

0848

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE
LA FACULTAD DE INGENIERIA

"PROPUESTA DE NORMAS DE ESTADOS LIMITE PARA EL DISEÑO
DE UNIONES CLAVADAS EN ESTRUCTURAS DE MADERA"

FEDERICO E. ROMO HEREDIA

TRABAJO SIN CREDITOS ACADEMICOS PARA OPTAR
POR EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERIA. *Estructuras.*
tesis.

OCTUBRE-NOVIEMBRE

1 9 8 4



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



DEFFI

T. UNAM
1984
ROM

FRANCISCO ROBLES F. V.
INGENIERO CIVIL

17 de Septiembre de 1984

ING. NEFTALI RODRIGUEZ
Subjefe del Area de Estructuras
División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería
U. N. A. M.

Como tema de examen sin créditos académicos para optar por el grado de -
Maestro en Ingeniería para que sea desarrollado por el ING. FEDERICO --
ERICK ROMO HEREDIA, propongo el siguiente:

"Propuesta de normas de estados límite para el diseño de uniones clavadas
en estructuras de madera".

El trabajo debe tratar los siguientes aspectos:

1. Características generales de las uniones clavadas.
2. Principales teorías empleadas para predecir el comportamiento de uniones clavadas.
3. Estudios requeridos para formular normas de estados límite para uniones clavadas.
4. Propuesta de un formato de normas de estados límite para uniones clavadas.

Como plazo para el desarrollo propongo 20 días hábiles.

Las siguientes referencias pueden ser útiles para el desarrollo del tema:

- Ehlbeck, J. Nailed Joints in Wood Structures. Virginia Polytechnic Institute and State University, Wood Research and Wood Construction Laboratory, Blacksburg, Va., 1979.
- Keenan, R. Improved Design of Fastenings in Timber Structures Based on Limit States Design Procedures. Report No. 1817211. Canadian Forestry Service, Dept. of the Environment, Quebec, 1982.
- Guidelines for the Development of Limit States Design. Canadian Standards Assn. Readale, Ontario, 1981.
- Propuesta de Código de estados límite para madera para Canada (borrador de marzo 8, 1983).
- CIB Structural Timber Design Code, 5a. edición, agosto, 1980.
- Sección de madera del "Ontario Bridge Code":-

Atentamente

ING. FRANCISCO ROBLES F.-V.

*mrgr.

Este trabajo fue seleccionado por el Ing. Romo el día 23 de octubre. Entregar el tema desarrollado antes del día 17 de noviembre a cada uno de los síndicos. El Coordinador

CONTENIDO

Introducción

1. Factores que afectan estructuralmente a las uniones clavadas
 - 1.1. Factores que influyen en las propiedades mecánicas de la madera
 - 1.2. Propiedades mecánicas de los clavos
 - 1.3. Influencia del tipo de configuración de la unión clavada

2. Comportamiento de uniones clavadas
 - 2.1. Teorías propuestas para determinar la carga última en las uniones clavadas
 - 2.1.1. A fuerzas laterales
 - 2.1.1.1. Teoría de Johansen
 - 2.1.1.2. Teoría de Moeller
 - 2.1.1.3. Teoría de Meyer
 - 2.1.1.4. Otras teorías
 - 2.1.2. A fuerzas de extracción
 - 2.2. Teorías propuestas para determinar la curva carga-deformación.
 - 2.2.1. Teoría de Kuenzi
 - 2.2.2. Teoría de Wilkinson
 - 2.2.3. Métodos empíricos

3. Estados límite
 - 3.1. Introducción
 - 3.2. Estados límite para uniones clavadas
 - 3.2.1. Identificación de los estados límite en uniones clavadas
 - 3.2.2. Estudio del comportamiento de la unión corres

pondiente a cada estado límite

3.2.2.1. Métodos experimentales

3.2.2.1.1. Aparato de pruebas

3.2.2.1.2. Procedimiento de aplicación de la carga

3.2.2.1.3. Número de probetas

3.2.2.1.4. Probetas recomendadas

3.2.2.1.5. Informe

3.2.3. Establecimiento de acciones y resistencias nominales

3.2.4. Obtención de factores de carga y resistencia

3.2.5. Establecimiento de índices de seguridad y factores de resistencia

3.2.5.1. Introducción al método de segundos momentos

3.2.5.2. Método probabilístico de segundos momentos

3.2.5.3. Calibración de resultados

4. Formato de reglamento de estados límite en uniones clavadas

4.1. Requisitos generales

4.2. Estados límite

4.3. Revisión de la seguridad y el comportamiento

4.4. Configuración de la unión

4.5. Diseño de la unión

4.5.1. Resistencia a carga lateral

4.5.2. Resistencia a la extracción

Observaciones

5. Apéndice A

6. Referencias

INTRODUCCION

En México, el Título IV del Reglamento de las Construcciones para el Distrito Federal establece los requisitos generales de resistencia y comportamiento que toda estructura debe satisfacer independientemente del material de que esté construida, estableciendo como enfoque de diseño el de estados límite.

El enfoque de estados límite es un formato en el que se consideran los aspectos del diseño en forma ordenada y racional y que permite la incorporación de criterios probabilistas.

Por medio de las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento para Construcciones del Distrito Federal se aplican los lineamientos generales del Título IV a materiales específicos. Las Normas Técnicas Complementarias para el diseño de estructuras de acero y de concreto reforzado están basados en el enfoque de estados límite y en métodos de resistencia última. En cambio, las Normas Técnicas Complementarias para estructuras de madera recomiendan métodos de esfuerzos permisibles.

La tendencia actual de los países más avanzados (tecnológicamente) está orientada hacia el diseño basado en el enfoque de estados límite.

Este trabajo pretende introducir el enfoque de estados límite en el diseño de las uniones clavadas. El trabajo está formado por cuatro capítulos. El primer capítulo establece los factores que influyen en el comportamiento de una unión clavada, presentando en forma breve los factores que influyen en las propiedades mecánicas de la madera, las propiedades mecánicas de los clavos y su influencia en la

configuración de la unión. El segundo capítulo es una recopilación de las principales teorías que describen el comportamiento de las uniones clavadas. Este capítulo se divide en dos partes, la primera parte presenta las teorías propuestas para determinar la carga última, y la segunda parte establece las teorías propuestas para determinar la curva carga-deformación. Este capítulo está orientado a establecer los parámetros necesarios para determinar el comportamiento estructural de las uniones clavadas. En el tercer capítulo, conociendo el comportamiento estructural de las uniones clavadas se identifican los estados límite y se plantea un procedimiento para determinar valores que sirvan para el diseño de las uniones basada en un enfoque de estados límite. En este capítulo se incluye una muy breve descripción del método semi-probabilista de Segundos Momentos. El quinto y último capítulo presenta un formato para el diseño de uniones clavadas en estructuras de madera, el cual pretende satisfacer el objetivo del trabajo.

1. FACTORES QUE AFECTAN ESTRUCTURALMENTE A LAS UNIONES CLAVADAS

Para poder satisfacer los requisitos de seguridad y servicio en las uniones clavadas es necesario conocer su comportamiento estructural. El comportamiento estructural de las uniones clavadas depende de las propiedades de la madera, del clavo y de su configuración.

Las propiedades de la madera varían de una especie a otra. En cada especie, sus propiedades varían con el contenido de humedad, la densidad, sus defectos, el tipo de acabado, los tratamientos retardantes al fuego y la relación entre otros.

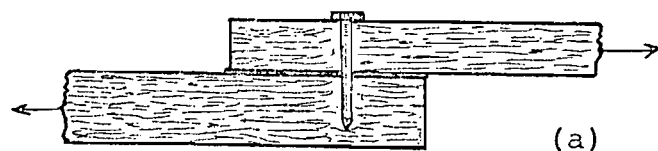
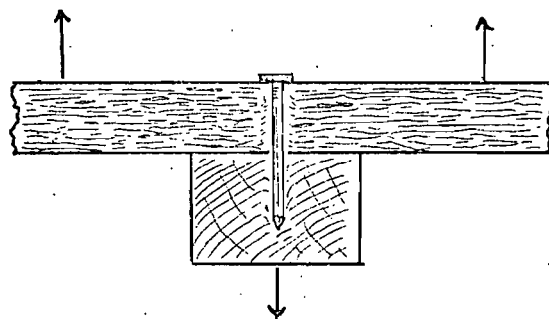
Las propiedades principales de los clavos que afectan a la unión son: su sección transversal, su punta, su cabeza, su acabado en su superficie, su recubrimiento, su longitud de penetración en la madera, el espaciamiento entre clavos y la distancia del clavo a bordes y a extremos.

Además, la resistencia de la unión depende de la orientación de la carga con respecto al clavo, a las fibras de la madera y a la unión.

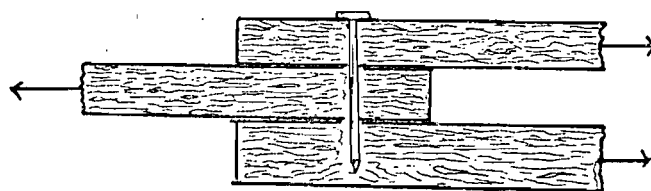
Las uniones pueden ser diseñadas básicamente para transmitir fuerzas en dirección paralela o perpendicular al eje longitudinal del clavo, (figs. 1 y 2). Cuando el clavo se somete a fuerzas de extracción su resistencia depende de la fricción entre la madera y el clavo, y de la resistencia a la tensión del clavo (fig.1). En cambio, cuando el clavo se somete a fuerzas transversales a su eje longitudinal su resistencia depende de la resistencia al aplastamiento de la madera bajo el clavo y de la resistencia al corte y a la flexión de la caña del clavo, siendo ésta última la forma más eficiente en que los clavos trans

FIGURA 1.

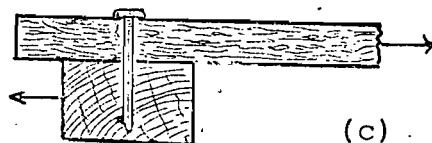
Clavo sometido a fuerzas de extracción.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 2.

(a) y (b) Clavos sometidos a empujes laterales paralelos a las fibras de la madera, en cortante simple y en cortante doble respectivamente. (c) A empujes perpendiculares a las fibras de la madera del miembro que recibe la punta.

miten carga (fig. 2).

1.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LA MADERA.

Las características físicas de la madera varían de un punto a otro, y sus características resistentes varían según la dirección considerada. Para fines prácticos del diseño estructural suelen distinguirse únicamente entre propiedades paralelas a las fibras y propiedades perpendiculares a éstas. La curva carga-deformación de la madera varía según la especie, el tipo de sollicitación, la forma en que se realizó el ensaye, las características del crecimiento y otros factores.

Los factores más importantes que influyen en el comportamiento y la resistencia de la madera son: la densidad, donde se observa que a mayor contenido de material leñoso mayor es su resistencia a las acciones mecánicas; el contenido de humedad, debido a que conforme la madera se va secando las características resistentes mejoran debido a la densificación y rigidización de las paredes de las células y al aumento de la cantidad de material leñoso por unidad de volumen originado por la contracción que acompaña a la pérdida del agua; los defectos, el tipo de acabado y los tratamientos retardantes al fuego disminuyen la resistencia de la madera obtenida de probetas "limpias" (una probeta limpia es una probeta que pretende eliminar la influencia que puede tener en el comportamiento estructural de la madera la presencia de irregularidades como son los nudos, las desviaciones en la dirección de las fi-

bras, las bolsas de resina, las rajaduras durante el crecimiento y/o el secado, las gemas, el alabeo y el aplanamiento); la relajación, es un fenómeno viscoelástico de la madera en donde los esfuerzos requeridos para conservar una deformación constante van disminuyendo con el tiempo. La influencia de la relajación y de algunos otros factores no mencionados son explicados al estudiar las teorías sobre el comportamiento estructural de las uniones clavadas.

1.2. PROPIEDADES MECANICAS DE LOS CLAVOS

Las propiedades mecánicas de los clavos dependen del material utilizado para su fabricación y de sus propiedades geométricas. Los materiales usados en la fabricación de los clavos son: acero con diferentes contenidos de carbón, acero inoxidable, acero con aleaciones de aluminio, de cobre, de bronce, u otros metales para aplicaciones específicas.

Las propiedades geométricas dependen del tiro de punta, de la sección transversal y tipo de superficie del alambre, y de la forma de la cabeza (fig. 3).

