

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL



“Estudio del Comportamiento Estructural de Uniones a Escala Real de Madera Pino Radiata con Pernos de Acero, Caso Específico de Uniones de Cizalle Doble Sometidas a Compresión Axial.”

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
Título de Ingeniero Civil

JASSY VELOSO PAREDES

Prof. Guía: Ángela Salinas Barrera

Concepción, Marzo del 2008.

Mucho fue el tiempo dedicado para recorrer este pequeño sendero y con éxito he llegado a su fin. Muchos caminos habrán en el futuro, pero la fortaleza que adquirí en este desafío, me ayudará a triunfar y lograr mis metas.

Doy las gracias a Dios y a mi familia por apoyarme, ayudarme y acompañarme en esta etapa de mi vida, a mi Tía Nena que me acompañó durante los primeros años de estudio y que aún me acompaña desde el cielo, a mi Mamá, mis Hermanas y Novio.

Jassy

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este proyecto de título implicó muchas horas de espera, ansiedad, nerviosismo, dedicación y trabajo. Quiero agradecer sinceramente a todas las personas que me ayudaron en el desarrollo de este, sin su colaboración y apoyo, hubiese sido más complicado llegar a su término.

Quiero agradecer a mi familia por acompañarme en esta etapa de mi vida, a mi madre Lissette Paredes Luna, por su amor, ánimo, consuelo y paciencia; a mis hermanas, Gina y Joanna Veloso Paredes por su compañía y alegría; a mi novio y colega, Arturo Rivera Fernández, por su amor, apoyo y compañía en este camino, y a mis tías, Carolina Adriazola Luna, Zunilda y Sara Luna Rivera.

Al personal de la Universidad, a los profesores de la comisión, Ángela Salinas, Alexander Opazo, Juan Marcus, Genaro Gotelli, a Don Francisco Pérez y Don Héctor Sepúlveda del Centro de Alta Tecnología de la Madera CATEM, a la Profesora Gilda Vargas, y a Don Roberto Rocha, jefe del departamento de adquisiciones de la universidad.

También destaco la ayuda de Don Mario Wagner, docente de la Universidad de Santiago, por su ayuda a distancia, a mis compañeros y amigos.

SUMARIO

La presente investigación, consiste en el estudio del comportamiento estructural de uniones de cizalle doble sometidas a compresión axial. Este tema, se abordó debido a que la Normativa Chilena, NCH 1198, fue actualizada el año 2006. Específicamente, el capítulo 9 referente a uniones estructurales, adopta la teoría de T. L. Wilkinson, de la normativa estadounidense, la cual se rige por el método de tensiones admisibles. Este método consiste en evaluar la resistencia aportada por una unión, específicamente, la capacidad asociada a la intersección de la curva carga deformación original de un ensayo, con una línea paralela a la zona elástica, desplazada en un 5% del diámetro del perno.

Se decidió diseñar y fabricar 32 uniones de cizalle doble de pino radiata, con 1, 3, 4 y 5 pernos, con diámetros de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{5}{8}$ " por hilera, y se planteó como objetivo general de cuantificar experimentalmente el factor de grupo o factor de modificación por longitud de hilera y la resistencia real aportada por una unión, para finalmente comparar los resultados arrojados por los ensayos experimentales con los resultados entregados por la nueva teoría planteada por la NCH 1198. También se plantearon como objetivos específicos, verificar las capacidades máximas de las uniones, tomando una tolerancia del 5%, observar y entregar información sobre los mecanismos de falla y analizar la influencia de ciertos parámetros entregados por la normativa en la capacidad de la unión.

El desarrollo de los ensayos experimentales consistió en la aplicación de una carga de compresión aplicada en el eje longitudinal de las uniones, esta carga se

aplicó de forma tal que no se produjeran corrimientos de la unión o excentricidad de la carga. La capacidad de estas dependen de la resistencia al aplastamiento de la madera, cantidad de pernos, disposición, diámetro y calidad de los medios de unión, en la práctica, los modos de falla fueron el I, para uniones con pernos de $\frac{1}{2}$ ", en el cual predomina el aplastamiento de la madera en su miembro central debido al agotamiento de la capacidad de aplastamiento de la madera y la alta calidad del medio de unión, el cual absorbe la totalidad de la carga, hundiéndose finalmente en el miembro central y entregando una capacidad mayor a la teórica como también, un factor de modificación por longitud de hilera mayor a la unidad. El modo de falla III, para uniones con perno de $\frac{5}{8}$ ", que consiste en el aplastamiento de la madera y la generación de rótulas plásticas en el medio de unión, en la zona de contacto de las piezas laterales con la central, la capacidad de las uniones a su vez fue mayor a la teórica, ya que la carga se distribuyó de mejor forma en los materiales, ya que ambos entregaron su máxima capacidad por lo que el factor de modificación final cumple su objetivo de reducción. También se descubrió con el estudio, que la capacidad de una unión con un medio de unión no es extrapolable a con múltiples pernos, ya que en la práctica la capacidad una unión es mucho mayor a la sumatoria de las capacidades admisibles de cada uno de los conectores.

El nivel de confiabilidad del estudio es bajo, debido a la poca cantidad de probetas destinadas a ensayo, por lo que para futuros estudios se recomienda aumentar como mínimo a 30 muestras por tratamiento, para así aumentar el nivel de confianza y disminuir la variabilidad de la respuesta.

ÍNDICE GENERAL

1 ANTECEDENTES GENERALES	
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivos Generales	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3. METODOLOGÍA	3
1.3.1. Revisión documentación bibliográfica	3
1.3.2. Recopilación de Información	3
1.3.3. Definición condiciones de análisis	4
1.3.4. Experimentación	4
1.3.5. Tabulación y análisis de resultados	4
1.3.6. Conclusiones y recomendaciones	4
1.4. MOTIVACIÓN	5
1.5. LA MADERA	6
1.5.1 Generalidades	6
1.5.2 Estructura celular de la madera	8
1.5.3 Estructura física de la madera	10
1.5.4 Propiedades físicas de la madera	12
1.6. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA	19
1.7. EL PINO RADIATA	22

2. UNIONES EN MADERA ESTRUCTURAL	
2.1. GENERALIDADES	32
2.2. FACTOR DE GRUPO	34
2.3. FUNDAMENTOS Y DEFINICIONES	35
2.4. DESARROLLO DEL FACTOR DE GRUPO	39
2.5. FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA DE UNA UNIÓN	42
2.5.1. Especie maderera	42
2.5.2. Sección Transversal Crítica y Tensiones de Cizalle	43
2.5.3. Dirección de la carga respecto a la fibra de la madera	46
2.5.4. Espaciamientos	47
2.5.5. Excentricidad	50
2.5.6. Acción en grupo de los elementos de unión	50
2.5.7. Factores de modificación	51
2.6. CARGAS DE DISEÑO	57
2.7. CARGAS ADMISIBLES POR EXTRACCIÓN LATERAL	57
3. INTRODUCCION AL DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y ETAPA EXPERIMENTAL	
3.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS	
3.1.1 Introducción	65
3.1.2 Tipos de variabilidad	67
3.1.3 Planificación de un experimento	68
3.2 PLANIFICACIÓN EXPERIMENTAL	
3.2.1 Generalidades	77
3.2.2 Objetivos del experimento	78
3.2.3 Determinación de las fuentes de variación	78

3.2.4	Tratamientos	81
3.2.5	Variable de respuesta	83
3.3	CONFECCIÓN DE LAS PROBETAS	
3.3.1	Geometría de la unión	99
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	
4.1.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	
4.1.1.	Probetas pernos 1/2"	104
4.1.2.	Probetas Pernos 5/8"	112
4.2.	RESULTADOS TEÓRICOS	
4.2.1.	Cargas Admisibles de Extracción Lateral	120
4.2.2.	Carga Admisible de la Unión	121
4.3.	RESULTADOS ESTADÍSTICOS	
4.3.1.	Análisis de Varianza	127
4.3.2.	Verificación del Modelo de efectos fijos	131
4.3.3.	Nivel de Confianza del estudio	135
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
5.1.	CONCLUSIONES	
5.1.1.	Resultados experimentales	139
5.1.2.	Resultados Teóricos y Estadísticos	140
5.2.	RECOMENDACIONES	
5.2.1.	Para evitar la variabilidad de la respuesta	144
5.2.2.	Para evitar el efecto de pandeo en uniones sometidas a compresión axial	145

Nomenclatura

A_C : Sección transversal bruta del madero principal, mm^2 .

A_l : Suma de las secciones transversales brutas de los maderos, mm^2 .

C : Módulo de corrimiento de un medio de unión individual, N/mm.

$C = 87.500 \text{ N/mm}$, para conectores anulares y placas de corte de diámetro 100mm.

$C = 70.000 \text{ N/mm}$, para conectores anulares y placas de corte de diámetro aprox. 65mm.

$C = 246 D^{1.5} \text{ N/mm}$, para pernos, pasadores y tirafondos en uniones de madera-madera.

$C = 370 D^{1.5} \text{ N/mm}$, para pernos, pasadores y tirafondos en uniones de madera-metal.

Con D , diámetro del vástago en mm.

D : Diámetro nominal del medio de unión, mm.

E_C : Módulo de elasticidad del madero principal, N/mm^2 .

E_l : Módulo de elasticidad de los maderos laterales, N/mm^2 .

FA : Factor de ajuste, según anexo E

F_G : Factor de grupo

F_{ff} : Tensión de fluencia en flexión del acero, Mpa.

H : Contenido de humedad, expresado como porcentaje %.

K : Coeficiente de contracción volumétrica para un cambio de 1% de contenido de humedad, calculado para cada especie, como la suma de los

respectivos coeficientes de contracción lineal, radial (Kr) y tangencial (Kt), para el caso del pino radiata Kr=0.20 y Kt=0.29.

K_D : Factor de modificación por duración de la carga

K_U : Factor de modificación por longitud de hilera, 1.0 para pernos, pasadores y tirafondos con diámetro $D < 6.4$ mm.

K_{UH} : Factor de modificación por contenido de humedad

K_T : Factor de modificación por temperatura

$P_{ad, unión}$: Capacidad admisible de la Unión, que ya incluye el factor de modificación por longitud de hilera, N

P_{el} : Capacidad de extracción lateral de un perno, N

P_G : Masa inicial de la madera, gr

P_{hilera} : Capacidad admisible de una hilera, N

$P_{n,ad}$: Carga admisible para carga normal a la fibra, N

$P_{P,ad}$: Carga admisible para carga paralela a la fibra, N

P_0 : Masa de la madera en estado anhidro, gr

$P_{\theta,ad}$: Carga admisible para un ángulo θ , entre carga y la fibra, N

$R_{ap,c}$: Resistencia al aplastamiento del vástago en el madero principal, Mpa.

$R_{ap,l}$: Resistencia al aplastamiento del vástago en el madero secundario, Mpa.

R_{EA} : Menor valor entre $\frac{E_l \cdot A_l}{E_c \cdot A_c}$ y $\frac{E_c \cdot A_c}{E_l \cdot A_l}$

T : Duración de la carga en segundos, s

V_g : Volumen madera saturada cm^3

n : Número de medios de unión alineados consecutivamente según la dirección de la fuerza.

n_{hilera} : Número de pernos por hilera

$$m : m = u - \sqrt{u^2 - 1}$$

l_c : Longitud de apoyo del pasador de la pieza principal ,mm.

l_l : Longitud de apoyo del pasador en la pieza lateral, mm.

s : Espaciamiento entre medios de unión adyacentes, en mm.

$$u : u = 1 + C \cdot \frac{s}{2} \left[\frac{1}{E_C \cdot A_C} + \frac{1}{E_L \cdot A_L} \right]$$

ΔH : Diferencia entre humedad 20% y H, %

θ : Ángulo entre la dirección de la sollicitación y la dirección de la fibra (asociada al eje longitudinal de la pieza), (°)

ρ_b : Densidad básica, kg/m³

ρ_H : Densidad de referencia al contenido de humedad H, kg/m³

ρ_o : Densidad anhidra media de al especie forestal, en kg/m³, según anexo E.

CAPÍTULO I
ANTECEDENTES GENERALES

1 ANTECEDENTES GENERALES

1.1. INTRODUCCIÓN

El hombre ha utilizado la madera desde el principio de los tiempos como material estructural y de construcción, gracias a su versatilidad y conveniencia. En el diseño de una estructura de madera, se debe contemplar algún sistema de unión el cual incluya elementos de fijación mecánicos, con el fin de acoplar las piezas y entregarle rigidez a la estructura.

Las tecnologías y las investigaciones especializadas recientes, proveen información de cargas dinámicas que afectan a las estructuras en eventos sísmicos. En general, la naturaleza de los eventos entregan aceleraciones laterales, las cuales afectan a sistemas estructurales, pues las cargas no solo incluyen la gravedad en sus componentes, sino que también componentes inerciales, que se aplican de manera cíclica.

Estos eventos tienen la capacidad de dañar y destruir extremadamente las estructuras en muy poco tiempo, por ello, el diseño y especificaciones para estas, consideran un diseño a la rotura o resistencia última del material. La frecuencia de eventos sísmicos, ha incrementado el interés para adecuar y reacondicionar las

uniones de madera. Por ello, si no se tiene claro la magnitud de estos esfuerzos, las estructuras de madera pueden verse muy afectadas.

La normativa Chilena hace alusión al comportamiento estructural teórico de uniones de madera con elementos de fijación mecánicos basado en el método de tensiones admisibles, por lo que sería necesario verificar mediante ensayos de laboratorio si el comportamiento descrito por la norma, para el caso de específico de pernos, es igual o similar al real, para así tomar ciertos cuidados a la hora del diseño, y dar a conocer las diferencias significativas que pueden resultar del estudio.

1.2. OBJETIVOS

1.5.1 Objetivos Generales

- Cuantificar experimentalmente el factor de grupo y la capacidad de uniones con múltiples pernos, expuestos a carga monotónica.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar y verificar la capacidad máxima de una unión, tomando una tolerancia de un 5%, expuesta a cargas monotónicas.

- Observar y entregar información de los mecanismos de falla.
- Analizar los resultados arrojados por los ensayos de laboratorio y verificar la hipótesis entregada por la normativa Chilena para el Pino Radiata, con respecto a ciertos parámetros de diseño (distanciamientos máximos entre pernos, factores de grupo, capacidad admisible de la unión, etc.)

1.3. METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos planteados se realizarán las siguientes actividades.

1.3.1. Revisión documentación bibliográfica

- Información nacional (Normativa e Investigación)
- Información extranjera (Normativa e Investigación)

1.3.2. Recopilación de Información

- Pino radiata
- Uniones en madera estructural
- Tipos de conectores
- Tipos de ensayos

1.3.3. Definición condiciones de análisis

- Estudio Normativa Chilena
- Definición del tipo de uniones en madera estructural
- Definición de los mecanismos de falla
- Definición de variables a considerar en el estudio
- Estudio y definición de ensayos experimentales

1.3.4. Experimentación

- Realización de ensayos experimentales

1.3.5. Tabulación y análisis de resultados

- Cálculo capacidad teórica de las uniones
- Tabulación de las capacidades reales y variaciones
- Gráficas de carga deformación
- Cálculo del factor de grupo y su variabilidad en un grupo específico de uniones.

1.3.6. Conclusiones y recomendaciones

- Metodología y resultados obtenidos
- Recomendaciones líneas de investigación para estudios futuros.

1.4. MOTIVACIÓN

El desarrollo del factor de grupo es usado desde 1997 en las Especificaciones de Diseño de Construcciones en Madera (NDS), las cuales se basan en análisis y modelos lineales elásticos, dando respuesta a solicitaciones monotónicas. La motivación principal es estudiar como perturba el factor de grupo en la capacidad admisible de una unión, para luego comparar esta resistencia con la descrita en la normativa chilena y conocer las causas de la falla. Se espera que esta investigación, aclare el comportamiento uniones con múltiples pernos, y que la capacidad de estas, se basan en criterios de deformación elástica, fijando un estado límite de servicio, con el objetivo final de evitar una respuesta inelástica de la unión.

1.5. LA MADERA

1.5.1 Generalidades

Las especies forestales se clasifican en dos grandes grupos: Coníferas y Latifoliadas. La diferencia entre estas especies es de origen botánico, pero existe un error en la clasificación, ya que se extrapola al campo de las propiedades físicas y mecánicas. Este error deriva de la denominación inglesa de ambos grupos “*Hardwoods*” (Maderas duras) y “*Softwoods*” (maderas blandas) para coníferas. Este concepto no es aplicable a las especies forestales Chilenas, pues existen coníferas con mejores propiedades mecánicas y físicas que muchas latifoliadas o viceversa.

Las Coníferas, pertenecen al grupo de las Gimnospermas, plantas que tienen semillas descubiertas, usualmente generadas dentro de conos y con hojas en forma de agujas, las cuales se mantienen en el árbol durante todo el año. Ejemplos de coníferas en nuestro país son: Araucarias, Ciprés de la Cordillera, Alerce, Ciprés de las Guaitecas, Pino Insigne, Pino Radiata, Mañío.

Las Latifoliadas pertenecen al grupo de las Angiospermas, plantas con flores, con semilla generada dentro de un fruto y hojas anchas que caen durante el invierno.

Ejemplos de Latifoliadas en nuestro país son: Olivillo, Tineo, Ulmo, Coigüe, Lengua, Raulí, Roble Lingue, Laurel, Tapa, Luma, Eucalipto, Canelo, Álamo y Ciruelillo.

Cuando germina una semilla bajo condiciones favorables, ella envía hacia arriba una capa de madera similar a un manto de cono que rodea el tejido central (Médula) el cual, por lo general, se caracteriza por ser blando. A partir de este momento y mientras el árbol este vivo, continuará proyectando sus ramas y raíces, aumentando el diámetro de su tronco, ramas y raíces mediante el agregado de nuevas capas de madera y corteza.

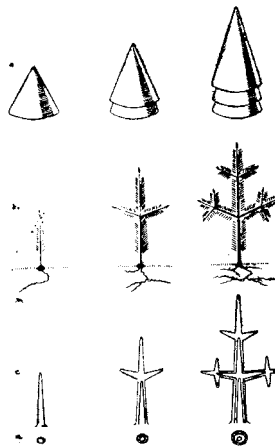


Figura 1- 1: Crecimiento en altura y diámetro de un árbol durante sus primeros tres años

La savia, solución diluida de sales minerales provenientes de las raíces, es conducida por las células que se ubican en las capas exteriores del tronco (albura) hacia las hojas del árbol.

Allí, mediante el proceso conocido como fotosíntesis, la savia se combina con gases de aire y con partículas de rayos solares, y de la clorofila, se produce el alimento requerido para el crecimiento del árbol. Este alimento es transportado por células ubicadas en la corteza interior, hacia las capas de tejidos en crecimiento y posteriormente a las raíces.

1.5.2 Estructura celular de la madera

La madera es un material orgánico no homogéneo compuesto fundamentalmente por celulosa y lignina. La celulosa constituye la estructura de las paredes celulares, mientras que la lignina es el material ligante de las células entre sí.

La célula de la madera, llamada también fibra o grano, es hueca y de una longitud entre 1 y 8 mm. Puede ser comparada con una bombilla de paja con sus extremos cerrados; a veces los largos son iguales al ancho (diámetro) y con diferentes espesores de pared celular. Si se construye un tubo encolando cientos de bombillas de paja, se tendría un modelo de la estructura básica de la madera. Este tubo tendría propiedades anisotrópicas, aún cuando las paredes de las bombillas estuviesen conformadas con un material isotrópico.

La mayoría de las células en la madera están orientadas en la dirección longitudinal pero algunas, denominadas células radiales, se ubican en tejidos que se extienden desde la superficie exterior de tronco hacia la médula.

Estos tejidos, rayos medulares, se componen de una o dos células en las coníferas y de muchas células en las latifoliadas. El porcentaje de madera que se ubica en rayos medulares respecto al volumen total del árbol, esta comprendido entre un 3 y 30% dependiendo este porcentaje de la especie.

Esta estructura celular, es en gran medida, la responsable de las distintas respuestas estructurales dadas por la madera a sollicitaciones que tienen distintas direcciones y características.

En la siguiente figura se puede ver en forma esquemática la descripción anterior.

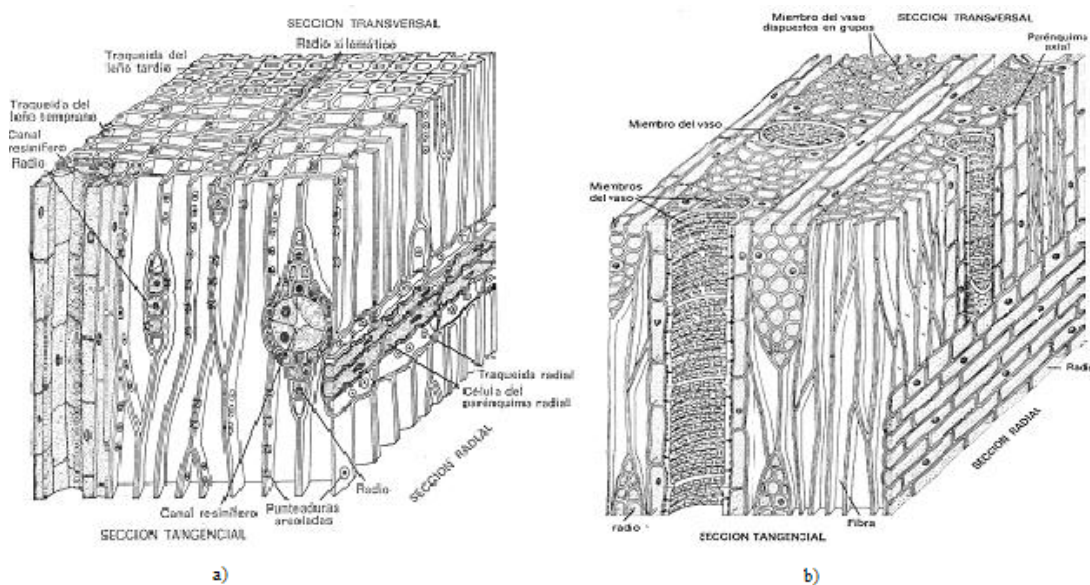


Figura 1- 2: Estructura celular típica de la madera. a) Estructura celular coníferas. b) Estructura celular Latifoliadas.

1.5.3 Estructura física de la madera

La sección transversal del tronco de un árbol típico, puede señalar diferentes zonas, las cuales se describen a continuación.

a) Corteza Exterior: Constituida por células muertas que cumplen una función de protección.

b) Corteza interior: Constituida por células vivas, cuya labor fundamental es el transporte de savia elaborada desde el follaje a las capas en crecimiento del árbol y posteriormente, a las raíces.

c) Cambium: Capa delgada, no visible a simple vista, en la cual se realiza el crecimiento del árbol, es decir, en donde se generan las nuevas células. En su superficie exterior se originan las células para la corteza interior y en la superficie interior, las correspondientes a las nuevas capas de madera que se esta formando.

d) Albura: Zona de tejido vivo, cuya función principal es el transporte de savia hacia las hojas y el almacenamiento de sustancias y sales minerales. Su ancho depende de la especie, de la edad del árbol y de su edad de crecimiento.

e) Duramen: Tejido inactivo, de coloración más oscura que la albura, debido a los extractivos químicos que se depositan en sus tejidos. Estos compuestos químicos le dan, por lo general, una mayor resistencia al ataque de hongos de pudrición y de insectos.

f) Rayos medulares: Células ubicadas en dirección normal al eje del árbol.

g) Médula: Tejido inactivo en el árbol adulto.

h) Anillos de crecimiento: Sección transversal de la capa de madera formada durante un periodo vegetativo. Se caracteriza por el contraste más o menos marcado entre el leño tardío de un periodo y el leño temprano del siguiente.

En la siguiente figura se puede visualizar en forma esquemática la descripción

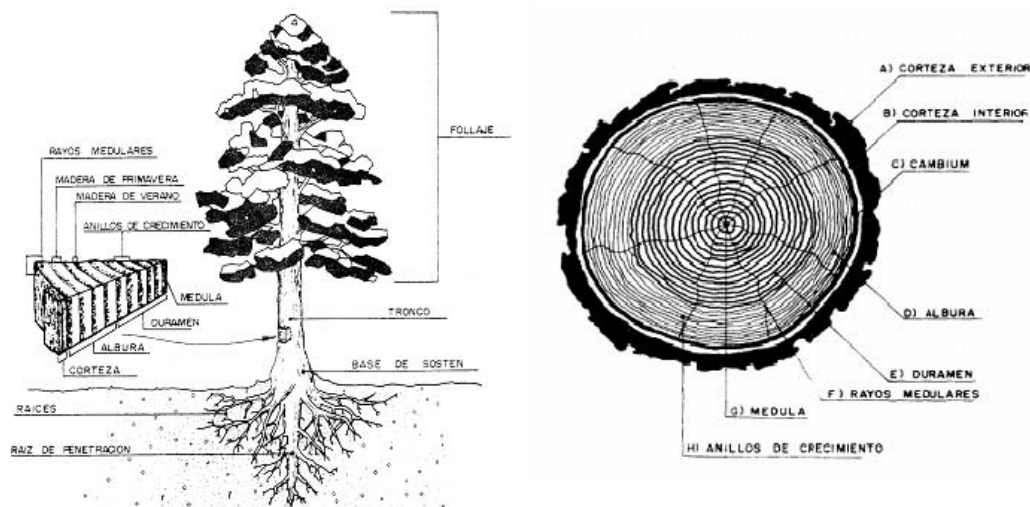


Figura 1- 3: Sección transversal de un tronco típico

Las propiedades resistentes de la albura y el duramen no son significativamente diferentes, siendo sin embargo, el duramen menos permeable que la albura.

1.5.4 Propiedades físicas de la madera

Las principales propiedades que caracterizan a la madera son el contenido de humedad, densidad y contracción.

1.5.3.1 Contenido de Humedad

Se entiende por contenido de humedad la masa de agua contenida en una pieza de madera, expresada como porcentaje de la masa de la pieza anhidra. La masa anhidra corresponde a la masa de madera con una humedad del 0%. Para determinar el contenido de agua en la madera, se utiliza con frecuencia el método gravimétrico, el cual consiste en fabricar una probeta de un largo de 3 a 4 cm en la dirección de las fibras y se pesa con una precisión de 0,1 gr (P_G). En seguida, la probeta se seca en una estufa a una temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas se pesa nuevamente (P_o). Finalmente se calcula el porcentaje del contenido de agua con la siguiente relación.

$$H_{(\%)} = \frac{\text{Masa agua}}{\text{Masa anhidra}} = \frac{P_G - P_o}{P_o} \cdot 100 \% \quad (1.1)$$

La madera es un material que absorbe o entrega agua según sea las condiciones de temperatura y humedad relativa del ambiente que la rodea. En una primera etapa, la madera se encuentra con sus cavidades y paredes celulares llenas de agua (savia). Al iniciarse un proceso de pérdida de humedad, la madera entrega al ambiente el agua libre contenida en sus cavidades, hasta alcanzar un punto conocido como “ Punto de saturación de la fibra”, que corresponde a un estado en el cual se ha eliminado toda el agua libre y las paredes celulares permanecen saturadas, el contenido de humedad en el punto de saturación de la fibra, o simplemente el punto de saturación de la fibra, depende de diversos factores y varía entre las diferentes especies; sin embargo, se acepta entre un 28 y 30% para madera en general.

Por debajo del punto de saturación de la fibra y al continuar el proceso de evaporación, la madera cede el agua contenida de sus paredes celulares hasta alcanzar un punto en el cual el proceso se detiene. Este punto se conoce como “Humedad de equilibrio ” de la madera y depende, fundamentalmente, de la especie, la temperatura y la humedad relativa del ambiente.

La pérdida de humedad por debajo de esta pérdida de equilibrio, solo podrá conseguirse por medio de tratamientos especiales de secado en hornos o estufas. De esta madera es posible obtener la sequedad completa o madera anhidra.

La norma chilena de cálculo, diseño y ejecución de construcciones en madera NCH 1198, define como madera en estado verde aquella cuyo contenido de humedad es superior al 30% y como madera seca aquella cuyo contenido de humedad es menor al 20%. También establece que la madera y los productos derivados de ella deben tener, en el momento de su utilización un contenido de humedad igual al correspondiente a la humedad de equilibrio del lugar donde ella prestará servicio.

El contenido de humedad se controlará de acuerdo con los procedimientos establecidos en NCH 176/1, aceptándose una tolerancia más menos del 3%.

No obstante, cuando por razones técnicamente justificadas no se puede cumplir con este requisito, se deben respetar las restricciones establecidas por las tensiones admisibles y módulos elásticos de la madera aserrada. Si en caso de que dicha especie se utilice en ambientes que determinen una humedad de equilibrio menor al 12%, deberá secarse a un contenido máximo de un 15%. Se excluye de esta justificación a las maderas de fácil secado como el pino radiata y el álamo.

Las humedades de equilibrio se presentan en la tabla E-1, del anexo E.

1.5.3.2 Densidad

La densidad de la madera, expresa la relación entre la masa de los distintos tipos de elementos que forman la madera y el volumen que ellos ocupan. Como la madera es un material poroso, debe considerarse al referirse a la densidad de la madera, el volumen interno de espacios vacíos existentes.

El contenido de humedad de la madera influye sobre la relación madera-volumen, es decir, afecta el peso y las dimensiones de la madera. Por ello se conocen distintos tipos de densidad, entre ellas destacan la densidad básica y la densidad de referencia.

La densidad básica considera masa anhidra y volumen de la madera saturada con agua, lo que se expresa como:

$$\rho_b = \frac{P_o}{V_g} \quad (1.2)$$

La densidad de referencia, considera masa y volumen en las mismas condiciones de humedad. La densidad de referencia a 12% de humedad, es de uso frecuente y se le conoce como densidad normal. En el caso de tener un contenido de humedad distinto al 12% se expresa de la siguiente manera

$$\rho_H = \rho_o \cdot \left(\frac{100 + H}{100 + k \cdot H} \right), \quad \text{cuando } H < \text{P.S.F} \quad (1.3)$$

$$\rho_H = \rho_b \cdot \left(\frac{100 + H}{100} \right); \quad \text{cuando } H > \text{P.S.F} \quad (1.4)$$

1.5.3.3 Contracción

La madera contiene una cierta cantidad de agua depositada en los lúmenes celulares y en las paredes celulares de las fibras. Normalmente cuando la madera intercambia humedad de la pared celular, se producen a consecuencia de este intercambio variaciones en las dimensiones de la madera, las que son conocidas como contracción o hinchamiento.

La NCH 176/3 define la “Contracción Normal”, como la disminución de dimensiones que sufre la madera al perder humedad bajo el punto de saturación de las fibras, expresada como el porcentaje de la dimensión de la madera al estado verde. También define el “Colapso” como la disminución irregular de dimensiones que sufre la madera en algunas especies al perder humedad en las primeras etapas de secado sobre el punto de saturación de las fibras, que se caracteriza por el aplastamiento de las paredes celulares, luego la suma de la contracción normal más el colapso, es la “Contracción Total”.

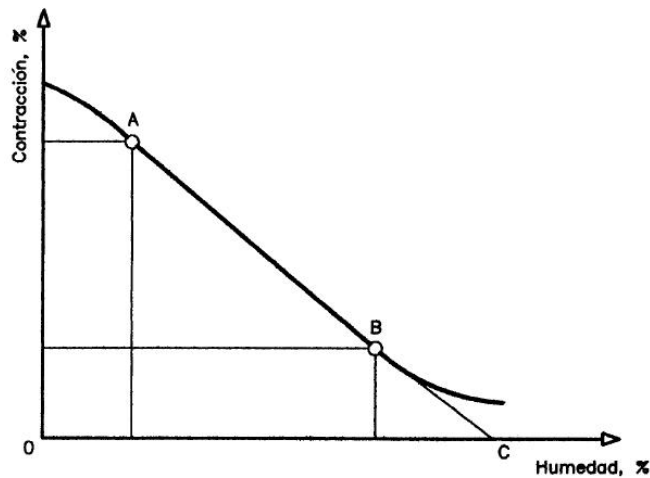


Figura 1- 4: Curva de contracción lineal

La determinación de las dimensiones que alcanza una pieza de madera a contenidos de humedad inferiores a 20% se obtiene a partir de los coeficientes de contracción lineal (k), determinados experimentalmente, específicamente para el pino radiata.

Tabla 1- 1: Coeficientes de contracción lineal (k) para Pino Radiata.

Especie	Dirección	Coeficiente de
		Contracción lineal (k)
Pino Radiata	T	0.29
	R	0.20

La fórmula que rige la variación de las dimensiones de las especies madereras debido a la contracción es la siguiente.

(1.5)

$$Dimension_H = Dimension_{20} \cdot \left(1 - \frac{k \cdot \Delta H}{100} \right) \quad (mm)$$

La contracción longitudinal provocada por una variación en el contenido de humedad de la madera, alcanza valores muy reducidos y es perfectamente despreciable en términos prácticos.

Con respecto al fenómeno de dilatación, el incremento dimensional producido en una madera seca al aumentar su contenido de humedad, se puede suponer, sin gran margen de error, que su comportamiento es regulado por las mismas relaciones que rigen la contracción, por consiguiente se pueden aplicar los valores de la tabla 1-1.

Durante la vida útil de una estructura de madera, esta se encuentra sometida a contracciones e hinchamientos continuos debidos a las variaciones de temperatura y de humedad ambiental. Este trabajo se conoce como “trabajo” o “juego” de la madera.

Además de las propiedades ya descritas, existen otras como las propiedades térmicas, acústicas y eléctricas, que no son relevantes en el diseño estructural por lo que no son analizadas.

1.6. Propiedades Mecánicas de la madera

Las propiedades mecánicas de la madera que son fundamentales para el diseño son:

- a) Tensión en la fibra extrema en flexión, F_f : Las fibras extremas en flexión, son aquellas fibras ubicadas en los cantos superior e inferior de una pieza, mostradas en la figura 1-5. Se nota que las fibras de la cara más cercana de la carga están en compresión, mientras que aquellas en la cara opuesta están en tracción.

- b) Tensión de corte o cizalle longitudinal en flexión, F_{cz} : Las piezas flexionadas también están sometidas a esfuerzos que tienden a deslizar horizontalmente una fibra con respecto a la otra. Esta tensión se conoce como cizalle longitudinal u horizontal, y aunque su efecto en los apoyos es ignorado, se alcanza un valor máximo en la zona central de la pieza (figura1-5).

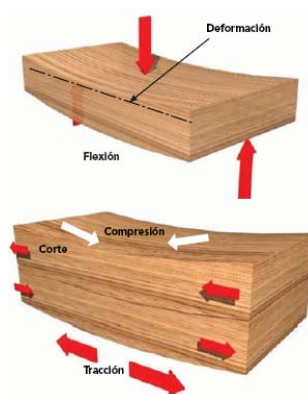


Figura 1- 5: Tensiones en la fibra extrema en flexión, F_f y Tensión de cizalle longitudinal, F_{cz} .

- c) Compresión perpendicular o normal a la fibra, F_{cn} : Las vigas son soportadas generalmente por apoyos localizados en los extremos de las ubicaciones intermedias como se muestra en la figura 1-6. En este caso, la tensión de compresión perpendicular a la fibra de la madera debe ser suficientemente alta para prevenir el aplastamiento.

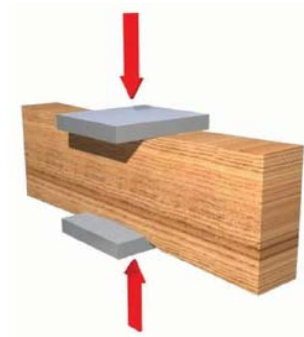


Figura 1- 6: Compresión perpendicular a la fibra, F_{cn}

- d) Compresión paralela a la fibra, F_{cp} : Elementos como las columnas, postes y tornapuntas deben resistir cargas importantes de compresión paralela aplicadas a todo lo largo de la pieza. (figura 1-7)



Figura 1- 7: Compresión paralela a la fibra, F_{cp}

- e) Tracción paralela a la fibra, F_{tp} : Algunos elementos como el cordón inferior de una cercha, están sometidos a una tracción paralela a la fibra (figura 1-8). Cuando los elementos están cargados de esta manera, se produce una concentración de tensiones alrededor de los nudos y la desviación de la fibra tiene una influencia significativa en su resistencia.



Figura 1- 8: Tracción paralela a la fibra

- f) Tracción perpendicular o normal a la fibra, F_{tn} : La madera no posee alta resistencia de tracción perpendicular a la fibra, por lo que los calculistas deberían evitar que se produzcan estas sollicitaciones siempre que sea posible.

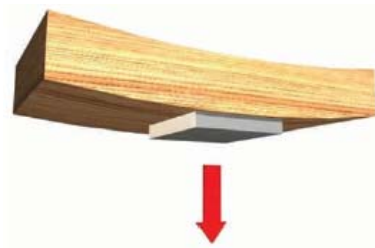


Figura 1- 9: Tracción perpendicular a la fibra

- g) Módulo de elasticidad, E : El módulo de elasticidad de un elemento es una medición de la resistencia a la deformación bajo carga. El módulo de elasticidad más utilizado es aquel que se mide en dirección paralela a las fibras, el cual es designado como E_L o simplemente E_f .

1.7. El Pino Radiata

En Chile el bosque que se da en forma natural, lo hace en zonas templadas y frías, a diferencia de otros lugares en el mundo, donde predominan selvas lluviosas tropicales.



Figura 1- 10: Plantaciones de Pino Radiata

Sin embargo en Chile, se han introducido variadas especies forestales, entre las cuales destacan los cultivos de Pino radiata y eucalipto. Estas especies fueron traídas desde Estados Unidos y Australia, respectivamente, y en la actualidad constituyen la base del desarrollo forestal nacional.

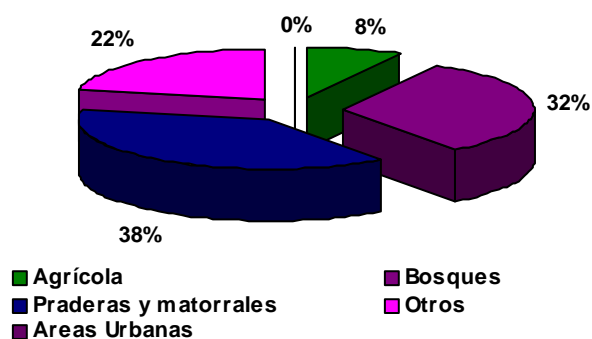


Gráfico 1- 1: Distribución de suelos en Chile

La plantación de estas especies ha significado la recuperación de 1,9 millones de hectáreas de suelos no aptos para la agricultura, descubiertos y erosionados, siendo el Pino radiata el que ocupa el 90% de los cultivos

La superficie total de bosques en Chile abarca 15,6 millones de hectáreas. Esta cifra corresponde al 21% de la superficie total del país.

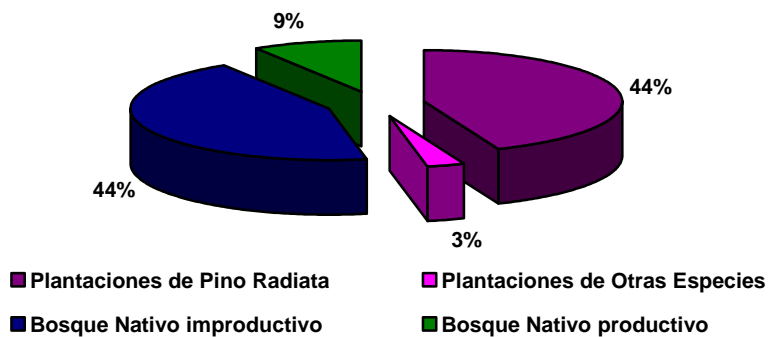


Gráfico 1- 2: Distribución de la zona boscosa de Chile

El Pino radiata ocupa un 9% de la superficie total de bosques en Chile. Por otra parte, en el país se producen 21,5 millones de metros cúbicos de madera en trozas. El Pino radiata constituye la principal especie utilizada, con 77% del total producido.

