del MOE.....	31
Figura 24: Efectos principales entre MOE.....	31
Figura 25: Comportamiento del MOR con los 3 adhesivos estudiados.....	31
Figura 26: Interacciones para MOR.....	32
Figura 27: Efectos principales del MOR.....	32
Figura 28: Porcentaje de delaminación (%) para los 3 adhesivos estudiados.....	34
Figura 29: Interacciones entre delaminación.....	34
Figura 30: Efectos principales entre delaminación.....	34
Figura 31: Resquebrajamiento de una probeta en línea de cola usando Sikadur 30....	35
Figura 32: Resquebrajamiento desde otro ángulo.....	36

## RESUMEN

Se estudió el comportamiento de tres adhesivos (Resorcinol, Poliuretano y Sikadur 30) en la unión encolada entre un refuerzo de fibra de carbono (Sika Carbodur) y madera de Pino radiata (*Pinus Radiata* D.Don.), mediante el desarrollo de tres ensayos: flexión estática, cizalle y delaminación.

En términos de flexión estática; se midió el módulo de ruptura (MOR) y módulo de Elasticidad (MOE), en cizalle se determinó la tensión máxima de cizalle y en delaminación se midió el porcentaje de falla de la unión encolada.

En flexión, el adhesivo que se comporta de mejor forma es Sikadur 30, con un MOE de 21532,01 N/mm<sup>2</sup> y un MOR de 147,76 N/mm<sup>2</sup>. Para el caso del cizalle los valores más altos de resistencia fueron para las muestras testigo de Poliuretano y Resorcinol, gracias a la alta capacidad de éstos de ingresar a los lúmenes celulares de la madera creando uniones fuertes. Sin embargo, las probetas pegadas con Sikadur 30 a la fibra de carbono fueron las que más resistieron en relación con los otros adhesivos, razón por la cual se sugiere como el mejor pegamento para este tipo de solicitaciones con refuerzo. El valor de tensión máxima de cizalle fue de 41,26 N/mm<sup>2</sup>.

En delaminación nuevamente los mejores desempeños se mostraron en las probetas testigo de poliuretano y resorcinol, mientras que en sikadur 30, el porcentaje de delaminación fue de 27,07 % en las muestras con refuerzo y de 65,48 en las testigos. En este sentido, Sikadur 30 presenta grandes resistencias, pero no se recomienda su uso durante largos períodos de tiempo. El mejor adhesivo en este caso fue Poliuretano, con 0% de delaminación en las muestras testigo y un 13,98% en las que sí tenían refuerzo.

De este modo, el mejor adhesivo para usar en la unión encolada entre madera y refuerzo de fibra de carbono es Sikadur 30, sin embargo se debe tomar en cuenta la alta delaminación que presenta este tipo de pegamento en Pino radiata, produciendo resquebrajamiento de la unión encolada a medida que transcurre el tiempo.

En segundo lugar, Poliuretano presentó altas resistencias en flexión luego de Sikadur, con un MOE de 19457,44 N/mm<sup>2</sup> y un MOR de 123,33 N/mm<sup>2</sup>, pero con solo 31,57 N/mm<sup>2</sup> de resistencia en cizalle. Además, sólo obtuvo un 13,98 % de delaminación en la línea encolada, valor que se recomienda en usos de baja resistencia, con uniones perdurables en el tiempo.

La opción menos favorable fue el Resorcinol, que si bien se desempeñó de forma correcta en la unión madera-madera, mostró bajos rendimientos en ensayos relativos a la relación madera-refuerzo.

Palabras clave: Adhesivo Sikadur 30, Poliuretano, Resorcinol, adhesivo, fibra de carbono, lámina de fibra de carbono Sika Carbodur, delaminación, cizalle, flexión estática.

## ABSTRACT

The performance of three adhesives (Resorcinol, Polyurethane and Sikadur 30) was studied in the glued union between samples or reinforcements of carbon fiber (Sika carbodur) and wood from radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) through the assessment of 3 test that included static flexion, delamination and cizalle.

For the static flexion assay, the modulus of rupture (MOR) and the modulus of elasticity (MOE) were quantified. Cizalle was determined, using the maximum tension and the delamination was evaluated according to the percentage of failure in the glued union.

Results showed that the best performance was reached by sikadur that exhibited a MOE equivalent to 21,532.01 N/mm<sup>2</sup> and a MOR of 147,76 N/mm<sup>2</sup> during the static flexion assay. For cizalle, the highest values of resistance were determined on control samples (wood-wood unions) of polyurethane and resorcinol because of their capacity to penetrate the intracellular space, creating strong unions. However, those samples glued with sikadur 30 were the most resistant in comparison to other adhesives and for this product was selected as the best option for this kind of solicitations. The highest value of maximum tension was 41,26 N/mm<sup>2</sup>.

In the delamination assay, the best performances were reached by control samples glued with polyurethane and resorcinol, while sikadur showed percentages of failure of 27,07% and 65,48% for samples and controls, respectively. In this sense, sikadur 30 exhibits high resistances but its use is not recommended for materials with expected long term under service. In this case, the best adhesive was polyurethane with 0% and 13,48% of failure for control and the rest of the samples, respectively.

So, the best adhesive intended for glued union between reinforcements of carbon fiber and woods is sikadur, however the high delamination must be considered due to the cracking that occurs during long term use.

In a second place, polyurethane showed high resistances, with MOE and MOR values of 19,457 N/mm<sup>2</sup> and 123,33 N/mm<sup>2</sup>, respectively cizalle resistance was 31,57 N/mm<sup>2</sup>. Furthermore, the percentage of failure was only 13,98% in the glued union, which is appropriate for uses that imply low resistance resulting in long term performances.

The worst option was resorcinol, which exhibited a low yield in assays focused on the union reinforcement-wood although it had a correct performance in wood-wood unions.

Key words: Sikadur 30, polyurethane, Resorcinol, adhesive, carbon fiber, Sika Carbodur, delamination, Cizalle, static flexion.

## 1. INTRODUCCIÓN

El mercado forestal es fundamental en el desarrollo económico del país, con un aporte del 3,1% al Producto Interno Bruto (PIB) nacional, un total de 16,2 millones de hectáreas de bosques, lo que representa más del 21% de la superficie del país, según el Instituto Forestal (INFOR, 2001). Del total -casi 14 millones de hectáreas-, sólo 2,3 millones de hectáreas están plantadas con pino (*Pinus radiata*) y eucalipto (*Eucalyptus globulus*), las dos principales especies exóticas plantadas en Chile. Sin embargo, son estas plantaciones las que proveen gran parte de los ingresos de la industria (Long, 2009).

El constante desarrollo de la industria forestal, además del exigente mercado, obligan a obtener mejoras y datos más precisos que permitan una producción más eficiente para lograr la más alta calidad del producto final. En esta línea, mientras más información se disponga, mayor probabilidad existirá de crear un producto de alta calidad, que cumpla con todos los estándares que el consumidor busca y que en términos generales proporcionen al mercado un producto de óptimas condiciones en términos económicos y sustentables.

Dentro de esta búsqueda, los materiales compuestos mejoran las propiedades de la madera por sí sola, mediante algún tipo de unión a otro tipo de material. Tableros de madera o revestimientos externos o internos de madera en usos estructurales son algunos ejemplos de la amplia gama de posibilidades que pueden obtenerse mediante este tipo de uniones. Gracias a los avances descritos, se ha podido realizar uniones eficientes que abren un nuevo abanico de posibilidades en el ámbito de la construcción.

Los materiales compuestos constan de dos o más sustratos de distintas propiedades que se pegan entre sí, mediante el uso de un adhesivo, siendo este último un factor primordial en la calidad de la unión y que, si se aplica de forma incorrecta, o si se utiliza un pegamento no adecuado para el uso final del material, puede llevar a que un producto no cumpla con los estándares mínimos de calidad esperados. Además, un mismo adhesivo no responde de la misma forma ante diferentes sustratos, ni a distintas condiciones de uso, por lo que un pegamento que es eficiente en madera puede no ser recomendable para uso en elementos de concreto o viceversa (Madrid, 2000).

Este estudio busca comprobar, dentro de tres adhesivos estructurales, la mejor opción para la unión entre madera de pino radiata y una lámina de fibra de carbono, realizando ensayos mecánicos como de flexión estática y de cizalle, así como también un ensayo de delaminación para determinar la calidad de la línea de cola

## **1.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **1.1.1 La Madera**

La Madera es un compuesto orgánico, heterogéneo, anisotrópico y biodegradable, combustible, termoplástico, polar e higroscópico, con variados usos en la época actual, desde aspectos estructurales hasta decoraciones varias, siendo históricamente uno de los materiales más utilizados por el hombre. Actualmente, en la mayoría de los países desarrollados su uso como material estructural alcanza cerca del 90% de la construcción habitacional total. Además, al ser renovable, la madera resulta un material ecológicamente ventajoso desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental (Pérez, 1978).

Tanto en lo teórico como en lo práctico, las construcciones de madera de hoy son diferentes a las de épocas anteriores. La búsqueda de nuevas opciones de aprovechamiento de restos de madera, como también las ganas de innovar con materiales cada vez más económicos, ha ampliado la gama de materiales derivados de la madera y productos en el mercado, desarrollándose elementos de madera aserrada encolada o grandes paneles de madera en los que no solo se utiliza pegamento, sino que también se utilizan diversos elementos como unión (Pérez, 1978).

### **1.1.2 Materiales compuestos**

Son aquellos materiales que se forman por la unión de dos materiales con el objetivo de conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener de los materiales originales (Callister y Rethwisch, 2009). Las propiedades que se obtienen de estas combinaciones son superiores a los materiales que los forman por separado, lo que hace que su utilización cada vez sea más imponente y sinérgica, sobre todo en aquellas piezas en las que se necesitan propiedades combinadas, en las que un material (polímero, metal o cerámico) por sí solo no puede brindar. Las propiedades que se obtienen son un producto de la combinación de los refuerzos que se utilicen y de la matriz que soporta al refuerzo en los materiales compuestos, el cual también juega un papel importante en la aplicación, razón por la cual resulta necesario hacer referencia a las propiedades que se obtienen al combinar refuerzo-matriz (Stupenengo, 2001).

### 1.1.3 Refuerzo de fibra de carbono

La estructura atómica de la fibra de carbono es similar a la del grafito. Consiste en láminas de átomos de carbono arreglados en un patrón regular hexagonal. La diferencia recae en la manera en que las láminas hexagonales que forman el grafito se entrecruzan, siendo en la fibra de carbono largas y delgadas. Los manojos de estas cintas se empaquetan entre sí para formar fibras, de ahí el nombre *fibra de carbono*. Es un material amorfo: las cintas de átomos de carbono están azarosamente empaquetadas o apretadas, lo cual hace que ante una tensión de tracción, las hojas se “traben” unas con otras, previniendo su deslizamiento entre capas e incrementando así su resistencia. Dentro de las ventajas que ofrece este tipo de material están:

- Niveles de resistencia mayores a otros tipos de elementos, tales como el acero y el concreto.
- Gran capacidad de aislamiento térmico
- Resistencia a las variaciones de temperatura
- Material muy ligero (Stupenengo, 2001).

### 1.1.4 Adhesivos

#### 1.1.4.1 Definición de adhesivo

Se puede definir adhesivo como aquella sustancia que aplicada entre las superficies de dos materiales permite una unión resistente a la separación. Denominamos sustratos o adherentes a los materiales que se pretende unir por mediación del adhesivo. El conjunto de interacciones físicas y químicas que tienen lugar en la interfase adhesivo/adherente recibe el nombre de adhesión (Madrid, 2000).

#### 1.1.4.2 Teoría de la adhesión

La técnica de encolado se basa en la teoría de que todos los objetos tienen átomos y moléculas que se unen entre sí por fuerzas principalmente eléctricas, así el encolado se basa en este principio y utiliza estas fuerzas para crear una unión entre dos cuerpos sólidos.

En elementos no porosos la unión será función sólo de las fuerzas de atracción que tendrán las moléculas de la superficie de los sustratos sobre las del adhesivo. Por ser la madera un elemento poroso existe una penetración del adhesivo mientras este permanezca en estado líquido. En la unión se manifiestan dos tipos de fuerzas; aquella con que el adhesivo se adhiere a la superficie, *adhesión*, y la fuerza con que se unen las moléculas de adhesivo entre sí, *cohesión*. El efecto de la penetración del adhesivo en la madera se traduce

en la diferenciación de tres zonas; la parte de madera impregnada de adhesivo de uno de los sustratos, la capa de adhesivo o línea de cola, y la parte de madera impregnada de adhesivo del otro sustrato.

En cuanto a las fuerzas desarrolladas y según los conceptos actuales de la teoría de la adhesión, se puede distinguir entre la adhesión específica y la mecánica (Maeda, 2004). Por tanto se entiende:

- Adhesión específica: Es la que se refiere a las fuerzas eléctricas que resultan de la atracción química entre los grupos activos de naturaleza polar de la madera y los grupos polares activos del adhesivo (Maeda, 2004).
- Adhesión mecánica: Los materiales adhesivos rellenan los huecos o poros de las superficies manteniendo las superficies unidas por enclavamiento. Existen formas a gran escala de costura, otras veces a media escala como el velcro y algunos adhesivos textiles que funcionan a escalas pequeñas (Maeda, 2004).