Existen diversos tipos de puntas (fig. 4), cuya finalidad consiste en facilitar el hincado del clavo. Las puntas cortas o semichatas reducen las rajaduras y la adherencia con la madera. Las puntas largas presentan mayor adherencia pero propician las rajaduras. Para casos específicos se utilizan puntas para remachar, las cuales poseen una muesca o una zona aplanada para permitir el remache en forma automática cuando la punta golpea una placa metálica en la parte posterior de la madera, después de haberla atravesado completamente.

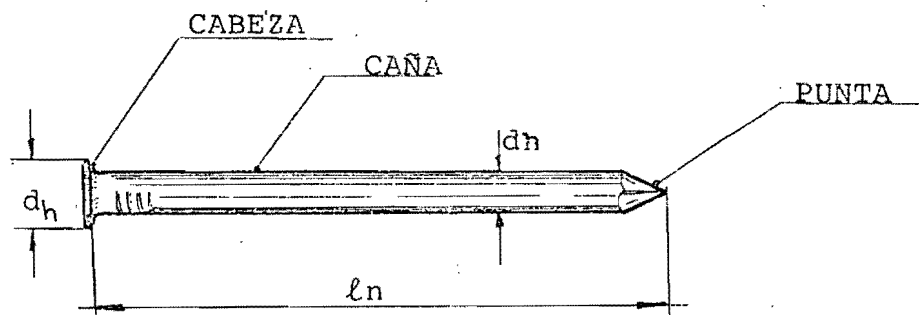


FIG.3 PARTES PRINCIPALES DE UN CLAVO

ℓ_n : longitud del clavo

d_h : diámetro de la cabeza

d_n : diámetro del clavo o caña

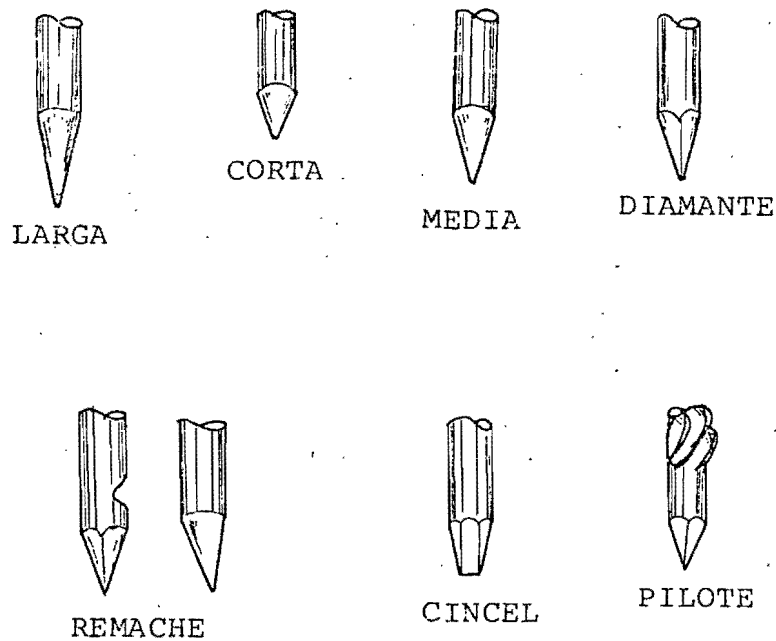


FIG.4 TIPOS DIFERENTES DE PUNTAS

La sección transversal del alambre de los clavos pueden ser circular, cuadrada, triangular, etc. (fig. 5); la más común es la circular. Su influencia consiste principalmente en su módulo de sección y su rigidez.

La superficie de la caña del clavo se modifica con frecuencia durante el proceso de fabricación (fig. 6). Los clavos estriados tienen ranuras continuas y simétricas, helicoidales o longitudinales, que se forman en el alambre antes de cortarlo. Las ranuras y anillos formados sobre la caña del clavo sirven para incrementar su adherencia con las fibras de las maderas, facilitando su hincado, y tratando de evitar su extracción. Este tipo de tratamiento en la caña del clavo incrementa su resistencia a la extracción en forma considerable y ésta no se ve afectada en forma importante por los cambios de humedad en la madera. Por lo general, se utilizan en conexiones de tipo permanente, dada la dificultad para su extracción.

Las funciones estructurales de la cabeza del clavo son: proporcionar un área para ser golpeada por el martillo o por las máquinas colocadoras de clavos, y brindar una superficie de soporte requerida para la transmisión de ciertos tipos de cargas. Se usan diferentes tipos de cabezas para clavos, dependiendo del propósito del clavo (fig. 7).

Los clavos pueden recibir algún tipo de recubrimiento para mejorar algunas de su propiedades. Los recubrimientos contra la corrosión a veces influyen en la rugosidad de la superficie del clavo, por lo que pueden influir en su comportamiento. Los pegamentos producen una adherencia temporal y limitada entre el clavo y la

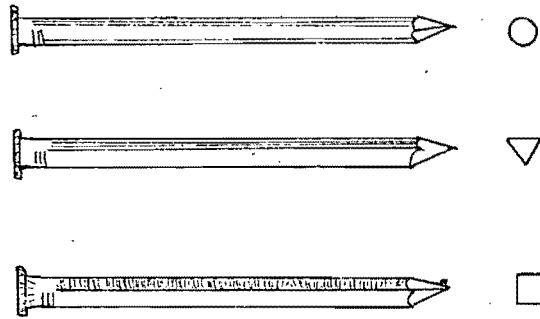


FIG. 5 DIFERENTES TIPOS DE SECCIONES TRANSVERSALES

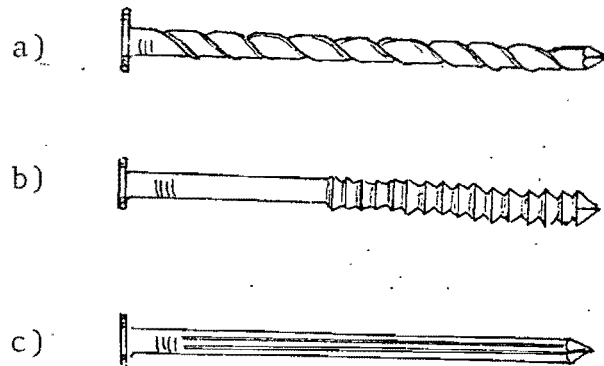
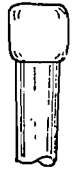
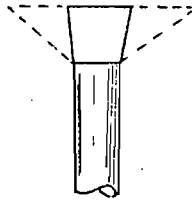


FIG. 6 DIFERENTES TIPOS DE CLAVOS.
 a). Clavo con ranuras helicoidales
 b). Clavo con ranuras anulares
 c). Clavo con ranuras longitudinales



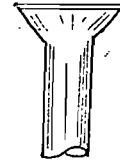
Sin cabeza



avellanado
o cónica



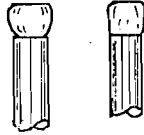
doble



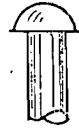
en filete



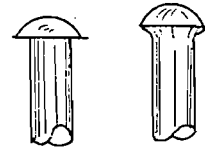
plana
o lisa



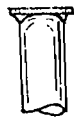
alfilerillo
sin cabeza



redonda



ovalada



en "T"



incompleta

FIG. 7 TIPOS DE CABEZAS

madera que lo rodea, proporcionando un recubrimiento que no se remueve durante el hincado del clavo y reduce la herrumbre durante el almacenado.

1.3. INFLUENCIA DEL TIPO DE CONFIGURACION DE LA UNION CLAVADA

Es importante el tipo de configuración de la unión puesto que definirá las formas en que se comporten estructuralmente la madera y el clavo. La capacidad de los clavos para transmitir cargas a extracción está influida por la fricción entre ellos y la madera que los rodea. Esta fricción es cambiante y puede desaparecer en forma parcial o completa debido al fenómeno de relajación de la madera que rodea al clavo, y al fenómeno de dilatación y contracción de la madera como resultado de los cambios en su contenido de humedad.

Las dimensiones, y especialmente el espesor del clavo y de los miembros de unión, así como las distancias del clavo a los bordes laterales y a extremos, y el espaciamiento entre clavos, son factores importantes en el comportamiento de la unión. Las rajaduras de los miembros de madera están relacionadas con sus dimensiones, el tamaño y localización de los clavos. Tales rajaduras pueden ser reducidas con huecos pretaladrados.

Cuando el clavo es remachado después de atavesar completamente la unión se incrementa su resistencia a la extracción y la rigidez de la unión, disminuyendo las rajaduras.

2. COMPORTAMIENTO DE UNIONES CLAVADAS

En el diseño de las uniones de madera es necesario conocer la forma en que cada una de las variables afecta el comportamiento bajo carga de la unión.

La fig. 8 muestra una curva típica carga-deformación de una unión en cortante doble bajo cargas laterales. En general, se puede afirmar que el valor correspondiente al límite de proporcionalidad es difícil de precisar, dada la forma curvilínea de la relación en todo su extensión. Fue de sin embargo, indicarse, a partir de un análisis de los resultados experimentales (ref. 4), que el punto a partir del cual se evidencian deformaciones permanentes de carácter plástico o residual ocurre normalmente a deslizamientos mayores de 2 a 4 mm, y que las cargas máximas se evidencian a deformaciones significativamente altas, superiores de los 8 a 10 mm, en probetas como la mostrada en la fig. 15.

Dadas las características de las curvas carga-deformación que se observan en las uniones clavadas, es casi imposible y poco práctico, el pretender derivar fórmulas matemáticas que representen adecuadamente tal comportamiento en toda su extensión. En consecuencia, los trabajos realizados en otros países se han orientado en dos sentidos: teorías que permitan estimar la capacidad máxima de la unión, y teorías que permitan estimar lo mejor posible la relación carga-deformación en la zona lineal de la curva.

2.1 TEORIAS PROPUESTAS PARA DETERMINAR LA CARGA ULTIMA EN LAS UNIONES CLAVADAS

2.1.1. A FUERZAS LATERALES

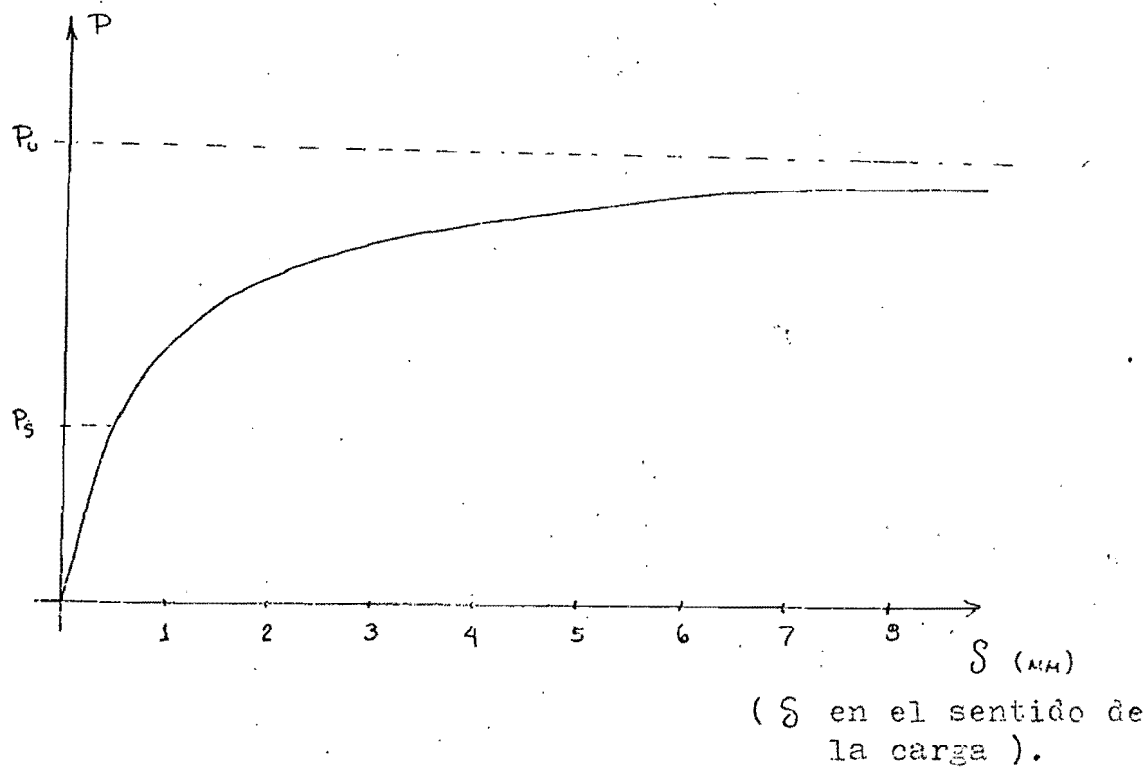


FIG. 8 Curva carga-deslizamiento de una unión clavada sometida a empujes laterales paralelos a las fibras de la madera.

