

824.3(83)
PERU

INSTITUTO FORESTAL
División Industrias

CORPORACION DE FOMENTO DE LA PRODUCCION
Gerencia de Desarrollo

UNIONES EN LA MADERA ESTRUCTURAL PERNOS Y CONECTORES

5419

Autor : VICENTE A. PEREZ GALAZ
Ingeniero Civil
Jefe División Industrias

Colaboradores :

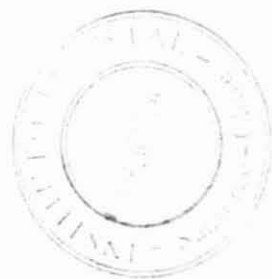
FERNANDO MORALES V.
ALEJANDRO PASTENE S.
EDUARDO PEREZ P.
ALEJANDRO G. RETAMAL P.
GASTON CUBILLOS C.



5419

SANTIAGO - CHILE
Abril, 1990

PROLOGO



El presente estudio "Uniones en la Madera Estructural. Pernos y Conectores", fue realizado por la Gerencia de Desarrollo de la Corporación de Fomento de la Producción-CORFO, con la participación de la División Industrias del Instituto Forestal, filial CORFO.

El objetivo del presente informe es entregar antecedentes relacionados con la resistencia de las uniones con pernos, de los conectores prefabricados y de aquéllos que tradicionalmente se diseñan y fabrican en nuestro país para resolver las uniones de los elementos estructurales de madera.

Este informe consta de doce capítulos y un anexo. Los primeros seis están dedicados a las uniones con pernos. En ellos se exponen los criterios modernos con los cuales se diseñan estas uniones y se comparan con los usados en Chile. Para lo anterior se realizaron ensayos a fin de determinar la precisión con la cual los distintos criterios estiman la resistencia real de una unión apernada. Los capítulos restantes están dedicados a conectores y en ellos se compara, experimentalmente, el comportamiento de los conectores prefabricados con aquéllos que, por lo general, se fabrican en nuestro país a solicitud del autor del diseño estructural.

Participaron en la realización de este estudio el Jefe de la División Industrias del Instituto Forestal, Ingeniero Civil Sr. Vicente Pérez Galaz, los Ingenieros Civiles Sres. Alejandro Pastene S. y Fernando Morales V., los Ingenieros de Ejecución en Madera Sres. Guido Retamal P. y Eduardo Pérez, el Dibujante Técnico Sr. Rodolfo Pérez P. y el personal técnico del Laboratorio de la División Industrias del Instituto Forestal. La labor de Secretaría fue realizada por la Srta. Margarita Martínez Salas.

La dirección y coordinación del estudio por parte de CORFO estuvo a cargo del Ingeniero Forestal M.Sc, Sr. Roy Wotherspoon Schrader.

INDICE

	Página
UNIONES APERNADAS	1
1.0 ANTECEDENTES	1
1.1. Estudios Realizados en Chile	2
1.2. Evolución de la Norma Chilena sobre Uniones Apernadas..	6
1.2.1. Norma Chilena NCh 1198 Of. 77	6
1.2.2. Norma Chilena NCh 1198. Revisión 1989	8
1.2.3. Proposición INFOR para Norma Chilena NCh 1198. Revisión 1989	11
2.0 TEORIA DE FLUENCIA PARA LAS UNIONES APERNADAS	15
2.1. Antecedentes Generales	15
2.2. Desarrollo de una Expresión de Diseño Práctica para la Teoría de Fluencia Aplicada a Uniones Apernadas	19
2.3. Criterio de Smith y Whale	22
3.0 COMPARACION ENTRE LOS DIFERENTES CRITERIOS	30
3.1. Agrupación de los Criterios Estudiados	30
3.2. Comparación de los Criterios que Entregan la Carga Admi- sible. GRUPO 1	31
3.2.1. Criterio según Norma Chilena NCh 1198 Of. 77 ...	31
3.2.2. Criterio según Norma Chilena NCh 1198. Revi- sión 1989	31
3.2.3. Proposición INFOR a la NCh 1198. Revisión 1989..	33
3.3. Comparación de los Criterios que Entregan la Carga en el Punto de Fluencia. GRUPO 2	42

	Página
3.3.1. Antecedentes Generales	42
3.3.2. Determinación de la Resistencia de Fluencia de Pernos	43
3.3.2.1. Ensayos Realizados	43
3.3.3. Determinación de la Resistencia de Fluencia por Aplastamiento de la Madera (S)	46
3.3.3.1. Ensayos Realizados	46
3.3.3.2. Resultados	48
3.3.4. Comparación entre el Criterio de la Teoría de Fluencia y el de Smith y Whale	55
3.3.4.1. Teoría de Fluencia	55
3.3.4.2. Criterio de Smith y Whale	56
4.0 TRABAJO EXPERIMENTAL	58
4.1. Probeta y Variables Estudiadas	58
4.2. Resultados	60
4.3. Comparación de los Resultados Experimentales con los Criterios que entregan la Carga Admisible (GRUPO 1)....	60
4.3.1. Parámetros Usados	60
4.3.2. Discusión de los Resultados	61
4.4. Comparación de los Resultados Experimentales con los Criterios que entregan la Carga en el Punto de Fluencia (GRUPO 2)	65
4.4.1. Valores a Usar para las Tensiones de Fluencia.	65
4.4.2. Parámetros Usados para medir la Comparación...	67

	Página
4.4.3. Comparación de los Valores Experimentales con el Criterio de la Teoría de Fluencia	68
4.4.4. Comparación de los Valores Experimentales con el Criterio de Smith y Whale	71
4.4.5. Discusión de los Resultados	80
4.4.6. Cargas Admisibles Obtenidas con el Criterio de Smith y Whale	84
4.4.7. Discusión de los Resultados	94
5.0 RECOMENDACIONES	94
5.1. General	94
5.2. Procedimiento Recomendado	94
5.3. Aplicación del Procedimiento Recomendado	98
5.3.1. Determinación de las Densidades	98
5.3.2. Angulo de Inclinação de la Carga respecto a las Fibras de la Madera	99
5.3.3. Tensión de Fluencia Característica por Aplastamiento de la Madera	99
5.3.4. Tensión de Fluencia del Perno	99
5.3.5. Cargas Admisibles	99
5.4. Comparación de las Cargas Admisibles Recomendadas con los Datos Experimentales Obtenidos en Otros Estudios...	101
5.5. Aplicación del Procedimiento Recomendado al Pino radiata. Seco	104
6.0 CONCLUSIONES	107
CONECTORES METALICOS	110
7.0 ANTECEDENTES GENERALES	110

	Página
8.0 CONECTORES METALICOS LIVIANOS	113
8.1. Tipos y Aplicaciones	113
8.2. Material y Terminación	118
8.3. Diseño	118
9.0 CONECTORES METALICOS PESADOS	120
9.1. Tipos y Aplicaciones	120
9.2. Material y Terminación	121
9.3. Diseño	122
9.4. Soldadura	131
9.5. Detalles y Fabricación	131
9.6. Montaje de la Estructura	132
10.0 PROGRAMA DE ENSAYOS	133
10.1. Clavos Helicoidales	133
10.2. Conectores Livianos Ensayados	141
10.3. Conectores Pesados Ensayados	147
11.0 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS	150
11.1. Procedimiento de Ensayo	150
11.1.1. Ensayos de Flexión	150
11.1.2. Ensayos de Torsión	157
12.0 CONCLUSIONES	163
12.1. Conectores Livianos	163
12.2. Conectores Pesados	165
12.3. Generales	167

	Página
12.4. Recomendaciones	168
BIBLIOGRAFIA	170
ANEXO A . ENSAYO DE CONECTORES	173

INDICE DE FIGURAS

FIGURA Nº 1.	Esquema de la probeta de ensayo con carga paralela a las fibras	3
FIGURA Nº 2.	Esquema de la probeta de ensayo con carga normal a las fibras	4
FIGURA Nº 3.	Esquema de la curva carga-deformación para una unión apernada	19
FIGURA Nº 4.	Esquema de la curva carga máxima de fluencia vs esbeltez de la unión	21
FIGURA Nº 5.	Posición relativa de las cargas	35
FIGURA Nº 6.	Esquema del ensayo para determinar la resistencia de fluencia de pernos	43
FIGURA Nº 7.	Gráfico de carga vs deformación que permite determinar la carga de fluencia	44
FIGURA Nº 8.	Ensayo de aplastamiento en la madera	47
FIGURA Nº 9.	Ensayo de compresión paralela a las fibras de la madera	59

FIGURA Nº 10.	Solicitud normal a la dirección de las fibras en la madera	96
FIGURA Nº 11.	Uniones con pernos sometidas a cizalle doble - Carga paralela a la dirección de las fibras - Pino <u>radia</u> <u>ta</u> - Seco	105
FIGURA Nº 12.	Uniones con pernos sometidas a cizalle doble - Carga normal a la dirección de las fibras - Pino <u>radia</u> <u>ta</u> - Seco	106
FIGURA Nº 13.	Conectores metálicos livianos	111
FIGURA Nº 14.	Conectores metálicos pesados	114
FIGURA Nº 15.	Elementos metálicos sometidos a compresión	123
FIGURA Nº 16.	Cálculo del área debilitada de una placa	124
FIGURA Nº 17.	Placa de aplastamiento con un lado en voladizo	125
FIGURA Nº 18.	Distribución de tensiones para placa con un lado en voladizo	126
FIGURA Nº 19.	Placa de aplastamiento con dos voladizos	127
FIGURA Nº 20.	Placa de aplastamiento con dos volados	127
FIGURA Nº 21.	Placa de aplastamiento simplemente apoyada	128
FIGURA Nº 22.	Placa de aplastamiento apoyada en tres lados	129

FIGURA N° 23.	Distribución de tensiones en placa de aplastamiento apoyada en tres lados	130
FIGURA N° 24.	Tipo de probetas ensayadas en uniones con clavos helicoidales	140
FIGURA N° 25.	Conector JH-20	144
FIGURA N° 26.	Conector JP-26S	144
FIGURA N° 27.	Conector MP-A1	145
FIGURA N° 28.	Conector JE-SS	145
FIGURA N° 29.	Conector JR-SSSR	146
FIGURA N° 30.	Conector pesado ①	148
FIGURA N° 31.	Conector pesado ②	148
FIGURA N° 32.	Conector pesado ④	149
FIGURA N° 33.	Conector pesado ⑤	149
FIGURA N° 34.	Ensayo de flexión curva carga-deformación	151
FIGURA N° 35.	Esquema del ensayo de flexión	152
FIGURA N° 36.	Curva momento-rotación	158

INDICE DE TABLAS

		Página
TABLA Nº 1.	CARGA ADMISIBLE POR PERNO SOMETIDO A CIZALLE DOBLE PARA PINO RADIATA	5
TABLA Nº 2.	CARGA ADMISIBLE POR PERNO SOMETIDO A CIZALLE DOBLE PARA MADERAS AGRUPADAS SEGUN SU DENSIDAD ANHIDRA ...	7
TABLA Nº 3.	TENSIONES BASICAS DE COMPRESION Y GRUPO A CONSIDERAR EN EL CALCULO DE LA TENSION ADMISIBLE DEL PERNO	10
TABLA Nº 4.	CONSTANTES A USAR EN EL CALCULO DE LA CARGA ADMIS <u>I</u> BLE PARA UN PERNO CON SOLICITACION PARALELA A LA DI <u>R</u> RECCION DE LA FIBRA DE LA PIEZA CENTRAL	10
TABLA Nº 5.	CONSTANTES A USAR EN EL CALCULO DE LA CARGA ADMIS <u>I</u> BLE PARA UN PERNO CON SOLICITACION NORMAL A LA DIREC <u>C</u> ION DE LA FIBRA DE LA PIEZA CENTRAL	11
TABLA Nº 6.	TENSIONES BASICAS DE COMPRESION Y GRUPO A CONSIDERAR EN EL CALCULO DE LA TENSION ADMISIBLE DEL PERNO	13
TABLA Nº 7.	FACTOR DE CORRECCION POR APLASTAMIENTO DE LA MADERA, K_a	14
TABLA Nº 8.	FACTOR DE CORRECCION POR EFECTO DEL DIAMETRO DEL PER <u>N</u> NO O BARRA DE ACERO, K_d	15
TABLA Nº 9.	GEOMETRIA Y ECUACIONES DE LA TEORIA DE FLUENCIA PARA UNIONES APERNADAS SOMETIDAS A CIZALLE DOBLE	17

	Página
TABLA N° 10. GEOMETRIA Y ECUACIONES DE LA TEORIA DE FLUENCIA PARA UNIONES APERNADAS SOMETIDAS A CIZALLE SIMPLE	18
TABLA N° 11. ECUACIONES DE REGRESION LINEAL ENTRE LA TENSION DE APLASTAMIENTO (S) Y LA DENSIDAD NORMAL (ρ_{12})	23
TABLA N° 12. DENSIDADES ANHIDRAS (ρ_0) MEDIAS PARA DIFERENTES ESPECIES MADERERAS	29
TABLA N° 13. COMPARACION DE LOS CRITERIOS QUE ENTREGAN LAS CARGAS ADMISIBLES Y APLICACION DE ELLOS USANDO LAS CARACTERISTICAS DE LAS PROBETAS ENSAYADAS EN COMPRESION PARALELA A LA FIBRA. PINO RADIATA	36
TABLA N° 14. COMPARACION DE LOS CRITERIOS QUE ENTREGAN LAS CARGAS ADMISIBLES Y APLICACION DE ELLOS USANDO LAS CARACTERISTICAS DE LAS PROBETAS ENSAYADAS EN COMPRESION PARALELA A LA FIBRA. COIGUE	39
TABLA N° 15. RESISTENCIA DE FLUENCIA (S_y) OBTENIDAS PARA PERNOS CORRIENTES DE DIFERENTES DIAMETROS	45
TABLA N° 16. RESISTENCIA DE FLUENCIA (S_y) PARA PERNOS CORRIENTES.	46
TABLA N° 17. ENSAYOS DE APLASTAMIENTO DE LA MADERA-COMPRESION PARALELA A LAS FIBRAS	49
TABLA N° 18. ENSAYOS DE APLASTAMIENTO DE LA MADERA-COMPRESION NORMAL A LAS FIBRAS	51
TABLA N° 19. ESTADIGRAFOS DE LA TENSION DE APLASTAMIENTO Y DE LA	

	DENSIDAD ANHIDRA. COMPRESION PARALELA A LA DIRECCION DE LAS FIBRAS	53
TABLA Nº 20.	ESTADIGRAFOS DE LA TENSION DE APLASTAMIENTO Y DE LA DENSIDAD ANHIDRA. COMPRESION NORMAL A LA DIRECCION DE LAS FIBRAS	54
TABLA Nº 21.	COMPARACION DE LOS CRITERIOS QUE ENTREGAN LA CARGA ADMISIBLE CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES. CARGA PARALELA A LAS FIBRAS	62
TABLA Nº 22.	COMPARACION DE LOS VALORES EXPERIMENTALES CON EL CRITERIO DE LA TEORIA DE FLUENCIA. CARGA PARALELA A LAS FIBRAS. PINO RADIATA	69
TABLA Nº 23.	REGRESION LINEAL ENTRE LA DENSIDAD ANHIDRA Y LA TENSION DE FLUENCIA POR APLASTAMIENTO	72
TABLA Nº 24.	COMPARACION DE LOS VALORES EXPERIMENTALES CON EL CRITERIO DE SMITH Y WHALE. CARGA PARALELA A LAS FIBRAS. PINO RADIATA. (ALTERNATIVA A)	77
TABLA Nº 25.	COMPARACION DE LOS VALORES EXPERIMENTALES CON EL CRITERIO DE SMITH Y WHALE. CARGA PARALELA A LAS FIBRAS. PINO RADIATA. (ALTERNATIVA B)	78
TABLA Nº 26.	COEFICIENTES DE CONTRACCION PARA LAS MADERAS CRECIDAS EN CHILE	81
TABLA Nº 27.	DENSIDADES PARA DIFERENTES ESPECIES MADERERAS	82

TABLA N° 28.	COMPARACION DE LOS VALORES EXPERIMENTALES CON EL CRITERIO DE SMITH Y WHALE. CARGA PARALELA A LAS FIBRAS. COIGUE	83
TABLA N° 29.	CARGAS ADMISIBLES PROPUESTAS PARA UNIONES CON PERNOS, SOLICITADAS EN CIZALLE DOBLE Y FABRICADAS CON PINO RADIATA SECO	88
TABLA N° 30.	CARGAS ADMISIBLES PROPUESTAS PARA UNIONES CON PERNOS, SOLICITADAS EN CIZALLE DOBLE Y FABRICADAS CON COIGUE SECO	91
TABLA N° 31.	RESUMEN DE LOS ESTADIGRAFOS OBTENIDOS EN LA COMPARACION DE LOS CRITERIOS SELECCIONADOS CON LOS VALORES EXPERIMENTALES	95
TABLA N° 32.	COMPARACION DEL PROCEDIMIENTO RECOMENDADO CON OTROS RESULTADOS EXPERIMENTALES	102
TABLA N° 33.	ESTADIGRAFOS DEL PARAMETRO DE COMPARACION ENTRE EL PROCEDIMIENTO RECOMENDADO Y LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	104
TABLA N° 34.	MOMENTOS DE FLEXION MAXIMOS EN PLACAS RECTANGULARES UNIFORMEMENTE CARGADAS CON TRES BORDES SIMPLEMENTE APOYADOS Y EL CUARTO LIBRE. COEFICIENTE DE POISSON $\eta = 0.3$	130
TABLA N° 35.	CLAVO HELICOIDAL DE $1\frac{3}{4}$ " DE LONGITUD	134
TABLA N° 36.	CLAVO HELICOIDAL DE $2\frac{1}{2}$ " DE LONGITUD	135

	Página
TABLA N° 37. EXTRACCION DE CLAVO HELICOIDAL DE 1 ³ / ₄ " DE LONGITUD.	136
TABLA N° 38. EXTRACCION DE CLAVO HELICOIDAL DE 2 ¹ / ₂ " DE LONGITUD.	137
TABLA N° 39. EXTRACCION DE CLAVO LISO	138
TABLA N° 40. APLASTAMIENTO DE LA MADERA DE PINO RADIATA BAJO LA ACCION DE UN CLAVO HELICOIDAL. CARGA PARALELA A LA FIBRA	139
TABLA N° 41. UNIONES CLAVADAS CON CLAVOS HELICOIDALES DE 1 ³ / ₄ " DE LONGITUD. NUMERO DE CLAVOS: 4	142
TABLA N° 42. UNIONES CLAVADAS CON CLAVOS HELICOIDALES DE 2 ¹ / ₂ " DE LONGITUD. NUMERO DE CLAVOS: 4	143
TABLA N° 43. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS CONECTORES LIVIANOS. <u>MA</u> DERA USADA: PINO RADIATA, SECO. ENSAYO: FLEXION ...	153
TABLA N° 44. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS CONECTORES PESADOS. <u>MADE</u> RA USADA: PINO RADIATA LAMINADO ENCOLADO. ENSAYO: FLEXION	155
TABLA N° 45. CARGA NORMAL CARACTERISTICA PARA LOS CONECTORES <u>ENSA</u> YADOS	157
TABLA N° 46. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS CONECTORES LIVIANOS. <u>EN</u> SAYO: TORSION	159
TABLA N° 47. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS CONECTORES PESADOS. <u>EN</u> SAYO: TORSION	161

UNIONES APERNADAS

1.0 ANTECEDENTES

La estabilidad y resistencia de una estructura depende en gran medida de los elementos que unen las diferentes partes componentes de ella.

El diseño de una estructura en madera debe considerar los elementos de unión adecuados que permitan traspasar las cargas de un elemento a otro, con la confiabilidad que el diseñador ha supuesto.

Hoy en día es considerado de vital importancia que, en una estructura de madera, se materialicen las uniones entre piezas estructurales de forma segura, ya que si estas uniones fallan también lo hará la estructura completa. Debido a ello, en los últimos años, en los países desarrollados, se han realizado numerosos estudios e investigaciones en esta materia tendientes a mejorar el diseño de las uniones mecánicas de elementos estructurales de madera, con el fin de obtener una mayor confiabilidad, no sólo de la unión, sino de la madera como material estructural.