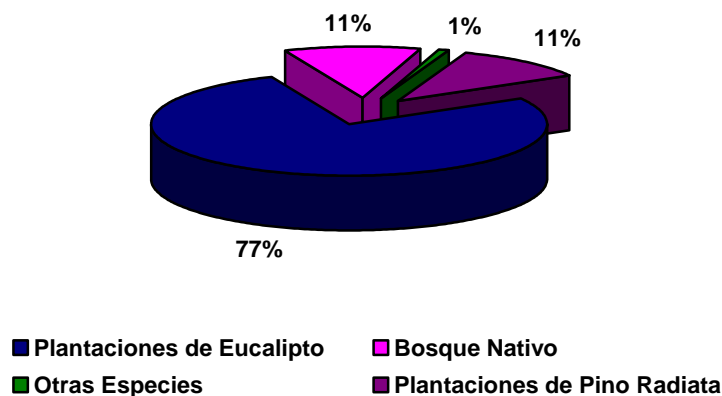


Gráfico 1- 3: Distribución de la producción de trozas en Chile.

En la actualidad, existen casi 20 millones de m³ de madera aserrable de pino radiata. La proyección de este recurso es duplicar su disponibilidad en los próximos 25 años. Esto permite proyectar que el principal recurso que se utilizará en el futuro para aplicaciones en la construcción, es la madera proveniente de plantaciones de Pino radiata.

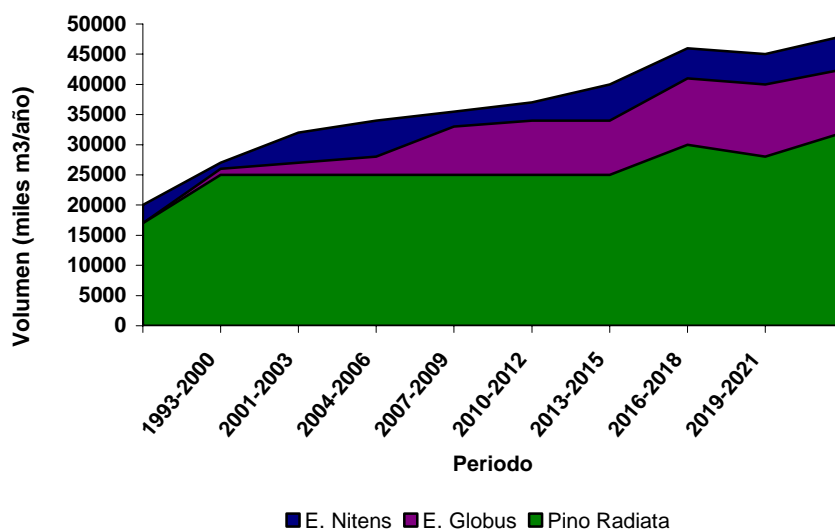


Gráfico 1- 4: Disponibilidad actual y futura de madera aserrable: Pino Radiata, Eucalipto Globus, Eucalipto Nitens.

1.7.1 Clasificación estructural del Pino Radiata

La madera de Pino radiata puede ser clasificada estructuralmente mediante dos métodos normalizados. El primero de ellos y el más conocido a nivel nacional, es la clasificación estructural visual, la que se basa en establecer en una pieza de madera, la razón de área nudosa presente en su interior, que provoca desmedro o incluso anula las propiedades mecánicas de la pieza.

Otro método de clasificación ampliamente utilizado en Chile, pero poco conocido aún, es la clasificación estructural mecánica, la cual consiste en medir el módulo de elasticidad de las piezas por medio de métodos mecanizados y automatizados.

1.7.1.1 Clasificación estructural visual

Cada pieza de madera, como consecuencia de las características individuales del árbol de origen, posee también características singulares. Por ello, es posible establecer un número indeterminado de grados estructurales, pero por razones de economía y conveniencia en la distribución y comercialización, resulta necesario agrupar en cantidad. Cada grado estructural consiste en un agrupamiento de piezas ligeramente diferentes, pero igualmente adecuadas para el uso o aplicación prevista para ellas.

Para Pino radiata, se ha podido comprobar que la característica de crecimiento que afecta en mayor proporción las propiedades mecánicas es la presencia de nudosidades. En segundo plano, quedan los efectos de incorporación de médula, inclinación de la fibra y velocidad de crecimiento, entre otros.

Por ello, el criterio de clasificación visual se basa en el riguroso control del tamaño, ubicación y frecuencia de los nudos. Se recurrió para estos efectos al método de Razón de Área Nudosa, RAN, desarrollado en Inglaterra y adoptado posteriormente por las principales normativas europeas y de Oceanía.

Descrito en términos simples, consiste en que el clasificador, después de decidir la sección más débil de la pieza, debe visualizar la geometría de proyección del nudo o grupo de nudos presentes en dicho sector.

Para entender lo que se denomina geometría de proyección de nudos, se establece como sección de la pieza en estudio, un volumen transparente y cuerpos de nudos en su interior como material opaco. El método se aplica examinando piezas en terreno, mediante la obtención de gráficos de nudos en las secciones transversales estimadas como críticas.



Figura 1- 11: Proyección del nudo en la sección interior de la pieza

Los nudos ubicados en zonas de borde se procesan en forma más severa. Por esto, el clasificador debe preocuparse especialmente de los cuartos adyacentes al espesor de pieza (cantos). La razón de área nudosa en las zonas de borde, se designa como RANB y en su valoración, se considera siempre el canto más desfavorable de ambos.

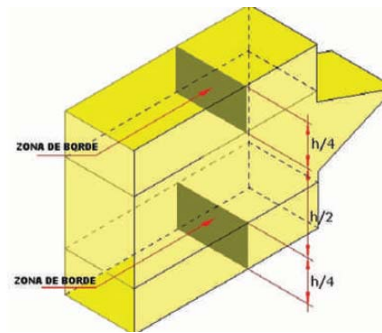


Figura 1- 12: Proyección de la zona de borde en una pieza de madera.

Es conveniente incorporar en la clasificación el concepto de condición de borde, situación que se manifiesta cuando más del 50% de una zona de borde de la sección transversal crítica se encuentra ocupada por nudos. Al existir una condición de borde, las restricciones de RANB para un mismo grado son más rigurosas que las establecidas para situaciones en la que no existe condición de borde.

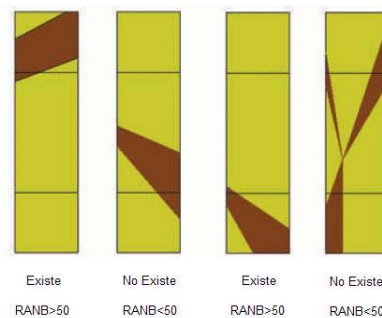


Figura 1- 13: Condición de borde según proyección de razón de áreas nudosas en zonas de borde

Dependiendo entonces de la razón de área nudosa y la razón de área nudosa en zonas de borde, la madera de Pino radiata puede ser clasificada en tres categorías estructurales:

- Grado GS o selecto: Es aquel en que RANB fluctúa entre 20 y 33,3% y no existe condición de borde.
- Grado G1: Aquel en que RANB fluctúa entre 33,3 y 50% y no existe condición de borde. También corresponde a esta clasificación, si existiendo condición de borde, la RANB no excede el 33,3%.
- Grado G2: Aquel en que RANB fluctúa entre 50 y 66,7% y además existe condición de borde.
- Si la pieza presenta en su sección de área nudosa más desfavorable una RANB mayor a 66,7%, simplemente se descarta o rechaza.

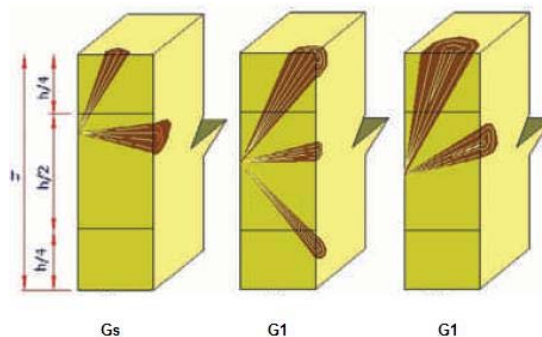


Figura 1- 14: Ejemplos de aplicación en la determinación de grados estructurales de la madera

Los grados estructurales definidos por la normativa chilena se muestran en la tabla E-2 del anexo E.

1.7.1.2 Clasificación Estructural Mecánica

El concepto de clasificación estructural mecánica de la madera fue estudiado en forma simultánea en varios países a principios de 1960. La inquietud de dicho estudio surgió por la necesidad de mejorar la eficiencia que entregaba la clasificación estructural visual, en la estimación de las propiedades resistentes de la madera.

El proceso de clasificación estructural mecánica sólo se hizo posible cuando se verificó la existencia de una relación entre la resistencia de flexión, compresión y tracción, y el módulo de elasticidad en flexión (E_f), determinado en luces cortas. El posterior diseño de una máquina capaz de medir el E_f permitió la clasificación de piezas de madera con propiedades resistentes superiores a un valor mínimo previamente establecido.

Las actuales máquinas de clasificación estructural usan esencialmente el mismo principio. Cada pieza de madera que se clasifica es deformada en una de sus caras como viga, y la magnitud de fuerza asociada con la deformación constante aplicada por la máquina, permite determinar el valor del E_f . Con ese valor, se estiman las propiedades resistentes y con ellas, la clasificación de las piezas.

La clasificación estructural mecánica está especialmente indicada para piezas que serán utilizadas como envigados, tijerales, escaleras y muros estructurales.

En Chile existen máquinas de clasificación estructural mecánica que permiten contar en el mercado con madera clasificada.

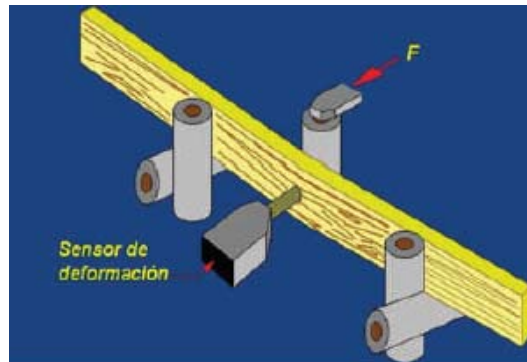


Figura 1- 15: Esquema de funcionamiento de la máquina de clasificación estructural mecánica

Las tensiones admisibles de la madera clasificada estructuralmente, se derivan de la norma europea EN 338, pero para hacerlas comparables o aplicables a los criterios de la norma chilena de cálculo Nch 1198, es necesario adecuar la metodología de derivación de la norma BS 5268, usada en Europa.

Los principales cambios se refieren a que la norma europea establece cargas de efecto permanente y la norma chilena toma una duración referencial de 10 años. Asimismo, la norma chilena toma como base para la derivación de la tensión de flexión y tracción una altura de pieza de 90 mm, en tanto que la norma europea, 300 mm. El contenido de humedad para el cual están calculadas las tensiones en la norma europea es de 20%, en tanto que la norma chilena utiliza una referencia de 12%.

CAPÍTULO II

UNIONES EN MADERA ESTRUCTURAL

2. UNIONES EN MADERA ESTRUCTURAL

2.1. Generalidades

Toda estructura de madera esta formada por muchas piezas que deben estar unidas entre si, con el fin, de que trabajen como un solo sistema estructural. La conexión de dos o más piezas estructurales se denomina unión estructural y su función principal es transmitir las fuerzas que actúan sobre ellas.

La unión estructural, a su vez, restringe el movimiento de las piezas que vincula, delimitando la forma del conjunto. En estructuras de madera representan la mayor parte del total de esfuerzos y fuerzas que resisten un sistema dado de cargas. La capacidad de una unión a la transferencia carga sobre un período del tiempo extendido, o durante un acontecimiento sísmico, afecta directamente en la seguridad, la confiabilidad, y la durabilidad de las estructuras de la madera.

En uniones de madera apernada, se utilizan generalmente configuraciones cizalle simple o cizalle doble, indicando el número de los planos del corte o el número de superficies de contacto entre los miembros. Estas uniones, simples y eficaces, pueden variar dependiendo de el grosor del miembro, material, diámetro y número de pernos, y la colocación de estos últimos. Los pernos se pueden disponer en filas, constituidas por varios pernos alineados o escalonados. En general, las

uniones apernadas, se configuran de tal forma que los espaciamientos son uniformes, tanto entre pernos como filas.

Un aspecto crítico que debe considerarse para comprender el comportamiento de las uniones de madera, es que existe un error en decir que la fuerza y la rigidez de las uniones de un solo perno son directamente proporcionales a la fuerza y rigidez de las uniones con múltiples pernos (Lantos, 1969). Las uniones se hacen en base a elementos mecánicos de unión, los cuales al quedar sometidos por fuerzas de cizalle, admiten corrimientos relativos entre las piezas conectadas y cuyas magnitudes dependen de la fuerza solicitante.

Los corrimientos se originan como consecuencia de las deformaciones por aplastamiento de la madera en la zona de contacto con el elemento de unión y, adicionalmente en el caso de elementos de unión de forma cilíndrica, por las deformaciones de flexión que ellos experimentan. Esto se debe a que la carga que es aplicada en la unión no se distribuye equitativamente entre los pernos que están dispuestos en una hilera, dando por resultado altas tensiones localizadas que potencialmente causan falla del perno y/o de la madera. Esta observación particular condujo al desarrollo del factor de grupo.

2.2. Factor de Grupo

El factor de grupo o factor de longitud de hilera, es un número menor que o igual a uno, el cual explica la distribución de carga desigual entre los pernos en una hilera. El uso de la expresión (2.1), está basado en los criterios de la deformación elástica, este fija un estado del límite de trabajo, el cual asegura que las cargas del servicio no producen respuesta inelástica de la unión.

Las recomendaciones actuales del diseño en los Estados Unidos, para las conexiones con múltiples pernos se basan en este criterio.

$$P_{hilera} = P_{el} \cdot n_{hilera} \cdot F_G \quad (2.1)$$

$$P_{ad, unión} = \sum_1^n P_{hilera} \quad (2.2)$$

“La capacidad admisible de una unión es la suma de las cargas admisibles asignadas a cada hilera que constituyen la unión”. (Ecuación 2.2)

El desarrollo del factor de grupo comenzó con la industria del acero, esto debido a la falla de uniones clavadas, las cuales se produjeron por una mayor absorción de carga de los elementos que se ubicaban al principio y fin de las hileras (Salenikovich et al, 1996).

Las pruebas conducidas por Stern (1940), Doyle (1964) e Isuymov (1967) iniciaron el desarrollo del factor de grupo en las uniones de madera basadas en características de funcionamiento similares. Esto implica, que la inclusión de un factor de grupo en diseño de madera, está basado en estudios de seguridad y falla de la unión apernada, debido a la distribución de carga desigual entre los pernos en una hilera.

2.3. Fundamentos y definiciones

Para entender el funcionamiento de uniones de madera apernada, es necesario presentar un método básico el cual describa las fuerzas, funcionamiento y falla. El funcionamiento de uniones apernadas esta basado en la relación Carga-Desplazamiento y en los mecanismos de falla que describen la respuesta elástica e inelástica.

Las raíces de el diseño de uniones de madera apernada comienzan con Trayer (1932). Como resultado, Trayer probó variados especímenes y configuraciones, las cuales proveen información y recomendaciones en el diseño de las uniones apernadas.

Para uniones de cizalle doble, se crean recomendaciones con respecto al espaciamiento apropiado entre pernos, distancias, alineamiento y cambio en el diámetro del perno. En la investigación de Trayer, la capacidad limite del primer elemento fue definida como *“La tensión media que se provoca bajo el perno, se*

provoca cuando la deformación de la unión deja de ser proporcional a la carga” (Trayer 1932) (ver figura 2.1). Trayer trabajó básicamente en el diseño de uniones de madera apernada en los estados unidos durante muchos años. (Moss 1996).

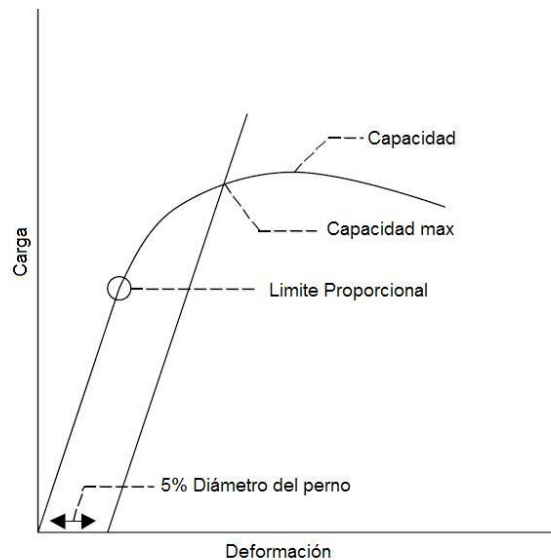


Figura 2- 1: Curva típica de Carga-Deformación, asociada a parámetros de diseño.

La evolución del diseño de uniones de madera apernada, entre la primera edición de la “*National Design Specification for Stress-Grade Lumber and its Fasteners*” (NLMA, 1944) y la “*National Design Specifications for Wood Construction*” (NFPA, 1986) considera una muy pequeña diferencia, pero la extrapolación significativa del trabajo de Trayer, crea inconsistencias y confusión, basadas en la interpretación (McLain, 1991). El resultado de la “*National Design Specifications for Wood Construction*” (NDS) (NFPA, 1991) adopta las expresiones, ajustando el modelo a capacidad límite de diseño de la unión, basado en las investigaciones anteriores europeas. Esta similitud reduce significativamente las inconsistencias

asociadas a la extrapolación de las investigaciones anteriores, por lo que entrega a los diseñadores una visión simple para el cálculo de los valores de diseño de una unión.

El desarrollo de un modelo a capacidad límite comienza a fines de 1949, por Johansen (1949). Su trabajo se fundamentó en mecanismos básicos de predicción de esfuerzos de un perno tipo, sujeto a flexión y la resistencia de la madera al aplastamiento. Las correcciones del modelo de capacidad y la verificación experimental de Mclain y Thangjitham (1983) y Soltis et al. (1986) determinan que el modelo de capacidad, podría ser aceptable, ya que puede predecir la carga paralela a la fibra que afecta a la unión. Sin embargo la capacidad de la madera no es un punto bien definido en la curva esfuerzo-deformación. Basado en el trabajo de Harding y Fowkes (1984), un desplazamiento de la zona elástica en un 5% del diámetro del perno, fue introducida y convertida por una descripción básica, de un esfuerzo de extracción lateral de un elemento de unión. La capacidad de la unión esta definida por el punto donde el la curva de carga-deformación es intersectada por una línea paralela a la zona elástica, pero desplazada en una deformación equivalente del 5% del diámetro del perno (ver figura 2.1). Estos criterios de capacidad asumen un comportamiento elasto-plástico de la madera y de los pernos. Conociendo la carga, la capacidad del perno y la geometría de la unión, se puede predecir la capacidad de la unión sometida a una carga lateral.

2.3.1 Derivación de AFPA (1999) y Heine (2001)

Aunque el procedimiento actual en el diseño de las uniones de madera apernada está basado en el método antes mencionado, existe el deseo de desarrollar diseños por capacidad. La definición de capacidad o carga última, dada por la ASTM D 1761 (ASTM 2001), es la carga de rotura o la carga que provoca un desplazamiento de la unión de 0.6 pulgadas (la que ocurra primero). Sin embargo Gutshall (1994) definió la capacidad como la última carga registrada o la carga que desplace 1 pulgada. Diferencias en las definiciones de capacidad dependerán de la predicción de los desplazamientos reales y las cargas que serán transferidas a otros elementos en la estructura. Como mínimo se debe considerar un margen de seguridad del diseño por capacidad de uniones apernadas. Este conocimiento es de gran utilidad en el caso de sismos o sollicitaciones fuertes, donde las uniones pueden ser sometidas a enormes esfuerzos.

Es probable que el margen del 5% de la capacidad, no sea siempre constante, ya que dependerá de la configuración de la unión. El modelo de capacidad límite puede ser usado para predecir la capacidad de uniones con falla dúctil, pero el modelo sobreestima la capacidad de la unión en falla frágil como por ejemplo: corte del perno, rotura y aplastamiento de la madera en tensión. (Jorissen 1998).

Jorissen desarrollo mecanismos de fractura, basados en el modelo de uniones de madera en cizalle doble con pernos rígidos. Estas uniones corresponden al modo de falla I, típicamente producen mayor confiabilidad en la predicción de esfuerzos que llevan a la capacidad límite y que actualmente son usadas. Los modos de falla de las uniones se especifican en el punto 2.6 de este capítulo.

2.4. Desarrollo del Factor de Grupo

El factor de grupo o factor de modificación por longitud de hilera, como se nombrará mas adelante, no fue introducido por los códigos hasta 1973 por la “*National Design Specifications for Wood Construction*”, en los Estados Unidos. Hasta ese periodo, solo se había asumido que para una unión “*Las carga admisible total de la unión será la suma de las cargas admisibles de cada conector usado*”, (NFPA 1971). En otras palabras, la carga admisible que soporta la unión es simplemente la carga admisible que soporta un sujetador, multiplicado por el número total de ellos. El desarrollo del factor de grupo, proviene de observaciones de distintas distribuciones de cargas en uniones con múltiples pernos. Cramer (1968) determina un diseño seguro, para uniones con múltiples pernos, la carga admisible de esta, no puede ser proporcional a una unión con un único perno. Como existe una distribución desigual de carga, el factor de grupo, reduce la probabilidad de falla en una unión con múltiples sujetadores.

Observaciones de distribuciones no uniformes de carga, entre pernos ubicados en una hilera, conducen al desarrollo de un modelo analítico por Cramer (1968). Este desarrollo es un modelo lineal-elástico, el cual predice la distribución de cargas entre pernos en hilera. El asumió que la fricción es insignificante, y considera solo una carga transferida por el perno, el corte. Cramer reconoció que las cargas no uniformes, ocurren alrededor de las perforaciones de los pernos, y esto fue considerado en el modelo. El validó los resultados con estrictas pruebas monotónicas para uniones perfectamente fabricadas, pero conocido el desalineamiento de las perforaciones de los pernos, provocó cambios considerables en la distribución de la carga asignada a los pernos. Los resultados observados fueron *“Las pruebas muestran que las tensiones máximas se redistribuyen sutilmente de los pernos exteriores más cargados a los pernos interiores menos cargados, cuando el perno esta en modo de falla”* Cramer (1968).

El año 1968, también se vio el modelo Lantos, para la distribución de carga en una hilera de sujetadores. Similar al trabajo de Cramer, Lantos desarrolla un modelo lineal-elástico de tres miembros, asumiendo que las cargas son uniformes a través de la sección. No se realizó una verificación experimental para validar el modelo.

Los modelos de Cramer y Lantos son válidos para rango lineal-elástico y aplicables para cargas temporales, paralelas a la fibra. Los criterios fueron

confirmados por Wilkinson (1980) quien comparó los modelos de predicción de Cramer y de Lantos en uniones donde se utilizaron pernos. Wilkinson encontró modelos que podían predecir proporcionalmente un límite de carga en una hilera de sujetadores, pero sobreestimarán la capacidad del rango lineal-elástico asumiendo una unión no lineal. El modelo de Lantos es usado para determinar el factor de grupo en 1997 por la NDS (AFPA, 1997), donde F_G es el factor de grupo.

$$F_G = \left[\frac{m(1 - m^{2n})}{n \cdot [(1 + R_{EA} \cdot m^n) \cdot (1 + m) - 1 + m^{2n}]} \right] \cdot \left[\frac{1 + R_{EA}}{1 - m} \right] \quad (2.3)$$

Debido a las limitaciones inherentes de un modelo lineal-elástico, se asume que esta derivación del factor de grupo, satisface un estado del límite para el diseño de las uniones apernadas de madera. Recordando a Salenikovich et al. (1996), “*En una unión con múltiples pernos, el comportamiento no lineal es causado por una distribución desigual de carga entre pernos, mientras se produce una redistribución de cargas. Además la deformación visco-elástica que depende del tiempo, reduce la rigidez de la unión y redistribuye a aplicación de cargas entre los sujetadores*”. Este modelo, no puede cuantificar exactamente el funcionamiento y seguridad de las uniones, más allá de las condiciones de servicio.

2.5. Factores que afectan la resistencia de una unión

Basado en la Normativa Chilena NCH 1198 Of. 2006, los factores que requieren ser considerados, que afectan la resistencia y que son comunes a todos los elementos de unión son:

- La especie maderera (densidad)
- Sección transversal crítica y tensiones de cizalle
- Dirección de la carga respecto a la fibra de la madera
- Espaciamientos
- Excentricidad
- Acción en grupo de los medios de unión
- Factores de modificación

2.5.1. Especie maderera

La resistencia de un elemento mecánico de unión varía con la madera en la cual se utiliza. Para los efectos del diseño de uniones, las especies madereras se consideran agrupadas, según la densidad anhidra (ρ_0), en la forma que se indica en la tabla E-3.

La densidad anhidra es muy importante a la hora del diseño, ya que la resistencia al aplastamiento de la madera depende de esta propiedad, la cual se explicará más adelante.

2.5.2. Sección Transversal Crítica y Tensiones de Cizalle

La sección transversal crítica de una unión, es aquella sección transversal, normal al eje longitudinal de la pieza, que presenta las tensiones de trabajo máximas, calculadas con la sección transversal neta. La sección transversal neta es igual a la sección transversal bruta de la pieza menos las áreas de perforaciones o de cualquier otra remoción de madera (figura 2-2).

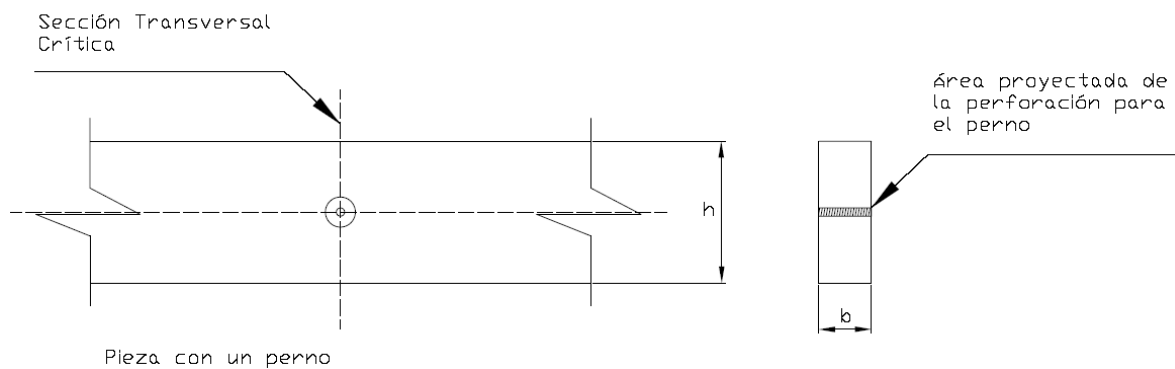


Figura 2- 2: Secciones transversales netas en las uniones

La sección transversal neta requerida, en piezas traccionadas o comprimidas, se determina dividiendo la carga total que se traspasa a través de la sección transversal neta crítica por el correspondiente valor de tensión de diseño en tracción o de compresión paralela a la fibra, para la especie y grado de material empleado.

Para solicitaciones paralelas a la dirección de la fibra con pernos, barras de acero, tirafondos o conectores alineados en forma alternada, estos se consideran dispuestos sobre una misma sección transversal crítica, salvo que el espaciamiento entre las secciones sea mayor a:

- 8 diámetros, en el caso de pernos, barras de acero y tirafondos.(Figura 2-3)
- 2 diámetros, en el caso de conectores.

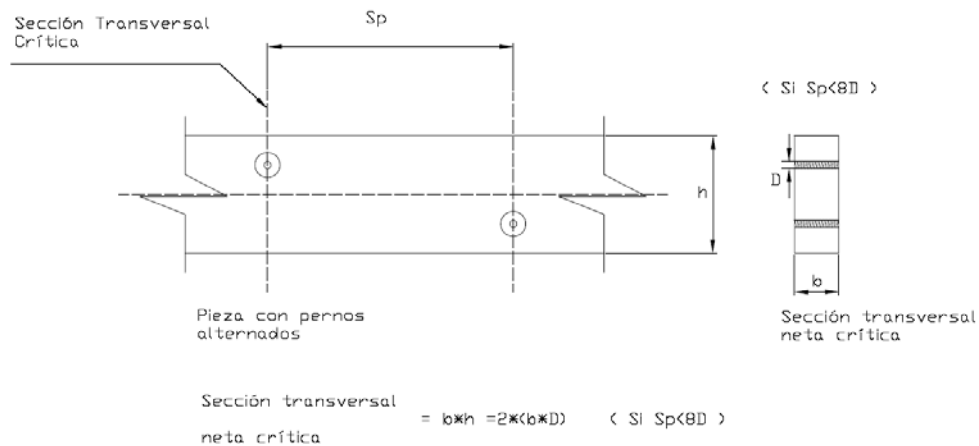


Figura 2- 3: Sección transversal neta para pernos alternados

En uniones solicitadas por fuerzas de corte y materializadas con pernos, tirafondos, barras de acero o conectores, se debe verificar las tensiones de cizalle F_{cz} , inducidas por las fuerzas de corte Q y evaluadas con las relaciones siguientes, siempre y cuando no excedan los valores indicados.

- En uniones alejadas del extremo de la pieza en 5 o mas veces la altura h de la misma, con:

$$f_{cz} = \frac{1.5 \cdot Q}{b \cdot h_e} \quad (2.4)$$

Donde se debe verificar:

$$f_{cz} \leq 1.5 \cdot F_{cz,dis} \quad (2.5)$$

- En uniones separadas del extremo de la pieza en menos de 5 veces la altura de la misma, con:

$$f_{cz} = \frac{1.5 \cdot Q}{b \cdot h_e} \cdot \frac{h}{h_e} \quad (2.6)$$

Donde se debe verificar:

$$f_{cz} \leq F_{cz,dis} \quad (2.7)$$

En el caso de pernos, tirafondos y barras de acero, “he” se evalúa deduciendo de la altura, la distancia entre el borde descargado y el centro del perno, tirafondo o barra de acero mas próximo.

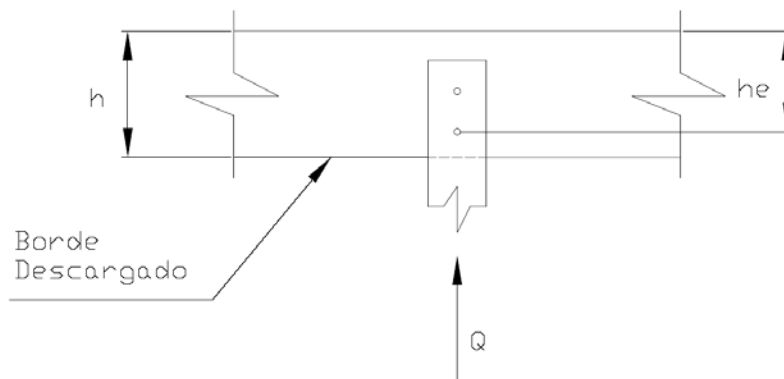


Figura 2- 4: Valor de “he” para pernos, barras de acero y tirafondos

Adicionalmente se debe verificar la sección transversal bruta de acuerdo con la relación:

$$f_{cz} = \frac{1.5 \cdot Q}{b \cdot h} \leq F_{cz,dis} \quad (2.8)$$

2.5.3. Dirección de la carga respecto a la fibra de la madera

El ángulo formado por las direcciones de la carga y de la fibra, en una unión, es un factor que para algunos elementos de unión, incide sobre la determinación de las cargas de diseño, obteniéndose mayores valores en la dirección paralela a la fibra de la madera. El ángulo de inclinación θ es el comprendido por la dirección de la fuerza con que el medio de unión que actúa sobre la pieza y la fibra de esta, la que puede suponerse coincidente con su eje axial.

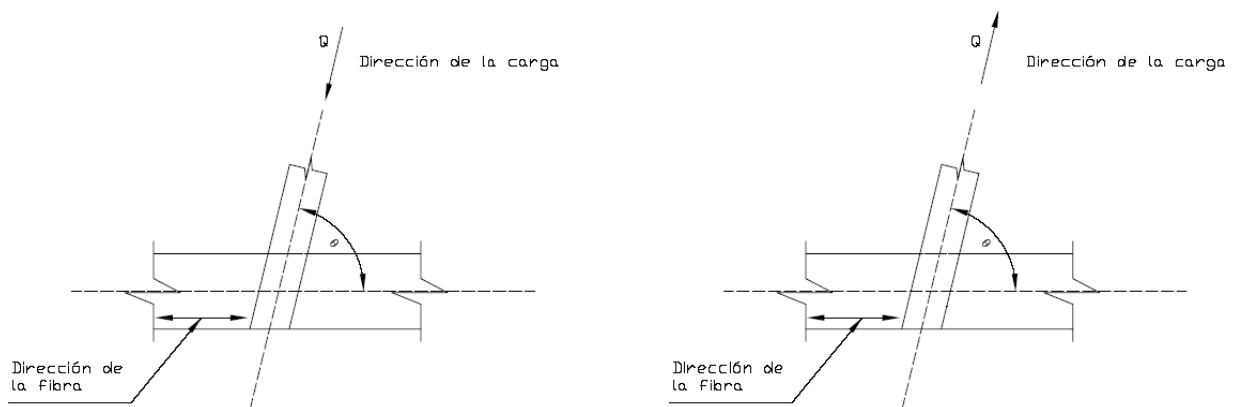


Figura 2- 5: Cargas inclinadas respecto a la fibra de la madera

La carga admisible, $P_{\theta,ad}$, se determina en función de los valores de diseño para cargas paralelas, $P_{P,ad}$ ($\theta=0^\circ$), y normal, $P_{n,ad}$ ($\theta=90^\circ$) a la fibra, aplicando la fórmula de Hankinson.

$$P_{\theta,ad} = \frac{P_{P,ad} \cdot P_{n,ad}}{P_{P,ad} \cdot \sin^2 \theta + P_{n,ad} \cdot \cos^2 \theta} \quad (2.9)$$

2.5.4. Espaciamientos

Se entiende por espaciamiento a la distancia que debe existir entre los centros de elementos de unión para que cada uno de ellos desarrolle su resistencia total. El espaciamiento puede medirse en dirección normal o paralela a la fibra. Se le da también el nombre de espaciamiento a la distancia que debe dejarse entre el centro de un medio de unión vecino a un borde y este.

Los bordes pueden tomar la siguiente designación:

- a) Borde cargado: Cuando la carga inducida por el elemento de unión actúa hacia dicho borde.

- b) Borde descargado: Cuando la carga inducida por el medio de unión actúa alejándose de tal borde.

Con estos antecedentes se pueden definir los siguientes tipos de espaciamientos:

- I. Espaciamiento mínimo entre elementos de unión medido en la dirección paralela a las fibras de la pieza: S_P

- II. Espaciamiento mínimo entre elementos de unión medidos en la dirección normal a las fibras de la pieza: S_n

- III. Espaciamiento mínimo entre un elemento de unión y un borde cargado, medido en dirección paralela a las fibras de la pieza S_{bcp}

- IV. Espaciamiento mínimo entre un elemento de unión y un borde cargado, medido en dirección normal a las fibras de la pieza S_{bcn}

- V. Espaciamiento mínimo entre un elemento de unión y un borde descargado, medido en dirección paralela a las fibras de la pieza S_{bdp}

- VI. Espaciamiento mínimo entre un elemento de unión y un borde descargado, medido en dirección normal a las fibras de la pieza S_{bdn}

En la siguiente figura se muestran las definiciones antes mencionadas.

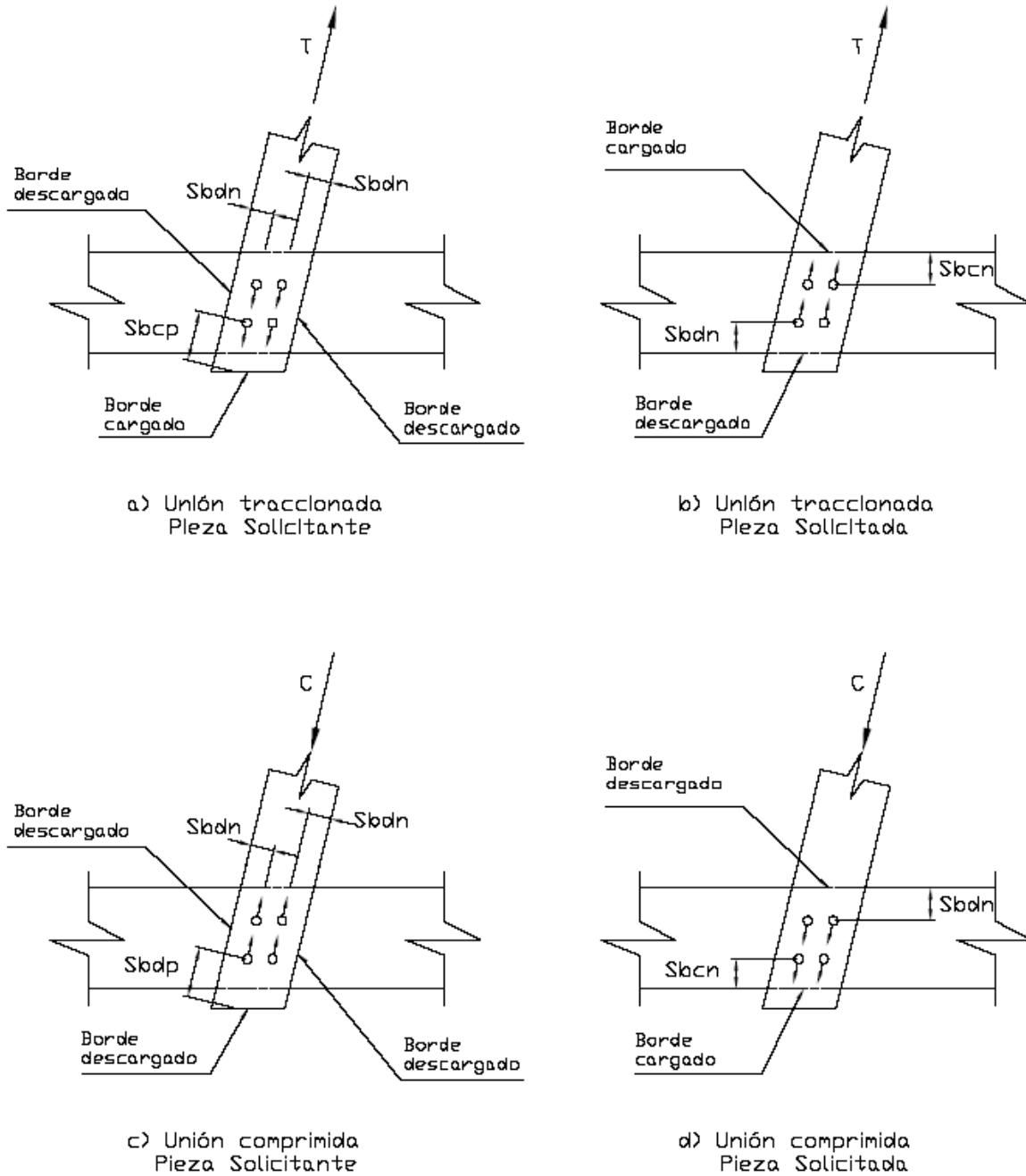


Figura 2- 6: Designaciones para los espaciamientos y bordes

2.5.5. Excentricidad

Las uniones deben conformarse, en lo posible, de modo que los ejes de las barras sean concéntricos, también los elementos de unión se deben disponer simétricamente con respecto al eje de la pieza.

2.5.6. Acción en grupo de los elementos de unión

Una hilera de elementos de unión consiste en dos o más elementos del mismo tipo y tamaño, alineados en la misma dirección de la carga, solicitándose en cizalle simple y/o múltiple.

Investigaciones recientes han indicado que una carga transferida por una hilera de elementos de unión, no queda repartida en forma equitativa entre todos los medios de unión. Los conectores extremos de una hilera tienden a recargarse con una mayor proporción de la sollicitación que aquellos intermedios. La distribución de la carga solicitante queda determinada por la rigidez relativa entre la pieza central y las piezas laterales.



Figura 2- 7: Hilera de conectores

2.5.7. Factores de modificación

Las cargas admisibles de una unión, dependen de la carga admisible de cada elemento de conexión individual que une las piezas de madera, ubicado con los espaciamientos que le permiten desarrollar su resistencia total, solicitado por una carga de duración normal y usado con las condiciones de contenido de humedad previamente establecidas.

Según la NCH 1198 Of. 2006, las capacidades de carga admisible se deben multiplicar por todos los factores de modificación que resulten aplicables en la determinación de las capacidades de carga de diseño de extracción lateral y extracción directa para cada tipo de medio de unión. La carga efectiva que solicita una unión no podrá exceder la capacidad de carga de diseño de la unión.

