

21  
2ej



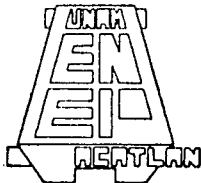
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

Escuela Nacional de Estudios Profesionales  
"ACATLAN"

MADERA LAMINADA: UNA ALTERNATIVA EN EL  
DISEÑO ESTRUCTURAL

T E S I S  
Que para obtener el Título de  
INGENIERO CIVIL  
p r e s e n t a  
ROLANDO REYES GRECO



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Acatlán, Edo. de México

1990



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 está 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.

## CONTENIDO

|   | PAGINA |
|---|--------|
| 1. ANTECEDENTES   | 1      |
| 2. INTRODUCCION   | 16     |
| 3. MATERIA PRIMA  | 24     |
| 3.1 ESPECIES DISPONIBLES                                      | 26     |
| 3.2 PROPIEDADES DE LA MADERA ESTRUCTURAL                      | 31     |
| 4. FABRICACION  | 52     |
| 4.1 ASERRIO   | 52     |
| 4.2 ESTUFADO  | 61     |
| 4.3 SELECCIONADO  | 70     |
| 4.4 PRE-ENGOMADO  | 84     |
| 4.5 ENGOMADO Y PRENSADO                                       | 89     |
| 4.6 ACABADOS  | 99     |
| 4.7 TRANSPORTE Y MONTAJE                                      | 106    |
| 5. PROPIEDADES MECANICAS                                      | 107    |
| 5.1 ANTECEDENTES  | 107    |
| 5.2 COMPORTAMIENTO EN FLEXION                                 | 110    |
| 5.3 PRUEBAS DE LABORATORIO                                    | 113    |
| 6. DISEÑO; NORMAS Y REGLAMENTOS                               | 123    |
| 6.1 CONSIDERACIONES GENERALES                                 | 123    |
| 6.2 ESFUERZOS BASICOS   | 130    |
| 6.3 FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA DE<br>VIGAS DE MADERA | 134    |
| 6.4 PROPUESTA DE DISEÑO                                       | 161    |
| 6.5 PROCEDIMIENTO GENERAL DE DISEÑO A FLEXION                 | 183    |
| 7. PROYECTO ESPECIFICO REAL                                   | 188    |
| 7.1 ASPECTOS GENERALES  | 188    |
| 7.2 DISEÑO MEDIANTE ELEMENTOS DE MADERA LAMINADA              | 195    |
| 7.3 DISEÑO MEDIANTE ELEMENTOS DE ACERO                        | 216    |
| 7.4 RESUMEN DE RESULTADOS DEL DISEÑO                          | 244    |
| 7.5 COMPARACION DE ALTERNATIVAS                               | 248    |
| 8. CONCLUSIONES   | 250    |
| 9. BIBLIOGRAFIA   | 263    |

**INDICE DE GRAFICAS.**

| NO. | CONCEPTO   | PAGINA |
|-----|--|--------|
| 3.1 | Relación entre humedad relativa, temperatura del aire y equilibrio de contenido de humedad.                                | 33     |
| 3.2 | Porcentajes de contracción de la madera.   | 37     |
| 3.3 | Variación de algunas propiedades de resistencia de la madera de acuerdo al contenido de humedad.                           | 40     |
| 3.4 | Variación de algunas propiedades de la madera con respecto a la densidad.  | 42     |
| 3.5 | Deformaciones de dos sistemas de piso en madera y en acero, expuestos al fuego.  | 48     |
| 4.1 | Contenido de humedad en equilibrio para diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa.                          | 67     |
| 6.1 | Influencia de la duración de la carga.   | 136    |
| 6.2 | Curvas que relacionan los esfuerzos de flexión y módulos de elasticidad con la relación de momentos de inercia $I_k/I_g$ . | 149    |
| 6.3 | Valores probables de la relación $I_k/I_g$ .   | 150    |



**INDICE DE TABLAS.**

| NO.  | CONCEPTO  | PAGINA |
|------|---|--------|
| 3.1  | Recursos forestales en coníferas y latifoliadas.  | 28     |
| 3.2  | Especies coníferas disponibles en México y su utilización.                                | 29     |
| 4.1  | Cantidades de humedad convenientes para distintos usos de la madera.                      | 61     |
| 4.2  | Clasificación de adhesivos para la madera.  | 91     |
| 4.3  | Clasificación de los adhesivos por su resistencia a diferentes condiciones de exposición. | 92     |
| 4.4  | Adhesivos para diferentes condiciones del ambiente a las que se verán expuestos.          | 93     |
| 4.5  | Cantidades de adhesivo a utilizar en las juntas de madera laminada.                       | 96     |
| 4.6  | Preservador para madera.  | 102    |
| 6.1  | Factores de carga según las NTC/EM.   | 139    |
| 6.2  | Factores de contenido de humedad según NTC/EM.  | 140    |
| 6.3  | Factores de contenido de humedad según NFFA.  | 141    |
| 6.4  | Factores de tamaño de elementos laminados.  | 145    |
| 6.5  | Factor de ajuste para viguetas de madera.   | 146    |
| 6.6  | Factor de junta de vigas de madera laminada.  | 148    |
| 6.7  | Factores de reducción por pendiente del grano.  | 152    |
| 6.8  | Valores de $lc/l_0$ utilizados en pandeo lateral.   | 158    |
| 6.9  | Cargas vivas según RCDF.  | 163    |
| 6.10 | Factores de resistencia de la madera.   | 165    |
| 6.11 | Esfuerzos básicos según NTC/EM.   | 167    |
| 6.12 | Esfuerzos básicos finales para diseño a flexión.  | 167    |
| 6.13 | Factores que afectan los esfuerzos básicos.   | 168    |
| 6.14 | Contraflechas recomendadas para vigas de madera laminada.                                 | 185    |
| 7.1  | Madera aserrada para uso en elementos laminados.  | 196    |
| 7.2  | Propiedades de las secciones.   | 196    |

| NO. | CONCEPTO   | PAGINA |
|-----|--|--------|
| 7.3 | Tabla de diseño para secciones H/I/Cajón de acero en compresión.     | 219    |
| 7.4 | Tabla de diseño para cualquier sección de acero en compresión.       | 221    |
| 7.5 | Fuerzas en los elementos de una armadura tipo con claro de 13.0 mts. | 234    |
| 7.6 | Fuerzas en los elementos de una armadura tipo con claro de 6.80 mts. | 241    |

INDICE DE FIGURAS.

| NO.  | CONCEPTO   | PAGINA |
|------|--|--------|
| 2.1  | Disposición de las laminaciones en elementos de madera laminada.                                   | 19     |
| 3.1  | Esquema de un corte de madera.   | 25     |
| 3.2  | Contracciones que sufre la madera.   | 36     |
| 3.3  | Efectos de contracción de la madera.   | 37     |
| 3.4  | Sección de una columna de madera laminada expuesta al fuego.                                       | 49     |
| 4.1  | Estufa para madera comunmente utilizada en México.   | 66     |
| 4.2  | Relación entre el contenido de humedad y el espesor de una pieza de encino.                        | 69     |
| 4.3  | Relación entre los cambios dimensionales de una pieza de encino secada en estufa.                  | 69     |
| 4.4  | Area total de una pieza de madera.   | 73     |
| 4.5  | Zonas adyacentes a los cantos de una pieza de madera.  | 73     |
| 4.6  | Area del nudo y Area del nudo en la zona adyacente.  | 74     |
| 4.7  | Pendiente del grano de una pieza de madera.  | 75     |
| 4.8  | Gema o arista faltante en una pieza de madera.   | 75     |
| 4.9  | Ataque de insectos y agujeros de larva.  | 76     |
| 4.10 | Bolsas de resina.  | 76     |
| 4.11 | Distorsión del hilo.   | 77     |
| 4.12 | Rajadura.  | 77     |
| 4.13 | Curvatura de la madera por deformaciones en sus diferentes planos, ocasionados por mal secado.     | 78     |
| 4.14 | Tipos de empalmes utilizados en madera laminada.   | 86     |
| 4.15 | Localización de los empalmes en una viga de madera laminada.                                       | 87     |
| 4.16 | Viga con juntas laterales.   | 87     |
| 4.17 | Diferentes posibilidades de corte de las tablas en función de la dirección de los anillos anuales. | 88     |
| 4.18 | Colocación de las tablas en el miembro laminado de acuerdo a la orientación de las fibras anuales. | 89     |
| 4.19 | Sistema de prensado de vigas de madera laminada.   | 97     |
| 4.20 | Tratamiento de la madera laminada.   | 101    |
| 5.1  | Ejes de simetría elástica de la madera.  | 107    |
| 5.2  | Comportamiento de la madera a tensión y compresión.  | 109    |

| NO.  | CONCEPTO  | PAGINA |
|------|---|--------|
| 5.3  | Comportamiento a flexión de la madera laminada.   | 110    |
| 5.4  | Distribución de esfuerzos a flexión en el rango elástico.   | 111    |
| 5.5  | Distribución de esfuerzos correspondiente a la deformación plástica de las fibras a compresión en un elemento sujeto a flexión. | 112    |
| 5.6  | Prueba de flexión estática.   | 115    |
| 5.7  | Flexión dinámica ( Impacto ).   | 115    |
| 5.8  | Compresión paralela al grano.   | 116    |
| 5.9  | Compresión perpendicular al grano.  | 117    |
| 5.10 | Medición de la dureza.  | 117    |
| 5.11 | Cortante paralelo al grano.   | 118    |
| 5.12 | Tensión paralela al grano.  | 119    |
| 5.13 | Tensión perpendicular al grano.   | 119    |
| 5.14 | Equipo utilizado en México para pruebas de flexión estática de madera de pino estructural.                                      | 121    |
| 6.1  | Respuesta de la estructura y estados límite.  | 128    |
| 6.2  | Gráficas para la obtención del factor de tamaño.  | 145    |
| 6.3  | Fandeo lateral por flexotorsión.  | 154    |
| 6.4  | Variación de los esfuerzos de flexión con el factor de esbeltez $C_s$ .   | 160    |
| 6.5  | Restricción del tamaño de los nudos.  | 166    |
| 6.6  | Consideración sobre el efecto del cortante cerca de los apoyos de la viga.  | 180    |
| 6.7  | Condiciones para el incremento de $f_c$ .   | 182    |
| 7.1  | Propuesta de distribución de columnas.  | 188    |
| 7.2  | Distribución de elementos principales, secundarios y áreas tributarias.   | 189    |
| 7.3  | Factores de presión para elementos secundarios, con pendiente de cubierta menor que $30^\circ$ .                                | 191    |
| 7.4  | Elemento en la posición más desfavorable ante las presiones del viento.   | 192    |
| 7.5  | Área tributaria de diseño de un elemento secundario.  | 200    |
| 7.6  | Viga tipo para diseño de elementos principales.   | 208    |
| 7.7  | Representación gráfica de la resistencia de miembros de acero a flexión. ( NTC-RCDF )   | 224    |
| 7.8  | Sección de cuerdas y diagonales de las armaduras.   | 232    |

| NO.  | CONCEPTO  | PAGINA |
|------|---|--------|
| 7.9  | Armadura tipo para un claro de 13.0 mts.                    | 233    |
| 7.10 | Sección de cuerdas superiores en armadura tipo de 13.0 mts. | 236    |
| 7.11 | Armadura tipo para un claro de 6.8 mts.                     | 240    |
| 7.12 | Sección de cuerdas superiores en armadura tipo de 6.8 mts.  | 242    |
| 7.13 | Vigas laminadas secundarias y principales.                  | 244    |
| 7.14 | Distribución de largueros y armaduras.                      | 245    |
| 7.15 | Armadura tipo A.  | 246    |
| 7.16 | Armadura tipo B.  | 247    |

## 1. ANTECEDENTES.

Actualmente, el uso de la madera en la construcción se ha incrementado debido a que se ha comprobado que es un material excepcional, tanto en acabado como por sus capacidades estructurales y que la colocan en competencia con otros elementos afines.

La madera, en alguna forma, ha sido utilizada por el hombre como material primario en la construcción desde tiempo inmemorial. Por ejemplo, en vivienda, cuando el hombre dejó el abrigo natural de las cavernas y comenzó a construirlo en los lugares que le agradaban, el material de más fácil adquisición era, sin lugar a dudas, la madera.

El tipo de uso que tiene la madera varía de una región a otra y está cambiando con el tiempo. Las estructuras de tronco han sido comunes en muchas zonas; puntales de madera como soporte para tiendas de cuero, tela u hojas han sido usados por diferentes culturas, particularmente las de tipo nómada, debido a su facilidad de transporte.

A la vez que el hombre se ha hecho más sofisticado, ha variado el uso de la madera en sus abrigos. El hombre moderno, en algunas zonas, continúa usando gran cantidad de madera en sus viviendas, pero ahora tiene una variedad de formas para su adquisición, las cuales han resultado de los

avances tecnológicos. Tiene además una considerable preparación científica que le permite usarla con una eficiencia estructural mayor, con una protección más efectiva contra el frío y el calor y con mayor efectividad en su protección contra elementos destructivos, como son el fuego, hongos, insectos y las condiciones ambientales. Sin embargo, en muchos países existe todavía una considerable preocupación en el uso de la madera.

La utilización de la madera en la fabricación de casas es muy común en Canadá y Estados Unidos. Una casa típica, por ejemplo, tiene una estructura de soporte de madera aserrada de 2 pulgadas de grueso nominal, llamada comunmente "madera dimensional". Los bastidores o estructura de trabajo utilizan alrededor de 2/3 de la madera aserrada de una casa típica; el resto va en pisos, cubiertas exteriores y otros.

Grandes avances se han tenido en el campo de la construcción de vivienda de madera en estos países. Por ejemplo, las casas tipo "Nu-Frame", donde se buscan continuamente nuevas formas de su utilización con una eficiencia estructural mayor, mediante sistemas que forman los marcos de pared y sus cubiertas, armaduras de elementos dobles, etc.

La información sobre el uso de la madera en la construcción en los países en desarrollo es difícil de

obtener. En algunos países, por ejemplo, los nativos todavía construyen casas típicas asentadas sobre postes o rollizos verticales, con piso y techo de madera. La construcción típica en otros lugares es del tipo viga-columna, con construcciones del tipo rollizo en algunos casos. Las armaduras del techo son básicamente de madera.