El actual método de cálculo y diseño de uniones apernadas utilizado en 1989, en Chile, se basa fundamentalmente en las recomendaciones del "Wood Handbook: Wood as an Engineering Material", Agriculture Handbook Nº 72, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, el cual, a su vez, se basa en las experiencias realizadas por Trayer en 1932.

Sin embargo, fallas recientes ocurridas en uniones apernadas en países desarrollados, en los cuales los principios de diseño y

cálculo se basaban en la teoría ya mencionada, han hecho dudar respecto del conocimiento básico de las uniones apernadas.

Es sabido que la resistencia y rigidez de una unión apernada depende de las propiedades físicas, mecánicas y geométricas de las piezas de madera que se unen y de las características mecánicas y geométricas del perno. Las propiedades de los elementos de madera que influyen en la unión son: el número y espesor de ellos, el tipo de material de los elementos laterales (acero o madera), la especie maderera, el contenido de humedad y la dirección de la carga con respecto a la dirección de las fibras. Por su parte, las propiedades de los pernos son: su diámetro, su tensión de fluencia, tolerancias de las perforaciones en la madera, espaciamiento entre ellos y distancias a los extremos y bordes de los elementos de madera. Además, en las uniones realizadas con varios pernos, la resistencia y rigidez de la unión es afectada por el número de pernos en una hilera, por la distancia entre éstas y por el desalineamiento o simetría de las mismas.

Factores externos que afectan a las uniones apernadas, y que también son necesarios conocer, son la duración de la carga, las condiciones ambientales a las que estarán expuestas y la preservación o tratamientos químicos previo a formar parte de la unión, a los que fueron sometidos los elementos de madera.

1.1. Estudios Realizados en Chile

Las investigaciones realizadas en Chile, y que pueden aportar antecedentes prácticos para respaldar una teoría sobre uniones apernadas son escasas. Entre éstas se pueden mencionar "Las Uniones en la Madera Estructural: Uniones de Pino insigne (radiata) con Pernos Sometidas a Carga Paralela y a Carga Normal a las Fibras" (Parte I y II respectivamente), realizada por el Centro de la Vivienda y Construcción de la

Universidad de Chile, el año 1966 y "Las Uniones en la Madera Estructural. Pernos y Tirafondos" realizada por José Benito L. como memoria para optar al título de Ingeniero Civil, en 1970.

El estudio realizado en uniones de Pino radiata consistió en ensayar probetas con carga paralela a la dirección de las fibras, tal como la que se muestra en la Figura Nº 1 y probetas con carga normal a la dirección de las fibras, como la mostrada en la Figura Nº 2. Ambos tipos de probetas se realizaron con tres piezas de Pino radiata, cuyo contenido de humedad era inferior a 16%, y unidas con un perno.

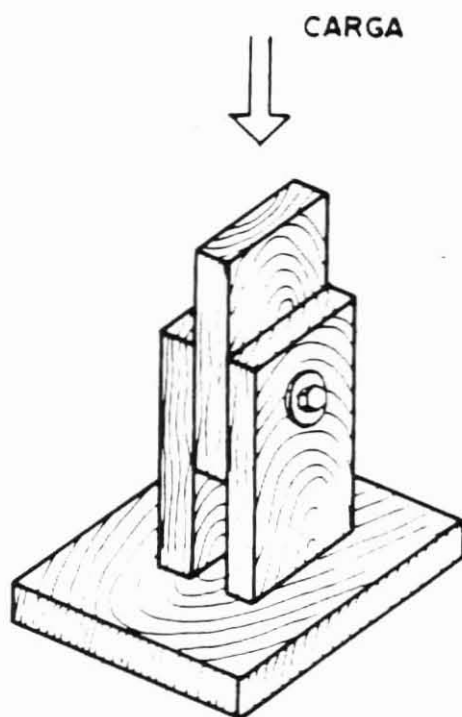


FIGURA Nº 1. Esquema de la probeta de ensayo con carga paralela a las fibras.

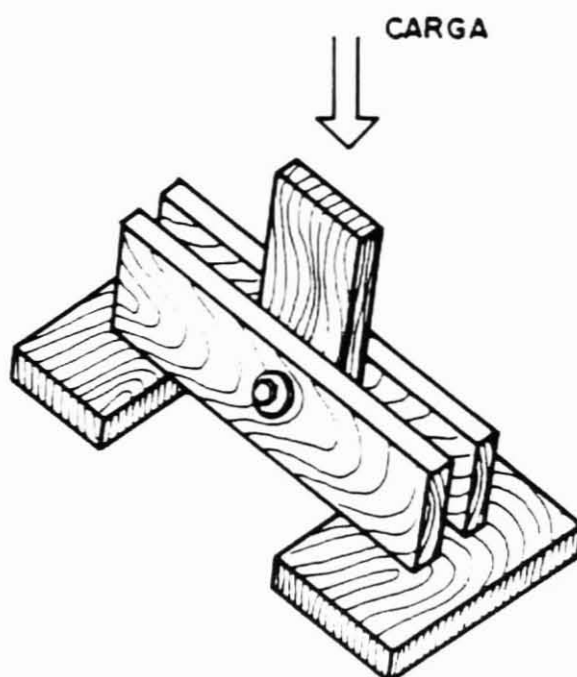


FIGURA Nº 2. Esquema de la probeta de ensayo con carga normal a las fibras.

Además de entregar los resultados obtenidos, en el Informe se desarrolla un método para la determinación de la tensión admisible, basado en la investigación de Trayer, y con ella se confecciona un ábaco que proporciona el esfuerzo unitario admisible por perno, para cualquier diámetro de éste y cualquier espesor de los elementos de unión. A partir de dicho ábaco se ha construido la Tabla Nº 1, que entrega la carga admisible de un perno en Pino radiata, sometido a cizalle doble; para las escuadrías y diámetros de pernos más comunes, tanto para sollicitaciones paralelas a las fibras como normales a ella.

La otra investigación mencionada es similar a la anterior en cuanto a la metodología de los ensayos, realizándose éstos con las especies Alamo, Pino radiata, Laurel, Araucaria y Ulmo. La diferencia fundamental es en cuanto al método desarrollado para determinar la carga ad

TABLA Nº 1. CARGA ADMISIBLE POR PERNO SOMETIDO A CIZALLE DOBLE PARA PINO RADIATA (1)

ESPESOR ELEMENTO CENTRAL (mm)	DIAMETRO DEL PERNO		CARGA ADMISIBLE POR PERNO	
			$P_{adm,p}^{2)}$	$P_{adm,n}^{3)}$
	(pulgada)	(mm)	(kN)	(kN)
25	1/4	6,35	1,20	1,34
	1/2	12,70	2,59	1,79
	3/4	19,05	3,89	2,26
	1	25,40	5,18	2,71
38	1/4	6,35	1,32	1,96
	1/2	12,70	3,90	2,73
	3/4	19,05	5,91	3,44
	1	25,40	7,87	4,13
50	1/4	6,35	1,31	2,00
	1/2	12,70	4,79	3,59
	3/4	19,05	7,69	4,52
	1	25,40	10,36	5,43
	1 1/4	31,75	12,95	6,36
63	1/4	6,35	1,32	1,87
	1/2	12,70	5,22	4,52
	3/4	19,05	9,06	5,70
	1	25,40	12,92	6,84
	1 1/4	31,75	16,32	8,01
75	1/4	6,35	1,31	1,70
	1/2	12,70	5,22	5,19
	3/4	19,05	10,78	6,78
	1	25,40	15,39	8,14
	1 1/4	31,75	19,23	9,54
100	1/2	42,70	5,22	5,38
	3/4	19,05	10,44	8,70
	1	25,40	19,17	10,86
	1 1/4	31,75	23,96	12,71

1) INFORME Nº 24: "Las Uniones en la Madera Estructural". Partes I y II. Centro de la Vivienda y Construcción. U. de Chile, 1966.

2) $P_{adm,p}$: Carga admisible para solicitación paralela a las fibras.

3) $P_{adm,n}$: Carga admisible para solicitación normal a las fibras.

misible de la unión apernada. Este método se basa en agrupar las especies madereras en función de su densidad anhidra. Para los dos grupos formados se construyeron ábacos que proporcionan la carga admisible por perno y espesor del elemento central, tanto para solicitaciones de compresión paralela a las fibras como para normales a ella. A partir de estos ábacos se ha confeccionado la Tabla N° 2, que entrega los mismos antecedentes de la Tabla N° 1, pero para los grupos madereros determinados.

1.2. Evolución de la Norma Chilena sobre Uniones Apernadas

1.2.1. Norma Chilena NCh 1198. Of. 77

La primera Norma Chilena que trató el tema de las uniones apernadas fue la NCh 1198 E Of.77 del año 1977. En ella se dice que las cargas admisibles para uniones de tres elementos sometidos a cizalle doble con carga paralela y normal a las fibras serán, para los diferentes grupos de especies y para los distintos estados de preparación de la madera, los que se incluyen en una Tabla adjunta. Esa Tabla, al parecer, es el resultado de una mezcla de las dos investigaciones mencionadas, pues se agrupan las especies de acuerdo a Benito y para las maderas del Grupo B se calcula la resistencia admisible al cizalle doble con las fórmulas por éste propuestas. Sin embargo, para las especies del Grupo A, se utilizan los valores del Informe N° 24 para la resistencia admisible paralela a las fibras y las de Benito para las normales.

Con esta norma se calcularon las uniones estructurales apernadas hasta 1988, fecha en la cual se procedió a su revisión. En tal ocasión se propuso un sistema más aplicable, numéricamente hablando, basado en una adaptación de lo propuesto por el Wood Handbook ya mencionado.

TABLA Nº 2. CARGA ADMISIBLE POR PERNO SOMETIDO A CIZALLE DOBLE, PARA MADERAS AGRUPADAS SEGUN SU DENSIDAD ANHIDRA (1)

ESPESOR ELEMENTO CENTRAL	DIAMETRO DEL PERNO		CARGA ADMISIBLE POR PERNO			
			MADERAS GRUPO A 2)		MADERAS GRUPO B 3)	
			$P_{adm,p}$	$P_{adm,n}$	$P_{adm,p}$	$P_{adm,n}$
(mm)	(pulgada)	(mm)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
25	1/4	6,35	2,23	1,84	2,97	2,12
	1/2	12,70	5,13	3,25	6,93	3,95
	3/4	19,05	8,34	4,53	11,36	5,69
	1	25,40	11,78	5,73	16,13	7,37
38	1/4	6,35	2,56	2,29	3,32	2,71
	1/2	12,70	5,89	4,04	7,72	5,06
	3/4	19,05	9,57	5,63	12,66	7,29
	1	25,40	13,52	7,13	17,99	9,44
50	1/4	6,35	2,81	2,64	3,56	3,19
	1/2	12,70	6,44	4,66	8,29	5,95
	3/4	19,05	10,48	6,49	13,60	8,57
	1	25,40	14,80	8,22	19,32	11,10
	1 1/4	31,75	19,35	9,87	25,37	13,57
63	1/4	6,35	3,03	2,97	3,78	3,65
	1/2	12,70	6,95	5,25	8,81	6,82
	3/4	19,05	11,31	7,32	14,44	9,82
	1	25,40	15,98	9,27	20,52	12,72
	1 1/4	31,75	20,88	11,13	26,94	15,55
75	1/4	6,35	3,21	3,26	3,96	4,05
	1/2	12,70	7,37	5,75	9,22	7,56
	3/4	19,05	11,98	8,02	15,11	10,88
	1	25,40	16,92	10,15	21,47	14,10
	1 1/4	31,75	22,12	12,19	28,19	17,24
100	1/2	12,70	8,10	6,68	9,93	8,95
	3/4	19,05	13,18	9,31	16,29	12,90
	1	25,40	18,61	11,79	23,14	16,71
	1 1/4	31,75	24,32	14,16	30,37	20,43

1) JOSE BENITO L. "Las Uniones en la Madera Estructural. Pernos y Tirafondos". Memoria para optar al título de Ing. Civil. Univ. de Chile. 1970.

2) Densidad anhidra $\leq 405 \text{ Kg/m}^3$.

3) Densidad anhidra $> 405 \text{ Kg/m}^3$.

1.2.2. Norma Chilena NCh 1198. Revisión 1989.

La proposición consiste, básicamente, en que la capacidad de carga admisible de un perno de acero solicitado en cizalle doble y en una unión constituida por tres piezas de la misma especie, con las piezas laterales paralelas entre sí y cada una de ellas de espesor igual a la mitad del espesor de la pieza central, se determina, en función de la esbeltez de la unión (λ_u), de acuerdo a las siguientes expresiones:

a) Para solicitaciones paralelas a la dirección de la fibra en la pieza central:

i) Si $\lambda_u \leq K_{cp}$

$$P_{cp,ad} = 0.8 \times F_{b,cp} \times \lambda_u \times D^2 \times 10^{-3}$$

ii) Si $K_{cp} < \lambda_u \leq K'_{cp}$

$$P_{cp,ad} = 0.8 \times F_{b,cp} \times D^2 \left[\frac{(Z_{cp} - K_{cp}) \times \lambda_u + (K'_{cp} - Z_{cp}) \times K_{cp}}{(K'_{cp} - K_{cp})} \right] \times 10^{-3}$$

iii) Si $\lambda_u > K'_{cp}$

$$P_{cp,ad} = 0.8 \times F_{b,cp} \times Z_{cp} \times D^2 \times 10^{-3}$$

en que:

$P_{cp,ad}$ = carga admisible para un perno, en kN.

$F_{b,cp}$ = tensión básica de aplastamiento en dirección paralela a las fibras, en MPa.

$$\lambda_u = \frac{e}{D} = \text{esbeltez de la unión.}$$

e = espesor del elemento central de la unión, en mm.

D = diámetro del perno, en mm.

Z_{cp}, K_{cp}, K'_{cp} = constantes que dependen de la especie y de sus diferentes agrupamientos.

b) Para solicitaciones normales a la dirección de la fibra en la pieza central:

i) Si $\lambda_u \leq K_{cn}$

$$P_{cn,ad} = F_{b,cn} \times \lambda_u \times D^2 \times 10^{-3}$$

ii) Si $\lambda_u > K_{cn}$

$$P_{cn,ad} = Z_{cn} \times F_{b,cn} \times D^{1.5} \times 10^{-3}$$

en que :

$P_{cn,ad}$ = carga admisible para un perno, en kN.

$F_{b,cn}$ = tensión básica de compresión en dirección normal a las fibras, en MPa.

Z_{cn}, K_{cn} = constantes que dependen de la especie maderera y de sus diferentes agrupamientos.

Los valores de $F_{b,cp}$ y $F_{b,cn}$ se obtienen de la Tabla Nº 3, los de K_{cp} , K'_{cp} y Z_{cp} de la Tabla Nº 4 y los de K_{cn} y Z_{cn} de la Tabla Nº 5.

TABLA Nº 3. TENSIONES BASICAS DE COMPRESION Y GRUPO A CONSIDERAR EN EL CALCULO DE LA TENSION ADMISIBLE DEL PERNO.

GRUPO ESTRUCTURAL DE LA MADERA (*)	SOLICITACION PARALELA			SOLICITACION NORMAL
	Tensión básica de compresión paralela, $F_{b,cp}$ (MPa)	Identificación del grupo para el cálculo		Tensión básica de compresión normal, $F_{b,cn}$ (MPa)
		CONIFERAS	LATIFOLIADAS	
ES 2	15.1	P 3	P 3	8.0
ES 3	12.9	P 3	P 3	5.5
ES 4	10.7	P 3	P 3	4.3
ES 5	8.9	P 2	P 2	3.2
ES 6	7.6	P 1	P 2	2.7

*) De acuerdo a NCh 1989.

TABLA Nº 4. CONSTANTES A USAR EN EL CALCULO DE LA CARGA ADMISIBLE PARA UN PERNO CON SOLICITACION PARALELA A LA DIRECCION DE LA FIBRA DE LA PIEZA CENTRAL.

GRUPO SEGUN TABLA Nº 5	CONSTANTES		
	K_{cp}	K'_{cp}	Z_{cp}
P 1	3	6	5.15
P 2	3	6	4.55
P 3	2	5	4.00

TABLA Nº 5. CONSTANTES A USAR EN EL CALCULO DE LA CARGA ADMISIBLE PARA UN PERNO CON SOLICITACION NORMAL A LA DIRECCION DE LA FIBRA DE LA PIEZA CENTRAL.

GRUPO ESTRUCTURAL DE LA MADERA (*)	CONSTANTES	
	K_{cn}	Z_{cn}
ES 2	$Z_{cn} / \sqrt{D}$	22
ES 3		24
ES 4		30
ES 5		34
ES 6		38

*) De acuerdo a NCh 1989.

1.2.3. Proposición INFOR para Norma Chilena NCh 1198. Revisión 1989

INFOR, con el fin de mejorar esta proposición ha incorporado valores más precisos y simplificado las fórmulas, quedando en definitiva:

- a) Para solicitaciones paralelas a la dirección de las fibras en la pieza central:

$$P_{cp,ad} = 0.8 \times F_{b,cp} \times K_a \times e \times D \times 10^{-3}$$

en que :

K_a = factor de corrección por aplastamiento de la madera,

calculado en función de la esbeltez del perno y de la agrupación de la especie.

- b) Para solicitaciones normales a la dirección de las fibras en la pieza central:

$$P_{cn,ad} = F_{b,cn} \times K_a \times K_d \times e \times D \times 10^{-3}$$

en que :

K_d = factor de corrección del efecto del diámetro del perno.

Los valores de $F_{b,cp}$ y $F_{b,cn}$ se obtienen de la Tabla Nº 6, los de K_a de la Tabla Nº 7 y los de K_d de la Tabla Nº 8.

TABLA Nº 6. TENSIONES BASICAS DE COMPRESION Y GRUPO A CONSIDERAR EN EL CALCULO DE LA TENSION ADMISIBLE DEL PERNO.

ESPECIE MADERERA	SOLICITACION PARALELA		SOLICITACION NORMAL	
	Tensión básica de compresión paralela $F_{b,cp}$ (MPa)	Identi ficación del grupo para el cálculo	Tensión básica de compresión normal $F_{b,cn}$ (MPa)	Identi ficación del grupo para el cálculo
Alamo	9.3	2	1.7	2
Alerce	12.0	3	2.1	2
Araucaria	14.7	3	4.2	4
Canelo de Chiloé	11.8	3	3.4	4
Ciprés de la Cordillera	12.6	3	2.9	3
Ciprés de las Guaitecas	12.2	3	4.6	4
Coihue	14.9	3	6.4	4
Coihue de Chiloé	13.2	3	4.0	4
Coihue de Magallanes	13.8	3	4.5	4
Eucalipto	21.0	3	7.2	4
Laurel	10.9	3	2.1	2
Lenga	12.5	3	3.4	4
Lingue	13.4	3	4.1	4
Mañfo macho	14.5	3	3.9	4
Olivillo	12.8	3	3.7	4
Pino oregón	13.0	3	3.1	4
Pino radiata	9.5	2	2.8	3
Raulf	16.4	3	4.6	4
Roble	15.6	3	9.4	4
Roble del Maule	14.9	3	6.3	4
Tepa	12.3	3	4.0	4
Ulmo	16.3	3	4.7	4

TABLA Nº 7. FACTOR DE CORRECCION POR APLASTAMIENTO DE LA MADERA, K_a .

RAZON e/D	SOLICITACION PARALELA A LAS FIBRAS			SOLICITACION NORMAL A LAS FIBRAS			
	GRUPO 1)			GRUPO 1)			
	1	2	3	1	2	3	4
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3	1.0	1.0	0.99	1.0	1.0	1.0	1.0
4	0.995	0.974	0.925	1.0	1.0	1.0	1.0
5	0.954	0.883	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0
6	0.856	0.758	0.672	1.0	1.0	1.0	0.963
7	0.734	0.65	0.576	1.0	1.0	0.973	0.869
8	0.642	0.569	0.504	1.0	0.961	0.881	0.75
9	0.571	0.506	0.448	0.946	0.863	0.767	0.646
10	0.514	0.455	0.403	0.85	0.762	0.672	0.554
11	0.467	0.414	0.366	0.761	0.676	0.593	0.484
12	0.428	0.379	0.336	0.686	0.61	0.52	0.425
13	0.395	0.35	0.31	0.622	0.553	0.459	0.375

1) De acuerdo a Tabla Nº 6.