Los factores de modificación aplicables según la NCH 1198 Of. 2006 son:

- a) Por duración de la carga
- b) Por contenido de humedad
- c) Por temperatura
- d) Por longitud de hilera

a) Por duración de la carga K_D : Este factor de modificación se debe utilizar solamente para cargas con una duración normal de 10 años. Estos son

aplicables a cargas admisibles de elementos de unión solicitados en dirección paralela y normal a la fibra. Cuando se consideren cargas con distinta duración, estos valores se deben multiplicar por la siguiente expresión:

$$K_D = \frac{1.747}{t^{0.0464}} + 0.295 \quad (2.10)$$

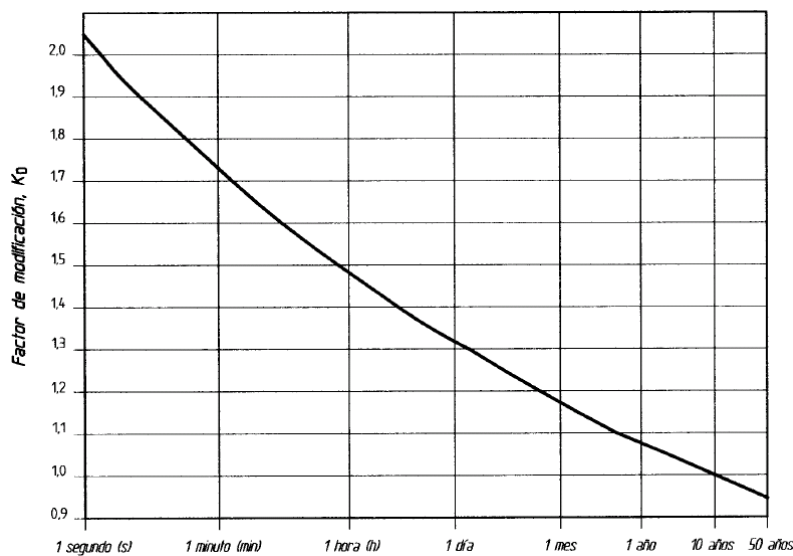


Figura 2- 8: factor de modificación por duración de la carga

- b) Por contenido de humedad K_{UH}: Este factor de modificación, es aplicable a madera con contenido de humedad no mayor al 19% y que en servicio se mantiene en esta condición, los valores admisibles reales de la unión deben multiplicarse por esos factores. Cuando las uniones son construidas con madera que se ha secado parcialmente o quedan expuestas a condiciones de

servicio húmedas, los valores admisibles se deben multiplicar por los factores de modificación señalados en la tabla E-4.

- c) Por temperatura K_T : La resistencia de los elementos de unión usados en madera son controlados por la resistencia al aplastamiento de ella. En aquellos casos en los cuales sea necesario afectar la resistencia de la madera por temperatura, también será necesario afectar las cargas admisibles de los medios de unión por el factor K_T , esto ocurriendo cuando las uniones queden expuestas, durante periodos prolongados a temperaturas de hasta 67°C. Los valores admisibles se deben multiplicar por los factores de modificación indicados en la tabla E-5.
- d) Por longitud de hilera K_U : La normativa Chilena NCH 1198 Of. 2006, nombra al factor de grupo, como Factor de modificación por longitud de hilera, el cual se denotará de aquí en adelante como K_U . Las capacidades admisibles de carga de extracción lateral para pernos, tirafondos y conectores con diámetro $D \leq 25$ mm, dispuestos consecutivamente decrecen cuando ellos se ubican en hileras largas. El factor de grupo o de modificación por longitud de hilera, K_U disminuye tales cargas admisibles; este se calcula según la expresión (2.3).

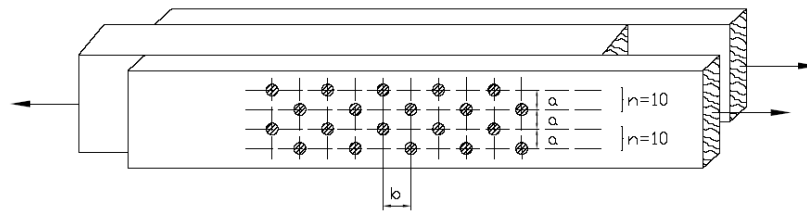
$$F_G = K_U = \left[\frac{m(1 - m^{2n})}{n \cdot [(1 + R_{EA} \cdot m^n) \cdot (1 + m) - 1 + m^{2n}]} \right] \cdot \left[\frac{1 + R_{EA}}{1 - m} \right] \quad (2.3)$$

Para poder utilizar este factor de modificación por longitud de hilera, se debe cumplir con las siguientes definiciones de hilera:

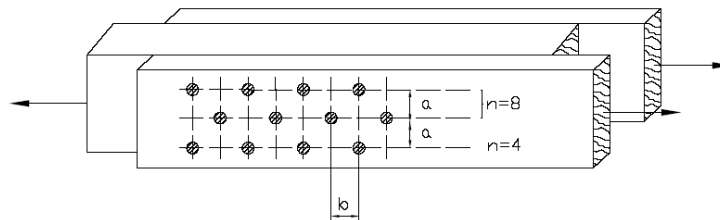
- Dos o más conectores de anillo o placa de corte alineados según la dirección de la sollicitación.
- Dos o más pernos, pasadores o tirafondos de igual diámetro, sollicitados en cizalle simple o múltiple, alineados según la dirección de la sollicitación.

Cuando los elementos de unión ubicados en hileras adyacentes se disponen en forma alternada y la distancia entre hileras adyacentes es menor que $\frac{1}{4}$ de la separación mínima entre dos elementos de unión vecinos de dos hileras adyacentes, medida en la dirección de las hileras, para efectos de la determinación del factor de modificación por longitud de hilera, las hileras adyacentes se consideran como una sola.

Para uniones con número par de hileras, este principio se aplicará sobre cada par. Para un número impar de hileras, debe aplicarse el criterio anterior a cada par de hileras, considerándose la restante como una hilera complementaria, (Figura 2-9).



Si $a < \frac{b}{4}$, Considerar dos hileras con 10 elementos de unión.

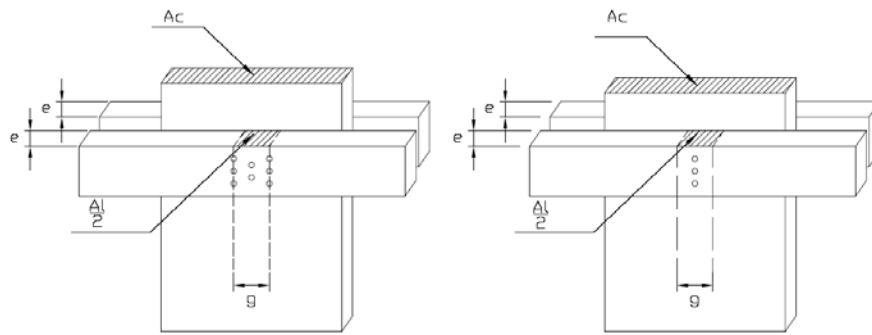


Si $a < \frac{b}{4}$, Considerar una hilera de ocho elementos de unión y una hilera de cuatro elementos de unión.

Figura 2- 9: Elementos de unión dispuestos en forma alternada. Número par e impar de hileras

En el caso particular de una pieza cargada en dirección perpendicular de la fibra, la determinación de K_u , las secciones A_m y A_s , se deben considerar como secciones transversales brutas, sin aplicar reducciones por concepto de debilitamiento inherente a las perforaciones. Cuando la pieza queda solicitada según la dirección perpendicular a la fibra, el área equivalente a su sección transversal se obtiene como el producto del espesor de la pieza por el ancho definido por las hileras extremas de la unión.

Cuando los medios de unión se disponen en una hilera, el ancho se considera como el espaciamiento mínimo entre los medios de unión, S_p , medido según la dirección de la fibra.



e: Espesor de la pieza
g: Ancho de la unión
Sp: Espaciamiento mínimo según la dirección de la fibra
Ac, Al: Áreas transversales

Figura 2- 10: Áreas de sección transversal A_l y A_m

La carga admisible de una hilera en elementos de unión del mismo tamaño y tipo, no debe ser mayor que el valor P_{hilera} , determinado por las expresiones (2.1) y (2.2).

$$P_{hilera} = P_{el} \cdot n_{hilera} \cdot K_U \quad (2.1)$$

$$P_{ad, unión} = \sum_1^n P_{hilera} \quad (2.2)$$

Se puede decir entonces que “*La capacidad de carga admisible en una unión es la suma de las cargas admisibles asignadas a cada hilera que constituye la unión*”.

2.6. Cargas de diseño

Los valores de las cargas de diseño se calculan mediante el producto de la carga admisible para los diferentes elementos de unión, por los factores de modificación y un factor de ajuste de 2.5, el cual extrapola la carga de un ensayo normalizado de un periodo de tiempo de 5 a 10 minutos a la duración normal de 10 años.

$$P_{dis} = 2.5 \cdot P_{ad,union} \cdot K_D \cdot K_{UH} \cdot K_T \quad (2.11)$$

2.7. Cargas admisibles por extracción lateral

Según la NCH 1198 Of. 2006, la capacidad admisible de carga de un medio de unión de tipo cilíndrico en una unión de cizalle simple o doble, según los esquemas de fluencia, corresponde al menor valor $P_{el,ad}$, resultante de las expresiones de los modos de fluencia que se indican en la figura 2-12.

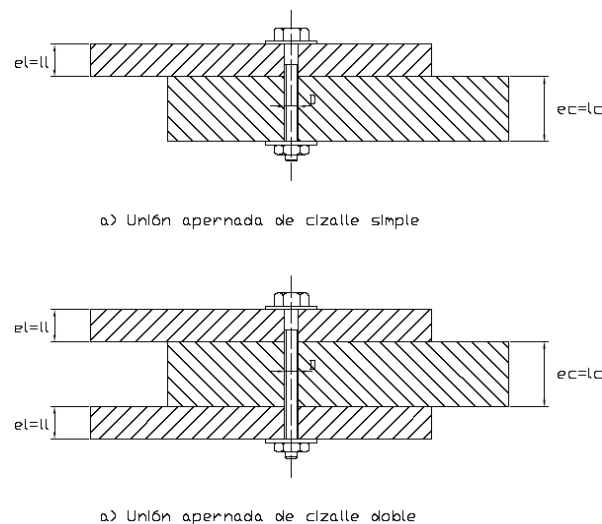


Figura 2- 11: Unión apernada

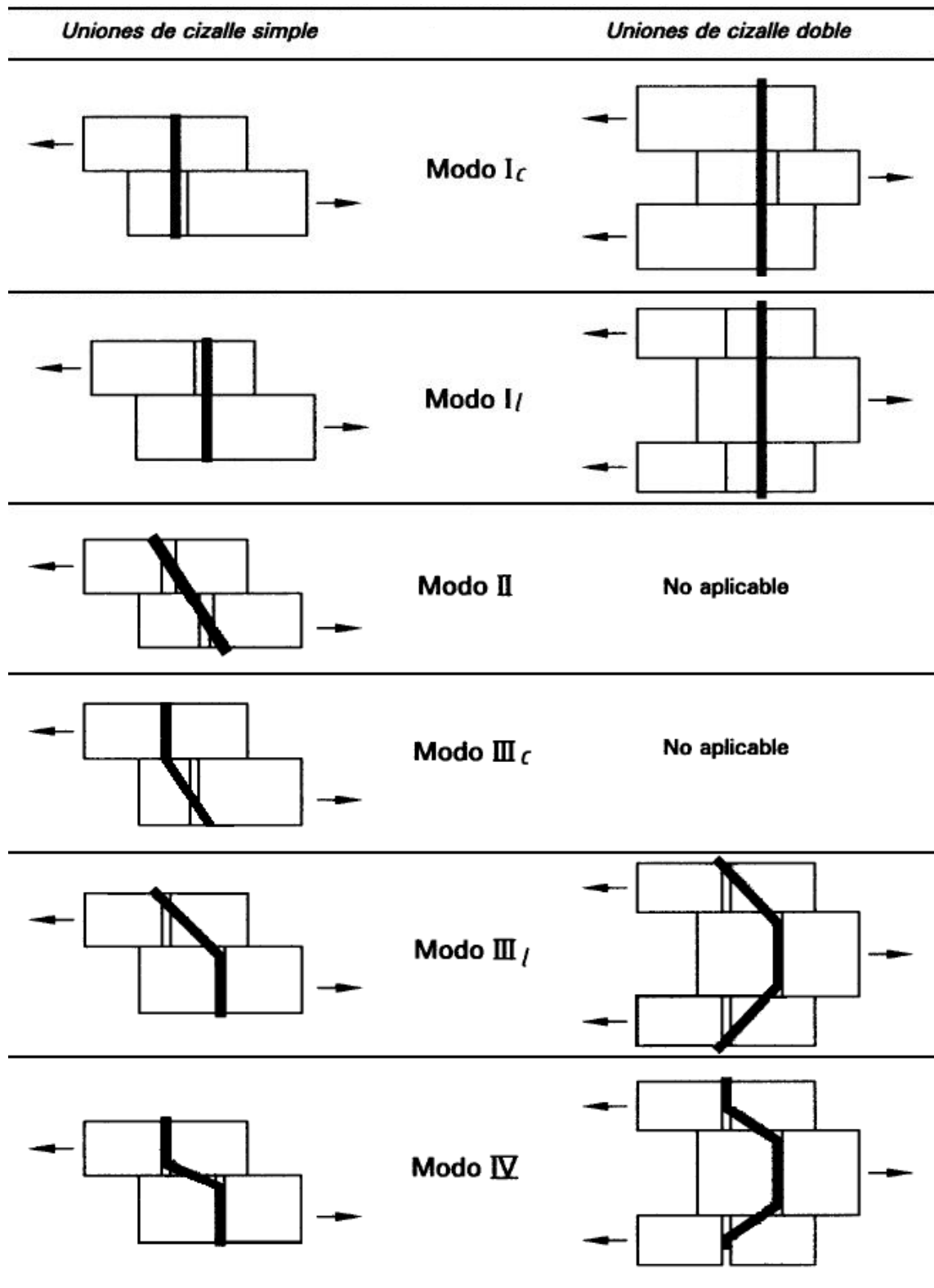


Figura 2- 12: Modos de fluencia en uniones de madera con elementos de fijación mecánicos.

Estudio del Comportamiento Estructural de Uniones a Escala Real de Madera Pino Radiata con Pernos de Acero, Caso Especifico de Uniones de Cizalle Doble Sometidas a Compresión Axial

Tabla 2- 1: Modelo de fluencia para medios de unión solicitados en extracción lateral

Uniones de cizalle simple		Uniones de cizalle doble	
Modo I _c	$P_{el} = \frac{D \cdot l_c \cdot R_{ap,c}}{FA}$	Modo I _c	$P_{el} = \frac{D \cdot l_c \cdot R_{ap,c}}{FA}$
Modo I _l	$P_{el} = \frac{D \cdot l_l \cdot R_{ap,l}}{FA}$	Modo I _l	$P_{el} = \frac{2 \cdot D \cdot l_l \cdot R_{ap,l}}{2 \cdot K_\alpha}$
Modo II	$P_{el} = \frac{k_1 \cdot D \cdot l_l \cdot R_{ap,l}}{FA}$		--
Modo III _c	$P_{el} = \frac{k_2 \cdot D \cdot l_c \cdot R_{ap,c}}{(1 + 2 \cdot R_e) \cdot FA}$		--
Modo III _l	$P_{el} = \frac{k_3 \cdot D \cdot l_l \cdot R_{ap,c}}{(2 + R_e) \cdot FA}$	Modo III _l	$P_{el} = \frac{2 \cdot k_3 \cdot D \cdot l_l \cdot R_{ap,c}}{(2 + R_e) \cdot FA}$
Modo IV	$P_{el} = \frac{D^2}{FA} \sqrt{\frac{2 \cdot R_{ap,c} \cdot F_{ff}}{3 \cdot (1 + R_e)}}$	Modo IV	$P_{el} = \frac{2 \cdot D^2}{FA} \sqrt{\frac{2 \cdot R_{ap,c} \cdot F_{ff}}{3 \cdot (1 + R_e)}}$

Donde:

$$k_1 = \frac{\sqrt{R_e + 2R_e^2 \cdot (1 + R_t + R_t^2) + R_t^2 \cdot R_e^3} - R_e \cdot (1 + R_t)}{1 + R_e}$$

$$k_2 = -1 + \sqrt{2 \cdot (1 + R_e) + \frac{2 \cdot F_{ff} \cdot (1 + 2 \cdot R_e) \cdot D^2}{3 \cdot R_{ap,c} \cdot l_c^2}}$$

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2 \cdot (1 + R_e)}{R_e} + \frac{2 \cdot F_{ff} \cdot (1 + 2 \cdot R_e) \cdot D^2}{3 \cdot R_{ap,c} \cdot l_l^2}}$$

$$R_e = \frac{R_{ap,c}}{R_{ap,l}} \quad R_t = \frac{l_c}{l_l}$$

- Capacidad modo I: La madera se aplasta en el miembro principal o laterales, la rigidez del sujetador es mayor que el de la madera.
- Capacidad modo II: Aplastamiento localizado solo en la superficie de los miembros de madera, provocando un giro del sujetador rígido, en el plano de corte.
- Capacidad modo III: El sujetador se flexiona y comienza a funcionar en rango plástico, en un punto donde el plano de corte esta asociado al aplastamiento de la madera.
- Capacidad modo IV: El sujetador se flexiona y se producen dos puntos de funcionamiento plástico, en los planos de corte asociados al aplastamiento de la madera.

Según la NCH 1198, para la aplicación de estas expresiones, se deben cumplir las siguientes condiciones.

- a) Las caras de las piezas unidas se encuentren en estrecho contacto
- b) Las cargas actúen perpendicularmente al eje del cilindro

- c) Se respeten los espaciamientos mínimos entre medios de unión y los bordes.
- d) La profundidad de penetración del medio de unión en la pieza principal de uniones de cizalle simple o en una pieza lateral que fija la punta del medio de unión de cizalle doble es mayor o igual que la penetración mínima requerida.

2.7.1 Resistencia al aplastamiento

La resistencia al aplastamiento nominal para pasadores, pernos y tirafondos de diámetro mayor o igual que 6.4 mm, R_{ap} , se determina mediante la siguiente expresión:

$$R_{ap,p} = 77,2 \cdot (\rho_o / 1000) \quad [\text{Mpa}] \text{ para solicitaciones paralelas a la fibra, (2.12)}$$

$$R_{ap,p} = \frac{212 \cdot (\rho_o / 1000)^{1,45}}{\sqrt{D}} \quad [\text{Mpa}] \text{ para solicitaciones normales a la fibra, (2.13)}$$

Cuando una pieza de unión se solicita según un ángulo con respecto a la dirección de la fibra, la resistencia de aplastamiento, $R_{ap,\theta}$, para la pieza se determinara aplicando la formula de Hankinson:

$$R_{ap,\theta} = \frac{R_{ap,p} \cdot R_{ap,n}}{R_{ap,p} \cdot \text{sen}^2 \theta + R_{ap,n} \cdot \text{cos}^2 \theta} \quad (2.14)$$

La longitud de apoyo de los medios de unión de la o las piezas secundarias y la pieza principal, l_l y l_c (ver figura 2-12) representan la longitud del medio de unión que se apoya perpendicularmente a la dirección de la fuerza. Cuando la penetración resulte menor a $10 D$, esta longitud de apoyo no incluye el extremo correspondiente a la punta.

2.7.2 Tensión de fluencia de los medios de unión

Las tensiones de fluencia para los medios de unión, F_{ff} , en Mpa se determinaran sobre la base de la tensión de fluencia derivada usando los métodos definidos en ASTM F 1575 o ASTM F 606. De una forma conservadora, también se pueden considerar los valores de 480 Mpa para medios de unión de diámetro $D=6.4$ mm, 410 Mpa, para diámetro $D=8$ mm y 310 Mpa para diámetros $D=9,5$ mm.

El valor de D que se debe considerar en el cálculo de las cargas de los modelos de fluencia corresponde al diámetro del vástago liso en el cado de pernos y pasadores.

CAPÍTULO III

INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y

ETAPA EXPERIMENTAL

3. INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y ETAPA EXPERIMENTAL

3.1 Principios básicos del diseño de experimentos

3.1.1 Introducción

Para cualquier fenómeno en el que existe algún grado de incertidumbre, el procedimiento apropiado para investigarlo es experimentar con él, de manera que puedan identificarse las características de interés. El diseño de experimentos se basa en modelos estadísticos cuyo objetivo es averiguar si determinados factores influyen en la variable de interés, y si existe influencia de algún factor, cuantificarla.

El elemento más importante de un experimento es la formulación del problema a resolver, una vez que este se define, es necesario identificar la variable por medir o respuesta que se va a estudiar y el factor o factores potenciales que pueden influenciar la variabilidad de la respuesta. La respuesta también se conoce como variable dependiente; el factor recibe el nombre de variable independiente, estando este último bajo el control del investigador.

Un nivel o tratamiento del factor es un valor o condición de éste, bajo el cual se observará la respuesta medible. Si un experimento consiste en varios factores, un tratamiento es una combinación de los niveles de cada factor.

Una unidad experimental se define como el objeto que es capaz de producir una medición de la variable de respuesta después de aplicar un tratamiento dado.

La metodología del diseño de experimentos estudia como variar las condiciones habituales de realización de un proceso empírico para aumentar la probabilidad de detectar cambios significativos en la respuesta, de esta forma se obtiene un mayor conocimiento del comportamiento del proceso de interés.

Un experimento se realiza por alguno de los siguientes motivos:

- Determinar las principales causas de la variación en la respuesta.
- Encontrar las condiciones experimentales con las que se consigue un valor extremo en la variable de interés o de respuesta.
- Comparar las respuestas en diferentes niveles de observación de variables controladas.
- Obtener un modelo estadístico-matemático que permita hacer predicciones de respuestas futuras.

3.1.2 Tipos de variabilidad

Uno de los principales objetivos de los modelos estadísticos, en particular, de los modelos de diseño de experimentos, es controlar la variabilidad de un proceso aleatorio que puede tener diferente origen. De hecho, los resultados de cualquier experimento están sometidos a tres tipos de variabilidad cuyas características son las siguientes:

- a) Variabilidad sistemática y planificada: Esta variabilidad viene originada por la posible dispersión de los resultados debida a diferencias sistemáticas entre las distintas condiciones experimentales impuestas en el diseño por expreso deseo del experimentador, (este es el tipo de variabilidad que se intenta lograr con el diseño estadístico). Cuando este tipo de variabilidad esta presente y tiene un tamaño importante, se espera que las respuestas tiendan a agruparse. Es deseable que exista esta variabilidad y que sea identificada y cuantificada por el modelo.

- b) Variabilidad típica de la naturaleza del problema y del experimento: Esta es la variabilidad no planificada denominada error de medida. Es una variabilidad impredecible e inevitable. Es la causante de que si en un laboratorio se toman medidas repetidas de un mismo objeto ocurra que, en muchos casos, la segunda medida no sea igual a la primera, y más aún no se puede predecir sin

error el valor de la tercera. Sin embargo, bajo el aparente caos, existe un patrón regular de comportamiento en esas medidas, todas ellas tenderán a fluctuar en torno a un valor central y siguiendo un modelo de probabilidad que será importante estimar. Esta variabilidad es inevitable pero, si el experimento ha sido bien planificado, es posible estimar su valor, lo que es de gran importancia para obtener conclusiones y poder hacer predicciones. Esta siempre estará presente, pero es tolerable.

- c) Variabilidad sistemática y no planificada: Esta variabilidad produce una variación sistemática en los resultados y es debida a causas desconocidas y no planificadas. En otras palabras, los resultados están siendo sesgados sistemáticamente por causas desconocidas. La presencia de esta variabilidad supone la principal causa de conclusiones erróneas y estudios incorrectos al ajustar un modelo estadístico.

3.1.3 Planificación de un experimento

La experimentación forma parte natural de la mayoría de las investigaciones científicas e industriales, en muchas de las cuales, los resultados del proceso de interés se ven afectados por la presencia de distintos factores, cuya influencia puede estar oculta por la variabilidad de los resultados muestrales. Es fundamental conocer los factores que influyen realmente y estimar esta influencia, para conseguir esto es necesario experimentar, variar las condiciones que afectan

a las unidades experimentales y observar la variable respuesta; del análisis y estudio de la información recogida se obtienen las conclusiones. Las metodologías de diseño de experimentos, se basan en estudiar simultáneamente los efectos de todos los factores de interés, estudia que factores son mas relevantes y proporcionan mejores resultados con un menor costo.

A continuación se enumeran las etapas que deben seguirse para una correcta planificación de un diseño experimental, etapas que deben ser ejecutadas de forma secuencial, también se introducen algunos conceptos básicos en el estudio de los modelos de diseño de experimentos.

Las etapas a seguir en el desarrollo de un problema de diseño de experimentos son las siguientes:

- a) Definir los objetivos del experimento.
- b) Identificar todas las posibles fuentes de variación, incluyendo:
 - Factores tratamiento y sus niveles
 - Unidades experimentales
 - Factores molestos: factores bloque, factores ruido y covariables.
- c) Elegir una regla de asignación de las unidades experimentales a las condiciones de estudio (tratamientos).
- d) Especificar las medidas con que se trabajará (la respuesta), el procedimiento experimental y anticiparse a las posibles dificultades.
- e) Ejecutar un experimento piloto.

- f) Especificar el modelo.
- g) Esquematizar los pasos del análisis.
- h) Determinar el tamaño muestral.
- i) Revisar las decisiones anteriores. Modificarlas si se considera necesario.

Los pasos del listado anterior no son independientes y en un determinado momento puede ser necesario volver atrás y modificar decisiones tomadas en algún paso previo.

A continuación se hace una breve descripción de las decisiones que se deben considerar en cada uno de los pasos enumerados. Sólo después de haber tomado estas decisiones se procederá a realizar el experimento.

a) Definir los objetivos del experimento.

Se debe hacer una lista completa de las preguntas concretas a las que debe dar respuesta el experimento. Es importante indicar solamente cuestiones fundamentales ya que tratar de abordar problemas colaterales puede complicar innecesariamente el experimento.

Una vez elaborada la lista de objetivos, puede ser útil esquematizar el tipo de conclusiones que se espera obtener en el posterior análisis de datos.

Normalmente la lista de objetivos es refinada a medida que se van ejecutando las etapas del diseño de experimentos.

b) *Identificar todas las posibles fuentes de variación.*

Una fuente de variación es cualquier “cosa” que pueda generar variabilidad en la respuesta. Es recomendable hacer una lista de todas las posibles fuentes de variación del problema, distinguiendo aquellas que, a priori, generarán una mayor variabilidad. Se distinguen dos tipos:

Factores tratamiento: Son aquellas fuentes cuyo efecto sobre la respuesta es de particular interés para el experimentador.

Se denomina factor tratamiento a cualquier variable de interés para el experimentador cuyo posible efecto sobre la respuesta se quiere estudiar. Los niveles de un factor tratamiento son los tipos o grados específicos del factor que se tendrán en cuenta en la realización del experimento.

Por ello si en un experimento se trabaja con más de un factor, se denomina tratamiento a cada una de las combinaciones de niveles de los distintos factores.

Finalmente un experimento factorial es el diseño de experimentos en el que existen observaciones de todos los posibles tratamientos.

Unidades experimentales: Son el material donde evaluar la variable de respuesta y al que se le aplican los distintos niveles de factores de tratamiento. Es muy importante que las unidades experimentales sean representativas de la población sobre las que se han fijado los objetivos del estudio.

Factores Nuisance: Son aquellas fuentes que no son de interés directo pero que se contemplan en el diseño para reducir la variabilidad no planificada. Con el fin de controlar esta influencia pueden incluirse en el diseño nuevos factores que, atendiendo a su naturaleza pueden ser de diversos tipos.

Si el experimentador esta interesado en la variabilidad de la respuesta cuando se modifican las condiciones experimentales, entonces los factores molestos o nuisance, son incluidos deliberadamente en el experimento y no se aísla su efecto por medio de bloques, se habla entonces de factores de ruido.

En resumen las posibles fuentes de variación de un experimento son:

Tabla 3- 1: Variabilidad experimental

Fuente	Tipo
Debida a las condiciones de interés (Factores de tratamiento)	Planificada y sistemática
Debida al resto de condiciones controladas (Factores Nuisance)	Planificada y sistemática
Debida a condiciones no controladas (Error de medida, material experimental, etc.)	No planificada y sistemática

c) Elegir una regla de asignación de las unidades experimentales a las condiciones de estudio (Tratamientos)

La regla de asignación o diseño experimental específica que las unidades experimentales se observarán bajo cada tratamiento, existen diferentes posibilidades

- Diseño factorial
- Anidamiento
- Asignación al azar en determinados niveles de observación
- El orden de asignación, etc.

En la práctica, existen una serie de diseños estándar que se utilizan en la mayoría de los casos.

d) Especificar las medidas que se realizarán (variable de respuesta), el procedimiento experimental y anticipación a posibles dificultades.

Los datos que se recogen de un experimento son medidas de una variable denominada variable de respuesta o interés. Es importante precisar de antemano cual es la variable de respuesta y en que unidades se mide. Naturalmente la respuesta esta condicionada por los objetivos del experimento.

A menudo aparecen dificultades imprevistas en la toma de datos, por ello es conveniente anticiparse a estos imprevistos pensando detenidamente en los

problemas que se pueden presentar o ejecutar un pequeño experimento piloto. Enumerar estos problemas permite en ocasiones descubrir nuevas fuentes de variación o simplificar el procedimiento experimental antes de comenzar.

También se debe especificar con claridad la forma en que se realizarán las mediciones: instrumentos de medida, tiempo en el que se harán las mediciones, etc.

e) Ejecución de un experimento piloto

Un experimento piloto, es un experimento que utiliza un número pequeño de observaciones. El objetivo de su ejecución es ayudar a completar y chequear la lista de acciones a realizar. Las ventajas que proporciona la realización de un pequeño experimento piloto son las siguientes:

- Permite practicar la técnica experimental elegida, e identificar problemas no esperados en el proceso de recolección de datos.
- Si el experimento piloto tiene un tamaño suficientemente grande, puede ayudar a seleccionar un modelo adecuado al experimento principal.
- Los errores experimentales observados en el experimento piloto pueden ayudar a calcular el número de observaciones que se precisan en el experimento principal.

f) *Especificar el modelo matemático*

El modelo matemático debe indicar la relación que se supone que existe entre la variable de respuesta y las principales fuentes de variación identificadas en el punto b). Es fundamental que el modelo elegido se ajuste a la realidad con la mayor precisión posible.

El modelo más habitual es el modelo lineal.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (\text{Ecc. 3-1})$$

En este modelo la respuesta viene dada por la combinación lineal de términos que representan las principales fuentes de variación planificada más un término residual debido a las fuentes de variación no planificada. El experimento piloto puede ayudar a comprobar si el modelo se ajusta razonablemente bien a la realidad.

g) *Esquematizar los pasos del análisis estadístico*

El análisis estadístico a realizar depende de:

- Los objetivos indicados en a)
- Diseño seleccionado en c)
- Modelo asociado en e)

Se deben esquematizar los pasos del análisis a realizar que deben incluir:

- Estimaciones de cálculo
- Contrastes a realizar
- Niveles de confianza

h) Determinación tamaño muestral

Este procedimiento consiste en calcular el número de observaciones que se deben tomar para alcanzar los objetivos del experimento.

i) Revisar las decisiones anteriores y modificar en caso que sea necesario.

De todas las etapas antes enumeradas, el proceso de recogida de datos suele ser la tarea que mayor tiempo consume, pero es importante realizar una planificación previa, detallando los pasos anteriores, lo que garantizará que los datos sean utilizados en la forma más eficiente posible.

3.2 Planificación experimental

La planificación experimental se basó en la metodología antes descrita, ya que es de fácil comprensión y ejecución.

3.2.1 Generalidades

El experimento que se realizó, es un ensayo de una unión apernada de cizalle doble.

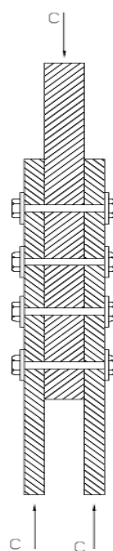


Figura 3-1: Unión de cizalle doble

Esta unión fue sometida a una carga de compresión, la cual se aplicó en su totalidad en el miembro central y la mitad de esta en cada uno de los miembros laterales. Por la maquinaria con la que se dispuso, la carga aplicada llegó a un máximo de 33 toneladas.

3.2.2 Objetivos del experimento

Los objetivos principales de este experimento son:

- Determinar la carga máxima resistida por las probetas
- Determinar los mecanismos de falla.
- Determinar curvas de carga deformación.

3.2.3 Determinación de las fuentes de variación

La realización de los ensayos experimentales, como el cumplimiento de los objetivos depende de la correcta fabricación de las probetas y la posterior ejecución del experimento, pero independientemente de estos factores también el experimento dependerá de las variables a considerar en el análisis y de las condiciones en que se encuentran los materiales de fabricación.

Factores tratamiento

Como se mencionó anteriormente, los factores tratamiento son aquellas fuentes cuyo efecto sobre la respuesta es de particular interés, por ello, para el caso específico del experimento de uniones de cizalle los factores de tratamiento son:

- Número de pernos por hilera
- Diámetro del perno a utilizar.

Material experimental

Son el material donde se evaluó la variable de respuesta y al que se le aplican los distintos niveles de factores tratamiento.

a) *Madera*

La madera con la que se fabricaron las probetas se clasificó como estructural tipo G1. Se contó con 40 vigas estructurales de 2.5 m de longitud, con una sección transversal de 195 x 30 mm, y 9 vigas de 200 x 50 mm, con una longitud de 3 m.



Figura 3-2: Piezas de madera estructural, tipo G1

b) *Pernos*

Los pernos que se utilizaron fueron de dos tipos. Para pernos de $\frac{1}{2}$ " de diámetro, se utilizó acero A325 y para pernos de $\frac{5}{8}$ " se utilizará acero corriente. Según la normativa NCH 1198 Of. 2006, el estado de fluencia teórico a utilizar es para pernos SAE J 429, cual tiene un valor de 310 Mpa, la cual es común en la mayoría de los pernos comercializados en el mercado, pero para el cálculo teórico se

utilizaron las calidades reales de los pernos antes mencionados, las cuales se muestran en el anexo D.



Figura 3-3: Pernos Acero A325

Finalmente, se construyeron 8 probetas con un solo perno y 24 en donde las piezas de madera se unieron por dos hileras de elementos, las que se constituyeron por 3, 4 y 5 pernos por hilera, esto se hizo con el objetivo de observar la variabilidad de los resultados en la respuesta de la unión con diferentes diámetros y número de pernos, para finalmente, ver cual es su mejor comportamiento.

Factores Nuisance

Son aquellas variables que no son de interés directo, pero que se contemplan en el diseño para reducir la variabilidad no planificada, en este caso se utilizaron factores Nuisance covariables, estas pueden ser medidas antes del experimento.

La resistencia máxima entregada por una unión depende exclusivamente de la resistencia al aplastamiento paralela a la fibra de la madera, la cual depende de la densidad anhidra. y la resistencia del medio de unión.

La densidad anhidra depende del grado de humedad a la cual esta sometida en la fabricación y su condición de servicio. En este caso, como el experimento se realizó en condiciones de estado seco, fue necesario verificar variables como el contenido de humedad, densidad y módulo de elasticidad de la madera y en el caso de los pernos su estado límite de fluencia, el cual se obtuvo a partir de ensayos de tracción, estos resultados se muestran en el anexo D.

3.2.4 Tratamientos

El tipo de experimento adecuado para este análisis fue un experimento factorial, ya que se pudieron estudiar simultáneamente dos o más factores y donde los tratamientos se formaron por la combinación de los diferentes niveles de cada uno de los factores.

Factor: Es un conjunto de tratamientos de una misma clase o característica.

Niveles de un factor: Son los diferentes tratamientos que pertenecen a un determinado factor

Factorial: Es una combinación de factores y sus niveles.

Los factores que se utilizarán en este experimento son:

- Diámetro del perno, (perno de 1/2" y 5/8")
- Número de pernos por hilera, (1, 3, 4 y 5)

A continuación se muestra un diagrama, el cual explica este proceso.

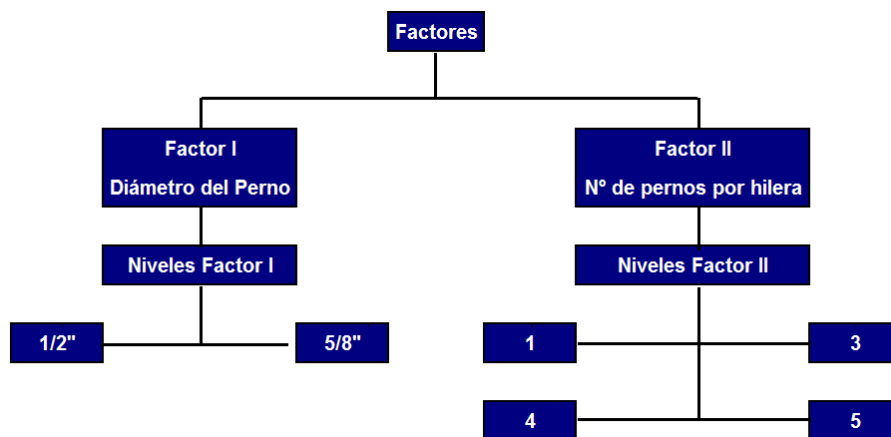


Figura 3-4: Organigrama; factores a utilizar en el experimento

Una vez definidos los factores y sus niveles se procedió a la combinación de estos, para dar origen a 8 tratamientos.

Tabla 3-2: Diseño de Tratamientos

Diámetro del perno	Número de pernos por hilera			
	1	3	4	5
1/2"	4	4	4	4
5/8"	4	4	4	4

Con los recursos que se contaba y considerando la totalidad de factoriales, se confeccionaron un total de 32 probetas, considerando un mínimo de 4 especímenes por tratamiento.

El nivel de confianza del estudio solo se conocerá una vez realizados ensayos experimentales y el posterior análisis de la variabilidad de las respuestas.

3.2.5 Variable de respuesta

Como se comentó anteriormente, las probetas se sometieron a una carga de compresión, aplicada hasta que se alcanzó la carga máxima resistida por la unión. Los ensayos experimentales entregaron dos respuestas, las cuales son, la capacidad de la unión, (la cual fue registrada en Kilonewton) y la deformación de esta, (la cual se registró en milímetros). Se tomaron mediciones intermedias, antes de la tensión de aplastamiento, para así poder construir la gráfica carga deformación real de la unión, las cuales ayudaron al análisis de resultados.

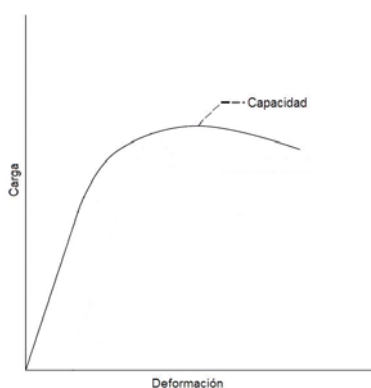


Figura 3-5: Gráfica Carga-Deformación

Los instrumentos y maquinarias que han de utilizarse serán:

Marco de carga

El marco de carga es la estructura en la cual se ensayaron las probetas de uniones, estos fueron de 4 tipos, el 1ro. y el 2do. estaban constituidos por una serie de perfiles circulares, los cuales están empotrados directamente al suelo, y

perfiles H, los que dan el sostén a un cilindro hidráulico el cuál genera la carga de compresión sobre la probeta.

El segundo tipo de marco de carga es mucho más robusto, también constituido por una serie de perfiles H y algunos atezadores, se utilizo en las probetas tamaño medio, su capacidad máxima es de 30 toneladas.

El 3er tipo similar al 2do tiene una capacidad máxima de 100 toneladas, el cual se utilizó para las probetas de mayor tamaño.



Figura 3- 6: Marcos de carga

Bomba hidráulica manual

La bomba hidráulica, es aquel mecanismo que transforma la energía mecánica con la que es accionada en energía hidráulica, a través de un fluido incompresible. En el caso específico, entrega aceite al cilindro hidráulico, bajo una cierta presión.