#### **1.1.4.3 Adhesivos orgánicos sintéticos.**

Las resinas sintéticas poco a poco han ido desplazando los productos naturales de un modo creciente desde que en las primeras décadas de este siglo comenzó su obtención industrial. Dichos adhesivos se dividen en termoestables y termoplásticos. Para el desarrollo de este estudio se utilizará solo adhesivos termoestables.

##### **- Adhesivos de Urea Formaldehído**

Se obtienen mediante polimerización por condensación entre la Urea y el Formaldehído, en un proceso que se interrumpe al alcanzarse un determinado punto. El curado se produce por adición de un ácido o sustancia liberadora de ácido, llamados también *endurecedores* o catalizadores, los cuáles se añaden justo antes de aplicar el adhesivo al sustrato. No obstante, se debe prestar atención a que frecuentemente el tiempo de trabajo con el adhesivo se ve drásticamente reducido, por lo que a veces puede ser necesaria la utilización de una sustancia retardadora de la reacción. Otro factor de importancia en la utilización de estos adhesivos es la aparición de grietas en la madera al aplicar capas gruesas de adhesivo, por lo que se debe aplicar una carga al adhesivo, el cual reduce esfuerzos y tensiones en el curado, y por ende, la contracción. Dichas cargas o extendedores pueden ser minerales u orgánicos, siendo los últimos harinas de tubérculos (almidones), harinas de cereales como el maíz o centeno, y harinas de madera, mientras que los minerales son del tipo óxido o silicatos. Son de naturaleza higroscópica, presentándose generalmente en polvo, con un Contenido de Humedad cercano al 70%, manteniéndose cercano



a este valor al contacto con la temperatura ambiente. Estas resinas presentan buena resistencia al agua, siempre y cuando esté fría, debilitándose con el agua caliente (70+-80°C), siendo nula cuando se usa agua hirviendo. Esta resistencia puede ser mejorada mediante la adición de melanina (Liesa y Bilurbina, 1990).

#### - **Adhesivos de Melamina Formaldehído**

El proceso de obtención de estos adhesivos es muy similar al de Urea Formaldehído, no habiendo alcanzado aún un campo de aplicación tan amplio como las anteriores. Se usan más como aditivos que como adhesivo. Necesitan una temperatura mínima de 65°C, empleándose sales amónicas o endurecedores ácidos para proceder con el fraguado. Se venden en forma de polvo, ya que así tienen un comportamiento más estable. Su gran ventaja reside en su resistencia al agua caliente, lo cual permite reforzar otras resinas. Presenta una resistencia a la humedad ligeramente inferior a la de otras resinas fenólicas. Se comercializan solas o con un catalizador, el cual permite un secado en mucho menos tiempo (Liesa y Bilurbina, 1990).

#### - **Adhesivos de Resorcina / Fenol Formaldehído**

La ventaja de la Resorcina, es poder polimerizar a temperatura ambiente mediante la adición de formaldehído, evitando así la acción del catalizador ácido del fenol, que debilita las fibras de madera adyacente a la zona de unión. Esta propiedad proviene de los grupos hidroxilo que causan un aumento en la velocidad de condensación del formaldehído. Resisten muy bien las acciones climatológicas adversas, incluida la resistencia al agua hirviendo. No obstante, luego del fraguado, el adhesivo adquiere características más duras, vidriosas y extremadamente rígidas, por lo que la adición de cargas se vuelve necesario para disminuir la contracción y aumentar las propiedades de relleno. Presentan propiedades parecidas con el resto de los adhesivos en relación a deformación térmica y fatiga, presentando raras veces problemas, y si es que ocurren, es posible que sean causados por los sustratos. El único problema de estos adhesivos es que manchan si existe una mala manipulación (Liesa y Bilurbina, 1990).

La aplicación más importante de este tipo de adhesivos es en la confección de vigas laminadas de madera y otras estructuras utilizadas en exteriores. Pueden aplicarse en la unión metal-madera, mejorando adherencia mediante la adición de polivinil butiral, por ejemplo. En la unión con algunos plásticos se ha obtenido buenos resultados usando laminados decorativos de melanina.

El adhesivo que hace varios años se utiliza para la fabricación de madera laminada es la Resorcina Fenol Formol, o Resorcinol (RFF). Hoy en día, ha ido

en aumento la utilización de Melamina Urea Formol (MUF) (Liesa y Bilurbina, 1990).

- **Otros adhesivos**
  
- **Poliuretano**

Los adhesivos de Poliuretano (PUR) se usan en diferentes áreas, por lo cual son extremadamente versátiles en sus propiedades físicas y químicas para satisfacer requisitos muy diversos – por ejemplo, en materiales aislantes o de amortiguación, capas exteriores o de recubrimiento para proteger superficies. Por otro lado, presentan una excelente flexibilidad y durabilidad y están disponibles como sistemas de uno o de dos componentes y son apropiados para pegar los materiales más diversos. Los adhesivos de PUR se adaptan a múltiples requisitos de aplicación y aportan características de protección. Entre ellas se incluyen la elasticidad, la buena resistencia a múltiples productos químicos y el calor, así como su idoneidad como masa de relleno y nivelación (Klebstoff, 2005).

#### **1.1.4.4 Tipos de adhesivos según condiciones de servicio**

Los adhesivos usados en la fabricación de madera laminada encolada estructural se clasifican según las condiciones a las que será expuesto cada elemento estructural de este material (*Norma Chilena NCh 2148.Of89, Madera laminada encolada estructural – Requisitos e inspección*).

#### **1.1.4.5 Factores que influyen en la calidad de la unión encolada (Madera)**

Principalmente son 3: la densidad, el contenido de humedad (CH%) y la porosidad de la madera. Existen también el hinchamiento, pH, entre otros, pero no importantes para el desarrollo de este estudio debido a que se centrará el enfoque en los factores ya descritos.

#### **1.1.4.6 Densidad de la Madera**

Es una de sus propiedades más importantes, ya que presenta una estrecha relación con el comportamiento físico-mecánico de dicho material. En cuanto a su encolabilidad, en maderas de alta densidad se forman uniones adhesivas pobres debido a que solo hay adhesión mecánica, produciéndose escurrimiento lateral en el momento del encolado y prensado. A densidades extremadamente bajas también hay uniones pobres, debido a que el sustrato absorbe totalmente

el adhesivo, creando una unión encolada débil. Se debe intentar nivelar dichos datos para obtener una unión encolada lo más eficiente posible (Poblete, 1978).

#### **1.1.4.7 Contenido de Humedad (CH%)**

La madera debe estar con un contenido de humedad bajo el punto de saturación de la fibra para obtener uniones encoladas confiables, debido a la absorción del adhesivo por parte de la madera. A contenidos de humedad sobre este porcentaje, la mayor cantidad de adhesivo quedará en la superficie del sustrato, produciéndose uniones de baja resistencia.

#### **1.1.4.8 Porosidad de la madera**

Debido a su gran porosidad la madera absorbe o cede agua del y al ambiente que lo circunda, según éste sea húmedo o seco y consecuentemente en relación con la época del año. La madera no obstante posee una cierta cantidad de agua estimada en un 20% - 30% de su peso, muy difícil que la pierda totalmente (Jonson, 1994).

### **1.1.5 Ensayos mecánicos**

#### **1.1.5.1 Flexión estática**

El ensayo de flexión consiste en aplicar una carga continua, a velocidad constante, en la mitad de la probeta, midiendo las deformaciones producidas por la aplicación de dicha carga hasta llegar al punto de rotura. Este ensayo consiste en un dispositivo con una barra transversal en cuyos extremos hay 2 puntos de apoyo de canto cilíndrico, entre los cuales, y justo al medio, existe otro punto de apoyo de similares características, y que es donde se aplicará la carga en donde se medirá la deformación según la norma NCh 2148: 2013 Madera laminada estructural – Requisitos, métodos de muestreo e inspección, y NCh 2150: 2013 - Madera Laminada encolada – Clasificación mecánica y visual de madera aserrada de Pino Radiata.

#### **1.1.5.2 Delaminación**

Es un proceso en el que se aplican condiciones extremas a la madera. De este modo se simula su desgaste en el tiempo. Mediante el uso de una autoclave o un cilindro de impregnación, se generan las condiciones a las cuales la madera estará expuesta en servicio, y así se verificará su posible desempeño frente a ellas. Según la Norma Chilena NCh 2148: 2013, consiste en la separación de las láminas de un elemento estructural de madera laminada encolada debido a la falla o falta de adhesivo en el tiempo.

### **1.1.5.3 Cizalle**

La resistencia de la madera al cizalle es la medida de su capacidad para resistir fuerzas que tienden a causar el deslizamiento de una parte sobre otra adyacente a la anterior. Las solicitaciones de cizalle se producen en mayor o menor grado en la mayoría de los usos de la madera (Ver *NCh 2148:2013* y *NCh 2150:2013*).

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo General

- Evaluar el desempeño de tres adhesivos (Resorcinol, LOCTITE PU 8103 y Sikadur 30) en elementos laminados de madera de *Pinus radiata* (*D.Don*) reforzada con fibras de carbono.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar el Módulo de Elasticidad (MOE) y Módulo de Ruptura (MOR) en flexión para madera encolada reforzada con una lámina de fibra de carbono.
- Determinar Tensión Máxima en Cizalle para madera encolada reforzada con un refuerzo de fibra de carbono.
- Determinar porcentaje de delaminación de la madera encolada reforzada.
- Determinar el adhesivo con mejor desempeño.

## 2. MATERIALES Y MÉTODO

### 2.1 Materiales y equipos

- Estufa de secado ERAEUS con capacidad para alcanzar los 70°C.
- Balanza electrónica de precisión 0,1g y capacidad máxima de 20 kg.
- Madera de *Pinus radiata* seca y cepillada.
- Sierra circular de mesa, para la obtención de probetas y refuerzos de fibra de carbono, de 380 V, 3 HP de potencia y un diámetro de sierra de 300 mm.
- Láminas de fibra de carbono para reforzamiento estructural Sika CarboDur.
- Resina epóxica Sikadur 30.
- Adhesivo de fraguado en frío Resorcinol Formaldehído.
- Adhesivo de Poliuretano LOCTITE PU 8103, con catalizador Macroplast UK 5400.
- Tensor universal equipado con un medidor de deformación.
- Cilindro de impregnación.
- Bomba de vacío.
- Compresor
- Bolitas de cristal utilizadas como peso para mantener probetas sumergidas.
- Lijadora de banda
- Prensas manuales.
- Máquina de compresión hidráulica con medidor de carga 1 kg de sensibilidad.
- Máquina Universal de ensayo INSTRON.

### 2.2 Método

Se estudió el efecto de tres tipos de adhesivos en la unión de un refuerzo de fibra de carbono con de madera de *Pinus radiata* (D.Don) seca y cepillada.

#### 2.2.1 Fabricación de las Probetas

Se fabricaron en total 130 probetas, de las cuales 60 correspondieron al ensayo de Flexión (30 testigos y 10 para cada uno de los adhesivos), 40 al cizalle (10 testigos y 10 para cada adhesivo) y 30 para delaminación (10 muestras para cada adhesivo). Cada probeta fue diseñada según la Norma Chilena NCh 2148:2013, desarrollando las siguientes etapas:

## 2.2.2 Preparación de las muestras

Mediante sierra circular, se obtuvieron 60 probetas de 20 x 20 x 340 mm de escuadría, con una tolerancia de  $\pm 2$  mm para flexión, otras 40 de 20 x 10 x 150 mm para cizalle y 30 más de 50 x 45 x 50 mm para delaminación. Fueron piezas libres de defectos revisadas mediante clasificación visual según Norma Chilena NCh 1207: 22005, con la finalidad de obtener resultados confiables al finalizar el estudio.

## 2.2.3 Obtención de las láminas de fibra de carbono

Se obtuvo láminas de fibra de carbono Sika CarboDur utilizando la sierra circular de banco ubicada en el taller del DIMB. Sus dimensiones fueron de 25 x 50 x 340 mm. Cabe destacar que, al igual que la madera, el refuerzo no presentaba defecto alguno para no afectar los resultados al final del estudio.

## 2.2.4 Fabricación de probetas

Se fabricaron laminados de madera-refuerzo utilizando los 3 tipos de adhesivos, con la finalidad de obtener las probetas destinadas para el desarrollo de los ensayos. Dichos laminados constaban de 2 trozos de madera, de 25 x 50 x 340 mm, con la lámina de refuerzo de fibra de carbono pegada entre ellos, con el mismo ancho y largo de dichas probetas. Se procedió a pesar las maderas antes del encolado, para así determinar cuánto adhesivo se agregó luego de la aplicación del pegamento. La preparación de los adhesivos se hizo respetando las instrucciones entregadas por el fabricante en sus respectivas fichas técnicas, y se puede observar su preparación en la Figura 1.