Queda bien definido que uno de los usos más importantes de la madera es en la construcción de vivienda. Sin embargo, en la mayoría de los países no se ha avanzado en este ramo.

Dentro de la construcción en México, el uso que se le da a la madera es muy variado. Se tiene por ejemplo, en pisos, donde se utilizan especies con una serie de requisitos y tratadas previamente de tal manera que presenten propiedades tales como belleza, dureza adecuada, buena estabilidad, acabado agradable, etc. También, se utiliza en la fabricación de puertas y ventanas. En closets y cancelería también es usual encontrarla.

El uso de la madera en cimbres es también muy importante. Se utiliza en losas, castillos, columnas, trabes, etc, con elementos tales como polines, vigas, tablas, tarimas, barrotes y tablonés, entre otros.



Ahora, es también importante mencionar en este capítulo que existen factores que han frenado el uso de la madera en la construcción. Los principales son:

a. Falta de promoción e información de los nuevos productos con y para la madera; hace falta desarrollar técnicas mercadológicas en sus diferentes aspectos de comercialización, ventas y difusión hacia los constructores, las instituciones y el usuario. Es importante que, en cuanto al renglón de difusión, organismos tales como los colegios de profesionales actualicen los conocimientos de nuevas técnicas y materiales entre sus agremiados a través de conferencias, películas técnicas, visitas a obras y edición de publicaciones. Se deberán establecer contactos con instituciones de enseñanza superior para brindar información que permita actualizar los planes de estudio.

b. Otro gran factor que frena el desarrollo de la construcción de madera se relaciona con las compañías aseguradoras. El alto valor de las tasas de interés aplicadas por estas compañías a este tipo de construcciones por desconocer el material, las hacen inaccesibles e incosteables.

c. Un gran problema que se ha venido presentando es que la utilización de los recursos forestales hacia la industria de la construcción, se ha ajustado a técnicas y

procedimientos sumamente restringidos, en relación con su industrialización. Hasta hace algunos años, el desarrollo tecnológico para la producción de mejores materiales para la construcción, hizo que los tradicionales procedimientos constructivos para techos, resueltos a base de vigas de madera rolliza o viga de madera aserrada, se vieran disminuidos; además, la explotación forestal se redujo a unas cuantas autorizaciones debido a la conservación irracional de bosques nacionales. Esto provocó poca inversión en activos fijos de las industrias forestales y como consecuencia la nula adquisición de tecnología.

La industria forestal, por muchos años, no estuvo acorde con el desarrollo general del país. La creciente utilización de otros materiales y procedimientos constructivos hizo que los precios de la madera aumentaran hasta llegar a ser los más altos del mundo. La producción forestal, entonces, ajustaba apenas para surtir las necesidades de madera para fabricar triplay, muebles y cimbra para concreto.

En los últimos años, el gobierno, con el firme propósito de mejorar el manejo de los bosques nacionales, ha creado organismos oficiales que reglamentan la extracción y comercialización de productos forestales. Además, a través de centros especializados, ha iniciado estudios tendientes a promover la madera en sus formas más convenientes.

Uno de los problemas relevantes en México es el de la vivienda popular de beneficio social. Contando con un recurso renovable que es el bosque, autoridades e industriales forestales convinieron en crear un organismo que agrupará a las instituciones y personas que directa o indirectamente estaban ligadas a resolver el problema de la habitación, uniendo esfuerzos que anteriormente estaban dispersos, para tratar de resolver el problema mediante una alternativa más: la casa construida con madera. El organismo mencionado es el Consejo Nacional de la Madera en la Construcción (COMACO).

Dado que la vivienda es uno de los renglones más deficitarios en el país, la madera puede permitir, una vez dominada la tecnología, construir a más bajo costo y a una velocidad notablemente superior a la tradicional mampostería.

A través de COMACO se ha propiciado, en relación a la construcción con madera, un cambio de ideas y de mentalidades en la población del país. Se puede indentificar como un ejemplo de alianza para la producción, en virtud de que en su estructura administrativa y de apoyo, participan dependencias nacionales, asociaciones industriales, empresas privadas, asociaciones profesionales y centros de investigación.

Los objetivos que COMACO se ha fijado y que pueden ser de utilidad en la promoción e información sobre el uso de la madera son:

- a. Promover la madera en la construcción.
- b. Elaborar normas, manuales y reglamentos para su aplicación.
- c. Promover de una manera más efectiva la instalación de industrias dedicadas a la fabricación de componentes, viviendas completas y otros elementos a base de madera.
- d. Realizar programas de capacitación para la formación de obreros, técnicos y profesionales.
- e. Auspiciar y promover el intercambio y la colaboración con instituciones, centros de investigación, empresas, industriales, etc., de México y de otras naciones, que tienen mayor experiencia en la construcción de madera.

En los últimos años, COMACO ha venido realizando esfuerzos en los siguientes aspectos importantes:

- a. Un programa de vivienda progresiva, en donde por su versatilidad, la construcción a base de elementos de madera es idónea, porque permite que, a partir de un modelo básico habitacional, los usuarios puedan ampliarla, terminarla o mejorarla sin problemas de

tecnología sofisticada. Para el caso de vivienda, los procedimientos tradicionales a base de mampostería son muy lentos, pudiéndose sustituir con elementos de madera, cuyo procedimiento de construcción es tres veces más rápido. En casos de pre-fabricación de madera, el procedimiento se puede acelerar aun más, lo que representa el abatimiento de costos, de gastos indirectos y de financiamiento.

- b. Realización de gestiones ante la Comisión Nacional Bancaria y de Seguros, instituciones financieras, organismos públicos y privados, para lograr que en las construcciones con elementos de madera, las tasas y primas de seguros de riesgo contra incendio y condiciones crediticias, valoricen razonablemente.
- c. Incorporación de la construcción de vivienda con madera, a los planes y programas tendientes a resolver el problema habitacional. Para este propósito, el establecimiento de normas constituye un elemento básico, y esta labor se realiza a través del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Vivienda de Interés Social con Elementos de Madera.
- d. A nivel internacional se ha solicitado información a la ONU, FAO, UNIDO.

En Estados Unidos, se mantiene un intercambio con los siguientes organismos:

- National Forest Products.
- Gypsum Association, Underwriters Laboratories INC.
- Division of Agricultural Science, Universidad de California.
- American Plywood Association.
- Department of Housing and Urban Development.
- American Institute of Timber Construction.
- Trauss Plate Institute.
- Department of Agriculture.
- American Society of Civil Engineers.
- American Wood Preserves Association.

En el Reino Unido, se mantiene contacto con:

- International Research Development Council.
- British Standards.
- Timber Research and Development Association.

Cabe mencionar, sin duda, que el primer requisito para abordar programas de aplicación de la madera en la construcción es que el país cuente con este recurso renovable.

México tiene una superficie forestal arbolada de 30 millones de hectáreas cubiertas por bosques y selvas con características que las pueden hacer susceptibles de utilización. No se incluyen las selvas bajas que están constituidas principalmente por arbustos, matorrales y chaparrales. La superficie forestal incluyendo la arbolada, arbustiva, la herbácea, y la que no tiene vegetación, suma más de 130 millones de hectáreas.

Los recursos forestales del país son suficientes para hacer frente a una demanda por el uso de madera en la construcción. Comparando nuestra superficie forestal con otros países tradicionalmente exportadores, México cuenta con el doble de superficie forestal que Suecia o Finlandia; sin embargo, si estuviéramos en condiciones de conducir un adecuado aprovechamiento sobre estas 30 millones de hectáreas, indiscutiblemente produciríamos lo suficiente para llenar estos requerimientos de construcción de habitación y quizá podríamos ser exportadores.

Ahora, por circunstancias vistas anteriormente, México tiene un consumo de productos forestales maderables, en lo particular, muy bajo. Se deberá brindar un apoyo más firme a los dueños y poseedores de los recursos forestales, para que participen en la producción forestal. Habrá que organizarlos, capacitarlos y enseñarles a ser silvicultores;

además, otorgarles el financiamiento para que puedan participar.

Otra problemática importante del sector forestal es que esta actividad se realiza en los lugares más comunicados, más alejados, en lo alto de las sierras, en la selva insalubre, con caminos en muy mal estado, con poca gente que quiera trabajar en estas condiciones, con una notable falta de infraestructura. Generalmente, los que participan en la actividad forestal son los que tienen que realizar esta infraestructura. Esto hace que en la producción gravite un alto costo social y termine con un alto costo en la madera ya elaborada.

La mayor parte de la superficie forestal es fundamentalmente de pequeños propietarios. Hay un pequeño porcentaje de terrenos nacionales. La distribución de este recurso natural, a lo largo del país, refiriéndonos a los bosques, se encuentra a lo largo de la Sierra Madre Occidental y de la Sierra Madre Oriental, el Macizo Forestal de Chihuahua, Durango, con sus partes en Sonora, Sinaloa, y un poco en Zacatecas.

Otra zona de importancia forestal es el Eje transversal neo-volcánico, o sea, la cordillera volcánica, que viene desde Jalisco y atraviesa el país por los estados del centro: Michoacán, México, Morelos, Puebla y Veracruz.



En la Sierra Madre del Sur se encuentran importantes superficies arboladas. Los bosques tropicales, o sea, las selvas, particularmente las altas y las medianas que son las de mayor importancia económica, se encuentran en la península de Yucatán, en partes importantes de Chiapas y del estado de Oaxaca. Menores superficies, aunque también de importancia, se encuentran en el sur de Veracruz, del Golfo de México y del Pacífico. Incluso llega a haber algunas especies tropicales hasta en Sinaloa.

Para poder explotar esta riqueza, nos hace falta infraestructura caminera. Buena parte de los recursos no pueden ser aprovechados porque no hay caminos, no hay facilidades para establecer otras industrias. Hace falta energía eléctrica de las características requeridas. Hay que capacitar también a más personas dedicadas a esta actividad.

Los problemas inherentes a la madera en México han hecho que en los últimos años, solamente el 7.2% del PIB del país correspondió a los productos de madera, fabricación de muebles, papel, imprenta y editorial. De este porcentaje, el 2.1% correspondió a la industria de la madera y corcho, el 1% a aserraderos, conservación y preparación de la madera. El 0.2% a la fabricación de triplay, chapas de madera, tableros aglomerados y de fibra, y, a la fabricación de otros productos, el 1% restante.

Ante esta problemática, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos decidió apoyar al sector forestal de la siguiente manera:

- Al poseedor de recursos, capacitándolo y organizándolo para que él sea quien trabaje y aproveche el bosque, a manera de eliminar al contratista.

- Se ha modificado en forma sustancial el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, dotándolo de mayores recursos financieros. Sus programas contemplan la solución de los problemas más relevantes del país. El instituto se ha descentralizado en ocho centros regionales, en lugar de un gran instituto central. Cuentan con toda la infraestructura para la investigación.

Finalmente, de acuerdo a la problemática analizada en la industria forestal, los esfuerzos que se deben hacer con los siguientes:

a. Planear, conforme a los lineamientos oficiales, bajo las normas técnicas que garanticen no solo la conservación, sino también el incremento del recurso.

b. Organizar y llevar a cabo el racional e integral aprovechamiento de los recursos forestales existentes en los

bosques de propiedad nacional, ejidal, comunal o de pequeños propietarios en diferentes zonas de la República.

c. Impulsar la industrialización de los productos obtenidos de la explotación de los bosques.

d. Realizar toda clase de actos jurídicos para el cumplimiento de los objetivos mencionados.

e. Adquirir toda clase de bienes inmuebles, instalaciones y maquinaria y equipos necesarios.

f. Promover la construcción y conservación de los caminos necesarios para la explotación forestal.

g. Realizar los desmontes que para fines agropecuarios autoricen las dependencias oficiales dentro de zonas señaladas.

h. Establecer viveros y zonas de forestación y reforestación. Ejecutar los trabajos permanentes y sistemáticos para proteger los bosques contra incendios, plagas, enfermedades, y para evitar la erosión de los suelos.

i. Ejecutar, dentro de la zona que se opere, los trabajos necesarios para la protección de las cuencas hidrológicas

superiores, con objeto de disminuir el azolve de embalses y cauces.

j. Colaboración con dependencias oficiales, para mantener al día el inventario de los bosques de las zonas en que se opere.

k. Promover la divulgación de los conceptos de valor y utilidad del recurso forestal en la vida económica de la nación.

l. Colaborar con organismos científicos en la investigación.

m. Tratar de que los beneficios de esta industria se canalicen hacia los propietarios y poseedores de los bosques, propiciando el desarrollo y comercio de los productos forestales, lo que contribuye a elevar el nivel de vida de la población rural y del estado en general.

## 2. INTRODUCCION.

Los materiales laminados son utilizados en la ingeniería en volúmenes crecientes y cada vez en más diversos campos, por las siguientes razones:

a. Combinan las propiedades de sus partes componentes para obtener propiedades compuestas que son nuevas o únicas.

b. Es más fácil y económico obtener ciertas propiedades que no poseen los materiales " sólidos ". Por ejemplo, el comportamiento de los metales térmicos depende de la combinación de diferentes metales; la resistencia del vidrio debe su valor a la combinación de ciertos materiales; el concreto debe su resistencia a la combinación de cemento, agregados y agua.

La laminación, para incrementar las propiedades de los materiales o de combinar varios materiales en uno no es nuevo, pero la rápida expansión de este principio en una gran variedad de diferentes aplicaciones es relativamente reciente. Representa algo nuevo en el campo de los materiales.

Los ejemplos más antiguos de algunos materiales laminados, incluyen los de madera laminada y el triplay, considerados frecuentemente como nuevos. Por ejemplo, se

encontró en Thebas una pieza egipcia muy antigua de madera laminada, y que pertenece a la 18a dinastía (aproximadamente 1500 AC). En la parte inferior del elemento hay 5 piezas delgadas de madera laminada pegadas a una pieza más pesada. Existen también fragmentos de madera laminada pertenecientes a la 3a dinastía ( 2780 AC ), que antecede por 1200 años a la pieza anterior. También los romanos utilizaban el triplay para su mueblería fina. El incremento del uso de la madera laminada y su aplicación en la ingeniería estructural, sin embargo, es un fenómeno reciente.

El uso de elementos estructurales a base de madera laminada tuvo sus inicios formales en la primera década del siglo XX, en Europa, donde se desarrolló la construcción de elementos a base de madera suave, laminada y pegada con adhesivos primitivos.