Figura 3- 7: Bomba Hidráulica Manual

Cilindro Hidráulico

El cilindro hidráulico es un actuador mecánico el cual obtiene su energía de un fluido hidráulico presurizado. Este generó la carga de compresión directamente sobre la probeta, la cual se genera a partir del aceite hidráulico que es transferido desde la bomba al cilindro, la capacidad de este es hasta 50 toneladas.



Figura 3- 8: Cilindro Hidráulico

Deformómetro

Instrumento con el cual se midió directamente la deformación sufrida por la madera, en centésimas de milímetro. Este se ubicará en el miembro central de la probeta.



Figura 3- 9: Deformómetro

Data Logger

Dispositivo electrónico de registro de datos, constituido por una consola computarizada y una celda de carga, la cual registra datos de fuerza a los cuales esta siendo sometida la probeta.

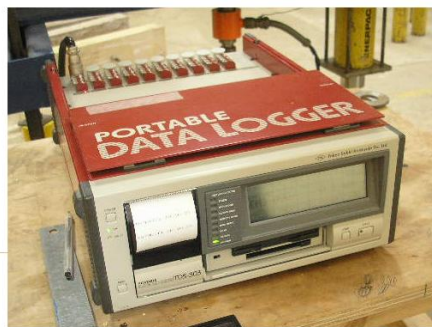


Figura 3- 10: Data Logger

3.2.6 Experimentos factoriales con dos factores

Para el caso específico de las uniones, se eligió un experimento factorial de dos factores, a dos y cuatro niveles, por lo cual, se necesitó un modelo lineal para el análisis de la variable de salida de los experimentos.

Este tipo de experimento factorial es uno de los más sencillos, este consta de factores A y B, con n réplicas y cada una contiene ab combinaciones de tratamientos. La observación en la ij-ésima celda para la k-ésima réplica esta denotada por y_{ijk} . Al realizar el experimento, las observaciones abn deben obtenerse con un orden aleatorio, por lo tanto el experimento factorial de dos factores es un diseño completamente aleatorizado.

Las observaciones pueden describirse con el modelo estadístico lineal

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (\text{Ecc 3.1})$$

En el caso específico, μ es el efecto promedio global, τ_i es el efecto del i-ésimo nivel del factor A, β_j es el efecto del j-ésimo nivel del factor B, $(\tau\beta)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre A y B y ε_{ij} es un componente de error aleatorio que tiene una distribución normal con media cero y varianza σ^2 .

En este caso el interés recae en probar las hipótesis de que no hay efecto principal para el factor A, ni para el factor B, y ningún efecto de interacción AB. Para probar estas hipótesis se hará uso del análisis de varianza el cual se conoce con el nombre de varianza en dos sentidos.

Tabla 3-3: Arreglo de datos para un diseño factorial de dos factores

		Factor B				Totales	Promedios
		1	2	...	b		
Factor A	1	Y111, Y112, ..., Y11n	Y121, Y122, ..., Y12n	...	Y1b1, Y1b2, ..., Y1bn	Y1·	$\bar{Y}_{1·}$
	2	Y211, Y212, ..., Y21n	Y221, Y222, ..., Y22n	...	Y2b1, Y2b2, ..., Y2bn	Y2·	$\bar{Y}_{2·}$
	⋮						
	a	Ya11, Ya12, ..., Ya1n	Ya21, Ya22, ..., Ya2n	...	Yab1, Yab2, ..., Yabn	Ya·	$\bar{Y}_{a·}$
	Totales	Y·1	Y·2	...	Y·b	Y...	
	Promedios	$\bar{Y}_{·1}$	$\bar{Y}_{·2}$...	$\bar{Y}_{·b}$		$\bar{Y}_{··}$

3.2.6.1 Análisis estadístico del modelo de elementos fijos

Suponiendo que A y B son dos factores fijos, los a niveles del factor A y los b niveles del factor B son seleccionados de manera específica por el experimentador, y las inferencias están confinadas únicamente en estos niveles. En este modelo, es costumbre definir los efectos τ_i , β_j , $(\tau\beta)_{ij}$ como desviaciones a

partir de la media, de modo que: $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$ $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = 0$ $\sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$

El análisis de varianza puede emplearse para probar hipótesis sobre los efectos principales de los factores A y B, y la interacción AB. Para presentar los detalles del análisis de varianza se necesitan ciertos símbolos, algunos de los cuales aparecen en la tabla 3-3. Sean $y_{i..}$ el total de observaciones tomadas del i-ésimo nivel del factor A, $y_{.j.}$ el total de observaciones tomadas en el j-ésimo nivel del factor B, y $y_{...}$ el gran total de todas las observaciones. Se define como $\bar{y}_{i..}$, $\bar{y}_{.j.}$, $\bar{y}_{ij.}$ y $\bar{y}_{...}$ como los promedios por fila, columna, celda y total, respectivamente esto es:

$$\begin{aligned}
 y_{i..} &= \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{i..} &= \frac{y_{i..}}{bn} & i &= 1, 2, \dots, a \\
 y_{.j.} &= \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{.j.} &= \frac{y_{.j.}}{an} & j &= 1, 2, \dots, b \\
 y_{ij.} &= \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{ij.} &= \frac{y_{ij.}}{n} & i &= 1, 2, \dots, a \\
 & & & & j &= 1, 2, \dots, b \\
 y_{...} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{...} &= \frac{y_{...}}{abn}
 \end{aligned}$$

Las hipótesis por probar son las siguientes:

- a) $H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$, (Ningún efecto principal sobre el factor A)
 H_1 : al menos para un $\tau_1 \neq 0$.
- b) $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_a = 0$, (Ningún efecto principal sobre el factor B)
 H_1 : al menos para un $\beta_1 \neq 0$.
- c) $H_0: (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots = (\tau\beta)_{ab} = 0$, (No hay interacción)
 H_1 : al menos para un $(\tau\beta)_{ij} \neq 0$.

El análisis de varianza, prueba estas hipótesis mediante la descomposición de la variabilidad total presente en los datos en sus componentes, para después comparar los distintos elementos de esta descomposición. La variabilidad total se mide con la suma total de cuadrados de las observaciones.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2$$

Mientras que la suma de cuadrados de la descomposición esta definida como:

$$\begin{aligned} SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 &= bn \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + an \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 \\ &+ n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 \quad (\text{Ecc 3.2}) \\ &+ \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2 \end{aligned}$$

La identidad de suma de cuadrados puede escribirse en forma simbólica como:

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \quad (\text{Ecc 3.3})$$

Existen en total $abn - 1$ grados de libertad. Los efectos principales de A y B tienen $a - 1$ y $b - 1$ grados de libertad, mientras que el efecto interacción AB tiene $(a - 1)(b - 1)$ grados de libertad.

Dentro de cada una de las celdas ab de la tabla 3-3, existen $n-1$ grados de libertad entre las n réplicas, y las observaciones en la misma celda solo pueden diferir debido al error aleatorio. Por consiguiente, existen $ab(n-1)$ grados de libertad para el error. En consecuencia, los grados de libertad están divididos de acuerdo con:

$$abn - 1 = (a - 1) + (b - 1) + (a - 1)(b - 1) + ab(n - 1)$$

Si se divide cada una de la suma de los cuadrados del miembro derecho de la ecuación, entre el número de grados de libertad correspondiente, se obtienen las medias de los cuadrados de A, B, la interacción y el error.

$$MS_A = \frac{SS_A}{a-1} \quad MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$$

$$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)} \quad MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$$

Al suponer que los factores A y B son fijos, no es difícil demostrar que los valores esperados de estas medias de cuadrados son:

$$E(MS_A) = E\left(\frac{SS_A}{a-1}\right) = \sigma^2 + \frac{bn \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a-1}$$

$$E(MS_B) = E\left(\frac{SS_B}{b-1}\right) = \sigma^2 + \frac{an \sum_{j=1}^b \beta_j^2}{b-1}$$

$$E(MS_{AB}) = E\left(\frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}\right) = \sigma^2 + \frac{n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$$

$$E(MS_E) = E\left(\frac{SS_E}{ab(n-1)}\right) = \sigma^2$$

A partir de esas medias de cuadrados esperadas, es evidente que si las hipótesis nulas sobre los efectos principales $H_0:\tau_i=0$, $H_0:\beta_j=0$, y la hipótesis de interacción $H_0:(\tau\beta)_{ij}=0$ son todas verdaderas, entonces las cuatro medias de los cuadrados son estimaciones insesgadas de σ^2 . Para probar que los efectos de los factores de fila son todos iguales a cero ($H_0:\tau_i=0$), se emplea el cociente

$$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$$

el cual tiene una distribución F con $a-1$ y $ab(n-1)$ grados de libertad si $H_0:\tau_i=0$ es verdadera. Esta hipótesis nula se rechaza si con un nivel de significancia α si $f_0 > f_{\alpha, a-1, ab(n-1)}$. De manera similar, para probar la hipótesis de que todos los efectos de los factores columna son cero ($H_0:\beta_i=0$), se utiliza como cociente.

$$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$$

El cual tiene una distribución F con $b-1$ y $ab(n-1)$ grados de libertad si $H_0: \beta_i=0$ es verdadera. Esta hipótesis nula se rechaza si con un nivel de significancia α si $f_0 > f_{\alpha, b-1, ab(n-1)}$. Finalmente para probar la hipótesis nula $H_0: (\tau\beta)_{ij}=0$, que es la hipótesis de que todos los efectos de interacción son cero, se hace uso del cociente:

$$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$$

El cual tiene una distribución F con $(a-1)(b-1)$ y $ab(n-1)$ grados de libertad si la hipótesis nula $H_0: (\tau\beta)_{ij}=0$, es verdadera. Esta hipótesis se rechaza si con un nivel de significancia α si $f_0 > f_{\alpha, (a-1)(b-1), ab(n-1)}$.

Usualmente lo mejor es efectuar primero la prueba de interacción y luego evaluar los efectos principales. Si la interacción no es significativa, los efectos principales de los factores que participan en la interacción no tienen mucho valor interpretativo práctico. El conocimiento de la interacción es, en general, más importante que el de los efectos principales.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (\text{Ecc 3.4})$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i..}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (\text{Ecc 3.5})$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (\text{Ecc 3.6})$$

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij.}^2}{n} - \frac{y_{...}^2}{abn} - SS_A - SS_B \quad (\text{Ecc 3.7})$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad (\text{Ecc 3.8})$$

Normalmente los cálculos se muestran en una tabla de análisis de varianza, tal como se muestra en la tabla (3-4).

Tabla 3- 4: Tabla de análisis de varianza para modelo factorial de dos factores, efectos fijos

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de Cuadrados	Fo
Tratamientos A	SSA	a-1	$MS_A = \frac{SS_a}{a-1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
Tratamientos B	SSB	b-1	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
Interacción	SSAB	(a-1)(b-1)	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SSE	ab(n-1)	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
Total	SST	abn-1		

3.2.6.2 Verificación de la adecuación del modelo

Los residuos de un experimento factorial juegan un papel importante en la evaluación de la adecuación del modelo. Los residuos de un experimento factorial de dos factores son:

$$e_{ijk} = y_{ijk} - \bar{y}_{ij} \tag{Ecc 3.10}$$

Esto es, los residuos son precisamente la diferencia entre las observaciones y los promedios de celda correspondiente.

Los residuos de un experimento deberían distribuirse normalmente representándose a través de una línea recta en una grafica residuo v/s probabilidad, si esto no se cumple puede haber un error en la suposición de normalidad de los residuos.

3.2.6.3 Determinación del tamaño de la muestra

En cualquier problema de diseño experimental, una decisión critica es la elección del tamaño de la muestra, es decir, determinar el número de réplicas que deben analizarse. En general, si el experimentador tiene interés por detectar efectos pequeños, se necesitan más réplicas que cuando el experimentador se interesa en detectar efectos grandes.

Para determinar el tamaño de una muestra se deben utilizar las curvas de operación característica, la cual es una gráfica de probabilidad de rechazar la hipótesis nula. El experimentador puede usar estas curvas como guía de selección de número de réplicas para que el diseño sea sensible a diferencias potenciales importantes en los tratamientos.

Se considera la probabilidad del error tipo II del modelo con efectos fijos para el caso en que se usa el mismo tamaño de muestras para cada tratamiento, por ejemplo:

$$\beta = 1 - P\{\text{Rechazar } H_0 | H_0 \text{ es falsa}\} \quad (\text{Ecc. 3.10})$$

$$\beta = 1 - P\{F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a} | H_0 \text{ es falsa}\}$$

Para evaluar el enunciado de probabilidad, es necesario conocer cual es la distribución del estadístico de prueba F_0 si la hipótesis nula es falsa. Puede demostrarse que, si H_0 es falsa y el estadístico $F_0 = MS_{\text{Tratamientos}}/MS_E$ se distribuye como una variable aleatoria F no central con $a-1$ y $N-a$ grados de libertad y parámetro de no centralidad δ . Si $\delta=0$, la distribución F no central se convierte en la distribución F (central) común.

Las curvas de operación característica se utilizan para evaluar el enunciado de probabilidad de la ecuación 3.10. En estas curvas grafican la probabilidad de error tipo II contra un parámetro Φ , donde:

$$\Phi^2 = \frac{n \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a\sigma^2}$$

La cantidad Φ^2 está relacionada con el parámetro de no centralidad δ . Al usar las curvas de operación característica, el experimentador debe especificar el parámetro Φ , con frecuencia es difícil hacer esto en la práctica, por lo que se puede recurrir al software INFOSTAT, para el cálculo de la potencia β .

3.2.6.4 La Distribución F

La distribución F es una de las más útiles en la estadística. La variable aleatoria F se define como el cociente de dos variables aleatorias ji-cuadradas independientes, cada una dividida entre sus respectivos grados de libertad, donde W y Y son variables aleatorias ji-cuadrada independientes con grados de libertad u y v, respectivamente, entonces el cociente:

$$F = \frac{W/u}{Y/v}$$

tiene una función de densidad de probabilidad

$$f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{u+v}{2}\right) \left(\frac{u}{v}\right)^{\frac{u}{v}} x^{\frac{u}{v}-1}}{\Gamma\left(\frac{u}{2}\right) \Gamma\left(\frac{v}{2}\right) \left[\left(\frac{u}{v}\right)x+1\right]^{\frac{u+v}{2}}}, \quad 0 < x < \infty$$

y se dice que sigue a distribución F con u grados de libertad en el numerador, y v grados de libertad en el denominador. Usualmente esto se abrevia como $F_{u,v}$. La media y la varianza de la distribución F son:

$$\mu = \frac{v}{v-2} \quad \text{para } v > 2$$

$$\sigma^2 = \frac{2v^2(u+v-2)}{u(v-2)^2(v-4)} \quad \text{para } v > 4$$

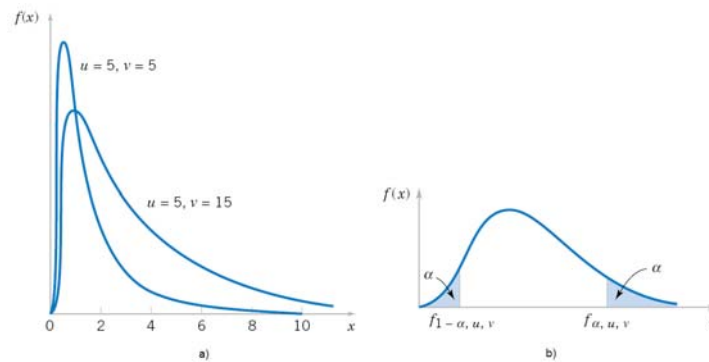


Figura 3-10: a) Funciones de densidad de probabilidad de varias funciones F, b) Puntos críticos superior e inferior de la distribución F.

La variable aleatoria F es no negativa, y la distribución tiene un sesgo hacia la derecha. La distribución F tiene una apariencia muy similar a la distribución ji-cuadrada, sin embargo se encuentra centrada respecto a 1, y los dos parámetros u y v proporcionan una flexibilidad adicional con respecto a la forma de la distribución.

Sea $f_{\alpha, u, v}$ el punto crítico de a distribución F, con u grados de libertad en el numerador, y v grados de libertad en el denominador, tal que la probabilidad de que la variable aleatoria F sea mayor que este valor es:

$$P(F > f_{\alpha, u, v}) = \int_{f_{\alpha, u, v}}^{\infty} f(x) dx = \alpha$$

Los puntos críticos de la cola inferior $f_{1-\alpha, u, v}$ pueden calcularse de la siguiente manera:

$$f_{1-\alpha, u, v} = \frac{1}{f_{\alpha, u, v}}$$

3.3 Confección de las probetas

3.3.1 Geometría de la unión

La normativa NCH 1198 Of. 2006 especifica distanciamientos mínimos para medio de unión cilíndricos de acero que atraviesan perpendicularmente los planos de cizalle de la unión.

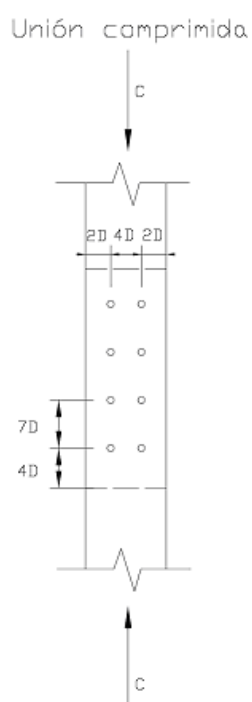


Figura 3-11: Distanciamiento Mínimo a los bordes en unión comprimida

También la NCH, especifica la mayoración de los diámetros de los agujeros, para la colocación de los pernos, tamaño de arandelas, y distanciamientos mínimos entre medios de unión y a los bordes. Para el caso específico de pernos de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{5}{8}$ " de diámetro, estas características se muestran en el anexo E.

Una vez construidas las 32 probetas y para identificarlas de una mejor manera, se modelo una nomenclatura para su identificación.

$$D_a H_b P_n$$

Donde:

a: Diámetro del perno, con a =1 para perno de ½”, y a =2 para perno de 5/8”

b: Número de pernos por hilera, con b =1,3,4,5

n: Número de probeta, con n =1,2,3,4

a) Probetas con pernos de ½”

16 probetas fueron ensayadas con pernos de ½” de diámetro, las cuales se clasificaron en 4 grupos:

- 4 uniones de 1 perno (D1H1P1, D1H1P2, D1H1P3, D1H1P4)
- 4 uniones, con 2 hileras y 3 pernos cada una (D1H3P1, D1H3P2, D1H3P3, D1H3P4.)
- 4 uniones, con 2 hileras y 4 pernos cada una (D1H4P1, D1H4P2, D1H4P3, D1H4P4)
- 4 uniones, con 2 hileras y 5 pernos cada una (D1H5P1, D1H5P2, D1H5P3, D1H5P4).

b) Probetas con pernos de 5/8”

16 probetas fueron ensayadas con pernos de 5/8” de diámetro, las cuales se clasificaron en 4 grupos:

- 4 uniones de 1 perno (D2H1P1, D2H1P2, D2H1P3, D2H1P4)
- 4 uniones, con 2 hileras y 3 pernos cada una (D2H3P1, D2H3P2, D2H3P3, D2H3P4.)
- 4 uniones, con 2 hileras y 4 pernos cada una (D2H4P1, D2H4P2, D2H4P3, D2H4P4)
- 4 uniones, con 2 hileras y 5 pernos cada una (D2H5P1, D2H5P2, D2H5P3, D2H5P4)

Para mayor información sobre la construcción y realización de los ensayos véase el anexo B y C.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados experimentales

Como se comenta en el Anexo C, los ensayos experimentales residieron en pruebas de uniones de cizalle doble en compresión axial, las cuales consistían en distinto número de pernos por hilera. El objetivo principal de desarrollar distintas disposiciones, es observar los distintos mecanismos de falla que se producirían, cuantificar la carga máxima resistida por la probeta y hacer la comparación entre la resistencia práctica y teórica.

Las probetas se ensayaron en 4 distintos marcos de carga, los cuales tenían distinta capacidad. Estas se cargaron axialmente y la curva de carga-deformación de los especímenes se construyó a medida que se iba ejecutando el ensayo. (La ejecución de las pruebas se describe en el Anexo C).

Como se explicó en el capítulo II, la carga práctica que soportaría la unión, se deduce de la teoría de T. L. Wilkinson. La teoría del “5% del Diámetro del Perno”, consiste en trazar una línea paralela a la zona elástica de la curva carga deformación, desplazada en un 5% del diámetro del perno, para luego intersectarla con la original y encontrar un punto común, en este caso, la carga máxima soportada por la unión y su deformación asociada.

4.1.1. Probetas pernos 1/2"

Para uniones con perno de 1/2", el cálculo de la resistencia se realizó con el método del "5% del Diámetro del Perno", desplazando la curva paralela que indica el procedimiento en 0.63 mm de la original, intersectando su extrapolación con la curva de carga-deformación arrojada por el ensayo, por lo que se debió resolver un sencillo sistema de ecuaciones para cada uno de los casos, así encontrando la resistencia de la unión con su respectiva deformación.

El modo de fluencia predominante en los ensayos fue el I, el cual consiste en el agotamiento de la resistencia al aplastamiento de la madera en el miembro central; predominó el aplastamiento en la zona de contacto, entre la perforación donde se ubica el medio de unión y el perno, la permanencia en buen estado de los miembros laterales como también la no presencia de rótulas plásticas en el perno. La calidad del medio de unión que se utilizó para estos especímenes fue un perno de alta resistencia, con un $f_y = 8370 \text{ Kg} / \text{cm}^2$.



Figura 4- 1: Uniones con pernos de 1/2"

a) Uniones con 1 perno

Como se describe en el Anexo C, los ensayos experimentales consistieron en la aplicación de una carga axial de compresión sobre el miembro central de la unión de cizalle doble. Para el caso de las probetas de 1 perno de $\frac{1}{2}$ " , se presentó un buen comportamiento del conjunto madera-perno, no visualizando un giro del miembro central, que pudo producirse por excentricidad accidental de la carga en el transcurso del ensayo. Este modo de falla fue producto de la alta resistencia del perno de $\frac{1}{2}$ " y la heterogeneidad de la madera, ya que esta presentaba distintas densidades y contenidos de humedad en cada pieza.



Figura 4- 2: Modo de Falla I en uniones de 1 perno de $\frac{1}{2}$ "

A continuación se presenta un pequeño resumen para el primer tratamiento de uniones, en donde se muestra la resistencia práctica de la unión con su deformación asociada, según la teoría del 5% del diámetro del perno.

Tabla 4- 1: Cuadro Resumen, Capacidad Práctica de Uniones con un perno, Método del 5% del Diámetro del Perno.

Probeta	Modo de	5% Diámetro del Perno	
	Falla	P (KN)	Δ (mm)
D1H1P1	I	16.35	1.45
D1H1P2	I	8.41	1.69
D1H1P3	I	13.02	0.99
D1H1P4	I	12.60	2.03

b) Uniones con 3 pernos por hilera

Para el caso de uniones con 3 pernos por hilera, el modo de falla fue el I. El aplastamiento de la madera en el miembro central no fue tan exagerado como en el tratamiento de uniones de 1 perno, pero en este caso, la carga se distribuyó de una manera más equitativa en cada uno de los medios de unión.

Tabla 4- 2: Cuadro Resumen, Capacidad Practica de Uniones con 3 pernos por hilera, Método del 5% del Diámetro del Perno.

Probeta	Modo de	5% Diámetro del Perno	
	Falla	P (KN)	Δ (mm)
D1H3P1	I	128.25	2.64
D1H3P2	I	128.46	2.59
D1H3P3	I	110.91	3.47
D1H3P4	I	172.58	5.11

c) Uniones con 4 pernos por hilera

En el caso de las uniones con 4 pernos por hilera, el modo predominante fue el I, al igual que el caso anterior, se produjo aplastamiento en el miembro central, pero de forma mucho más sutil.

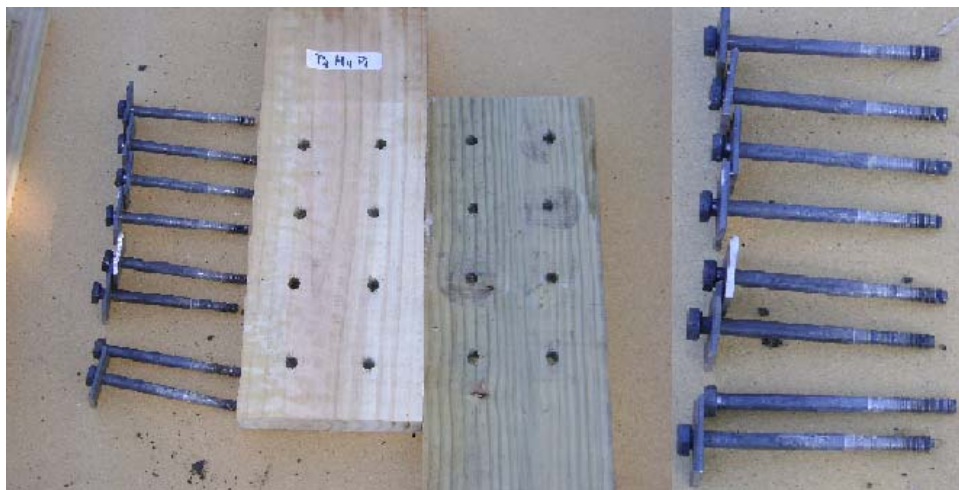


Figura 4- 3: Modo de Falla I en uniones de 4 pernos por hilera de 1/2”

Tabla 4- 3: Cuadro Resumen, Capacidad Practica de Uniones con 4 pernos por hilera, Método del 5% del Diámetro del Perno.

Probeta	Modo de Falla	5% Diámetro del Perno Ensayos	
		P (KN)	Δ (mm)
D1H4P1	I	204.45	3.99
D1H4P2	I	171.29	4.05
D1H4P3	I	190.29	3.24
D1H4P4	I	189.08	3.46

d) Uniones con 5 pernos por hilera

El comportamiento de las uniones de 5 pernos por hilera fue consecuente con los casos antes mencionados, el modo de falla fue el I.

Tabla 4- 4: Cuadro Resumen, Capacidad Práctica de Uniones con 5 pernos por hilera, Método del 5% del Diámetro del Perno.

Probeta	Modo de	5% Diámetro del Perno	
	Falla	P (KN)	Δ (mm)
D1H5P1	I	125.77	5.77
D1H5P2	I	136.95	1.96
D1H5P3	I	136.76	3.76
D1H5P4	I	172.83	5.23

Para todas las uniones con perno de $\frac{1}{2}$ ", el modo de falla o de fluencia fue el I, este comportamiento se produjo por la diferencia en la resistencia de los materiales; la capacidad al aplastamiento de la madera y la capacidad al corte del perno, que en este caso era de alta resistencia con un acero A325, con $f_y = 8370 \text{ kg/cm}^2$.

Para el caso de pernos, las cargas se traspasan puntualmente a través de un efecto de aplastamiento sobre la superficie de contacto entre cada medio de unión y la madera. La geometría de la sección transversal es circular, lo que determina distribuciones de aplastamiento variables orientadas radialmente, en este caso, las cargas se descomponen paralela y perpendicularmente a la fibra.

Cuando la dirección de la fuerza traspasada coincide con la dirección de la fibra, se generan sobre la madera tensiones de empujes lateral, que están orientadas hacia cada extremo, como componentes de fuerza horizontal H , y considerando la poca capacidad resistente de la madera ante sollicitaciones normales a la fibra las tensiones pueden conducir a fallas por hendimiento, simultáneamente se producen tensiones de cizalle paralelo a la fibra que comprometen las superficies paralelas, en la práctica se ha probado que la falla se produce por este aspecto.

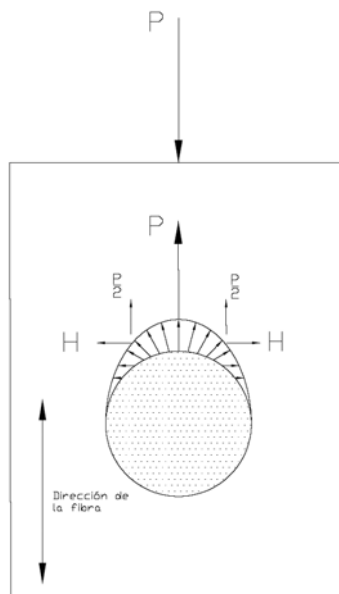


Figura 4- 4: Distribución de tensiones en la madera, producto de la carga

Al comienzo de los ensayos, la carga se distribuía equitativamente en la unión, esta al incrementar, provocó una disminución de la resistencia al aplastamiento de la madera hasta que esta se agotara completamente, por lo que el perno comenzó a absorber la totalidad de la sollicitación, así produciéndose un hundimiento del medio de unión en la pieza central.

Con respecto al control de deformaciones, la NCH 1198 especifica un corrimiento para la capacidad admisible $\delta=0.8$ mm, para relacionar esta verificación con el método aportado por Wilkinson, la curva paralela a la zona elástica de la curva carga deformación debe desplazarse en 0.8 mm. La carga y deformación relacionadas al corrimiento de δ , se calculan al igual que la capacidad de la unión, trazando una línea de tendencia a la nueva recta paralela y resolviendo un sencillo sistema de ecuaciones, a continuación se muestra un cuadro resumen con estos resultados.

Tabla 4- 5: Cuadro Resumen, Carga-Deformación asociada al corrimiento $\delta=0.8$ mm en uniones con pernos de $\frac{1}{2}$ ".

Probeta	NCH 1198 $\delta=0.8$ mm	
	Ensayos	
	P (KN)	Δ (mm)
D1H1P1	16.95	1.68
D1H1P2	9.65	1.96
D1H1P3	14.78	1.25
D1H1P4	14.09	2.29
D1H3P1	137.33	2.96
D1H3P2	137.68	2.90
D1H3P3	132.56	4.22
D1H3P4	179.57	5.47
D1H4P1	220.46	4.42
D1H4P2	177.28	4.35
D1H4P3	201.18	3.58
D1H4P4	204.56	3.85
D1H5P1	134.49	6.21
D1H5P2	148.33	2.28
D1H5P3	137.31	3.97
D1H5P4	182.40	5.67

En el caso específico de uniones con pernos de $\frac{1}{2}$ " la carga entregada por el método del "5% del diámetro del perno" es menor que el entregado para la verificación del control de deformaciones, por lo que la teoría extranjera adoptada por la nacional es más conservadora con respecto a las deformaciones.

4.1.2. Probetas Pernos 5/8"

Al igual que el caso de uniones con perno de 1/2", el cálculo de la resistencia para uniones con pernos de 5/8" se realizó con el método del "5% del Diámetro del Perno", desplazando la curva paralela que indica el procedimiento en 0.8 mm de la original.

El modo de fluencia predominante fue el III; esta topología de falla se caracteriza por la generación de rótulas plásticas en el perno, en la zona de contacto de las piezas laterales con la medular y el aplastamiento de la madera en el miembro central o lateral. La calidad del medio de unión que se utilizó para estos especímenes fue un perno corriente, con un $f_y = 3725 \text{ Kg} / \text{cm}^2$.



Figura 4- 5: Uniones con pernos de 5/8"

a) Uniones con 1 perno

Para el caso específico de las uniones con un perno, se presentó claramente el efecto de la carga sobre el medio de unión, se generaron rótulas plásticas en la zona de contacto de las piezas de madera, como también aplastamiento de la madera del miembro central, pero de forma muy sutil. Este efecto se produjo por el efecto de la carga axial sobre la unión, la carga se distribuyó en ambos materiales, la madera alcanzó su capacidad al aplastamiento, como el perno sobrepasó su resistencia al corte.

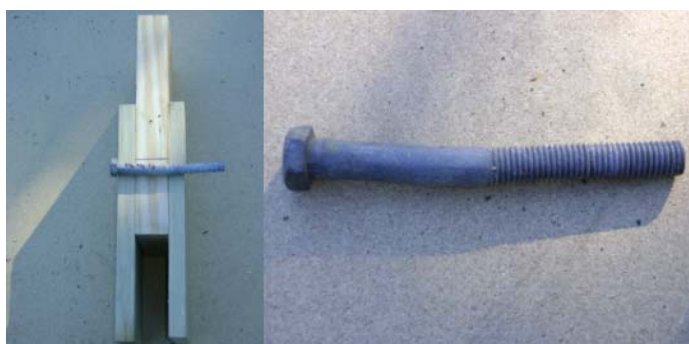


Figura 4- 6: Modo de falla III en Uniones de 1 perno de diámetro 5/8”

Tabla 4- 6: Cuadro Resumen, Capacidad Práctica de Uniones con 1 perno de 5/8” por hilera, Método del 5% del Diámetro del Perno.

Probeta	Modo de Falla	5% Diámetro del Perno Ensayos	
		P (KN)	Δ (mm)
		D2H1P1	III
D2H1P2	III	41.57	5.24
D2H1P3	III	39.91	5.20
D2H1P4	III	32.25	2.93

b) Uniones con 3 pernos por hilera

Para las uniones con 3 pernos de 5/8" por hilera, se presentó igualmente el modo de falla III, cabe mencionar que el aplastamiento de la madera en el miembro central de la unión es mínimo, como en los miembros laterales nulo. Se presentaron rótulas plásticas en los medios de unión, pero la deformación sufrida por estos fue menor que el caso anterior.

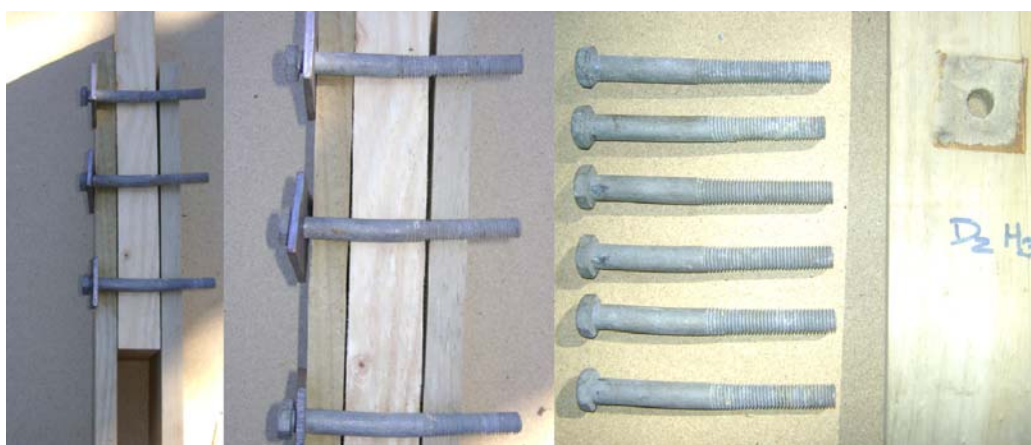


Figura 4- 7: Modo de Falla III, Probetas de 3 pernos de 5/8" por hilera.

Tabla 4- 7: Cuadro Resumen, Capacidad Práctica de Uniones con 3 pernos de 5/8" por hilera, Método del 5% del Diámetro del Perno.

Probeta	Modo de	5% Diámetro del Perno	
	Falla	P (KN)	Δ (mm)
D2H3P1	III	137.84	3.19
D2H3P2	III	238.28	6.35
D2H3P3	III	230.52	6.13
D2H3P4	III	185.09	5.98

c) Uniones con 4 pernos por hilera

Las Probetas de 4 pernos por hilera tuvieron un comportamiento totalmente distinto a las anteriores, estas son mucho más esbeltas que otros ejemplares, (debido al distanciamiento mínimo entre medios de unión, el cual se especifica en el anexo B), y sumado a las condiciones de apoyo del marco N°3, que en este caso se comportan como un apoyo móvil, la unión comenzó a pandearse en la zona libre de medios de unión.



Figura 4- 8: Pandeo Probetas de 4 pernos de 5/8" por hilera

El pandeo fue bastante notorio, por lo que el ensayo debió interrumpirse antes de llegar a la carga máxima que pudiese soportar la probeta, ya que esta podía soltarse peligrosamente del marco de carga o simplemente explotar.

La unión presentó modo de falla III, los pernos sufrieron una deformación no tan notoria como el caso de las uniones con 3 pernos por hilera, esto debido a que la probeta no desarrollo toda su capacidad resistente.



Figura 4- 9: Pandeo Probetas en sector libre de medios de unión.

Como se mencionó anteriormente, las uniones no desarrollaron en su totalidad la capacidad resistente, pero para el método del “5% del diámetro del perno”, en los 4 casos, la curva carga deformación desarrollo completamente la zona elástica, por lo que el método se pudo aplicar correctamente.

Tabla 4- 8: Cuadro Resumen, Capacidad Práctica de Uniones con 4 pernos de 5/8” por hilera, Método del 5% del Diámetro del Perno.

Probeta	Modo de	5% Diámetro del Perno Ensayos	
	Falla	P (KN)	Δ (mm)
D2H4P1	III	116.92	4.26
D2H4P2	III	156.35	3.78
D2H4P3	III	141.55	4.05
D2H4P4	III	193.43	6.53

d) Uniones con 5 pernos por hilera

Las uniones con 5 pernos por hilera se ensayaron en el marco de carga N°4, esta estructura contaba con un sistema incorporado de registro de carga, la deformación sufrida por la probeta se registró al igual que los casos anteriores con deformómetros.

El modo de falla presentado por lo especímenes fue el III, pero al igual que las probetas de 4 pernos por hilera, sufrieron un bajo porcentaje de pandeo, pero esta vez producido por la presencia de nudos en la madera y no por la condición de apoyo de la unión. Los especímenes desarrollaron completamente su capacidad, por lo que se cargaron más allá del límite plástico, llegando finalmente a la rotura.



Figura 4- 10: Pandeo Probetas 5 Pernos por Hilera



Figura 4- 11: Rotura de Probetas en zona de nudos.

El aplastamiento sufrido por la madera en su miembro central, consecuentemente con los casos anteriores fue sutil, con respecto a los medios de unión, hubo generación de rótulas plásticas, y la deformación sufrida por ellos fue pequeña.



Figura 4- 12: Modo de Falla III, Probetas de 5 pernos de 5/8” por hilera.

Tabla 4- 9: Cuadro Resumen, Capacidad Práctica de Uniones con 4 pernos de 5/8” por hilera, Método del 5% del Diámetro del Perno.

Probeta	Modo de Falla	5% Diámetro del Perno Ensayos	
		P (KN)	Δ (mm)
D2H5P1	III	215.08	5.23
D2H5P2	III	273.22	7.20
D2H5P3	III	318.72	7.40
D2H5P4	III	307.09	6.72

Con respecto a el control de deformaciones, al igual que en el caso uniones con pernos de 1/2", las uniones que están formadas por pernos de 5/8", el corrimiento de 0.8 mm coincide con la teoría del "5% del diámetro del perno", por lo que la deformación entregada por esta teoría es la misma que la entregada por la NCH 1198.

Tabla 4- 10: Cuadro Resumen, Carga-Deformación asociada al corrimiento $\delta=0.8\text{mm}$ en uniones con pernos de 5/8".

Probeta	NCH 1198 $\delta=0.8$ mm	
	Ensayos	
	P (KN)	Δ (mm)
D2H1P1	31.44	3.25
D2H1P2	41.57	5.24
D2H1P3	39.91	5.20
D2H1P4	32.25	2.93
D2H3P1	137.84	3.19
D2H3P2	238.28	6.35
D2H3P3	230.52	6.13
D2H3P4	185.09	5.98
D2H4P1	116.92	4.26
D2H4P2	156.35	3.78
D2H4P3	141.55	4.05
D2H4P4	193.43	6.53
D2H5P1	215.08	5.23
D2H5P2	273.22	7.20
D2H5P3	318.72	7.40
D2H5P4	307.09	6.72

4.2. Resultados Teóricos

Como se alcanzó en el punto 4.1, la resistencia de la unión se rige a partir de la teoría del “5% del diámetro del perno”, por lo que la capacidad calculada teóricamente se puede comparar directamente con la carga práctica determinada en el punto anterior.

4.2.1. Cargas Admisibles de Extracción Lateral

La capacidad admisible de carga de un medio de unión del tipo cilíndrico en una unión de cizalle doble, corresponde al menor valor de P_{el} resultante de las expresiones de los modos de fluencia que se indicaron en el capítulo II, estos modos de fluencia incorporan en sus expresiones características del medio de unión, características de la madera y factores de ajuste que dependen de la orientación de la carga con respecto a la fibra de la madera.

A continuación se muestra una tabla resumen con las capacidades admisibles en extracción lateral de los medios de unión, para los 4 modos de fluencia, los cuales incluyen el factor de ajuste de 2.5.

Tabla 4- 11: Cargas de Extracción lateral Para pernos de 1/2” y 5/8”, para cada modo de fluencia.