TABLA Nº 8. FACTOR DE CORRECCION POR EFECTO DEL DIAMETRO DEL PERNO O BARRA DE ACERO, K_d .

DIAMETRO DEL PERNO O BARRA DE ACERO (mm)	FACTOR DE CORRECCION
6	2.56
9	1.99
12	1.71
15	1.55
19	1.42
22	1.35
25	1.27
28	1.23
32	1.19

2.0 TEORIA DE FLUENCIA PARA LAS UNIONES APERNADAS

2.1. Antecedentes Generales

La teoría más interesante que explica el desarrollo de la resistencia y comportamiento de las uniones apernadas es la llamada "Teoría de Fluencia Europea", cuyo autor es K. W. Johansen y data del año 1949.

Esta teoría, está regulada por dos grandes efectos:

- i) El "efecto de flexión", que depende de la resistencia del perno a la flexión y de la resistencia de la madera al "aplastamiento".
- ii) El "efecto de tracción" sobre el perno, que depende de la resistencia de éste a la tracción y del roce entre las superficies de contacto.

A partir de esta teoría, numerosos investigadores han realizado diversos estudios, con el fin de perfeccionar y simplificar los análisis y fórmulas.

MCLain y Thangjitham (1983) examinaron esta teoría para uniones apernadas en madera estructural, sometidas a cargas paralelas a las fibras y encontraron que los valores teóricos eran muy similares a los obtenidos en forma práctica. Soltis y otros (1986) ratificaron lo anterior y, además, verificaron que para uniones sometidas a cargas normales a la dirección de las fibras, también se producía dicha similitud.

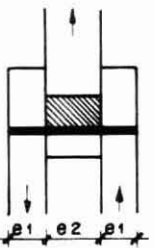
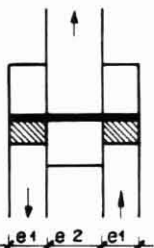
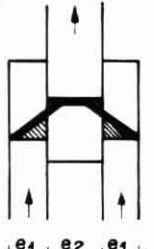
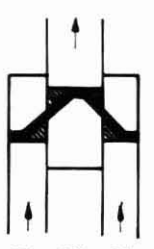
La teoría de fluencia supone que la capacidad resistente de una unión apernada se obtiene cuando ocurre una de las dos situaciones siguientes:

- a) La resistencia a la compresión de la madera bajo el perno es superada (modo de falla 1).
- b) Uno o más quiebres plásticos (puntos de fluencia) se producen en el perno (modo de falla 2 ó 3).

Estas suposiciones generan varios modos de fallas, dependiendo de los espesores de las piezas de madera a unir, de la resistencia a la compresión de éstas y de la resistencia del perno.

Los modos de falla típicos se muestran en la Tabla N° 9 para uniones sometidas a cizalle doble y en la Tabla N° 10 para cizalle simple. En ambos casos se indica la geometría de la falla y las fórmulas para determinar la resistencia o carga máxima de fluencia.

TABLA N° 9. GEOMETRIA Y ECUACIONES DE LA TEORIA DE FLUENCIA PARA UNIONES APERNADAS SOMETIDAS A CIZALLE DOBLE.

MODO DE FALLA	GEOMETRIA DE LA FALLA	PUNTOS DE FLUENCIA	CARGA MAXIMA DE FLUENCIA
1 a		0	$F_y = D \times e_2 \times S_2$
1 b		0	$F_y = \frac{2 \times D \times e_2 \times S_2}{\alpha \times \beta}$
2		2	$F_y = \frac{2 D e_2 S_2}{\alpha (2 + \beta)} \left[\sqrt{\frac{2 (1 + \beta)}{\beta} + \frac{2 S_y (2 + \beta) \alpha^2}{3 S_2 \left(\frac{e_2}{D}\right)^2}} - 1 \right]$
3		4	$F_y = 2 D^2 \times S_2 \sqrt{\frac{2 S_y}{3 S_2 (1 + \beta)}}$

D = diámetro del perno

S_y = resistencia de fluencia del perno

S_1 = resistencia de fluencia del elemento lateral

S_2 = resistencia de fluencia del elemento central

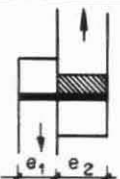
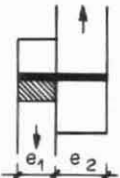
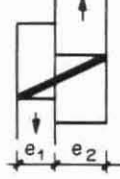
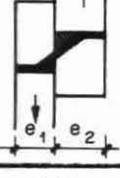
e_1 = espesor del elemento lateral

e_2 = espesor del elemento central

$\alpha = e_2/e_1$

$\beta = S_2/S_1$

TABLA Nº 10. GEOMETRIA Y ECUACIONES DE LA TEORIA DE FLUENCIA PARA UNIONES APERNADAS SOMETIDAS A CIZALLE SIMPLE.

MODO DE FALLA	GEOMETRIA DE LA FALLA	PUNTOS DE FLUENCIA	CARGA MAXIMA DE FLUENCIA
1a		0	$F_y = D \times e_2 \times S_2$
1b		0	$F_y = \frac{D \times e_2 \times S_2}{\alpha \times \beta}$
2		0	$F_y = \frac{D \times e_2 \times S_2}{\alpha \times \beta} \left[\sqrt{\frac{\beta + 2\beta^2(1 + \alpha + \alpha^2) + \alpha^2\beta^3 - \beta(1 + \alpha)}{(1 + \beta)}} \right]$
3a		1	$F_y = \frac{D \times e_2 \times S_2}{\alpha (2 + \beta)} \left[\sqrt{\frac{2(1 + \beta)}{\beta} + \frac{2 S_y (2 + \beta) \alpha^2}{3 S_2 \left(\frac{e_2}{D}\right)^2}} - 1 \right]$
3b		1	$F_y = \frac{D \times e_2 \times S_2}{(1 + 2\beta)} \left[\sqrt{2(1 + \beta) + \frac{2 S_y (1 + 2\beta)}{3 S_2 \left(\frac{e_2}{D}\right)^2}} - 1 \right]$
4		2	$F_y = D^2 \sqrt{\frac{2 S_2 S_y}{3 (1 + \beta)}}$

D = diámetro del perno
 S_y = resistencia de fluencia del perno
 S_1 = resistencia de fluencia del elemento 1
 S_2 = resistencia de fluencia del elemento 2

e_1 = espesor del elemento 1
 e_2 = espesor del elemento 2
 α = e_2/e_1
 β = S_2/S_1

Es importante destacar la diferencia que existe entre la resistencia en el límite proporcional y la resistencia de fluencia. El límite proporcional está definido como el punto en el cual la curva carga-deformación deja de ser lineal; el punto de fluencia se define como el resultante de la intersección de la prolongación de la parte recta de la curva mencionada y la tangente a dicha curva (ver Figura N° 3).

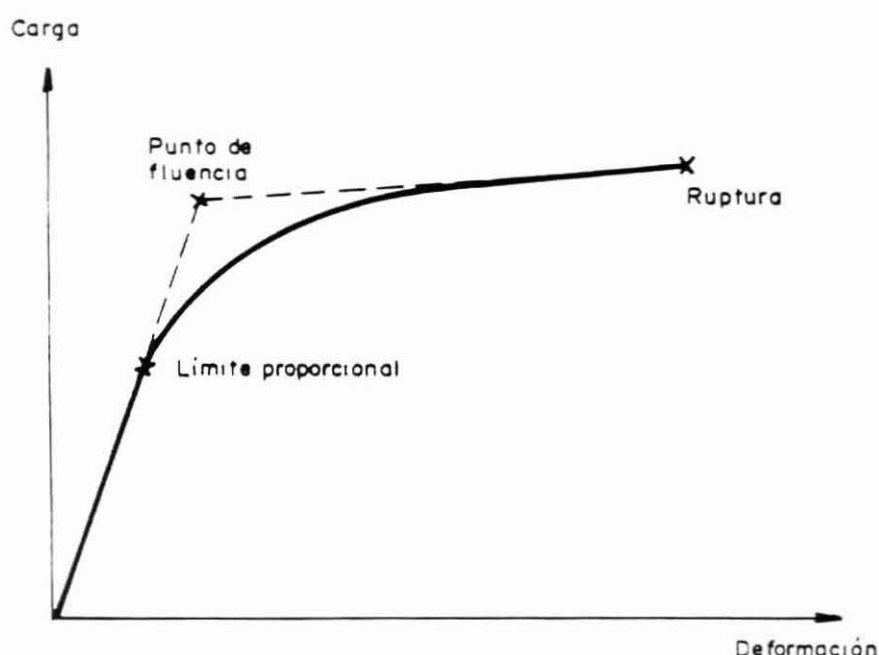


FIGURA N° 3. Esquema de la curva carga - deformación para una unión apernada.

2.2. Desarrollo de una Expresión de Diseño Práctica para la Teoría de Fluencia Aplicada a Uniones Apernadas

Para efectos de este estudio, se tomarán las siguientes consideraciones, que son las corrientemente utilizadas en el diseño y cálculo de uniones apernadas.

- i) Todos los elementos de madera que forman parte de la unión estructural, son de la misma especie, por lo tanto sus propiedades resistentes son las mismas. Con esto, el valor del parámetro β , en las ecuaciones de la teoría de fluencia, toma el valor 1 (es decir: $S_1 = S_2 = S$).
- ii) El espesor de los elementos laterales es igual a la mitad del espesor del elemento central, con lo que el valor del parámetro α , para las ecuaciones en análisis, toma el valor 2 (es decir: $e_2 = 2 e_1 = e$).

Al introducir estas consideraciones en las ecuaciones de la teoría de fluencia, se tiene que, para el caso de uniones apernadas sometidas a cizalle doble, los modos de falla 1a y 1b coinciden, y las ecuaciones para determinar la carga máxima de fluencia quedan reducidas a:

$$\text{Modo de falla 1 : } F_y = D \times e \times S \quad (1)$$

$$\text{Modo de falla 2 : } F_y = \frac{D^2 \times S}{3} \left[\sqrt{4 \times \left(\frac{e}{D}\right)^2 + \frac{8 S_y}{S}} - \frac{e}{D} \right] \quad (2)$$

$$\text{Modo de falla 3 : } F_y = 2 \times D \times \sqrt{\frac{S \times S_y}{3}} \quad (3)$$

Para determinar cuál de las tres fórmulas anteriores corresponde utilizar en el diseño y cálculo de una unión apernada sometida a cizalle doble, se debe calcular la esbeltez de la unión (λ_u), la cual es la razón entre el espesor del elemento central y el diámetro del perno, es decir:

$$\lambda_u = \frac{e}{D} \quad (4)$$

Los límites o rangos dentro de los cuales se encuentra ca

da modo de falla, se determinan igualando las ecuaciones (1) y (2) por una parte, y las ecuaciones (2) y (3) por otra, obteniéndose los siguientes valores:

$$\text{Modo de falla 1 : } \lambda_u \leq \sqrt{\frac{2}{3}} \times \sqrt{\frac{S_y}{S}}$$

$$\text{Modo de falla 2 : } \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\frac{S_y}{S}} < \lambda_u \leq \frac{2\sqrt{3}}{3} (1 + \sqrt{2}) \sqrt{\frac{S_y}{S}}$$

$$\text{Modo de falla 3 : } \lambda_u > \frac{2\sqrt{3}}{3} (1 + \sqrt{2}) \sqrt{\frac{S_y}{S}}$$

En la Figura N° 4 se puede observar esta situación en forma más clara.

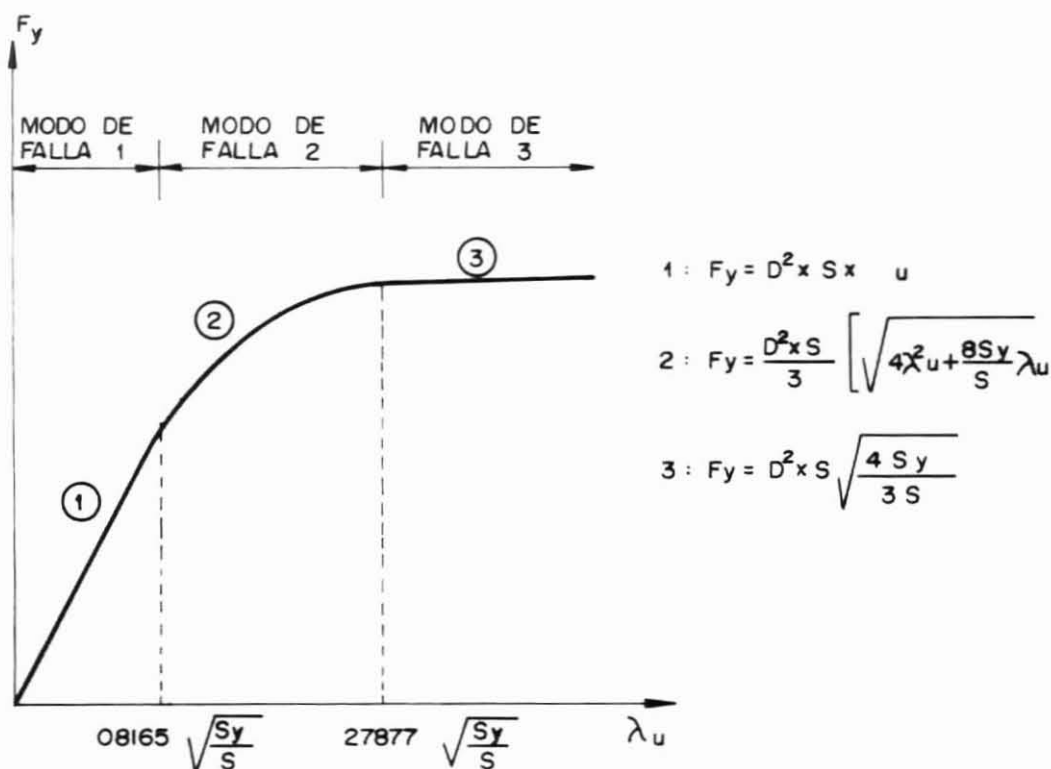


FIGURA N° 4. Esquema de la curva carga máxima de fluencia vs esbeltez de la unión.

El valor de la resistencia de fluencia del perno (S_y) se determina mediante ensayos normalizados, para diferentes diámetros, pues se ha demostrado que este valor varía de acuerdo al diámetro del perno. Esto se puede observar en el punto 3.

Por otra parte, el valor de la resistencia de fluencia del elemento central (S), también se determina mediante ensayos normalizados, pero a falta de éstos, se puede obtener de acuerdo a lo indicado en el punto 2.3.

2.3. Criterio de Smith y Whale

Estos investigadores toman como base las ecuaciones de la teoría de fluencia desarrolladas en los puntos 2.1 y 2.2.

Mediante un completo programa de ensayos de aplastamiento de distintas especies madereras bajo la acción de pernos con diferentes diámetros, Smith y Whale, encontraron ecuaciones de regresión lineal entre la tensión de aplastamiento (S) de la madera y la densidad normal (ρ_{12}).

Estas regresiones lineales son las indicadas en la Tabla N° 11.

TABLA Nº 11. ECUACIONES DE REGRESION LINEAL ENTRE LA TENSION DE APLASTAMIENTO (S) Y LA DENSIDAD NORMAL (P_{12}).

DIRECCION DE LA CARGA RESPECTO A LA FIBRA	TIPO DE MADERA	ECUACION DE REGRESION LINEAL	COEFICIENTE DE CORRELACION
Paralela a la Fibra	Coníferas y Latifoliadas	$S = (0,082 - 0,00082 \times D) \times P_{12}$	$r = -0,72$
Normal a la Fibra	Coníferas	$S = (0,041 - 0,00088 \times D) \times P_{12}$	$r = -0,91$
	Latifoliadas	$S = (0,043 - 0,00081 \times D) \times P_{12}$	$r = -0,85$

S : tensión de aplastamiento, en MPa.

D : diámetro del perno, en mm.

P_{12} : densidad normal (masa y volumen determinados para un contenido de humedad $H = 12\%$), en Kg/m^3 .

Asumen que la fijación parcial producida por las arandelas que se ubican bajo la cabeza del perno y bajo la tuerca, inhiben el desarrollo de la falla tipo 2, señalada en la Tabla Nº 9.

Afirman que es razonable aplicar, a las uniones con pernos, sólo las ecuaciones:

$$1) F_{y,1} = D \times e_2 \times S$$

$$2) F_{y,2} = 2 D^2 \sqrt{\frac{S \times S_y}{3}}$$

considerando como capacidad de carga final de la unión, al menor valor que resulta de ambas ecuaciones.

La capacidad de carga que entrega la teoría de fluencia (F_y) queda expresada en N (para pernos que tengan una resistencia de fluencia de a lo menos 240 MPa) si el diámetro (D) del perno se mide en mm y las tensiones S y S_y , se expresan en MPa.

Recomiendan que el valor de la tensión de aplastamiento (S en MPa) puede ser determinado, tanto para coníferas como para latifoliadas, mediante la expresión simplificada:

$$S = \frac{0,0008 \rho_{12} (100 - D)}{2,3 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta}$$

Con :

D = diámetro del perno, en mm.

ρ_{12} = densidad normal, calculada con masa y volumen determinados para H = 12%, en Kg/m³.

θ = ángulo entre la dirección de la carga y la dirección de la fibra en el elemento de la unión que se esté considerando.

Es posible expresar la ecuación anterior en función de la densidad anhidra (ρ_o), usando la relación:

$$\rho_{12} = \rho_o \frac{100 + 12}{100 + K \times 12} = \rho_o \frac{112}{100 + K \times 12}$$

Con :

K = coeficiente de contracción volumétrica.

Aplicando el criterio de Smith y Whale al Pino radiata, se obtiene que:

$$S = \frac{0,0008 \times \rho_{12} (100 - D)}{2,3 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} \quad (5)$$

y considerando que :

$$\rho_{12} = \rho_o \frac{100 + 12}{100 + K \times 12}$$

en que el coeficiente de contracción volumétrica K es :

$$K = k_T + k_R$$

Con :

$$k_T = \text{coeficiente de contracción tangencial} = 0,29$$

$$k_R = \text{coeficiente de contracción radial} = 0,20$$

se obtiene :

$$K = 0,29 + 0,20 = 0,49$$

$$\rho_{12} = \rho_o \frac{100 + 12}{100 + 0,49 \times 12} = 1,0578 \times \rho_o$$

Reemplazando en la ecuación (5), se tiene :

$$S = \frac{0,0008 \times 1,0578 \times \rho_o (100 - D)}{2,3 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} \quad (6)$$

i) Si la sollicitación es : compresión paralela ($\theta = 0^\circ$)

$$S_{cp} = \frac{0,000846 \times \rho_o (100 - D)}{1}$$

$$S_{cp} = 0,000846 (100 - D) \times \rho_o \quad (\text{MPa}) \quad (7)$$

ii) Si la sollicitación es : compresión normal ($\theta = 90^\circ$)

$$S_{cn} = \frac{0,0008 \times 1,0578 \times \rho_o (100 - D)}{2,3 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta}$$

$$S_{cn} = \frac{0,000846 (100 - D) \rho_o}{2,3}$$

$$S_{cn} = 0,000368 (100 - D) \times \rho_o \quad (\text{MPa}) \quad (8)$$

En las ecuaciones (6), (7) y (8), las unidades de medición son :

S = tensión de aplastamiento en la madera, MPa.

D = diámetro del perno, mm.

ρ_o = densidad anhidra, Kg/m³.