2.1.1.1. TEORIA DE JOHANSEN

La primera teoría importante que surgió con respecto a la transmisión de la carga en uniones donde se utilizan clavos o pernos, fué desarrollada por Johansen (ref. 9). Consideró tres efectos fundamentales en una unión: el efecto del perno (o clavo), que depende de su resistencia a la flexión y de la resistencia al aplastamiento de la madera bajo el perno; el efecto producido por la fuerza de tensión que se presenta en el alambre del perno, el cual depende de su resistencia a la tensión y de la fricción existente entre el perno y la madera que lo rodea; el tercer y último de los efectos considerados fué el de las placas dentadas.

Las expresiones teóricas obtenidas por Johansen proporcionan la carga última de una unión; se basa en las hipótesis de un comportamiento plástico de la madera y considera como capacidad última de la unión, el inicio de la fluencia del material. Tanto las hipótesis como las expresiones propuestas por Johansen, se verificaron experimentalmente.

2.1.1.2. TEORIA DE MOELLER

Moeller fué el primero en aplicar la teoría de Johansen a uniones con clavos sometidos a cargas perpendiculares al eje longitudinal del clavo. La teoría de Moeller se basó en un comportamiento rígido del clavo y de la madera hasta el inicio de la fluencia de los materiales. Estas hipótesis niegan cual

quier deformación de la unión hasta el inicio de los esfuerzos de fluencia, no siendo posible el calcular la deformación en el intervalo de carga. Moeller desarrolló las expresiones matemáticas correspondientes a uniones en cortante simple y doble, haciendo las hipótesis siguientes referentes a la falla:

- a) El clavo permanece rígido hasta alcanzar la fluencia de la madera (fig. 9a).
- b) El momento de fluencia del clavo, M_y , es alcanzado antes de presentarse la fluencia de la madera (fig. 9b).

(Véase el ápendice A donde se muestra con mayor detalle la teoría de Moeller).

El método propuesto por Moeller ha sido el más aceptado y respaldado por los resultados experimentales para la determinación de la capacidad máxima de uniones clavadas en maderas coníferas. El método ignora los efectos de la fricción entre los elementos de unión. Exige, además, el conocimiento del momento máximo resistente del clavo, M_y , y el esfuerzo máximo a aplastamiento en áreas pequeñas y confinadas de la madera, f_e .

2.1.1.3. TEORIA DE MEYER

Meyer extendió la teoría de Moeller tomando en cuenta la resistencia a la extracción del clavo y el efecto de la fricción entre las superficies de contacto de los miembros de madera, que se presenta después de una deformación considerablemente alta para que sea significativa su contribución al valor

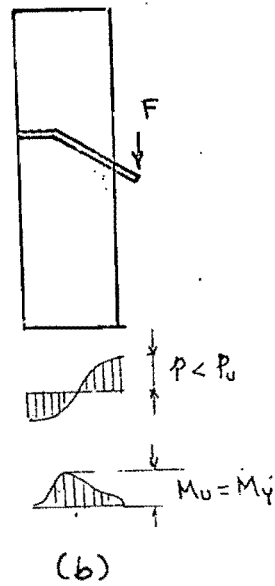
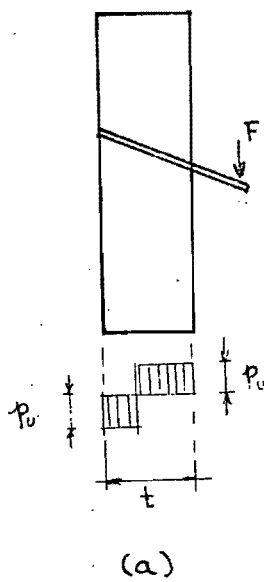


FIG. 9 (a) PRESENCIA DE ESFUERZOS ULTIMOS, P_u , CUANDO EL CLAVO ES RIGIDO

(b) PRESENCIA DEL MOMENTO DE FLUENCIA, M_y DEL CLAVO

de la capacidad máxima (ref. 7).

La resistencia de una unión en cortante se alcanza cuando el clavo se dobla un ángulo tal que se presenta una fuerza en la caña del clavo, F_t , que puede ser la resistencia última a la extracción, o la resistencia última del clavo (fig. 10). Su componente paralela a la superficie de contacto $F_t \text{ Sen } \varphi$ se puede sumar a la capacidad de cortante lateral en la dirección perpendicular al eje del clavo. La componente perpendicular a las superficies de contacto de los miembros, $F_t \text{ Cos } \varphi$, origina una resistencia adicional, $\mu F_t \text{ Cos } \varphi$, en la dirección de la carga lateral, debida a la fricción entre los miembros.

La capacidad de carga adicional total es:

$$F_{\text{adicional}} = F_t \text{ Sen } \varphi + \mu F_t \text{ Cos } \varphi$$

donde: μ = coeficiente de fricción de las superficies de contacto de los miembros.

φ = ángulo de deformación del clavo.

F_t = fuerza de tensión que se presenta en el clavo.

Es necesario, conocer además los valores del coeficiente de fricción madera-madera y los valores de la resistencia a la extracción de los clavos en las maderas utilizadas. Sin embargo, el coeficiente de fricción μ , de madera a madera, obtenido directamente en el laboratorio, no es necesariamente aplicable a uniones insitu, dado que depende del acabado de los elementos, de la dirección de las fibras, del contenido de humedad, contracciones, etc.

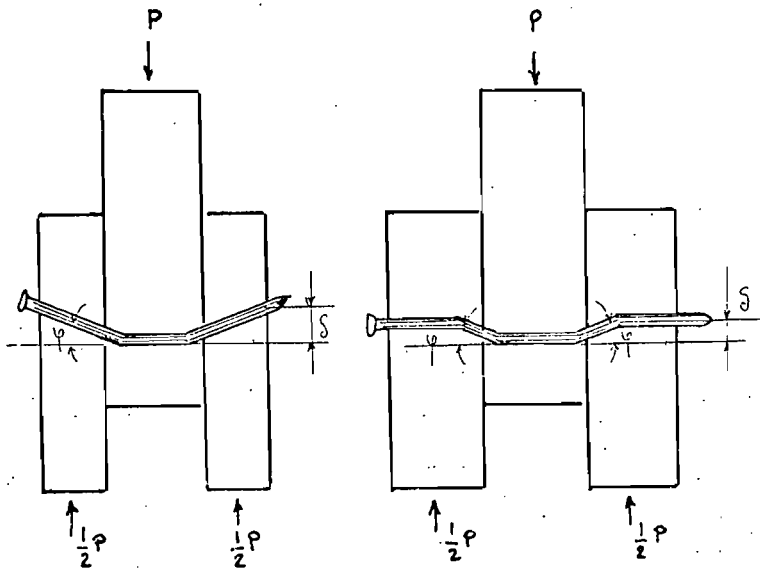


FIG. 10 DEFORMACION EN UNIONES CLAVADAS BAJO CARGA, SEGUN MEYER.

En la teoría de Woeller se ha visto que la resistencia de la madera al aplastamiento bajo el clavo, f_e , es uno de los parámetros principales que influyen en la capacidad de transmisión de la carga en uniones clavadas. f_e se define como la presión última de la madera por unidad de longitud del clavo, p_u , entre el diámetro del clavo, d_n :

$$f_e = p_u/d_n = F_u/t \cdot d_n$$

donde: t = espesor del miembro

F_u = carga última

La resistencia al aplastamiento de la madera bajo el clavo, f_e , es diferente de la resistencia a compresión, f_c , obtenida con pequeñas probetas prismáticas en laboratorio, (probetas de 51x51x152 mm).

La hipótesis de distribución uniforme de carga bajo el clavo es únicamente válida para clavos extremadamente rígidos. De este modo, un valor válido para la resistencia al aplastamiento bajo el clavo puede ser obtenido únicamente en base a pruebas de laboratorio cuando la dimensión del miembro es delgada en relación al diámetro del clavo. La relación de esbeltez del clavo:

$$\lambda_n = t/d_n$$

debe ser pequeña y menor de 4. Para $\lambda_n > 4$, la deformación del clavo influye en la distribución de esfuerzos.

Ya que la resistencia a compresión, f_c , es una propiedad estándar de la madera, distintos investigadores han tratado de determinar la relación entre f_e y f_c , por medio del factor: $\psi_e = f_e/f_c$
Este factor, sin embargo no es constante; depende

del contenido de humedad de la madera, del diámetro, forma y especialmente de la sección transversal del clavo, así como, del ángulo entre la carga y la dirección de las fibras.

Moeller obtuvo para maderas de Suecia y Finlandia los valores promedio de $\varphi_e = 0.75$ para clavos de sección cuadrada con estrias, y de $\varphi_e = 0.49$ para clavos de sección circular lisos.

2.1.1.4. OTRAS TEORIAS

Siimes, Johansen y Niskanen (ref. 28), experimentaron con pinus silvestris, y determinaron que f_e depende de la densidad y del contenido de humedad de la madera, del diámetro del clavo, de la colocación del clavo con respecto a los anillos de crecimiento de la madera, y del ángulo entre la carga y la dirección de la fibra. Utilizaron placas de carga especiales, con tres formas diferentes de apoyo, para presionar a los especímenes de madera, como se muestra en la fig. 11 .

Los valores medios obtenidos fueron de $\varphi_e = 0.89$ para clavos de sección circular lisos, y de $\varphi_e = 1.09$ para clavos de sección cuadrada. El contenido de humedad define la resistencia a compresión, f_c ; para madera verde, la resistencia al aplastamiento f_e , es mayor que la resistencia a compresión f_c , con $\varphi_e > 1.0$. Esto se debe a que las rajaduras en la madera seca son más frecuentes que cuando la madera esta verde. La disminución de la resistencia al aplastamiento, f_e , al incrementar el contenido de

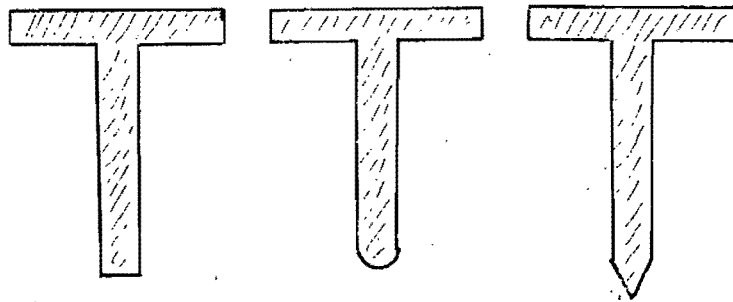


FIG. 11 PLACAS DE CARGA, CON DIFERENTES FORMAS DE SUPERFICIES DE APOYO

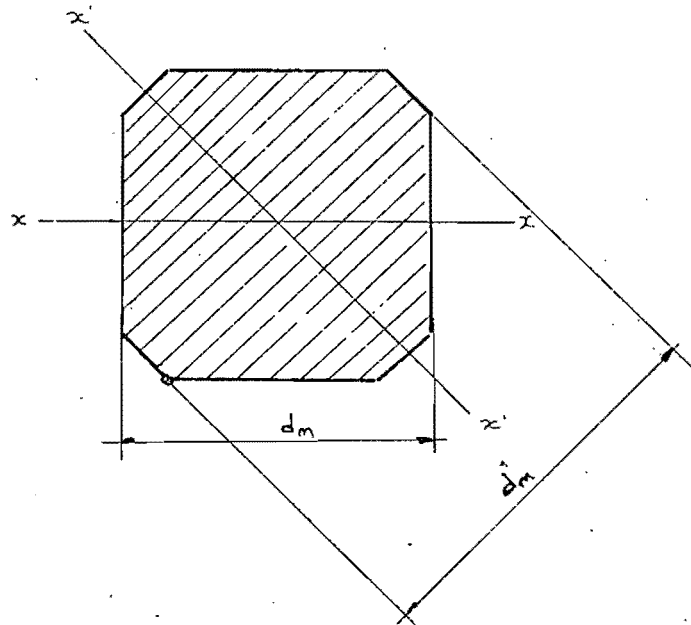


FIG. 12 SECCION TRANSVERSAL DE UN CLAVO DE CAÑA CUADRADA CON LAS ESQUINAS RECORTADAS.

humedad.

En Finlandia se realizaron pruebas con clavos de sección cuadrada, y se observó que la resistencia al aplastamiento bajo el clavo disminuye cuando se incrementa su grosor (ref. 7).