Diámetro Perno D (in)	Diámetro Perno D (mm)	Fluencia Perno Fff (Mpa)	Modo Ic Pel (KN)	Modo Ii Pel (KN)	Modo Iiii Pel (KN)	Modo IV Pel (KN)
1/2	12.7	837	14.74	25.32	14.97	24.66
5/8	15.88	372.5	18.43	31.65	15.74	25.71

Según el cuadro resumen, teóricamente las uniones debieron presentar el modo I de falla para las probetas con pernos de $\frac{1}{2}$ " y modo III para probetas con pernos de $\frac{5}{8}$ ", ya que son los menores valores de extracción lateral que se presentan en el análisis.

Prácticamente, se cumplió esta teoría, ya que las probetas con pernos de $\frac{1}{2}$ " tuvieron un comportamiento caracterizado por el modo de fluencia I, y las probetas de $\frac{5}{8}$ " presentaron el modo de fluencia III.

4.2.2. Carga Admisible de la Unión

La carga admisible soportada por la probeta, teóricamente será la suma de las capacidades de carga de diseño determinadas para cada medio de unión individual, en este caso la suma de la carga de extracción lateral de cada medio de unión multiplicado por los factores de modificación que corresponden.

Por condiciones de los materiales experimentales, que se presentan en el anexo D, se aplicaron directamente el factor de modificación por longitud de hilera, ya que los factores de modificación por contenido de humedad, de temperatura y duración de carga tienen un valor de 1.

La expresión del factor por longitud de hilera o factor de grupo, el cual se muestra en el capítulo II, contempla características geométricas y mecánicas de las piezas de madera, como también las disposiciones de los medios de unión, este factor toma un papel de reducción, ya que presenta un valor teórico menor a la unidad.

$$F_G = \left[\frac{m(1 - m^{2n})}{n \cdot [(1 + R_{EA} \cdot m^n) \cdot (1 + m) - 1 + m^{2n}]} \right] \cdot \left[\frac{1 + R_{EA}}{1 - m} \right]$$

Ecuación 4- 1: Factor de longitud de Hilera

a) Factores de longitud de hilera y capacidad admisible de las uniones con pernos de ½”.

A continuación se muestra un cuadro resumen con los valores teóricos de factor de modificación por longitud de hilera o factor de grupo, incorporando las características antes mencionadas.

Tabla 4- 12: Características físicas, mecánica de la madera y geometría de la unión con pernos de ½”

Pieza central		Pieza lateral	
b (mm)	200	b (mm)	200
e (mm)	50	e (mm)	25
Ac (mm ²)	10000	Al (mm ²)	10000
Ec (N/mm ²)	8324	EI (N/mm ²)	11825
D (in)	1/2	C (N/mm)	11133.73
D (mm)	12.7	s (mm)	90
RE _{A1}	1.42	u	1.01
RE _{A2}	0.70	m	0.87
		REA	0.70

Tabla 4- 13: Cuadro Resumen Factores longitud hilera y capacidades de unión para cada modo de falla

Medios de unión por hilera	Número de hileras	Factor Hilera		Capacidad Unión (KN)			
		Ku	Modo Ic	Modo II	Modo III	Modo IV	
1	1	1	14.74	25.32	14.97	24.66	
2	2	1.00	58.87	101.11	59.76	98.48	
3	2	0.99	87.70	150.64	89.04	146.71	
4	2	0.98	115.58	198.52	117.33	193.34	
5	2	0.96	142.15	244.15	144.31	237.79	

Los ensayos prácticos arrojaron que las uniones con pernos de ½” fallaron según el modo de fluencia I, por lo que, los valores de la 4^{ta} columna entregada en la tabla anterior, se deben comparar directamente con los valores prácticos mostrados en el punto 4.1.

b) Factores de longitud de hilera y capacidad admisible de las uniones con pernos de 5/8”.

Al igual que el caso de uniones con pernos de ½”, se muestran tablas resumen con los factores de longitud de hilera y capacidades admisibles de las uniones.

Tabla 4- 14: Características físicas, mecánica de la madera y geometría de la unión con pernos de 5/8”

Pieza central		Pieza lateral	
b (mm)	200	b (mm)	200
e (mm)	50	e (mm)	25
Ac (mm ²)	10000	Al (mm ²)	10000
Ec (N/mm ²)	8324	EI (N/mm ²)	11825
D (in)	5/8	C (N/mm)	15559.86
D (mm)	15.88	s (mm)	120
REA1	1.42	u	1.02
REA2	0.70	m	0.82
		REA	0.70

Tabla 4- 15: Cuadro Resumen Factores longitud hilera y capacidades de unión para cada modo de falla.

Medios de unión por hilera	Número de hilera	Factor Hilera Ku	Capacidad Unión (KN)			
			Modo Ic	Modo Ii	Modo IIIi	Modo IV
1	1	1	18.43	31.65	15.74	25.71
2	2	1.00	73.48	126.20	62.74	102.50
3	2	0.98	108.85	186.95	92.94	151.83
4	2	0.96	142.11	244.08	121.33	198.23
5	2	0.94	172.63	296.51	147.40	240.81

Para el caso de uniones con pernos de 5/8" se presentó un comportamiento de falla asociado al modo de fluencia III, por lo que se pueden comparar los resultados prácticos con los resultados entregados en la penúltima columna de la tabla 4-45.

c) Factores de longitud de hilera

Como se mostró en las tablas resumen, el factor de longitud de hilera, teóricamente, es un factor de minoración de la capacidad admisible de la unión, el cual disminuye a medida que se aumentan los pernos por hilera, esto se debe sencillamente a que la expresión general del factor es inversamente proporcional con el número de medios de unión alineados.

Prácticamente, las uniones que utilizaron perno corriente, en este caso de 5/8", se cumplió esa característica de minoración debido a la calidad del perno, ya que la distribución de cargas en los materiales fue más equitativa; su modo de fluencia

III, depende de las características resistentes de la madera, características de la disposición de los medios de unión y de la calidad del perno.

En el caso de uniones con pernos de $\frac{1}{2}$ " , se presentó un factor de modificación mayor a la unidad, esto se debe completamente a la alta calidad del perno, como se mencionó en el punto 4.1, el perno tiene una calidad que duplica la del perno de $\frac{5}{8}$ " , la unión resistió más de lo que debía resistir según la teoría, por lo que el modo de falla de la unión lo controla completamente la calidad del perno.

A continuación, se muestra un cuadro resumen con la carga característica o carga resistida por la probeta, la carga admisible asociada con el factor de ajuste de 2.5 (carga Teórica) y el factor de longitud por longitud de hilera, practico y teórico.

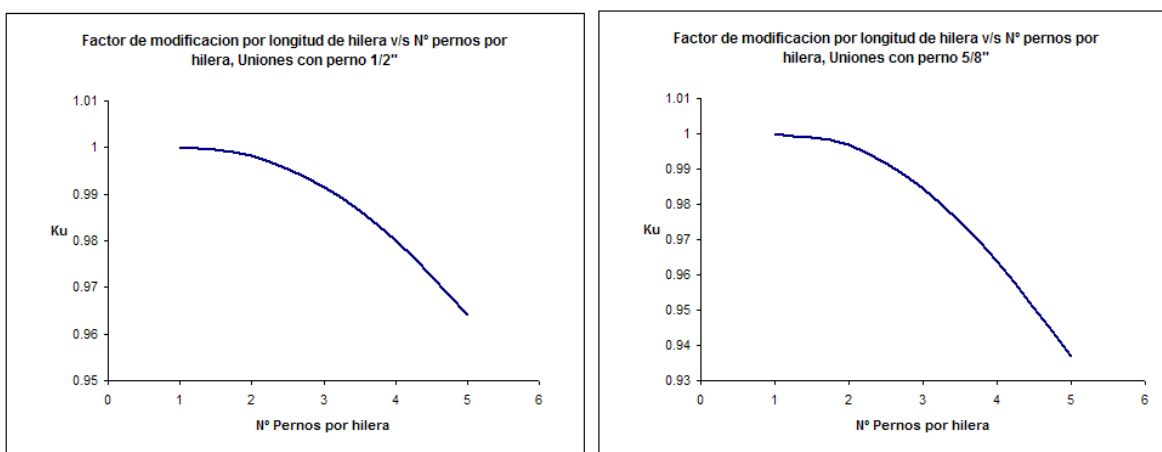


Gráfico 4- 1: Gráfico Factor de modificación por longitud de hilera v/s N° de pernos por hilera, Uniones con pernos de $\frac{1}{2}$ \" y $\frac{5}{8}$ \".

Tabla 4- 16: Cuadro Resumen, Cargas Prácticas, Cargas Teóricas y Factores de Grupo, por Método “5% Diámetro del Perno”

Probeta	Modo de Falla	Teoría del "5% Diámetro Perno"							
		Ensayos					Teoría		
		P (KN)	Δ (mm)	P Promedio (KN)	Δ Promedio (mm)	Ku Práctico	P (Kn)	Δ (mm)	Ku Teórico
D1H1P1 D1H1P2 D1H1P3 D1H1P4	I	16.35 8.41 13.02 12.60	1.45 1.69 0.99 2.03	12.60	1.54	1.00	14.74	0.06	1.00
D1H3P1 D1H3P2 D1H3P3 D1H3P4	I	128.25 128.46 110.91 172.58	2.64 2.59 3.47 5.11	135.05	3.45	1.79	87.7	0.06	0.99
D1H4P1 D1H4P2 D1H4P3 D1H4P4	I	204.45 171.29 190.29 189.08	3.99 4.05 3.24 3.46	188.78	3.68	1.87	115.58	0.06	0.98
D1H5P1 D1H5P2 D1H5P3 D1H5P4	I	125.77 136.95 136.76 172.83	5.77 1.96 3.76 5.23	143.08	4.18	1.14	142.15	0.06	0.96
D2H1P1 D2H1P2 D2H1P3 D2H1P4	III	31.44 41.57 39.91 32.25	3.25 5.24 5.20 2.93	36.29	4.16	1.00	15.74	0.08	1.00
D2H3P1 D2H3P2 D2H3P3 D2H3P4	III	137.84 238.28 230.52 185.09	3.19 6.35 6.13 5.98	197.93	5.41	0.91	92.94	0.08	0.98
D2H4P1 D2H4P2 D2H4P3 D2H4P4	III	116.92 156.35 141.55 193.43	4.26 3.78 4.05 6.53	152.06	4.66	0.52	121.33	0.08	0.96
D2H5P1 D2H5P2 D2H5P3 D2H5P4	III	215.08 273.22 318.72 307.09	5.23 7.20 7.40 6.72	278.53	6.64	0.77	147.40	0.08	0.94

4.3. Resultados estadísticos

En el capítulo III, se dio una introducción a el diseño de experimentos, en donde se indica la planificación experimental, número de tratamientos que se requieren para hacer un sondeo y el estudio matemático que se debe hacer con las variables de interés para ver su influencia sobre los resultados obtenidos.

El estudio que se hizo con las variables de interés, (Diámetro del Perno y número de pernos por hilera) y la respuesta,(carga soportada por la unión según el método del “5% del Diámetro del Perno”) es un análisis estadístico para un modelo de elementos fijos, en donde se estudia el efecto del cambio de diámetro de perno y el número de elementos de unión, sobre la carga que puede soportar la unión; encontrar si existe relación entre las variables o si cada una de ellas tiene un efecto independiente sobre la capacidad.

4.3.1. Análisis de Varianza

Antes de realizar el análisis de varianza, las respuestas del estudio, capacidad, se debieron tabular de forma tal, que se distingan claramente los tratamientos que se utilizaron en el experimento, por lo que se utilizó un arreglo de datos para un diseño factorial de dos factores.

Tabla 4- 17: Arreglo de datos, capacidad de uniones, diseño Factorial de dos Factores

		Diámetro del perno (Factor B)							
		1/2"				5/8"			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Número de pernos por hilera (Factor A)	1	16.35	8.41	13.02	12.60	31.44	41.57	39.91	32.25
	3	128.25	128.46	110.91	172.58	137.84	238.28	230.52	185.09
	4	204.45	171.29	190.29	189.08	116.92	156.35	141.55	193.43
	5	125.77	136.95	136.76	172.83	215.08	273.22	318.72	307.09

En la tabla anterior, se muestra un ordenamiento de las cargas soportadas por las uniones, según el método del “5% del diámetro del perno”, una de las entradas es el número de pernos por hilera, que lo define las filas 1, 3, 4 y 5, la segunda entrada es el diámetro del perno, que lo definen las columnas 1/2” y 5/8”, cada una de las columnas están compuestas por el número de probeta según el tratamiento del 1 al 4.

El análisis de varianza sigue la metodología mostrada en el capítulo III, por lo que el análisis se puede reducir en una tabla ANOVA.

Tabla 4- 18: Tabla ANOVA del Análisis de Varianza

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	Fo	f _{α,u,v}	Valor P	Resultado
Nº pernos por hilera	159655.5	3	53218.5	63.75	9.28	1.41E-11	Incidencia de Factor
Diámetro del perno	17170.6	1	17170.6	20.57	10.13	8.07E-07	Incidencia de Factor
Interaccion	31251.8	3	10417.3	12.48	9.28	4.07E-05	Incidencia de Factor
Error	20035.5	24	834.8				
Total	228113.4	31					

El Valor P, es la probabilidad que la hipótesis nula se cumpla o sea verdadera, es decir, la probabilidad que los factores asociados al estudio no tienen incidencia en la respuesta. Desde otro punto de vista, el valor P es muy bajo, por lo que la hipótesis nula se rechaza, luego, se puede concluir que los factores asociados al estudio afectan la variable de respuesta.

Otra forma de rechazar la hipótesis nula es comparar directamente el valor de P con el nivel de significación. Este nivel es el error asociado en la obtención de la respuesta, en este caso $\alpha=3\%$, luego si el valor P es menor al nivel de significación la hipótesis nula se rechaza, lo que implicaría directamente que existe incidencia de los factores sobre la respuesta.

Para la experiencia realizada con las uniones, el análisis de varianza muestra que existe una fuerte incidencia de los factores en la resistencia de las uniones, pero también que existe una interacción de entre las variables.

Para el caso de la primera variable (número de pernos por hilera) se puede observar que la capacidad de la unión incrementa a medida que aumenta el número de medios de unión por hilera, esto se produce ya que teóricamente, la capacidad total de la unión es la suma de las capacidades de diseño de cada medio de unión, pero prácticamente se cumple que existe mayor área de corte que resiste la carga axial que se aplica sobre la unión. El segundo factor también incide sobre la respuesta, independientemente que el perno tenga una menor calidad, el área de contacto que existe entre el conector y la madera es mayor ,

por lo que se evita el hendimiento del medio de unión sobre la madera, ya que existe una mejor distribución de tensiones.

La interacción de los factores se produce solo matemáticamente, si se estudia el comportamiento de cada conjunto de probetas, se puede ver que para la tipología de uniones con perno de 1/2", el incremento de capacidad aumenta linealmente, excepto en el caso de la unión con 5 pernos por hilera, ya que ese tratamiento en específico, se presentaron problemas de pandeo, debido a la longitud de la probeta y condiciones de apoyo en el marco de carga N°3, lo mismo ocurre para el caso de las uniones con perno de 5/8" con 4 pernos por hilera.

El resultado habría sido completamente distinto, si los dos casos antes mencionados se hubieran ensayado en el marco de carga N°4, ya que las condiciones de apoyo eran mucho más favorables, esto se puede ver claramente en los resultados de las probetas de mayor tamaño (uniones con 5 pernos por hilera de 5/8"), por lo que los resultados seguirían la misma tendencia lineal.

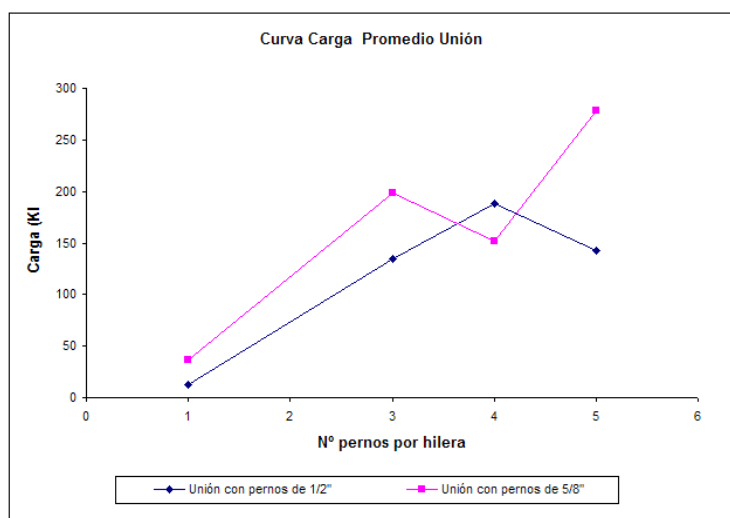


Gráfico 4- 2: Curvas cargas promedio de cada tratamiento, para uniones con perno de 1/2" y 5/8" con distintos números de medios de unión por hilera

Tabla 4- 19: Cargas promedio de cada tratamiento, para uniones con perno de ½ y 5/8” con distintos números de medios de unión por hilera

Nº pernos por hilera	Carga promedio tratamientos	
	Perno 1/2"	Perno 5/8"
1	12.59	36.29
3	135.05	197.93
4	188.78	152.06
5	143.08	278.53

4.3.2. Verificación del Modelo de efectos fijos

El modelo de efectos fijos es adecuado al diseño del experimento cuando los errores tienen distribución normal, por ello se calcularon los errores de la respuesta según el punto 3.2.6.2.

Tabla 4- 20: Cálculo de residuos o errores

		Diámetro del Perno (Factor B)							
		1/2"				5/8"			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Número de pernos por hilera (Factor A)	1	3.76	-4.18	0.42	0.01	-4.85	5.28	3.62	-4.04
	3	-6.80	-6.59	-24.14	37.53	-60.09	40.35	32.59	-12.85
	4	15.67	-17.49	1.51	0.30	-35.14	4.29	-10.52	41.37
	5	-17.31	-6.13	-6.32	29.75	-63.45	-5.31	40.19	28.56

Una forma de estudiar si los errores tienen aquella distribución es estandarizarlos. La varianza y media utilizada es aquella calculada por tratamiento, por lo que la estandarización resultante es por tratamiento.

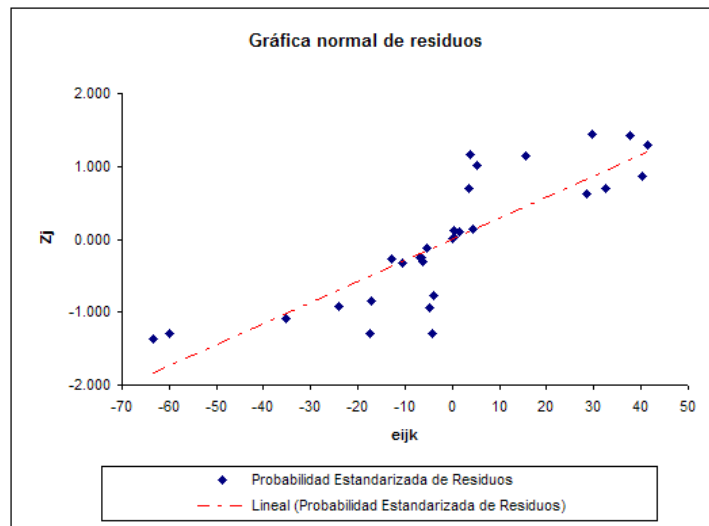


Gráfico 4- 3: Gráfica de dispersión de los residuos con respecto a su estandarización.

Luego se puede concluir según la gráfica anterior, que los errores se distribuyen normalmente, ya que la dispersión tiene una tendencia lineal, por lo que el modelo de efectos fijos es válido. Los puntos más alejados de la línea de tendencia, se deben a que la respuesta del experimento se aparta más del promedio del tratamiento, luego se recomienda tomar algunas medidas en la fabricación de las uniones y en la ejecución de los ensayos, para disminuir dispersión.

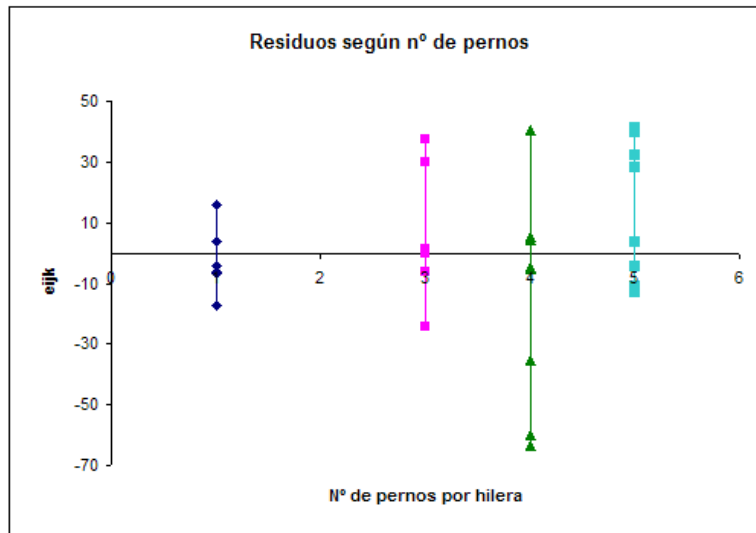


Gráfico 4- 4: Distribución de residuos según número de pernos por hilera

El gráfico 4-4, muestra la distribución del error de la respuesta según el número de pernos por hilera, se puede ver claramente que las probetas que presentaron menor error o que tuvieron menor variabilidad en la respuesta son las de 1 perno, debido a que en esta tipología existen menos variables a considerar, en cambio en uniones con 4 pernos por hilera se presenta la mayor variabilidad, cabe señalar que en las uniones de 4 pernos de 5/8" por hilera presentaron problemas de pandeo debido la mala condición de apoyo.

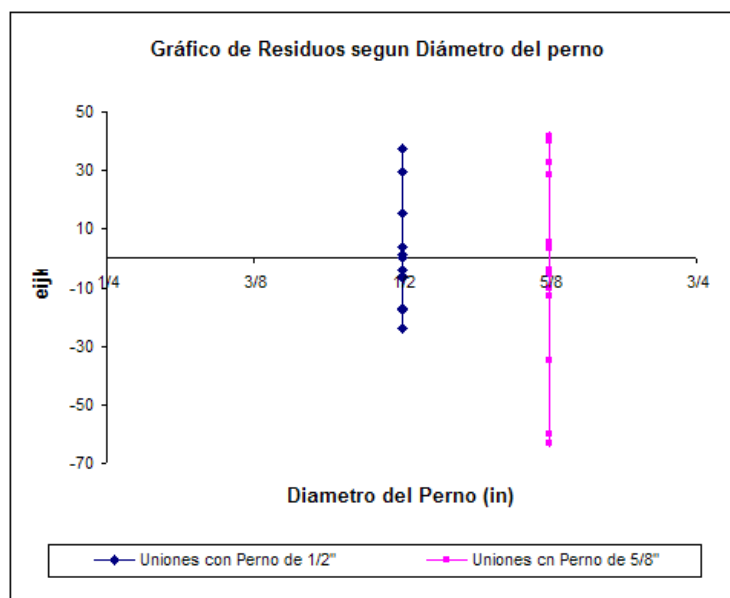


Gráfico 4- 5: Gráfica de residuos según el diámetro del perno

El Gráfico 4-5, indica la variabilidad de la respuesta en las uniones según el diámetro del perno, se nota claramente que las uniones que utilizaron perno de 1/2" no sufrieron grandes variaciones en la respuesta, en comparación con las uniones que utilizaron perno de 5/8", cabe señalar que los tratamientos que sufrieron pandeo en fueron las probetas que contenían 4 y 5 pernos de 5/8" por hilera.

Al analizar en detalle el gráfico 4-2, se pueden notar las diferencias entre los promedios de los tratamientos con respecto al perno utilizado, para uniones con un perno por hilera existe una diferencia de 23.7 KN al utilizar un perno de 1/2" con respecto a utilizar uno de 5/8", para el caso de 3 pernos por hilera existe una diferencia de 62.88 KN para el caso de 5 existe una diferencia de 135.45 KN, por lo que se recomienda desde el punto de vista económico, fabricar uniones con

pernos de menor diámetro y menor calidad, ya que la carga aportada por la unión es mayor y el funcionamiento de esta es mejor, ya que ambos materiales aportan a la resistencia.

4.3.3. Nivel de Confianza del estudio

El nivel de confianza del estudio se rige según las condiciones mencionadas en el punto 3.2.6.3. El grado de confiabilidad del estudio o potencia β , se puede calcular directamente con el software INFOSTAT, el programa requiere determinados parámetros, los cuales se nombran a continuación.

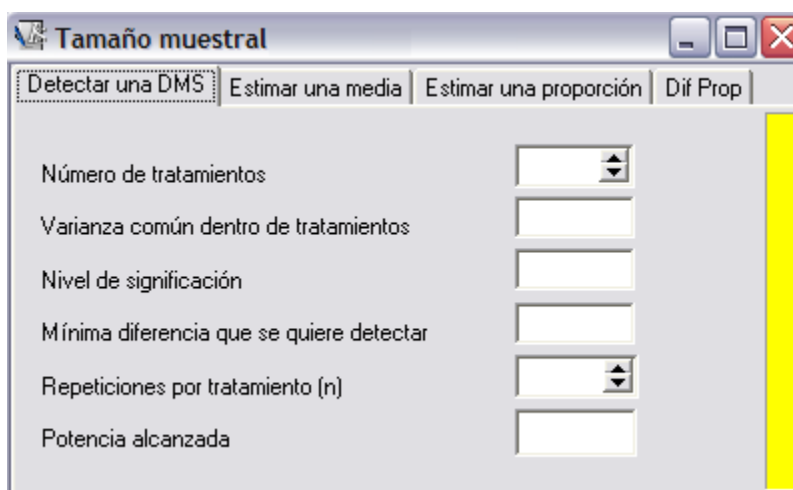
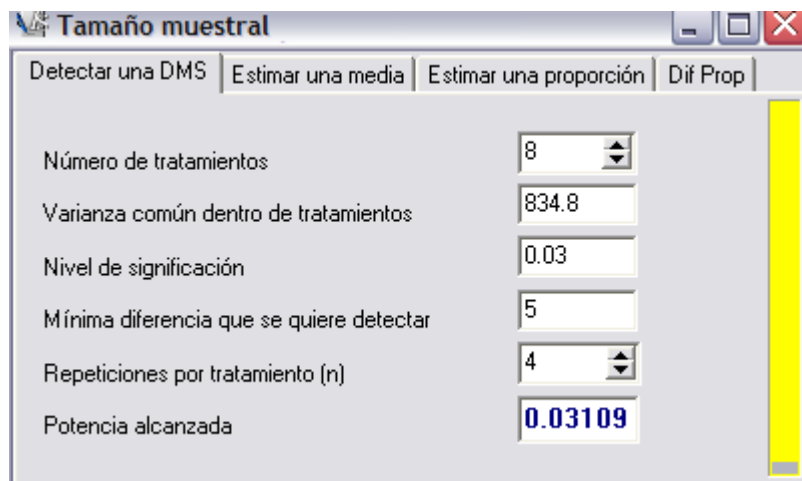


Figura 4- 13: Software Infostat, opción Cálculo Tamaño Muestral.

- Número de Tratamientos: Se ingresa la cantidad total de tratamientos diseñados, en este caso 8.

- Varianza común entre tratamientos: Se ingresa la suma de cuadrados del error del análisis de varianza, calculada entre todos los resultados de los ensayos, según el método del “5% del diámetro del perno”, 834.8.
- Nivel de significación: Se ingresa el error asociado a la respuesta, $\alpha=3\%$.
- Mínima diferencia que se quiere detectar: Este valor es una cierta cantidad de carga que se considere importante en la lectura de datos, en este caso 5 KN.
- Número de repeticiones por tratamiento: Cantidad de probetas ensayadas por tratamiento, $n=4$.



The screenshot shows a software window titled "Tamaño muestral" with four tabs: "Detectar una DMS", "Estimar una media", "Estimar una proporción", and "Dif Prop". The "Dif Prop" tab is selected. The window contains the following fields and values:

Parámetro	Valor
Número de tratamientos	8
Varianza común dentro de tratamientos	834.8
Nivel de significación	0.03
Mínima diferencia que se quiere detectar	5
Repeticiones por tratamiento (n)	4
Potencia alcanzada	0.03109

Figura 4- 14: Cálculo de la potencia o nivel de confianza del estudio.

Finalmente el grado de confiabilidad del estudio es un 3.109%, como se mostró en el punto 3.2.6.3, el grado de confiabilidad β depende de la curva de operación característica Φ , la cual es directamente proporcional a el número de muestras por

tratamiento y la suma de cuadrados de los promedios de cada uno de los tratamientos, e inversamente proporcional a el número de tratamientos y la varianza de la totalidad de las respuestas, por lo que el bajo nivel de confianza se produce por la poca cantidad de muestras por tratamiento, y la gran variabilidad de respuestas.

El nivel de confianza aumentaría si la variabilidad en la capacidad de las uniones fuese menor, lo que traería consigo una menor varianza. En este caso, se debió ejecutar como máximo dos tratamientos, con 16 réplicas cada uno, así aumentando considerablemente la cantidad de muestras, disminuyendo la variabilidad de la respuesta y utilizando probetas con tipologías similares; en este caso se debieron utilizar la misma cantidad de medios de unión, disposición y calidad, por lo que las uniones solo se diferenciarían en el diámetro. Así se hubiese estudiado la capacidad y comportamiento de un mismo tipo de unión, eliminando variables que afectan directamente el comportamiento (calidad del perno) y el grado de confiabilidad (número de replicas, varianza de las respuestas) aumentando el grado de confianza de un 3% a 6%.

Para llegar a grados de confiabilidad sobre el 80% se requiere aumentar notablemente la cantidad de muestras, aumentar la diferencia mínima a detectar que se considere importante, y disminuir la variabilidad de la respuesta.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

5.1.1. Resultados experimentales

- El modo de falla presente en las uniones depende de la calidad del perno y la resistencia al aplastamiento de la madera. En el caso de uniones con perno de $\frac{1}{2}$ ", el modo de fluencia fue el I. Este comportamiento se originó producto del agotamiento total de la resistencia al aplastamiento de la madera y el hundimiento del medio de unión metálico, ya que la calidad del perno era superior a la de uno corriente; en cambio en uniones con perno de $\frac{5}{8}$ ", el comportamiento de la falla fue más uniforme, es decir, los materiales que conformaron las uniones aportaron de igual forma resistencia ante las sollicitaciones, ya que los materiales alcanzaron su capacidad límite más allá de la capacidad teórica, independientemente del diámetro del perno, por lo que se recomienda desde el punto de vista económico fabricar uniones utilizando pernos con calidades normales de aproximadamente 310 Mpa.

- La disminución de la capacidad en las uniones con 5 pernos por hilera de $\frac{1}{2}$ " y en las uniones de 4 pernos por hilera de $\frac{5}{8}$ ", se debe exclusivamente en las condiciones de apoyo del espécimen, por ello se debe tener mayor cuidado en la ejecución de los ensayos, con el objetivo de no perder la probeta y mantener un nivel de seguridad adecuado, para no dañar los equipos y al experimentador.

5.1.2. Resultados Teóricos y Estadísticos

- El factor de ajuste 2.5, involucra las condiciones reológicas de la madera, observadas de un ensayo normalizado de 5 a 10 minutos, extrapoladas a la duración normal de 10 años y la condición de ignorancia de los investigadores respecto a la extrapolación de las condiciones de laboratorio a la realidad práctica.
- La capacidad desarrollada por una unión con un conector, no es extrapolable a uniones con múltiples medios de unión, según la teoría, la capacidad total de una unión con múltiples conectores que presentan idénticas características geométricas, mecánicas y modo de fluencia, es la sumatoria de las capacidades admisibles de cada medio de unión, pero que según la experiencia, la capacidad desarrollada por los especímenes es mucho mayor a la capacidad teórica, la cual incluye el factor de ajuste de 2.5.

- El factor de modificación por longitud de hilera, minora la capacidad de carga de una unión. En la práctica, esto se cumple solamente en uniones que están conformadas por pernos de calidades normales, ya que la resistencia total, depende del grado de aplastamiento de la madera y la capacidad del perno.
- En el caso de uniones con pernos de alta resistencia, el factor de modificación tiene valores mayores a la unidad, ya que la resistencia de la unión, depende del agotamiento de la capacidad al aplastamiento de la madera, produciéndose en este caso, el hundimiento del medio de unión.
- El factor de modificación por longitud de hilera práctico es inferior al teórico, en el caso de uniones con perno corriente, debido a que la capacidad total de uniones con múltiples medios de unión es superior a la teórica. Este factor es el cociente entre el promedio de las capacidades entregadas por los ensayos de las uniones de un mismo tratamiento, y el producto entre del promedio de las capacidades de las uniones con un perno del mismo tipo y la cantidad total de conectores que componen la unión múltiple.

- La teoría del “5% del diámetro del perno” es más conservadora que el control de deformaciones especificado por la NCH 1198, esto cumpliéndose para medios de unión menores a 5/8”, en el caso de utilizar pernos de mayor diámetro, el nivel de deformación será mayor.
- El grado de incidencia del diámetro y el número de conectores por hilera en la capacidad de la unión es significativa, el diámetro del perno y el número de medios de unión aumenta la capacidad de extracción lateral y la capacidad total de la unión respectivamente, ya que estos parámetros son directamente proporcionales, pero según la experiencia la capacidad real de la unión es mucho mayor.
- La variabilidad de la respuesta, es consecuencia de heterogeneidad de la madera, calidad del medio de unión, construcción de las uniones y ejecución de los ensayos experimentales, ya que en algunos casos, las respuestas dentro de un mismo tratamiento pueden diferenciarse notablemente, debido a presencia de nudos, orientación de la fibra, fisuras en la madera, correcta perforación y disposición de los agujeros, continuidad y excentricidad de la carga, problemas de pandeo y condiciones de apoyo en la probeta.

- La interacción entre las variables, diámetro del perno y medios de unión por hilera es solo matemática, ya que si todas las uniones se hubiesen ensayado en un marco de carga automatizado como el N°4, la variabilidad en la respuesta debido a las condiciones de apoyo, continuidad y excentricidad de la carga serían menores. La capacidad de la unión, hubiese incrementado en los casos de uniones con 5 pernos por hilera de 1/2" y 4 pernos por hilera de 5/8", y la capacidad seguiría la tendencia lineal e incremental del resto de los especímenes.
- El grado de confiabilidad del estudio o potencia, está relacionado con el parámetro Φ y el nivel de significación α a través de las curvas de operación característica, para incrementar el grado de confiabilidad es necesario aumentar el número de réplicas por tratamiento, con el objetivo de eliminar las muestras menos representativas en capacidad y disminuir el nivel de significación. Por el contrario sería necesario aumentar la mínima diferencia a detectar, ya que las probetas de cada uno de los tratamientos presentan el mismo modo de fluencia, por lo que la diferencia de carga que se puede considerar como significativa podría incrementarse, finalmente, podría hacerse el análisis estadístico con resultados mucho más representativos y confiables.

5.2. RECOMENDACIONES

5.2.1. Para evitar la variabilidad de la respuesta

- Aumentar la cantidad de especímenes destinados a ensayos, con el objetivo de eliminar las uniones menos representativas en capacidad. Normativas extranjeras recomiendan ensayar un mínimo de 30 probetas por tratamiento.
- Considerar el mismo tipo de madera para las piezas que conformaran la unión, con respecto a sus propiedades mecánicas y clase estructural.
- Evitar utilizar maderas jóvenes
- Evitar utilizar piezas con presencia de nudos, fisuras o irregularidades
- La disposición de los medios de unión sea lo mas fiel a lo proyectado
- Las terminaciones o extremos de las uniones sean lo mas paralelas posible

- El almacenamiento de la madera sea en un lugar en donde las condiciones ambientales no estén sujetas a variaciones considerables (Humedad y temperatura)
- Disminuir el diámetro de los medios de unión para aumentar el la cantidad de hileras y disminuir los distanciamientos mínimos entre conectores.

5.2.2. Para evitar el efecto de pandeo en uniones sometidas a compresión axial

- Realizar ensayos a tensión
- Mejorar las condiciones de apoyo de la unión, con el objetivo de evitar factores de longitud efectiva que mayores la esbeltez de la pieza.
- Se recomienda aumentar la sección transversal a la sollicitación.
- Disminuir la longitud de la hilera de medios de unión en sentido paralelo a la sollicitación..

BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSON, G.T., T, 2001. Experimental Investigation of Group Action Factor for Bolted Wood Connections. Tesis Ingeniero Civil. Virginia, Virginia Polytechnic Institute and State University, Departamento de Ingeniería Civil.
- HEINE, C . T, 2001. Simulated Response of Degrading Hysteretic Joints With Slack Behavior. Tesis Ingeniero Civil. Virginia, Virginia Polytechnic Institute and State University. Departamento de Ciencia de la madera y productos del bosque.
- Núñez, C. 1994, Diseño de Uniones Estructurales en Madera con Barras Lisas de Acero, Tesis Ingeniero Civil en Obras civiles. Santiago, Universidad de Santiago de Chile. Departamento de Ingeniería Civil en Obras Civiles. 195p.
- CERDA, C. y CORTEZ, H. 1997. Ensayos de secado en madera de coigüe de 30 mm de espesor. Seminario Ingeniero de Ejecución en Maderas. Concepción, Universidad del Bio Bio. Departamento de Ingeniería en Maderas. 126p.

- MONTGOMERY, D.C y RUNGER G.C. 1996. Probabilidad y estadística aplicadas a la Ingeniería. D. F México, McGraw-Hill. 1008p.
- MONGOMERY, D. C. 2003. Diseño y análisis de experimentos. 2ª ed. Limusa, México, McGraw-Hill. 686p.
- FRITZ, A. 2004. La construcción de viviendas en madera, manual. Santiago, Chile, Corma. 643p.
- Norma Chilena, NCH 1198. OF 2006. Madera, Construcciones en Madera, Cálculo, Santiago, Chile. Instituto Nacional de Normalización, 2006.
- Norma Chilena, NCH 987, Madera: Determinación de las propiedades mecánicas, Ensayo de Flexión Estática (método Secundario), Santiago, Chile. Instituto Nacional de Normalización, 1986.
- Norma Chilena, NCH 176/2, Madera: Determinación de la densidad. Santiago, Chile. Instituto Nacional de Normalización, 1986.

- ASTM D 5457-04a, Standard Specification for Computing Reference Resistance of Wood-Bases Materials and Structural Connections for Load and Resistance Factor Design. West Conshohocken, Pennsylvania Estados Unidos. American Society for Testing Materials. 9p
- ASTM D 5652-95, Standard Test Methods for Bolted Connections in Wood and Wood-Bases Products. West Conshohocken, Pennsylvania Estados Unidos. American Society for Testing Materials, 2000. 4p
- ASTM D 5764-97a, Standard Test Method for Evaluating Dowel-Bearing Strength of Wood and Wood-Based Products. West Conshohocken, Pennsylvania Estados Unidos. American Society for Testing Materials, 2002. 5p
- ASTM A 370-02, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. West Conshohocken, Pennsylvania Estados Unidos. American Society for Testing Materials, 2002. 52p.
- AF&PA/ASCE Standard 16-95, LRFD Manual for Engineered Wood Construction. Washington, Estados Unidos. American Forest and paper Association, 1996.