Finalmente, las ecuaciones que entregan la capacidad de carga de fluencia (F_y) de las uniones apernadas de Pino radiata, solicitadas a cizalle doble, son :

Para compresión paralela :

$$I) F_{y,1} = 0,000846 (100 - D) \times D \times e_2 \times \rho_o \quad (N)$$

$$II) F_{y,2} = 0,0336 \times D^2 \sqrt{(100 - D) \times \rho_o \times S_y} \quad (N)$$

Para compresión normal :

$$I) F_{y,1} = 0,000368 \times (100 - D) \times D \times e_2 \times \rho_o \quad (N)$$

$$II) F_{y,2} = 0,02215 \times D^2 \sqrt{(100 - D) \times \rho_o \times S_y} \quad (N)$$

Si se introduce el parámetro $\lambda_u = e_2/D$ las ecuaciones son:

Para: compresión paralela

$$F_{y,p} \rightarrow \min \begin{cases} F_{y,1} = 0,000846 (100 - D) \times D^2 \times \lambda_u \times \rho_o & (N) \\ F_{y,2} = 0,0336 \times D^2 \left[(100 - D) \times \rho_o \times S_y \right]^{1/2} & (N) \end{cases}$$

Para: compresión normal

$$F_{y,n} \rightarrow \min \begin{cases} F_{y,1} = 0,000368 (100 - D) \times D^2 \times \lambda_u \times \rho_o & (N) \\ F_{y,2} = 0,02215 \times D^2 \left[(100 - D) \times \rho_o \times S_y \right]^{1/2} \end{cases}$$

Si se desea obtener el valor de F_y en Kg, las fórmulas quedan :

i) Compresión paralela

$$F_{y,p} \rightarrow \text{mín} \begin{cases} F_{y,1} = \frac{(100 - D) \times D^2 \times \lambda_u \times \rho_o}{11590} & (\text{Kg}) \\ F_{y,2} = \frac{D^2 \left[(100 - D) \times \rho_o \times S_y \right]^{1/2}}{290} & (\text{Kg}) \end{cases}$$

ii) Compresión normal

$$F_{y,n} \rightarrow \text{mín} \begin{cases} F_{y,1} = \frac{(100 - D) \times D^2 \times \lambda_u \times \rho_o}{26650} & (\text{Kg}) \\ F_{y,2} = \frac{D^2 \left[(100 - D) \times \rho_o \times S_y \right]^{1/2}}{440} & (\text{Kg}) \end{cases}$$

En las fórmulas que preceden se deben usar las siguientes unidades de medición :

$D \rightarrow \text{mm}$; $\rho_o \rightarrow \text{Kg/m}^3$ (ver Tabla N° 12)

$S_y \rightarrow \text{MPa}$ (ver Tabla N° 14)

Los valores medios de la densidad anhidra (ρ_o) para diferentes especies madereras se incluyen en la Tabla N° 12 y los correspondientes a la tensión de fluencia (S_y) de los pernos ensayados en este estudio, para distintos diámetros, se incluyen en la Tabla N° 14.

TABLA Nº 12. DENSIDADES ANHIDAS (ρ_o) MEDIAS PARA DIFERENTES ESPECIES MADERAS.

ESPECIE MADERERA Nombre Común	DENSIDAD ANHIDRA (Kg/m^3)	
	VALOR MEDIO ρ_o	VALOR CARACTERISTICO $\rho_{o,K}^*$
Alamo	370	357
Alerce	460	
Canelo	470	440
Ciprés de la Cordillera	470	
Ciprés de las Guaitecas	470	390
PINO RADIATA	450	370
Pino oregón	410	326
Araucaria	570	
Coigüe de Chiloé	590	505
Laurel	510	
Lenga	540	476
Lingue	596	
Maño hojas punzantes	520	
Olivillo	550	
Raulí	510	
Tepa	520	442
Algarrobo	740	
Coigüe	650	400
Coigüe de Magallanes	620	
Eucalipto	800	543
Roble	630	
Roble del Maule	680	605
Tineo	700	
Ulmo	630	

* Calculada como la percentila de 5% de exclusión: ($\rho_{o,K} = \rho_o - 1,645 \times s \rho_o$).

3.0 COMPARACION ENTRE LOS DIFERENTES CRITERIOS

3.1. Agrupación de los Criterios Estudiados

Los antecedentes incluidos en los capítulos 1.0 y 2.0 tienen diferentes parámetros de medición. Es así como:

- i) la norma NCh 1198, versión 1977, entrega las CARGAS ADMISIBLES por perno, sometido a cizalle doble, para maderas agrupadas según su densidad anhidra. (Ver Tabla N° 2).
- ii) la versión 1989 de la misma norma especifica un procedimiento para obtener dichas CARGAS ADMISIBLES, usando la esbeltez de la unión (λ_u). (Ver párrafo 1.2.2.), y
- iii) la proposición INFOR presentada en el párrafo 1.2.3. de este Informe también está orientada a la obtención de las CARGAS ADMISIBLES.

En cambio, la teoría de fluencia y el criterio de Smith and Whale entregan expresiones para determinar la CARGA MAXIMA DE FLUENCIA (F_y).

A fin de comparar la totalidad de estos criterios entre sí y cada uno de ellos con los resultados experimentales obtenidos de los ensayos de probetas fabricadas con Pino radiata y Coigüe, se procederá a efectuar un agrupamiento de tales criterios, reuniendo a los que determinan la Carga Admisible en un grupo (GRUPO 1) y a los que entregan la Carga Máxima de Fluencia, en el Grupo N° 2. Posteriormente se compararán ambos grupos con los resultados experimentales.

Para todos los criterios se usarán las características de las uniones diseñadas y ensayadas expresamente para este estudio y cuyos resultados se incluyen en las Tablas N° 13 y N° 14.

3.2. Comparación de los Criterios que Entregan la Carga Admisible. GRUPO 1

3.2.1. Criterio Según Norma Chilena NCh 1198 Of. 77

El procedimiento especificado en esta norma se aplicará a las siguientes características de la unión (Probeta PA 3-2):

- a) Especie : Pino radiata
Diámetro del perno : $D = 1/4" = 6,2 \text{ mm}$
Espesor elemento central : $e = 37,6 \text{ mm}$
Densidad anhidra : $\rho_o = 495 \text{ Kg/m}^3$
Contenido de humedad : 12,0%



Si :

$P_{adm,p}$ = carga admisible por perno, en dirección paralela a la fibra.

$P_{adm,n}$ = carga admisible por perno, en dirección normal a la fibra.

se obtiene de la Tabla N° 2 :

$$P_{adm,p} = 3,32 \text{ kN} \approx 339 \text{ Kg}$$

$$P_{adm,n} = 2,71 \text{ kN} \approx 277 \text{ Kg}$$

3.2.2. Criterio Según Norma Chilena NCh 1198. Revisión 1989

Probeta : PA 3-2

Características de la unión : Ver 3.2.1.

Con tales datos se obtiene : $\lambda_u = e/D = 6,06$

Pino radiata seco : Grupo Estructural : ES 5
Identificación del grupo para el cálculo : P 2
Tensión básica de Compresión Paralela : $F_{b,cp} = 8,9 \text{ MPa}$
Tensión básica de Compresión Normal : $F_{b,cn} = 3,2 \text{ MPa}$

Solicitud Paralela a la Fibra (Ver Tabla N° 4)

$$\begin{aligned}\text{Grupo : } & P 2 \\ K_{cp} &= 3 \\ K'_{cp} &= 6 < \lambda_u = 6,06 \\ Z_{cp} &= 4,55\end{aligned}$$

Solicitud Normal a la Fibra (Ver Tabla N° 5)

$$\begin{aligned}\text{Grupo Estructural : } & ES 5 \\ Z_{cn} &= 34 \\ K_{cn} = Z_{cn}/\sqrt{D} &= 34/\sqrt{6,2} = 13,7 > \lambda_u = 6,06\end{aligned}$$

Carga admisible del perno solicitado en dirección:

i) Paralela a la Fibra :

$$\begin{aligned}\lambda_u &> K'_{cp} \\ P_{cp,ad} &= 0,8 \times F_{b,cp} \times Z_{cp} \times D^2 \times 10^{-3} \\ P_{cp,ad} &= 0,8 \times 8,9 \times 4,55 \times \overline{6,2}^2 \times 10^{-3} \\ P_{cp,ad} &= 1,245 \text{ kN} \approx 127 \text{ Kg}\end{aligned}$$

ii) Normal a la Fibra :

$$\lambda_u < K_{cn}$$

$$P_{cn,ad} = F_{b,cn} \times \lambda_u \times D^2 \times 10^{-3}$$

$$P_{cn,ad} = 3,2 \times 6,06 \times 6,2^2 \times 10^{-3}$$

$$P_{cn,ad} = 0,745 \text{ kN} = 76 \text{ Kg}$$

3.2.3. Proposición INFOR a la NCh 1198. Revisión 1989

Probeta : PA 3-2

Característica de la unión : Ver 3.2.1.

- i) Solicitaciones paralelas a la dirección de las fibras en la pieza central

Si :

K_a = factor de corrección por aplastamiento, según esbeltez (λ_u) y agrupación de la especie.

Para : $\lambda_u = 6,06$

$F_{cp,ad} = 9,5 \text{ MPa}$ (Tabla Nº 6)

Grupo : 2 (Ver Tabla Nº 6)

Se obtiene : $K_a = 0,752$ (Tabla Nº 7)

Luego :

$$P_{cp,ad} = 0,8 \times F_{b,cp} \times K_a \times e \times D \times 10^{-3}$$

$$P_{cp,ad} = 0,8 \times 9,5 \times 0,752 \times 37,6 \times 6,2 \times 10^{-3}$$

$$P_{cp,ad} = 1,332 \text{ kN} \approx 133 \text{ Kg}$$

ii) Solicitaciones normales a la dirección de las fibras en la pieza central

Si :

K_d = factor de corrección del efecto del diámetro del perno.

Para : $\lambda_u = 6,06$

$D = 6,2 \text{ mm}$

$K_d = 2,522$ (De Tabla Nº 8)

$F_{b,cn} = 2,8 \text{ MPa}$

Grupo : 3

$K_a = 0,9984$ (De Tabla Nº 7)

$K_d = 2,522$

Luego :

$$P_{cn,ad} = F_{b,cn} \times K_a \times K_d \times e \times D \times 10^{-3}$$

$$P_{cn,ad} = 2,8 \times 0,9984 \times 2,522 \times 37,6 \times 6,2 \times 10^{-3}$$

$$P_{cn,ad} = 1,644 \text{ kN} \approx 168 \text{ Kg}$$

En resumen, para la unión elegida en la comparación, se tienen los siguientes valores de Cargas Admisibles.

CRITERIO	CARGA ADMISIBLE, EN Kg	
	PARALELA A LA FIBRA	NORMAL A LA FIBRA
NCh 1198 Of. 77	339	277
NCh 1198. Revisión 1989	127	76
Proposición INFOR (NCh 1198. Revisión 1989)	133	168

En el cuadro anterior se observan notorias diferencias entre los tres criterios analizados. Esto señala la conveniencia de extender el ejemplo a todas las probetas ensayadas tanto de Pino radiata como de Coigüe. Los resultados de la aplicación de dichos criterios a las probetas ensayadas en compresión paralela se indican en las Tablas Nº 13 y Nº 14. En la Figura Nº 5, se indica la posición relativa de los tres parámetros que intervienen, a saber: Carga Admisible, Carga en el Límite de Proporcionalidad y Carga en el Punto de Fluencia.

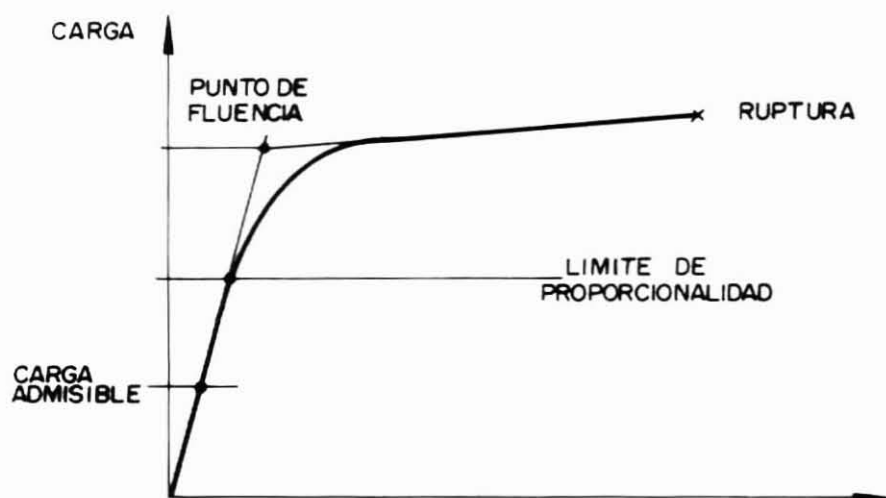


FIGURA Nº 5. Posición relativa de las cargas.

TABLA Nº 13.

COMPARACION DE LOS CRITERIOS QUE ENTREGAN LAS CARGAS ADMISIBLES Y APLICACION DE ELLOS USANDO LAS CARACTERISTICAS DE LAS PROBETAS ENSAYADAS EN COMPRESION PARALELA A LA FIBRA. PINO RA
DIATA.

PROBETA Nº	DIAMETRO DEL PERNO D (mm)	ESP. DEL ELE MENTO CENTRAL e (mm)	ESBELTEZ DE LA UNION $\lambda_u = e/D$	CONTENIDO DE HUMEDAD H (%)	DENSIDAD ANHIDRA ρ_o (Kg/m ³)	CARGA EN EL LIMITE DE PROPORCIONAL (Kg)	CARGA EN EL PUNTO DE FLUENCIA (Kg)	CARGA ADMISIBLE SEGUN		
								NCh 1198 Of. 77	NCh 1198 Revisión 1989	Proposición INFOR
PE 1 - 1	25,2	24,8	0,98	11,9	434	700	1590	1632	452	485
- 2	25,2	24,2	0,96	12,2	464	800	1540	1632	443	473
- 3	25,2	24,5	0,97	13,1	520	940	1640	1632	448	479
- 4	25,2	24,8	0,98	12,9	476	1000	1830	1632	452	485
- 5	25,2	24,5	0,97	11,8	447	900	1790	1632	448	479
PD 1 - 1	18,9	18,3	0,97	12,8	530	790	1020	-	252	268
- 2	18,2	18,6	1,02	14,0	501	600	905	-	245	263
- 3	19,0	18,0	0,95	13,2	492	450	815	-	249	265
- 4	19,2	18,5	0,96	13,6	490	510	860	-	257	275
- 5	19,0	17,9	0,94	13,7	445	460	770	-	247	264
PE 2 - 2	25,8	49,9	1,93	10,8	491	2760	4520	1971	933	998
- 3	25,8	49,2	1,91	11,0	466	1440	3700	1971	924	984
- 4	25,8	49,1	1,90	12,2	501	2620	3800	1971	919	982
- 5	25,8	50,0	1,94	10,4	464	2020	3680	1971	938	1000
PD 2 - 1	19,0	37,0	1,95	12,0	525	1400	2090	1292	511	545
- 2	19,0	37,0	1,95	13,0	459	1100	2240	1292	511	545
- 3	18,8	37,2	1,98	13,1	489	1040	1780	1292	508	542
- 4	19,6	37,0	1,89	12,8	513	1260	1840	1292	528	562
- 5	18,4	37,4	2,03	12,1	470	1400	1970	1292	499	534
PA 1 - 1	6,2	18,2	2,94	10,4	499	390	545	-	82	88
- 2	6,0	18,6	3,10	10,7	456	210	310	-	80	87
- 3	6,0	18,2	3,03	11,0	482	320	400	-	79	85
- 4	6,0	18,4	3,07	10,8	450	250	420	-	79	86
- 5	6,0	18,6	3,10	10,6	417	200	360	-	80	87

(Continúa)

TABLA Nº 13. (Continuación)

PROBETA Nº	DIAMETRO DEL PERNO D (mm)	ESP. DEL ELE MENTO CENTRAL e (mm)	ESBELTEZ DE LA UNION $\lambda_u = e/D$	CONTENIDO DE HUMEDAD H (%)	DENSIDAD ANHIDRA ρ_o (Kg/m³)	CARGA EN EL LIMITE DE PROPORCIONAL (Kg)	CARGA EN EL PUNTO DE FLUENCIA (Kg)	CARGA ADMISIBLE SEGUN		
								NCh 1198 Of. 77	NCh 1198 Revisión 1989	Proposición INFOR
PC 1 - 1	12,5	37,5	3,00	11,8	481	840	1440	788	341	363
- 2	12,5	37,8	3,02	12,0	466	960	1560	788	342	366
- 3	12,6	37,8	3,00	11,4	434	780	1340	788	346	369
- 4	12,2	37,8	3,10	11,4	443	700	1220	788	330	357
- 5	12,6	37,9	3,01	12,5	569	860	1380	788	347	370
PC 2 - 1	12,4	50,2	4,05	12,1	510	1120	1820	846	396	468
- 2	12,2	50,0	4,10	11,9	443	1160	1560	846	386	479
- 3	12,3	50,2	4,08	11,8	478	1600	1890	846	391	475
- 4	12,2	49,8	4,08	11,9	423	1080	1800	846	385	455
- 5	12,4	49,1	3,96	11,5	448	900	1600	846	391	460
PB 1 - 1	9,1	38,3	4,21	12,3	436	1060	1300	-	218	258
- 2	8,2	38,3	4,67	11,6	437	1040	1300	-	189	222
- 3	8,2	38,0	4,63	12,6	430	680	740	-	188	222
- 4	8,2	38,2	4,66	12,1	398	835	1050	-	189	222
- 5	8,2	38,0	4,63	12,0	422	690	735	-	188	221
PC 3 - 1	12,4	61,7	4,98	13,4	453	970	1750	899	450	525
- 2	12,4	62,4	5,03	13,9	522	860	1780	899	452	528
- 3	12,4	62,6	5,05	14,2	440	960	1700	899	454	528
- 4	12,4	62,3	5,02	14,1	435	1160	1740	899	452	528
- 5	12,3	62,4	5,07	12,1	480	1440	2170	899	447	520
PA 2 - 1	6,2	32,0	5,16	10,3	453	280	500	-	115	133
- 2	6,1	32,0	5,25	10,9	473	300	565	-	113	129
- 3	6,1	31,8	5,21	10,6	412	330	540	-	112	129
- 4	6,0	32,0	5,33	10,5	391	250	440	-	110	125
- 5	6,1	31,8	5,21	10,5	358	270	480	-	112	129

(Continúa)

TABLA N° 13. (Continuación)

PROBETA N°	DIAMETRO DEL PERNO D (mm)	ESP. DEL ELE MENTO CENTRAL e (mm)	ESBELTEZ DE LA UNION $\lambda_u = e/D$	CONTENIDO DE HUMEDAD H (%)	DENSIDAD ANHIDRA ρ_o (Kg/m³)	CARGA EN EL LIMITE DE PROPORCIONAL (Kg)	CARGA EN EL PUNTO DE FLUENCIA (Kg)	CARGA ADMISIBLE SEGUN		
								NCh 1198 Of. 77	NCh 1198 Revisión 1989	Proposición INFOR
PA 3 - 1	6,2	37,6	6,06	12,3	502	300	600	135	127	136
- 2	6,2	37,6	6,06	12,0	495	310	510	135	127	136
- 3	6,2	37,5	6,05	11,8	466	200	440	135	127	136
- 4	6,2	37,6	6,06	11,9	485	270	480	135	127	136
- 5	6,2	37,4	6,03	11,7	469	270	405	135	127	136
PC 4 - 1	11,2	74,7	6,67	13,0	472	1160	1720	533	415	445
- 2	11,8	74,6	6,32	12,1	464	880	1720	533	460	494
- 3	11,4	74,8	6,56	12,7	531	960	1350	533	430	461
- 4	11,8	75,2	6,37	11,8	463	920	1600	533	460	494
- 5	11,2	75,0	6,70	12,4	504	980	1410	533	415	445
PB 2 - 1	8,0	75,0	9,38	12,4	447	650	960	-	212	226
- 2	8,1	74,1	9,15	11,6	418	420	810	-	217	232
- 3	8,1	75,1	9,27	12,4	399	570	975	-	217	232
- 4	8,1	75,1	9,27	12,0	416	790	965	-	217	232
- 5	8,2	74,9	9,13	11,9	478	680	990	-	222	238
PA 4 - 1	5,2	50,2	9,65	12,2	391	190	345	-	89	96
- 2	5,2	49,7	9,56	13,0	416	195	385	-	89	96
- 3	5,4	50,2	9,30	12,5	374	200	340	-	96	103
- 4	5,3	50,0	9,43	13,0	467	240	400	-	93	99
- 5	5,5	49,6	9,36	12,2	408	190	390	-	100	103



TABLA Nº 14. COMPARACION DE LOS CRITERIOS QUE ENTREGAN LAS CARGAS ADMISIBLES Y APLICACION DE ELLOS USANDO LAS CARACTERISTICAS DE LAS PROBETAS ENSAYADAS EN COMPRESION PARALELA A LA FIBRA. COIGUE.