La influencia de clavos colocados en dirección tangencial, diagonal o radial con respecto a los anillos de crecimiento es insignificante. Normalmente la resistencia al aplastamiento de la madera bajo el clavo para diferentes ángulos de carga puede ser considerada la misma. Esta última observación debe ser restringida a clavos hincados sin taladrar la madera.

Kuipers y Verneyden proponen usar una resistencia media al aplastamiento, f_e , de 33 N/mm^2 en maderas con contenido de humedad igual al 12%, y de 30 N/mm^2 para contenidos de humedad del 15%, en maderas coníferas de los Países Bajos. Estos valores no toman en cuenta cualquier incremento en la resistencia, f_e , cuando decrece el diámetro del clavo.

Gaber (ref. 7) confirmó que la resistencia al aplastamiento, f_e , decrece ligeramente con el incremento en el diámetro del clavo. Esto se explica debido a la tendencia mayor a las rejaduras originadas por el uso de clavos gruesos. Presentó los datos siguientes para madera seca:

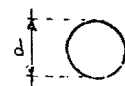
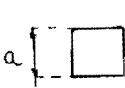
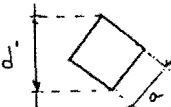
d_n (mm)	3.1	4.2	6.0
f_e (N/mm^2)	36.6	34.8	30.8

Otro parámetro importante en la teoría de Moeller es el momento de fluencia del clavo, M_y ; el

cual se alcanza cuando los esfuerzos de flexión empiezan a alcanzar el esfuerzo de fluencia del material.

Ehlbeck (ref.7) calculó los módulos de sección plástica y elástico para secciones cuadradas y circulares, Tabla 1.

Tabla 1. Módulos de sección plástica y elástico para secciones transversales cuadradas y circulares.

Sección Transversal	M_p	M_y	K_p/M_y
	$d^3/6$	$\pi d^3/32$	1.70
	$a^3/4$	$a^3/6$	1.50
	$\frac{a^3}{3\sqrt{2}} = \frac{d'^3}{12}$	$\frac{a^3}{6\sqrt{2}} = \frac{d'^3}{24}$	2.00

La determinación del esfuerzo de fluencia de los clavos es algunas veces complicada, dado que presenta gran variación las propiedades de los alambres de los clavos con respecto al diámetro del clavo.

2.1.2. A FUERZAS DE EXTRACCION

La carga última resistente a la extracción de las cañas de los clavos en las uniones de madera se pueden calcular en forma simplificada con la siguiente ecuación:

$$F_{ex} = f_{ex} \cdot \pi \cdot d_n \cdot l_p$$

donde: l_p = Longitud de penetración del clavo

f_{ex} = resistencia a la extracción por unidad de área de contacto, suponiendo que es uniforme a lo largo de toda la superficie del clavo.

Esta última hipótesis se justifica cuando la longitud de penetración del clavo, l_p , es menor o igual a $20 \cdot d_n$ pero mayor que $8 \cdot d_n$. De no ser así, debe considerarse que la resistencia última a la extracción no varía linealmente con la profundidad de penetración.

La resistencia a la extracción, f_{ex} , depende de un gran número de parámetros, tanto del conector como de los miembros que constituyen la unión. Durante el hincado, muchas de las fibras de la madera son desplazadas o cortadas por la punta del clavo; el número de fibras desplazadas o cortadas depende principalmente del tipo de punta. Las fibras que son desplazadas producen un efecto de presión confinante sobre la caña del clavo, que afecta a la fuerza friccionante que se origina entre la caña y la madera. Cuando el clavo es jalado axialmente, la extracción ocurre tan pronto como las fuerzas de fricción son excedidas.

La presión lateral ejercida por las fibras de la madera sobre la caña del clavo no es constante y disminuye con el tiempo, como resultado de la relajación de la madera comprimida, del secado y de los cambios cíclicos del contenido de humedad.

Además, la presión lateral inicial después del hincado varía con el tipo de madera, su densidad y el contenido de humedad durante su colocación. Por es-

tas razones, debe evitarse el uso de clavos de caña lisa sometidos a fuerzas de extracción, especialmente bajo cargas de larga duración.

No únicamente la madera que rodea al clavo influye sobre su resistencia a la extracción; esta depende también del tipo de superficie del clavo, ya sea rugosa o lisa. Una forma efectiva para incrementar la adherencia entre la madera y el clavo ha sido el uso de ranuraciones, tanto helicoidales como anulares, en la caña del clavo. Moeller y Ehlbeck (ref. 7) han visto que en los clavos ranurados no influyen en forma importante los efectos de la relajación y la contracción de la madera. En forma contraria, durante el secado las fibras de la madera son más resistentes y ofrecen un mayor poder de sujeción del clavo a fuerzas de extracción. De este modo, se ha observado que al disminuir el contenido de humedad de la madera, cuando la caña del clavo tiene ranuras adecuadas se incrementa la resistencia a la extracción.

Los recubrimientos que se utilizan en las cañas de los clavos en algunas ocasiones incrementan su resistencia a la extracción, pero por lo general ese aumento es temporal (ref. 33).

Debido al gran número de variables que influyen en la resistencia a la extracción de los clavos, muchas y muy diversas pruebas han sido realizadas para tratar de optimizar su diseño (ref. 32). Muchas de ellas fueron realizadas para obtener respuestas a aplicaciones específicas, y otras para obtener datos básicos.

2.2. TEORIAS PROPUESTAS PARA DETERMINAR LA CURVA CARGA-DEFORMACION

No es justificable el despreciar la deformación durante el proceso de carga y referirse únicamente a la capacidad de transmisión de la carga última, en un intento por establecer las cargas de diseño. Se han realizado investigaciones para describir la curva carga-deformación en uniones con clavos. El problema se presenta debido a la multiplicidad de factores que influyen en el comportamiento de las uniones, siendo uno de los más complejos el tiempo, del cual dependen la intensidad de la carga, el contenido de humedad y el cambio continuo de las condiciones ambientales. A continuación se describen las principales teorías existentes y sus hipótesis básicas.

2.2.1. TEORIA DE KUENZI

Kuenzi (ref. 11) fué el primero en desarrollar un análisis teórico de conexiones con clavos o pernos sometidos a cargas perpendiculares a su eje longitudinal, para tratar de predecir la curva carga-deformación, se basó en la teoría de vigas sobre una cimentación elástica, en donde la presión bajo la viga es considerada proporcional a su desplazamiento, y en un comportamiento elástico lineal de los materiales.

La teoría de vigas sobre un medio de cimentación elástico fué introducido inicialmente por Winkler, y las soluciones en vigas de longitud finita, utili-

zadas por Kuenzi, fueron obtenidas por Hetenyi (ref. 34).

Las soluciones desarrolladas por Kuenzi relacionan el módulo de elasticidad del clavo, su momento de inercia, el módulo de cimentación elástica de la madera, y las dimensiones de los miembros. Se obtienen expresiones que dependen de funciones trigonométricas e hiperbólicas, con las que se calculan la presión, el momento flexionante, la fuerza cortante y la deflexión en cualquier punto del clavo. Se proponen soluciones en miembros en cortante simple y en cortante doble.

En un estudio desarrollado por Stluka (ref. 35), las expresiones desarrolladas por Kuenzi fueron investigadas experimentalmente, encontrando que la teoría predecía el comportamiento elástico de las uniones con bastante exactitud, si los agujeros eran preta-ladrados ligeramente antes de introducir el clavo. Stluka encontró también que al aplicar la carga en sentido paralelo a las fibras de la madera el módulo de cimentación elástica se puede expresar como una fracción constante de su módulo elástico, independientemente del diámetro del clavo. Cuando las cargas se aplican en dirección perpendicular a las fibras, el módulo de cimentación elástica de la madera cambia con el diámetro del clavo.

2.2.2. TEORIA DE WILKINSON

Wilkinson (ref 30) mejoró la teoría de Kuenzi al introducir una relación sencilla en uniones en cortante simple, entre la carga y el correspondiente des

plazamiento de los miembros. La expresión teórica obtenida por Wilkinson relaciona la carga aplicada en una unión, en la que se han utilizado clavos de caña lisa, con la deformación de dicha unión. La expresión propuesta toma en cuenta los diferentes tamaños y materiales de los clavos y las diferentes especies de madera.

En un segundo artículo (ref. 31), Wilkinson complementó su trabajo al considerar uniones entre miembros de diferentes tamaños; además, obtuvo datos suplementarios sobre los efectos que producen las deformaciones de las cañas de los clavos en las gráficas carga-deformación de las uniones.

2.2.3. METODOS EMPIRICOS

Los métodos basados en la teoría elástica no toman en cuenta las deformaciones residuales que ocurren durante las etapas iniciales de carga. Se han realizado diversos intentos por describir la curva carga-deformación usando fórmulas empíricas de ajustes de datos experimentales. Cabe destacar el método de Ivanov (ref. 7) que utiliza una ecuación empírica de segundo orden para describir la curva carga-deformación de la unión, del tipo mostrado en la siguiente ecuación:

$$\xi = a_1 \sigma + a_2 \sigma^2$$

ξ representa la deformación unitaria, σ es el esfuerzo correspondiente y a_1 y a_2 son coeficientes constantes obtenidos experimentalmente.

El método de Mack (ref. 14) para describir la

curva carga-deformación, ajusta los resultados obtenidos experimentalmente en conexiones a base de clavos sometidos a cargas de corta duración. De las investigaciones realizadas por Mack (ref. 15, 16 y 17) se concluye lo siguiente:

- a) Se presenta un incremento de capacidad de carga de 1.39 entre la madera seca y la verde.
- b) Se encontró un factor de reducción de 0.94 para uniones con doce clavos, comparado con el efecti vidad de las conexiones con un clavo por cada plano de corte.
- c) Las uniones en cortante doble presentaron el doble de rígidez de las uniones en cortante simple.
- d) Es necesario pretaladrar la madera antes de colocar el clavo para facilitar la penetración, cuando se emplean clavos comunes colocados en maderas duras, para prevenir así el pandeo del clavo y las rajaduras de la madera. Las pruebas indicaron que no se presentaban diferencias en las curvas carga-deformación de maderas suaves, pretaladradas o no; de este modo, no necesita introducir se ningún factor de ajuste, excepto por el hecho de que las cargas últimas mayores observadas se presentaron en conexiones pretaladradas, debido al reducido peligro de las rajaduras.
- e) La dirección de las fibras en la madera en relación a la dirección de la carga parece tener una gran influencia sobre la curva carga-deformación de la unión, en un intervalo bajo de carga.

Morris (ref. 20) indicó que para un intervalo bajo de deformación, de 0 a 0.25 mm, la curva carga-defor

mación puede ser descrita por:

$$F = A s^B$$

donde A y B son constantes obtenidas experimentalmente, s es la deformación y F la carga.

McLain (ref. 36) realizó un extenso programa de pruebas utilizando diferentes tipos de madera, así como triplay, madera maciza, aglomerados o placas metálicas en los miembros laterales de las conexiones traslapadas. Utilizó más de treinta y cinco funciones posibles para ajustar los resultados obtenidos experimentalmente, y llegó finalmente a la siguiente ecuación, que es la que representa los resultados experimentales con mayor precisión:

$$F = A \log (1 + B.s)$$

Las constantes A y B se obtuvieron mediante un análisis de regresión múltiple de los datos experimentales basados en las densidades relativas y sus módulos de elasticidad. La ecuación es válida para desplazamientos relativos, s, menores o iguales a 2.5 mm.

Brock (ref. 3) realizó experimentos para determinar la influencia de ciertos factores en la resistencia y rigidez de las conexiones de madera con clavos sometidos a fuerzas laterales, llegando a las siguientes conclusiones:

- a) Para el mismo espesor total de los miembros en cortante doble (unión con tres miembros) y en cortante simple (unión con dos miembros), las uniones en cortante doble tienen una rigidez doble que las conexiones en cortante simple; además, las cargas transmitidas por conexiones en cortante doble son mayores, hasta en un 80%, que

una deformación s , puede obtenerse con la ecuación:

$$P = R N_p K_{\text{especie}}$$

donde R es la resistencia (en Newtons) para una deformación (en milímetros) dada por:

$$R = (0.560s + 3.02)(1 - \exp(-2.95s))^{0.7}$$

N_p es un factor que depende del diámetro del clavo d_n , dado en milímetros

$$N_p = 0.181 d_n^{1.75}$$

K_{especie} es un factor que depende del peso específico G

$$K_{\text{especie}} = 303 G$$

El procedimiento desarrollado por Mack fué para utilizarse en uniones clavadas que presenten un pequeño deslizamiento inicial entre los miembros. Esto es típico en uniones bajo cargas de servicio, debido a que pequeños cambios en la humedad pueden causar que los miembros se muevan ligeramente entre sí.