Posteriormente, en Estados Unidos, de acuerdo con experimentos realizados en los Laboratorios de Productos Forestales de Madison, Wisc. se construyó para el mismo, un edificio formado por arcos laminados con gran éxito. A partir de esa época y principalmente durante la 2a Guerra Mundial, la edificación a base de elementos estructurales de este tipo ha tenido un auge importante. Por ejemplo, el mayor incentivo para el establecimiento de madera laminada en Inglaterra, surgió precisamente durante los años inmediatos de pos-guerra por la escasez de estructuras de

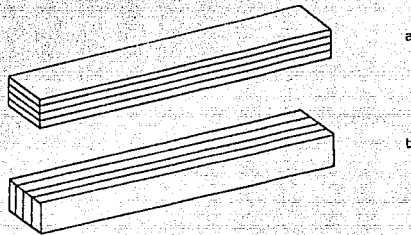
acero y por la urgencia que entonces existía de reparar los daños causados por la acción enemiga. Fue en este periodo cuando en diferentes países, principalmente en Europa, la madera laminada fue usada para propósitos estructurales. Desde entonces, la industria ha ido en creciente desarrollo y la madera laminada ha sido utilizada para la construcción de escuelas, estancias, bibliotecas, iglesias, etc.

Sin embargo, hasta hace no muchos años, la información de las propiedades y resistencia de la madera laminada era escasa, y últimamente se han venido desarrollando pruebas en diferentes laboratorios ( esencialmente fuera de México ) para poder diseñar de una manera segura y óptima este tipo de elementos.

En México, han existido algunos intentos de construcción mediante estos elementos estructurales, pero en forma esporádica, y no se ha generalizado su utilización debido a los problemas inherentes de la industria forestal comentados en el capítulo anterior.

El término madera laminada se refiere a una forma de construcción en el que un número de laminaciones son dispuestas paralelamente al eje del miembro, en donde cada elemento comprime las laminaciones, siendo unidas con las fibras aproximadamente paralelas y pegadas para formar un miembro con funciones de una unidad simple estructural. Las

laminaciones en este tipo de miembros generalmente son referidas como laminaciones horizontales en contraste con aquellas en miembros donde las laminaciones corren en ángulos rectos referidos a un plano neutral, y son conocidas como laminaciones verticales. ( FIG 2.1 )



a) Laminaciones horizontales.

b) Laminaciones verticales.

FIG 2.1: Disposición de las laminaciones en elementos de madera laminada.

La laminación introduce una medida de libertad en el diseño de la madera y su fabricación. Permite la selección del material en un miembro para lograr una mayor resistencia y una bella apariencia, permitiendo la colocación de menos materiales deseables en posiciones donde son suficientes.

Los adhesivos utilizados en madera laminada permiten un uso más económico de la madera. Debido a que las



laminaciones son delgadas ( generalmente no exceden de dos pulgadas ) las leyes que gobiernan la selección de tablas son usualmente menos rígidas que aquellas que se aplican cuando la madera aserrada se usa directamente para fines estructurales.

Los adhesivos utilizados permiten que las tablas cortas puedan ser eficientemente pulidas y unidas a una serie de laminaciones que pueden formar prácticamente estructuras de cualquier tamaño, sección y perfil.

La construcción con madera laminada permite al ingeniero y arquitecto diseñar una viga o un arco que sea al mismo tiempo práctico y artístico, en donde la sección varía a través de su longitud de acuerdo a los esfuerzos requeridos, sin rebasar los esfuerzos permisibles.

Las grandes dimensiones de los miembros de madera laminada la hacen considerablemente más resistente que arcos o vigas de piezas individuales de madera diseñadas para la misma carga. Estas secciones de madera laminada, dado su bajo peso, pueden ser montadas con labor local, sin plantas muy caras, en lugares donde algunas formas de construcción más pesadas no se pueden emplear.

Debido a que las laminaciones tienen espesores pequeños, estas pueden secarse fácilmente a un determinado

contenido de humedad antes de su uso, satisfaciendo de esta manera los requerimientos de humedad que deben tener las estructuras de madera; además, el secado toma un tiempo relativamente corto, mientras que los elementos sólidos requieren semanas o meses para alcanzar una estabilidad de humedad.

Sin embargo, existen algunas desventajas en el uso de elementos estructurales a base de madera laminada:

a. El engomado y prensado de los elementos generalmente elevan los costos finales del producto terminado, en ocasiones por encima del de los miembros sólidos.

b. En construcciones en donde la madera verde puede ser utilizada, más tiempo se requiere en cortar, secar y hacer la laminación, que el que se utiliza en cortar la madera verde.

c. Debido a que gran parte de la eficiencia estructural del producto laminado, depende de la resistencia de las juntas engomadas, el proceso de laminación requiere equipo especial, plantas y procesos de fabricación que no se necesitan en elementos de madera verde.

d. Debido a las operaciones de fabricación que se requieren en la producción de miembros laminados, en comparación con

miembros sólidos, se deberá tener más cuidado en cada operación para asegurar un producto de alta calidad.

Las estructuras de madera laminada tienen un uso muy variado. Los arcos de madera laminada, de sección variable, incrementando su anchura en la base, han sido utilizados en proyectos de gimnasios, edificios industriales, donde se pueden dar grandes claros sin ningún tipo de obstrucción y considerable carga. Algunos arcos también han sido construídos con secciones " I " de madera.

Las vigas de madera laminada han encontrado considerable aceptación en la construcción de iglesias; se logran buenos efectos arquitectónicos. Algunas armaduras curvas de madera laminada se han usado frecuentemente en granjas y en algunos edificios comerciales. Por ejemplo, durante la Segunda Guerra Mundial, los hangares de aviones empleando arcos de madera laminada en varias formas fueron muy utilizados.

Las estructuras de madera laminada para aplicaciones exteriores son menos comunes, pero algunos puentes están compuestos en parte de madera laminada.

Por otro lado, la construcción de barcos y navíos ofrece un campo promisorio para la utilización de la madera laminada, en donde se ha demostrado un incremento

considerable en la resistencia y en las uniones comparado con otras juntas mecánicas comúnmente utilizadas.

En México, como se comentaba anteriormente, ya se han hecho algunos intentos de fabricación de elementos estructurales a base de madera laminada. Por ejemplo, el estadio de Puebla, con un claro de 60 mts; la cubierta del hotel Sol Caribe en Cozumel; algunos puentes, muelles o estructuras industriales. Sin embargo, el mayor uso que se le ha dado es en construcciones pequeñas a nivel residencial, y también algunas aplicaciones en iglesias, pequeños gimnasios y centros comerciales.

En el presente trabajo se expondrá en forma conjunta, las etapas para la elaboración de estos elementos estructurales, incluyendo el análisis de las especies disponibles y sus propiedades, el aserrio, estufado, seleccionado, pre-engomado, engomado y prensado, acabados, transporte y montaje. Se mostrará el comportamiento a flexión de vigas rectas laminadas, los aspectos que rigen su diseño y las normas y reglamentos existentes. Se propondrá una metodología de diseño y se aplicará en un proyecto específico real. Se realizará un estudio comparativo con otro sistema estructural.

### 3. MATERIA PRIMA.

A diferencia de muchos materiales de construcción, la madera no es un material elaborado, sino orgánico, que generalmente se usa en estado natural.

Los árboles, cuya madera se emplea en la construcción, se clasifican en dos grupos, los de madera blanda y los de madera dura; éstos tienen hojas más anchas, las cuales caen al piso en el invierno. Pertenecen al grupo de las angiospermas ( sus óvulos se encuentran encerrados en un saco especial, hermético ). Son característicos de este grupo los encinos y los arces. En cambio, los de madera blanda pertenecen al grupo de las gimnospermas. Sus hojas son rara vez anchas, permanecen verdes durante el invierno y tienen parecido a agujas. Los árboles de madera blanda son los más comunes para utilizarse como elementos estructurales, y se les conoce también como coníferas, caracterizados por el agrupamiento de sus órganos reproductores en conos. La especie más utilizada es el pino.

Los árboles que se utilizan para obtener madera son exógenos, es decir, aumentan de tamaño creando madera en la superficie exterior debajo de la corteza.

La sección transversal de un árbol se muestra a continuación: ( FIG 3.1 )

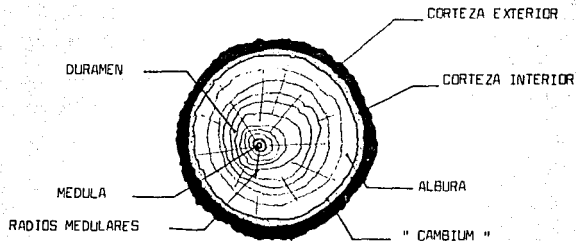


FIG 3.1: Esquema de un corte de madera.

La sección muestra los anillos de madera nueva que se forman anualmente. Estos anillos se llaman anillos anuales, formados con capas de color claro y otras de color oscuro, correspondiendo el anillo claro al leño que se desarrolla en la primavera de cada año y el de color oscuro en el verano. El número de anillos anuales en la base de un árbol indica su edad. La banda de anillos anuales en el borde exterior del tronco se conoce con el nombre de albura. Esta banda es de color claro; contiene células vivas y conduce la savia de las raíces a la hoja. Conforme el árbol envejece, la albura cambia gradualmente a duramen. Este es más denso y da resistencia al tronco del árbol, además, es más resistente y más durable que la albura, pero, si la madera se va a tratar con preservadores, la albura es útil por ser absorbente.

La estructura de los árboles está constituida por haces longitudinales de fibra leñosa o celdas. Estas pequeñas fibras huecas varían de forma y de disposición, lo cual influye tanto en la apariencia como en las propiedades

físicas de las diferentes especies. Bandas más pequeñas de fibras, llamadas radios medulares, se extienden radialmente desde el centro del tronco y ayudan a mantener unida la estructura.

### 3.1 ESPECIES DISPONIBLES.

De acuerdo a los resultados de las últimas investigaciones hechas en México por la Cámara Nacional de la Industria Forestal, en coordinación con datos de la Dirección General de Normatividad de la SARH, el patrimonio forestal mexicano de superficie arbolada lo constituyen cerca de 30 millones de hectáreas de las cuales 19.293 millones corresponden a especies de clima templado y frío, y el resto son de clima tropical y subtropical.

De la superficie del bosque de clima templado y frío, el 66.4% lo forman fundamentalmente especies coníferas y el restante 33.6% especies latifoliadas. En los bosques de clima tropical y subtropical, el 82.3% corresponden a selvas medianas y el restante 17.7% a selvas altas.

Se calcula que la existencia total en bosques de clima templado y frío es del orden de 1563 millones de metros cúbicos, de los cuales 1255.6 son de bosques de coníferas. De éstos, 868.9 millones se encuentran en bosques con más de

50 m<sup>3</sup> por hectárea, y el resto, con existencias inferiores a esta cantidad.

La mayor cubierta forestal corresponde a los bosques de clima templado y frío, en donde el 65% se localiza en la Sierra Madre Occidental con un total de 12.54 millones de hectáreas. En orden de importancia le siguen la Sierra Neovolcánica con 2.8 millones de hectáreas, en seguida la Sierra Madre del Sur con 2.112 millones, la Sierra Madre Oriental con 1.188 millones, el estado de Chiapas con 0.528 millones y la península de Baja California, con 0.33 millones de hectáreas.

La mayor superficie forestal se localiza en el estado de Chihuahua que dispone de 4.16 millones de hectáreas, seguido de Durango con 3.83 millones. Esta región boscosa es la que aporta el mayor incremento anual de coníferas en el país. En Durango, por ejemplo, 3 millones de hectáreas boscosas están en posibilidad de producir al año un mínimo de 2.3 millones de m<sup>3</sup> de madera en rollo.

La distribución de los recursos forestales en coníferas y latifoliadas se muestra a continuación: ( TABLA 3.1 )



| ENTIDAD      | SUP. ARBOLADA (Ha) | EXISTENCIAS EN M3 (ROLLO) |
|--------------|--------------------|---------------------------|
| Chihuahua    | 4 161 080          | 230 524 000               |
| Durango      | 3 830 675          | 245 632 995               |
| Oaxaca       | 2 150 000          | 116 096 220               |
| Guerrero     | 1 218 225          | 227 340 000               |
| Michoacán    | 2 266 400          | 163 365 600               |
| Jalisco      | 1 067 200          | 87 743 050                |
| Chiapas      | 1 005 900          | 101 099 000               |
| Resto País   | 4 593 574          | 319 352 131               |
| <b>TOTAL</b> | <b>19 293 574</b>  | <b>1 563 152 996</b>      |

TABLA 3.1: Recursos forestales en coníferas y latifoliadas.

Las principales especies que satisfacen la demanda de la industria de la construcción pertenecen a los bosques de clima templado y frío, especialmente las coníferas, en diferentes pináceos y encinos.

Los estudios realizados sobre los recursos silvícolas muestran que los bosques de México permiten una producción anual, permanente y sin deteriorar el recurso, de 43.2 millones de m<sup>3</sup> de madera; sólo aprovechamos el 20.9% de

nuestro potencial forestal. Lo anterior nos lleva a afirmar que se cuenta con volúmenes ilimitados de madera.

Para el uso de madera estructural, especialmente en madera laminada, en Estados Unidos y en Europa, se utilizan tanto especies duras como blandas. En México, se utiliza madera blanda para fines estructurales, la cuál proviene básicamente de bosques de regiones de clima frío y templado. Este tipo de bosques se desarrollan en altitudes que varían entre 1500 y 3500 mts sobre el nivel del mar.