- Grupo Infostat, 2008. Infostat, Software Estadístico. [Windows], <<http://www.infostat.com.ar>.>
- Prisma Consultores, 2007. Statgraphics, Software Estadístico. [Windows], < <http://www.primaconsultores.com.mx/statgraphics.htm>>

**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE PROYECTO DE TÍTULO**

Departamento de Ingeniería Civil			
Título		Estudio del Comportamiento Estructural de Uniones a Escala Real de Madera Pino Radiata con Pernos de Acero, Caso Especifico de Uniones de Cizalle Doble Sometidas a Compresión Axial.	
Nombre Memorista		Jassy Veloso Paredes	
Modalidad	Investigación y Experimentación	Profesor Patrocinante	
Concepto		Ing. Ángela Salinas B	
Calificación			
Fecha		Ingeniero Supervisor	Institución
Comisión			
Ángela Salinas B Profesor Guía	Alexander Opazo V Profesor Comisión	Juan Marcus Sch Profesor Comisión	Genaro Gotelli V Profesor Comisión
Resumen			
<p>La presente investigación, consiste en el estudio del comportamiento de uniones de cizalle doble sometidas a compresión. La normativa NCH 1198 fue actualizada el año 2006, específicamente el capítulo 9 de uniones estructurales, se basa en la teoría de T. L. Wilkinson, de la normativa estadounidense, el cual se rige por el método de tensiones admisibles. Este método entrega la capacidad de una unión a partir de la intersección de la curva carga deformación obtenida de un ensayo y una línea paralela a la zona elástica desplazada en un 5% del diámetro del perno. Se decidió fabricar 32 uniones de cizalle doble con el objetivo de comparar los resultados prácticos con los teóricos aportados por la normativa actualizada. Los resultados experimentales arrojaron que la capacidad de las uniones son mucho mayores a las teóricas, debido a que los materiales que constituyeron las uniones, soportaron y distribuyeron de buena manera la sollicitación aplicada. Los modos de falla presentes en las probetas, fueron el I y el III, concordantes con la predicción hecha por la teoría, estos se debieron por la resistencia al aplastamiento de la madera y la calidad del perno. El grado de confiabilidad del estudio es bajo, debido a la poca cantidad de muestras por tratamiento, por lo que recomienda aumentar a un mínimo de 30 probetas por conjunto, así disminuyendo la variabilidad de la respuesta y aumentando el grado de confiabilidad del estudio.</p>			
Palabras Claves			
Unión, cizalle doble, Compresión, Capacidad, Diámetro, Aplastamiento madera, Modo de falla, Capacidad admisible medio de unión.			

ÍNDICE ANEXO

ANEXO A

REFERENCIA A NORMATIVAS EXTRANJERAS

A.1. Manual for Engineered wood Construction.....	1
A.2. Standard Specification for Computing Reference Resistance of Wood-Based Materials and Structural Connections for Load and Resistance Factor Design, (ASTM D 5457-04a).....	2
A.3. Standard Test Methods for Bolted Connections in Wood and Wood-Based Products (ASTM D 5652-95, Reapproved 2000).....	3
A.4. Standard Test Method for Evaluating Dowel-Bearing Strength of Wood and Wood-Bases Products. (ASTM D 5764-97a, Reapproved 2002).....	5

ANEXO B

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y FABRICACIÓN DE LAS UNIONES

B.1 CONFECCIÓN DE PROBETAS.....	8
B.1.1 Geometría	8
B.2 FABRICACIÓN	14

ANEXO C

EJECUCION DE ENSAYOS

C.1	MARCOS DE CARGA	20
C.1.1	Marco de carga 4 toneladas	20
C.1.2	Marco de carga de 20 toneladas	21
C.1.3	Marco de carga de 30 toneladas	21
C.1.4	Marco de carga 100 toneladas	22
C.2	EJECUCIÓN.....	23

ANEXO D

ENSAYOS DE MATERIALES EXPERIMENTALES

D.1	ENSAYOS A MADERA PINO RADIATA.....	27
D.1.1	Ensayos de densidad anhidra y flexión	27
D.2	HUMEDADES MIEMBROS CENTRALES Y LATERALES UNIONES	29
D.3	ENSAYOS DE PERNOS	30

ANEXO E

TABULACIONES Y GRÁFICOS

E.1	Tabulaciones Capítulo I.....	34
E.2	Tabulaciones Capitulo II.....	35
E.3	Tabulaciones capitulo III.....	39
E.4	Análisis de datos para probetas con pernos de ½”, Método “5% diámetro del perno”.....	40
E.5	Análisis de datos para probetas con pernos de 5/8”, Método “5% diámetro del perno”	56

ANEXO A

REFERENCIA NORMATIVAS EXTRANJERAS

A. ANEXO A

REFERENCIA A NORMATIVAS EXTRANJERAS

A.1. Manual for Engineered wood Construction

La Normativa NCH 1198-2006, esta basada en la normativa americana “*National Design Specification for Wood Construction, NDS 2001*”, el cual se rige por el método de tensiones admisibles. El desarrollo de la presente investigación, se fundamenta en el “*Manual for Engineered wood Construction*” del American Forest, que es un manual práctico de construcción utilizado en Estados Unidos, basado en la normativa NDS antes mencionada.

Este manual, define en su capítulo 7 las uniones mecánicas, refiriéndose a miembros sólidos de madera, como también los medios cilíndricos que conforman la unión. La aplicación de la metodología mencionada, solo es válida para medios de unión cilíndricos (pernos, clavos, tornillos, grapas y pasadores) con un rango de diámetros de $\frac{1}{4}$ in (6.3mm) y 1 in (25.4 mm), como también elementos metálicos tipo placa.

La metodología que entrega este manual, es la misma que nos entrega nuestra normativa con respecto a la configuración básica de las uniones, ubicación de conectores, factores de modificación (humedad, tiempo, temperatura y grupo), como también cargas de extracción lateral.

A.2. Standard Specification for Computing Reference Resistance of Wood-Based Materials and Structural Connections for Load and Resistance Factor Design, (ASTM D 5457-04a).

La normativa americana, ASTM D 5457-04a, especifica el cálculo para estructuras y uniones de madera basado en el método LRFD, esta transforma la capacidad máxima de la unión del método de tensiones admisibles ASD al método de diseño de factores carga y resistencia.

Este código indica el número de muestras por tratamiento que se requieren para un cierto nivel de confianza, el cual a su vez depende del coeficiente de variación de los materiales de fabricación (módulos de elasticidad, densidades, tensiones de fluencia). Según las recomendaciones que entrega este documento, se requieren como mínimo 30 muestras por tratamiento, que pueden ser probadas en estado de falla, ya que el grado de confianza de una población de especímenes, decrece a medida que disminuye el tamaño de la muestra.

Según recomendaciones para este estudio en específico que esta basado en el código ASD el mínimo de probetas a ensayar por tratamiento es de 20 especímenes.

A.3. Standard Test Methods for Bolted Connections in Wood and Wood-Based Products (ASTM D 5652-95, Reapproved 2000).

Esta normativa evalúa la resistencia y funcionamiento de una unión, constituida por un único perno, sometida a una carga estática, que puede ser de compresión o tensión, aplicada paralela o perpendicularmente a la fibra. El objetivo de esta es determinar los efectos de distintos factores en la resistencia de la conexión, como por ejemplo, espesor y ancho de las piezas de madera, distanciamientos mínimos desde los bordes o entre conectores, tipo de conector, tolerancias de fabricación, contenido de humedad, preservantes, especie maderera. Se deben realizar como mínimo 10 pruebas para evaluar los efectos de las variables antes mencionadas.

Para el caso específico de un ensayo a compresión paralelo a la fibra, se utiliza un equipo que usa una placa redonda que aplica directamente la carga sobre la probeta, la deformación es medida por dos celdas, las cuales están calibradas para medir a una razón de 0.001 in (0.026 mm). Los intervalos de carga que se utilizan son lo suficientemente amplios para alcanzar a leer las celdas de deformación y construir de manera correcta la curva de carga deformación. En ensayo dura aproximadamente 10 minutos, este termina cuando la deformación llega a 0.6 in (15 mm).

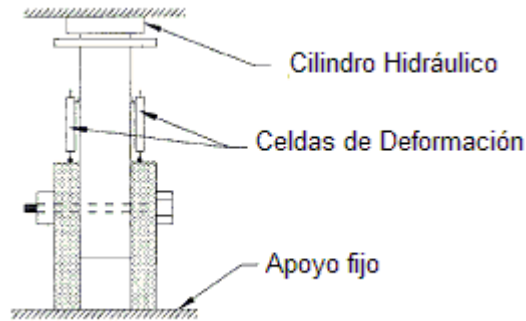


Figura A- 1: Diagrama esquemático equipo de carga de compresión, paralela a la fibra

Los modos de fluencia de uniones dependen del grado de aplastamiento de la madera, por ello, la carga máxima resistida de la probeta se rige por la teoría de T. L. Wilkinson. La carga resistida por la unión, es aquella que se calcula a partir de la intersección entre la curva de carga-deformación real, y una línea paralela a la zona elástica de la curva antes mencionada, desplazada en un 5% del diámetro del perno.

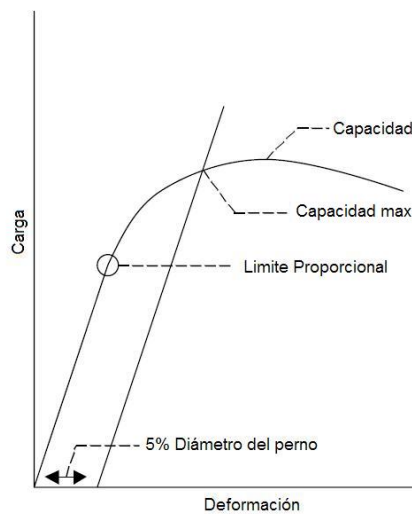


Figura A- 2: Grafica Carga-Deformación, Capacidad máxima de la unión.

A.4. Standard Test Method for Evaluating Dowel-Bearing Strength of Wood and Wood-Bases Products. (ASTM D 5764-97a, Reapproved 2002).

Este código, entrega los procedimientos para evaluar el grado de aplastamiento de un medio de unión sobre la madera, (Teoría de T. L. Wilkinson) el aplastamiento es usado para determinar la resistencia y deformación de una unión sometida a una carga estática, resultado de la transmisión de esfuerzos desde la pieza de madera del miembro central de la probeta, hacia el conector, este método es aplicable a pernos, pasadores, clavos, tornillos, o cualquier elemento de unión cilíndrico.

El método consiste en el ensayo de un paralelepípedo rectangular de madera con una perforación perpendicular al ancho de la pieza, la idea principal es evaluar la resistencia al aplastamiento que provoca el conector dentro de la perforación, esto, mientras el elemento metálico no haya fallado. La máquina de prueba, carga al conector en sus extremos por un periodo de tiempo de 1 a 10 minutos, a una velocidad constante de 0.04 (in/min) (1 mm/min), la deformación provocada por el medio de unión, es medida con un medidor diferencial de deformación (LVDT, linear variable differential transducer)

El ensayo entrega datos sobre los efectos de variables tales como diámetro del conector, diámetro de la perforación, contenido de humedad y densidad de la madera y aplastamiento de la madera producto del conector con respecto a la dirección de la fibra.

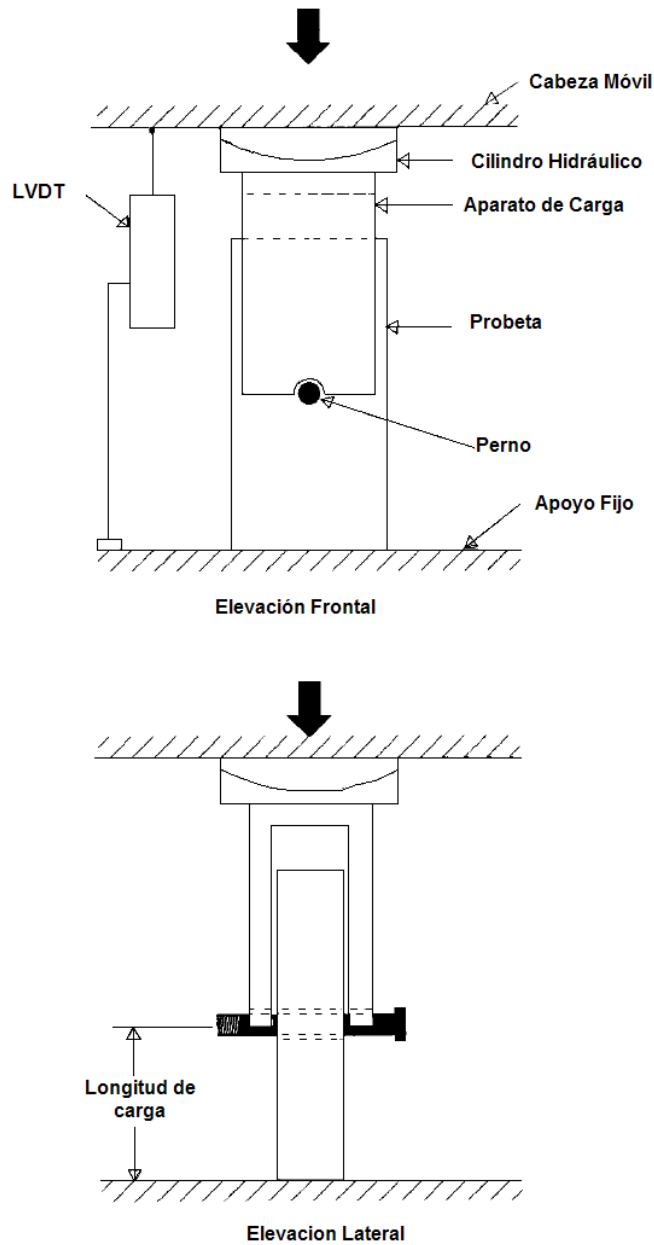


Figura A- 3: Diagrama esquemático, equipo de carga para perforación completa.

ANEXO B

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y FABRICACIÓN DE

LAS UNIONES

ANEXO B

B.1 Confección de probetas

B.1.1 Geometría

Como se mencionó en el Capítulo II y en el Anexo A, las uniones deben cumplir con ciertas características geométricas, específicamente con las distancias mínimas a los bordes, distancia mínima entre conectores en sentido paralelo y perpendicular a las fibras de la madera y mayoración de los diámetros de perforación, con el objetivo de que cada uno de los elementos estructurales desarrolle completamente su capacidad.

También como se vió en el capítulo III, para llevar a cabo el experimento sería necesario confeccionar 32 probetas de uniones, finalmente por el material con que se contaba se decidió una cierta longitud específica para cada tipo de probeta.

Secciones Transversales Mínimas

Todo elemento estructural conformado por madera debe tener una sección transversal mínima, con el objetivo de resistir las cargas a las cuales serán sometidas. La NCH 1198-06, en su párrafo 7.1.2 especifica que *“Las piezas estructurales individuales simples deben tener un espesor mínimo de 25 mm y una sección transversal mínima de 1500 mm², salvo que las especificaciones de los medios de unión exijan dimensiones mínimas superiores”*.

Como se mencionó en el capítulo III, las uniones que se ensayaron son de cizalle doble, las cuales fueron sometidas a compresión. Los miembros laterales tienen una sección transversal igual a la mitad del miembro central, todo con el objetivo de que la carga axial se distribuya equitativamente.

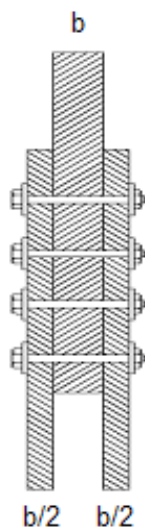
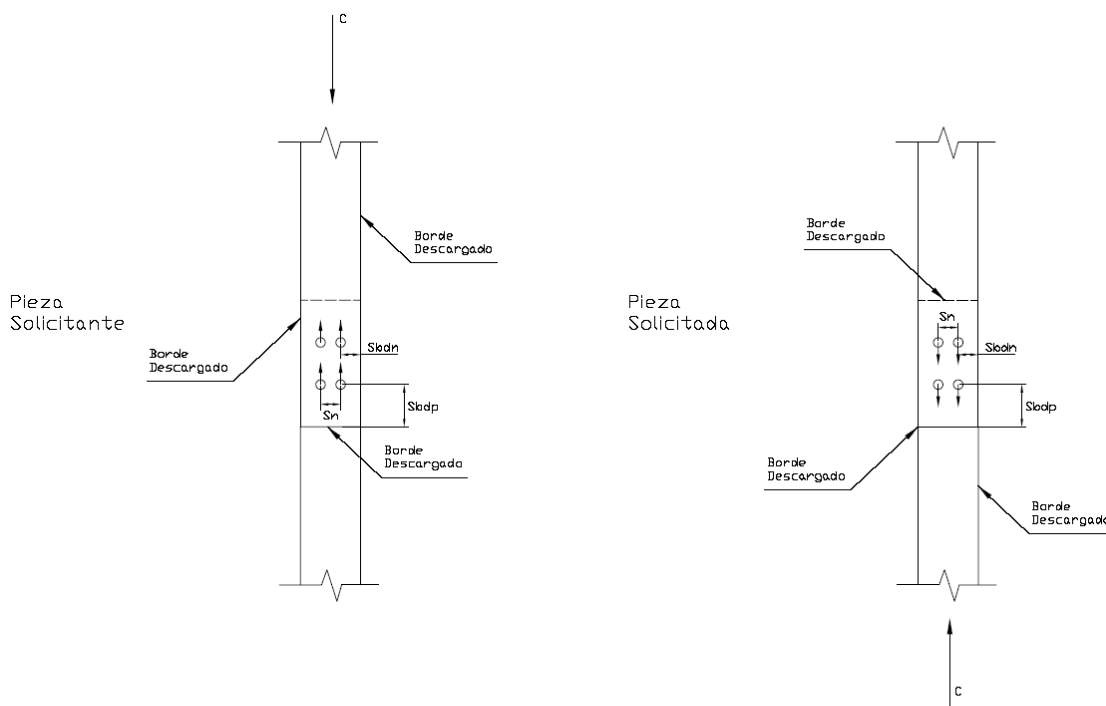


Figura B- 1: Unión de cizalle doble

Distancias Mínimas

Según la NCH 1198-06 en uniones, se deben cumplir distanciamientos mínimos de los medios de unión a los bordes, los cuales dependen exclusivamente del tipo de unión y el diámetro del conector. En el caso específico de uniones sometidas a compresión se tiene la designación de los bordes, cargados y descargados.



S_{bdn} : Espaciamiento mínimo entre el medio de unión y un borde descargado, medido en dirección paralela a la fibra.

S_{bdp} : Espaciamiento mínimo entre el medio de unión y un borde descargado, medido en dirección normal a la fibra.

Figura B- 2: Bordes cargados y descargados en una unión comprimida

A continuación se muestran las distancias mínimas requeridas y las dimensiones finales de las uniones.

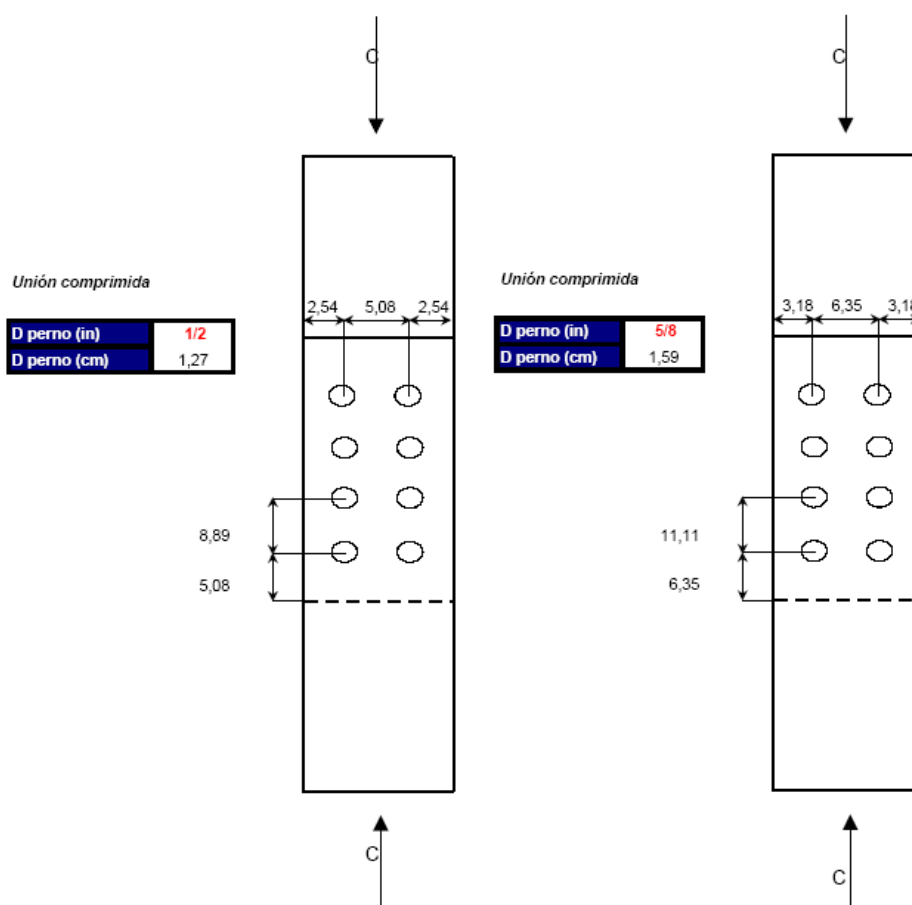


Figura B- 3: Distancias mínimas a los bordes en uniones comprimidas.

Uniones perno 1/2"

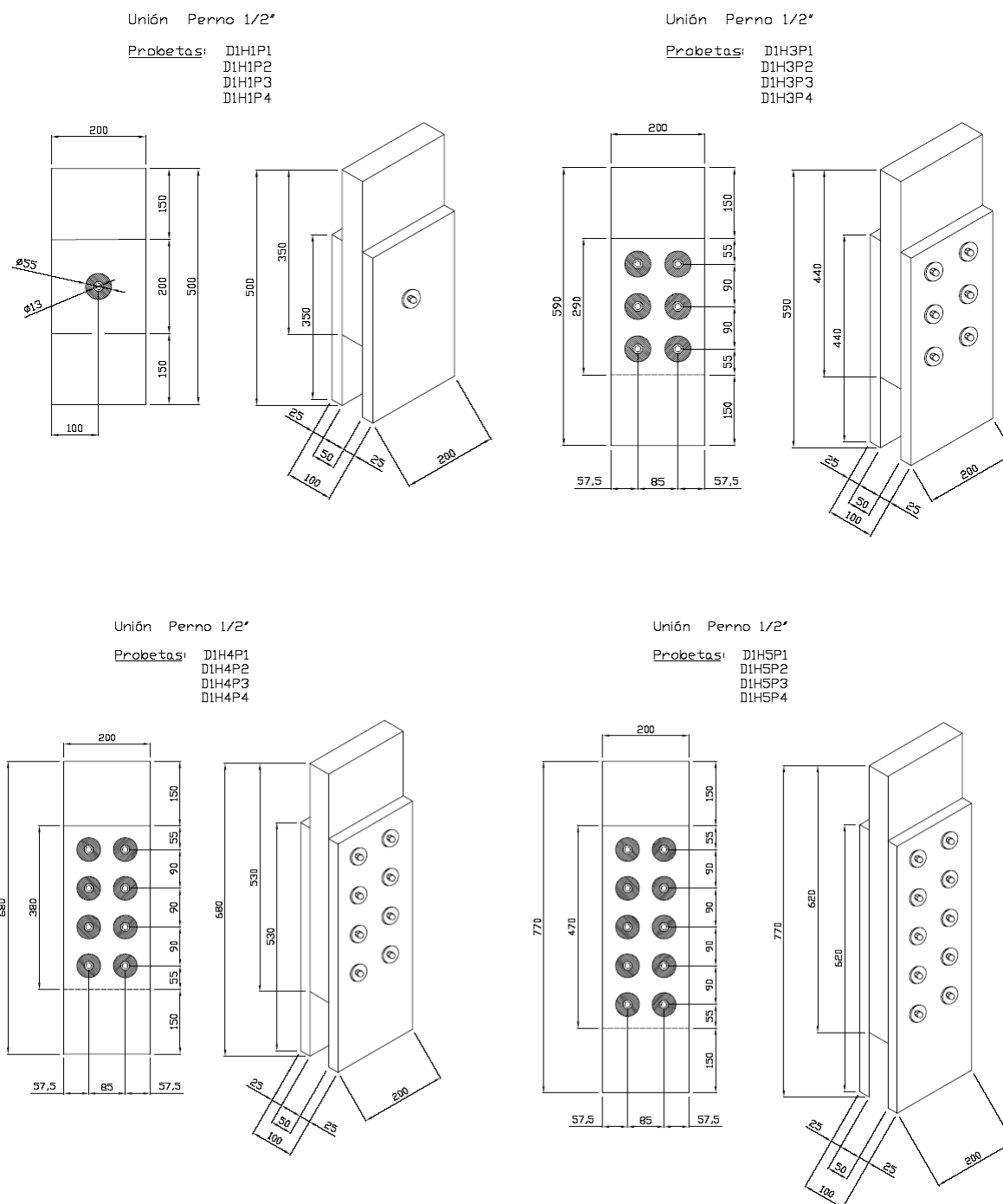


Figura B- 4: Dimensiones finales y distancias mínimas, uniones con pernos 1/2" (distancias en mm)

Uniones perno 5/8"

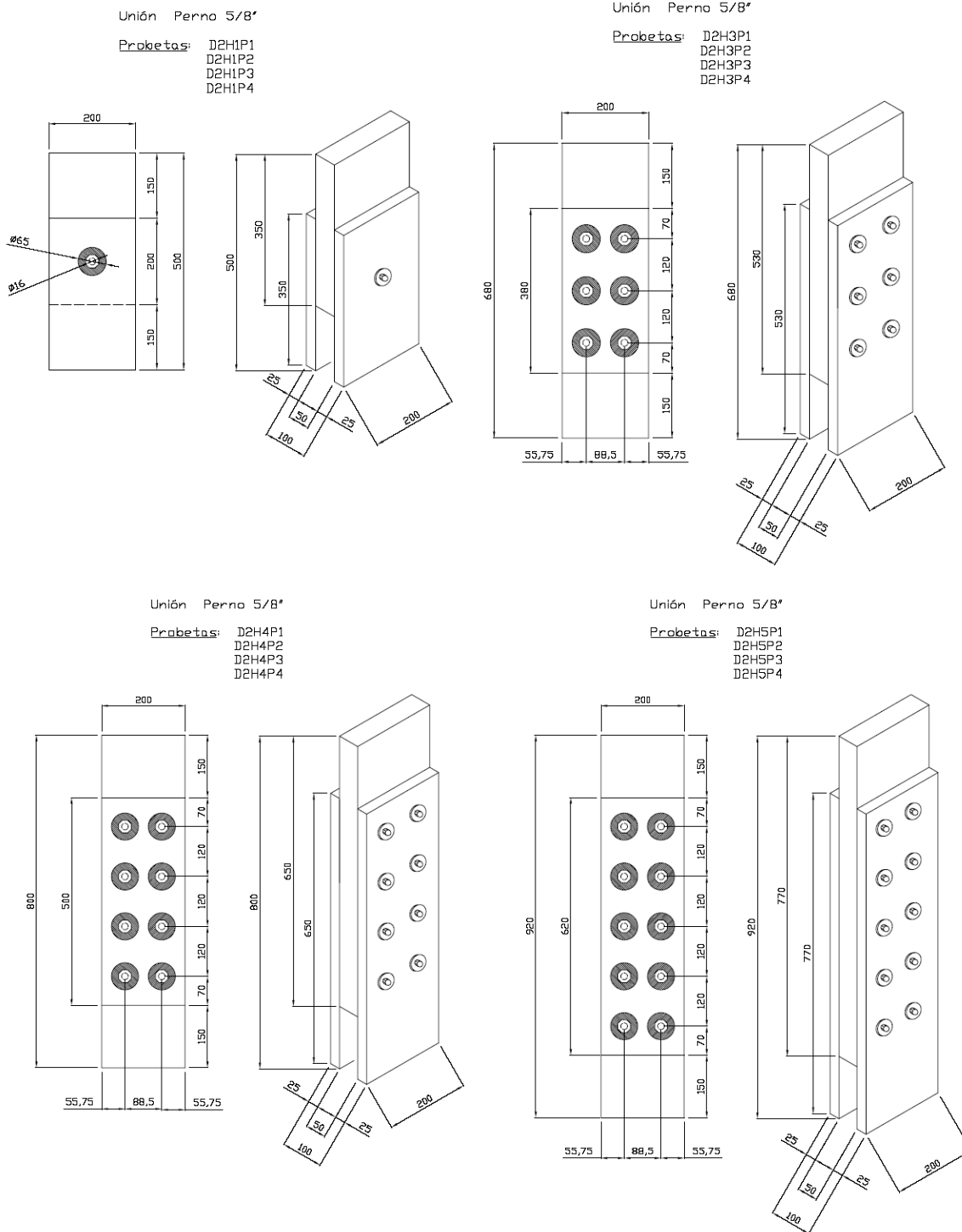


Figura B- 5: Dimensiones finales y distancias mínimas, uniones con perno 5/8" (distancias en mm)

B.2 Fabricación

La correcta fabricación de las uniones, trae consigo un buen desarrollo de los ensayos experimentales, ya que se reducen en forma considerable errores que pueden presentarse en la ejecución de los ensayos.

A continuación, se hará una descripción de cada una de las etapas de fabricación de las probetas.

Cepillado

Para cumplir con las especificaciones de secciones mínimas, se debió corroborar las dimensiones de las piezas de madera donadas por el CATEM “Centro de Alta Tecnología de la Madera” de la Universidad del Bio Bio. La valiosa donación consistió en 40 piezas de madera tipo G1, de sección transversal 30 x 195 mm y 2.5 m de largo, las cuales constituirían las piezas laterales. Para llegar a la dimensión mínima de 25 mm la madera debió rebajarse mediante cepillado.



Figura B- 6: Cepilladora regruesadora

Las piezas centrales de las uniones fueron constituidas por madera aserrada, adquirida en locales establecidos de Concepción. Esta madera aserrada del tipo G1 en estado bruto, tiene una sección transversal de 200 x 50 mm y 3.2 m de largo.



Figura B- 7: Madera aserrada

Corte

Para la fabricación y dimensionamiento real de las probetas, se debió cortar cada una de las piezas de madera, esta acción se ejecutó con la ayuda de una sierra circular.



Figura B- 8: Sierra Circular

Perforación

Como se mencionó en el capítulo II, la disposición recomendada por la NCH 1198 define la resistencia de la unión según el número de pernos por hilera. Una vez definida la cantidad de pernos y sus distanciamientos mínimos, se procedió a la perforación de las uniones con un taladro vertical magnético y manual.



Figura B- 9: Taladro vertical magnético y taladro manual

Una vez perforadas las piezas de la unión, se procedió a la colocación de las golillas y los pernos.



Figura B- 10: Colocación de pernos

Apriete de pernos

El apriete de pernos se ejecutó de forma manual, se hizo hasta que la madera alcanzara la tensión máxima de aplastamiento normal a la fibra de la madera, registrándose claramente en punto en donde la madera comenzara a aplastarse debido al apriete.



Figura B- 11: Chicharra y llave inglesa



Figura B- 12: Apriete de Pernos

Una vez unidas las piezas, cepilladas, cortadas, unidas por los pernos y apretadas están listas para poder ser ensayadas.



Figura B- 13: Probetas listas para ensayar

ANEXO C
EJECUCIÓN DE ENSAYOS

ANEXO C

EJECUCIÓN DE ENSAYOS

C.1 MARCOS DE CARGA

La ejecución de los ensayos consistió en cuatro etapas, se debieron utilizar marcos distintos, ya que todos contaban con una distinta capacidad de carga.

C.1.1 Marco de carga 4 toneladas

Como se mencionó en el capítulo III, el primer marco de carga que se utilizó, esta conformado por una serie de perfiles circulares, los cuales están empotrados directamente al suelo, y perfiles H. Este marco de carga tiene una capacidad máxima de 4 toneladas y se ensayaron las probetas D1H1P1, D1H1P2, D1H1P3, D1H1P4.



Figura C- 1: Marco de carga de 4 ton

C.1.2 Marco de carga de 20 toneladas

El segundo marco, constituido por el mismo tipo de elementos que el primero, es mucho más alto y con mucha mayor capacidad. En este se ensayaron las probetas D1H3P1, D1H3P2, D1H3P3, D1H3P4.



Figura C- 2: Marco de carga 6 toneladas.

C.1.3 Marco de carga de 30 toneladas

El tercer tipo de marco es mucho más robusto, también constituido por una serie de perfiles H y algunos atezadores, se utilizó en las probetas tamaño medio, su capacidad máxima es de 30 toneladas. Las probetas que fueron ensayadas en este fueron D1H4P1, D1H4P2, D1H4P3, D1H4P4, D1H5P1, D1H5P2, D1H5P3, D1H5P4, D2H1P1, D2H1P2, D2H1P3, D2H1P4, D2H3P1, D2H3P2, D2H3P3, D2H3P4, D2H4P1, D2H4P2, D2H4P3, D2H4P4.



Figura C- 3: Marco de carga 30 toneladas.

C.1.4 Marco de carga 100 ton

El tercer tipo similar al segundo, tiene una capacidad máxima de 100 toneladas, el cual se utilizó para las probetas de mayor tamaño, en este caso se ensayaron las probetas D2H5P1, D2H5P2, D2H5P3, D2H5P4.



Figura C- 4: Marco de carga 100 toneladas.

C.2 Ejecución

Como todo circuito óleo-hidráulico su funcionamiento se basa en la Ley de Pascal, la energía mecánica con la que era accionada la bomba manual, era transformada en energía hidráulica a través de un fluido incompresible, en este caso aceite hidráulico, el cual era entregado al cilindro, provocando el deslizamiento del pistón, y provocando la carga de compresión. Como la bomba era de funcionamiento manual, se intentó una carga constante a través del tiempo, con el objetivo de no variar la velocidad de carga del ensayo.

La probeta se centró lo mayor posible en el marco, con el objetivo que el vástago del cilindro se ubicara en el eje axial de la probeta, así se evitarían excentricidades y giros de la pieza a ensayar.

La carga generada fue registrada por un dispositivo electrónico llamado Data Logger, el cual tiene incorporado una celda de carga, dispositivo físico que se ubica entre el pistón del cilindro hidráulico y la probeta. Este procedimiento se utilizó en el 1er, 2do y 3er marco.



Figura C- 5: Celda de Carga



Figura C- 6: Conjunto Marco de carga, bomba, cilindro y Data Logger.

El cuarto marco, se constituía por una estructura muy similar al tercero, pero este incorporaba un dispositivo electrónico que controlaba la velocidad y cantidad de carga aplicada.



Figura C- 7: Marco de carga 100 toneladas

La deformación en todos los ensayos era medida con deformómetros, en la pieza central se aperraron placas rígidas perpendiculares a esta, las cuales aplastaban el vástago del deformómetro, así se medía la cantidad que descendía la pieza central.



Figura C- 8: Deformómetros sobre placas rígidas.

Las gráficas de carga deformación se fueron elaborando a medida que se incrementaba la carga. En los tres primeros marcos, la carga se aumentaría cada 5 KN, a su vez se media la deformación acumulada en ese momento; en el último marco, la carga se incrementó cada 30 KN y la deformación se media también en ese instante.

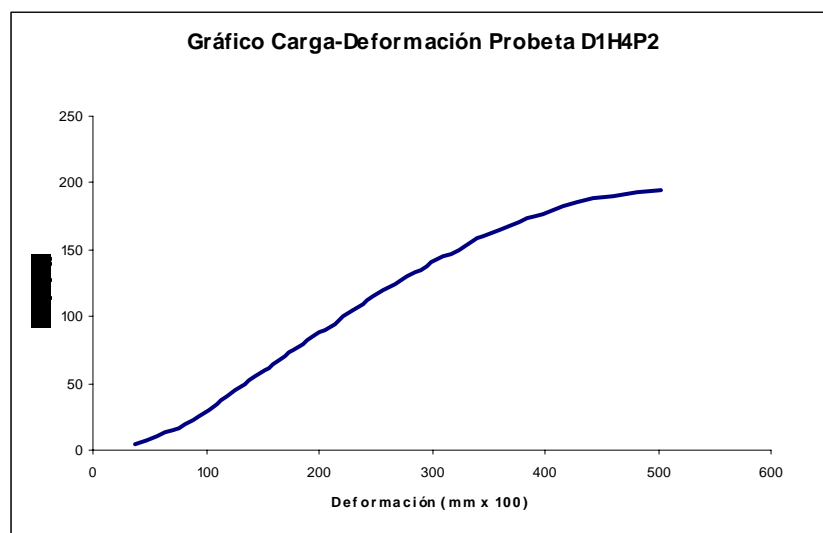


Figura C- 9Gráfica Carga-Deformación.

ANEXO D
ENSAYOS DE MATERIALES EXPERIMENTALES

ANEXO D

ENSAYOS DE MATERIALES EXPERIMENTALES

Los ensayos experimentales dieron a conocer cual era la capacidad de las uniones, pero estos resultados debieron compararse con la carga teórica que entrega nuestra normativa, por ello, se debieron hacer ensayos a los materiales experimentales, madera y pernos, para así conocer sus verdaderas propiedades mecánicas.

D.1 Ensayos a Madera Pino Radiata

Como se comentó en el anexo B, se contó con dos tipos de pino radiata, el primero, donado el CATEM, “*Centro de Alta Tecnología de la Madera*”, de la Universidad del Bío-Bío, que consistió en 40 piezas impregnadas de madera tipo G1, y el segundo, pino radiata del tipo G1 que fue adquirido en locales establecidos de Concepción.

D.1.1 Ensayos de densidad anhidra y flexión

Para conocer las propiedades mecánicas de la madera con la que se fabricaron las probetas, se recurrió al laboratorio de materiales del CATEM, en donde se realizaron ensayos de densidad anhidra y flexión a la madera.

Los ensayos se basaron en la NCH 987, Madera: Determinación de las propiedades mecánicas. Ensayo de Flexión Estática (método Secundario) y en la NCH 176/2 Madera: Determinación de la densidad.

El siguiente cuadro resumen muestra los resultados entregados por el CATEM

Tabla D- 1: Tabla resumen de ensayos mecánicos

Condición	N ° Probeta	MOE (kgf/mm ²)	Densidad (kg/m ³)
Madera Bruta	1	832	508.94
	2	873	510.15
	3	914	499.51
	4	757	458.20
	5	879	507.64
	6	848	462.26
	7	761	466.21
	8	831	472.42
	9	902	466.67
	10	729	460.04
Madera impregnada	1	1099	357.78
	2	1201	380.30
	3	1270	380.62
	4	1194	380.90
	5	1260	434.43
	6	1092	480.28
	7	1170	433.96
	8	1150	463.82
	9	1268	442.20
	10	1121	378.20

Finalmente para el cálculo de las uniones se toman como datos los promedios de cada una de las propiedades.

Tabla D- 2: Tabla promedio de las propiedades mecánicas de la madera.

	MOE (kgf/mm ²)	Densidad (kg/m ³)
Madera Bruta	832.4	481.2
Madera Impregnada	1182.5	413.2

D.2 Humedades miembros centrales y laterales uniones

Tabla D- 3: Tabulación Humedades miembros centrales y laterales uniones

Probeta	Porcentaje Humedad H%		
	Miembro central	Miembro lateral	
		1	2
D1H1P1	12.6	11.2	13.2
D1H1P2	13.2	12.5	12.1
D1H1P3	13.2	11	12.5
D1H1P4	11.2	12.6	13.6
D1H3P1	12.6	13.8	13.2
D1H3P2	12.6	11.6	11
D1H3P3	13.8	13.4	12.6
D1H3P4	13.2	13.5	12.1
D1H4P1	13.4	14.3	11.7
D1H4P2	11.9	14.8	12.3
D1H4P3	11.8	14.6	12.3
D1H4P4	14	11.8	11.3
D1H5P1	9.2	12.1	12
D1H5P2	10.2	11.5	13.2
D1H5P3	12.6	10.6	13.4
D1H5P4	11.2	10	10.3
D2H1P1	10.7	13.2	11.3
D2H1P2	11.3	13.2	10.6
D2H1P3	11.2	12.6	12.6
D2H1P4	12.5	12.1	11.9
D2H3P1	10.6	10.2	11.3
D2H3P2	11.6	13.8	12.6
D2H3P3	11.2	14.4	9.4
D2H3P4	10	13.2	14
D2H4P1	12.5	11	11
D2H4P2	10.7	10.6	10.6
D2H4P3	12	12.2	11.2
D2H4P4	10.2	12.2	9.1
D2H5P1	12.2	13.4	11.3
D2H5P2	11.6	12.2	12.1
D2H5P3	10.4	13.6	11.2
D2H5P4	13.5	12.7	13.1

D.3 Ensayos de Pernos

Para determinar las propiedades del acero que conforman los pernos de unión, se recurrió al laboratorio de materiales del IDIEM, los ensayos se basaron en la normativa ASTM A370-02 “Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products” , pero anteriormente las probetas con las que se realizaron los ensayos fueron confeccionadas por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Bio Bio. Las dimensiones de las probetas también se basan en la normativa antes mencionada.