La aplicabilidad de la fórmula ha sido comprobada por los resultados experimentales publicados por Morris (ref. 20).

3. ESTADOS LIMITE

3.1. INTRODUCCION

El diseño basado en estados límite consiste en diseñar las estructuras de manera que presenten un grado de seguridad adecuado contra la posible ocurrencia de comportamientos no deseados. El inicio de un comportamiento no deseado es lo que se llama un estado límite.

Los estados límite se pueden clasificar en estados límite de resistencia y de servicio. Los primeros son aquellos que involucran la seguridad de la estructura y de sus ocupantes, mientras que los segundos están relacionados con la apariencia, con desperfectos estructurales menores o con condiciones temporales no deseadas.

3.2. ESTADOS LIMITE PARA UNIONES CLAVADAS

Para el establecimiento de normas basadas en estados límite para uniones clavadas es necesario identificar cuáles serán los estados límite, cómo satisfacerlos y cómo determinar la magnitud de las acciones y de las resistencias nominales; para lograrlo se plantea la siguiente temática:

- 1) Identificar los estados límite
- 2) Estudiar el comportamiento de la estructura que lleva, eventualmente, al estado límite
- 3) Establecer acciones y resistencias nominales
- 4) Obtener factores de carga y resistencia
- 5) Establecer índices de seguridad

A continuación se presenta un breve desarrollo de los puntos citados:

3.2.1. IDENTIFICACION DE LOS ESTADOS LIMITE EN UNIONES CLAVADAS

Para identificar los estados límite más relevantes es necesario realizar un estudio general sobre el comportamiento de las estructuras de madera a base de uniones clavadas, para poder apreciar cuál es el comportamiento estructural no deseado, y definir el estado límite. El estudio se debería basar en el comportamiento integral de la estructura, pero debido a la complejidad del problema y al comportamiento poco dúctil de las estructuras de madera, ocasionado por dificultades para obtener continuidad entre los elementos que las constituyen, se basa en el comportamiento estructural de las uniones clavadas aisladas.

En los capítulos anteriores se ha estudiado el comportamiento estructural de las uniones clavadas, y los resultados de este estudio permiten definir dos estados límite, el de deformación máxima tolerable y el de capacidad máxima.

3.2.2. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA UNION CORRESPONDIENTE A CADA ESTADO LIMITE

Para conocer el comportamiento de la unión correspondiente a cada estado límite, es necesario conocer su comportamiento en forma experimental junto con su variabilidad para poder emplear métodos probabilísticos.

En este inciso se establecen métodos experimentales que permitan determinar el comportamiento estructural de las uniones. Se consideran los dos tipos básicos de uniones clavadas, las que someten al clavo a empujes laterales y las que lo someten a fuerzas de extracción.

Las recomendaciones que se presentan a continuación tratan de seguir los principios generales establecidos por comités y organismos internacionales, como son el CIB-W18 (ref. 5), el comité 3TT-1 de la "Reunion International des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions" Rilem (ref. 23), la "American Society for Testing and Materials" ASTM (ref. 1 y 2), y otras más, con el objeto de comparar y utilizar resultados de otros investigadores.

3.2.2.1. METODOS EXPERIMENTALES

3.2.2.1.1. APARATO DE PRUEBAS

El aparato que se utilice para los ensayos debe ser capaz de medir y aplicar la carga con una exactitud no menor de $\pm 1\%$, y las deformaciones menores de 2 mm con una exactitud de ± 0.02 mm. El equipo debe asegurar que las excentricidades giros, etc., no influyan de manera significativa en las mediciones.

3.2.2.1.2. PROCEDIMIENTO DE APLICACION DE LA CARGA



La RILEM (ref. 23) recomienda que la carga se aplique como se muestra en la figura 13. En cada prueba la carga debe incrementarse o disminuirse a razón de 0.2 Fest. por minuto \pm 25%, donde Fest es la resistencia promedio máxima es timada del tipo de unión, que puede obtenerse en base a la experiencia, cálculos o pruebas preliminares. La carga debe crecer desde cero hasta 0.4 Fest, mantenerse durante 30 segundos con ese valor, ser reducida a 0.1 Fest y mantenida, otra vez, por 30 segundos (el requisito de mantener la carga constante durante 30 segundos a 0.4 y 0.1 Fest es para permitir un tiempo adecuado antes de modificar la dirección de aplicación de la carga). Después, vuelve a crecer hasta alcanzar la carga máxima o un desplazamiento prestablecido. Arriba de 0.7 Fest puede modificarse la velocidad de aplicación de la carga para que la carga máxima o el desplazamiento máximo se alcancen en un intervalo de 3 a 5 minutos. El tiempo total de la prueba debe ser de 10 a 15 minutos.

En cada espécimen deben anotarse los deslizamientos V01, V04, V14, V11, V21, V24, V26, y V28, mostrados en la figura 14.

Los cálculos recomendados por el RILEM son:

- 1) La carga máxima $F_{m\acute{a}x}$, alcanzada antes de o para un deslizamiento fijo
- 2) La carga estimada, Fest
- 3) El deslizamiento inicial, $V_i = V_{04}$
- 4) El deslizamiento inicial modificado, V_{imod}

$$V_{imod} = 4/3 (V_{04} - V_{01})$$

FIG. 13 PROCEDIMIENTO DE CARGA

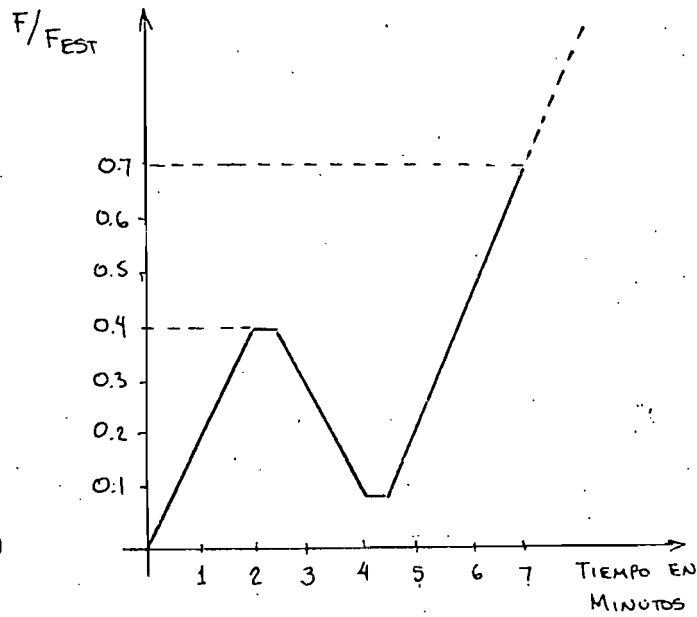
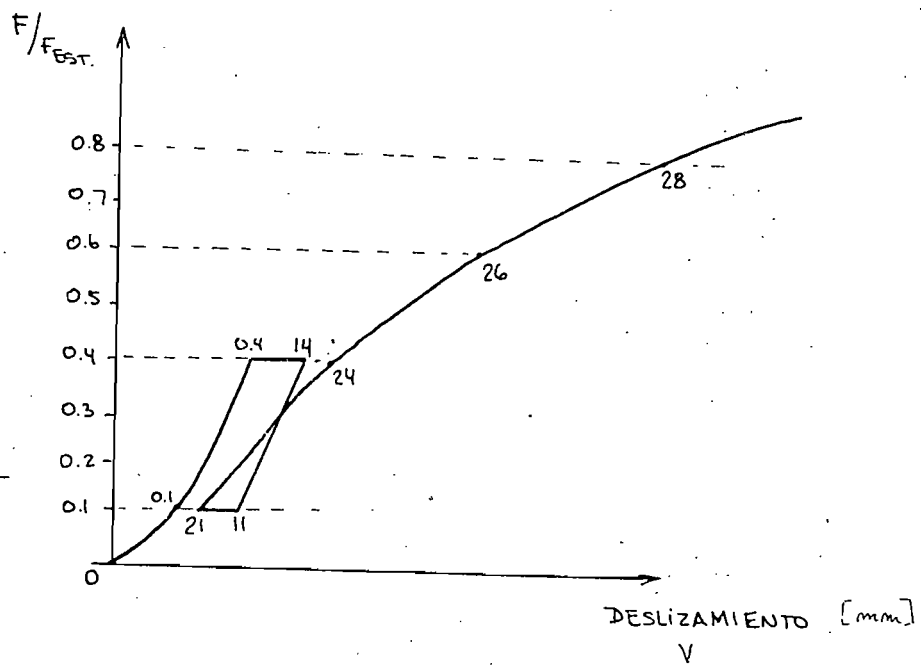


FIG. 14 CURVA CARGA-DES_LIZAMIENTO (idealizada)



5) El asentamiento de la unión, $V_s = V_i - V_{imod}$

6) El deslizamiento elástico, V_e

$$V_e = 2/3 (V_{14} + V_{24} - V_{11} - V_{21})$$

7) El módulo inicial de deslizamiento, k_i

$$k_i = 0.4 F_{est}/V_i$$

8) El módulo de deslizamiento, $k_s = 0.4 F_{est}/V_{imod}$

9) El deslizamiento a 0.6 F_{max} , $VO.6$

10) El deslizamiento modificado para 0.6 F_{max} ,

$$VO.6_{mod} = VO.6 - V_{24} + V_{imod}$$

11) El deslizamiento a 0.8 F_{max} , $VO.8$

12) El deslizamiento modificado a 0.8 F_{max} , $VO.8_{mod}$

$$VO.8_{mod} = VO.8 - V_{24} + V_{imod}$$

3.2.2.1.3. NUMERO DE PROBETAS

Para obtener resultados experimentales que sean representativos del comportamiento de las uniones clavadas es necesario realizar una pequeña serie de probetas para conocer su distribución, y poder así, proponer alguna función probabilística continua que represente lo mejor posible a esa población. Seleccionada la función probabilística se fija un intervalo de confianza, y con los datos estadísticos obtenidos, se determina el número necesario de probetas que represente adecuadamente a esa población.

Después de realizar los ensayos se deben efectuar pruebas de hipótesis para determinar si los valores utilizados inicialmente son representativos de la población. En caso negativo se repite el procedimiento, pero ahora con los datos

estadísticos del ensayo principal, siempre y cuando el número de probetas sea mayor que el de las pruebas preliminares. En caso contrario se incrementa el número de probetas, y el ciclo se vuelve iterativo, hasta obtener valores representativos de la población con un intervalo de confianza pre-establecido.

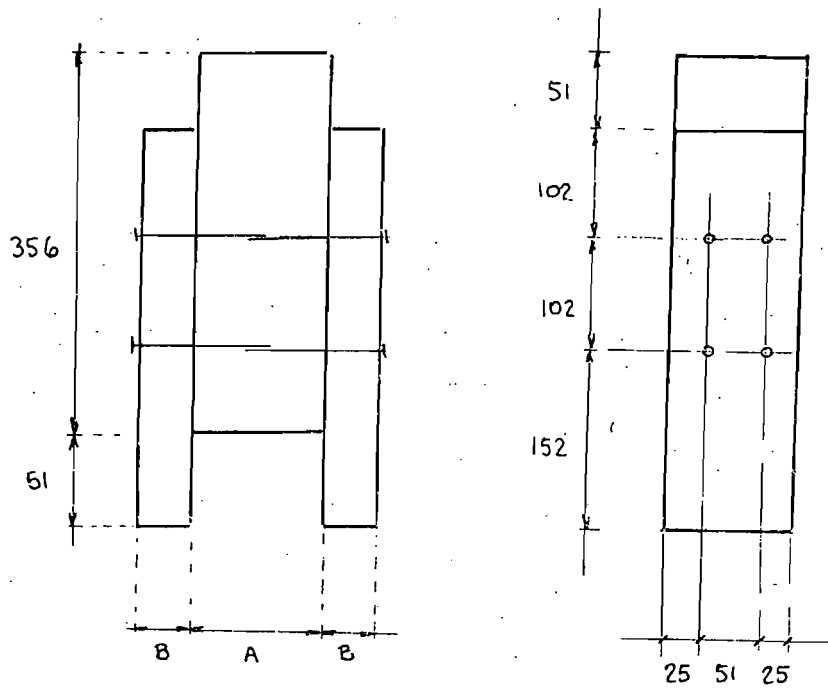
3.2.2.1.4. PROBETAS RECOMENDADAS

Para determinar la resistencia a fuerzas de extracción o a fuerzas laterales, se proponen dos tipos diferentes de probetas. Para obtener la resistencia de uniones a fuerzas laterales, algunos investigadores (refs. 3, 4 y 29) han utilizado la probeta mostrada en la fig. 15; las dimensiones A y B dependen de la longitud del clavo, para lograr sólo un plano de corte en los clavos.