PROBETA Nº	DIAMETRO DEL PERNO D (mm)	ESP. DEL ELE MENTO CENTRAL e (mm)	ESBELTEZ DE LA UNION $\lambda_u = e/D$	CONTENIDO DE HUMEDAD H (%)	DENSIDAD ANHIDRA ρ_o (Kg/m ³)	CARGA EN EL LIMITE DE PROPORCIONAL (Kg)	CARGA EN EL PUNTO DE FLUENCIA (Kg)	CARGA ADMISIBLE SEGUN		
								NCh 1198 Of. 77	NCh 1198 Revisión 1989	Proposición INFOR
CD 1 - 1	18,8	18,2	0,97	9,3	519	470	1100	-	299	416
- 2	19,0	18,3	0,96	9,8	506	520	950	-	303	423
- 3	19,1	18,5	0,97	9,3	532	550	890	-	309	430
- 4	19,0	18,1	0,95	9,7	535	420	860	-	300	418
- 5	19,2	18,2	0,95	9,4	581	480	1050	-	306	425
CE 1 - 1	24,8	25,4	1,02	9,4	508	1220	2280	1646	548	782
- 2	24,8	25,0	1,01	10,1	504	1140	2200	1646	543	762
- 3	24,8	25,2	1,02	9,0	469	960	2020	1646	548	782
- 4	24,8	25,2	1,02	9,4	478	1020	2180	1646	548	782
- 5	24,8	25,2	1,02	9,9	466	1080	2260	1646	548	782
CD 2 - 1	19,4	38,0	1,96	10,4	524	1360	2180	1292	644	897
- 2	19,3	38,2	1,98	10,3	590	1580	2400	1292	644	897
- 3	19,5	38,0	1,95	10,7	509	1180	2340	1292	648	901
- 4	19,1	37,8	1,98	10,4	561	1460	2400	1292	631	878
- 5	19,3	38,0	1,97	10,2	565	1460	2500	1292	641	892
CE 2 - 1	25,1	50,4	2,01	10,1	510	1920	4160	1971	1104	1538
- 2	25,1	50,7	2,02	10,3	447	1960	4240	1971	1108	1548
- 3	25,1	50,6	2,02	10,8	488	1800	3910	1971	1108	1544
- 4	25,1	50,6	2,02	10,8	531	2240	4720	1971	1108	1544
- 5	25,1	50,5	2,01	10,7	486	2160	4560	1971	1104	1542
CA 1 - 1	6,1	17,8	2,92	11,1	464	205	355	-	85	131
- 2	6,0	17,8	2,97	10,0	564	210	450	-	83	129
- 3	6,0	17,9	2,98	9,5	563	280	465	-	83	129
- 4	6,1	18,1	2,97	9,7	492	210	380	-	86	133
- 5	6,0	18,0	3,00	9,3	515	290	505	-	84	130

(Continúa)

TABLA Nº 14. (Continuación)

PROBETA Nº	DIAMETRO DEL PERNO D (mm)	ESP. DEL ELE- MENTO CENTRAL e (mm)	ESBELTEZ DE LA UNION $\lambda_u = e/D$	CONTENIDO DE HUMEDAD H (%)	DENSIDAD ANHIDRA ρ_o (Kg/m³)	CARGA EN EL LIMITE DE PROPORCIONAL (Kg)	CARGA EN EL PUNTO DE FLUENCIA (Kg)	CARGA ADMISIBLE SEGUN		
								NCh 1198 Of. 77	NCh 1198 Revisión 1989	Proposición INFOR
CC 1 - 1	12,4	37,2	3,00	11,3	587	790	1330	788	358	555
- 2	12,4	37,6	3,03	11,5	558	770	1230	788	361	560
- 3	12,4	37,6	3,03	11,6	620	660	1270	788	361	560
- 4	12,4	37,4	3,02	10,7	545	730	1340	788	360	558
- 5	12,4	38,2	3,08	11,4	579	720	1330	788	365	567
CC 2 - 1	12,4	49,8	4,02	10,4	520	940	2040	846	449	693
- 2	12,6	49,6	3,94	10,2	638	1220	2380	846	457	706
- 3	12,3	49,5	4,02	11,0	563	1120	2060	846	442	688
- 4	12,5	49,5	3,96	10,3	525	960	2050	846	451	698
- 5	12,5	49,6	3,97	10,1	569	1160	2110	846	452	699
CB 1 - 1	8,2	38,0	4,63	10,4	533	470	1080	-	220	347
- 2	8,2	38,0	4,63	10,0	583	480	1160	-	220	347
- 3	8,6	38,0	4,42	10,8	589	570	1440	-	233	372
- 4	8,2	37,8	4,61	10,2	558	560	1320	-	220	346
- 5	8,2	37,8	4,61	10,1	483	510	1230	-	220	346
CC 3 - 1	11,4	62,4	5,47	26,4	528	740	1510	899	454	640
- 2	12,3	62,1	5,05	26,4	579	1060	2260	899	454	737
- 3	12,3	62,4	5,07	27,7	549	1060	2080	899	454	738
- 4	12,3	62,0	5,04	27,3	584	940	2020	899	454	737
- 5	11,1	61,5	5,54	22,5	492	760	1540	899	454	607
CA 2 - 1	6,2	31,9	5,15	11,1	533	330	920	-	134	188
- 2	6,2	31,8	5,13	11,5	495	310	690	-	134	188
- 3	6,2	31,9	5,15	11,3	636	290	770	-	134	188
- 4	6,2	31,8	5,13	10,9	544	320	760	-	134	188
- 5	6,2	31,9	5,15	12,0	590	280	840	-	134	188

(Continúa)

TABLA Nº 14. (Continuación)

PROBETA Nº	DIAMETRO DEL PERNO D (mm)	ESP. DEL ELE MENTO CENTRAL e (mm)	ESBELTEZ DE LA UNION $\lambda_u = e/D$	CONTENIDO DE HUMEDAD H (%)	DENSIDAD ANHIDRA ρ_o (Kg/m³)	CARGA EN EL LÍMITE DE PROPORCIONAL (Kg)	CARGA EN EL PUNTO DE FLUENCIA (Kg)	CARGA ADMISIBLE SEGUN		
								NCh 1198 Of. 77	NCh 1198 Revisión 1989	Proposición INFOR
CA 3 - 1	6,1	37,5	6,15	11,2	561	370	640	339	130	183
- 2	6,2	37,9	6,11	10,3	595	220	1000	339	134	189
- 3	6,1	38,0	6,23	10,1	646	310	720	339	130	183
- 4	6,2	38,0	6,13	10,4	608	270	730	339	134	186
- 5	6,1	38,1	6,25	10,5	612	280	690	339	130	183
CC 4 - 1	11,2	75,1	6,71	18,5	617	720	1380	941	438	618
- 2	12,8	75,5	5,90	24,1	626	960	1720	941	572	805
- 3	11,5	75,6	6,57	32,6	622	720	1360	941	462	653
- 4	11,2	75,7	6,76	31,7	634	820	1420	941	438	618
- 5	12,5	75,1	6,01	25,5	615	1060	1800	941	546	766
CB 2 - 1	8,1	75,6	9,33	30,6	535	480	1150	-	229	323
- 2	8,2	74,8	9,12	26,2	606	460	1070	-	235	330
- 3	8,2	75,2	9,17	21,8	548	500	1090	-	235	330
- 4	8,1	75,2	9,28	26,2	523	540	1120	-	229	323
- 5	9,2	75,0	8,15	21,4	555	440	990	-	296	416
CA 4 - 1	5,4	49,7	9,20	11,5	537	340	850	363	102	143
- 2	5,2	49,9	9,60	11,5	617	290	710	363	94	133
- 3	5,8	49,7	8,57	11,5	510	260	530	363	118	166
- 4	5,4	50,0	9,26	11,3	503	260	530	363	102	143
- 5	5,7	49,6	8,70	11,6	485	220	500	363	114	160

Analizando los resultados incluidos en las Tablas N° 13 y N° 14 se puede concluir que:

- a) los valores de la norma NCh 1198 Of. 77 varían en torno a la carga en el límite de proporcionalidad, superándola en diferentes casos, lo cual resulta peligroso para la unión.
- b) las cargas admisibles propuestas por la revisión 1989 de dicha norma son bastante conservadores. En general, no sobrepasan el 50% de la carga en el límite de proporcionalidad. Esto lleva a un sobredimensionamiento de la cantidad de pernos en una unión.
- c) la proposición que INFOR hace a la revisión 1989 de la norma NCh 1198, entrega valores que se ubican entre los dos criterios anteriores, obteniéndose cargas admisibles que varían entre un 40% y un 75% de la carga en el límite de proporcionalidad. El mayor de estos porcentajes se obtiene para maderas de alta densidad.

3.3. Comparación de los Criterios que entregan la Carga en el Punto de Fluencia. GRUPO 2

3.3.1. Antecedentes Generales

El criterio de la Teoría de Fluencia y el de los autores Smith y Whale usan, en sus fórmulas, los siguientes parámetros:

- i) El valor de la resistencia de fluencia del perno (S_y), y
- ii) El valor de la resistencia de fluencia por aplastamiento de la madera (S), del elemento central. Este último, según Smith y Whale, está correlacionado con la densidad de la madera.

En este estudio, estos parámetros han sido determinados mediante los ensayos que se describen a continuación:

3.3.2. Determinación de la Resistencia de Fluencia de Pernos

3.3.2.1. Ensayos Realizados

Para los ensayos destinados a determinar la resistencia de fluencia del perno (S_y), se adquirieron pernos corrientes, en el comercio con los siguientes diámetros $1/4"$, $3/8"$, $1/2"$, $5/8"$, $3/4"$ y $1"$.

El ensayo propiamente tal consistió en apoyar cada perno en dos puntos, con una luz " L ", sobre cuyo centro se aplicó una carga puntual " P ". El esquema del ensayo se observa en la Figura N° 6.

La carga P se aplicó en forma continua, procediéndose a leer la deformación " δ " cada cierto rango de carga, registrándose los datos del ensayo en formularios especialmente diseñados para tal efecto.

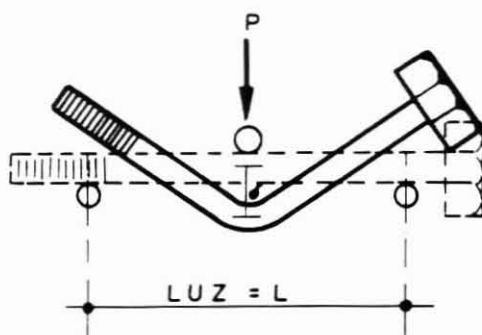


FIGURA N° 6. Esquema del ensayo para determinar la resistencia de fluencia de pernos.

Con los datos se confeccionaron gráficos de carga vs de

formación (ver Figura N° 7). En ellos se obtiene la carga de fluencia (P_y) de acuerdo a lo indicado en Figuras N° 3 y N° 7.

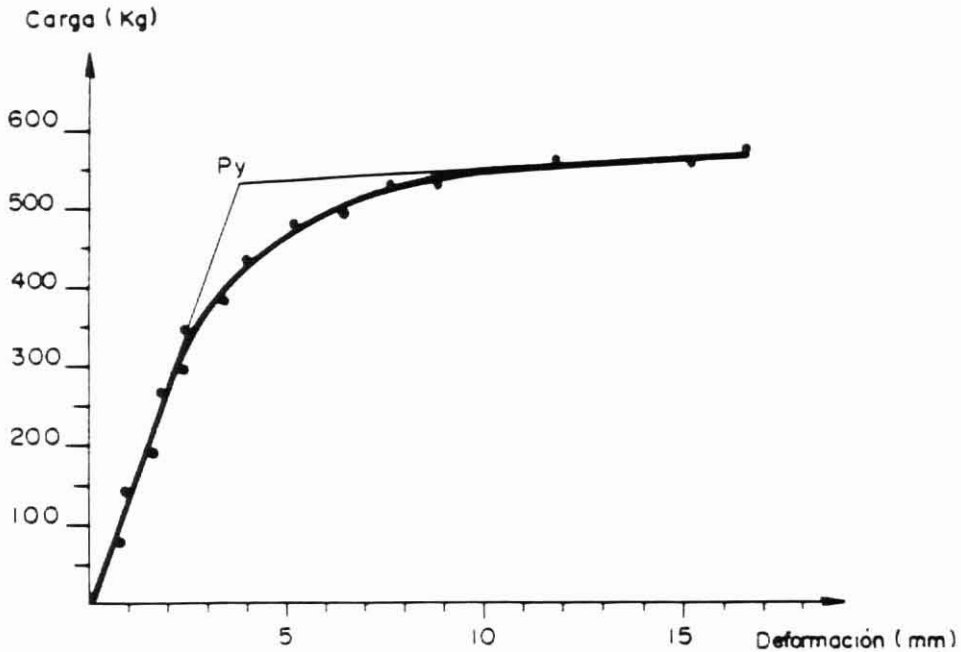


FIGURA N° 7. Gráfico de carga vs deformación que permite determinar la carga de fluencia.

Obtenida la carga de fluencia, se procede a calcular el momento plástico (M_y) mediante la expresión:

$$M_y = \frac{P_y \times L}{4}$$

en que :

M_y = momento plástico, en N x mm.

P_y = carga de fluencia, en N.

L = luz del ensayo, en mm.

Calculado el momento plástico, se obtiene la resistencia de fluencia del perno (S_y) de acuerdo a :

$$S_y = \frac{M_y}{Z}$$

Con : $Z = \frac{D^3}{6}$

en que :

S_y = resistencia de fluencia, en MPa.

Z = módulo plástico, en mm^3 .

D = diámetro del perno, en mm.

3.3.2.2. Resultados

Los resultados de los ensayos realizados para diferentes diámetros de pernos se señalan en la Tabla N° 15.

TABLA N° 15. RESISTENCIA DE FLUENCIA (S_y) OBTENIDAS PARA PERNOS CORRIENTES DE DIFERENTES DIAMETROS.

DIAMETRO DEL PERNO (Pulg.)	RESISTENCIA DE FLUENCIA (MPa)							
	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	ENSAYO 4	ENSAYO 5	MEDIA	DES- VIA- CION ESTANDAR	COEFICIEN- TE DE VARIACION
$1/4$	617.8	533.6	589.7	585.7	485.4	562.4	52.7	9.4 %
$3/8$	218.8	426.1	443.4	289.8	-	344.5	108.4	31.5 %
$1/2$	442.7	274.1	543.0	468.4	378.2	421.3	101.3	24.0 %
$5/8$	279.5	271.6	279.5	500.1	424.4	351.0	105.1	29.9 %
$3/4$	302.9	257.1	281.1	302.9	309.4	290.7	21.6	7.4 %
1	387.8	471.9	477.2	498.4	466.6	460.4	42.3	9.2 %

Analizando la Tabla N° 15, resulta evidente la existencia

de diferentes calidades de pernos en el mercado nacional, las cuales no pueden ser identificadas en forma visual. Para efectos de este estudio, se tomarán las resistencias de fluencia medias para pernos de diámetros $1/4"$, $3/4"$ y $1"$ y las mínimas para los de $3/8"$, $1/2"$ y $5/8"$.

Con ello, la resistencia de fluencia de pernos (S_y) que resultan son las indicadas en la Tabla N° 16.

Para efecto de diseño en Inglaterra, Canadá y Estados Unidos, se usa un valor común y único igual a 240 MPa.

TABLA N° 16. RESISTENCIA DE FLUENCIA (S_y) PARA PERNOS CORRIENTES.

DIAMETRO DEL PERNO		RESISTENCIA DE FLUENCIA (MPa)
Pulgada	mm	
$1/4$	6.35	562.4
$3/8$	9.53	218.8
$1/2$	12.70	274.1
$5/8$	15.88	271.6
$3/4$	19.05	290.7
1	25.40	460.4

3.3.3. Determinación de la Resistencia de Fluencia por Aplastamiento de la Madera (S)

3.3.3.1. Ensayos Realizados

Se usaron probetas con la forma señalada en la Figura N° 8.

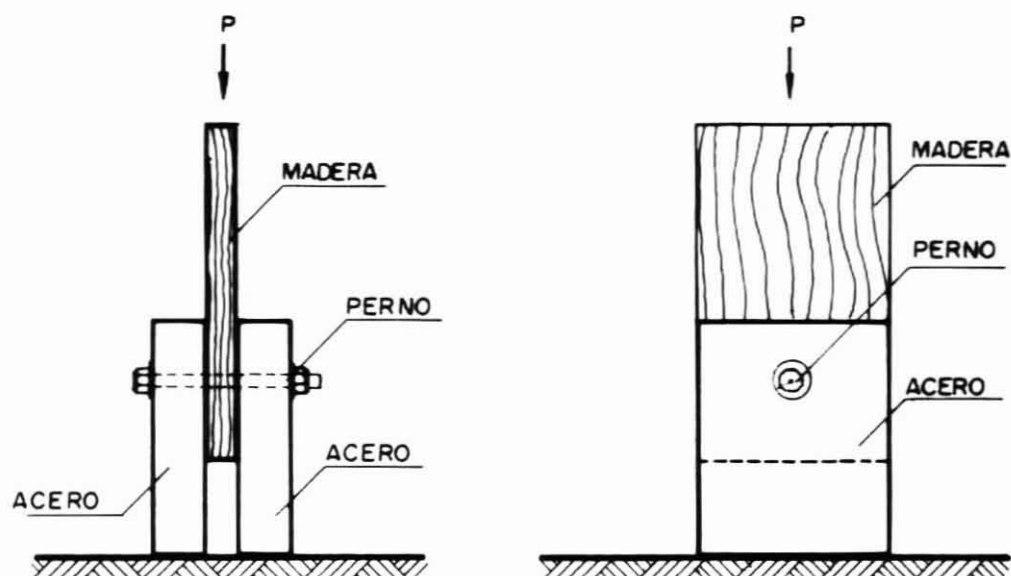


FIGURA Nº 8. Ensayo de aplastamiento en la madera.

Los pernos usados tenían diámetros (D) de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " y fueron adquiridos en el mercado de Santiago. Las maderas incluidas en este ensayo son: Alamo, Pino radiata, Tapa y Eucalipto, usando 5 repeticiones para cada grupo de parámetros.

Las probetas fueron solicitadas con carga paralela a las fibras de la madera y con carga normal a dichas fibras.

Por lo tanto el número de ensayos realizados resultaron :

Solicitaciones	: 2
Especies madereras	: 4
Diámetros de perno	: 2
Repeticiones	: 5
TOTAL DE ENSAYOS	: $2 \times 4 \times 2 \times 5 = 80$

Para cada ensayo se dibujó la curva carga-deformación que resultó con la forma señalada en la Figura N° 5.

En ella se obtuvo la carga en el límite de proporcionalidad, la carga en el punto de fluencia (P_y) y la carga de ruptura.

Con la carga en el punto de fluencia se calculó la tensión de fluencia por aplastamiento de la madera (S) mediante la expresión:

$$S = \frac{P_y}{\text{Espesor} \times \text{Diámetro del perno}} = \frac{P_y}{e \times D}$$

Una vez ensayadas las probetas, de ellas se extrajeron muestras para determinar el contenido de humedad (H) y las densidades de referencia, básica y anhidra, utilizando los métodos especificados en las normas chilenas.

3.3.3.2. Resultados

Los resultados de tales ensayos se incluyen en la Tabla N° 17 para carga aplicada en dirección paralela a la fibra, y en la Tabla N° 18 para carga normal a la fibra.