La siguiente tabla muestra las especies coníferas disponibles en México y su utilización en diferentes productos: ( TABLA 3.2 )

| ESPECIE             | 1  | 2  | 3  | 4 | 5  | 6 |
|---------------------|----|----|----|---|----|---|
| Abies duranguensis  | x  | x  |    | x |    | x |
| Abies hickelii      | x  | x  |    | x |    | x |
| Abies oaxacana      | x  | x  |    | x |    | x |
| Abies religiosa     | x  | x  |    | x |    | x |
| Cupressus arizonica | x  |    |    | x |    | x |
| Cupressus benthami  | x  |    |    | x |    | x |
| Cupressus linleyi   | x  |    |    | x |    | x |
| Juniperus patoniana | x  |    |    | x |    | x |
| Pinus arizonica     | xx | xx | xx | x | xx | x |
| Pinus ayacahuite    | x  | xx | xx | x | x  | x |

|                                 |               |     |             |    |    |    |
|---------------------------------|---------------|-----|-------------|----|----|----|
| <i>Pinus cooperi</i>            | XX            | II  | II          | II | II | II |
| <i>Pinus chihuahuana</i>        | X             | II  | X           | II | II | X  |
| <i>Pinus douglasiana</i>        | XX            | II  | II          | II | II | II |
| <i>Pinus duranguensis</i>       | III           | XX  | XX          | X  | XX | X  |
| <i>Pinus engelmannii</i>        | III           | XX  | XX          | II | XX | II |
| <i>Pinus hartwegii</i>          | X             | X   | II          | II | II | X  |
| <i>Pinus herrerae</i>           | III           | X   | II          | X  | X  | II |
| <i>Pinus lawsonii</i>           | X             | II  | II          | II | II | II |
| <i>Pinus leiophylla</i>         | II            | II  | II          | II | II | II |
| <i>Pinus michoacana</i>         | II            | X   | II          | X  | II | II |
| <i>Pinus montezumae</i>         | II            | II  | X           | II | II | II |
| <i>Pinus ochoterenae</i>        | II            | II  | X           | II | II | II |
| <i>Pinus ocarpa</i>             | II            | II  | X           | II | II | X  |
| <i>Pinus patula</i>             | XX            | III | III         | II | II | X  |
| <i>Pinus pseudostrobus</i>      | III           | XX  | XX          | II | II | X  |
| <i>Pinus ponderosa</i>          | XX            | III | X           | II | X  | X  |
| <i>Pinus reflexa</i>            | X             | II  | II          | II | II | II |
| <i>Pinus rudis</i>              | II            | X   | II          | II | II | X  |
| <i>Pinus strobus chiapensis</i> | II            | II  | II          | II | X  | X  |
| <i>Pinus tenuifolia</i>         | XX            | XX  | XX          | II | X  | X  |
| <i>Pinus leucete</i>            | X             | X   | II          | II | II | II |
| <i>Pseudotsuga spp</i>          | X             |     |             | II |    | X  |
| 1. PRODUCTOS ASEKADOS           | 2. CHAPA      |     | 3. TRIPLAY  |    |    |    |
| 4. FOSTERIA                     | 5. MOLBURADOS |     | 4. TABLEROS |    |    |    |

TABLA 3.2: Especies coníferas disponibles en México y su utilización.

Para estructuras de madera, en especial para elementos de madera laminada, se usan las siguientes especies de pino:

a. *Pinus ponderosa*, que se encuentra como especie de 1er grupo ( clasificada según importancia en volumen y frecuencia ) en Baja California Norte.

b. *Pinus duranguensis*, que se encuentra como especie de 1er grupo en Chihuahua, Durango y Sonora.

c. *Pinus douglasiana*, que se encuentra como especie de 2o grupo en Colima, Jalisco, y Michoacán.

Una de las razones porque se utilizan estas especies es por su importancia en volumen en algunos estados de la República; además, sus propiedades, recientemente estudiadas en México, muestran un comportamiento estructural óptimo y eficiente, similar al de algunas especies sumamente estudiadas en Estados Unidos, como la yellow pine y la douglas fir, por ejemplo.

### 3.2 PROPIEDADES DE LA MADERA ESTRUCTURAL.

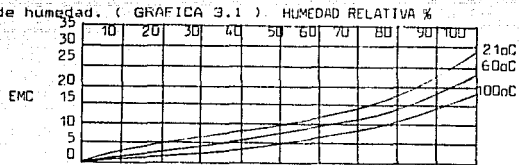
Así como en otros materiales, es necesario conocer las propiedades de la madera que será usada para fines estructurales. En esta sección no se incluyen las propiedades mecánicas, las cuales se analizarán más adelante.

### 3.2.1 CONTENIDO DE HUMEDAD.

La madera acabada de cortar contiene una cantidad considerable de humedad, provocada esencialmente por la circulación de la savia a través del tronco hasta las hojas. La savia se compone principalmente de agua y pequeñas cantidades de otros materiales en solución.

El contenido de humedad de la madera se expresa como porcentaje del peso de la madera secada en horno. El peso de la madera después de secada en el horno se determina exponiendo la madera en el horno a una temperatura de 101°C a 105°C hasta que el peso sea constante. Aproximadamente el 30% de la cantidad de agua que contiene la madera verde está absorbida o retenida dentro de las paredes de las celdas, y el resto es agua libre. A este valor, el 30% de contenido de humedad, se le llama PUNTO DE SATURACION DE LA FIBRA. Al llegar a este punto, las paredes de las celdas están completamente saturadas, pero las cavidades de las mismas están vacías. Aunque hay algunas variantes, según las especies, este valor es muy aproximado para todas. El punto de saturación de la fibra es de significación desde el punto de vista mecánico, físico y de algunas propiedades eléctricas.

La madera es un material higroscópico, es decir, tiene la facultad de asimilar y liberar la humedad en forma de vapor. Toda la madera mojada elimina vapor de agua en la atmósfera. La madera seca absorbe el vapor de agua de la atmósfera húmeda. Debido a esta propiedad higroscópica, la madera tiende a alcanzar un contenido de humedad en equilibrio con la humedad relativa y la temperatura del aire que la rodea. A este punto se le llama EQUILIBRIO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD que con frecuencia se abrevia EMC. La siguiente gráfica nos muestra la relación que existe entre la humedad relativa y diferentes temperaturas de aire que rodea a la madera, con respecto al equilibrio de contenido de humedad. ( GRAFICA 3.1 )



GRAFICA 3.1: Relación entre humedad relativa, temperatura del aire y el equilibrio de contenido de humedad.

El contenido de humedad de la madera se puede obtener por secado en horno o por el uso de medidores eléctricos de humedad.

a. Método de secado en horno.

- Se escoge un tablón representativo y se corta transversalmente una sección como de una pulgada de grueso, cortando a lo largo del grano. ( En sentido de las fibras ).

- Inmediatamente después del corte, se quitan todas las astillas y se pesa la sección.

- Se coloca la sección en un horno que se mantiene a una temperatura de 110°C a 115°C y se seca hasta que su peso sea constante.

- Se pesa la sección para saber su peso después de secado en el horno.

- Se resta el peso del material secado en el horno del peso inicial; el resultado se divide por el peso del material después del secado y se multiplica por cien para obtener el porcentaje de humedad en el tablón original:

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{peso original} - \text{peso seco en horno}}{\text{peso seco en horno}} \times 100$$

Ejemplo:

Una sección de madera de nogal verde pesa 76 gramos al tiempo de cortarse para las pruebas. Después de secada en el

horno a un peso cta, la sección pesa 40 gramos. Determinese el contenido de humedad de la sección.

$$\% \text{ humedad} = (76 - 40) / 40 = 36 \times 100 / 40$$

$$\% \text{ humedad} = 90\%$$

#### b. Sistema de medidor eléctrico.

Los medidores eléctricos de humedad son de dos clases: de resistencia y de radiofrecuencia por pérdida de potencia. Los medidores de resistencia se hacen con electrodos tipo punta, para maderas de 1 1/2 de grueso máximo, y las agujas de medición se insertan aproximadamente a 1/4 del espesor. El medidor de pérdida de potencia, usa electrodos de contacto que se aplican en la superficie y no penetran en la madera. Trabajan solamente de 0% a 25% de contenido de humedad.

El contenido de humedad es un parámetro importante, ya que de acuerdo al uso que se le dará a la madera se fijarán contenidos de humedad límite.

### 3.2.2 CONTRACCION Y EXPANSION.

Cuando la pérdida de humedad baja del punto de saturación de la fibra, la madera se contrae. De hecho, el



proceso de contracción se inicia cuando la madera comienza a secar antes de que el contenido de humedad promedio llegue al 30%.

La contracción total que va de la madera verde a la secada en horno varía según la especie y las tres direcciones que sigue el grano. ( Término que se emplea con frecuencia para indicar la dirección general de las fibras en la madera aserrada o sin aserrar ).

Las contracciones que sufre la madera son las siguientes: ( FIG 3.2 )

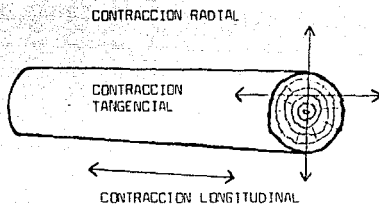
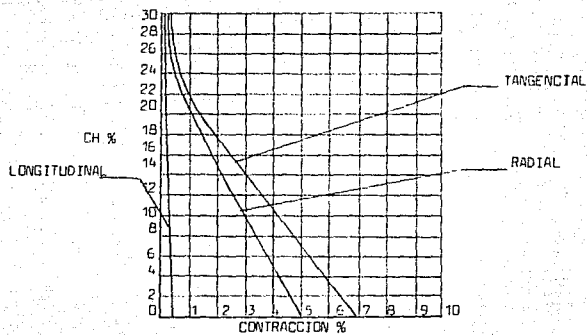


FIG 3.2: Contracciones que sufre la madera.

La contracción tangencial puede ser 2 veces mayor que la contracción radial. La contracción longitudinal es muy ligera ( 0.1% - 0.2% ). La siguiente gráfica nos muestra la variación de las contracciones con respecto a la reducción del contenido de humedad: ( GRAFICA 3.2 )



GRAFICA 3.2: Porcentajes de contracción de la madera.

Cuando la contracción tangencial es considerablemente mayor que la radial, se presentan condiciones de distorsión apreciables, como se muestra a continuación: ( FIG 3.3 )

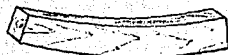
Arqueamiento:



Torsión:



Desviación de filo:



Comba:

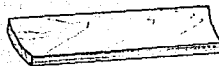


FIG 3.3: Efectos de contracción de la madera.

La madera es secada para asegurar que la contracción ocurra antes de que el material se use. Los cambios en las dimensiones después de la instalación pueden ser reducidos secando la madera cerca del punto de equilibrio de humedad. Este punto, en general, para madera estructural está entre el 10 y 15%. El secado deberá ser controlado para prevenir fuertes distorsiones.

La madera seca también se expande al absorber el agua o la humedad del ambiente. Se considera que el porcentaje de expansión es equivalente al porcentaje de contracción, para el mismo cambio de humedad al secarse.

Algunos valores característicos de las contracciones de madera estructural de pino son los siguientes:

a. Secada a un 20% de contenido de humedad:

Radial: 1.3% - 1.7%

Tangencial: 2.0% - 2.6%

b. Secada a un 12% de contenido de humedad:

Radial: 2.3% - 2.9%

Tangencial: 3.4% - 4.4%

c. Secada a un 0% de contenido de humedad:

Radial: 3.9% - 4.8%

Tangencial: 6.3% - 7.7%

Existe una fórmula que permite el cálculo de la contracción o expansión de la madera estructural por cambio en el contenido de humedad:

$$S = \frac{(MI - MF) D}{[(30 / ST + SR) - 30] + MI}$$

En donde:

S = Contracción ó expansión en pulgadas o unidades métricas.

MI = Contenido inicial de humedad en porcentaje ( max = 30 ).

MF = Contenido final de humedad en porcentaje ( max = 30 ).

D = Dimensión en el contenido inicial de humedad, en pulgadas o unidades métricas.

ST = Contracción tangencial total en porcentaje dividido entre 100.

SR = Contracción radial total en porcentaje dividido entre 100.

Ejemplo:

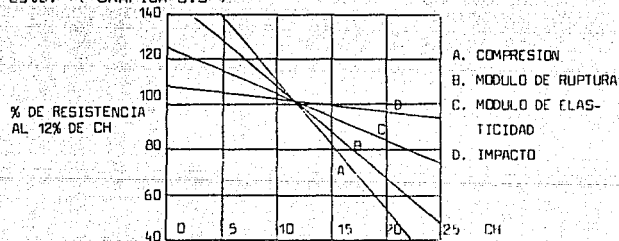
Determinese la contracción tangencial aproximada de un tablón de Pino Ponderosa cepillado a un ancho de 6 1/2 pulgadas, al secarse de 20% a 6% de contenido de humedad.

$$ST \text{ Aprox} = 5.1/100 = 0.051$$

$$S = (20 - 6) (6.5) / [ (30/0.051) - 30 ] + 20$$

$$S = 0.157 \text{ pulg.}$$

Debajo del punto de saturación de la fibra, la resistencia se incrementa mientras el contenido de humedad decrece, gracias a la compactación que sufren las paredes de las celdas. Sin embargo, los cambios en el contenido de humedad no son los mismos para todas las propiedades de resistencia de la madera. La siguiente gráfica nos ilustra esto: ( GRAFICA 3.3 )



GRAFICA 3.3: Variación de algunas propiedades de resistencia de la madera de acuerdo al contenido de humedad.

### 3.2.3 DENSIDAD.

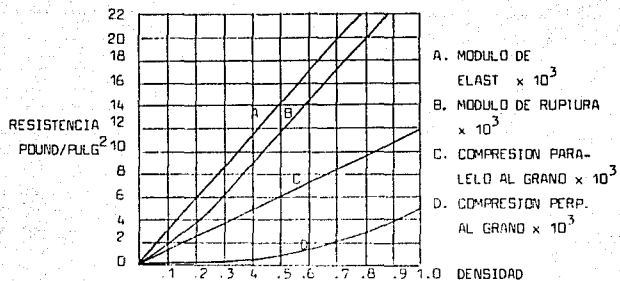
La densidad es un factor importante que afecta la resistencia de la madera. Se expresa en términos de masa por unidad de volumen.

La densidad de la pared celular de la madera varía, en general, de 0.40 a 0.90 ton/m<sup>3</sup>. Las diferencias en el peso entre las especies de madera seca provienen de su estructura, pero, esencialmente, de las cantidades relativas de las paredes y cavidades de la celda. La humedad que hay en la madera aumenta el peso de la misma.

Las especies que tienen más sustancia de madera, tienen celdas con paredes más gruesas y menos cavidades, y son las de mayor densidad. Las especies de madera más densas son las más fuertes.

Varias propiedades de resistencia son influenciadas por la densidad; algunas varían directamente con el incremento de ésta.

En la siguiente gráfica se muestra como varían algunos parámetros de la resistencia con la densidad: (GRAFICA 3.4)



GRAFICA 3.4: Variación de algunas propiedades de la madera con respecto a la densidad.

### 3.2.4 DUREZA.

La dureza es la habilidad de la madera de resistir:

- Desgaste.
- Rayado.
- Abrasión.