Figura 1: Preparación adhesivo Sikadur 30 (Parte A+B)

Luego del encolado, se ubicaron los laminados en las prensas manuales (Figura 2 y 3) para proceder con el prensado y secado de dichas muestras. Se siguieron las indicaciones entregadas por los fabricantes de cada adhesivo en sus respectivas fichas técnicas, realizando un prensado de al menos 7 días en un ambiente fresco y seco, para asegurar una unión encolada firme. Para evitar que las probetas se deslizaran entre ellas debido a lo viscoso del adhesivo, se fabricaron elementos de madera que se ubicaron en los extremos de cada sándwich, lo cual permitió que no existiera movimiento de las probetas durante el prensado.



Figura 2: Prensado muestras pegadas con Sikadur 30



Figura 3: Prensado muestras pegadas con Sikadur 30 desde otro ángulo

### 2.2.5 Dimensionado de las Probetas

Al tener los laminados con el adhesivo seco y completamente pegados, se procedió a medir y dimensionar las probetas para cada uno de los ensayos a realizar. Utilizando sierra circular, se obtuvo 2 probetas para delaminación, 1 para cizalle y otra para flexión por cada sándwich, cuyas características y



dimensiones son detalladas en el capítulo 3.2. Los laminados ya secos se muestran en las Figuras N°4 y N°5



Figura 4: Laminados ya terminado el proceso de prensado



Figura 5: Muestras de cizalle sobre maderas pegadas con refuerzo de fibra de carbono

## 2.3 Realización de ensayos

### 2.3.1 Flexión estática.

Al existir poca disponibilidad de refuerzo de fibra de carbono, y para aumentar el universo de probetas haciendo más representativo el estudio, cada muestra de 340 mm de largo, 50 mm de espesor y 50 mm de ancho destinado para flexión, fue dimensionada nuevamente, esta vez a lo largo utilizando la sierra circular, aumentando así al doble el número de probetas para el ensayo (se tenían solo 6 probetas con refuerzo para cada adhesivo, de 50 x 20 x 340, luego se dimensionó nuevamente para obtener 12 probetas de 20 x 20 x 340 mm). Es decir, se fabricaron 36 probetas con refuerzo destinadas a flexión (12 para cada

adhesivo), y 36 probetas testigo, sin ningún adhesivo ni refuerzo. Otro factor que se estudió fue el hecho de que fuera un sándwich de madera el utilizado en este ensayo, llegando a la conclusión de que este tipo de probeta no es el más adecuado para un ensayo de flexión, debido a que no se estudia realmente la resistencia del adhesivo y del refuerzo al quedar atrapado entre 2 maderas, razón por la cual usando la sierra circular, se eliminó una de las caras del sándwich, dejando solamente una pieza de madera con el refuerzo de fibra de carbono pegada a una de sus caras. Luego de esto, se procedió a lijar la fibra de carbono para así eliminar cualquier rastro de madera restante en su superficie, teniendo siempre la precaución de no dañar el refuerzo mediante la aplicación de un lijado excesivo.

Se estudió un total de 72 probetas de dimensiones finales 23 x 20 x 340 mm, 12 para cada adhesivo, cuyos extremos se ubicaron sobre los apoyos de la máquina de ensayo *tensor universal*. Además, se estudió también el desempeño de 36 muestras sin ningún tipo de refuerzo ni adhesivo, llamándolas testigo, con la finalidad de tener datos que permitan comparar y determinar el real efecto del refuerzo de fibra de carbono y del adhesivo al final del estudio.

Se midió la deflexión durante el experimento, producida en la mitad de la luz, para cargas progresivas, con intervalos de 2,5 mm/min, con una tolerancia de  $\pm 0,7$  mm/min, para así diseñar con las lecturas obtenidas un gráfico eficaz. Se realizó el ensayo de flexión en la máquina universal de ensayo INSTRON hasta 175 kg aproximadamente, para evitar fallas por aplastamiento en las probetas. Luego la muestra fue trasladada a la máquina neumática; llamada de compresión hidráulica, donde no se calcula la deformación, pero sí la carga máxima de rotura o de falla del adhesivo.

Luego, se registró la carga máxima **Q**, obtenida durante el ensayo (Carga necesaria para fracturar la probeta en la mitad de la luz). La disposición de la probeta se puede ver en la Figura N°6, mientras que en la Figura N°7 se observa la deformación que sufría la probeta durante el experimento.

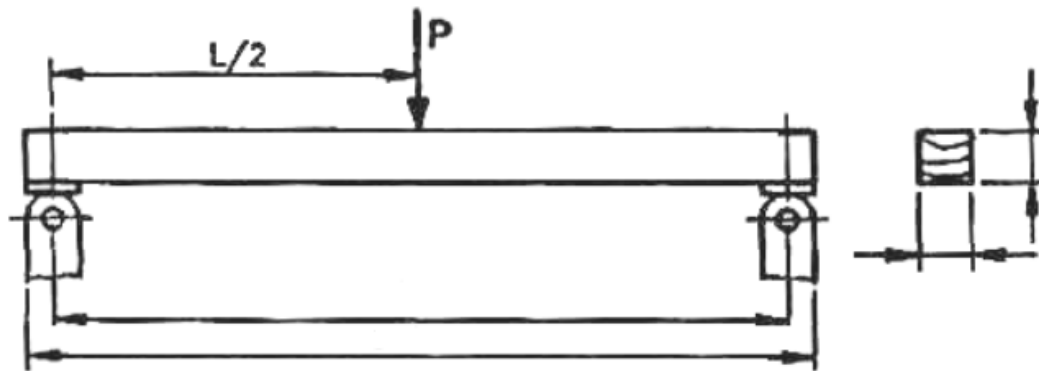


Figura 6: Luz de ensayo de flexión estática para las probetas del estudio

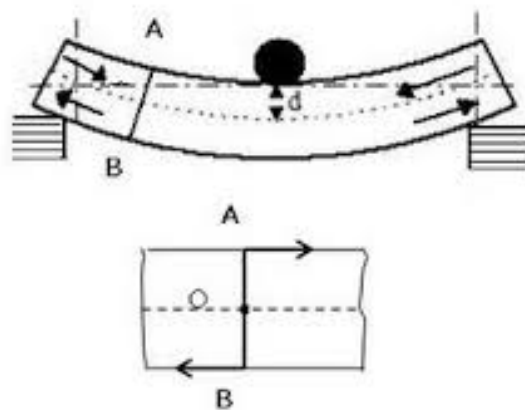


Figura 7: Deformación de las probetas durante el ensayo

Se calculó además el MOE (Módulo de Elasticidad) y el MOR (Módulo de Ruptura) de las probetas.

El MOE se determinó mediante la expresión (1)

$$MOE_x = \frac{L^3 P}{4bh^3 \delta} \quad (Ec. 1)$$

Donde:

$MOE_x$  = Módulo de elasticidad en flexión de la muestra x ( $Kg/cm^2$ ).

L = Luz de ensayo (cm).

b = Ancho de la pieza (cm).

h = Altura de la pieza (cm).

P = Carga aplicada (Kg).

$\delta$  = Deformación obtenida (cm).

El MOR se determinó mediante la fórmula (2)

$$MOR_x = \frac{3QL}{2bh^2} \quad (Ec. 2)$$

Donde:

MOR<sub>x</sub> = Módulo de ruptura en flexión de la muestra x (Kg/cm<sup>2</sup>).

Q = Carga máxima aplicada (Kg).

L = Luz de ensayo (cm).

b = Ancho de la pieza (cm).

h = Altura de la pieza (cm).

### 2.3.2 Cizalle

Esta determinación fue basada en la Norma Chilena NCh 2148:2013 y NCh 976.Of86.

Para el desarrollo de este ensayo, se prepararon 60 probetas de 20 x 10 x 150 mm, con un área de ruptura de 3 a 4 cm<sup>2</sup>, 10 para cada adhesivo y 30 como testigo, las cuales se fabricaron utilizando sierra circular. En palabras más simples, se fabricaron 10 probetas para cada adhesivo con refuerzo y otras 10 para el mismo, pero sin refuerzo, siendo 20 por cada pegamento.



Figura 8: Probeta testigo pegada con adhesivo Poliuretano

Se ubicaron las probetas de cizalle en la máquina neumática (Figura 9), en donde se aplicó una carga que aumentaba progresivamente a una velocidad aproximada de 2 kg por segundo. Se registró la carga de rotura de la madera o la carga en que el adhesivo presentó falla, y se denominó dicha carga con la letra **Q**. Se calculó la tensión máxima de cizalle paralelo a las fibras, **R<sub>v</sub>** mediante la Ecuación (3)

$$R_v = \frac{Q}{he} \quad (Ec. 3)$$

Donde:

R<sub>v</sub> = Tensión máxima de cizalle (Kg/cm<sup>2</sup>).

Q = Carga para la cual se obtiene la falla de la probeta (Kg).

h = Altura del plano de falla de la probeta (cm).

e = Ancho del plano de falla de la probeta (cm).

Inmediatamente después de la realización del ensayo, y utilizando el xilohigrómetro digital, se calculó el contenido de humedad (CH%) para así poder compararlos al final del estudio, y verificar la influencia directa en la calidad de la unión encolada final. Se realizaron 3 mediciones por cara de la probeta, siendo 6 mediciones por cada muestra.



Figura 9: Máquina de ensayo en donde se realizó el estudio de cizalle

El resultado de cada uno de los ensayos de cizalle aplicados a cada probeta, y el porcentaje de falla de la madera, debieron cumplir con los requisitos especificados en la Norma Chilena NCh 2148: 2013 Madera laminada encolada estructural – Requisitos, métodos de muestreo e inspección. Dichos datos se detallan en el Apéndice 3.

### 2.3.3 Delaminación

El ensayo fue basado en *la Norma Chilena NCh 2148:2013*.

Se fabricaron 72 probetas para delaminación, en donde cada adhesivo contó con 24 de ellas, 12 muestras con refuerzo y otras 12 como testigo, de dimensiones 20 x 50 x 75 mm. Cabe destacar que de cada sándwich se obtuvo 2 de dichas muestras, llamándoles probeta 1 y 2 respectivamente. En las Figuras 10 y 11 se puede ver una probeta con refuerzo para este ensayo.



Figura 10: Probeta con refuerzo pegada con Poliuretano para ensayo de delaminación



Figura 11: Probeta pegada con Poliuretano desde otro ángulo

Antes de comenzar el estudio, las probetas fueron pesadas en la balanza digital para luego ser ingresadas en un cilindro de impregnación, inundando el aparato de ensayo con agua a 25°C, para luego aplicar las etapas de vacío presión e inmersión. Durante media hora se aplicó un vacío de 500 mm de mercurio (500 mm Hg) (0,66 bar) utilizando la bomba de vacío conectada a la parte superior del cilindro de impregnación. El tiempo comenzó a ser registrado en el momento en que el vacío alcanzó los 0,66 bar. Luego de transcurrida media hora, y sin quitar el vacío, se aumentó la presión hasta 0,5 (MPa) utilizando el compresor, durante

2 horas. En la Figura 12 se puede ver el cilindro de impregnación utilizado en el estudio.



Figura 12: Cilindro de impregnación con válvula en la parte superior, donde se conectará con el compresor

Después de terminado el proceso de vacío-presión, las probetas fueron extraídas del cilindro de impregnación y fueron llevadas a la estufa para ser secadas durante 13 horas, a una temperatura constante de 70°C, hasta que sus pesos presentaran una disminución del 15% en relación con el que presentaban antes del ensayo. Se realizaron 3 ciclos de 24 probetas, para asegurar la total inmersión de cada una de ellas.

La delaminación se midió a lo largo de la línea de encolado de las muestras, como porcentaje de la suma de longitudes de líneas de encolado que estén en los extremos de la probeta. Durante la etapa de inmersión, las probetas debieron estar totalmente sumergidas, por lo que se utilizó bolitas de cristal como peso para mantenerlas bajo el agua durante todo el ensayo.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Para el diseño de los laminados se ocupó una cantidad de pegamento proporcional a la indicada por el fabricante en cada una de las fichas técnicas de cada adhesivo. Además, en el Apéndice 1, se puede encontrar cuánto adhesivo se le aplicó a cada una de las caras del sándwich, además de los pesos finales de cada una de las probetas.

En promedio se aplicó 18,16 y 19,40 g de Poliuretano para los laminados con refuerzo y testigos respectivamente, aplicando también 156,5 g y 142 g para Sikadur. Para el caso del adhesivo Resorcinol se agregó 14,66 g para los laminados con refuerzo y 19,4 g para las muestras testigo, todo esto en base a los datos de los fabricantes. Llama la atención la alta cantidad de adhesivo Sikadur necesario para una unión encolada de buena calidad, lo cual se suma al hecho de lo caro que resulta obtener dicho pegamento.

#### **3.1 Resultados de los ensayos**

##### **3.1.1 Cizalle**

Utilizando la versión de prueba del programa Minitab 17 se realizaron relaciones simples además de un estudio ANOVA para determinar si los distintos tratamientos con los adhesivos presentaron diferencias estadísticamente significativas entre ellos, además de determinar cuál de ellos presentaba un mejor rendimiento para las condiciones expuestas en cada uno de los experimentos. El comportamiento de las muestras se expresa en las Figuras 13, 14 y 15.