En las Tablas N° 19 y N° 20 se entregan algunos estadígrafos de los parámetros que interesan, a saber: Tensión de Aplastamiento (S) y Densidad Anhidra (P_o), en los ensayos de compresión paralela y normal a las fibras, respectivamente.

TABLA Nº 17. ENSAYOS DE APLASTAMIENTO DE LA MADERA - COMPRESION PARALELA A LAS FIBRAS.

ESPECIE	PROBETA Nº	ESPESOR MADERA (cm)	DIAMETRO PERNO (cm)	CARGA OBTENIDA EN			AREA DE APLASTAMIENTO (cm ²)	TENSION DE FLUENCIA (Kg/cm ²)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	DENSIDAD (Kg/m ³)		
				Límite de Prop. (Kg)	Punto de Fluencia (Kg)	Rotura (Kg)				De Referencia	Básica	Anhidra
ALAMO	A-P13-1	2,52	1,25	740	975	1020	3,15	309,5	7,8	386	358	365
	A-P13-2	2,52		540	830	880	3,15	263,5	9,6	397	366	379
	A-P13-3	2,50		490	985	1030	3,125	315,2	9,4	422	391	407
	A-P13-4	2,52		510	890	915	3,15	282,5	9,4	413	383	399
	A-P13-5	2,50		530	900	950	3,125	288,0	9,5	473	423	456
	A-P19-1	3,74	1,88	1260	2090	2230	7,0312	297,2	9,0	392	364	366
	A-P19-2	3,82		1180	1970	2080	7,1816	274,3	10,2	434	398	415
	A-P19-3	3,79		1380	2080	2275	7,1252	291,9	10,1	388	356	370
	A-P19-4	3,81		1240	1990	2090	7,1628	277,8	10,2	413	379	396
	A-P19-5	3,79		1360	2080	2260	7,1252	291,9	10,1	397	349	360
PINO RADIATA	P-P13-1	2,48	1,24	950	1400	1410	3,0752	455,3	13,2	681	606	654
	P-P13-2	2,48		640	1045	1050	3,0752	339,8	11,5	440	394	405
	P-P13-3	2,50		920	1410	1450	3,1000	454,8	11,4	399	359	387
	P-P13-4	2,50		680	1050	1060	3,1000	338,7	12,3	398	362	395
	P-P13-5	2,52		1220	1660	1710	3,1248	531,2	11,5	598	546	582
	P-P19-1	3,82	1,89	1760	2840	2860	7,2198	393,4	10,9	416	378	395
	P-P19-2	3,80		1160	2280	2350	7,1820	317,5	11,2	419	385	402
	P-P19-3	3,78		1840	3090	3170	7,1442	432,5	10,7	395	360	384
	P-P19-4	3,78		1220	2090	2260	7,1442	292,6	12,4	510	463	494
	P-P19-5	3,76		1380	2710	2740	7,1064	381,3	13,8	448	413	428

(Continúa)

TABLA Nº 17. (Continuación)

ESPECIE	PROBETA Nº	ESPESOR MADERA (cm)	DIAMETRO PERNO (cm)	CARGA OBTENIDA EN			AREA DE APLASTAMIENTO (cm ²)	TENSION DE FLUENCIA (Kg/cm ²)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	DENSIDAD (Kg/m ³)		
				Límite de Prop. (Kg)	Punto de Fluencia (Kg)	Rotura (Kg)				De Referencia	Básica	Anhidra
TEPA	T-P13-1	2,56	1,24	860	1180	1250	3,1744	371,7	13,5	537	480	508
	T-P13-2	2,52		620	1130	1180	3,1248	361,6	15,0	571	508	521
	T-P13-3	2,50		830	1090	1220	3,1000	351,6	16,2	558	498	542
	T-P13-4	2,60		680	1090	1115	3,2240	338,1	15,6	555	488	523
	T-P13-5	2,50		730	1140	1180	3,1000	367,7	15,0	532	473	503
	T-P19-1	3,76	1,88	1560	2420	2480	7,0688	342,3	13,7	489	442	465
	T-P19-2	3,76		1180	2140	2500	7,0688	302,7	14,7	510	456	485
	T-P19-3	3,78		1340	2090	2200	7,1064	294,1	15,9	535	474	509
	T-P19-4	3,74		1220	2220	2260	7,0312	315,7	15,6	519	461	491
	T-P19-5	3,74		2340	2860	3050	7,0312	406,8	10,7	540	493	518
EUCALIPTO	E-P13-1	2,48	1,24	1480	2840	2920	3,0752	923,5	11,5	970	854	929
	E-P13-2	2,52		1460	2100	2760	3,1248	864,1	12,0	923	804	904
	E-P13-3	2,50		1420	2060	2340	3,1000	664,5	11,6	942	833	908
	E-P13-4	2,50		1420	2050	2250	3,1000	661,3	11,8	896	789	889
	E-P13-5	2,48		1840	2360	2450	3,0752	767,4	11,7	869	768	866
	E-P19-1	3,82	1,88	3820	5560	5920	7,1816	774,2	14,4	930	812	897
	E-P19-2	3,80		3480	5500	5820	7,1440	769,9	15,2	966	873	950
	E-P19-3	3,80		3120	4920	5380	7,1440	688,7	15,0	925	808	879
	E-P19-4	3,80		3520	5580	5730	7,1440	781,1	14,3	947	833	917
	E-P19-5	3,80		2940	5020	5730	7,1440	702,7	15,1	1080	911	965

TABLA Nº 18. ENSAYOS DE APLASTAMIENTO DE LA MADERA - COMPRESION NORMAL A LAS FIBRAS.

ESPECIE	PROBETA Nº	ESPESOR MADERA (cm)	DIAMETRO PERNO (cm)	CARGA OBTENIDA EN			AREA DE APLASTAMIENTO (cm ²)	TENSION DE FLUENCIA (Kg/cm ²)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	DENSIDAD (Kg/m ³)		
				Límite de Prop. (Kg)	Punto de Fluencia (Kg)	Rotura (Kg)				De Referencia	Básica	Anhídra
ALAMO	A-N13-1	2,52	1,26	150	375	435	3,1752	118,1	9,2	386	358	365
	A-N13-2	2,52		260	405	445	3,1752	127,6	9,9	397	366	379
	A-N13-3	2,50		210	375	410	3,1500	119,0	10,1	422	391	407
	A-N13-4	2,50		150	315	395	3,1500	100,0	10,0	413	383	399
	A-N13-5	2,52		180	345	375	3,1752	108,7	9,7	473	423	456
	A-N19-1	3,78	1,88	330	570	720	7,1064	80,2	9,8	438	407	401
	A-N19-2	3,80		380	535	690	7,1440	74,9	9,7	408	376	375
	A-N19-3	3,80		395	665	730	7,1440	93,1	9,8	442	404	403
	A-N19-4	3,80		340	710	875	7,1440	99,4	9,8	401	366	369
	A-N19-5	3,80		440	700	770	7,1440	98,0	9,5	423	387	386
PINO RADIATA	P-N13-1	2,52	1,24	350	530	765	3,1248	169,6	11,8	483	436	457
	P-N13-2	2,52		600	730	870	3,1248	233,6	11,7	494	446	469
	P-N13-3	2,55		200	330	495	3,1620	104,4	12,7	483	430	448
	P-N13-4	2,56		450	580	670	3,1744	182,7	10,6	550	502	520
	P-N13-5	2,54		300	370	465	3,1496	117,5	11,2	440	394	411
	P-N19-1	3,80	1,87	400	630	750	7,1060	88,7	11,2	375	338	360
	P-N19-2	3,77		250	515	650	7,0499	73,1	11,4	437	397	413
	P-N19-3	3,78		550	745	875	7,0686	105,4	10,6	466	426	454
	P-N19-4	3,80		450	645	780	7,1060	90,8	11,1	460	420	441
	P-N19-5	3,77		700	880	1045	7,0499	124,8	11,3	556	505	531

(Continúa)

TABLA Nº 18. (Continuación)

ESPECIE	PROBETA Nº	ESPESOR MADERA (cm)	DIAMETRO PERNO (cm)	CARGA OBTENIDA EN			AREA DE APLASTAMIENTO (cm ²)	TENSION DE FLUENCIA (Kg/cm ²)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	DENSIDAD (Kg/m ³)		
				Límite de Prop. (Kg)	Punto de Fluencia (Kg)	Rotura (Kg)				De Referencia	Básica	Anhida
TEPA	T-N13-1	2,50	1,24	300	435	470	3,1000	140,3	12,2	542	491	512
	T-N13-2	2,50		300	460	470	3,1000	148,4	13,5	545	494	516
	T-N13-3	2,42		240	435	480	3,0008	145,0	15,0	549	488	514
	T-N13-4	2,55		300	495	530	3,1620	156,5	14,4	526	467	491
	T-N13-5	2,56		300	535	587	3,1744	168,5	12,7	548	489	515
	T-N19-1	3,75	1,88	600	860	940	7,0500	122,0	9,2	537	494	512
	T-N19-2	3,74		650	870	900	7,0312	123,7	9,3	542	493	514
	T-N19-3	3,78		500	830	900	7,1064	116,8	9,2	483	449	466
	T-N19-4	3,78		600	810	940	7,1064	114,0	9,0	485	450	464
	T-N19-5	3,76		500	750	865	7,0688	106,1	12,3	493	448	468
EUCALIPTO	E-N13-1	2,48	1,25	600	940	1090	3,1000	303,2	14,2	769	672	725
	E-N13-2	2,48		750	1160	1385	3,1000	374,2	12,4	898	796	867
	E-N13-3	2,47		800	1090	1310	3,0875	353,0	13,4	847	744	799
	E-N13-4	2,45		950	1250	1350	3,0625	408,2	15,0	851	746	823
	E-N13-5	2,48		450	750	965	3,1000	241,9	12,6	694	624	656
	E-N19-1	3,76	1,88	1200	1900	2160	7,0688	268,8	13,1	938	846	927
	E-N19-2	3,82		1000	1360	1500	7,1816	189,4	12,1	817	741	778
	E-N19-3	3,80		1100	1700	1840	7,1440	238,0	13,0	811	732	786
	E-N19-4	3,84		1100	1720	1850	7,2192	238,3	12,3	829	752	801
	E-N19-5	3,84		1400	1820	2040	7,2192	252,1	13,9	862	767	834

TABLA Nº 19. ESTADIGRAFOS DE LA TENSION DE APLASTAMIENTO Y DE LA DENSIDAD ANHIDRA.
COMPRESION PARALELA A LA DIRECCION DE LAS FIBRAS.

DIRECCION DE LA CARGA : PARALELA A LAS FIBRAS DE LA MADERA								
ESPECIE	DIAMETRO DEL PERNO	TENSION DE APLASTAMIENTO S, EN Kg/cm ²				DENSIDAD ANHIDRA P ₀ EN Kg/m ³		
		N	MEDIA	DESVIACION ESTANDAR	VALOR CARACTERISTICO *	N	MEDIA	COEFICIENTE DE VARIACION (%)
ALAMO	1/2 "	5	291,74	20,992	257,2	10	391,3	7,6
	3/4 "	5	286,62	9,966	270,2			
	1/2 " y 3/4 "	10	289,18	15,275	264,0			
PINO RADIATA	1/2 "	5	423,96	83,346	286,9	10	452,6	20,8
	3/4 "	5	363,46	57,260	269,3			
	1/2 " y 3/4 "	10	393,71	74,737	271,0			
TEPA	1/2 "	5	358,14	13,524	335,9	10	506,5	4,3
	3/4 "	5	332,32	45,446	257,6			
	1/2 " y 3/4 "	10	345,23	34,415	288,6			
EUCALIPTO	1/2 "	5	776,16	117,452	582,9	10	910,4	3,4
	3/4 "	5	743,32	43,934	671,0			
	1/2 " y 3/4 "	10	759,74	85,373	619,3			

* Calculado con la expresión : MEDIA - 1,645 x DESVIACION ESTANDAR.

TABLA Nº 20.

ESTADIGRAFOS DE LA TENSION DE APLASTAMIENTO Y DE LA DENSIDAD ANHIDRA.
COMPRESION NORMAL A LA DIRECCION DE LAS FIBRAS.

DIRECCION DE LA CARGA : NORMAL A LAS FIBRAS DE LA MADERA								
ESPECIE	DIAMETRO DEL PERNO	TENSION DE APLASTAMIENTO S, EN Kg/cm ²				DENSIDAD ANHIDRA P ₀ EN Kg/m ³		
		N	MEDIA	DESVIACION ESTANDAR	VALOR CARACTERISTICO *	N	MEDIA	COEFICIENTE DE VARIACION (%)
ALAMO	1/2 "	5	114,68	10,589	97,3	10	394,0	6,7
	3/4 "	5	89,12	10,979	71,1			
	1/2 " y 3/4 "	10	101,90	16,879	74,1			
PINO RADIATA	1/2 "	5	161,56	52,225	75,6	10	450,4	11,2
	3/4 "	5	96,56	19,507	64,5			
	1/2 " y 3/4 "	10	129,06	50,545	45,9			
TEPA	1/2 "	5	151,74	11,079	133,5	10	497,2	4,6
	3/4 "	5	116,52	7,010	105,0			
	1/2 " y 3/4 "	10	134,13	20,518	100,4			
EUCALIPTO	1/2 "	5	336,10	64,984	229,2	10	799,2	9,3
	3/4 "	5	237,32	29,611	188,6			
	1/2 " y 3/4 "	10	286,71	70,548	170,7			

* Calculado con la expresión : MEDIA - 1,645 × DESVIACION ESTANDAR.

3.3.4. Comparación entre el Criterio de la Teoría de Fluencia y el de Smith y Whale

3.3.4.1. Teoría de Fluencia

Este criterio se aplicará a una unión de Pino radiata con las características de la probeta PD2-2:

Diámetro del perno : $D = 3/4" = 19 \text{ mm.}$

Espesor elemento central : $e = 37 \text{ mm.}$

Esbeltez de la unión : $\lambda_U = e/D = 37/19 = 1,95$

Resistencia de fluencia media del perno $3/4"$: $S_y = 290,7 \text{ MPa}$

Resistencia de fluencia del perno $3/4"$ adoptada : $S_y = 240 \text{ MPa}$

Tensión de aplastamiento Pino radiata con perno de $3/4"$:

a) Valor medio : $S = 363,46 \text{ Kg/cm}^2 = 35,6 \text{ MPa}$

b) Valor característico $S_k = 269,3 \text{ Kg/cm} = 26,4 \text{ MPa}$

Solicitud : Paralela a las fibras.

Determinación del MODO DE FALLA :

$$\lambda_o = 0,8165 \sqrt{\frac{S_y}{S}}$$

i) Si se usan los valores medios para S_y y S :

$$\lambda_o = 0,8165 \sqrt{\frac{290,7}{35,6}} = 2,3$$

Como $\lambda_U < \lambda_o$ se tiene MODO DE FALLA 1 luego, la carga máxima de fluencia es :

$$F_y = D^2 \times S \times \lambda_U$$

$$F_y = 19^2 \times 35,6 \times 1,95 = 25060 \text{ N}$$

$$F_y = 2557 \text{ Kg}$$

- ii) Si se usan el valor adoptado para S_y y el valor característico para S_k (percentila de exclusión : 5%) se tiene :

$$\lambda_o = 0,8165 \sqrt{\frac{240}{26,4}} = 2,46 > \lambda_u \quad (\text{MODO DE FALLA 1})$$

Carga máxima de fluencia :

$$F_y = D^2 \times S_k \times \lambda_u$$

$$F_y = 19^2 \times 26,4 \times 1,95 = 18584 \text{ N}$$

$$F_y = 1896 \text{ Kg}$$

3.3.4.2. Criterio de Smith y Whale

Este procedimiento supone que no se conoce la tensión de aplastamiento y que ella se puede estimar mediante la densidad anhidra (ρ_o) a través de la expresión :

$$S_{cp} = \frac{0,000846 \times \rho_o \times (100 - D)}{\quad} \quad (\text{compresión paralela})$$

Si se usa la unión cuyas características se incluyen en

3.3.4.1.

$$S_{cp} = 0,000846 \times 452 (100 - 19)$$

$$S_{cp} = 31,0 \text{ MPa}$$

$$S_{cp} = 315,8 \text{ Kg/cm}^2$$

- i) Con los valores medios :

$$\lambda_o = 0,8165 \sqrt{\frac{S_y}{S_{cp}}} = 0,8165 \times \sqrt{\frac{290,7}{31}} = 2,5 \quad (\text{MODO DE FALLA 1})$$

$$F_y = D^2 \times S_{cp} \times \lambda_u$$

$$F_y = \overline{19}^2 \times 31 \times 1,95 = 21822 \text{ N}$$

$$F_y = 2227 \text{ Kg}$$

ii) Usando el valor característico de S_k y el valor de S_y adoptado se tiene :

$$S_{cp} = 0,00846 \times \rho_{o,K} (100 - d)$$

$$\text{Con : } \rho_{o,K} = 370 \text{ Kg/m}^3 \quad (\text{De Tabla N}^\circ 12)$$

$$S_{cp,k} = 0,000846 \times 370 \times (100 - d)$$

$$S_{cp,k} = 25,35 \text{ MPa}$$

$$S_{cp,k} = 258,5 \text{ Kg/cm}^2$$

Luego :

$$\lambda_o = 0,8165 \sqrt{\frac{S_y}{S_{cp,k}}} = 0,8165 \sqrt{\frac{240}{25,35}}$$

$$\lambda_o = 2,5 > \lambda_u$$

$$F_y = D^2 \times S_{cp,k} \times \lambda_u$$

$$F_y = \overline{19}^2 \times 25,35 \times 1,95 = 17845 \text{ N}$$

$$F_y = \underline{1820} \text{ Kg}$$

En resumen, para el ejemplo elegido se tienen las siguientes cargas máximas de fluencia:

CRITERIO	CARGA PARALELA A LAS FIBRAS	
	Con : Valores medios de S_y , S y ρ_o	Con : $S_y = 240$ MPa $S = S_{cp,k}$ $\rho_o = \rho_{o,k}$
TEORIA DE FLUENCIA	$F_y = 2557$ Kg	$F_y = 1896$ Kg
SMITH Y WHALE	$F_y = 2227$ Kg	$F_y = 1820$ Kg

Los valores resultan bastante similares entre sí cuando se adoptan los valores característicos de la tensión de aplastamiento de la madera (S_k) o de la densidad anhidra ($\rho_{o,k}$). Al usar los valores medios de dichos parámetros, ambos criterios dan cargas máximas de fluencia superiores.

Queda por dilucidar cuál de estos criterios se acerca más a los valores experimentales.

4.0 TRABAJO EXPERIMENTAL

4.1. Probeta y Variables Estudiadas

Con el fin de comparar los valores que entregan estos criterios teóricos con aquéllos que experimentalmente se obtienen en una unión con pernos, se planificaron ensayos de probetas con las características que se indican en la Figura N° 9 y cuyas dimensiones son las especificadas en norma ASTM.