La madera laminada deberá estar formada por piezas que tengan un óptimo comportamiento frente a estos agentes. Algunos aditivos pueden ser utilizados para garantizar este comportamiento.

### 3.2.5 PROPIEDADES ELECTRICAS.

La resistencia eléctrica de la madera varía en gran manera con los contenidos de humedad, de varios miles de megohms cerca del punto de saturación de la fibra a casi cero cuando es muy húmeda. Los medidores eléctricos utilizan

esta propiedad de la madera para medir el contenido de humedad.

En los rangos de humedad, cuando la madera no conduce la electricidad, ésta se encuentra debajo del punto de saturación de la fibra. Cuando el contenido de humedad está por encima de este punto, la madera se convierte en un buen conductor de la electricidad.

### 3.2.6 PROPIEDADES TERMICAS.

#### a. Expansión.

La expansión provocada por temperatura en la madera es mínima en la mayoría de los casos. Esta expansión se da más frecuentemente y con mayor intensidad en la sección a través del grano que en su longitud. Por lo tanto, la expansión térmica de la madera pocas veces se toma en cuenta para el análisis de piezas.

#### b. Conductividad Térmica.

La mayoría de los elementos estructurales de madera ofrecen resistencia al paso del calor, algunas especies en



mayor grado que otras. La madera es un aislante natural. Millones de pequeñas bolsas de aire entre la estructura celular hacen de la madera una barrera natural contra el calor y el frío. La madera menos densa, entonces, es la que ofrece mejores condiciones de aislante.

### 3.2.7 PROPIEDADES ACUSTICAS.

La acústica, como sabemos, es la ciencia de los sonidos audibles, deseados o no deseados. El control de los sonidos no deseados dentro de una edificación se refiere a la separación acústica o aislamiento acústico. La madera, como material para construcción, juega un papel muy importante en el aislamiento acústico.

Una importante propiedad acústica de la madera es su habilidad de amortiguar vibraciones. La red celular formada por poros convierte la energía del sonido en energía calorífica, por la resistencia a la fricción entre esos poros y por la vibración de las pequeñas fibras. Debido a esta alta fricción interna, la madera tiene propiedades de amortiguamiento que casi todos los materiales no tienen. Este amortiguamiento reduce la tendencia de las estructuras de transmitir vibraciones en largas distancias.

### 3.2.8 AGENTES DESTRUCTIVOS.

Así como otros materiales estructurales, la madera tiene sus particulares agentes destructivos, de los que podemos mencionar los siguientes:

#### a. Pudrición.

Es causada por las formas bajas de plantas conocidas como hongos, que se alimentan de la sustancia de la madera, de las paredes de las celdas. Bajo condiciones favorables, los hongos se pueden desarrollar en esporas.

El crecimiento de los hongos y la destrucción de la madera por estos agentes, depende de 3 factores principales; la ausencia o cambio de uno o más de estos factores prevendrá la pudrición. Estos factores son:

- Adecuado contenido de humedad.
- Aire para proveer oxígeno.
- Temperaturas favorables.

La humedad es una condición esencial para el crecimiento de hongos pero es un factor fácil de controlar. Si a los materiales húmedos que se usarán en una construcción se les controla la humedad, el pudrimiento puede ser eliminado. Una adecuada ventilación usualmente

prevendrá la acumulación de humedad en áreas cerradas. Un contenido de humedad abajo del punto de saturación de la fibra, retardará grandemente el pudrimiento. Abajo del 20% de contenido de humedad, el crecimiento de hongos se inhibe completamente.

La estructura de las celdas de todas las especies de madera contiene aire atrapado que puede provocar el crecimiento de hongos. Si el aire es excluido, el pudrimiento no ocurrirá.

Los organismos pueden crecer y multiplicarse en un rango muy variado de temperaturas, pero generalmente se desarrollan mejor alrededor de 27°C. En temperaturas muy bajas, los organismos se encuentran inactivos, pero cobran actividad cuando la temperatura se vuelve favorable. Las temperaturas altas pueden matar a los hongos, pero la madera puede ser rápidamente re infectada.

#### b. Resistencia al Fuego.

Es cierto que la madera arde y que puede provocar serios problemas. Sin embargo, es importante recalcar la manera en que las secciones largas o pequeñas arden. Las secciones pequeñas usualmente arden muy fácil, y una vez ardiendo, ellas mismas aceleran la combustión hasta reducir la madera a cenizas.

Las secciones largas, en contraste, es difícil que logren arder, y una vez que arden, se deterioran lentamente debido a las hileras aisladas de carbón que se forman en la superficie y que actúan como aislantes del calor entre las llamas y la madera aun sin quemar. La madera tiene más baja conductividad térmica que los metales, y el calor necesario para producir gases inflamables se transmite lentamente de afuera de la sección hacia adentro.

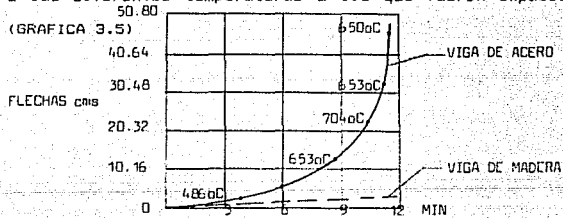
Ningún material estructural es completamente a prueba de fuego; quizá no arda pero contribuye al peligro en temperaturas muy altas. Las estructuras metálicas, por ejemplo, pierden resistencia, se distorsionan, se expanden y colapsan. El concreto puede astillarse y fallar.

En contra de lo que se cree, los miembros estructurales de gran longitud, tanto de madera maciza como de madera laminada, se comparan favorablemente con miembros de otros materiales estructurales cuando la resistencia al fuego es considerada.

En temperaturas altas, las secciones de madera se carbonizan aproximadamente 1 pulgada de profundidad en 39 minutos, y esto provee a la madera estructural una ventaja especial en temperaturas que harían a los metales colapsar. La resistencia de una estructura de madera sólo se reduce en

proporción al grado de carbonización que ésta sufre, y las propiedades ante la aplicación de cargas de la madera sin quemar no son afectadas por el calor extremo. Generalmente más de la mitad de la sección puede ser consumida en un incendio antes de que ésta colapse.

Se realizó un experimento en unos laboratorios de Estados Unidos en donde se expusieron simultáneamente a las mismas condiciones de fuego 2 sistemas de piso, uno de acero y otro de madera. Después de 12 min, la temperatura ambiente alcanzó los 1300°F (704°C) y el gas que alimentaba al fuego fue desconectado. El sistema de acero continuó deformándose, y eventualmente colapsó, pero las vigas de madera mantuvieron el 80% del tamaño de su sección y todavía soportaban las cargas. Además, las deformaciones de las flechas del acero fueron considerablemente mayores que las de la madera. La siguiente gráfica muestra el incremento de las flechas con respecto al tiempo, de los sistemas de piso a las diferentes temperaturas a los que fueron expuestos.



GRAFICA 3.5: Deformaciones de dos sistemas de piso en madera y en acero, expuestos al fuego.

La facilidad con que las especies arden difiere poco y es influenciada básicamente por la densidad de las especies. Mientras más densa sea la especie es más difícil que arda y se quema más lentamente.

A continuación se muestra las secciones de una columna de madera laminada de 9" x 9" sujeta a una prueba de fuego de una hora, soportando una carga de 16 ton. El dibujo muestra la sección original, la sección de la columna quemada con el carbón intacto y la sección que muestra la madera sin quemar. ( FIG 3.4 )



FIG 3.4: Sección de una columna de madera laminada expuesta al fuego.

#### c. Insectos.

En México, los insectos como las termitas no son usualmente un problema. En donde existen, los aditivos contra la pudrición son también efectivos contra insectos. Las columnas de madera usadas en agua salada, en donde

existen organismos tales como los moluscos y crustaceos, se deberá dar un especial tratamiento a la madera.

#### d. Clima.

La madera puede deteriorarse físicamente si se expone a cambios extremos atmosféricos; el sol, la lluvia, el viento, el congelamiento, etc., pueden causar gradualmente la desintegración. Los aditivos contra los insectos y la pudrición también incrementan la resistencia contra el clima. Generalmente en el uso de la madera laminada, este problema no se presenta muy a menudo, debido a que las estructuras más usadas de madera se dan en los interiores. En caso contrario, como en algunos puentes, se deberá dar un cuidado especial a este aspecto.

#### e. Resistencia Química.

La madera laminada ha sido escogida frecuentemente para edificaciones en donde se usan o se producen sustancias químicas. La madera es resistente a una gran variedad de sustancias químicas, especialmente ácidos suaves, y sales ácidas y neutras. En este aspecto, la madera es superior al comportamiento del acero. Algunos adhesivos sintéticos de resina también son generalmente resistentes al ataque químico. La madera no es resistente a fuertes soluciones alcalinas ( Hidróxido de Sodio, por ejemplo ), y el acero

ofrece mucho mayor resistencia. La madera generalmente no se utiliza como elemento estructural en lugares donde pueda ser afectada por sustancias químicas con un alto PH. La madera, después de un largo periodo de tiempo, puede ser destruida por el contacto con fuertes ácidos y alcalinos.



#### 4. FABRICACION.

La madera laminada es un producto que requiere de un proceso de fabricación bajo cierto control de calidad. A continuación se mencionarán las etapas de elaboración que sigue la madera laminada desde el aserrio hasta el montaje en obra.

##### 4.1 ASERRIO.

Siendo los bosques productores de bienes y servicios, reguladores del equilibrio ecológico, del microclima y la erosión, y además, un resguardo de la fauna silvestre, para poder aprovecharlos se requiere una serie de requisitos técnicos y legales que garanticen el uso adecuado de este recurso natural renovable, asegurando su persistencia, fomento y mejoramiento.

Es indispensable la justificación técnica del aprovechamiento mediante un estudio de evaluación del recurso. Se hace una delimitación física de cuáles son, dentro del Área en estudio, las hectáreas que tiene el bosque; se realiza un muestreo de campo, donde se recaba el diámetro y la altura de los árboles seleccionados, se determina su edad y cuánto crecen anualmente.

Para calcular el volumen que se puede cosechar se hacen las siguientes consideraciones: los árboles existentes representan un capital, y lo que cada uno de ellos crece anualmente es otro monto que en términos financieros representan el interés. Hablando en metros cúbicos, lo que crecen los árboles anualmente es lo que se programa extraer cada año, para no descapitalizar el bosque.

El estudio mencionado permite conocer las cantidades disponibles del recurso y su localización, tomando en cuenta no romper con la ecología y los aspectos de carácter socioeconómico, condicionados al interés que da el crecimiento del bosque, para asegurar la recuperación de lo que se está cortando en un tiempo dado.

Por ejemplo, si para una superficie determinada, un estudio arroja el dato de que en 10 años los árboles crecen 50000 m<sup>3</sup>, entonces se pueden cortar 5000 cada año, para lo que es necesario tener 10 parcelas anuales y programar el aprovechamiento de cada una de ellas en el transcurso de 10 años.

El área de corte intervenida se aprovecha hasta que se cumpla su periodo de recuperación, que para el ejemplo anterior es de 10 años. A este estudio técnico justificativo lo denominamos Estudio Dasonómico, el cual se presenta ante

la autoridad forestal para las gestiones de obtención del permiso de aprovechamiento.

Para poder llegar al bosque con camiones y maquinaria de derribo y arrastre, se requiere de una infraestructura de caminos, de tal manera que se facilite el transporte de la madera, mano de obra y material. La construcción y conservación de carreteras representan importantes partidas de gastos. proyectando debidamente el sistema de carreteras, puede conseguirse un óptimo empleo de la inversión en ellas y justificar ampliamente su construcción.

En la explotación forestal, las carreteras pueden clasificarse en dos:

- Carreteras de acceso.
- Caminos secundarios.

Las carreteras de acceso son las que se necesitan para el transporte hasta la zona del bosque. Su función es transportar la mano de obra y el equipo entre, por ejemplo, un aserradero, una ciudad o aldea, y el bosque. Algunas carreteras principales que atraviesan los bosques pueden también ser de acceso.

Los costos de construcción de carreteras públicas de calidad determinada, pueden servir de orientación para la

estimación de costos, los cuales, varían de acuerdo al tipo de terreno. En regiones montañosas con frecuentes afloramientos rocosos, pueden fácilmente duplicarse.

Los caminos secundarios están situados dentro de la zona del bosque. Su finalidad principal es penetrar en ellos y acortar la distancia de arrastre.

En general, los caminos secundarios se construyen con especificaciones de menor calidad y muchas veces su empleo es temporal. ( Se utilizan exclusivamente con vistas a la explotación de una zona y se abandonan cuando se ha terminado la corta ).

Las pistas de saca son brechas que se construyen de la zona de corte hacia las carreteras secundarias.

La distancia a considerar de la zona de corte al camino secundario se le denomina distancia media de saca. Generalmente esta distancia es de  $1/4$  del espaciamiento entre las carreteras cuando las piezas se transportan hasta la carretera desde ambos costados y que éstas estén espaciadas más o menos uniformemente en toda la zona. Cuando las carreteras sirven únicamente un lado, la distancia media de saca es de  $1/2$  del espaciamiento.

La densidad de carreteras se define como la longitud de carreteras por unidad de área a la que sirven.

Generalmente el costo unitario de caminos secundarios está situado entre el 60% y 80% del costo total de saca, cuando ambos costos se expresan sobre la misma base.

Las técnicas de trabajo en la construcción de carreteras son muy parecidas en todo el mundo. La construcción mecanizada exige poca mano de obra. El costo de ésta sólo representa aproximadamente el 20% del costo directo de construcción; los materiales entre el 5% y 10% y el resto corresponde a la maquinaria.

Las operaciones madereras tienen con frecuencia un carácter de explotación; la madera comerciable se extrae y los caminos se abandonan. La conservación de carreteras se limita casi exclusivamente al acceso y a los caminos principales. Como regla empírica el costo de mantenimiento de carreteras al año representa un costo fijo del 5% del costo de su construcción. Se han creado modelos matemáticos para lograr una calidad óptima de los sistemas de carreteras con respecto al espaciamiento entre ellas así como a su

calidad. Sin embargo, el diseño de dichas redes de carreteras no competen a los propósitos de esta tesis.

Considerado de manera general el aspecto de carreteras para la explotación forestal, nos referiremos ahora a lo que se le denomina operaciones al pie del tocón, que se relacionan esencialmente con el corte.