Para evitar la fricción entre las caras de la madera, debido a su gran variabilidad y obtener así valores más confiables, se recomienda dejar una pequeña holgura, o colocar algún material adecuado entre los elementos de la unión. Centeno (ref. 4) utilizó hojas de papel parafinado para minimizar los efectos de fricción.

En las probetas se recomienda hincar los clavos en dirección perpendicular a la fibra, que es la forma básica para determinar la resistencia.

Para obtener la resistencia a fuerzas de ex-



(Acotaciones en mm)

FIGURA 15

PROBETA DE ENSAYE A FUERZAS
LATERALES

tracción, ASTM (ref. 2) recomienda utilizar probetas prismáticas de 51 x 51 x 152 mm (2"x 2"x 6") y colocar los clavos en ángulo recto con las caras de la probeta, con una penetración total de 32 mm (1 1/4"). Deben colocarse dos clavos en dirección tangencial a los anillos de crecimiento, dos en dirección radial y uno en cada extremo, a una distancia tal, del borde y de los extremos, que se eviten las rajaduras en la madera. En general, la distancia a los bordes no debe ser menor que 19 mm (3/4"), y a los extremos, 38 mm (1 1/2"); se recomienda colocar los clavos manualmente, con ayuda de un martillo.

Inmediatamente después de ensayar cada probeta se debe proceder a extraer muestras de la madera, para determinar el contenido de humedad y la densidad de cada uno de los maderos.

El CIB-W-18, así como el comité RILEM, están en espera de publicar otros documentos relacionados con el muestreo de los especímenes y el análisis de los datos experimentales para obtener valores característicos.

3.2.2.1.5. INFORME

El informe debe incluir los cálculos recomendados por la RILEM, así como los descritos a continuación por el ASTM:

- 1) Para cada probeta debe obtenerse la carga de falla, la carga promedio y una evaluación estadística de los ensayos.
- 2) Una descripción completa del método de prueba.

y del procedimiento de carga

- 3) Una descripción de los especímenes, que incluya las dimensiones de la madera, el tamaño de los clavos, sus separaciones y sus distancias a bordes y extremos
- 4) Número de ensayos
- 5) Peso específico y contenido de humedad de la madera
- 6) Detalles explicatorios en caso de cualquier desviación de los métodos prescritos o recomendados por comités u organismos internacionales
- 7) Detalles de cualquier factor no incluido que pueda ser significativo en los resultados

3.2.3. ESTABLECIMIENTO DE ACCIONES Y RESISTENCIAS NOMINALES

La determinación de las acciones y resistencias nominales se debe basar en información estadística de observaciones o de pruebas estandarizadas. Además, para la determinación de las acciones nominales es necesario fijar niveles probabilísticos que dependan de la naturaleza de la carga, del estado límite considerado, y de la importancia de la estructura.

La información estadística obtenida para la resistencia nominal debe ser modificada para tratar de representar las condiciones reales de la unión, como parte de la estructura. Además, se deben fijar niveles probabilísticos de los resultados experimentales, que dependen del estado límite considerado. Para estados límite de capacidad máxima el nivel probabilístico va del 1 al 10% (Se recomiendan generalmente 5%, con un 75% de nivel de confianza

za, para muestras estadísticas). Para estados límite de deformación, el valor especificado corresponde al valor promedio de los resultados experimentales.

3.2.4. OBTENCIÓN DE FACTORES DE CARGA Y RESISTENCIA

Los factores de carga deben tomar en cuenta la variabilidad de las cargas, su distribución en el espacio, y las deficiencias en la evaluación de los efectos de las cargas.

Para uniformar el diseño, se recomienda utilizar los valores de los factores de carga dados en el Título IV del Reglamento del Distrito Federal.

Los factores de resistencia deben tomar en cuenta el comportamiento estructural de la unión y las incertidumbres en la predicción de la resistencia. La obtención de los factores de resistencia deben proporcionar índices de seguridad constantes.

3.2.5. ESTABLECIMIENTO DE INDICES DE SEGURIDAD Y FACTORES DE RESISTENCIA

3.2.5.1. INTRODUCCION AL METODO DE SEGUNDOS MOMENTOS

Para establecer índices de seguridad y factores de resistencia en uniones clavadas es necesario conocer su comportamiento estructural, en base a desarrollos semi-probabilísticos. Para lograrlo, el método de segundos momentos es el que se ha considerado como el más adecuado para las estructuras de madera (refs. 25 y 26).

Al usar el método de segundos momentos, el comportamiento estructural debe ser expresado en términos de valores promedio y desviaciones estándar (o varianzas) de las variables; además, el método tiende a penalizar, por medio de factores de seguridad muy elevados, a las situaciones que presentan un alto grado de variabilidad. En las uniones clavadas es de gran mérito tratar de utilizar este método, debido a su gran variabilidad, y a que la información obtenida ha sido orientada a la predicción de reglas seguras de diseño. Ahora se necesita reexaminar la información para tratar de predecir su comportamiento junto con su variabilidad.

Cuando todas las formas del comportamiento de las uniones clavadas hayan sido estudiadas con suficiente profundidad para predecir la capacidad de carga en términos del promedio y la varianza, el problema de la resistencia quedaría resuelto.

Las solicitaciones de diseño deberán ser las mismas que las utilizadas en estructuras de otros materiales. En aquellos casos donde se presenten solicitaciones diferentes, éstas deberán ser examinadas en la misma forma que las resistencias, y se obtendrá el promedio y la varianza de las cargas máximas que puedan actuar durante la vida útil de la estructura.

En los siguientes párrafos se da una breve descripción del método de segundos momentos (ref. 25) para presentar un panorama que sirva para establecer las bases de un formato de estados límite en uniones clavadas.

3.2.5.2. METODO PROBABILISTICO DE SEGUNDOS MOMENTOS

En el método de segundos momentos se utiliza de desarrollos probabilísticos aplicados a la ingeniería estructural, para la creación de formatos de reglamentos de estados límite.

La expresión "segundos momentos" se refiere a que sólo se utilizan como medidas de incertidumbre el valor promedio y la desviación estandar. La descripción completa de una variable aleatoria por su función de densidad de probabilidad es imposible determinarla con los datos con que se cuenta. (ref. 26).

El método de segundos momentos llamado también de primer orden, porque hace aproximaciones de primer grado sobre cantidades de orden superior.

El método de segundos momentos da como resultado un valor característico de la seguridad, conocido como índice de confiabilidad o seguridad β . Deben establecerse reglas de diseño que proporcionen un índice de seguridad constante.

La forma exponencial que se expone a continuación fué originada por Cornell (ref. 26). El desarrollo se basa en el efecto de las cargas U y de las resistencias R . La falla ocurre cuando la resistencia R es menor que el efecto de la carga U . Si se grafica la función de densidad de probabilidades de $\ln(R/U)$, la zona de falla se alcanza cuando el $\ln(R/U) < 0$ (fig. 17). Esto es válido sin importar la forma de la distribución de R y U (refs. 6 y 12). El promedio y la varianza de $\ln(R/U)$ se aproximan

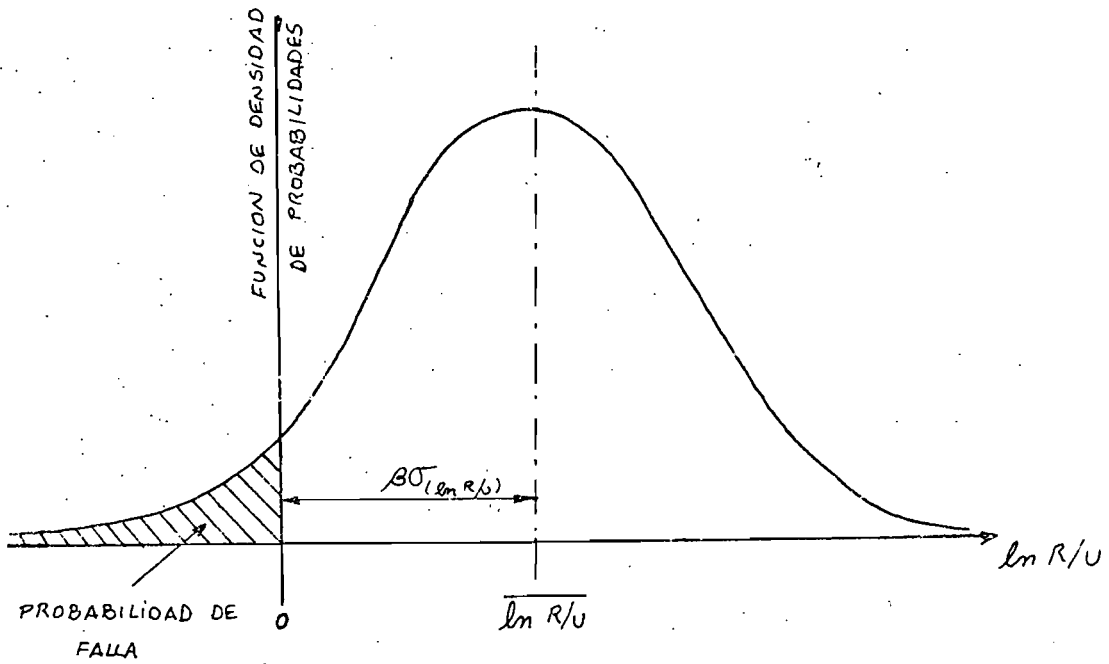


FIGURA 17. Definición de índice de seguridad, β .

por: $\overline{\ln(R/U)} = \ln(\bar{R}/\bar{U})$

$$\sigma^2(\ln(R/U)) = \sigma^2(\ln(R)) + \sigma^2(\ln(U))$$

La seguridad se cuantifica por el número de desviaciones estándar menos el promedio de $\ln(R/U)$; cuando sea mayor a cero. El criterio de seguridad establece que $\overline{\ln(R/U)}$ menos β veces la desviación estándar sea mayor que cero.

$$\beta \sigma(\ln(R/U)) = \overline{\ln(R/U)}$$

$$\beta = \overline{\ln(R/U)} / \sigma(\ln(R/U))$$

$$\beta = \overline{\ln(R/U)} / (\sigma^2(\ln R) + \sigma^2(\ln U))^{1/2}$$

El coeficiente de variación V es la relación entre la desviación estándar y el promedio. Usando esta definición y las aproximaciones antes mencionadas, se tiene:

$$\beta = \frac{\overline{\ln(R/U)}}{(V_R^2 + V_U^2)^{1/2}}$$

$$\beta = \frac{\ln(\bar{R}/\bar{U})}{(V_R^2 + V_U^2)^{1/2}}$$

Esto implica que el índice de seguridad β , es una función sencilla del promedio y la varianza de las cargas y las resistencias.

Se debe observar que la seguridad es una medida de la diferencia entre el promedio de la función logarítmica R/U y cero, en términos de su desviación estándar. El cociente R/U es el factor de seguridad que corresponde a la falla, (si $\ln(R/U) = 0$ significa que $R/U = 1$ lo que implica que $R = U$, o sea falla inminente). A esa diferencia se le llama índice de seguridad.

Se podría concluir que para establecer reglas de diseño basta conocer el promedio y la varianza

de U y R, para poder fijar los índices de confianza, pero se ha visto que éstos no son consistentes, y que varían con algunas de las variables de diseño (refs. 8, 18 y 25).

La expresión del índice de seguridad presenta limitaciones por el hecho de que únicamente incluye dos variables, la carga y la resistencia; en muchas ocasiones las variables no pueden ser clasificadas fácilmente.

Existen trabajos (ref. 25) que proponen una generalización para cualquier número de variables.

3.2.5.3. CALIBRACION DE RESULTADOS

Para poder establecer índices de seguridad y factores de resistencia constantes en normas de estados límite para uniones clavadas, deben realizarse estudios comparativos entre los resultados obtenidos experimentales y los obtenidos por otros investigadores y códigos vigentes que funcionen en forma satisfactoria, teniendo cuidado sobre las bases en que se fundamente cada código.

Por medio de calibraciones se establecerá un índice de resistencia constante, que no produzca cambios drásticos respecto a las normas vigentes, durante una etapa de transición a las normas de estados límite en uniones clavadas.