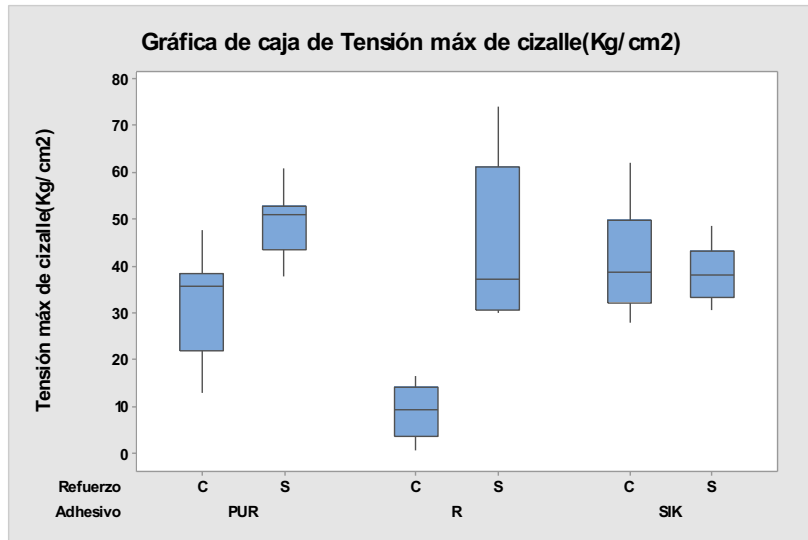


Figura 13: Resultados Cizalle

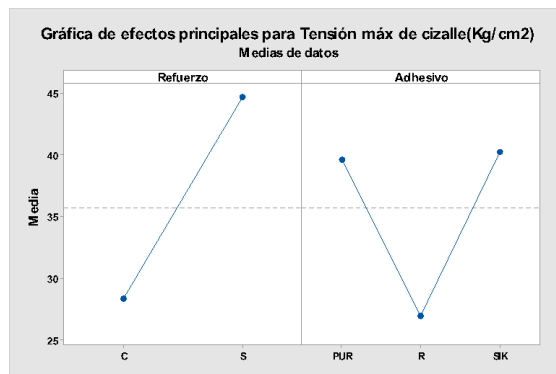


Figura 14: Medias de datos de los 3 adhesivos estudiados

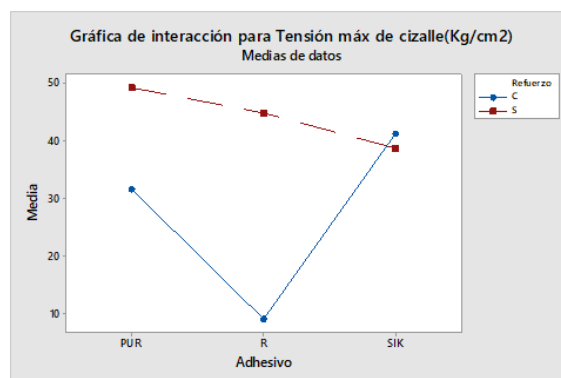


Figura 15: Interacciones entre los 3 adhesivos ensayados

El análisis estadístico indicó que existen diferencias significativas entre los ensayos, determinando la existencia de 3 tratamientos distintos. Esto se puede confirmar al verificar que las rectas en el gráfico de interacción se cruzan (Figura 16), lo que implica que si existe un potenciamiento de los factores del estudio

que tiene incidencia en los resultados finales. Por lo tanto, existe diferencia estadísticamente significativa entre usar o no usar adhesivo en el ensayo de cizalle. El modelo de Varianza (ANOVA) realizado para este ensayo puede verse en el Apéndice N°2

A primera vista se pueden apreciar valores distintos para cada tipo de adhesivo, teniendo cada uno de ellos un comportamiento particular. Se observa que las probetas sin refuerzo tuvieron una resistencia más alta que las muestras con refuerzo, excepto en el caso de Sikadur. Para el caso del Resorcinol, esta diferencia es aún más notoria, con valores mucho más altos para las probetas testigo. Esto se puede explicar debido a que la fibra de carbono no es un material poroso, por lo que se genera sólo adhesión mecánica entre los sustratos, afectándose la calidad de la unión encolada final. Además, durante el prensado de las muestras en el proceso de secado, el resorcinol y el poliuretano presentaron un escurrimiento exagerado al aplicar carga con las prensas, lo cual pudo haber afectado la pérdida de adhesivo y la consiguiente reducción en la calidad de la unión encolada final. Dicho fenómeno puede verse en las Figuras 16 y 17.



Figura 16: Probeta ensayada con el adhesivo Resorcinol testigo



Figura 17: Probeta con refuerzo y pegada con resorcinol

Para el caso de las testigos hubo falla de madera y altas resistencias, mientras que casi nulo pegado en las probetas con refuerzo de carbono. En la Figura 18 se muestra una probeta de cizalle con refuerzo, mientras que en la Figura 19 se ve una probeta testigo pegada con poliuretano.



Figura 18: Probeta con refuerzo pegada con poliuretano



Figura 19: Probeta testigo pegada con poliuretano

En general, el resorcinol fue el adhesivo que tuvo el menor desempeño en la relación madera-refuerzo, pero con unos rendimientos bastante altos en una relación madera-madera.

Para el caso del adhesivo Sikadur los valores entre probetas testigo y con refuerzo se mostraron bastante parejos, lo cual se puede explicar a las características espesas del adhesivo, que evitaron un escurrimiento excesivo del pegamento, obteniendo uniones encoladas de un grosor importante. En general, la falla se produjo en la madera y no en la unión de cola, lo cual indica la necesidad de repetir los ensayos en una madera más resistente. Dicho fenómeno se puede apreciar en la Figura 20, en donde la falla se presenta en la madera y no en la línea de cola.



Figura 20: Probeta testigo resorcinol 11, con falla en madera y no en línea de cola

Se realizó una prueba Tukey para verificar cuáles son los tratamientos que se comportan diferente entre sí, y cuáles son los que se comportan de forma estadísticamente similar.

La prueba Tukey realizada en este ensayo puede verse en el Cuadro 1.

Cuadro 1: Prueba de Tukey realizada en el programa Minitab 2017 para ensayo de cizalle

Adhesivo*Refuerzo	N	Media	Agrupación
PUR S	10	49,2666	A
R S	10	44,9140	A
SIK C	12	41,2633	A B
SIK S	8	38,7386	A B
PUR C	12	31,5663	B
R C	10	9,0220	C

Según la prueba Tukey, las muestras testigo de los 3 adhesivos se comportan de forma similar, pudiéndose agrupar en el llamado grupo A (esto puede ser lógico debido a que las muestras testigo no tenían adhesivo alguno en sus caras, siendo entonces muestras iguales). Además, la prueba afirma que las muestras de sikadur testigo y con refuerzo se comportan de forma estadísticamente similar al PUR con refuerzo, agrupándolas en un grupo B. En el caso del Resorcinol con refuerzo, Tukey la asocia con un grupo independiente C.

En resumen, para el caso de la Tensión máxima de cizalle, puede destacarse el uso del Poliuretano sin Refuerzo, obteniendo una unión encolada de alta calidad. Para el caso de las probetas con refuerzo, el adhesivo con mejores resultados fue Sikadur 30, presentando además un desempeño bastante uniforme entre muestras testigos y reforzada. El adhesivo con rendimiento más bajo fue el

resorcinol con refuerzo, con casi nula capacidad de pegado en la relación fibra de carbono-madera.

### 3.1.2 Flexión estática

Los promedios de deformaciones pueden verse en la Cuadro 2, mientras que las deformaciones y cargas pueden verse en la Figura 21.

Cuadro 2: Promedios de deformación para cada una de las probetas en flexión (mm).

Carga (Kg)	Deformación (mm)					
	Poliuretano		Sikadur		Resorcinol	
	Def. Testigo	Def. CR	Def. Testigo	Def. CR	Def. Testigo	Def. CR
10	1,26	1,08	1,33	1,14	1,68	1,12
20	1,74	1,32	1,79	1,34	2,22	1,44
30	2,16	1,56	2,26	1,56	2,81	1,75
40	2,61	1,80	2,66	1,77	3,36	2,04
50	3,05	2,05	3,09	1,98	3,97	2,42
60	3,53	2,30	3,58	2,19	4,56	2,77
70	4,03	2,53	4,02	2,40	5,22	3,11
80	4,52	2,79	4,60	2,62	5,91	3,59
90	5,08	3,05	5,09	2,84	6,72	4,07
100	5,71	3,32	5,73	3,07	7,58	4,53
110	6,45	3,60	6,50	3,31	8,70	5,11
120	7,11	3,93	7,25	3,56	9,77	5,30
130	7,37	4,26	7,75	3,81	10,38	5,09
140	8,45	4,68	8,12	4,10	11,16	6,08
150	9,38	5,08	9,29	4,42	10,94	6,64
160	10,06	5,25	9,03	4,76	12,99	7,01
170	9,20	5,73	9,93	5,06	-	8,09
180	6,72	6,14	-	4,82	-	8,28
190	7,49	8,02	-	-	-	6,56
200	8,58	8,00	-	-	-	7,28
210	9,72	-	-	-	-	8,60

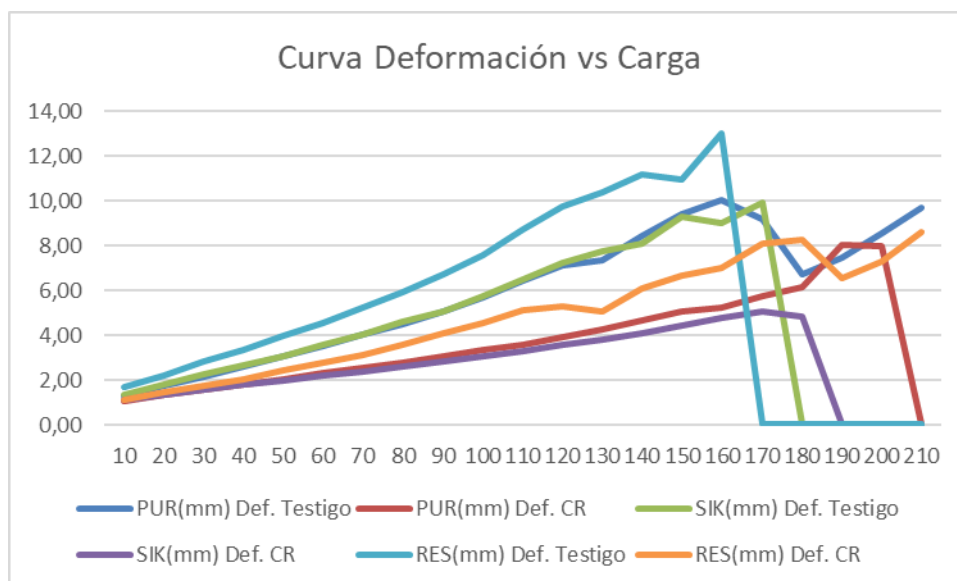


Figura 21: Deformación vs carga durante el ensayo de flexión

La figura anterior muestra el comportamiento de la deformación que sufrieron las probetas a medida que se aumentaba la carga aplicada en el centro de la luz, y muestra lo esperado: las muestras testigo se deformaron en mayor grado que las probetas con refuerzo. Las probetas testigo son las 3 rectas superiores, con mayor deformación, mientras que las probetas que se reforzaron fueron las que presentaron menos grados de deformación. Para el caso de las probetas reforzadas, las que más se deformaron fueron las que tenían resorcinol, en segundo grado las probetas PUR y finalmente las muestras SIK. Las deformaciones de cada una de las muestras se detallan en el Apéndice 4.

### 3.1.2.2 Módulo de Elasticidad y Módulo de Ruptura.

Cuadro 1: MOE Y MOR para probetas con refuerzo pegadas con Poliuretano

Probetas	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	MOR(N/mm <sup>2</sup> )
1PUR1	23891,50	133,48
1PUR2	-	-
1PUR3	20009,64	129,37
1PUR4	16879,81	85,86
1PUR5	21596,55	155,00
1PUR6	17114,98	77,96
1PUR7	18689,17	122,51
1PUR8	21917,46	126,45
1PUR9	19016,24	132,65
1PUR10	18487,74	127,68
1PUR11	-	-
1PUR12	16971,31	142,30
Valor Máx	23891,50	155,00
Valor Mín	16879,81	77,96
Desv. Est.	2371,84	23,76
Promedio	19457,44	123,33

Donde 1PUR1 – 1PUR12: Probetas con refuerzo pegadas con poliuretano.

Cuadro 2: MOE Y MOR para probetas testigo pegadas con Poliuretano.