Actualmente, el empleo de sierras mecánicas es fuerte, y las más aconsejables son las de una mano, de hoja bastante larga, y accionadas con motores de 10 a 12 HP, aunque también existen sierras de dos manos, y en algunas operaciones todavía se utilizan hachas.

Junto con la operación de corte, está la operación de desrama y troceo, donde los árboles derribados se seccionan a las medidas que pide la industria para no tener desperdicios y optimizar su uso.

La producción en el corte y troceo está en función de los siguientes factores:

- Diámetro del árbol ( A la altura del pecho ).
- Número de trozas por árbol.
- Tiempo de trabajo efectivo.

El diámetro influye en la producción de dos maneras: determina la cantidad de trabajo que hace falta para apear un árbol ( superficie por cortar ), y refleja también el volumen que puede utilizarse. Un árbol grande exigirá más tiempo para apearlo y trozarlo, pero también dará un mayor volumen de madera.

El número de horas de trabajo efectivo por día, es uno de los factores más importantes de la producción, aunque uno de los más difíciles de establecer. La experiencia demuestra que rara vez se alcanzan 6 horas de trabajo efectivo, debido al agotamiento físico. En la operación, el tiempo efectivo incluye:

- Caminar hasta los árboles.
- Manipulación de instrumentos.
- Preparación de lugar de corte.
- Corte.

A continuación se da una información resumida acerca de los métodos y producción para las operaciones al pié del tocón:

| METODO  | PROD. DIARIA 1 CUADRILLA | OBREROS/CUADR. |
|---|--------------------------|----------------|
| Corte y troce con hacha                         | 9-15                     | 1              |
| Corte con hacha y troce con sierra de dos manos | 25-30                    | 2              |
| Corte y troce con sierra dos manos              | 15-30                    | 2              |
| Corte y troce con sierra mecánica               | 30-70                    | 2              |

Después de las operaciones al pie del tocón, se realiza el desembosque, es decir, transportar las piezas desde el lugar de corte y troceo hasta los caminos secundarios. El desembosque puede ser de dos tipos: por arrastre y por cable.

El desembosque por arrastre es el método más utilizado y se realiza normalmente con tractores de orugas o con tractores articulados de cuatro ruedas. Estos últimos son de gran maniobrabilidad y elevada velocidad en terreno adecuado, sin embargo, son de limitado esfuerzo de tracción y tienen menor capacidad de penetración. Debido a estas características, el tractor de orugas se suele emplear cerca del pie del tocón y el tractor de ruedas en tramos sin obstrucciones.



Se denomina saca con cable al método de transporte a corta distancia que generalmente se limita a condiciones de terreno en que los tractores de orugas y/o ruedas no pueden trabajar satisfactoriamente, como en terrenos pantanosos o muy quebrados y en laderas escarpadas.

Una vez que las trozas se han desemboscado, el transporte a los aserraderos se realiza generalmente en camiones, y sólo en casos muy particulares, se utiliza el transporte por ferrocarril o por vía acuática. La calidad de construcción del camino repercute mucho en la velocidad del transporte. Las condiciones óptimas se obtienen con una carretera casi lisa, con gran prioridad de paso, buenas cunetas de desagüe y curvas tangentes que permitan la vista a larga distancia.

Las trozas, una vez que llegan al aserradero, son generalmente almacenadas en tanques de agua. Antes de que las piezas sean aserradas, es necesario que se realice una primera clasificación visual en función de los defectos que se presenten. La madera clasificada es introducida en una planta donde se corta a dimensiones previamente establecidas de acuerdo al uso que se le dará.

#### 4.2 ESTUFADO.

La madera es un material orgánico debido a que los troncos tienen como función fundamental, además de sostener al árbol, transportar agua con sustancias disueltas en ella, de las raíces hacia las hojas. Al momento de derribar un árbol para transformarlo en madera aserrada, éste contiene gran cantidad de agua almacenada dentro de su estructura.

La madera, como materia prima, para poder transformarla en un producto, debe poseer un contenido de humedad apropiado para diversos usos, tal como se muestra a continuación: (TABLA 4.1)

| % HUMEDAD | USO DE LA MADERA O FENÓMENOS   |
|-----------|--|
| 26        | Inicio de cambios dimensionales notorios.                                      |
| 20        | Límite para el desarrollo de hongos causantes de pudrición.                    |
| 15        | Madera para estructuras, puertas y ventanas exteriores. Implementos agrícolas. |
| 12        | Muebles, juguetes, puertas interiores, lambrín, vigas laminadas.               |
| 10        | Instrumentos musicales   |

TABLA 4.1: Cantidades de humedad convenientes para distintos usos de la madera.

El secado de la madera ofrece las siguientes ventajas:

- a. Mejora la estabilidad dimensional de la madera en uso.
- b. Aumenta la resistencia mecánica.
- c. Mejora las características como aislante térmico, acústico y eléctrico.
- d. Aumenta la resistencia contra la biodegradación.
- e. Permite mejor tratamiento.

Existen diferentes métodos para extraer la humedad que posee la madera en el momento de ser aserrada, que van desde un secado al aire libre o natural, en el que sólo es necesario un buen apilado de madera, orientación adecuada y un techo, hasta algunos tan refinados como el secado de alta frecuencia que requiere equipo especial y por lo mismo, tiene un costo elevado. Otra opción es el secado solar. Un sistema intermedio es el denominado "convencional" que funciona a base de temperatura y vapor de agua, y que actualmente es el más usado.

Existen dos formas principales de hacer llegar el calor a la madera. Una de ellas es el secado al aire libre a las temperaturas del medio ambiente. La otra es el secado en estufa en donde la temperatura se eleva artificialmente sin exceder, en la mayoría de los casos, los 100°C.

En general, para contenidos de humedad arriba del 14%, el secado al aire libre es suficiente. Para madera estructural, especialmente la madera laminada, donde se requieren contenidos de humedad abajo del 14%, es necesario el secado artificial en estufa.

Un paso importante previo al secado de la madera es el almacenaje y el manejo de los troncos para reducir el deterioro. Los troncos se deben llevar de los bosques a los aserraderos para convertirlos en madera aserrada tan pronto como sea posible, especialmente en temporada de calor. En aserraderos grandes es necesario tomar ciertas precauciones, almacenando la madera adecuadamente en estanques o en pilas.

El secado al aire libre se lleva a cabo exponiendo la madera aserrada a la atmósfera del exterior en un patio de secado o en un cobertizo. El secado al aire libre es la forma más sencilla y, en muchos casos, la más barata del proceso de secar.

Si en el secado al aire libre se aplican las ventajas de una buena práctica, la madera secará en el tiempo más breve con el mínimo de defectos en el secado. Estos puntos ventajosos son:

- a. Contar con un local adecuado para exponer la madera aserrada a una atmósfera favorable para el secado.

b. Apilar la madera aserrada de modo que el aire circule alrededor de cada uno de los tablones.

Para estructuras a base de madera laminada, es necesario exponer la madera aserrada a un secado inicial al aire libre, en donde se alcanza el contenido de humedad correspondiente al punto de saturación de la fibra. El tiempo promedio para alcanzarlo es de aproximadamente 4 semanas. Posteriormente se realiza el secado en estufa, debido al bajo contenido de humedad que se requiere ( del 3% al 12% ). La diferencia principal entre el secado en estufa y el secado al aire libre estriba en que en el primero, el calor se proporciona artificialmente para acelerar el proceso. El calor eleva la temperatura a un grado mayor del que prevalece en el exterior. Una estufa requiere una estructura más costosa para que resista la acción de las temperaturas y las humedades relativas altas.

El secado en estufa tiene otra ventaja sobre el secado al aire libre: las temperaturas altas matan al hongo, que mancha y descompone la madera y también mata a los insectos.

Las estufas generalmente se construyen con materiales locales, tales como:

- Madera seca.
- Ladrillos hechos en la localidad.

- Concreto.
- Bloques de concreto.
- Mosaicos.
- Láminas de asbesto-cemento o de metal.

Algunos tipos muy utilizados son los siguientes:

a. Secador pequeño de aire caliente, para madera de fácil secado. Usa un sistema de circulación de aire natural. Su capacidad es de 7000 pie-tablón.

b. Estufa pequeña, de circulación natural, en donde se calienta el aire con serpentines de vapor. Con un diseño adecuado, este tipo de estufa seca una gran variedad de madera aserrada, a rapidez mayor y con mayor uniformidad en la humedad. Sin embargo, el índice de circulación del aire no es muy rápido y el grado de control no es muy bueno. Estos pueden muy bien llenar las necesidades preliminares de una industria maderera en cualquier país.

c. Estufa pequeña, de circulación forzada. Este tipo resulta apropiado para aserraderos y plantas pequeñas que trabajan madera. Usa abanicos eléctricos para la circulación del aire. Su capacidad es de 4000 pie-tablón, y es relativamente barata, fácil de instalar y no necesita equipo o maquinaria especial.

d. Estufas modernas, que usan vapor para su calentamiento y abanicos. Este tipo tiene una capacidad hasta de 100000 pié-tablón. El secado es de la más alta calidad y en ocasiones el más económico. La cantidad y la distribución uniforme del calor se controlan con instrumentos automáticos que operan, ya sea con aire comprimido, o con electricidad.

Las estufas de secado más usadas en México son las pequeñas, de circulación forzada, formada por los siguientes elementos:

- a. Ventilador.
- b. Calentador.
- c. Termómetro.
- d. Ventila.
- e. Deflector.

Su construcción es muy sencilla y satisfacen las necesidades de un aserradero de mediana capacidad. El esquema se muestra en la siguiente figura: ( FIG 4.1 )

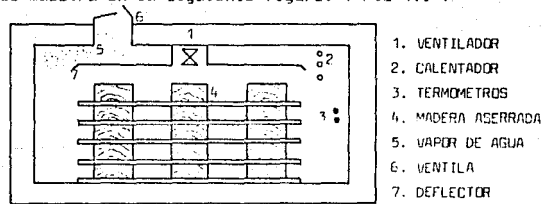
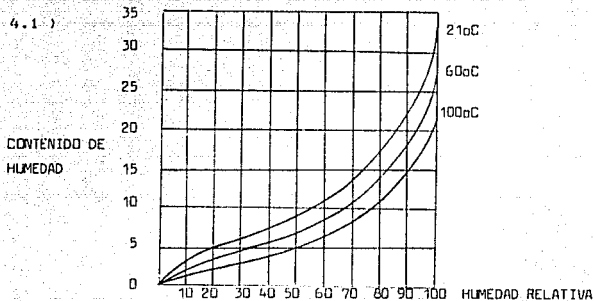


FIGURA 4.1: Estufa para madera comúnmente utilizada en México

Como se mencionó anteriormente, la madera es un material higroscópico, es decir, absorbe agua de una atmósfera húmeda o la deja escapar a una atmósfera seca. Debido a esta propiedad, la madera tiende a estar en equilibrio con la humedad relativa y la temperatura del aire que la rodea. Es pues importante en el proceso de secado el control de la humedad relativa, la temperatura y la circulación del aire, hasta que la madera alcanza un contenido de humedad predeterminado, inferior al 15%. En el interior de las estufas se colocan termómetros y bulbos húmedos que permiten el manejo de estos parámetros. La siguiente gráfica nos muestra la relación existente entre la humedad relativa, la temperatura, y el contenido de humedad en equilibrio de la madera en el proceso de secado. (GRAFICA



GRAFICA 4.1: Contenido de humedad en equilibrio para diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa.



Dentro del proceso de secado, la humedad relativa hace que la evaporación en las superficies de la madera y el movimiento de la humedad procedente del interior de la misma, vayan al mismo paso. El movimiento del aire proporciona una corriente de calor uniforme, para hacer desaparecer el agua exudante de la superficie de la madera. A fin de garantizar un secado uniforme, la dirección de la corriente se hace variar, obteniéndose velocidades de aproximadamente 3 mts/seg.

El tiempo de secado de la madera y su comportamiento durante el secado, varia dependiendo del grado de humedad que se quiera lograr, el tipo de estufa, la cantidad de madera por secar, y los contenidos de humedad iniciales. Por ejemplo, en una pieza de encino de 2" x 4" x 8", sometida a un secado en estufa durante 30 días, la madera en sus superficies exteriores, posee un contenido de humedad mayor que en el centro, el cual se reduce abruptamente en los siguientes 4 días, cuando el contenido de humedad es mucho mayor en el centro que en las superficies externas. Hacia los 21 días, se tiende a lograr un equilibrio en toda la madera, hasta que finalmente, a los 30 días se logra una humedad uniforme en toda la madera. La siguiente figura nos muestra el cambio en los contenidos de humedad de la pieza, en función del tiempo y de la superficie de la misma: ( FIG 4.2 ).

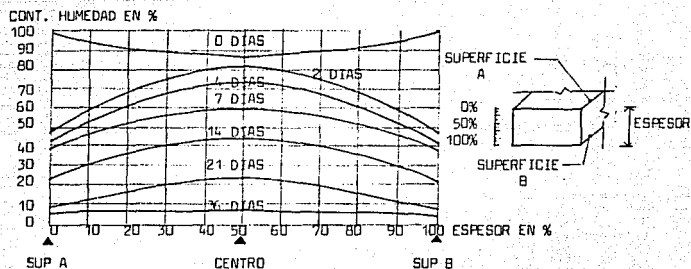


FIG 4.2: Relación entre el contenido de humedad y el espesor de una pieza de encino.

Durante el proceso de secado, la madera sufre contracciones cuando la humedad de la madera alcanza valores inferiores al punto de saturación de la fibra. La siguiente figura nos muestra la relación entre los cambios dimensionales en las direcciones radial y tangencial y el contenido de humedad de la misma pieza de encino: (FIG 4.3).

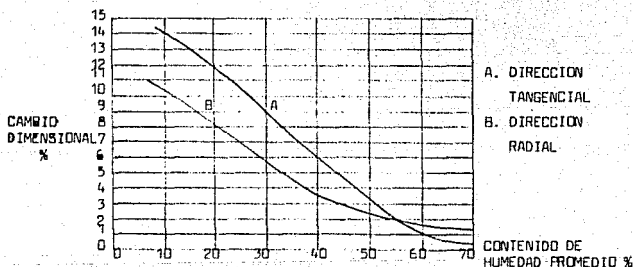


FIG 4.3: Relación entre los cambios dimensionales de una pieza de madera de encino secada en estufa.