Para establecer factores de resistencia constantes, Madsen (ref. 18) utiliza un percentil de la resistencia para un índice de seguridad seleccionado; el valor del factor de resistencia es casi constante con variaciones de \pm 10 por ciento. Por ello

no dependerá del coeficiente de variación V_R .

Madsen recomienda, para el establecimiento de estados límite, obtener índices de seguridad y factores de resistencia constantes.

4. FORMATO DE REGLAMENTO DE ESTADOS LIMITE EN UNIONES CLAVADAS

4.1. REQUISITOS GENERALES

Todas las uniones clavadas deben ser diseñadas y construidas, en forma tal, que presente un comportamiento adecuado durante su vida útil. Las uniones deben resistir tanto las cargas producidas por el procedimiento constructivo, como las que actúen durante su uso.

4.2. ESTADOS LIMITE

Los estados límite establecidos en uniones clavadas son: estados límite de servicio y estados límite de resistencia última.

Se presenta un estado límite de servicio cuando las deformaciones relativas de la unión exceden el valor de 0.4 mm, bajo cargas normales de uso.

Se presenta un estado límite de resistencia última cuando se inicia en la unión un comportamiento plástico, ya sea, en los clavos, o en la madera o en ambos simultáneamente.

4.3. REVISION DE LA SEGURIDAD Y EL COMPORTAMIENTO

Para revisar cada uno de los estados límite en uniones clavadas se recomienda utilizar las cargas, combinaciones de carga y factores de carga establecidos por el Título IV del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

4.4. CONFIGURACION DE LA UNION

- (1),(2)- La capacidad de transmisión de carga en una unión con clavos y con cualquier otro tipo de dispositivo de unión, es menor que la suma de las capacidades individuales de cada uno de ellos. Además, se debe considerar la diferencia de sus rigideces.
- (3) - La forma de la unión, el tamaño, las distancias y espaciamientos de los clavos a los bordes y extremos de la madera, se diseñaran para que se obtenga la resistencia esperada.
- (4) - La longitud de penetración del clavo en los elementos de unión debe satisfacer los valores mínimos estipulados.

4.5. DISEÑO DE LA UNION

4.5.1. RESISTENCIA A CARGA LATERAL

- La capacidad de carga resistente a fuerzas laterales en una unión con clavos, N_{ru} , debe ser mayor o igual que el efecto de las cargas multiplicadas por el factor de carga correspondiente.
- La capacidad de carga al deslizamiento en una unión con clavos, N_{rs} , debe ser mayor o igual que el efecto de las cargas de servicio.
- La capacidad de carga resistente a fuerzas laterales, N_{ru} , y la capacidad de carga al deslizamiento, N_{rs} , en clavos hincados en dirección perpendicular a las fibras de la madera, se definen como:

$$N_{ru} = F_r K_{cu} N_u N$$

$$N_{rs} = F_r K_{cs} N_s N$$

(6) Fr es el factor de reducción obtenido según la cláusula 3.2.5, Kcu y Kcs son parámetros que dependen de la duración de la carga, del tratamiento retardante al fuego, del contenido de humedad, del espesor de los elementos de unión, de la configuración de la conexión, de la dirección de hincado de los clavos con respecto a las fibras de la madera, y de otros factores más. Nu y Ns son la capacidad básica última y la capacidad básica de servicio respectivamente, obtenidas en forma experimental y basadas en las cláusulas 3.2.2.1 y 3.2.5.2. N es el número de clavos que componen la unión.

- La resistencia de uniones con diferentes tipos de madera se debe basar en la que tenga las propiedades mecánicas mas desfavorables.

4.5.2. RESISTENCIA A LA EXTRACCION

- (5)
- Para clavos hincados en dirección paralela a las fibras de la madera, sometidos a fuerzas de extracción, no se debe considerar capacidad alguna para transmitir carga.
 - No se permite el uso de los clavos a extracción, excepto para soportar cargas de viento o sismo.
 - La cabeza de los clavos sometidos a fuerzas de extracción debe ser capaz de resistir esas fuerzas.
 - La carga resistente a la extracción en una unión clavada, Nre, debe ser mayor o igual, que el efecto de las cargas factorizadas.
 - La resistencia a la extracción por milímetro de penetración del clavo, cuando es hincado perpendicularmente a la dirección de las fibras, se define como:

$$Nre = Fr Kce Ne Ip N$$

- (7) Fr es el factor de reducción obtenido según la cláusula 3.2.5, Kce es un parámetro que depende del contenido de humedad, del tratamiento retardante al fuego, del efecto de remache de la punta del clavo, de la inclinación de hincado con respecto a las fibras, de la geometría del clavo, etc.; Ne es la capacidad básica obtenida en forma experimental basada en las cláusulas 3.2.2.1 y 3.2.5.2. Ip es la longitud de penetración del clavo en el miembro principal.

OBSERVACIONES

- 1) Gran cantidad de investigaciones realizadas en otros países ha sido orientada a determinar si la capacidad de una unión clavada depende del número de clavos que la conforman. En 1966, Mack (ref. 16) reportó un factor de reducción de 0.94 para la capacidad unitaria en uniones con 12 clavos. El código alemán DIN 1052 especifica que los valores básicos unitarios de diseño se reduzcan en un 10% por cada 10 clavos de la unión. El código danés DS 413 indica una reducción del 33% en los valores básicos unitarios de diseño cuando existen más de 10 clavos en cada fila en la dirección de aplicación de la carga. En Holanda el código NEN 3852 especifica reducciones del 10% por cada 10 clavos en la unión. El código inglés CP-112 no indica nada referente a reducciones por el número de clavos. El código U.S.A. especifica que la capacidad de una unión es directamente proporcional al número de clavos que la forman. En 1967, Lantos (ref.17) concluyó que en uniones con veinte clavos por fila, las reducciones en capaci-

dad unitaria no son importantes (menores del 5%). Brock, en Inglaterra, y Stoy en Alemania, llegan a la conclusión de que la capacidad de carga en una unión es proporcional al número de clavos. La CIB-Structural Timber Design Code propone una reducción de 1/3 para los clavos que se excedan de 10. La ecuación propuesta es:

$$N_{ef} = 10 + (2/3)(n-10)$$

- 2) El CIB-Structural Timber Design Code señala que si la carga es transmitida por clavos en combinación con pernos, tornillos, pijas para madera o conectores, la carga resistente de diseño para cada conector debe ser reducida en un tercio. Cuando se utilicen clavos en combinación con adhesivos, en las que difieren en forma significativa su comportamiento estructural, se deben considerar que trabajan en forma independiente y no sumar sus capacidades de carga.
- 3) Son necesarios ciertos espaciamientos mínimos entre clavos, así como distancias a bordes y extremos para evitar o reducir al mínimo las rajaduras en la madera que puedan alterar la resistencia de la unión. Estos espaciamientos y distancias dependen en alto grado del tipo de madera usada. Por lo tanto, no es de sorprender que las separaciones difieran de un reglamento a otro.
- 4) Para lograr un comportamiento adecuado, en donde no se altere la resistencia de la unión, se han establecido espesores mínimos de los elementos de unión, que varían de unos reglamentos a otros.
- 5) Las pruebas experimentales han indicado que se pierde hasta un 75% de la resistencia a la extracción por la relajación de las fibras de la madera (ref. 17). Además, la resistencia es muy errática.

- 6) Se ha visto que los factores que influyen en el comportamiento de la madera también influyen en el comportamiento de la unión. Algunos de estos factores son: el efecto de la duración de la carga, ya que generalmente la madera transmite mayores cargas si se aplica en períodos cortos de tiempo; el efecto producido por los tratamientos retardantes al fuego, los cuales disminuyen en un 90% la capacidad de la madera (ref. 7); el contenido de humedad de la madera en condiciones de servicio, incrementándose la resistencia cuando la madera está con bajos contenidos de humedad. Además, existen otros factores producidos por la dirección de hincado de los clavos respecto a las fibras de la madera. Cuando los clavos se colocan en dirección paralela a las fibras su resistencia disminuye al 67% de la obtenida al colocar el clavo perpendicularmente a las fibras; si se colocan inclinados con respecto a las fibras su resistencia se reduce en un 83%, siempre y cuando sean satisfechos ciertos requisitos, fig. 16 (refs. 5, 7 y 22). Además, si la punta del clavo es remachada después de atravesar la unión, se incrementan resistencia y rigidez. Brock (ref. 3) observó que la resistencia básica de las uniones clavadas sometidas a fuerzas laterales esta en función de la densidad de la madera y el diámetro del clavo.
- 7) La resistencia básica a la extracción N_e es función de la densidad de la madera y del diámetro del clavo. En clavos inclinados con respecto a las fibras de la madera sometidos a fuerzas de extracción, que cumplan ciertos requisitos, fig. 16 (refs. 5 y 7), su resistencia se puede considerar como el 67% de la obtenida al colocar el clavo perpendicularmente a las fibras.

A P E N D I C E A

A.1. TEORIA DE MOELLER PARA PREDECIR LA CARGA ULTIMA EN UNIONES - CLAVADAS.

Moeller desarrolló unas expresiones para uniones en cortante simple y en cortante doble, las hipótesis en las que se basan estas expresiones son:

Se supone la misma resistencia a compresión, F_e , de la madera bajo el clavo, para todos los miembros que forman la unión.

De la Figura A1(a), tenemos que $t_2 = \alpha t_1$, donde $\alpha > 1$, de éste modo, la carga última, F_u , cuando el clavo no ha alcanzado su momento de fluencia, como se muestra en la Figura A1 (a), puede ser determinada por:

A1 a

$$F_u = C P_u t_1 \quad \dots (g)$$

Donde:
$$C = \frac{1}{2} \left[\sqrt{3\alpha^2 + 2\alpha + 3} - (1 + \alpha) \right] \quad \dots (h)$$

Para $\alpha = 1.0$, tenemos que $c = 0.414$, y la ecuación (g) es válida. Sin embargo, para $\alpha = 3.0$, tenemos $c = 1.0$ y

$$F_u = t_1 \cdot F_e \cdot dn \quad \dots (i)$$

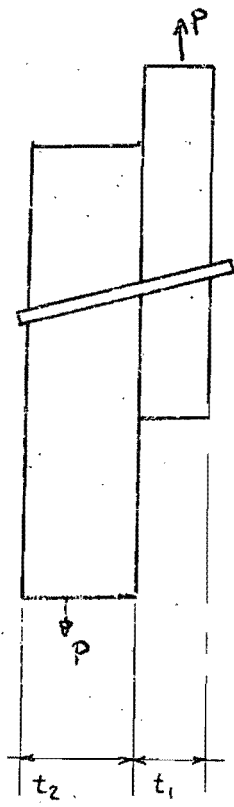
Este es el caso, cuando ocurre la falla en el miembro de dimensión t_1 , como se muestra en la Figura A1 (b).

La dimensión t_1^* , cuando el momento de fluencia en el clavo y la resistencia a compresión de la madera bajo el clavo son alcanzados simultáneamente, es:

$$t_1^* = \frac{2}{\alpha - c} \sqrt{\frac{S_p f_y}{dn F_e}} \quad \dots (j)$$

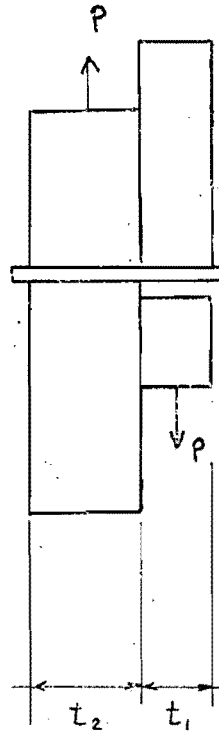
cuando $t_1 < t_1^*$ la falla depende de F_e y tenemos que:

$$F_u = c t_1 F_e dn \quad \dots (k)$$



$$t_2 = \alpha t_1$$

(a)



$$t_2 \geq 3t_1$$

(b)

FIG. A1. UNIONES EN CORTANTE SIMPLE.
TIPOS DE FALLAS CARACTERISTICAS

cuando $t_1 > t_1^*$, la falla se presenta en el clavo y tenemos:

$$F_u = \frac{F_e \cdot d_n \cdot t_1}{3} \left[\sqrt{4 + \frac{12 \cdot M y_2}{F_e d_n t_1}} - 1.0 \right] \dots (l)$$

El tipo de falla en este caso, se ilustra en la Fig. A2

En el caso en el que $t_1 > 3.414 \sqrt{\frac{S_p f_y}{d_n f_e}} \dots (m)$

La falla se presenta en el clavo simultáneamente en ambos miembros. (Fig. A3).