Probetas	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	MOR(N/mm <sup>2</sup> )
PURT1	15534,26	105,01
PURT2	10034,78	84,08
PURT3	9881,03	84,36
PURT4	16097,45	95,40
PURT5	15414,85	98,71
PURT6	14493,64	96,95
PURT7	-	-
PURT8	14635,39	73,83
PURT9	10542,52	94,17
PURT10	9216,61	68,17
PURT11	-	-
Valor Máx	16097,45	105,01
Valor Mín	9216,61	68,17
Desv. Est.	2860,96	12,20
Promedio	12872,28	88,97

Donde PURT1 – PURT11: Probetas testigo pegadas con poliuretano.

- : Probetas que fallaron antes de tener datos que sirvan para el estudio, se despegaron o no cumplieron los requisitos mínimos para ser considerados en el estudio.

Cuadro 3: MOE Y MOR para probetas con refuerzo pegadas con Sikadur

Probetas	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	MOR(N/mm <sup>2</sup> )
S1	21748,44	140,96
S2	18026,88	151,20
S3	-	-
S4	18324,26	155,84
S5	25688,78	167,38
S6	20596,30	133,82
S7	19421,36	153,97
S8	-	-
S9	18966,97	160,31
S10	26725,58	127,26
S11	21231,91	147,04
S12	24589,58	139,86
Valor Máx	26725,58	167,38
Valor Mín	18026,88	127,26
Desv. Est.	3130,90	12,39
Promedio	21532,01	147,76

Donde S1-S12 son las probetas con refuerzo pegadas con sikadur 30. S3 y S8 fueron problemas desechadas del estudio.

Cuadro 4: MOE Y MOR para probetas testigo pegadas con Sikadur

Probetas	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	MOR(N/mm <sup>2</sup> )
ST1	10802,00	71,41
ST2	12330,83	95,26
ST3	18085,26	100,87
ST4	17488,73	92,21
ST5	19119,98	114,24
ST6	16304,51	111,89
ST7	15685,24	96,93
ST8	-	-
ST9	15390,97	104,83
ST10	11719,45	81,90
Valor Máx	19119,98	114,24
Valor Mín	10802,00	71,41
Desv. Est.	2960,32	13,71
Promedio	15214,11	96,61



Donde ST1-ST10: Probetas testigo pegadas con sikadur 30. S8 no se consideró para el estudio.

Cuadro 5: MOE Y MOR para probetas con refuerzo pegadas con Resorcinol

Probetas	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	MOR(N/mm <sup>2</sup> )
R1	20921,19	121,27
R2	17029,78	37,92
R3	8520,47	68,22
R4	15839,01	52,29
R5	10564,31	57,97
R6	15460,43	100,33
R7	17804,76	80,93
R8	25344,24	101,47
R9	14107,37	51,36
R10	33908,92	97,05
R11	26710,78	104,91
R12	16653,57	83,08
Valor Máx	33908,92	121,27
Valor Mín	8520,47	37,92
Desv. Est.	7146,08	26,08
Promedio	18572,07	79,73

Donde R1-R12 son las probetas con refuerzo pegadas con resorcinol.

Cuadro 6: MOE Y MOR para probetas testigo pegadas con Resorcinol

Probetas	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	MOR(N/mm <sup>2</sup> )
RT1	7799,79	63,32
RT2	10010,61	79,70
RT3	10877,03	80,06
RT4	17993,68	106,12
RT5	8296,18	96,97
RT6	11225,80	84,31
RT7	19058,49	61,21
RT8	8783,57	74,43
RT9	14463,19	99,29
RT10	9658,11	70,24
RT11	-	-
Valor Máx	19058,49	106,12
Valor Mín	7799,79	61,21
Desv. Est.	4006,74	15,25
Promedio	11816,65	81,56

Donde RT1-RT11 son las probetas testigo pegadas con resorcinol. RT11 falló durante el proceso de pegado.

### 3.1.2.2.1 Módulo de Elasticidad (MOE)

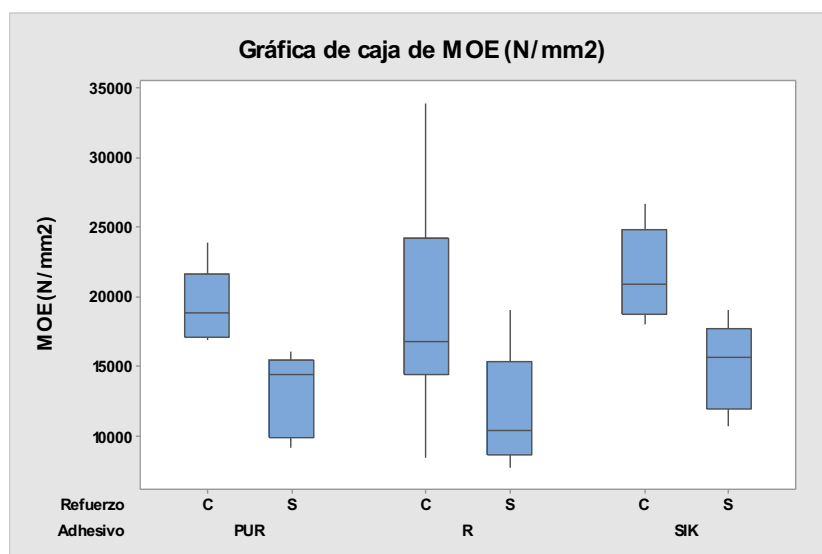


Figura 22: Diagrama de caja para MOE en todos los ensayos, donde C significa con refuerzo y S corresponde a las testigos

La gráfica anterior es un diagrama de caja que muestra cómo se comportó el MOE utilizando los 3 tipos de adhesivos. Se aprecia a primera vista que el MOE es mayor en las probetas que presentan refuerzo de fibra de carbono en los 3 adhesivos, sin diferencias significativas entre ellos. El modelo resultante del ANOVA se puede encontrar en el Apéndice 2. Además, se realizó una prueba de Tukey para verificar si los distintos tratamientos presentaban diferencias significativas. Los resultados de dicho estudio se pueden ver en el Cuadro 9.

Cuadro 9: Prueba de Tukey realizada en el programa Minitab 2017 para el ensayo de Flexión estática.

Adhesivo*Refuerzo	N	Media	Agrupación
SIK C	10	21532,0	A
PUR C	10	19457,4	A B
R C	12	18572,1	A B
SIK S	9	15214,1	B C
PUR S	9	12872,3	C
R S	10	11816,6	C

La prueba de Tukey determinó que los ensayos con refuerzo usando los 3 adhesivos no tienen diferencias significativas, al igual que las muestras testigo entre ellas. Además, también se determinó que las muestras pegadas con poliuretano y resorcinol al refuerzo no presentan una diferencia estadísticamente significativa en relación con las probetas Sikadur testigo. El comportamiento de dichos adhesivos puede verse en las Figuras 23 y 24.

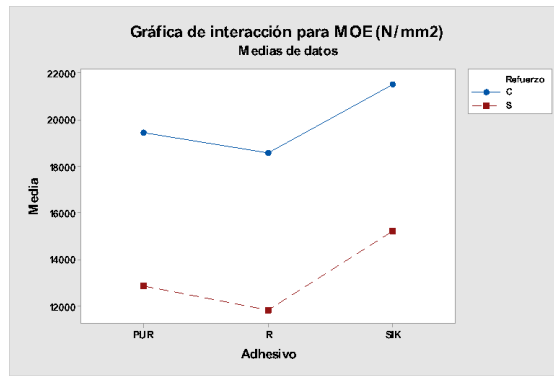


Figura 23: Interacciones del MOE

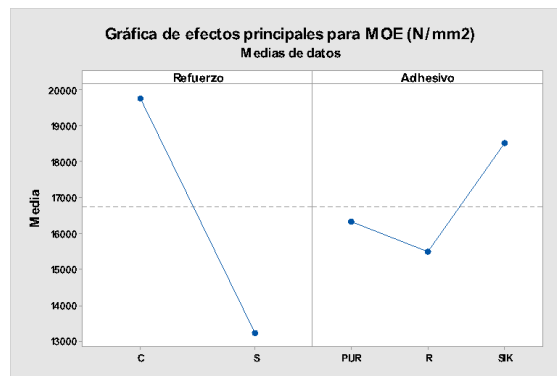


Figura 24: Efectos principales entre MOE

Las figuras indican que el mejor valor para MOE lo presentaron las probetas pegadas con Sikadur 30 al refuerzo de fibra de carbono, mientras que las muestras con peor rendimiento fueron las Resorcinol testigo.

### 3.1.2.2 Módulo de Ruptura (MOR)

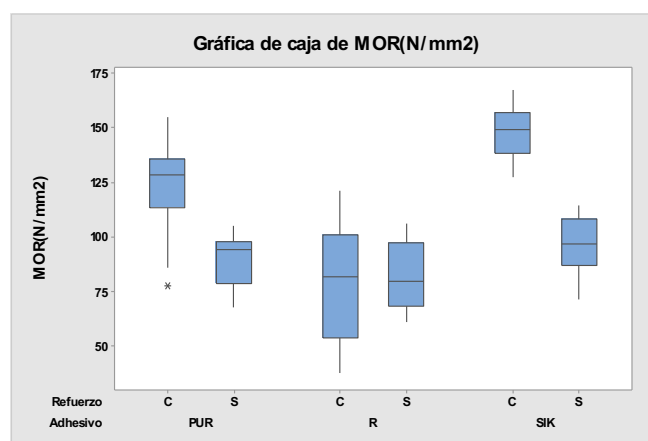


Figura 25: Comportamiento del MOR con los 3 adhesivos estudiados

Se puede observar en el gráfico previamente expuesto que los ensayos en los que se utilizó poliuretano y sikadur presentan diferencias estadísticamente significativas entre usar o no usar el refuerzo de fibra de carbono, mientras que

para el resorcinol no existe gran diferencia entre probetas con refuerzo y probetas testigo.

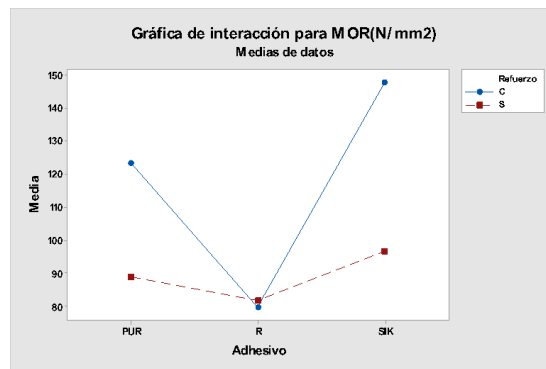


Figura 26: Interacciones para MOR

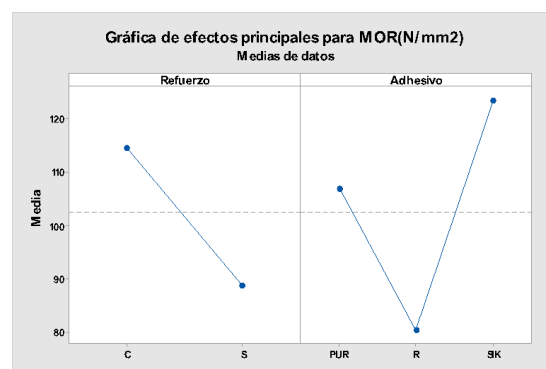


Figura 27: Efectos principales del MOR

Analizando las figuras anteriores, se puede observar que los mayores valores para el MOR se pueden encontrar en las probetas SIK con refuerzo, mientras que el peor rendimiento lo obtienen las muestras Resorcinol con refuerzo. Nuevamente el resorcinol aparece como el adhesivo menos resistente en relación al uso o no uso de un refuerzo de fibra de carbono, obteniendo valores muy por debajo al resto de los pegamentos, en contraste con los altos valores de resistencia que alcanzaron las muestras de sikadur con refuerzo, en donde normalmente antes de fallar la unión encolada, fallaba la madera.

El entrecruzamiento de las rectas de la figura 26 indica que existe un potenciamiento de las propiedades del refuerzo en relación con el adhesivo. Es decir, muestra de que la presencia del refuerzo si provoca diferencias estadísticamente significativas en los resultados obtenidos al final del estudio. Para comprobar dicha aseveración se llevó a cabo la prueba Tukey correspondiente. Los resultados de dicha prueba pueden verse en el Cuadro 10.

Cuadro 10: Prueba de Tukey realizada en el programa Minitab 2017 para el ensayo de Flexión estática, para los valores del MOR.

Refuerzo_1*Adhesivo_1	N	Media	Agrupación	
S PUR	10	1175,90	A	
S R	10	1074,60	A	
C SIK	12	990,33	A	B
S SIK	8	918,37	A	B
C PUR	12	764,25		B
C R	10	202,60		C

La prueba Tukey muestra de que existen 3 tipos de tratamientos dentro del ensayo, determinando que los resultados de las probetas testigo para los 3 adhesivos junto con las probetas pegadas al refuerzo de fibra de carbono con Sikadur 30 son similares. Del mismo modo se determinó que las muestras con refuerzo pegadas con Sikadur 30 y con poliuretano parecidas a las probetas testigo del grupo Sikadur 30. Finalmente, se determinó que las probetas con refuerzo pegadas con resorcinol poseen diferencias significativas con el resto de los adhesivos.