Para evitar fuertes agrietamientos, se deberá fijar un equilibrio de humedad más alto del que se desea lograr, y reduciéndolo paulatinamente mientras se va secando la madera.

Mediante el proceso en estufa, el secado se puede acelerar considerablemente ( de 1/10 a 1/30 del tiempo requerido en aire libre ), además de que se reducen los defectos causados durante el proceso, y se seca la madera a contenidos de humedad deseados y apropiados para el uso que se le va a dar.

La madera aserrada que se ha secado a un contenido de humedad adecuado para su uso, se deberá proteger contra la intemperie. Si se almacena durante mucho tiempo, se necesita contar con cobertizos de almacenamiento o cuartos apropiados para este objeto. Si se le da una protección adecuada contra la humedad, la madera aserrada se mantendrá a su nivel de contenido de humedad y logrará una mayor uniformidad.

#### 4.3 SELECCIONADO.

Se mencionó anteriormente que a la madera desde que sale del aserradero, se le hace una separación previa de acuerdo con su calidad. Sin embargo, es posteriormente al secado en donde se realizará una selección definitiva.

Hasta hace algunos años, no existía en México ningún reglamento para la clasificación correcta de la madera. Se venía utilizando la clasificación americana de la " Western Pine Association ", y también los lineamientos trazados por la Norma Oficial DGN-C18-46, expedida por la Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, que la clasifica dentro de cuatro grupos: selecta, de primera, de segunda, y de tercera calidad. Sin embargo, esta clasificación no es adecuada para fines estructurales ya que carece de los fundamentos que consideran todos los defectos o características que afectan sus propiedades.

A partir de 1979, financiado por el " International Development Research Center " de Canadá, el Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera ( LACITEMA ) desarrolló un sistema de calificación y clasificación visual para madera de pino de usos estructurales.

Las reglas son aplicables a la madera de pino aserrada en todo el país, a excepción de la especie " Pinus ayacahuite ". Tampoco son aplicables a maderas de otras especies de coníferas, ni a las especies de maderas tropicales. Se deben utilizar para madera seca ( Contenido de humedad < 18% ) y cepillada, puesto que, si se clasifica un material que posteriormente será secado o cepillado,

algunas piezas pueden cambiar de clase, en caso de distorsión por el secado.

Existen tres tipos de reglas para la clasificación: generales, especiales e industriales. Las diferencias en los tres tipos de reglas son las dimensiones permisibles de los defectos y su localización.

Las reglas generales utilizan un criterio sencillo por lo que se le asignan valores de resistencia bajos. Son recomendables para usuarios que no requieran de un material con estricto control de calidad.

Las reglas especiales son más estrictas en cuanto a las dimensiones de los nudos en el canto. Se aplican a madera que requiere de valores de resistencia más altos.

Las reglas industriales clasifican la madera con valores de resistencia mayores que las aplicables con las reglas generales y especiales. Esto se logra con la reducción del tamaño máximo permisible de los defectos.

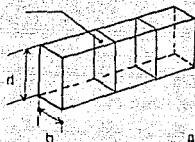
Para la fabricación de elementos de madera laminada, se requiere de un material de alta calidad estructural, para lo cual, se utilizan las reglas industriales de clasificación.

Para la correcta aplicación de las reglas, es necesario aclarar los siguientes conceptos:

a. Sección transversal y área total. ( AT )

Área resultante de un corte perpendicular al eje longitudinal. El área total es la superficie de una sección transversal: ( FIG 4.4 )

SECCION TRANSVERSAL



$$AT = b \times d$$

FIG 4.4: Área total de una pieza de madera.

b. Zonas adyacentes a los cantos.

Son las zonas adyacentes a la dimensión menor, con una dimensión de un octavo de la dimensión mayor: ( FIG 4.5 )

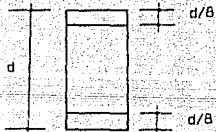


FIG 4.5 : Zonas adyacentes a los cantos de una pieza de madera.

c. Nudo y área del nudo.

Los nudos son partes de una rama incorporada en el tallo de un árbol. La resistencia de un miembro resulta afectada por el tamaño y la posición de los nudos que puede tener. El área del nudo,  $A_n$ , es el área total de nudo o nudos que estén en un tramo de 15 cms proyectados en la sección transversal de la pieza de madera. El área del nudo en la zona adyacente al canto,  $A_{nc}$ , es la porción del nudo que se localiza en la zona de canto como se define en el inciso anterior: ( FIG 4.6 )

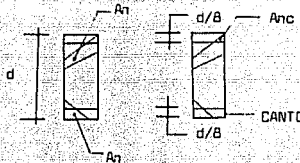


FIG 4.6: Área del nudo y área del nudo en la zona adyacente.

d. Pendiente del grano.

Es la desviación de las fibras de la madera con respecto al eje longitudinal de la pieza de madera. Se mide como la relación entre la desviación de una unidad de

longitud, y la distancia longitudinal donde se da la separación: ( FIG 4.7 )

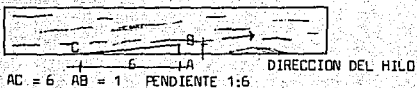


FIG 4.7: Pendiente del grano de una pieza de madera.

e. Gema ( Arista Faltante ).

Es la madera faltante en una arista de la pieza aserrada; se mide como la proporción que abarca sobre las dimensiones de la pieza: ( FIG 4.8 )

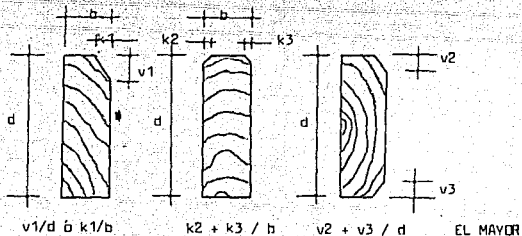


FIG 4.8: Gema o arista faltante en una pieza de madera.

f. Ataque de insectos y agujeros de larva.

El primero se refiere a perforaciones de insectos que generalmente no rebasan 1mm de diámetro. A veces tienen una mancha azul alrededor de la perforación. Los agujeros de



larva son perforaciones más grandes, y a veces se presentan como galerías en los que se encuentran restos de aserrín (FIG 4.9)

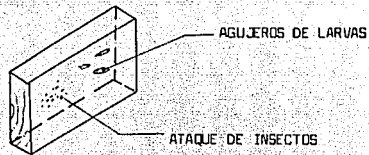


FIG 4.9: Ataque de insectos y agujeros de larva.

g. Bolsas de Resina.

Son aberturas paralelas a los anillos anuales que contienen resina, ya sea sólida o líquida. Se toman como nudos para fines de clasificación. Cuando son pequeñas no afectan la resistencia. Cuando la resina ocupa todo el grueso, se tomarán como rajaduras para fines de clasificación: ( FIG 4.10 ).

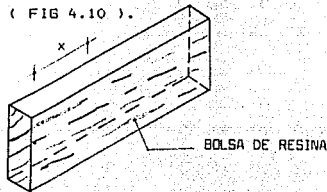


FIG 4.10: Bolsas de resina.

h. Distorsión del hilo.

Es la desviación de las fibras ocasionadas por un nudo que estuvo en una tabla cortada en una sección adyacente a la tabla clasificada: ( FIG 4.11 )

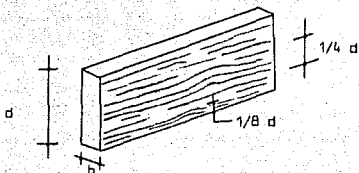


FIG 4.11: Distorsión del hilo.

#### i. Rajadura.

Es una hendidura o separación longitudinal de la madera que atraviesa los anillos anuales. Muchas veces es ocasionada por el secado: ( FIG 4.12 )

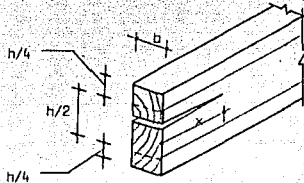


FIG 4.12: Rajadura.

Las limitaciones en rajaduras para todas las clases de madera es:

$$x < 1/2 b$$

Sólo se considerarán las grietas y rajaduras dentro de la porción central.

j. Manchas.

Cambios en el color de la madera que no afectan la estructura leñosa y se producen por la acción de hongos.

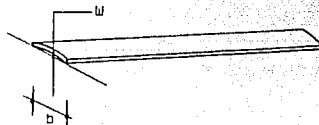
k. Pudrición.

Descomposición gradual de la sustancia leñosa, por la acción de los hongos.

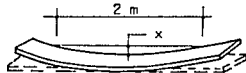
l. Alabeo.

Curvatura de una pieza de madera por la deformación de sus planos longitudinal y transversal, o de ambos. Es ocasionada por un mal secado, distinguiéndose cuatro deformaciones: ( FIG 4.13 )

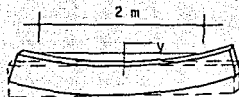
- Acanalamiento ( abarquillado ): Alabeo en la dirección transversal.



- Arqueamiento: Alabeo en la dirección longitudinal.



- Encorvadura: alabeo de los cantos en sentido longitudinal.



- Torcedura: alabeo simultáneo en las direcciones longitudinales y transversal.

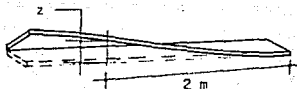


FIG 4.13: Curvatura de la madera por deformaciones en sus diferentes planos, ocasionados por mal secado.

m. Madera muy liviana.

Es aquella que tiene un peso específico aparentemente no mayor de  $0.40 \text{ gr/cm}^3$  al 12% de humedad.

n. Acebolladura.

Es la desunión de 2 anillos de crecimiento contiguos.

Las reglas generales, especiales e industriales clasifican, en general, la madera en tres calidades

79  
ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

estructurales: Clase "A" de alta resistencia, Clase "B" de mediana resistencia, y Clase "G" de baja resistencia de aplicación a fines no estructurales.

Para clasificar estructuralmente la madera, se deben tomar en consideración todas las propiedades y características que afectan negativamente su rigidez y resistencia.

El procedimiento de clasificación puede seguir los siguientes pasos:

- a. Se revisa la pieza de madera en toda su longitud y se identifica el defecto mayor que presente; en la mayoría de las piezas corresponde a los nudos.
- b. Una vez identificado el nudo más grande o nudos que se encuentran en una longitud menor de 15 cms y que sumados representen una área mayor que el nudo más grande, se aplica la regla correspondiente.
- c. Una vez revisada la pieza por los nudos, se deben aplicar las consideraciones generales; al final, se marca la pieza con la clase que resulte.

A continuación se presentan las especificaciones para nudos, consideraciones generales y defectos por secado

máximos permisibles para la clasificación visual de la madera que se utilizará en la elaboración de elementos laminados:

a. Tamaño máximo permisible de los nudos.

| CLASE | An        | Anc       |
|-------|-----------|-----------|
| A     | 1/4 de At | 0         |
| B     | 1/4 de At | 1/8 de At |

b. Pendiente máxima del grano.

| CLASE | PENDIENTE |
|-------|-----------|
| A     | 1:10      |
| B     | 1:8       |

c. Gema máxima permisible.

| CLASE | GEMA MAXIMA            |
|-------|------------------------|
| A     | 1/4 DEL GRUESO O ANCHO |
| B     | 1/3 DEL GRUESO U ANCHO |

d. Ataque de insectos.

Máximo: 10 agujeros en un cuadro de 6 x 6 cms. No debe haber infestación activa.

e. Bolsas de resina.

Se consideran como si fueran nudos. Cuando la resina ocupa todo el grueso se limita como las grietas y rajaduras.

f. Grietas, rajaduras y acebolladuras.

La longitud debe ser menor a la mitad del ancho.

g. Distorsión localizada del grano.

En la zona adyacente al canto, 1/8 del ancho "d" como máximo. En la zona central 1/4 del ancho "d" como máximo.

h. Pudrición.

No se admite en ninguna forma.

i. Combinación de defectos.

Cuando más de la mitad de la pieza tenga una mancha azul, ataque de insectos y sea sensiblemente más ligera, no se podrá clasificar dentro de la clase "A" o "B".

j. Agujeros de larvas.

Se admite un tamaño máximo de 12mm, y no más de 2 en un cuadro de 6 x 6 cms.

k. Defectos por secado: Máximos permisibles.

Acanalamiento(w): Menos de 1mm por cada 50mm de ancho de la pieza.

Arqueamiento (x): En una longitud de 2 mts: Menor de 10mm

Encorvadura(y): En una longitud de 2 mts: Menor de 5mm

Tercedura(z): En una longitud de 2 mts: Menos de 1.5mm por cada 12mm de la pieza

La selección de las piezas es un paso importante dentro del proceso de fabricación. Deberá buscarse madera estructural de la mejor calidad, procurando que en la clasificación las piezas correspondan al tipo "A" de acuerdo a los lineamientos marcados anteriormente.



#### 4.4 PRE-ENGOMADO.

Para la fabricación de elementos de madera laminada es necesario contar con una planta especialmente equipada para ello. En los Estados Unidos, por ejemplo, el diseño de una fábrica especial es influenciado por la demanda de vigas existentes en el país. En México son pocas las estructuras hechas de madera laminada y el mercado es bastante reducido, por lo que sólo es necesario equipar una planta con instalaciones relativamente sencillas. Sin embargo, el proceso requiere de mano de obra especializada y una supervisión cuidadosa.

Una vez que la madera es secada en estufa, es transportada a la planta, en donde generalmente se almacena en cuartos especiales para conservar el contenido de humedad. ( En algunos casos, las estufas se encuentran cerca o forman parte de la planta ). Se deberá mantener una temperatura aproximada en la fábrica entre los 15°C y 18°C, y una humedad relativa entre el 55% y 65%.

En esta parte del proceso, se clasifica la madera de acuerdo a los lineamientos propuestos en la sección anterior y las especificaciones provenientes del diseño. Si la madera no cumple los requisitos, se utilizan equipos especiales para remover los nudos e insertar a presión madera limpia en su lugar. La razón por la cual se realiza esta operación es

porque los nudos no pegan al momento del engomado con los adhesivos utilizados, y posteriormente, éstos iniciarán la deslaminación del elemento cuando se exponga a cambios de humedad:

Previo al engomado, el contenido de humedad de la madera no deberá ser mayor que el 15% y no menor del 7%. Además, el rango de diferencia entre contenidos de humedad de las tablas no deberá exceder del 3%. Cuando el elemento se expone a cambios de humedad en condiciones de servicio, se generan esfuerzos internos entre las laminaciones debido a las contracciones y expansiones que éstas sufren.