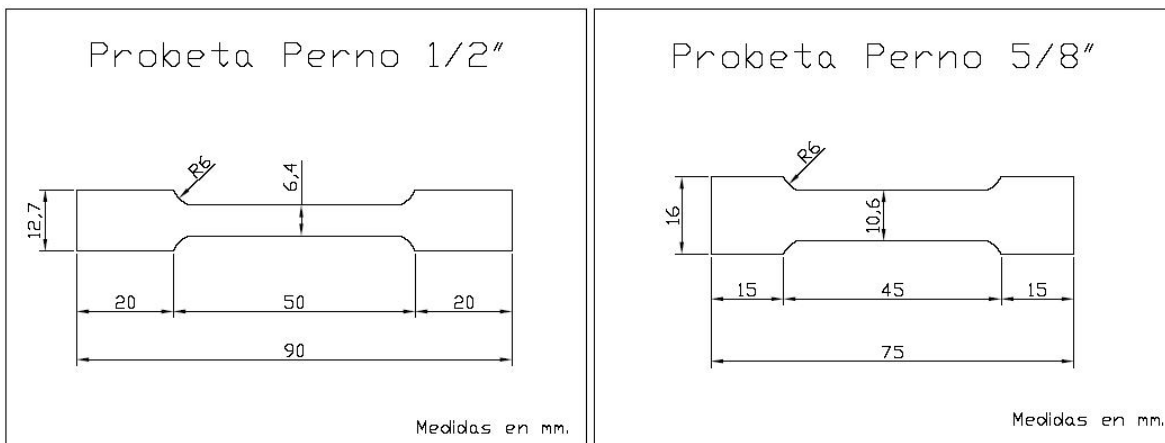


Figura D- 1: Formato probetas de 1/2" y 5/8"

A continuación se adjuntan los certificados entregados por IDIEM con los resultados de los ensayos de tracción y dureza realizados a las probetas.

ANEXO E
TABULACIONES Y GRÁFICOS

E TABULACIONES Y GRÁFICOS

E.1 Tabulaciones Capítulo I.

Tabla E- 1: Humedades de equilibrio de diferentes regiones geográficas del país.

Localidad	Humedad media de equilibrio (%)
Iquique	17
Antofagasta	17
Copiapó	14
La Serena	17
Santiago	14
Chillan	14
Concepción	19
Temuco	17
Valdivia	17
Osorno	17
Puerto Montt	18
Puerto Aysén	18
Punta Arenas	14

Tabla E- 2: Tensiones admisibles y módulos de elasticidad en flexión para Madera aserrada (Pino Radiata H=12%)

Grado	Tensiones admisibles					Módulo de elasticidad en flexión Ef (Mpa)	Índice de aplastamiento en compresión normal Ecn,h (Mpa/mm)
	Flexión	Compresión paralela	Tracción Paralela	Compresión Normal	Cizalle		
	Ff (Mpa)	Fcp (Mpa)	Ftp (Mpa)	Fcn (mpa)	Fcz (Mpa)		
Gs	11.0	8.5	6.0	2.5	1.1	10,500	5.65
G1	7.5	7.5	5.0	2.5	1.1	10,000	5.65
G2	5.4	6.5	4.0	2.5	1.1	8,900	5.65

E.2 Tabulaciones Capitulo II

Tabla E- 3: Agrupación de especies, según su densidad anhidra, a ser considerada en el diseño de uniones.

Grupo	Densidad anhidra (kg/m ³)		Especies comerciales de mayor uso en la construcción
	Condición	Valor medio (ρ _o)	
A	ρ _o < 400	370	Álamo (Fitzroya cupressoides)
		460	Alerce (Fitzroya cupressoides)
		470	Canelo (Drymis winteri)
B	400 < ρ _o < 500	470	Ciprés de la cordillera (Austrocedrus chilensis)
		470	Ciprés de las guaitecas (Pilgerodendron uvifera)
		410	Pino oregón (Pseudotsuga menziesii)
		450	Pino radiata (Pinus radiata)
		570	Araucaria (Araucaria araucana)
C	500 < ρ _o < 600	590	Coigue de Chiloé (Nothofagus nitida)
		510	Laurel (Laurelia sempervirens)
		540	Lenga (Nothofagus pumilio)
		596	Lingue (Persea lingue)
		520	Mañío hojas punzantes (Podocarpus nubigenus)
		550	Olivillo (Aextoxicon punctatum)
		510	Raulí (Nothofagus alpina)
520	Tepa (Laurelia philippiana)		
D	ρ _o > 600	740	Algarrobo (Prosopis Chilensis)
		650	Coigûe (Nothofagus dombeyi)
		620	Coigue de Magallanes (Nothofagus betuloides)
		800	Eucalipto (Eucapiltus globulus)
		630	Roble (Nothofagus alpina)
		680	Roble del Maule (Nothofagus glauca)
		700	Tineo (Weinmannia thischosperma)
		630	Ulmo (Eucryphia cordifolia)

Tabla E- 4: Factores de modificación por contenido de humedad de la madera, K_{UH}

Medio de unión	Condición de la madera		Factor de modificación K_{UH}
	Durante la fabricación	En servicio	
Extracción lateral			
Pernos, Tirafondo, pasadores y clavos.	$\leq 19\%$	$\leq 19\%$	1.00
	$> 19\%$	$\leq 19\%$	0.40 ¹⁾
	Cualquiera	$> 19\%$	0.70

1) $K_{UH} = 0.7$, para medios de unión con diámetro D, menor a 6.3 mm.

Tabla E- 5: Factor de modificación por temperatura, K_{UT}

Condición de servicio	K_{UT}		
	$T \leq 38^\circ\text{C}$	$38^\circ\text{C} < T \leq 52^\circ\text{C}$	$52^\circ\text{C} < T \leq 67^\circ\text{C}$
Seca ¹⁾	1.0	0.8	0.7
Húmeda	1.0	0.7	0.5

- 1) Uniones en madera, con contenido de humedad 19%, y usada en condiciones permanentemente secas, como es el caso de la mayoría de las construcciones cubiertas.
- 2) Madera no secada, o parcialmente secada o expuestas a condiciones de servicio húmedas.

Tabla E- 6: Factores de ajuste, FA

Diámetro medio de unión	Modo de fluencia	FA
6.4 mm ≤ D ≤ 25 mm	I _C , I _I	4 · K _α
	II	3.6 · K _α
	III _C , III _I , IV	3.2 · K _α
D < 6.4 mm	I _C , I _I , II , III _C , III _I , IV	K _d ¹⁾
<p>Notas:</p> $K_{\alpha} = 1 + \frac{\alpha_{\max}}{360^{\circ}}$ <p>Con α_{\max} : Máxima desangulación entre la dirección de la fuerza y de la fibra de cualquier pieza en la unión. ($0^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$)</p> <p>$K_d = 2.2$ Para $D \leq 4.3$ mm</p> $K_d = \frac{10 \cdot D + 12.7}{25.4}$ Para $4.3 \text{ mm} \leq D \leq 6.4 \text{ mm}$ <p>1) Para tornillos o tirafondos cuyo diámetro nominal sea mayor o igual que 6.4 mm de diámetro de la zona roscada sea menor a 6.4 mm, $FA = K_d \cdot K_{\alpha}$</p>		

Tabla E- 7: Densidad normal de algunas maderas crecidas en Chile

Grupo	Especie maderera nombre común	Densidad normal, (kg/m ³)	
		Valor medio ρ_{12}	Valor característico ρ_{12, k^*}
A	Álamo	399	385
	Alerce	492	412
	Canelo	502	470
B	Ciprés de la Cordillera	502	420
	Ciprés de las Guaitecas	502	417
	Pino radiata	476	391
	Pino oregón	441	350
	Araucaria	603	505
C	Coigue de Chiloé	623	533
	Laurel	543	455
	Lenga	573	505
	Lingue	629	526
	Mañío hojas punzantes	553	463
	Olivillo	583	488
	Raulí	543	454
	Tepa	552	469
	Algarrobo	771	645
	Coigûe	691	425
Coigue de Magallanes	653	546	
D	Eucalipto	830	564
	Roble	668	559
	Roble del Maule	712	634
	Tineo	736	613
	Ulmo	660	550

*) Definido con el percentil de 5% de exclusión

E.3 Tabulaciones capítulo III

Tabla E- 8: Mayoración de los diámetros de los agujeros respecto al diámetro del perno, mm.

Diámetro del perno D (mm)	Humedad de la madera en condiciones de servicio			
	H=6%	H=12%	H=15%	H ≥ 20%
D ≤ 20	1.6	0.8	0.8	0.8
20 < D ≤ 24	2.5	1.6	0.8	0.8
24 < D ≤ 30	2.5	1.6	1.6	0.8

Tabla E- 9: Dimensiones mínimas de arandelas para uniones apernadas estructurales.

Diámetro del perno	mm	10	12	16	20	> 20
Espesor arandela	mm	5	5	6	6	8
Diámetro ext (arandela circular)	mm	50	55	65	75	95
Lado (arandela cuadrada)	mm	45	50	60	65	85

Tabla E- 10: Espaciamientos mínimos de pernos y pasadores a los bordes

Naturaleza del borde	Desangulación Fuerza perno- Fibra madera	
	0°	90°
Cargado	Sbcp=7D	Sbcn=4D
Descargado	Sbdp=4D	Sbdn=2D

Tabla E- 11: Espaciamientos mínimos entre pernos y pasadores

Dirección	Designación
Según la dirección de la fibra	Sp=7D
Normal a la dirección de la fibra	Sn=4D

E.4 Análisis de datos para probetas con pernos de 1/2”, Método “5% diámetro del perno”.

a) Probeta D1H1P1

Tabla E- 12: Datos curva Carga-Deformación, Probeta D1H1P1

Carga (kg)	Δ (mm x 100)
50	0
197	15
335	19
464	23
602	29
759	37
878	46
1016	55
1154	60
1292	66
1430	83
1568	125
1707	170
1854	315

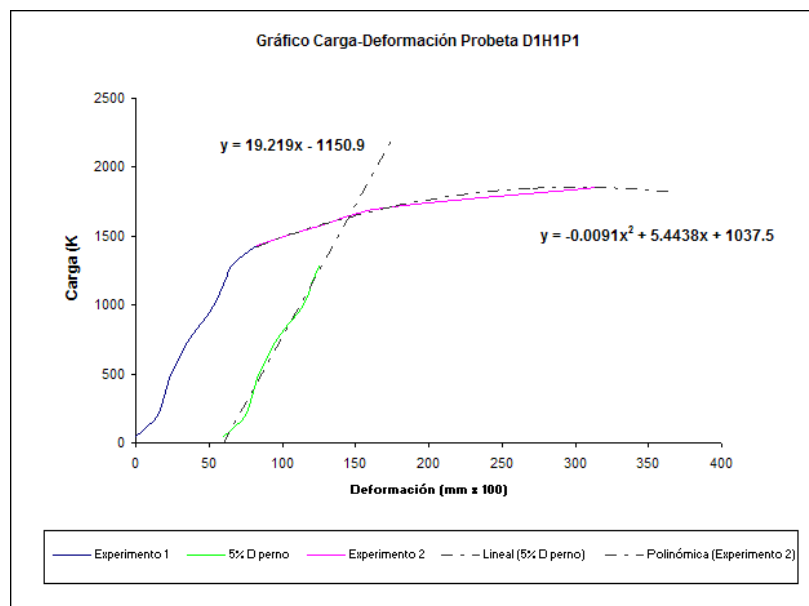


Gráfico E- 1: Curva Carga-Deformación Probeta D1H1P1

b) Probeta D1H1P2

Tabla E- 1: Datos curva Carga-Deformación, Probeta D1H1P2

Carga (kg)	Δ (mm x 100)
50	0
142	52
197	70
326	76
464	86
602	119
740	150
878	185
1007	210
1154	236
1283	265
1430	306
1568	365
1707	390

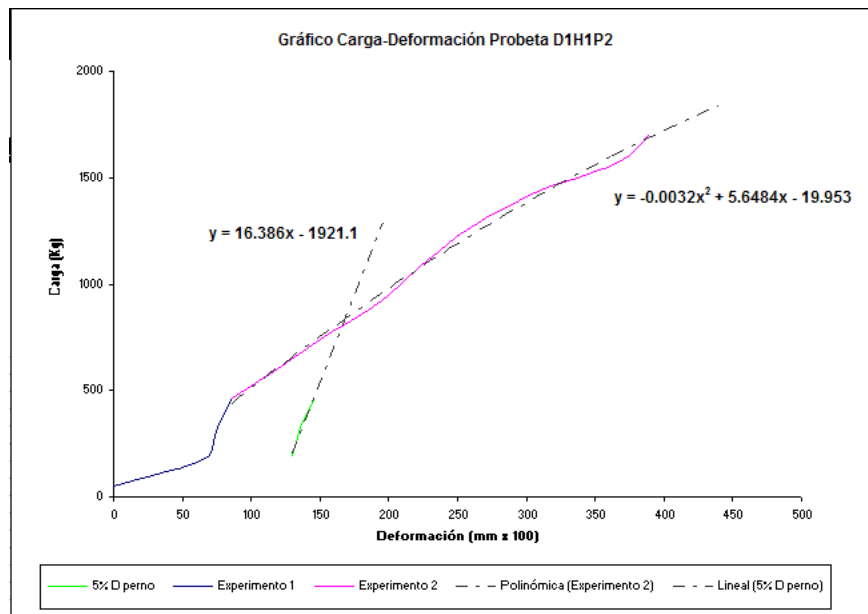


Gráfico E- 2: Curva Carga-Deformación Probeta D1H1P2

c) Probeta D1H1P3

Tabla E- 2: Datos curva Carga-Deformación, Probeta D1H1P3

Carga (kg)	Δ (mm x 100)
50	0
142	5
234	7
326	10
418	11
510	15
602	20
694	26
805	35
887	43
980	54
1062	68
1154	82
1256	95
1357	108
1430	118
1522	134
1614	148
1707	162
1799	180
1891	198
1983	224
2075	260
2203	315

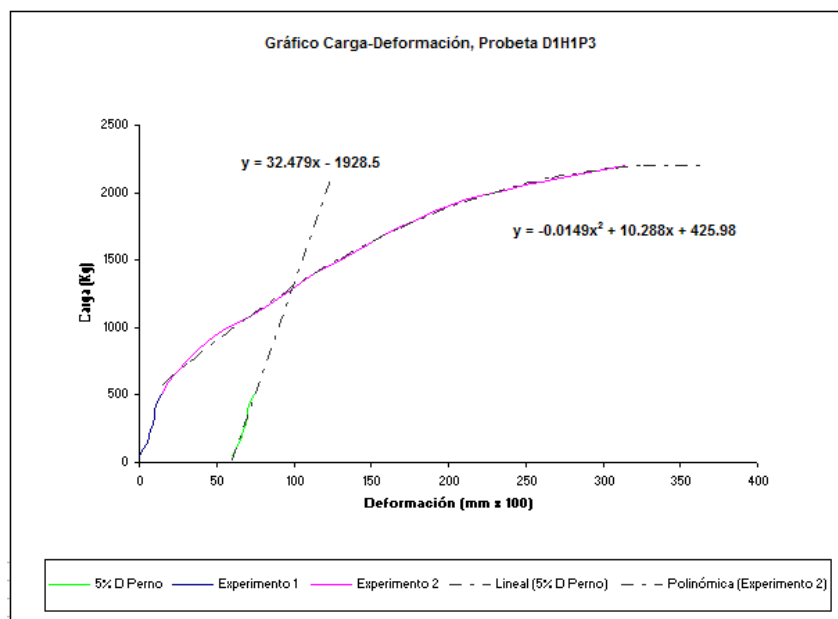


Gráfico E- 3: Curva Carga-Deformación Probeta D1H1P3

d) Probeta D1H1P4

Tabla E- 3: Datos curva Carga-Deformación, Probeta D1H1P4

Carga (kg)	Δ (mm x 100)
50	0
207	100
335	105
464	110
602	116
740	122
970	143
1108	179
1246	205
1394	230
1522	248
1670	272
1799	299
1891	320

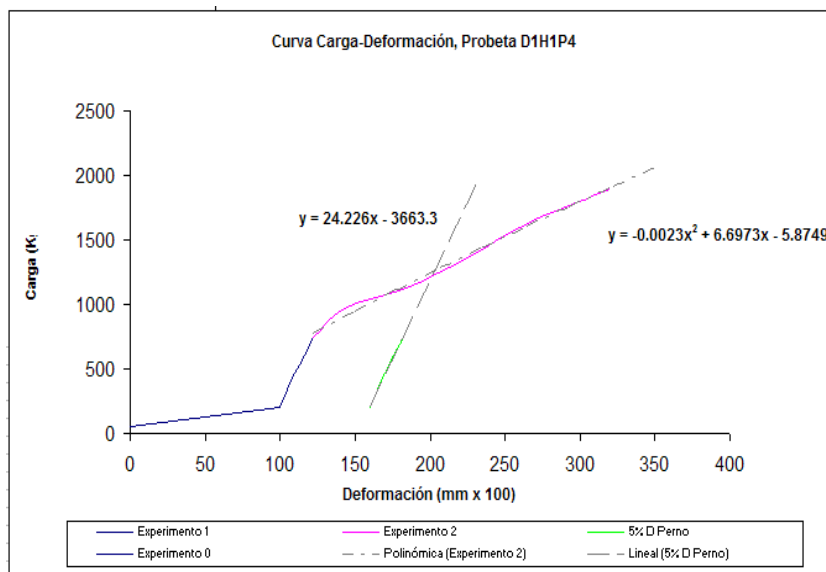


Gráfico E- 4: Curva Carga-Deformación, Probeta D1H1P4

e) Probeta D1H3P1

Tabla E-5: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D1H3P1

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
6.3	26
10.5	28
15.2	31
20.6	54
25.0	62
30.0	72
35.3	78
40.0	84
45.0	89
50.0	94
63.0	120
73.0	135
82.0	167
84.5	170
90.0	172
95.7	183
100.3	191
105.0	201
111.0	213
115.4	223
120.0	233
125.0	245
130.0	260
135.0	276
140.0	296
145.0	320
150.0	350

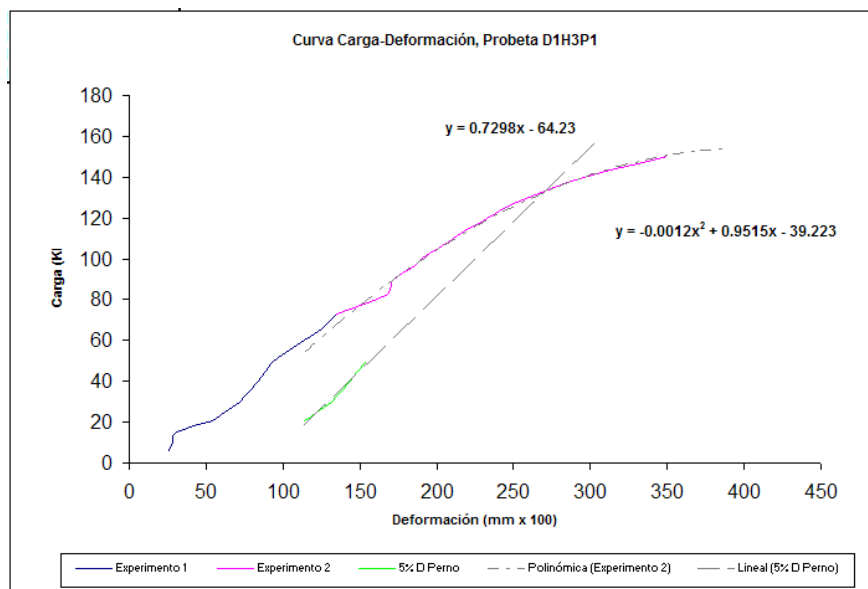


Gráfico E- 5: Curva Carga-Deformación, Probeta D1H3P1

f) Probeta D1H3P2

Tabla E- 6: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D1H3P2

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
8.5	32
10.0	36
15.4	48
20.0	58
25.0	68
30.0	77
35.0	85
40.0	92
45.2	98
50.4	105
55.0	110
60.0	117
65.1	122
70.1	128
75.0	134
80.0	139
85.0	145
90.0	152
95.0	160
100.0	170
105.0	190.0
110.0	205.0
115.0	223.0
120.0	239.0
125.0	254.0
130.3	274.0
135.0	293.0

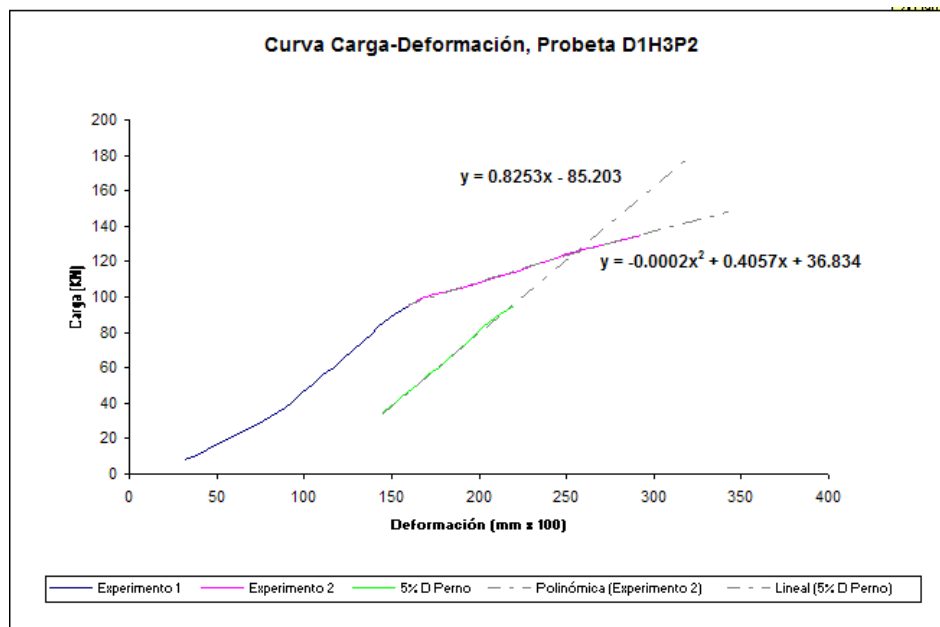


Gráfico E- 6: Curva Carga-Deformación, Probeta D1H3P2

g) Probeta D1H3P3

Tabla E- 7: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D1H3P3

Carga (KN)	Δl (mm x 100)
5	15
10	30
15	43
20	54
25	68
30	80
35	93
40	105
45	118
50	132
55	152
60	176
65	196
70	216
75	232
80	248
86	264
90	280
95	296
100	310
105	326
110	342
115	356
120	375
125	393
130	410
135	425
140	445
145	460
150	485
155	514

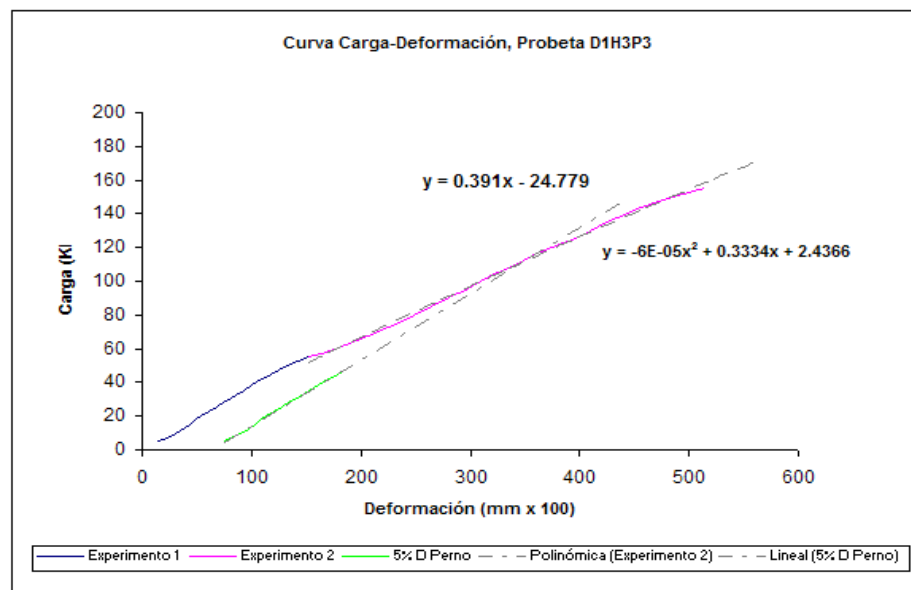


Gráfico E- 7: Curva Carga-Deformación, Probeta D1H3P3

h) Probeta D1H3P4

Tabla E-8: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D1H3P4

Carga (KN)	Δl (mm x 100)
5	10
10	25
15	38
20	49
25	61
30	72
35	83
40	99
45	114
50	127
55	141
60	160
65	188
70	210
75	229
80	242
85	253
90	265
95	275
100	285
105	298
110	310
115	320
120	335
125	350
130	364
135	376
140	395
145	407
150	420
155	436
160	455
165	474
170	495
175	525

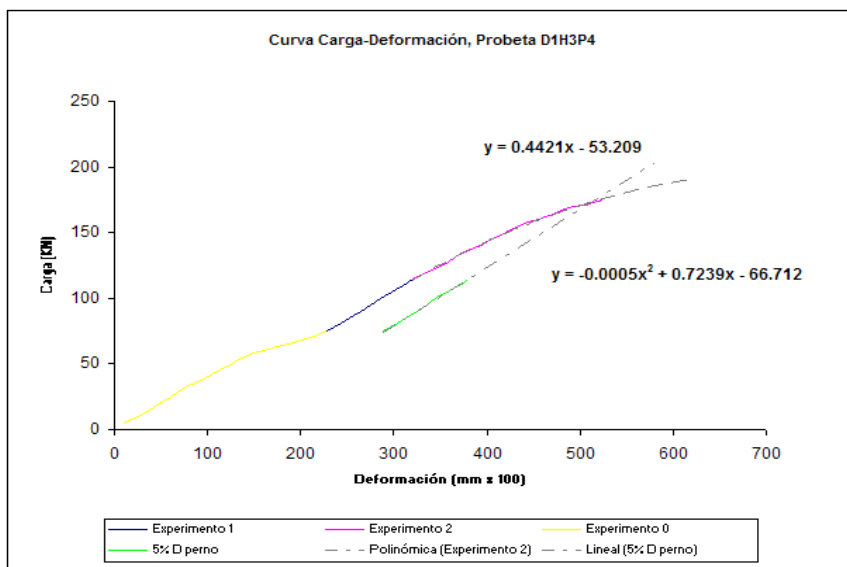


Gráfico E- 8: Curva Carga-Deformación, Probeta D1H3P4

i) Probeta D1H4P1

Tabla E-9: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D1H4P1

Carga (KN) Δ (mm x 100)

5	7
10	15
15	33
20	50
25	62
30	74
35	84
40	95
45	105
50	112
55	120
60	129
65	138
70	143
75	150
80	156
85	162
90	169
95	175
100	184
105	194
110	200
115	209
120	218
125	236
130	244
135	251
140	258
145	276
150	280
155	285
160	297
165	307
170	320
175	327
180	345
185	356

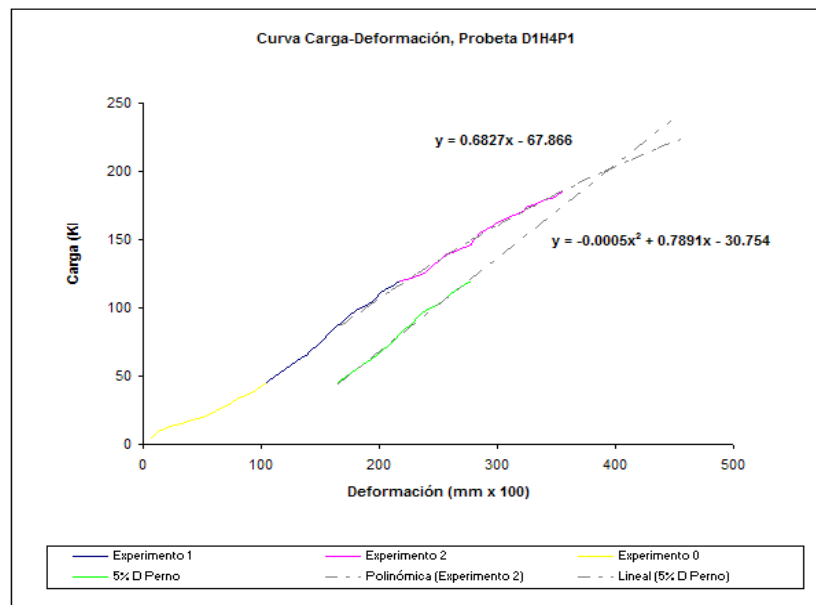


Gráfico E- 9: Curva Carga-Deformación, Probeta D1H4P1

j) Probeta D1H4P2

Tabla E-10: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D1H4P2

Carga (kg)	Δ (mm x 100)
5	38
10	57
15	72
20	82
25	94
30	103
35	111
40	119
45	126
50	135
55	143
60	152
65	159
70	170
75	177
80	186
85	194
90	205
95	214
100	221
105	230
110	239
115	248
120	257
125	267
130	279
135	290
140	300
145	311
150	324
155	335
160	346
165	360
170	377
175	391
180	407
185	428
190	460
195	502

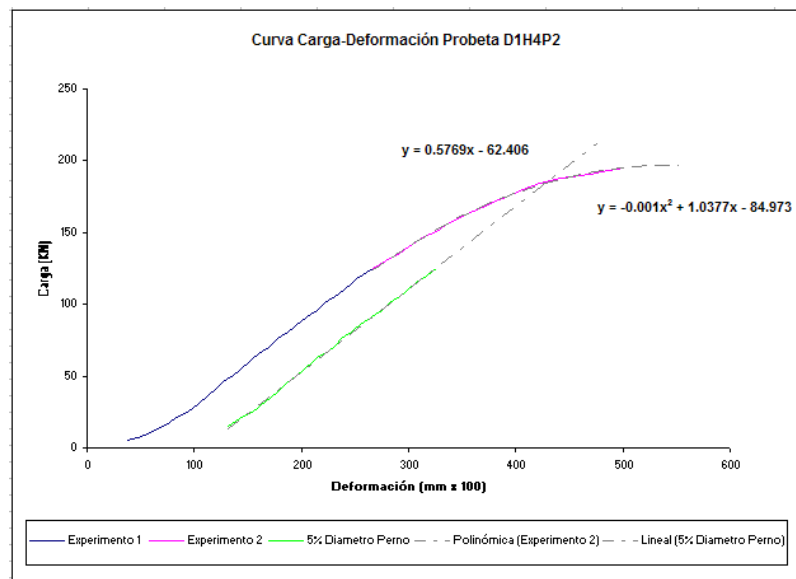


Gráfico E- 10: Curva Carga-Deformación, Probeta D1H4P2

K) Probeta D1H4P3

Tabla E-11: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D1H4P3

Carga (KN) Δ (mm x 100)	
5	15
10	26
15	36
20	45
25	53
30	60
35	68
40	74
45	81
50	87
55	92
60	98
65	104
70	108
75	115
80	121
85	127
90	133
95	140
100	150
105	158
110	164
115	171
120	178
125	185
130	194
135	202
140	210
145	219
150	230
155	239
160	249
165	259
170	275
175	285
180	297
185	315
190	325
195	340
200	355
205	378
210	392
215	410
220	440

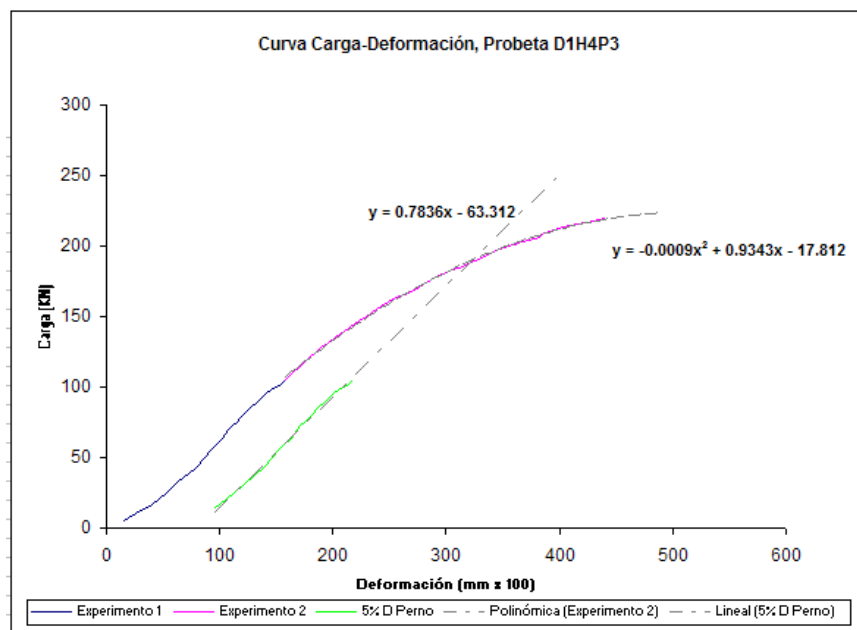


Gráfico E- 11: Curva Carga-Deformación, Probeta D1H4P3

k) Probeta D1H4P4

Tabla E-12: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D1H4P4

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
5	41
10	58
15	71
20	78
25	86
30	93
35	100
40	106
45	113
50	118
55	124
60	129
65	135
70	141
75	147
80	154
85	159
90	166
95	170
100	178
105	182
110	189
115	197
120	205
125	218
130	226
135	240
140	249
145	256
150	265
155	278
160	286
165	295
170	303
175	316
180	325
185	335
190	350
195	368
200	380
205	392
210	409
215	419
220	431

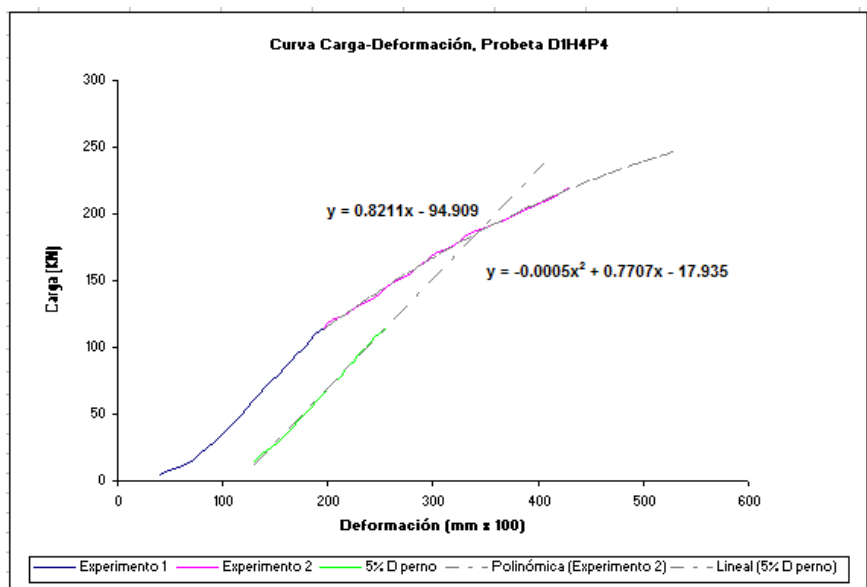


Gráfico E- 12: Curva Carga-Deformación, Probeta D1H4P4.

l) Probeta D1H5P1

Tabla E-13: Datos curva Carga-Deformación, Probeta D1H5P1

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
5	77
10	135
15	164
20	193
25	214
30	233
35	255
40	274
45	290
50	310
55	324
60	335
65	350
70	363
75	378
80	390
85	406
90	420
95	450
100	459
105	465
110	480
115	505
120	525
125	550
130	585
135	605
140	630
145	650
150	670
155	705
160	725
165	755
170	800
175	835
180	870

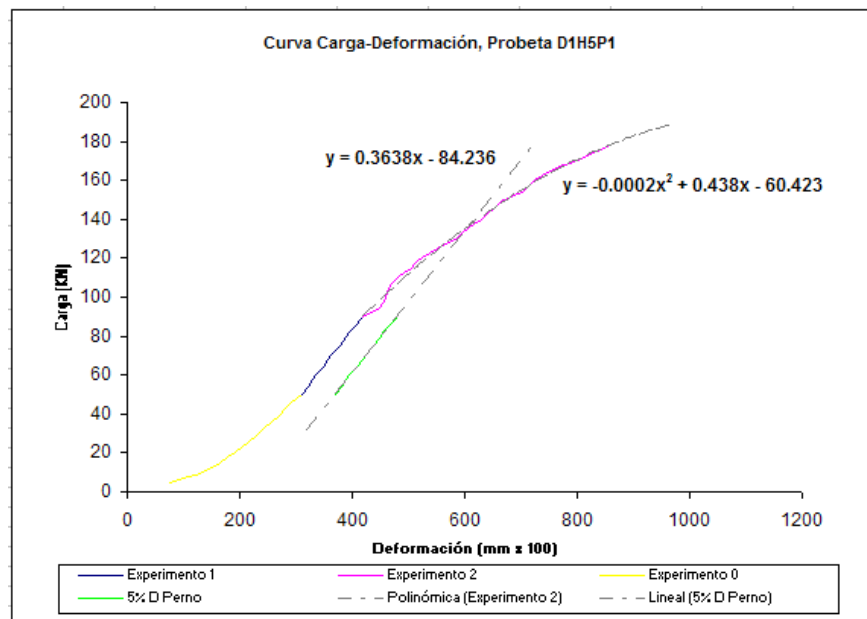


Gráfico E- 13: Curva Carga-Deformación, Probeta D1H5P1

m) Probeta D1H5P2

Tabla E-14: Datos Curva Carga-Deformación, probeta D1H5P2

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
5	5
10	9
15	19
20	25
25	29
30	33
35	35
40	40
45	45
50	51
55	56
60	60
65	71
70	76
75	83
80	90
85	99
90	106
95	110
100	119
105	128
110	139
115	150
120	160
125	173
130	187
135	200
140	211
145	225
150	245
155	264
160	285
165	330

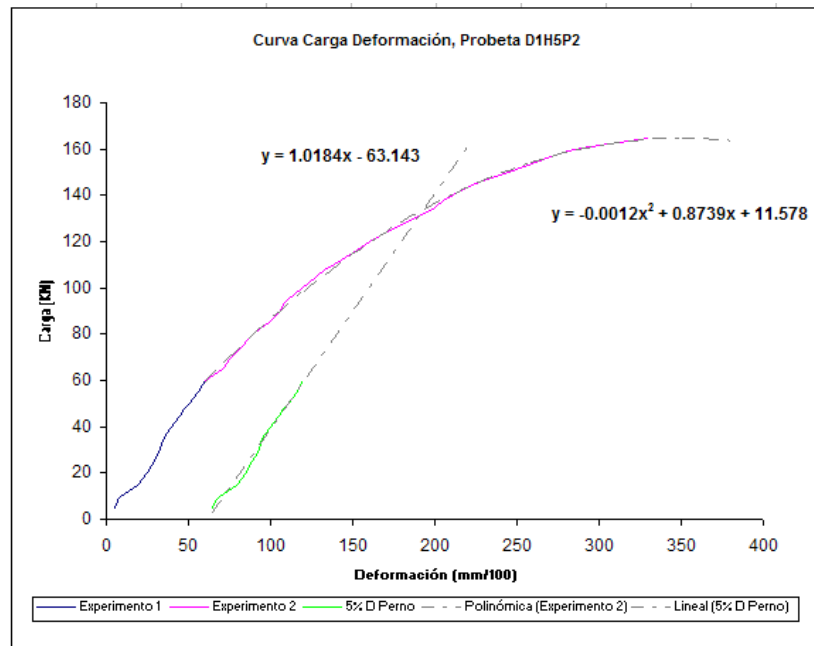


Gráfico E- 14: Curva Carga-Deformación, Probeta D1H5P2

n) Probeta D1H5P3

Tabla E-15: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D1H5P3

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
5	34
10	57
15	69
20	79
25	88
30	101
35	115
40	127
45	138
50	150
55	162
60	171
65	180
70	188
75	197
80	208
85	217
90	226
95	235
100	243
105	251
110	260
115	270
120	280
125	290
130	298
135	309
140	500