### 3.1.3 Delaminación

Para el caso de la delaminación, el adhesivo Poliuretano fue el que mejor se comportó, produciendo casi nulas delaminaciones al término del ensayo. El adhesivo Sikadur presentó resquebrajamiento en la unión encolada, lo que fue considerado en este estudio como un factor de delaminación, mientras que las probetas de resorcinol con refuerzo obtuvieron un 100% de delaminación. Éstas últimas se despegaban al simple contacto, siendo prueba concreta de lo débil de la unión encolada que este adhesivo genera en la interfase fibra de carbono-Madera. Para el caso de las probetas resorcinol testigo, la unión encolada soportó bien. Dichos fenómenos se pueden apreciar mejor en la Gráfica de caja que se puede observar a continuación en la Figura 28.

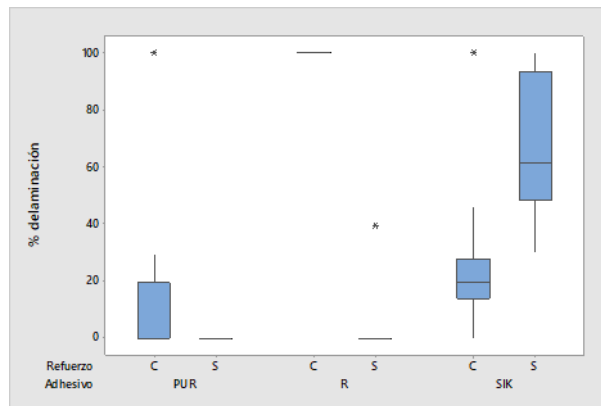


Figura 28: Porcentaje de delaminación (%) para los 3 adhesivos estudiados

Analizando más a fondo el gráfico anterior se pueden realizar variadas afirmaciones, pero se realizó un estudio ANOVA cuyo modelo puede encontrarse en el Apéndice 2.

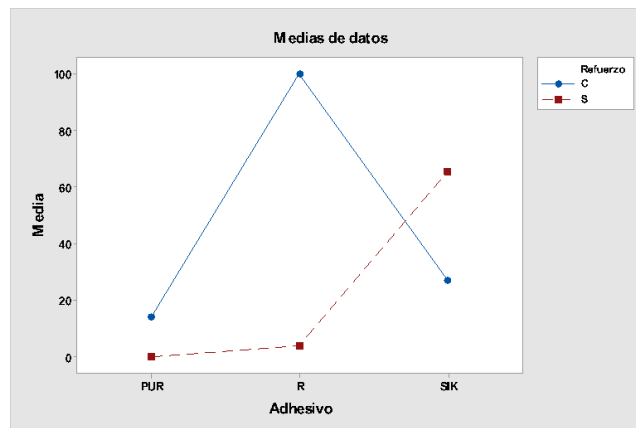


Figura 29: Interacciones entre delaminación

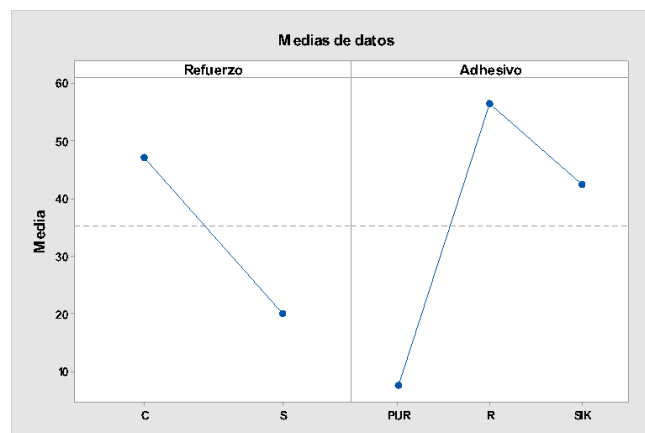


Figura 30: Efectos principales entre delaminación

Analizando el gráfico se pudo determinar que existe diferencia estadísticamente significativa entre usar o no refuerzo de fibra de carbono y sobre qué adhesivo ocupar. En el gráfico de interacción (Figura 29) se puede apreciar que el adhesivo resorcinol presentó delaminación total en las probetas con refuerzo, aclarando una vez más que es el adhesivo más débil en la unión madera-refuerzo. No obstante, casi no presentó delaminación en el caso de las probetas testigo, lo cual lo hace una buena alternativa para unir madera-madera. En el caso del poliuretano, las probetas testigo tuvieron bajo porcentaje de delaminación, y las que tenían refuerzo tuvieron un promedio de delaminación cercano al 20%. Por último, el adhesivo Sikadur presentó grandes separaciones en las líneas encoladas. Ejemplo de dichos resquebrajamiento en la línea de cola puede verse en las Figuras 31 y 32. Se entiende que, al ser un adhesivo con gran rigidez, y al existir una línea de cola tan gruesa en las probetas testigo, es lógico que se produzcan resquebrajamiento en su estructura, reduciéndose en las muestras con refuerzo. Para las muestras reforzadas, la misma fibra de carbono sirve como un material que disminuye el grosor de la línea de cola, disminuyendo tensiones y la posibilidad de resquebrajamiento del adhesivo. Para confirmar dichas afirmaciones se desarrolló la prueba Tukey correspondiente, la cual se puede ver en el Cuadro 11.



Figura 31: Resquebrajamiento de una probeta en línea de cola usando Sikadur 30



Figura 32: Resquebrajamiento desde otro ángulo

Cuadro 11: Prueba de Tukey realizada en el programa Minitab 2017 para el ensayo de Delaminación, para los 3 adhesivos estudiados.

Adhesivo*Refuerzo	N	Media	Agrupación
R C	12	100,000	A
SIK S	8	65,484	B
SIK C	12	27,074	C
PUR C	12	13,986	C D
R S	10	3,943	C D
PUR S	10	-0,000	D

Dicha prueba confirmó que, además de todo lo anterior, los resultados de este ensayo sí presentan diferencias estadísticamente significativas.

En resumen, el mejor adhesivo para el caso de las probetas testigo es el resorcinol junto con el Poliuretano, con bajísimo porcentaje de delaminación. Para el caso de probetas reforzadas el adhesivo que presentó mejores valores fue también el Poliuretano, pero seguido muy de cerca por el Sikadur 30. Un detalle a tomar en cuenta es que el adhesivo poliuretano es mucho más barato que el sikadur, y además se necesita aplicar menor cantidad para obtener resultados similares. Esto se explica mejor en los Cuadros 12 y 13.



## Resumen de los 3 ensayos

Cuadro 12: Gráfico de promedios de los 3 ensayos realizados para las probetas en estudio.

RESULTADOS FINALES	PUR		RES		SIK		
	C	S	C	S	C	S	
MOE (N/mm <sup>2</sup> )	19457,44	12872,28	18572,07	11816,65	21532,01	15214,11	EI
MOR(N/mm <sup>2</sup> )	123,33	88,97	79,73	81,56	147,76	96,61	ED
Cizalle	31,57	49,27	9,02	44,91	41,26	38,74	ED
Delaminación	13,9858333	0	100	3,94	27,07	65,48	ED

Cuadro 13: Tabla que facilita cual es el adhesivo que mejor se comportó en relación a su importancia.

RESULTADOS FINALES	PUR		RES		SIK		
	C	S	C	S	C	S	
MOE (N/mm <sup>2</sup> )	MOE2	MOE5	MOE3	MOE6	MOE1	MOE4	EI
MOR	MOR2	MOR4	MOR6	MOR5	MOR1	MOR3	ED
Cizalle	5	1	6	2	3	4	ED
Delaminación	3	1	6	2	4	5	ED

#### 4. CONCLUSIONES

El adhesivo sikadur demostró tener mucha resistencia en los ensayos de flexión, con altos valores en relación a las probetas sin refuerzo (MOR con refuerzo: 147,76 N/mm<sup>2</sup> / MOR sin refuerzo: 96,61 N/mm<sup>2</sup>)( MOE con refuerzo: 21532,01 N/mm<sup>2</sup> / MOE sin refuerzo: 15214,11 N/mm<sup>2</sup>). Sin embargo, mostró altas fallas en la línea encolada luego del ensayo de delaminación, con resquebrajamientos comunes e incluso pérdida de adhesivo en algunas partes específicas, lo cual indica que es un adhesivo sensible a fallar tras el paso del tiempo (delaminación con refuerzo llegó a 27%, mientras que sin refuerzo fue de 65,48%). Respecto al ensayo de cizalle, fue el único adhesivo que tuvo mejores resultados en las probetas con refuerzo (41,26) que las testigos (38,74), punto a tomar en cuenta si se quiere someter el sustrato a estos tipos de esfuerzo.

El adhesivo poliuretano sorprendió con sus altos valores de resistencia a la flexión con (MOE: 19457,44 N/mm<sup>2</sup> ; MOR: 123,33 N/mm<sup>2</sup>) y sin (MOE: 12872,28 N/mm<sup>2</sup> ; MOR: 88,97 N/mm<sup>2</sup>) refuerzo, con un MOE, MOR y tensión máxima de cizalle cercanos a los del Sikadur. Lo que destaca este adhesivo es la mínima falla en la línea de cola luego del ensayo de delaminación (13,98 %), siendo nula incluso en las probetas testigo. Este pegamento mostró gran resistencia a los efectos del paso del tiempo, convirtiéndolo en una buena alternativa si se quiere usar en exteriores, en solicitudes que no exijan cargas elevadas.

El resorcinol fue el pegamento que tuvo el peor desempeño. El MOR, delaminación y tensión máxima de cizalle en las probetas con refuerzo fueron los peores resultados de todos los adhesivos ensayados. Sin embargo, no dejan de sorprender sus altos valores de resistencia a la delaminación y la tensión máxima de cizalle en las probetas testigo, lo cual indica que dicho pegamento no tiene un gran desempeño en la relación madera-refuerzo, pero si es interesante pegar madera con madera.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

ADHESIVOS ESTRUCTURALES KLEBSTOFF: 2015, Características y Usos de los Adhesivos Epóxicos (En Línea) <<http://klebstoff.mx/blog/caracteristicas-y-usos-de-los-adhesivos-epoxicos>> [s.a]. (Citado en 11 de marzo de 2018).

CALLISTER, W.D., Rethwisch, D.G., 2009, Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Limusa-Wiley, México.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (CHILE). Madera Laminada estructural – Requisitos, métodos de muestreo e inspección. NCh 2148: 2013. Santiago, Chile.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (CHILE). Determinación del Contenido de Humedad. NCh 176/1: 2003 (Visualización gratuita en [www.minvu.cl](http://www.minvu.cl)).

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (CHILE). Determinación de la Densidad. NCh 176/2 Of86 Mod 1988.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (CHILE). Determinación de las propiedades mecánicas – Ensayo de Cizalle paralelo a las fibras. NCh976 Of86.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (CHILE). Madera Laminada encolada – Clasificación mecánica y visual de madera aserrada de Pino Radiata. NCh 2150: 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (CHILE). Pino radiata - Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad. NCh 1207: 22005.

JONSON, H. 1994. La madera, Editorial Blume, Barcelona.

LIESA, F.; Bilurbina, L, 1990, Adhesivos Industriales. Editorial: Marcombo S.A, Colección: 1ª Edición, 128 págs. Rústica.

LONG, G; 2009, La Industria Forestal de Chile. [En línea] *Revista Business Chile*. <<http://www.amchamchile.cl/2009/09/la-industria-forestal-de-chile>> [Consulta: 24 de Junio del 2016].

MADRID, M; 2000, Tecnología de la adhesión. Madrid (España): Loctite España.

N. MAEDA; C; TIRRELL, M; ISRAELACHVILI, JN (2002). «Adhesion and Friction Mechanisms of Polymer-on-Polymer Surfaces». *Science* 297 (5580)

PÉREZ, G., 1978, Manual de Construcciones en Madera, Manual 10. INFOR, 200p.

POBLETE, H. 1978. Uniones de madera con adhesivos. Publicación Técnica N°1. U. Austral de Chile.

STUPENENGO, F., 2011, Materiales y materias primas: Materiales Compuestos – Guía didáctica: Capítulo 10., Instituto Nacional de Educación Tecnológica, República de Argentina.

# **APENDICE 1**

## **CANTIDAD DE ADHESIVO USADO EN LOS LAMINADOS**

Cantidad de adhesivo utilizado en cada sándwich, además del peso final de la probeta.

Cuadro 14: Pesos de los sandwiches y cantidad de adhesivo aplicado a cada una de las probetas testigo utilizando el adhesivo Poliuretano.

	Peso Parte A(g)		Peso Parte B(g)		Peso Refuerzo(g)	Total(g)
	Adhesivo A	Probeta A	Adhesivo B	Probeta B		Total
PUR1	5	315	11	336	54	721
PUR2	5	349	11	322	53	740
PUR3	8	258	7	294	54	621
PUR4	9	309	11	331	54	714
PUR5	10	337	11	333	54	745
PUR6	10	287	11	338	54	700
Promedio	7,83	309,17	10,33	325,67	53,83	706,83
Valor Máx.	10,00	349,00	11,00	338,00	54,00	745,00
Valor Mín.	5,00	258,00	7,00	294,00	53,00	621,00
Desv. Est	2,32	33,18	1,63	16,48	0,41	45,22

Cuadro 15: Pesos de los sandwiches y cantidad de adhesivo aplicado a cada una de las probetas testigo utilizando el adhesivo Poliuretano.