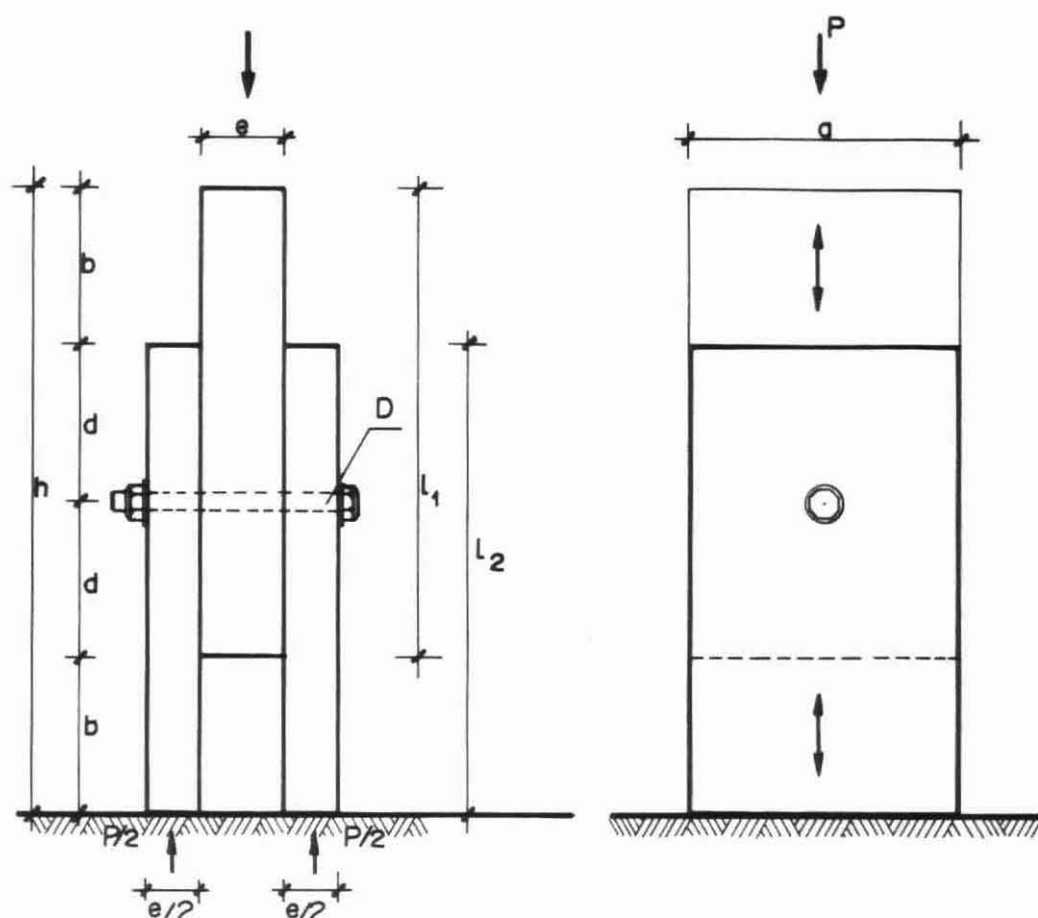


FIGURA Nº 9. Ensayo de compresión paralela a las fibras de la madera.

Las variables que se estudiaron en este trabajo experimental fueron :

Dirección de la carga	:	1 (Paralela a la fibra)
Especies madereras	:	2 (Pino radiata y Coigüe)
Esbeltez de la unión : $\lambda_u = e/D$	:	14
Repeticiones	:	5

TOTAL DE PROBETAS : $1 \times 2 \times 14 \times 5 = 140$

4.2. Resultados

Los resultados de los ensayos aparecen en la Tabla N° 13 para el Pino radiata y en la Tabla N° 14, para el Coigüe.

4.3. Comparación de los Resultados Experimentales con los Criterios que entregan la Carga Admisible (GRUPO 1)

4.3.1. Parámetros Usados

Esta comparación ya ha sido comentada en el capítulo 3.1 y en el párrafo 3.2.3. En este capítulo se ampliará tal discusión.

La variable que interesa, en la práctica, es la CARGA ADMISIBLE pues, con ella es posible diseñar una unión determinando la cantidad de pernos que son necesarios en una construcción o estructura de madera. Es importante que la CARGA ADMISIBLE se ubique en la zona elástica de la unión, es decir que sea menor que la CARGA EN EL LIMITE DE PROPORCIONALIDAD pero, lo más cerca posible de ella a fin de aprovechar al máximo su capacidad resistente.

Para visualizar lo anterior se introducirá el parámetro:

$$\Psi = \frac{\text{CARGA ADMISIBLE}}{\text{CARGA EN EL LIMITE DE PROPORCIONALIDAD}}$$

Si : $\Psi > 1$ significa que se ha sobrepasado la zona elástica y la unión presentará deformaciones permanentes.

$\Psi \leq 1$ señala que la unión solicitada permanece en la zona elástica y que al deformarse con una carga, ella recuperará su forma y posición inicial al cesar la acción de dicha carga.

TABLA Nº 21. COMPARACION DE LOS CRITERIOS QUE ENTREGAN LA CARGA ADMISIBLE CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES. CARGA PARALELA A LAS FIBRAS.

ESPECIE	PROBETAS TIPO	VALORES PROMEDIOS						
		ESBELTEZ DE LA UNION $\lambda_u = e/D$	CARGA EXPERIMENTAL EN EL		PARAMETRO EXPERIMENTAL $\bar{n} = P_y/P_L$	CRITERIO		
			LIMITE PROPORCIONAL P_L (Kg)	PUNTO DE FLUENCIA P_y (Kg)		NCh 1198.77 $\bar{\Psi}_1 = P_{ad}/P_L$	NCh 1198 Rev. 1989 $\bar{\Psi}_2 = P_{ad}/P_L$	INFOR $\bar{\Psi}_3 = P_{ad}/P_L$
PINO RADIATA	PE1	0,97	868	1678	1,95	1,91	0,53	0,56
	PD1	0,97	562	874	1,59	-	0,46	0,50
	PE2	1,92	2210	3925	1,87	0,95	0,45	0,48
	PD2	1,96	1240	1984	1,62	1,06	0,42	0,45
	PA1	3,05	274	407	1,52	-	0,31	0,34
	PC1	3,03	828	1388	1,68	0,96	0,41	0,44
	PC2	4,05	1172	1734	1,52	0,75	0,34	0,41
	PB1	4,56	861	1025	1,18	-	0,23	0,27
	PC3	5,03	1078	1828	1,73	0,86	0,43	0,50
	PA2	5,23	286	505	1,77	-	0,40	0,46
	PA3	6,05	270	487	1,83	0,51	0,48	0,51
	PC4	6,52	980	1560	1,60	0,55	0,45	0,48
	PB2	9,24	622	940	1,56	-	0,37	0,39
	PA4	9,46	203	372	1,84	-	0,47	0,49

(Continúa)

TABLA Nº 21. (Continuación)

ESPECIE	PROBETAS TIPO	VALORES PROMEDIOS						
		ESBELTEZ DE LA UNION $\lambda_u = e/D$	CARGA EXPERIMENTAL EN EL		PARAMETRO EXPERI MENTAL $\bar{n} = P_y/P_L$	CRITERIO		
			LIMITE PROPORCIONAL P_L (Kg)	PUNTO DE FLUENCIA P_y (Kg)		NCh 1198.77 $\bar{\Psi}_1 = P_{ad}/P_L$	NCh 1198 Rev. 1989 $\bar{\Psi}_2 = P_{ad}/P_L$	INFOR $\bar{\Psi}_3 = P_{ad}/P_L$
COIGUE	CD1	0,96	488	970	2,00	-	0,63	0,87
	CE1	1,02	1084	2188	2,03	1,53	0,51	0,72
	CD2	1,97	1408	2364	1,69	0,93	0,46	0,64
	CE2	2,02	2016	4318	2,14	0,98	0,55	0,77
	CA1	2,97	239	431	1,82	-	0,36	0,56
	CC1	3,03	734	1300	1,78	1,08	0,49	0,77
	CC2	3,98	1080	2128	1,98	0,79	0,42	0,65
	CB1	4,58	518	1246	2,40	-	0,43	0,68
	CC3	5,23	912	1882	2,06	1,01	0,51	0,77
	CA2	5,14	306	796	2,61	-	0,44	0,62
	CA3	6,17	290	756	2,75	1,20	0,47	0,66
	CC4	6,59	856	1536	1,81	1,26	0,58	0,82
	CB2	9,01	484	1084	2,25	-	0,51	0,72
	CA4	9,07	274	624	2,26	1,35	0,40	0,56

e = espesor elemento central de la probeta ; D = diámetro del perno.

- b) Para las cargas admisibles que entrega la NCh 1198, en su versión revisada en 1989.

La totalidad de los valores normalizados resultaron menores que la carga en el límite de proporcionalidad determinada experimentalmente. El parámetro de comparación Ψ , entregó los siguientes estadígrafos:

	<u>PINO RADIATA</u>	<u>COIGUE</u>
Media :	$\bar{\Psi}_2 = 0,410$	$\bar{\Psi}_2 = 0,483$
Valor máximo :	$\Psi_{2,máx} = 0,65$	$\Psi_{2,máx} = 0,71$
Valor mínimo :	$\Psi_{2,mín} = 0,18$	$\Psi_{2,mín} = 0,29$
Desv. estándar :	$s_{\Psi_2} = 0,1016$	$s_{\Psi_2} = 0,0915$
Coef. de variación :	$v_{\Psi_2} = 24,8\%$	$v_{\Psi_2} = 18,95\%$

Sólo el 25% de las cargas admisibles normalizadas comparadas, superaron la mitad de la correspondiente carga en el límite de proporcionalidad determinada en los ensayos. Estos resultados conducen a señalar que el criterio propuesto, en la revisión de esta norma, se puede calificar como conservador.

- c) Para la proposición INFOR, a la revisión de la NCh 1198

Todos los valores extraídos de la proposición resultaron menores que la correspondiente carga en el límite de proporcionalidad determinada experimentalmente. Los estadígrafos de Ψ resultaron:

	<u>PINO RADIATA</u>	<u>COIGUE</u>
Media :	$\bar{\Psi}_3 = 0,449$	$\bar{\Psi}_3 = 0,684$
Valor máximo :	$\Psi_{3,máx} = 0,69$	$\Psi_{3,máx} = 1,000$
Valor mínimo :	$\Psi_{3,mín} = 0,21$	$\Psi_{3,mín} = 0,42$
Desv. estándar :	$s_{\Psi_3} = 0,1049$	$s_{\Psi_3} = 0,1255$
Coef. de variación :	$v_{\Psi_3} = 23,4\%$	$v_{\Psi_3} = 18,34\%$

En el caso de maderas de baja densidad (Pino radiata), el criterio entrega un promedio para el parámetro Ψ_3 menor que el correspondiente a maderas de mayor densidad (Coigüe). Esta diferencia resulta igual a un 23,5%, que se desglosa de la forma siguiente:

$$\begin{array}{rcl} \Psi_3 \text{ (Coigüe)} & = & 0,684 \\ \Psi_3 \text{ (Pino radiata)} & = & 0,449 \\ \hline \text{Diferencia} & = & 0,235 \end{array}$$

De lo anterior, se deduce que el criterio propuesto por INFOR resulta menos conservador que el propuesto en la última revisión de la NCh 1198.

4.4. Comparación de los Resultados Experimentales con los Criterios que entregan la Carga en el Punto de Fluencia (GRUPO 2)

4.4.1. Valores a Usar para las Tensiones de Fluencia

a) Tensión de fluencia del perno (S_y).

Existen dos alternativas para elegir los valores de esta variable:

- i) Aquellos valores promedios determinados en los ensayos y que se incluyen en la Tabla N° 18.
- ii) Un valor único, igual a 240 MPa, que en general es menor que los encontrados experimentalmente y que coincide con la tensión de fluencia usada en países tales como Inglaterra, Canadá y Estados Unidos.

Cálculos preliminares aconsejan la elección de la segunda alternativa. Se usará, por lo tanto:

$$S_y = 240 \text{ MPa}$$

b) Tensión de fluencia de la madera (S).

En este caso también se presentan dos alternativas para esta variable:

- i) el valor promedio para la especie maderera, determinado con el ensayo descrito en 3.3.3 y que en este estudio se realizó para el Alamo, Pino radiata, Tapa y Eucalipto. (Ver Tablas N° 19 y N° 20).
- ii) el valor característico de la tensión de fluencia de la madera, calculado con la expresión:

$$S_k = \bar{S} - 1,645 \times s_S$$

valor que excluye la percentila del 5% y que, por lo tanto, asegura que sólo 5 piezas de 100 pueden tener un valor menor que S_k .

Cálculos previos recomiendan la elección de la TENSION DE FLUENCIA CARACTERISTICA (S_k). Los valores para las maderas utilizadas en este estudio se incluyen en la Tabla N° 19 para carga paralela a la dirección de las fibras de la madera y, en la Tabla N° 20 para cargas de dirección normal a las fibras. La única especie maderera que fue usada tanto en los ensayos de determinación de tensiones de aplastamiento como en los de uniones con pernos sometidos a cizalle doble, fue el Pino ra

diata. Por tal motivo la comparación se hará con uniones fabricadas con dicha madera.

El valor característico de la tensión de fluencia por aplastamiento del Pino radiata se ha calculado con los datos incluidos en la Tabla N° 19, a saber:

SOLICITACION : COMPRESION PARALELA A LA DIRECCION DE LAS FIBRAS DE LA MADERA.

NUMERO DE PROBETAS : 10

MEDIA : $\bar{S} = 393,71$

DESVIACION ESTANDAR : $s_S = 74,737$

$$S_k = \text{Tensión de fluencia característica} = \bar{S} - 1,645 \times s_S$$

$$S_k = 393,71 - 1,645 \times 74,5737$$

$$S_k = 271 \text{ Kg/cm}^2 = 26,58 \text{ MPa}$$

4.4.2. Parámetros Usados para Medir la Comparación

La comparación se realiza entre la carga en el punto de fluencia obtenida experimentalmente y la carga de fluencia teórica que entrega el criterio que se analiza.

El "error" (ϵ) que entrega el criterio, respecto al valor experimental queda definido por la expresión:

$$\epsilon = \frac{P_{Y,t} - P_{Y,e}}{P_{Y,e}} \times 100$$

Con :

$P_{Y,t}$ = carga teórica máxima de fluencia que entrega el criterio.

$P_{Y,e}$ = carga experimental en el punto de fluencia.

Si : $P_{Y,t} > P_{Y,e}$ el error (ϵ) irá precedido por un signo positivo (+), y

Si : $P_{Y,t} < P_{Y,e}$ el error (ϵ) será negativo.

4.4.3. Comparación de los Valores Experimentales con el Criterio de la Teoría de Fluencia

Los resultados de tal comparación se incluyen en la Tabla Nº 22. El error porcentual promedio obtenido para las probetas ensayadas aparece en la columna encabezada por " ϵ_1 ".

Los MODOS DE FALLA han sido determinados con los parámetros incluidos en la Figura Nº 4 y en el capítulo 2.2.

Si se define :

$$\lambda_{12} = 0,8165 \sqrt{\frac{S_y}{S_k}}$$

$$\lambda_{23} = 2,7877 \sqrt{\frac{S_y}{S_k}}$$

TABLA Nº 22. COMPARACION DE LOS VALORES EXPERIMENTALES CON EL CRITERIO DE LA TEORIA DE FLUENCIA. CARGA PARALELA A LAS FIBRAS. PINO RA DIATA.

PROBETA TIPO	DIAMETRO DEL PERNO D (mm)	ESBELTEZ DE LA UNION λ_u	CARGA EXPERI MENTAL CARAC TERISTICA EN EL PUNTO DE FLUENCIA $P_{y,e,k}$ (Kg)	CARGA DE FLUENCIA EN TREGADA POR EL CRITERIO DE LA TEORIA DE FLUENCIA $P_{y,t}^*$ (Kg)	ERROR PORCENTUAL RESPECTO AL VALOR EXPERI MENTAL ϵ_1 (%)
PE1	25,4	0,97	1470	1697	+ 15,4
PD1	19,0	0,97	716	950	+ 32,7
PE2	25,4	1,92	3267	3359	+ 2,8
PD2	19,0	1,96	1677	1919	+ 14,4
PA1	6,0	3,05	262	241	- 8,0
PC1	12,5	3,03	1182	1046	- 11,5
PC2	12,5	4,05	1495	1086	- 27,4
PB1	9,5	4,56	562	645	+ 14,8
PC3	12,5	5,03	1510	1149	- 23,9
PA2	6,0	5,23	424	268	- 36,8
PA3	6,0	6,05	364	284	- 22,0
PC4	12,5	6,52	1276	1277	+ 0,1
PB2	8,0	9,24	819	602	- 26,5
PA4	6,0	9,46	327	339	+ 3,7

* En el cálculo de $P_{y,t}$ se ha usado : $S_y = 240 \text{ MPa}$

$S_k = 26,58 \text{ MPa}$

con los valores señalados en 4.4.1 para S_y y S_k , se obtiene que:

$$\lambda_{1,2} = 0,8165 \sqrt{\frac{240}{26,58}} = 2,453$$

$$\lambda_{2,3} = 2,7877 \sqrt{\frac{240}{26,58}} = 8,377$$

Luego, el valor teórico de la carga máxima en el punto de fluencia queda determinado con los siguientes criterios:

i) Si : $\lambda_u \leq 2,453$ se obtiene MODO DE FALLA 1

$$\text{luego : } F_y = D^2 \times S_k \times \lambda_u$$

ii) Si : $2,453 < \lambda_u \leq 8,377$ se obtiene MODO DE FALLA 2

$$\text{luego : } F_y = \frac{D^2 \times S_k}{3} \left[\sqrt{4 \lambda_u^2 + \frac{8 \times S_y}{S_k}} - \lambda_u \right]$$

iii) Si : $8,377 < \lambda_u$ se obtiene MODO DE FALLA 3

$$\text{luego : } F_y = D^2 \times S_k \times \sqrt{\frac{4 \times S_y}{3 S_k}}$$

El valor absoluto del error medio resultante (ϵ_1), es de: 17,1% con las siguientes características:

i) 50% de los valores del error son positivos y resultan con un error promedio de + 12%.

- ii) el 50% de los valores con errores negativos tienen un error promedio de - 22%.
- iii) valor absoluto máximo del error : $\epsilon_{1,\text{máx}} = - 36,8\%$
- iv) valor absoluto mínimo del error : $\epsilon_{1,\text{mín}} = + 0,1\%$
- v) intervalo : $(+ 32,7\%) + (- 36,8)$

4.4.4. Comparación de los Valores Experimentales con el Criterio de Smith y Whale

Este procedimiento se recomienda para el caso en que se desconozca la tensión de fluencia por aplastamiento de la madera (S).

Los autores proponen que el valor de S se obtenga usando la correlación existente entre la tensión de aplastamiento y la densidad anhidra característica ($P_{o,k}$) cuya expresión es:

$$P_{o,k} = \overline{P_o} - 1,645 \times s_{P_o}$$

En este estudio la ecuación de regresión lineal entre la tensión de fluencia por aplastamiento (S) y la densidad anhidra (P_o), se ha calculado con los datos del ensayo de aplastamiento, los cuales se presentan en las Tablas N° 17 para la compresión paralela a las fibras, y en la Tabla N° 18, para la compresión normal a las fibras.

La ecuación de la regresión lineal es del tipo:

$$S = a + b \times P_o$$

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla N° 23.

TABLA Nº 23. REGRESION LINEAL ENTRE LA DENSIDAD ANHIDRA Y LA TENSION DE FLUENCIA POR APLASTAMIENTO.

DIRECCION DE LA CARGA COMPRESION EN LA UNION	ECUACION DE REGRESION LINEAL	COEFICIENTE DE CORRELACION
PARALELA A LAS FIBRAS DE LA MADERA	$S_{cp} = - 38,514 + 0,85895 \times \rho_o$	$r = 0,9333$
NORMAL A LAS FIBRAS DE LA MADERA	$S_{cn} = - 448,272 + 2,2917 \times \rho_o$	$r = 0,8568$

S_{cp} = Tensión de fluencia por aplastamiento en compresión paralela, Kg/cm².

S_{cn} = Tensión de fluencia por aplastamiento en compresión normal, Kg/cm².

ρ_o = Densidad anhidra, Kg/m³.

Al expresar la tensión de fluencia por aplastamiento en megapascuales, se tiene:

$$S_{cp} = - 3,777 + 0,08423 \times \rho_o$$

$$S_{cn} = - 43,960 + 0,22474 \times \rho_o$$

Con : S_{cp} y S_{cn} , en MPa.

ρ_o , en Kg/m³

Si se utiliza la densidad anhidra característica ($\rho_{o,k}$) para cada especie maderera, calculada con:

$$\rho_{o,k} = \bar{\rho}_o - 1,645 \times s_{\rho_o}$$

se puede obtener la tensión de fluencia característica por aplastamiento, las cuales tendrán las expresiones siguientes:

i) Para carga paralela a la dirección de las fibras de la madera:

$$S_{cp,k} = -3,777 + 0,08423 \times \rho_{o,k} \quad (\text{MPa})$$

ii) Para carga normal a la dirección de las fibras de la madera:

$$S_{cn,k} = -43,96 + 0,22474 \times \rho_{o,k} \quad (\text{MPa})$$

Con :

$$\rho_{o,k} = \text{densidad anhidra característica, en Kg/m}^3$$

Los valores de $\rho_{o,k}$ se incluyen en la Tabla N° 12 para aquellas maderas que cuentan con la necesaria cantidad de valores para su determinación.