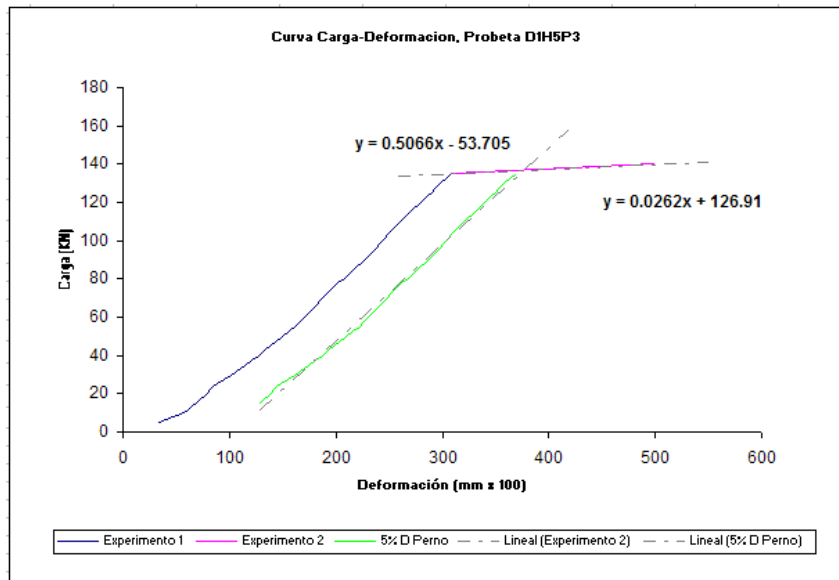


Gráfico E- 15: Curva Carga-Deformación, Probeta D1H5P3

o) Probeta D1H5P4

Tabla E-16: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D1H5P4

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
5	37
10	58
15	77
20	93
25	106
30	120
35	130
40	144
45	156
50	168
55	180
60	190
65	203
70	216
75	229
80	238
85	250
90	261
95	275
100	285
105	300
110	310
115	325
120	340
125	355
130	375
135	400
140	420
145	435
150	460
155	480
160	500
165	540
170	560
175	580
180	620

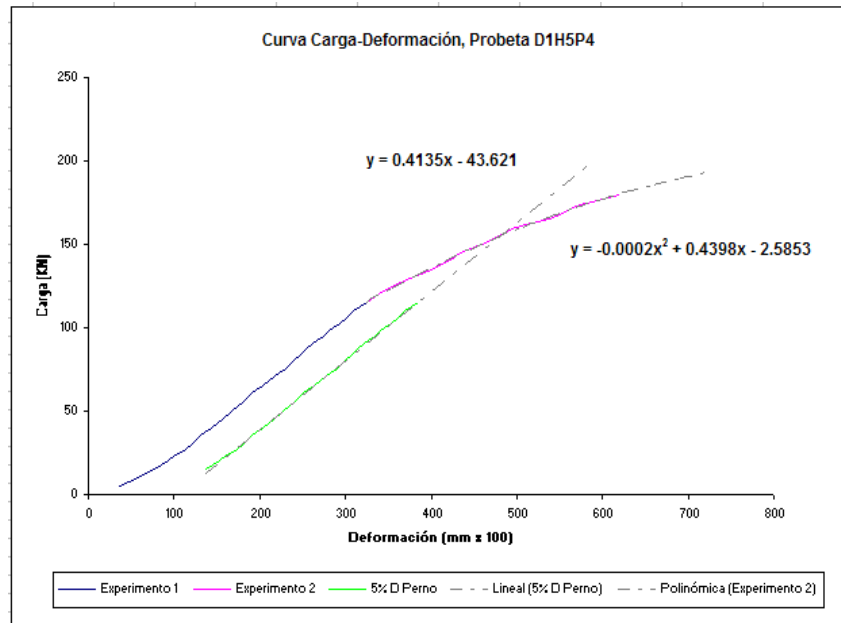


Gráfico E- 16: Curva Carga-Deformación, Probeta D1H5P4

E.5 Análisis de datos para probetas con pernos de 5/8”, Método “5% diámetro del perno”.

a) Probeta D2H1P1

Tabla E-17: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D1H1P1

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
5	39
10	69
15	110
20	157
25	239
30	310
35	366
40	450
45	619

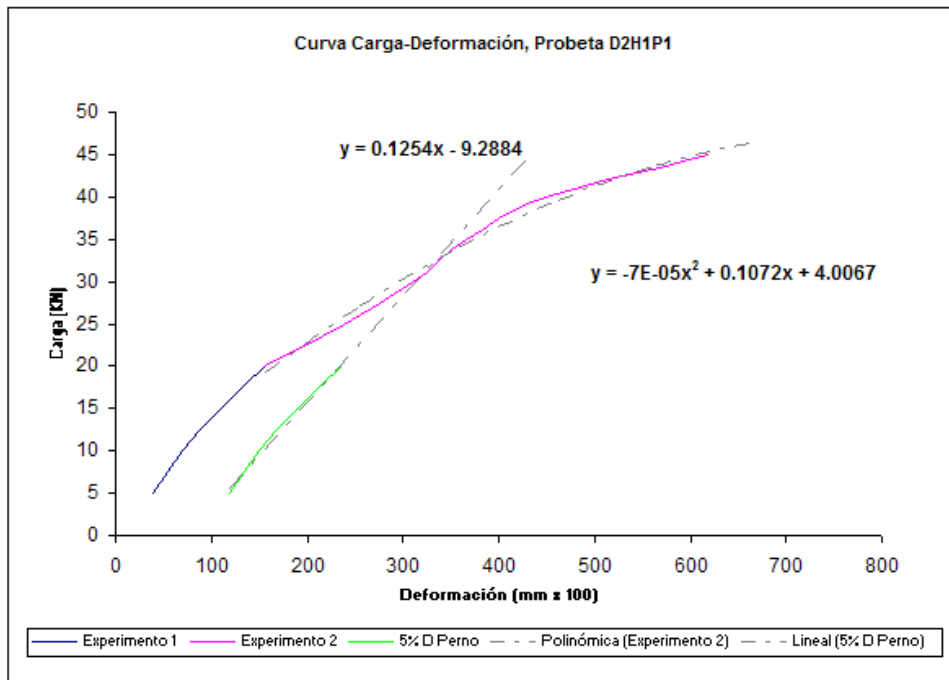


Gráfico E- 17: Curva Carga Deformación, Probeta D2H1P2

b) Probeta D2H1P2

Tabla E-18: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D2H1P2

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
5	35
10	60
15	142
20	202
25	257
30	312
35	389
40	499
45	623

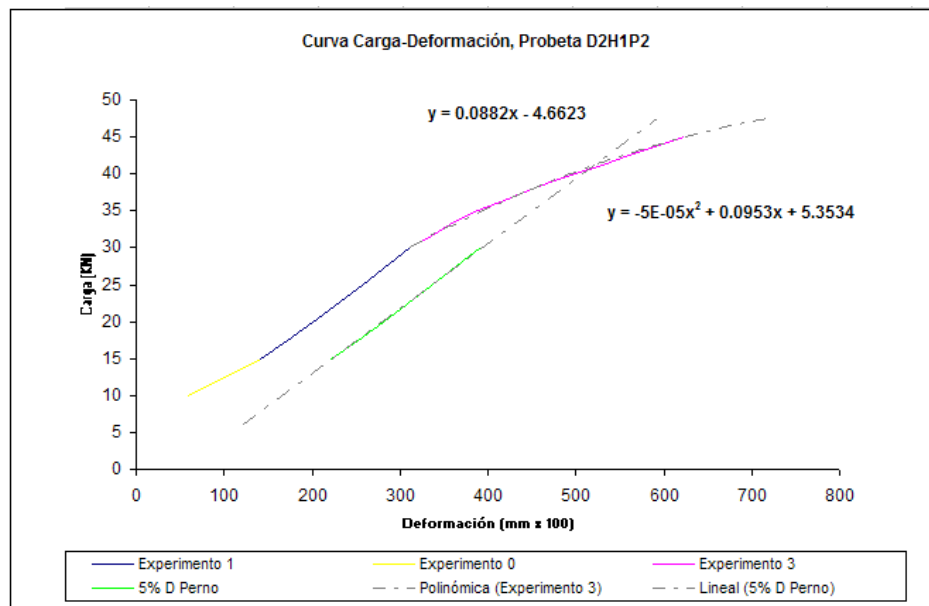


Gráfico E- 18: Curva Carga-Deformación, Probeta D2H1P2

c) Probeta D2H1P3

Tabla E-19: Curva Carga-Deformación, Probeta D2H1P3

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
5	38
10	104
15	160
20	218
25	267
30	326
35	415
40	558
45	664

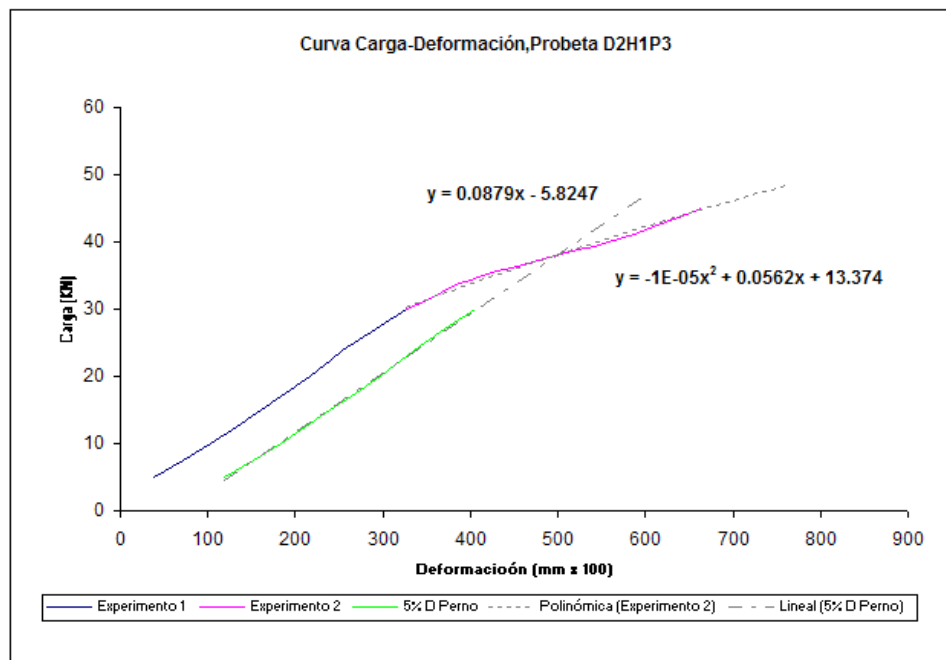


Gráfico E- 19: Curva Carga-Deformación, Probeta D2H1P3

d) Probeta D2H1P4

Tabla E-20: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D2H1P4

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
5	43
10	64
15	93
20	139
25	200
30	271
35	327
40	413
45	533
50	670

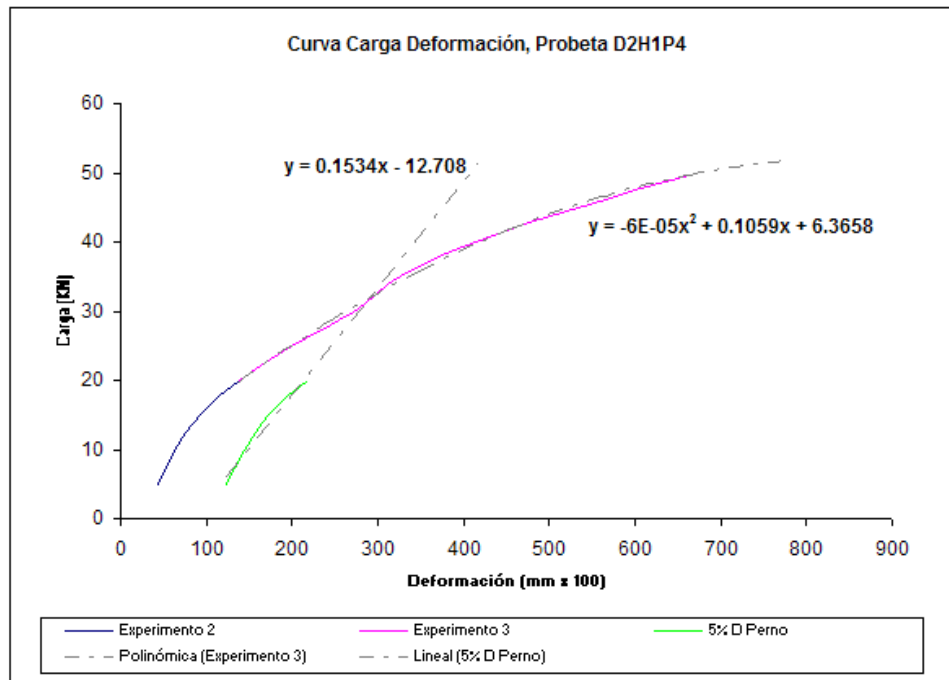


Gráfico E- 20: Curva Carga Deformación, Probeta D2H1P4

e) Probeta D2H3P1

Tabla E-21: Datos curva Carga deformación, Probeta D2H3P1

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
5	28
10	40
15	53
20	61
25	73
30	76
35	85
40	90
45	100
50	106
55	116
60	120
65	124
70	134
75	139
80	147
85	162
90	169
95	182
100	195
105	215
110	230
115	243
120	259
125	282
130	297
135	313
140	327
145	348
150	360
155	369
160	388
165	399
170	414
175	433
180	450
185	468
190	492
195	512
200	538
205	563
210	589
215	623

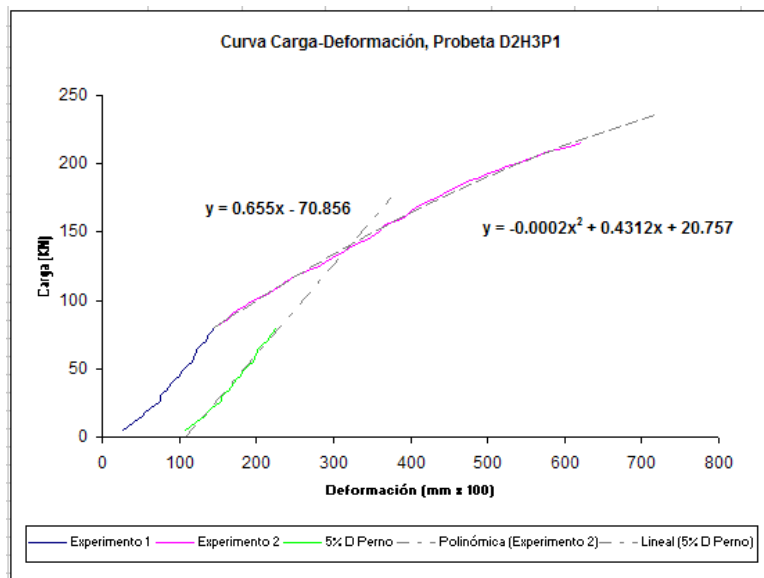


Gráfico E- 21: Curva Carga-Deformación, Probeta D2H3P1

f) Probeta D2H3P2

Tabla E-22: Datos Curva Carga Deformación, Probeta D2H3P2

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
5	31
10	44
15	60
20	70
25	80
30	88
35	96
40	106
45	114
50	124
55	139
60	149
65	159
70	169
75	178
80	186
85	200
90	214
95	227
100	242
105	255
110	267
115	277
120	289
125	302
130	313
135	321
140	336
145	346
150	358
155	371
160	383
165	400
170	413
175	428
180	444
185	460
190	478
195	502
200	518
205	541
210	563
215	588
220	611
225	643
230	678
235	713
240	755

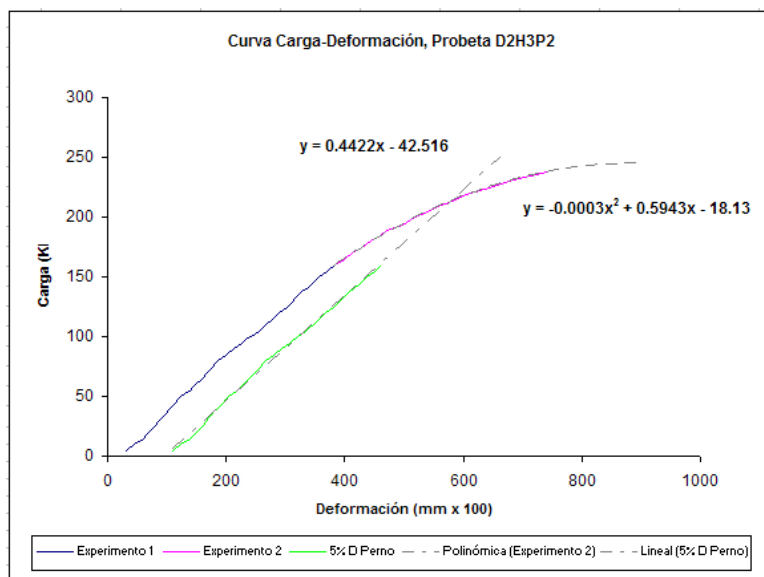


Gráfico E- 22: Curva Carga Deformación, probeta D2H3P2

g) Probeta D2H3P3

Tabla E-23: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D2H3P3

Carga (KN) Δ (mm x 100)

5	23
10	44
15	55
20	65
25	71
30	79
35	87
40	99
45	109
50	119
55	130
60	140
65	149
70	158
75	165
80	177
85	188
90	202
95	213
100	227
105	238
110	251
115	265
120	278
125	292
130	303
135	312
140	323
145	338
150	347
155	361
160	374
165	388
170	400
175	415
180	427
185	443
190	463
195	483
200	503
205	521
210	543
215	565
220	588
225	615
230	650
235	680

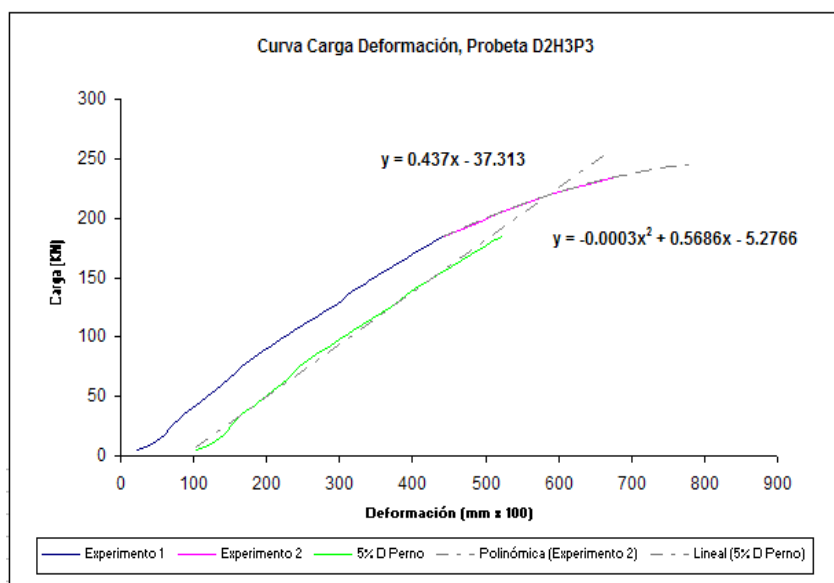


Gráfico E- 23: Curva Carga deformación, Probeta D2H3P3

h) Probeta D2H3P4

Tabla E-24: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D2H3P4

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
5	31
10	48
15	61
20	74
25	84
30	96
35	110
40	124
45	140
50	159
55	175
60	189
65	204
70	217
75	230
80	242
85	255
90	265
95	278
100	291
105	300
110	320
115	329
120	339
125	350
130	361
135	378
140	393
145	414
150	432
155	453
160	472
165	503
170	530
175	550
180	570
185	594
190	618
195	639
200	665
205	692
210	715
215	739
220	768
225	817

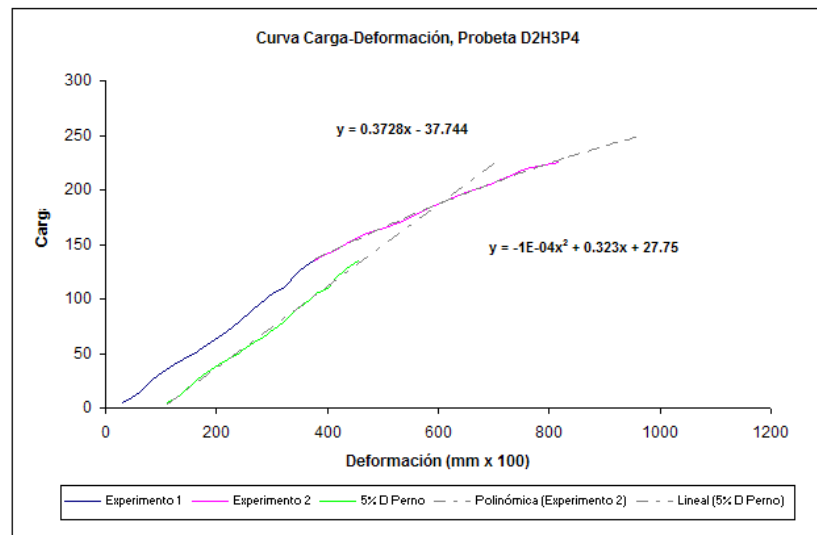


Gráfico E- 24: Curva Carga deformación Probeta D2H3P4

i) Probeta D2H4P1

Tabla E-25: Datos Curva Carga-Deformación, Probeta D2H4P1

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
5	20
10	39
15	59
20	68
25	80
30	94
35	108
40	122
45	135
50	148
55	163
60	178
65	198
70	215
75	228
80	253
85	275
90	298
95	329
100	365
105	387
110	421
115	453
120	483
125	520
130	570
135	608

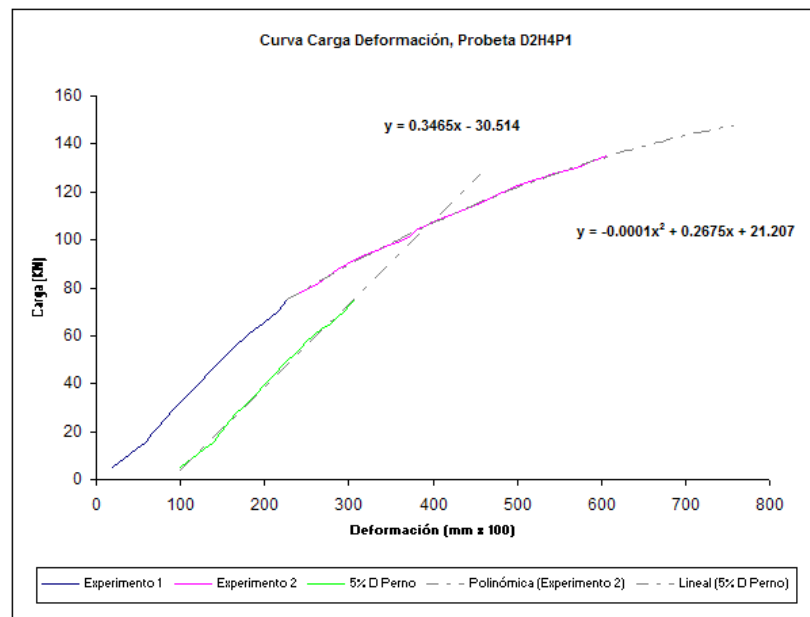


Gráfico E- 25: Curva Carga Deformación, Probeta D2H4P1

j) Probeta D2H4P2

Tabla E-26: Datos Curva Carga Deformación, Probeta D2H4P2

Carga (KN) Δ (mm x 100)

5	27
10	31
15	55
20	62
25	73
30	81
35	88
40	94
45	101
50	107
55	123
60	131
65	137
70	147
75	155
80	161
85	170
90	181
95	191
100	198
105	207
110	214
115	226
120	238
125	254
130	273
135	293
140	310
145	330
150	345
155	367
160	380
165	396
170	413
175	432
180	452
185	469
190	490
195	514
200	536
205	554
210	570
215	603
220	630
225	678

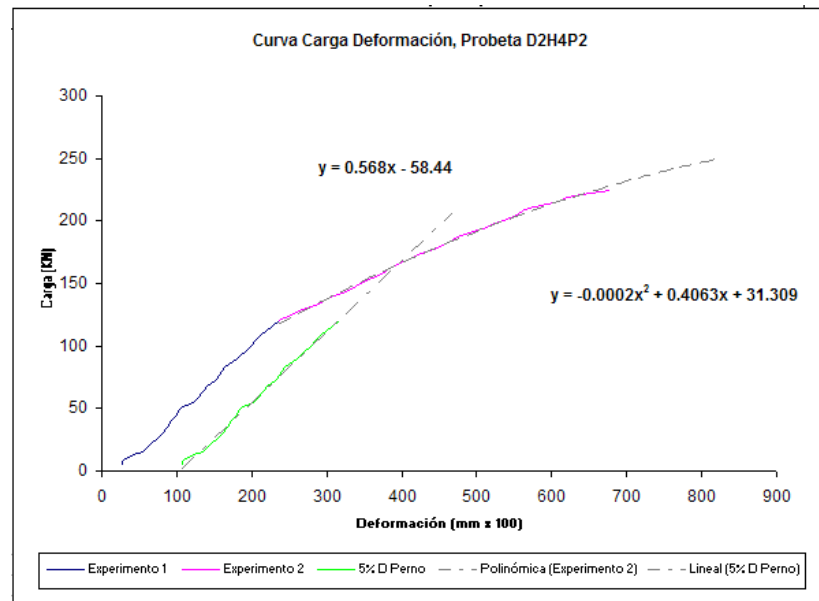


Gráfico E- 26: Curva Carga Deformación, Probeta D2H4P2

k) Probeta D2H4P3

Tabla E-27: Datos Curva Carga Deformación, Probeta D2H4P3

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
5	27
10	49
15	73
20	90
25	105
30	118
35	129
40	138
45	149
50	158
55	167
60	174
65	182
70	191
75	198
80	211
85	219
90	228
95	240
100	250
105	269
110	282
115	305
120	318
125	341
130	359
135	371
140	393
145	413
150	427
155	441
160	454
165	465
170	487
175	506
180	519
185	533
190	562
195	588
200	613
205	649
210	681

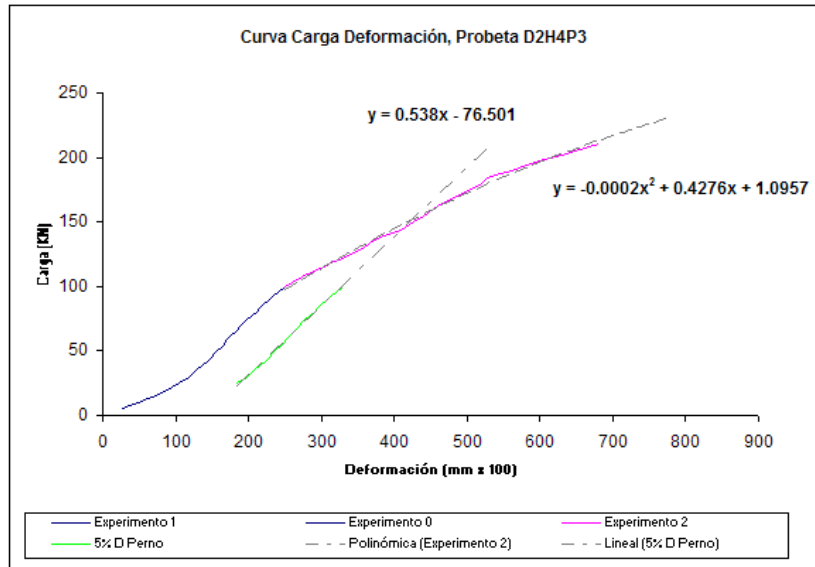


Gráfico E- 27: Curva Carga Deformación, Probeta D2H4P3

I) Probeta D2H4P4

Tabla E-28: Datos Curva Carga Deformación, Probeta D2H4P4

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
5	21
10	43
15	62
20	73
25	83
30	95
35	110
40	126
45	135
50	153
55	167
60	180
65	194
70	206
75	222
80	239
85	255
90	276
95	293
100	310
105	322
110	338
115	354
120	366
125	380
130	395
135	409
140	427
145	443
150	460
155	474
160	490
165	503
170	525
175	553
180	567
185	597

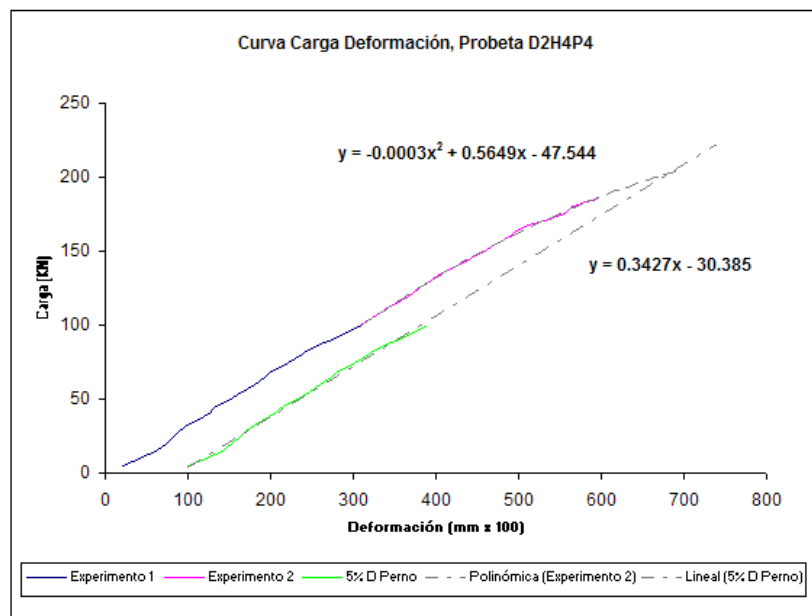


Gráfico E- 28: Curva Carga Deformación, Probeta D2H4P4

j) Probeta D2H5P1

Tabla E-29: Datos Curva Carga Deformación, Probeta D2H5P1

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
30	95
60	158
90	210
120	260
150	324
180	410
210	556
250	640

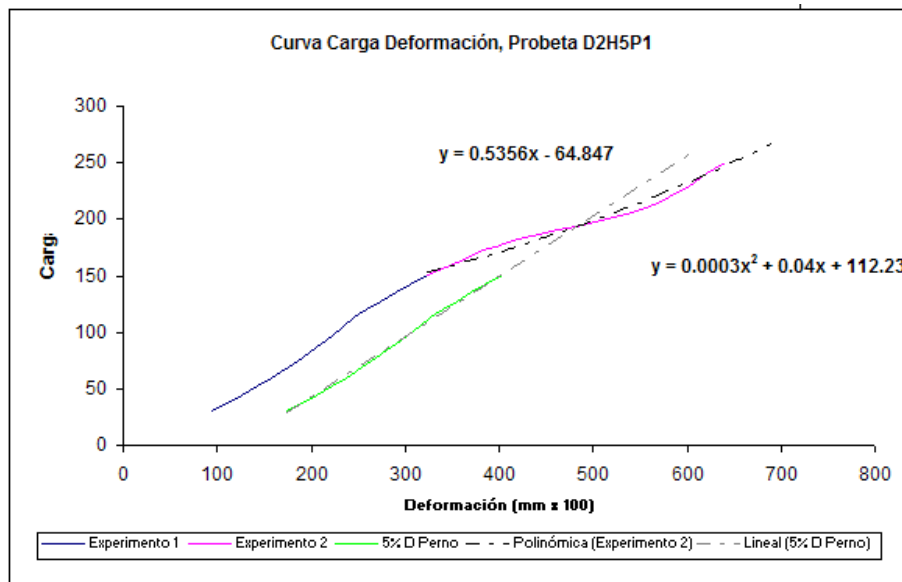


Gráfico E- 29: Curva Carga Deformación, Probeta D2H5P1

k) Probeta D2H5P2

Tabla E-30: Datos Curva Carga Deformación, Probeta D2H5P2

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
30	108
60	160
90	265
120	329
150	400
180	450
210	508
240	625
270	715
275	800

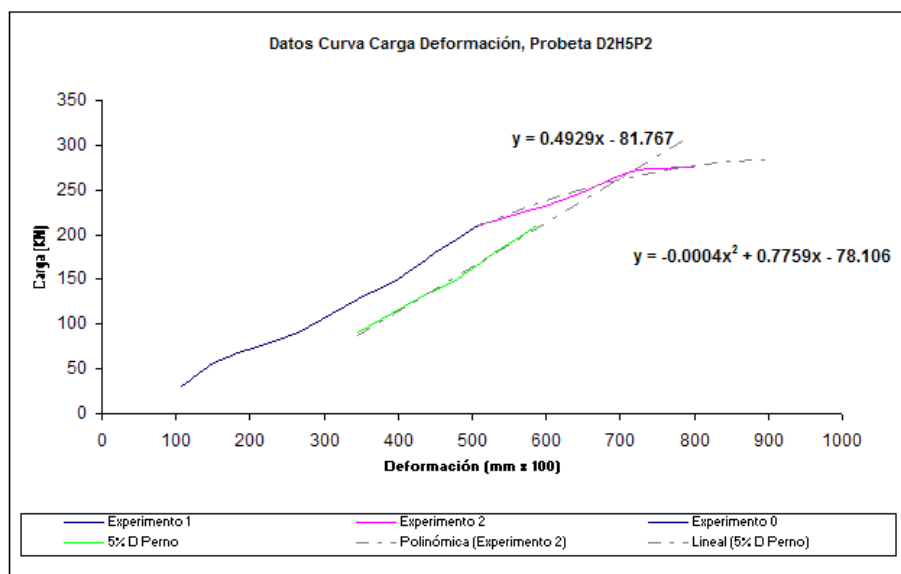


Gráfico E-30: Curva Carga Deformación, Probeta D2H5P2

m) Probeta D2H5P3

Tabla E-31: Datos Curva Carga Deformación, Probeta D2H5P3

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
30	80
60	129
90	197
120	263
150	328
180	384
210	438
240	495
270	580
300	765
309	905

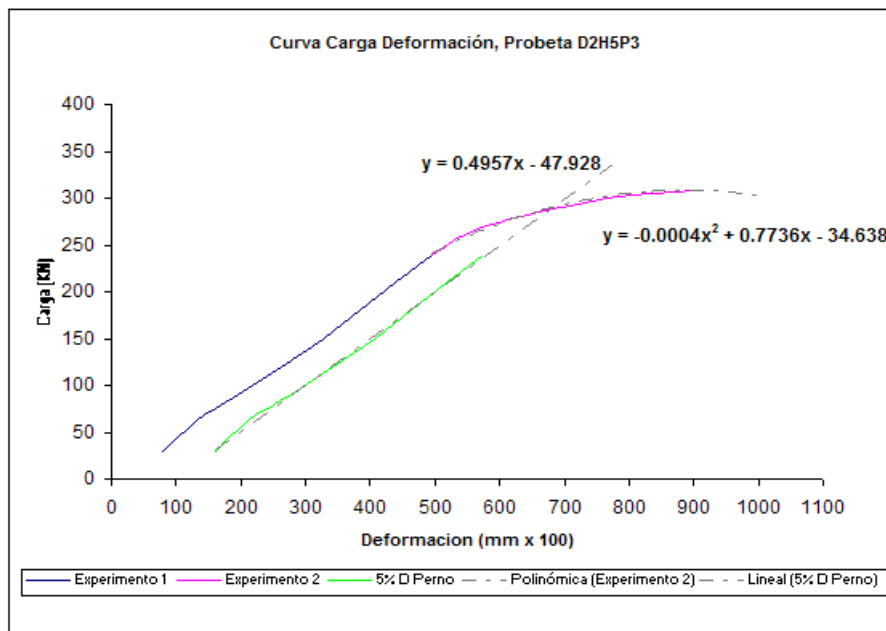


Gráfico E- 31: Curva Carga Deformación, Probeta D2H5P3

n) Probeta D2H5P4

Tabla E-32: Datos Curva Carga Deformación, Probeta D2H5P4

Carga (KN)	Δ (mm x 100)
30	58
60	110
90	164
120	225
150	284
180	339
210	410
240	468
270	540
302	635

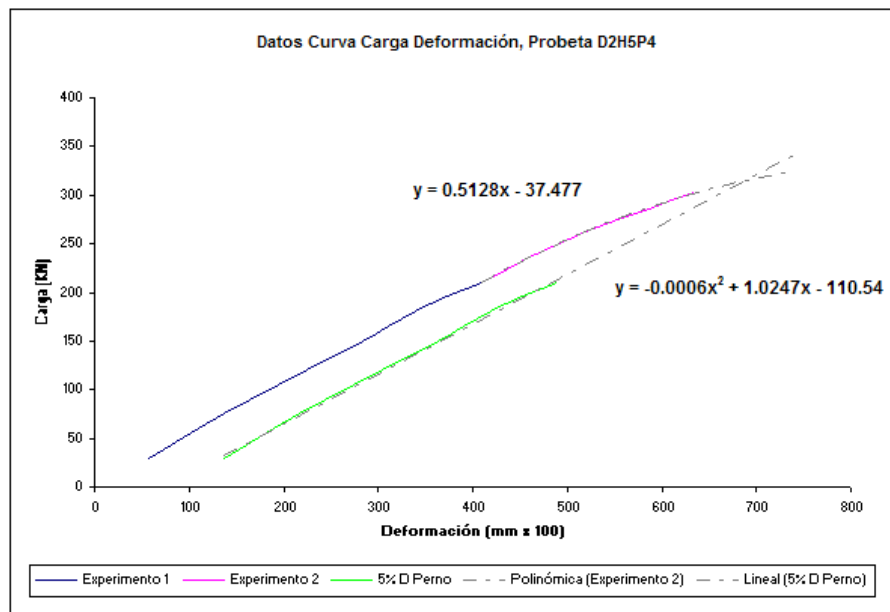


Gráfico E- 32: Curva Carga Deformación, Probeta D2H5P4

Tabla E-33: Cuadro Resumen General, Resultados Prácticos y Teóricos Método “5% Diámetro del Perno”, Control de Deformaciones y Capacidad última uniones.

Probeta	Modo de Falla	Teoría del "5% Diámetro Perno"								NCH 1198 $\delta=0.8$ mm		P max ensayo (KN)
		Ensayos					Teoría			Ensayos		
		P (KN)	Δ (mm)	P Promedio (KN)	Δ Promedio (mm)	Ku Práctico	P (Kn)	Δ (mm)	Ku Teórico	P (KN)	Δ (mm)	
D1H1P1 D1H1P2 D1H1P3 D1H1P4	I	16.35 8.41 13.02 12.60	1.45 1.69 0.99 2.03	12.60	1.54	1.00	14.74	0.06	1.00	16.95 9.65 14.78 14.09	1.68 1.96 1.25 2.29	18.5 17.1 22.0 18.9
D1H3P1 D1H3P2 D1H3P3 D1H3P4	I	128.25 128.46 110.91 172.58	2.64 2.59 3.47 5.11	135.05	3.45	1.79	87.7	0.06	0.99	137.33 137.68 132.56 179.57	2.96 2.90 4.22 5.47	150 135 155 175
D1H4P1 D1H4P2 D1H4P3 D1H4P4	I	204.45 171.29 190.29 189.08	3.99 4.05 3.24 3.46	188.78	3.68	1.87	115.58	0.06	0.98	220.46 177.28 201.18 204.56	4.42 4.35 3.58 3.85	185 195 220 225
D1H5P1 D1H5P2 D1H5P3 D1H5P4	I	125.77 136.95 136.76 172.83	5.77 1.96 3.76 5.23	143.08	4.18	1.14	142.15	0.06	0.96	134.49 148.33 137.31 182.40	6.21 2.28 3.97 5.67	180 165 145 180
D2H1P1 D2H1P2 D2H1P3 D2H1P4	III	31.44 41.57 39.91 32.25	3.25 5.24 5.20 2.93	36.29	4.16	1.00	15.74	0.08	1.00	31.44 41.57 39.91 32.25	3.25 5.24 5.20 2.93	45 45 45 50
D2H3P1 D2H3P2 D2H3P3 D2H3P4	III	137.84 238.28 230.52 185.09	3.19 6.35 6.13 5.98	197.93	5.41	0.91	92.94	0.08	0.98	137.84 238.28 230.52 185.09	3.19 6.35 6.13 5.98	215 240 235 225
D2H4P1 D2H4P2 D2H4P3 D2H4P4	III	116.92 156.35 141.55 193.43	4.26 3.78 4.05 6.53	152.06	4.66	0.52	121.33	0.08	0.96	116.92 156.35 141.55 193.43	4.26 3.78 4.05 6.53	135 225 210 185
D2H5P1 D2H5P2 D2H5P3 D2H5P4	III	215.08 273.22 318.72 307.09	5.23 7.20 7.40 6.72	278.53	6.64	0.77	147.40	0.08	0.94	215.08 273.22 318.72 307.09	5.23 7.20 7.40 6.72	250 275 309 302