	Peso Parte A(g)		Peso Parte B(g)		Peso Refuerzo(g)	Total(g)
	Adhesivo A	Probeta A	Adhesivo B	Probeta B		Total
PUR7	10	348	11	339	-	708
PUR8	10	349	10	318	-	687
PUR9	10	309	10	285	-	614
PUR10	8	316	11	323	-	658
PUR11	9	331	8	329	-	677
Promedio	9,40	330,60	10,00	318,80	-	668,80
Valor Máx.	10,00	349,00	11,00	339,00	-	708,00
Valor Mín.	8,00	309,00	8,00	285,00	-	614,00
Desv. Est	0,89	18,17	1,22	20,45	-	35,55

Cuadro 16: Pesos de los sandwiches y cantidad de adhesivo aplicado a cada una de las probetas testigo con refuerzo utilizando el adhesivo sikadur 30.

	Peso Parte A(g)		Peso Parte B(g)		Peso Refuerzo(g)	Total(g)
	Adhesivo A	Probeta A	Adhesivo B	Probeta B		
SS1	71	333	83	300	53	840
SS2	78	339	93	356	52	918
SS3	80	294	88	317	53	832
SS4	49	326	85	309	54	823
SS5	123	308	40	360	54	885
SS6	81	332	68	333	53	867
Promedio	80,33	322,00	76,17	329,17	53,17	860,83
Valor Máx.	123,00	339,00	93,00	360,00	54,00	918,00
Valor Mín.	49,00	294,00	40,00	300,00	52,00	823,00
Desv. Est	24,06	17,36	19,61	24,86	0,75	36,30

Cuadro 17: Pesos de las muestras y cantidad de adhesivo aplicado a las muestras Sikadur testigo

	Peso Parte A(g)		Peso Parte B(g)		Peso Refuerzo(g)	Total(g)
	Adhesivo A	Probeta A	Adhesivo B	Probeta B		
SS7	71	321	69	251	-	712
SS8	65	296	73	310	-	744
SS9	70	293	75	347	-	785
SS10	75	285	70	308	-	738
Promedio	70,25	298,75	71,75	304,00	-	744,75
Valor Máx.	75,00	321,00	75,00	347,00	-	785,00
Valor Mín.	65,00	285,00	69,00	251,00	-	712,00
Desv. Est	4,11	15,54	2,75	39,62	-	30,21

Cuadro 18: Pesos de los sandwiches y cantidad de adhesivo aplicado a cada una de las probetas con refuerzo utilizando el adhesivo Resorcinol.

	Peso Parte A(g)		Peso Parte B(g)		Peso Refuerzo(g)	Total(g)
	Adhesivo A	Probeta A	Adhesivo B	Probeta B		
RES1	7	330	7	297	54	695
RES2	7	328	7	307	54	703
RES3	7	324	7	299	54	691
RES4	7	347	7	346	54	761
RES5	9	298	9	307	54	677
RES6	7	303	7	315	54	686
Promedio	7,33	321,67	7,33	311,83	54,00	702,17
Valor Máx.	9,00	347,00	9,00	346,00	54,00	761,00
Valor Mín.	7,00	298,00	7,00	297,00	54,00	677,00
Desv. Est	0,82	18,25	0,82	17,94	0,00	30,11

Cuadro 19: Pesos de los sandwiches y cantidad de adhesivo aplicado a cada una de las probetas testigo pegadas con adhesivo resorcinol.

	Peso Parte A(g)		Peso Parte B(g)		Peso Refuerzo(g)	Total(g)
	Adhesivo A	Probeta A	Adhesivo B	Probeta B		Total
RES7	9	351	10	294	-	664
RES8	10	304	10	328	-	652
RES9	10	346	7	376	-	739
RES10	10	310	10	325	-	655
RES11	9	315	12	348	-	684
Promedio	9,60	325,20	9,80	334,20	-	678,80
Valor Máx.	10,00	351,00	12,00	376,00	-	739,00
Valor Mín.	9,00	304,00	7,00	294,00	-	652,00
Desv. Est	0,55	21,70	1,79	30,32	-	35,90



## **APENDICE 2**

### **ESTUDIOS ANOVAS REALIZADOS EN EL INFORME**

**Cuadro 20: Estudio ANOVA realizado para las tensiones máximas de cizalle.**

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Adhesivo	2	2739	1369,3	8,31	0,001
Refuerzo	1	4565	4565,0	27,71	0,000
Error	58	9554	164,7		
Falta de ajuste	2	3616	1807,8	17,05	0,000
Error puro	56	5938	106,0		
Total	61	16395			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
12,8343	41,73%	38,71%	33,33%

**Cuadro 21: Estudio ANOVA desarrollado para delaminación.**

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Adhesivo	2	27212	13605,9	11,72	0,000
Refuerzo	1	11009	11009,3	9,48	0,003
Error	60	69680	1161,3		
Falta de ajuste	2	47468	23733,9	61,97	0,000
Error puro	58	22212	383,0		
Total	63	108291			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
34,0784	35,65%	32,44%	26,60%

**Cuadro 22: Estudio ANOVA desarrollado para el ensayo de Flexión, más específicamente el relacionado con el MOE.**

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Refuerzo_1	1	2481459	2481459	43,35	0,000
Adhesivo_1	2	1414895	707448	12,36	0,000
Refuerzo_1*Adhesivo_1	2	2182195	1091098	19,06	0,000
Error	56	3205574	57242		
Total	61	9324485			

Cuadro 23: Estudio ANOVA desarrollado para el ensayo de Flexión, más específicamente el relacionado con el MOR

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Adhesivo	2	17996	8997,8	25,94	0,000
Refuerzo	1	11563	11562,8	33,33	0,000
Adhesivo*Refuerzo	2	7549	3774,7	10,88	0,000
Error	54	18732	346,9		
Total	59	56122			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
18,6248	66,62%	63,53%	59,24%

## **APÉNDICE 3.**

**VALORES EN DETALLE OBTENIDOS EN EL ESTUDIO**

## Cizalle

Cuadro 24: Datos entregados luego del ensayo de las probetas con refuerzo pegadas con el adhesivo Loctite Poliuretano, con sus respectivos promedios de contenido de humedad de cada una de sus caras.

			CH. Cara A y B(%)	
Probetas		Carga rotura(Kg)	Prom A	Prom B
PUR1	1PUR1	1170	9,00	9,60
	2PUR1	935	9,13	9,33
PUR2	1PUR2	893	9,27	9,03
	2PUR2	877	9,03	9,47
PUR3	1PUR3	682	9,17	9,03
	2PUR3	902	9,90	8,87
PUR4	1PUR4	555	8,90	9,13
	2PUR4	323	8,73	9,43
PUR5	1PUR5	1087	8,97	8,90
	2PUR5	389	9,27	9,33
PUR6	1PUR6	840	9,33	9,77
	2PUR6	518	9,33	9,50
PUR7	1PUR7	1278	9,80	9,90
	2PUR7	1311	9,97	10,20
PUR8	1PUR8	1045	9,50	10,00
	2PUR8	1232	9,73	9,93
PUR9	1PUR9	1400	9,97	9,93
	2PUR9	1027	9,90	9,97
PUR10	1PUR10	923	9,97	10,27
	2PUR10	1165	9,97	10,13
PUR11	1PUR11	1186	10,10	9,80
	2PUR11	1192	10,30	9,93

Cuadro 25: Carga de Rotura y Contenido de Humedad (CH%) para cada muestra con refuerzo pegada con el adhesivo Loctite Poliuretano.

			CH. Cara A y B(%)	
Probetas		Carga Rotura(Kg)	Prom A	Prom B
SIK1	1SIK1	870	8,833	9,233
	2SIK1	649	9,033	9,100
SIK2	1SIK2	938	8,900	9,833
	2SIK2	1101	8,867	9,800
SIK3	1SIK3	828	8,933	9,133
	2SIK3	779	9,033	9,100
SIK4	1SIK4	738	9,233	8,967
	2SIK4	1059	9,533	8,967
SIK5	1SIK5	1451	9,800	9,600
	2SIK5	1355	9,467	9,267
SIK6	1SIK6	1177	8,967	9,300
	2SIK6	939	9,267	9,067
SIK7	1SIK7	875	9,367	9,833
	2SIK7	956	9,067	9,700
SIK8	1SIK8	1128	9,267	8,700
	2SIK8	879	9,000	9,533
SIK9	1SIK9		-	-
	2SIK9		-	-
SIK10	1SIK10	804	8,967	8,900
	2SIK10	1043	9,833	9,667
SIK11	1SIK11	924	9,900	9,833
	2SIK11	738	9,600	9,100

Cuadro 26: Carga de Rotura y Contenido de Humedad (CH%) para cada muestra con refuerzo pegada con el adhesivo Loctite Poliuretano.

	Promedios CH(%)		Carga rotura(kg)
	Prom A	Prom B	
1R1	10,13	10,23	80
2R1	10,00	9,83	110
1R2	10,30	9,93	140
2R2	10,13	10,03	305
1R3	9,97	10,40	15
2R3	10,10	10,47	316
1R4	10,13	10,10	350
2R4	9,70	9,77	67
1R5	10,00	9,90	257
2R5	9,90	9,87	386
1R7	9,73	10,13	950
2R7	8,93	9,83	1079
1R8	9,37	8,90	1480
2R8	8,93	8,87	735
1R9	9,77	9,47	1782
2R9	9,03	9,57	832
1R10	8,47	9,90	737
2R10	9,83	9,10	733
1R11	9,30	9,30	1491
2R11	9,30	10,20	927

## Flexión estática

Cuadro 27: Datos de Flexión estática para las muestras con refuerzo pegadas con adhesivo Loctite Poliuretano.

Probetas	F.max(kgf)	F.max(N)	F2(40%)	F1(10%)	DEF(F2)(mm)	DEF(F1)(mm)	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	MOR(N/mm <sup>2</sup> )
1PUR1	251,00	2510	1004,00	251,00	2,87	1,37	23891,50	133,48
1PUR2	-	-	-	-	-	-	-	-
1PUR3	237,00	2370	948,00	237,00	2,94	1,20	20009,64	129,37
1PUR4	149,00	1490	596,00	149,00	2,42	0,98	16879,81	85,86
1PUR5	293,00	2930	1172,00	293,00	3,28	1,36	21596,55	155,00
1PUR6	145,00	1450	580,00	145,00	2,19	0,99	17114,98	77,96
1PUR7	223,00	2230	892,00	223,00	3,35	1,55	18689,17	122,51
1PUR8	230,00	2300	920,00	230,00	2,96	1,40	21917,46	126,45
1PUR9	234,00	2340	936,00	234,00	3,78	1,86	19016,24	132,65
1PUR10	241,00	2410	964,00	241,00	2,85	1,05	18487,74	127,68
1PUR11	-	-	-	-	-	-	-	-
1PUR12	251,00	2510	1004,00	251,00	3,85	1,58	16971,31	142,30
Valor Máx	293,00	2930,00	1172,00	293,00	3,85	1,86	23891,50	155,00
Valor Mín	145,00	1450,00	580,00	145,00	2,19	0,98	16879,81	77,96
Desv. Est.	45,53	455,34	182,14	45,53	0,53	0,29	2371,84	23,76
Promedio	225,40	2254,00	901,60	225,40	3,05	1,33	19457,44	123,33

Donde F.máx (Kgf) = Carga de rotura de la madera, es decir, la carga que se registró al momento de fractura de la probeta, en kilogramo fuerza (Kgf).

F.máx(N) = Carga de rotura de la probeta en Newton (N).

F2(40%) = 40% de la carga de rotura.

F1(10%) = 10% de la carga de rotura.

DEF F2 = Deformación obtenida para la carga F2 (40%).

Def F1 = Deformación obtenida para la carga F1 (10%).

MOE (N/mm<sup>2</sup>) = Módulo de elasticidad de las probetas, expresado en N/mm<sup>2</sup>.

MOR (N/mm<sup>2</sup>) = Módulo de Ruptura de las probetas, expresado en N/mm<sup>2</sup>



Cuadro 28: Dimensiones de las probetas con refuerzo y adhesivo Poliuretano.

Probetas	Prom ch(%)	Prom ancho(mm)	Prom esp(mm)	Largo(mm)
1PUR1	9,60	21,25	21,15	337
1PUR2	-	-	-	-
1PUR3	8,93	20,8	21,1	337
1PUR4	9,53	20,5	20,9	344
1PUR5	9,37	21,4	21,1	336
1PUR6	9,00	20,6	21,3	335
1PUR7	9,37	20,95	21,05	340
1PUR8	9,27	20,85	21	337
1PUR9	9,47	20,4	21	340
1PUR10	9,10	20,65	21,4	334
1PUR11	-	-	-	-
1PUR12	9,60	20,45	20,85	336
Valor Máx	9,60	21,40	21,40	344,00
Valor Mín	8,93	20,40	20,85	334,00
Desv. Est.	0,24	0,34	0,17	2,95
Promedio	9,32	20,79	21,09	337,60

Cuadro 29: Datos de Flexión estática para las probetas testigo asignadas a Poliuretano.