En el caso de diferentes materiales en los miembros de unión, la relación entre ellos, para sus valores de resistencia a compresión bajo el clavo, serán:

$$F_{e_2} = \beta F_e, \dots (n)$$

entonces las ecuaciones serán para la carga última, F_u de la siguiente forma:

a) Cuando la falla se presenta en los miembros de unión, y no en el clavo.

$$F_u = c' \cdot t_1 \cdot F_{e_1} d_n \dots (o)$$

donde: $c' = \frac{\sqrt{\beta + 2\beta^2 + 2\alpha^2 \beta^2 + \alpha^2 \beta^3} - (1 + \alpha) - \beta}{1 + \beta} \dots (p)$

Para $c' \leq 1.0$ cuando la falla ocurre únicamente en el miembro de dimensión t_1 y para $c' \leq \alpha B$ cuando la falla ocurre únicamente en el miembro de dimensión t_2 .

b) Cuando el momento de fluencia del clavo se presenta en el miembro de dimensión t_2 .

$$() \dots F_u = \frac{B}{2 + \beta} F_{e_1} \cdot d_n \cdot t_1 \left[\sqrt{\frac{2(1 + \beta)}{B} + \frac{4(2 + \beta)}{B} \cdot \frac{M y_2}{F_{e_1} d_n \alpha t_1}} - 1 \right]$$

c) Cuando el momento de fluencia del clavo es alcanzado únicamente en el miembro de dimensión t_1 .

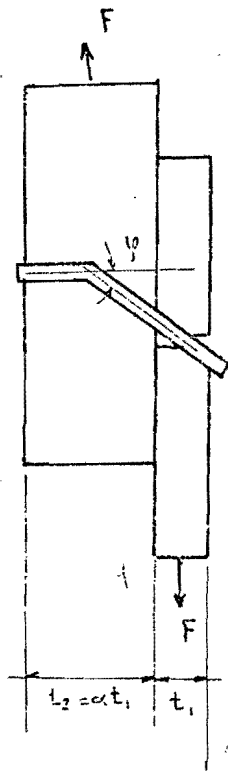


FIG.A2. EL ESFUERZO DE FLUENCIA SE PRESENTA EN EL MIEMBRO DE DIMENSION MAYOR.

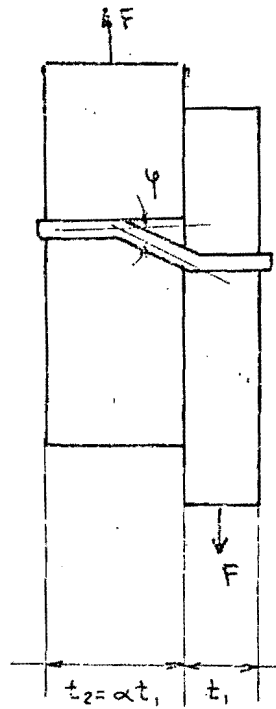


FIG.A3 EL MOMENTO DE FLUENCIA DEL CLAVO OCURRE EN AMBOS MIEMBROS.

d) Cuando el momento de fluencia del clavo es alcanzado si -
multáneamente en ambos miembros,

$$F_u = \frac{2}{1+B} \sqrt{\frac{B}{1+B}} M_y F_{e1} d_n \dots (r)$$

El mínimo espesor de los miembros, t_1^* y t_2^* , requerido para al-
canzar el momento de fluencia en ambos miembros respectivamen-
te, son dados por las siguientes ecuaciones:

$$t_1^* = 2 \left(1 + \sqrt{\frac{\beta}{1+\beta}} \right) \sqrt{\frac{S_p f_y}{d_m \cdot F_{e1}}} \dots (s)$$

$$t_2^* = \frac{2}{\beta} \left(\sqrt{\beta} - \sqrt{\frac{\beta}{1+\beta}} \right) \sqrt{\frac{S_p f_y}{d_m \cdot F_{e1}}} \dots (t)$$

CORTANTE DOBLE.

MOELLER propusó las siguientes expresiones aplicables sólo para
uniones simétricas con igual espesor entre los miembros latera-
les entre sí, y teniendo los tres miembros resistencias a com-
presión bajo el clavo iguales, y siendo:

t_m = espesor del miembro intermedio y t_{la} = espesor de los -
miembros laterales (de cada uno).

Bajo la hipótesis de que el clavo permanece rígido, la falla -
ocurre en el mismo interno, y su capacidad de carga última, F_u ,
es:

$$F_u = t_m F_{e1} d_n \dots (u)$$

$$\text{Bajo } t_m < 2t_{la} \dots (v)$$

La falla ocurrirá en los miembros laterales, si $t_{la} < t_m/2$, y -
su capacidad de carga última será:

$$F_u = 2t_{la} F_{e1} d_n \dots (w)$$

Los tipos de falla esperados son mostrados en la Figura A4.

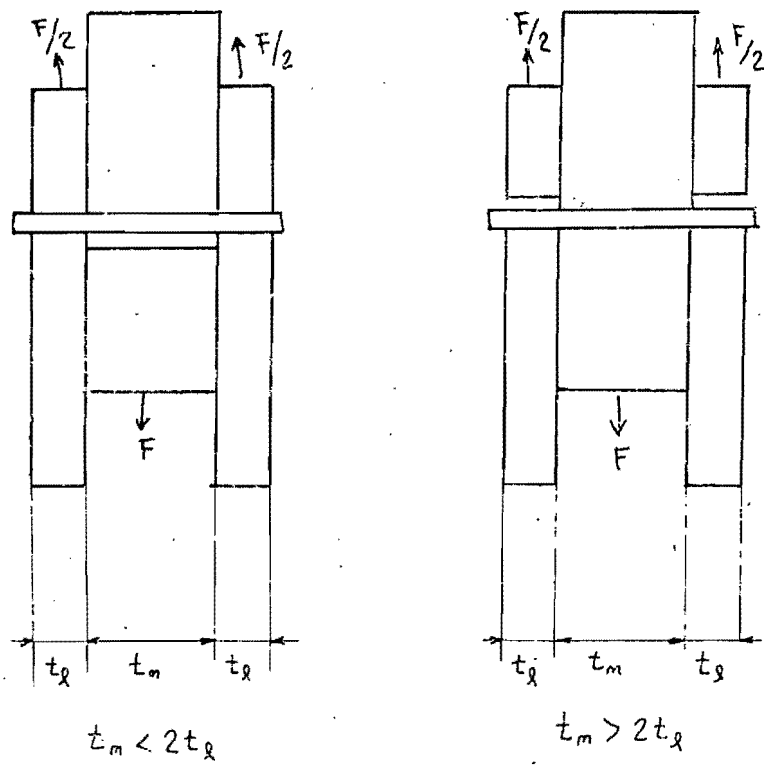


FIG. A4 UNIONES EN CORTANTE DOBLE.
 TIPOS DE FALLAS ESPERADOS.

REFERENCIAS:

1. American Society for Testing and Materials. "Standard definitions of terms relating to nails for use with wood and wood-base materials". ANSI/ASTM Standard F, pág. 547 a 577. Philadelphia, Pennsylvania. 1977.
2. American Society for Testing and Materials. "Standard Methods of Testing Mechanical Fasteners in Wood". ANSI/ASTM Standard D 1761-77. Philadelphia, Pennsylvania. 1977
3. Brock, G.R. "The behaviour of nailed joints under long term and short duration loading". Simposio Internacional sobre uniones en estructuras de madera, Proceedings. Londres. 1965.
4. Centeno, J.C. "Resistencia mecánica y esfuerzos de diseño para uniones clavadas con madera tropicales de la Región Andina". Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Mérida, Venezuela. 1981.
5. CIB "Structural Timber Design Code. W-18. 5a. edición. 1980.
6. Canadian Standards Association. "Guidelines for the Development of Limit States Design". Rexdale, Ontario, Canadá, 1981.
7. Ehlbeck, J. "Nailed joints in wood structures". Virginia Polytechnic Institute and State University, Wood Research and Wood Construction Laboratory. Blacksburg, Virginia. 1979.
8. Foschi, R.O. "A discussion on the application of the safety index concept to wood structures". Canadian Journal of Civil Engineering, Volumen 6, número 1, 1979. Páginas 51 a 58.

9. Johansen, K.W. "Theory of timber connections". International Association of Bridge and Structural Engineering. publicación 9. 1949. Copenhagen, pág. 249 a 262.
10. Keenan, R., "Improved design of fastening in timber structures based on limit states design procedures", informe No. 1817211. Canadian Forestry Service, Dept. of the Environment, Quebec. 1982.
11. Kuenzi, E. W., "Theoretical Design of a nailed or bolted joint under lateral load". USDA Forest Products Laboratory. Informe No. D1951, Madison, Wisconsin.
12. Kuipers, J. "Determination of allowable loads on joints; introduction of limit state design". ...
13. Larsen, H.J. "The yield load of bolted and nailed joints". IUFRO-5 Conferences , Pretoria.
14. Mack, J.J. "The grouping of species for the design of timber joints with particular application to nailed joints". CSIRO. Division of Building Research Technical paper No. 26 Melbourne, Australia, 1978.
15. Mack, J.J. "The strength of nailed timber joints". CSIRO Division of Forest Products Technological paper No. 9 Melbourne, Australia, 1978.
16. Mack, J.J. "The establishment of lateral working loads for nailed joints for Australian conditions", CSIRO Division of Building Research, Technical paper No. 30, Melbourne, Australia, 1978.
17. Mack, J.J. "The withdrawal resistance of plain steel nails and screws in Australian timbers", CSIRO Division of Building Research, Technical paper No. 27, Melbourne, Australia, 1979.

18. Madsen, B. "Discussion of limit states pertaining to CSA-C86". CSA-C86 Code Coritee Members, Vancouver, British Columbia, Canadá, 1982.
19. Nasani, N.J. "Research report on nail-joints in timber structures". Part III. The Forest Research Institute, Dehra Dun and The National Buildings Organization. Nueva Delhi.
20. Morris, E.N., "An analysis of the load-slip curve for nailed joints and the effects of moisture content", Journal of the Institute of Wood Science. Volumen 5, páginas 3 a 9.
21. Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. "Diseño y Construcción de estructuras de madera", No. 404, UNAM, 1977.
22. Propuesta de Código de Estados Límite para Madera para Canadá (borrador) Marzo 8, 1983.
23. RILEM. 3-TT Committee. "Testing Methods for Joints with Mechanical Fasteners in Load-Bearing Timber Structures" Joint Committee RILEM/CIB-3TT. Testing Methods of Timber, Paris, 1979.
24. Sección de Madera del "Ontario Bridge Code".
25. Sexsmith, R.G., "Limit States Design workshop". Timber Engineering and Limit States Design. Ottawa, Canadá. 1975.
26. Sexsmith, R.G., "Limit States Design for Wood", Environment Canadá Forestry Directorate. Western Forest Products Laboratory. Vancouver, B.C. Canadá, 1976.
27. Sexsmith, R.G., "Proposed limit states design format for wood structure". Western Forest Products Laboratory. Technical Report No. 7, Vancouver, B.C.

Canadá, 1979.

28. Siimes, P.E., F.E. Johanson, y E. Niskanen. "Investigations on the ultimate embedding stress and nail holding power of Finnish pine". The State Institute for Technical Research, Tiedoltus, Helsinki (resumen en inglés).
29. Wagner, M.F. "Un aporte para racionalizar el diseño de uniones estructurales clavadas en madera". Universidad de Chile. Informe 47. Santiago, Chile. 1980.
30. Wilkinson, T.L. "Theoretical lateral resistance of nailed joints", Journal of the Structural Division. Proceedings ASCE. Septiembre 1972. páginas 2005 a 2013.
31. Wilkinson, T.L. "Analysis of Nailed Joints with Dissimilar Members". Journal of the Structural Division. Proceedings ASCE. Mayo 1971, páginas 1381 a 1398.
32. Stern, E.G. "Plain shank vs. fluted vs. threaded nails". Virginia Polytechnic Institute and State University. Wood Research and Wood Construction Laboratory. Bulletin No.27, Blacksburg, Virginia.
33. Canadian Wood Construction. Nails, Spikes and Staples. Canadian Wood Council. Ottawa, Canadá.
34. Hetenyi, M. "Beams on elastic foundation". University press. Ann Arbor, Mich., 1946. pp 50 a 53.
35. Stluka, R.T., "Theoretical design of a nailed or bolted joint under load". Tesis presentada a la Universidad de Wisconsin, Madison, Wisconsin. 1960.
36. McLain, T.E. "Curvilinear load-slip relations in laterally loaded nailed joints". Dept. of Forest and Wood Sciences. Fort Collins, Colorado. 1975.