La expresión encontrada por los investigadores Smith y Whale para la correlación entre la tensión de aplastamiento y la densidad (ver párrafo 2.3) es:

$$S = \frac{0,0008 \times \rho_{12} \times (100 - D)}{2,3 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta}$$

Aplicada al Pino radiata en uniones de compresión paralela a las fibras de la madera se llega a la ecuación:

$$S_{cp} = 0,000846 (100 - D) \times \rho_o \quad (\text{MPa})$$

Usando el valor característico de la densidad anhidra se obtiene :

$$\rho_{o,k} = 370 \text{ Kg/m}^3 \quad (\text{ver Tabla N}^\circ 12)$$

$$S_{cp,k} = 0,31302 (100 - D)$$

$$S_{cp,k} = 31,302 - 0,313 \times D \quad (\text{MPa})$$

Esta ecuación proporciona valores de $S_{cp,k}$ en función del diámetro D del perno. Luego, para los diámetros empleados en los ensayos se obtiene:

DIAMETRO D mm	TENSION DE APLASTAMIENTO $S_{cp,k}$ MPa	CARACTERISTICA $S_{cp,k}$ Kg/cm ²
6	29,42	300,0
8	28,78	293,5
9,5	28,33	288,9
12,5	27,39	279,3
19,0	25,35	258,5
25,4	23,35	238,1
	PROMEDIO : 27,1	PROMEDIO : 276,4

Tal como se mencionó en 2.3, "el criterio de Smith y Whale asume que la fijación parcial producida por las arandelas que se ubican bajo la cabeza del perno y bajo la tuerca, inhiben el desarrollo del MO DO DE FALLA 2, señalada en la Tabla N° 9".

Por lo tanto, la carga máxima en el punto de fluencia (P_y) que asignan a las uniones con perno, es el menor valor que resulta de

las ecuaciones siguientes:

$$i) \quad F_y' = D \times e \times S_k = D^2 \times S_k \times \lambda_u$$

$$ii) \quad F_y'' = D^2 \times \sqrt{\frac{4 \times S_k \times S_y}{3}}$$

Al reemplazar en estas expresiones los valores que se obtienen para el Pino radiata, formando una unión con pernos, sometida a carga paralela a las fibras de la madera, resulta:

$$\rho_{o,k} = 370 \text{ Kg/m}^3 \quad (\text{ver Tabla N}^\circ 12)$$

a) ALTERNATIVA A

Usando la ecuación de regresión calculada directamente en tre las variables S y ρ_o obtenidas en este estudio, se tiene:

$$S_{cp,k} = -3,777 + 0,08423 \times \rho_{o,k} \quad (\text{según 4.4.4.i})$$

$$S_{cp,k} = -3,777 + 0,08423 \times 370$$

$$S_{cp,k} = 27,4 \text{ MPa}$$

Por lo tanto:

$$i) \quad F_y' = D^2 \times \lambda_u \times 27,4 \quad (\text{newtons})$$

$$ii) \quad F_y'' = D^2 \times \sqrt{\frac{4 \times 27,4 \times 240}{3}}$$

$$F_y'' = 93,6376 \times D^2 \quad (\text{newtons})$$

Expresando : F_y en Kg-f, se obtiene:

$$i) F'_y = 2,796 \times \lambda_u \times D^2$$

$$ii) F''_y = 9,554 \times D^2$$

b) ALTERNATIVA B

Si se utiliza la ecuación recomendada por los autores :

$$i) F'_y = D \times e \times S_k = D^2 \times S_k \times \lambda_u$$

$$F'_y = D^2 \times (31,302 - 0,313 \times D) \times \lambda_u \quad (\text{newtons})$$

$$ii) F''_y = D^2 \times \sqrt{\frac{4 \times S_k \times S_y}{3}}$$

$$F''_y = D^2 \times \sqrt{\frac{4 \times 240 \times (31,302 - 0,313 D)}{3}}$$

$$F''_y = D^2 \times \sqrt{10016,64 - 100,16 D} \quad (\text{newtons})$$

Expresando : F_y en Kg-f, resulta:

$$i) F'_y = D^2 \times \lambda \times (3,1939 - 0,0319 \times D)$$

$$ii) F''_y = D^2 \times \sqrt{104,28 - 1,043 \times D}$$

Los resultados que se obtienen con este criterio aplicado

a los tipos de probetas incluidos en la Tabla N° 22, se presentan en la Tabla N° 24 y N° 25.

TABLA N° 24. COMPARACION DE LOS VALORES EXPERIMENTALES CON EL CRITERIO DE SMITH Y WHALE. CARGA PARALELA A LAS FIBRAS. PINO RADIATA. (ALTERNATIVA A).

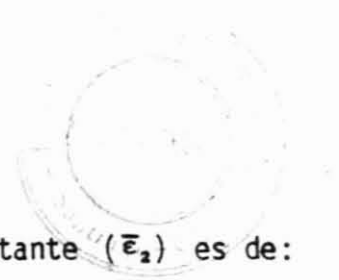
PROBETA TIPO	DIAMETRO DEL PERNO D (mm)	ESBELTEZ DE LA UNION λ_u	CARGA EXPERIMENTAL CARACTERISTICA EN EL PUNTO DE FLUENCIA $P_{y,e,k}$ (Kg)	CARGAS DE FLUENCIA ENTREGADAS POR EL CRITERIO DE SMITH Y WHALE			ERROR PORCENTUAL RESPECTO AL VALOR EXPERIMENTAL ϵ_2 (%)
				$F'_{y,t} *$ (Kg)	$F''_{y,t} *$ (Kg)	VALOR FINAL $F_{y,t} *$ (Kg)	
PE 1	25,4	0,97	1470	1750	6164	1750	+ 19,0
PD 1	19,0	0,97	716	979	3449	979	+ 36,7
PE 2	25,4	1,92	3267	3463	6164	3463	+ 6,0
PD 2	19,0	1,96	1677	1978	3449	1978	+ 17,9
PA 1	6,0	3,05	262	307	344	307	+ 17,2
PC 1	12,5	3,03	1182	1324	1493	1324	+ 12,0
PC 2	12,5	4,05	1495	1769	1493	1493	- 0,0
PB 1	9,5	4,56	562	1151	862	862	+ 53,4
PC 3	12,5	5,03	1510	2197	1493	1493	0,0
PA 2	6,0	5,23	424	526	344	344	- 18,9
PA 3	6,0	6,05	364	610	344	344	- 5,5
PC 4	12,5	6,52	1276	2848	1493	1493	+ 17,0
PB 2	8,0	9,24	819	1653	611	611	- 25,4
PA 4	6,0	9,46	327	952	344	344	+ 5,2

* En el cálculo de $F'_{y,t}$; $F''_{y,t}$ y $F_{y,t}$ se ha usado: $S_y = 240$ MPa y la ecuación de regresión: $S_{cp,k} = -3,777 + 0,08423 \times P_{o,k}$ (MPa).

TABLA Nº 25. COMPARACION DE LOS VALORES EXPERIMENTALES CON EL CRITERIO DE SMITH Y WHALE. CARGA PARALELA A LAS FIBRAS. PINO RADIATA. (ALTERNATIVA B).

PROBE TA TIPO	DIAME TRO DEL PERNO D (mm)	ESBEL TEZ DE LA UNION λ_u	CARGA EXPERI MENTAL CARAC TERISTICA EN EL PUNTO DE FLUENCIA $P_{y,e,k}$ (Kg)	CARGAS DE FLUENCIA ENTREGA DAS POR EL CRITERIO DE SMITH Y WHALE			ERROR PORCENTUAL RESPECTO AL VALOR EXPERI MENTAL ϵ'_2 (%)
				$F'_{y,t} *$ (Kg)	$F''_{y,t} *$ (Kg)	VALOR FINAL $F_{y,t} *$ (Kg)	
PE 1	25,4	0,97	1470	1492	5690	1492	+ 1,5
PD 1	19,0	0,97	716	906	3318	906	+ 26,5
PE 2	25,4	1,92	3267	2953	5690	2953	- 9,6
PD 2	19,0	1,96	1677	1831	3318	1831	+ 9,2
PA 1	6,0	3,05	262	330	356	330	+ 26,0
PC 1	12,5	3,03	1182	1323	1493	1323	+ 11,9
PC 2	12,5	4,05	1495	1769	1493	1493	- 0,1
PB 1	9,5	4,56	562	1190	877	877	+ 56,0
PC 3	12,5	5,03	1510	2197	1493	1493	- 1,1
PA 2	6,0	5,23	424	565	356	356	- 16,0
PA 3	6,0	6,05	364	654	356	356	- 2,2
PC 4	12,5	6,52	1276	2848	1493	1493	+ 17,0
PB 2	8,0	9,24	819	1738	627	627	- 23,4
PA 2	6,0	9,46	327	1023	356	356	+ 8,9

* En el cálculo de $F'_{y,t}$; $F''_{y,t}$ y $F_{y,t}$ se ha usado: $S_y = 240$ MPa y la ecuación de regresión: $S_{cp,k} = 0,000846 (100 - D) \times P_{o,k}$ (MPa).



El valor absoluto del error medio resultante ($\bar{\epsilon}_2$) es de: 16,7%, con las siguientes características:

- i) 64,3% de los valores del error son positivos y resultan con un error promedio de + 20,5%.
- ii) 14,3% de los valores de carga de fluencia que entrega el criterio coinciden con la carga experimental característica en el punto de fluencia ($\epsilon_2 = 0$).
- iii) el 21,4% de los valores con errores negativos tienen un error promedio de - 16,6%.
- iv) valor absoluto máximo del error: $\epsilon_{2,m\acute{a}x} = + 53,4\%$.
- v) valor absoluto mínimo del error: $\epsilon_{2,m\acute{i}n} = 0$.
- vi) intervalo: (+ 53,4%) + (- 25,4%).

El valor absoluto del error medio resultante ($\bar{\epsilon}_2^I$) es de: 15%, con las siguientes características:

- i) 57,1% de los valores del error son positivos y resultan con un error promedio de: + 19,6%.
- ii) el 42,9% de los valores con errores negativos tienen un error promedio de: - 8,7%.
- iii) valor absoluto máximo del error: $\epsilon_{2,m\acute{a}x}^I = + 56,0\%$.
- iv) valor absoluto mínimo del error: $\epsilon_{2,m\acute{i}n}^I = - 0,1\%$.
- v) intervalo: (+ 56,0) + (- 23,4).

4.4.5. Discusión de los Resultados

De los dos criterios que entregan las cargas máximas en el punto de fluencia, la que tiene un mayor rango de aplicación es la de los autores Smith y Whale pues, se cuenta con una mayor cantidad de datos para la densidad anhidra característica ($\rho_{0,k}$). La teoría de fluencia necesita de la tensión de fluencia por aplastamiento de la madera (S) para la cual sólo existen los valores determinados, en este estudio, y que contemplan cuatro maderas: Alamo, Pino radiata, Tapa y Eucalipto.

El promedio del error absoluto del procedimiento de Smith y Whale es ligeramente menor que el correspondiente a la teoría de fluencia. Los rangos de errores son:

Teoría de fluencia :	+ 32,7% ; - 36,8%
Smith y Whale :	+ 53,4% ; - 25,4% (ALTERNATIVA A)
Smith y Whale :	+ 56,0% ; - 23,4% (ALTERNATIVA B)

Resultando : 69,5% para el primer criterio y 78,8% y 79,4% para el segundo, quedando más equilibrado el criterio de la teoría de fluencia.

Sin embargo, la alternativa A, del criterio de Smith y Whale, da un 14,3% de valores teóricos coincidentes con los experimentales.

Para los objetivos de este estudio resulta conveniente la alternativa B del procedimiento ideado de los autores Smith y Whale.

El problema que en ella se presenta es el conocimiento de: la densidad (ρ_{12}) determinada con masa y volumen a un contenido de humedad de 12%, la desviación estándar de dicha densidad ($S_{\rho_{12}}$) y el valor característico ($\rho_{12,k}$), para las distintas especies madereras. Conociendo

los coeficientes de contracción volumétrica (K) de ellas, se hace posible la transformación mediante la ecuación:

$$\rho_{12,k} = \rho_{0,k} \frac{100 + 12}{100 + K \times 12} = \rho_{0,k} \frac{112}{100 + K \times 12}$$

El Departamento de Tecnología de la Madera de la Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad de Chile, ha determinado los coeficientes de contracción lineal que aparecen en la Tabla Nº 26.

TABLA Nº 26. COEFICIENTES DE CONTRACCION PARA LAS MADERAS CRECIDAS EN CHILE.

ESPECIE	COEFICIENTES DE CONTRACCION LINEAL		
	LINEAL		VOLUMETRICA K
	Tangencial	Radial	
Pino radiata	0,29	0,20	0,49
Tepa	0,31	0,15	0,46
Eucalipto	0,42	0,24	0,66
Coigüe	0,30	0,15	0,45
Roble	0,29	0,18	0,47
Olivillo	0,30	0,15	0,45
Ulmo	0,35	0,25	0,57
Tineo	0,36	0,18	0,54
Otras Maderas	No se conoce	No se conoce	$0,00085 \times \rho_0^*$

* Según Anexo A de la NCh 176/2, con ρ_0 en Kg/m³.

Con estos datos es posible completar la Tabla Nº 12 entre

gada anteriormente. El resultado de este procedimiento se incluye en la Tabla Nº 27.

TABLA Nº 27. DENSIDADES PARA DIFERENTES ESPECIES MADERERAS.

ESPECIE MADERERA Nombre Común	DENSIDAD ANHIDRA (Kg/m ³)		DENSIDAD NORMAL (Kg/m ³)	
	VALOR MEDIO $\bar{p}_o$	VALOR CARACTERISTICO $p_{o,k}$	VALOR MEDIO $\bar{p}_{12}$	VALOR CARACTERISTICO $p_{12,k}$
Alamo	370	357	399	385
Alerce	460	385	492	412
Canelo	470	440	502	470
Ciprés de la Cordillera	470	393	502	420
Ciprés de las Guaitecas	470	390	502	417
PINO RADIATA	450	370	476	391
Pino oregón	410	326	441	350
Araucaria	570	477	603	505
Coigüe de Chiloé	590	505	623	533
Laurel	510	427	543	455
Lenga	540	476	573	505
Lingue	596	498	629	526
Maño hojas punzantes	520	435	553	463
Olivillo	550	460	583	488
Raulf	510	426	543	454
Tepa	520	442	552	469
Algarrobo	740	619	771	645
Coigüe	650	400	691	425
Coigüe de Magallanes	620	518	653	546
Eucalipto	800	543	830	564
Roble	630	527	668	559
Roble del Maule	680	605	712	634
Tineo	700	583	736	613
Ulmo	630	525	660	550

Con el fin de comprobar la aplicabilidad de este criterio, la ALTERNATIVA B se comparará con los resultados experimentales obtenidos en las uniones con pernos realizados con COIGUE. (Ver Tabla Nº 14). Los resultados de esta aplicación se muestran en la Tabla Nº 28.

TABLA Nº 28. COMPARACION DE LOS VALORES EXPERIMENTALES CON EL CRITERIO DE SMITH Y WHALE. CARGA PARALELA A LAS FIBRAS. COIGUE.

PROBETA TIPO	DIAMETRO DEL PERNO D (mm)	ESBELTEZ DE LA UNION λ_u	CARGA EXPERIMENTAL CARACTERISTICA EN EL PUNTO DE FLUENCIA $P_{y,e,k}$ (Kg)	CARGAS DE FLUENCIA EN TREGADAS POR EL CRITERIO DE SMITH Y WHALE			ERROR PORCENTUAL RESPECTO AL VALOR EXPERIMENTAL ϵ_s (%)
				$F'_{y,t}^*$ (Kg)	$F''_{y,t}^*$ (Kg)	VALOR FINAL $F_{y,t}^*$ (Kg)	
CD1	19,0	0,96	801	974	3458	974	+ 21,6
CE1	24,8	1,02	2019	1637	5676	1637	- 18,9
CD2	19,3	1,97	2170	2054	3561	2054	- 5,3
CE2	25,1	2,02	3786	3307	5803	3307	- 12,7
CA1	6,0	2,97	329	349	371	349	+ 6,1
CC1	12,4	3,03	1221	1416	1532	1416	+ 16,0
CC2	12,5	3,98	1892	1888	1556	1556	- 17,8
CB1	8,2	4,58	1016	981	686	686	- 32,5
CC3	11,9	5,23	1326	2264	1415	1415	+ 6,7
CA2	6,2	5,14	652	643	396	396	- 39,3
CA3	6,1	6,17	524	748	384	384	- 26,7
CC4	11,8	6,39	1195	2722	1392	1392	+ 16,5
CB2	8,2	9,01	984	1929	686	686	- 30,3
CA4	5,5	9,07	375	899	313	313	- 16,5

* En el cálculo de $F'_{y,t}$; $F''_{y,t}$ y $F_{y,t}$ se ha usado : $S_y = 240 \text{ MPa}$

$$P_{12,k} = 425 \text{ Kg/m}^3 \text{ y } S_{cp,k} = 0,0008 \times P_{12,k} \times (100 - D) = 0,34 (100 - D)$$

El valor absoluto del error medio resultante ($\bar{\epsilon}_s$) es de: 19,0%. Otras características son:

- i) el 35,7% de los valores del error resultante son positivos que presentan un error promedio de: + 13,4%.
- ii) los valores con errores negativos (64,3%) tienen un promedio de: - 22,2%.
- iii) valor absoluto máximo del error: $\epsilon_{s, \text{máx}} = - 39,3\%$
- iv) valor absoluto mínimo del error: $\epsilon_{s, \text{mín}} = - 5,3\%$
- v) intervalo: (+21,6%) + (- 39,3%).

Como se puede observar, el criterio de Smith y Whale es aplicable también a las maderas con alta densidad, presentando similares características a las obtenidas en el Pino radiata.

4.4.6. Cargas Admisibles Obtenidas con el Criterio de Smith y Whale

En el diseño de una unión, interesa la carga máxima que ella puede resistir en la zona elástica, carga que toma el nombre de carga admisible. Los criterios denominados en este estudio como: Teoría de Fluencia y el de Smith y Whale entregan la tensión máxima en el punto de fluencia. Por tal motivo es necesario reducir las cargas de fluencia entregadas por dichos procedimientos para llegar a la zona elástica de la unión.

En las Tablas N° 13 y N° 14 aparecen los valores experimentales obtenidos en uniones con pernos sometidos a cizalle doble, uti

lizando madera de Pino radiata (Tabla Nº 13) y de Coigüe (Tabla Nº 14). Todas ellas con carga paralela a la dirección de las fibras de la made
ra.

Entre dichos valores se incluyen la carga en el límite de proporcionalidad (P_L) obtenida en el ensayo y la carga en el punto de fluencia (P_y). Se ha definido también (párrafo 4.3.1) el parámetro:

$$\eta = \frac{P_y}{P_L}$$

cuyos valores promedios aparecen en la Tabla Nº 21.

De la expresión del parámetro η es posible obtener:

$$P_L = \frac{P_y}{\eta}$$

Si se usa un valor de η que estadísticamente asegure valores de P_L menores que las cargas experimentales en el límite de proporcionalidad, acercándose lo más posible a dicho límite, se habrá encontrado un procedimiento para obtener una carga admisible segura y de un valor mayor que aquéllos que entregan los procedimientos que se están discutiendo para la norma NCh 1198.

Tomando los valores de P_L y P_y para el Pino radiata y para el Coigüe se obtienen los siguientes estadígrafos para el parámetro η

i) ESPECIE MADERERA :	Pino radiata
N	= 69
$\Sigma \eta$	= 114,46
$\Sigma \eta^2$	= 195,2908
$\overline{\eta}$	= 1,65884
s_η	= 0,2823199