Probetas	F.max(kgf)	F.max(N)	F2(40%)	F1(10%)	DEF(F2)(mm)	DEF(F1)(mm)	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	MOR(N/mm <sup>2</sup> )
PURT1	209,30	2093	837,20	209,30	2,82	1,02	15534,26	105,01
PURT2	143,00	1430	572,00	143,00	3,30	0,97	10034,78	84,08
PURT3	143,00	1430	572,00	143,00	3,72	1,32	9881,03	84,36
PURT4	157,30	1573	629,20	157,30	3,90	2,21	16097,45	95,40
PURT5	155,60	1556	622,40	155,60	3,52	1,66	15414,85	98,71
PURT6	162,50	1625	650,00	162,50	3,17	1,31	14493,64	96,95
PURT7	-	-	-	-	-	-	-	-
PURT8	162,30	1623	649,20	162,30	3,06	1,74	14635,39	73,83
PURT9	139,40	1394	557,60	139,40	3,82	1,18	10542,52	94,17
PURT10	112,20	1122	448,80	112,20	3,60	1,50	9216,61	68,17
PURT11	153,10	1531	-	-	-	-	-	-
Valor Máx	209,30	2093,00	837,20	209,30	3,90	2,21	16097,45	105,01
Valor Mín	112,20	1122,00	448,80	112,20	2,82	0,97	9216,61	68,17
Desv. Est	24,53	245,30	104,07	26,02	0,37	0,39	2860,96	12,20
Promedio	153,77	1537,70	615,38	153,84	3,43	1,43	12872,28	88,97

Cuadro 30: Dimensiones probetas testigo.

Probetas	Prom ch(%)	Prom ancho(mm)	Prom esp(mm)	Largo(mm)
PURT1	9,17	22,35	21,2	336
PURT2	9,37	20,8	20,3	336
PURT3	9,40	21	20,2	337
PURT4	9,73	20,65	20,15	339
PURT5	9,50	20,3	19,9	340
PURT6	9,10	20,5	20,3	336
PURT7	-	-	-	-
PURT8	9,37	23,6	21,7	337
PURT9	9,40	20,45	19,1	336
PURT10	9,00	20,8	20	337
PURT11	9,07	-	-	-
Promedio	9,31	21,16	20,32	337,11
Valor Máx	9,73	23,60	21,70	340,00
Valor Mín	9,00	20,30	19,10	336,00
Desv. Est	0,23	1,10	0,75	1,45

### Adhesivo Sikadur 30.

Cuadro 31: Datos de Flexión estática para las muestras con refuerzo pegadas con adhesivo Sikadur 30.

Probetas	F.max(kgf)	F.max(N)	F2(40%)	F1(10%)	DEF(F2)(mm)	DEF(F1)(mm)	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	MOR(N/mm <sup>2</sup> )
S1	278,00	2780	1112,00	278,00	3,21	1,59	21748,44	140,96
S2	304,00	3040	1216,00	304,00	3,44	1,32	18026,88	151,20
S3	-	-	-	-	-	-	-	-
S4	294,00	2940	1176,00	294,00	4,35	2,12	18324,26	155,84
S5	317,00	3170	1268,00	317,00	3,81	2,11	25688,78	167,38
S6	263,00	2630	1052,00	263,00	2,92	1,29	20596,30	133,82
S7	297,00	2970	1188,00	297,00	3,27	1,29	19421,36	153,97
S8	-	-	-	-	-	-	-	-
S9	329,00	3290	1316,00	329,00	3,38	1,28	18966,97	160,31
S10	261,00	2610	1044,00	261,00	2,37	1,17	26725,58	127,26
S11	301,00	3010	1204,00	301,00	3,01	1,22	21231,91	147,04
S12	280,00	2800	1120,00	280,00	2,91	1,47	24589,58	139,86
Valor Máx	329,00	3290,00	1316,00	329,00	4,35	2,12	26725,58	167,38
Valor Mín	261,00	2610,00	1044,00	261,00	2,37	1,17	18026,88	127,26
Desv. Est	22,08	220,82	88,33	22,08	0,54	0,35	3130,90	12,39
Promedio	292,40	2924,00	1169,60	292,40	3,27	1,49	21532,01	147,76

Cuadro 32: Dimensiones y Contenido de Humedad (CH%) para las muestras con refuerzo y usando adhesivo Sikadur 30.

Probetas	Prom ch(%)	Prom ancho(mm)	Prom esp(mm)	Largo(mm)
S1	8,97	20,2	22,05	332
S2	9,40	20,5	22,2	335
S3	-	-	-	-
S4	9,63	20,7	21,4	335
S5	8,97	20,95	21,25	333
S6	9,03	20,1	22,1	333
S7	9,03	19,55	22,2	333
S8	-	-	-	-
S9	8,87	20,4	22,45	334
S10	9,07	20,6	22,4	336
S11	9,47	21,25	22,1	338
S12	9,10	20,85	21,9	333
Promedio	9,15	20,51	22,01	334,20
Valor Máx	9,63	21,25	22,45	338,00
Valor Mín	8,87	19,55	21,25	332,00
Desv. Est	0,25	0,48	0,39	1,81

Cuadro 33: Datos de Flexión estática para las muestras testigo asignadas al adhesivo Sikadur 30.

Probetas	F.max(kgf)	F.max(N)	F2(40%)	F1(10%)	DEF(F2)(mm)	DEF(F1)(mm)	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	MOR(N/mm <sup>2</sup> )
ST1	112,00	1120	448,00	112,00	3,43	1,51	10802,00	71,41
ST2	146,00	1460	584,00	146,00	3,77	1,49	12330,83	95,26
ST3	159,00	1590	636,00	159,00	3,52	1,90	18085,26	100,87
ST4	141,30	1413	565,20	141,30	2,48	0,92	17488,73	92,21
ST5	176,00	1760	704,00	176,00	3,20	1,45	19119,98	114,24
ST6	175,00	1750	700,00	175,00	3,40	1,40	16304,51	111,89
ST7	151,20	1512	604,80	151,20	3,71	1,90	15685,24	96,93
ST8	-	-	-	-	-	-	-	-
ST9	162,30	1623	649,20	162,30	3,90	1,90	15390,97	104,83
ST10	127,80	1278	511,20	127,80	3,56	1,52	11719,45	81,90
Valor Máx	176,00	1760,00	704,00	176,00	3,90	1,90	19119,98	114,24
Valor Mín	112,00	1120,00	448,00	112,00	2,48	0,92	10802,00	71,41
Desv. Est	21,10	211,05	84,42	21,10	0,42	0,32	2960,32	13,71
Promedio	150,07	1500,67	600,27	150,07	3,44	1,55	15214,11	96,61

Cuadro 34: Dimensiones y Contenido de Humedad (CH%) para probetas testigo asignadas a Sikadur 30.

Probetas	Prom ch(%)	Prom ancho(mm)	Prom esp(mm)	Largo(mm)
ST1	8,97	20,2	19,9	340
ST2	9,40	20,2	19,7	341
ST3	9,83	20,3	19,9	340
ST4	9,63	20,3	19,65	341
ST5	8,97	20	19,85	341
ST6	9,03	20,1	19,95	341
ST7	9,03	20,25	19,85	341
ST8	-	-	-	-
ST9	8,87	20,2	19,8	341
ST10	9,07	20,3	19,8	340
Promedio	9,20	20,21	19,82	340,67
Valor Máx	9,83	20,30	19,95	341,00
Valor Mín	8,87	20,00	19,65	340,00
Desv. Est	0,34	0,10	0,10	0,50

### Adhesivo Resorcinol.

Cuadro 35: Datos de Flexión estática para las muestras con refuerzo pegadas con adhesivo Resorcinol.

Probetas	F.max(kgf)	F.max(N)	F2(40%)	F1(10%)	DEF(F2)(mm)	DEF(F1)(mm)	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	MOR(N/mm <sup>2</sup> )
R1	213,50	2135	854,00	213,50	3,02	1,46	20921,19	121,27
R2	68,03	680,3	272,12	68,03	1,61	1,01	17029,78	37,92
R3	121,40	1214	485,60	121,40	3,71	1,55	8520,47	68,22
R4	96,30	963	385,20	96,30	1,83	0,93	15839,01	52,29
R5	106,00	1060	424,00	106,00	2,61	1,17	10564,31	57,97
R6	172,70	1727	690,80	172,70	3,64	1,84	15460,43	100,33
R7	142,10	1421	568,40	142,10	2,27	1,01	17804,76	80,93
R8	185,00	1850	740,00	185,00	2,33	1,25	25344,24	101,47
R9	92,80	928	371,20	92,80	2,25	1,29	14107,37	51,36
R10	160,70	1607	642,80	160,70	1,93	1,15	33908,92	97,05
R11	182,30	1823	729,20	182,30	2,20	1,12	26710,78	104,91
R12	142,20	1422	568,80	142,20	2,34	0,96	16653,57	83,08
Valor Máx	213,50	2135,00	854,00	213,50	3,71	1,84	33908,92	121,27
Valor Mín	68,03	680,30	272,12	68,03	1,61	0,93	8520,47	37,92
Desv. Est	44,25	442,53	177,01	44,25	0,67	0,27	7146,08	26,08
Promedio	140,25	1402,53	561,01	140,25	2,48	1,23	18572,07	79,73

Cuadro 36: Dimensiones y Contenido de Humedad (CH%) para las muestras con refuerzo pegadas con adhesivo Loctite Poliuretano.

Probetas	Prom ch(%)	Prom ancho(mm)	Prom esp(mm)	Largo(mm)
R1	9,13	20,35	20,85	335
R2	9,70	20,60	20,95	336
R3	9,53	20,30	21,05	337
R4	10,33	20,90	21,20	340
R5	9,83	20,65	21,00	332
R6	9,70	20,95	20,35	336
R7	10,17	20,60	20,85	340
R8	9,57	20,80	21,05	337
R9	10,03	20,60	20,90	332
R10	9,80	20,35	20,10	331
R11	9,87	20,60	20,65	337
R12	9,33	20,35	20,65	338
Promedio	9,75	20,59	20,80	335,92
Valor Máx	10,33	20,95	21,20	340,00
Valor Mín	9,13	20,30	20,10	331,00
Desv. Est	0,34	0,22	0,32	2,97

Cuadro 37: Datos de Flexión estática para las muestras testigo asignadas al adhesivo Resorcinol.

Probetas	F.max(kgf)	F.max(N)	F2(40%)	F1(10%)	DEF(F2)(mm)	DEF(F1)(mm)	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	MOR(N/mm <sup>2</sup> )
RT1	94,90	949	379,60	94,90	4,04	1,64	7799,79	63,32
RT2	124,90	1249	499,60	124,90	4,22	1,88	10010,61	79,70
RT3	124,90	1249	499,60	124,90	3,64	1,54	10877,03	80,06
RT4	160,20	1602	640,80	160,20	3,63	1,93	17993,68	106,12
RT5	144,20	1442	576,80	144,20	5,88	2,40	8296,18	96,97
RT6	124,00	1240	496,00	124,00	3,60	1,33	11225,80	84,31
RT7	92,80	928	371,20	92,80	2,25	1,29	19058,49	61,21
RT8	115,40	1154	461,60	115,40	4,27	1,75	8783,57	74,43
RT9	154,80	1548	619,20	154,80	3,85	1,93	14463,19	99,29
RT10	110,00	1100	440,00	110,00	3,83	1,73	9658,11	70,24
RT11	-	-	-	-	-	-	-	-
Valor Máx	160,20	1602,00	640,80	160,20	5,88	2,40	19058,49	106,12
Valor Mín	92,80	928,00	371,20	92,80	2,25	1,29	7799,79	61,21
Desv. Est	22,99	229,86	91,94	22,99	0,89	0,32	4006,74	15,25
Promedio	124,61	1246,10	498,44	124,61	3,92	1,74	11816,65	81,56

Cuadro 38: Dimensiones y Contenido de Humedad (CH%) de probetas testigo asignadas al adhesivo Resorcinol.

Probetas	Prom ch(%)	Prom ancho(mm)	Prom esp(mm)	Largo(mm)
RT1	9,37	20,00	19,55	340
RT2	9,47	20,85	19,55	339
RT3	9,80	20,45	19,55	334
RT4	9,47	20,20	19,35	334
RT5	9,23	20,30	19,30	339
RT6	9,30	20,15	19,35	342
RT7	9,07	20,50	19,45	341
RT8	9,30	20,75	19,55	341
RT9	9,17	20,55	19,35	329
RT10	9,40	20,65	19,55	336
RT11	-	-	-	-
Promedio	9,36	20,44	19,46	337,50
Valor Máx	9,80	20,85	19,55	342,00
Valor Mín	9,07	20,00	19,30	329,00
Desv. Est	0,20	0,27	0,11	4,14