Las tablas deberán ser cepilladas y procesadas, de manera que el grosor efectivo de las laminaciones al final de la fabricación sea de 1 1/2" , proveniente de tablas de 2" , o de 3/4", proveniente de tablas de 1" de grueso nominal. El material más delgado se utiliza en miembros curvos. El ancho efectivo de las laminaciones deberá ser de 3 1/8", 5 1/8", 6 3/4", 8 3/4" y 10 3/4", proveniente de tablas de 4", 6", 8", 10" y 12" de ancho nominal.

Las tablas para producir laminaciones se suministran generalmente en longitudes menores que seis metros. Para fabricar miembros con longitudes mayores, las laminaciones se unen en sus extremos por medio de juntas o empalmes encolados antes del ensamblado final del conjunto.

Probablemente es la operación más laboriosa en esta etapa. Dependiendo de la capacidad de la planta, se pueden utilizar sierras circulares, cepillos mecánicos y hasta máquinas automáticas para la elaboración de las juntas.

Los tipos de empalmes que se utilizan comúnmente en las laminaciones son los mostrados en la siguiente figura: ( FIG 4.14 )

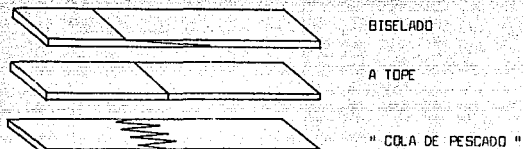


FIG 4.14: Tipos de empalmes utilizados en madera laminada.

El empalme de " cola de pescado " puede ser hecho con menos desperdicio de material que el empalme biselado; sin embargo, éste es el que menos afecta la resistencia del elemento. Es importante que a través de sujetadores mecánicos se mantengan alineadas las juntas durante el ensamble y el prensado, además, no deberán existir nudos en las superficies a ensamblar debido a su escasa capacidad de encolarse. Los adhesivos más utilizados para este tipo de juntas son la melamina ó el fenol-resorcinol, y deberán prensarse por cerca de 24 horas para que la junta logre su máxima capacidad. Algunas plantas instalan equipos especiales para revisar la resistencia de las juntas. Los

empalmes a tope son restringidos debido a su nula capacidad a esfuerzos de tensión.

Con pruebas hechas en Canadá, se llegó a la conclusión de que los espaciamientos longitudinales o el número de juntas en alguna sección no afecta la resistencia del elemento en conjunto. Sin embargo, siempre se busca que el empalme de una laminación no coincida con el empalme de la adyacente y no se localicen cerca. La siguiente figura nos ilustra la colocación de los empalmes que se usa generalmente en la fabricación: ( FIG 4.15 )

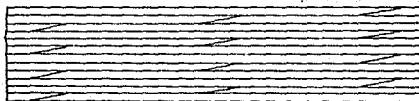


FIG 4.15: Localización de los empalmes en una viga de madera laminada.

En algunas ocasiones, se requieren secciones de ancho superior al de las tablas disponibles, y se tienen que unir lateralmente tal como se muestra en la siguiente figura: (FIG 4.16)

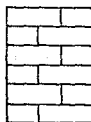


FIG 4.16: Viga con juntas laterales.

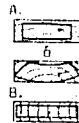
El encolado de estas juntas no es necesario, ya que no influyen en la resistencia del elemento. Sin embargo, es conveniente encolarlas para evitar futuras penetraciones de agua y humedad en la viga.

El siguiente paso del proceso es el ensamblado en seco de las laminaciones previo al encolado. La colocación de las láminas depende del tipo de sollicitación al que se verán sujetas. Por ejemplo, en flexión, las tablas de mejor calidad se colocan en los extremos superior e inferior de la viga, debido a que en esas zonas se presentan esfuerzos máximos a tensión y compresión. Material de calidad inferior puede ser colocado cerca del eje neutro, debido a que los esfuerzos en esa zona son prácticamente nulos.

Las tablas de madera pueden ser aserradas con los anillos anuales en diferentes ángulos, produciendo cortes radiales o cortes tangenciales, como lo muestra la siguiente figura: ( FIG 4.17 )

A. CORTE TANGENCIAL

B. CORTE RADIAL



SECCION  
DESPUES  
DEL SE-  
CADO

FIG 4.17: Diferentes posibilidades de corte de las tablas en función de la dirección de los anillos anuales.

Las contracciones que sufren las tablas pueden variar significativamente dependiendo de su colocación en el

miembro laminado. Se recomienda que las tablas se coloquen en alguna de las siguientes posiciones: ( FIG 4.1B )

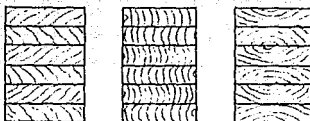


FIG 4.1B: Colocación de las tablas en el miembro laminado de acuerdo a la orientación de las fibras anuales.

#### 4.5 ENGOMADO Y PRENSADO.

Las laminaciones se unen con diferentes tipos de adhesivos, los cuales deberán permitir al miembro trabajar como una unidad.

La calidad de las juntas depende generalmente de los siguientes factores:

- A. La superficie de las tablas, la cuál deberá ser lisa y conservarse limpia para lograr un contacto adecuado entre ellas. Generalmente las tablas, durante el proceso, se cubren de moléculas de gases y vapores, polvo y mugre de la atmósfera que la rodea. Es preciso limpiar perfectamente la superficie de tal manera que se logre una unión adecuada.
- B. Las tablas deberán tener un contenido de humedad entre el 7% y 15%. Mientras el contenido de humedad sea más alto, la posibilidad de dilución del adhesivo y su penetración en los

poros de la madera aumenta considerablemente. Además, debido a la contracción y expansión que sufre la madera cuando se ve expuesta a cambios de humedad relativa del ambiente, las caras de las tablas que van a ser unidas deberán tener el mismo contenido de humedad.

El contenido de humedad de la madera también se ve afectado por el proceso de engomado, debido a la absorción de agua contenida en el adhesivo. Los incrementos de contenido de humedad para las maderas de pino utilizadas en México para diferentes adhesivos varían entre un 0.5% hasta un 4%. Es recomendable, entonces, que el contenido de humedad de las tablas no sobrepase el 12%.

C. Es necesario para una buena unión que el adhesivo humedezca completamente la superficie en donde será aplicado. Esta habilidad depende de cada adhesivo y de la superficie de la madera, que deberá tener la propiedad de contenerlo firmemente.

Para estructuras usadas en exteriores, el adhesivo deberá permitir al miembro engomado operar bajo las más rigurosas condiciones ambientales: deberá ser resistente al agua, calor, hongos, y en ocasiones, al aire contaminado por químicos.

Los adhesivos utilizados en la madera provienen de resinas naturales o sintéticas, como lo muestra la siguiente tabla: ( TABLA 4.2 )

| NATURALES  | SINTETICAS                        |
|--|-----------------------------------|
| A. ANIMALES:<br>DE HUESOS, PESCADO, CUERO,<br>ALBUMINA | B. FORMALDEIDOS:<br>FENOL<br>UREA |
| B. ALMIDON   | RESORCINOL                        |
| C. PROTEINAS:<br>VEGETALES<br>CASEINA                  | MELAMINA                          |

TABLA 4.2: Clasificación de adhesivos para la madera.

Todas las resinas sintéticas mencionadas y la caseína han sido utilizadas para la fabricación de elementos laminados, las cuáles endurecen con la aplicación de calor. A través de los años, éstas han mostrado un óptimo comportamiento. Existen otro tipo de resinas, llamadas termoplásticas, que se vuelven flexibles ante las altas temperaturas y no son recomendables.

De acuerdo a las condiciones ambientales a las que se verá expuesto el elemento laminado, será el adhesivo a utilizar en el engomado. Su comportamiento puede ser alguno de los que se mencionan a continuación:

A. Altamente resistente a la exposición ante clima, micro-organismos, agua caliente y calor seco.

B. Óptimo comportamiento ante el agua caliente, pero falla en exposiciones prolongadas frente al clima. Resistencia al agua fría y el ataque de micro-organismos.



| NATURALES  | SINTETICAS                        |
|--|-----------------------------------|
| A. ANIMALES:<br>DE HUESOS, PESCADO, CUERO,<br>ALBUMINA | B. FORMALDEIDOS:<br>FENOL<br>UREA |
| B. ALMIDON   | RESORCINOL                        |
| C. PROTEINAS:<br>VEGETALES<br>CASEINA                  | MELAMINA                          |

TABLA 4.2: Clasificación de adhesivos para la madera.

Todas las resinas sintéticas mencionadas y la caseína han sido utilizadas para la fabricación de elementos laminados, las cuáles endurecen con la aplicación de calor. A través de los años, éstas han mostrado un óptimo comportamiento. Existen otro tipo de resinas, llamadas termoplásticas, que se vuelven flexibles ante las altas temperaturas y no son recomendables.

De acuerdo a las condiciones ambientales a las que se verá expuesto el elemento laminado, será el adhesivo a utilizar en el engomado. Su comportamiento puede ser alguno de los que se mencionan a continuación:

- A. Altamente resistente a la exposición ante clima, micro-organismos, agua caliente y calor seco.
- B. Óptimo comportamiento ante el agua caliente, pero falla en exposiciones prolongadas frente al clima. Resistencia al agua fría y el ataque de micro-organismos.

C. Resistencia a la exposición del clima pero sólo por algunos años, al agua fría por mucho tiempo, pero al agua caliente por un tiempo limitado. Son resistentes al ataque de micro-organismos.

D. Son resistentes al agua fría, pero vulnerables al ataque de micro-organismos.

A continuación se muestra la clasificación de los adhesivos ante las condiciones expuestas en los párrafos anteriores: ( TABLA 4.3 )

| ADHESIVO      | CATEGORIA |           | COMPORTAMIENTO |   |   |   |
|---------------|-----------|-----------|----------------|---|---|---|
|               | NATURAL   | SINTETICO | A              | B | C | D |
| ANIMAL        | X         |           |                |   |   | X |
| ALMIDON       | X         |           |                |   |   | X |
| PROTEINA      | X         |           |                |   |   | X |
| FORMALDEIDOS: |           |           |                |   |   |   |
| FENOL         |           | X         | X              |   |   |   |
| UREA          |           | X         |                |   | X |   |
| RESORCINOL    |           | X         | X              |   |   |   |
| MELAMINA      |           | X         |                | X |   |   |

TABLA 4.3: Clasificación de los adhesivos por su resistencia a diferentes condiciones de exposición.

Es pues evidente que la resistencia de los adhesivos ante las diferentes condiciones climáticas es el principal factor para seleccionar el más conveniente.

Las estructuras de madera laminada se usan para dos condiciones de exposición:

a. Condiciones secas: El contenido de humedad en equilibrio de la madera no excederá el 18%.

b. Condiciones húmedas: El contenido de humedad en equilibrio de la madera excederá el 18%.

Para diferentes temperaturas, la " Asociación para el Desarrollo e Investigación de la Madera " ( TRDA ) en los Estados Unidos, recomienda el uso de los siguientes tipos de adhesivos: ( TABLA 4.4 )

| TEMPERATURA        | CONDICION SECA                 | CONDICION HUMEDA    | CONTAMINACION       |
|--------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|
| ALTA<br>( > 38°C ) | RESORCINOL<br>CASEINA          | RESORCINOL          | RESORCINOL          |
| BAJA               | RESORCINOL<br>FENOL<br>CASEINA | RESORCINOL<br>FENOL | RESORCINOL<br>FENOL |

TABLA 4.4: Adhesivos para diferentes condiciones del ambiente a las que se verán expuestos.

En general, y para las condiciones ambientales de México, en estructuras de uso interno, con contenidos de humedad en equilibrio menor del 15%, se recomienda la caseína; para uso externo o interno con condiciones de humedad altas, tal como en albercas, lavanderías, baños, etc. podrán usarse adhesivos provenientes de resinas fenólicas.

Los adhesivos de caseína se proveen en forma de polvo, y se combinan con agua en proporciones de una parte de peso

en polvo con dos partes de peso de agua. Estos adhesivos provienen del curado de la leche, obtenido al introducir ácidos diluidos en ella. El curado se combina con solventes alcalinos, lima hidratada o hidróxido de sodio. Algunos adhesivos de caseína están adicionados con químicos tóxicos para retardar el crecimiento de micro-organismos en altas temperaturas.

Los adhesivos provenientes de formaldehídos fenólicos fueron probablemente los primeros adhesivos sintéticos utilizados; se forman con la reacción de fenoles y cresoles, con formaldehídos y paraformaldehídos. Existen dos tipos: el primero, que puede fraguar a temperatura templada con la ayuda de catalizadores ácidos de bajo PH, pero con la desventaja que éstos generalmente dañan la madera. El segundo cura a temperaturas muy altas, lo que haría el proceso de laminado más difícil. Sin embargo, ofrecen mayor resistencia a las altas temperaturas y humedad. Existen evidencias que ambos, después de algunos años de exposición al ambiente, fallan.

Para lograr que el adhesivo tenga un comportamiento óptimo ante el medio ambiente, es común mezclar resinas resorcinólicas y fenólicas en forma líquida. Se curan a temperaturas de 24°C hasta 100°C, dependiendo de las proporciones de las resinas, el tiempo disponible de fraguado, las especies de madera y el tipo de viga a

construir. Este tipo de adhesivos son más económicos, aunque, como se ha dicho, requieren de temperaturas más altas para su curado.

Para la preparación de adhesivos a base de caseína, se coloca suficiente cantidad de agua en un recipiente, se rocía el polvo del pegamento en forma gradual mientras se agita lentamente. Se recomienda que el mezclado inicial dure 5 minutos y se deje reposar alrededor de 20 minutos; al término de este periodo, se agita nuevamente durante cinco minutos antes de usarse. Cuando se utilicen adhesivos a base de resinas fenol-resorcinólicas, es conveniente colocar el líquido en un recipiente y añadir un endurecedor en forma de polvo mientras se agita. Después de que el polvo está totalmente sumergido, se agita con rapidez. El tiempo de mezclado varía generalmente de 3 a 10 minutos, antes de que pueda usarse. El mezclado, en ambos casos, puede realizarse a mano o usando mezcladores eléctricos.

Para realizar juntas satisfactorias, es conveniente aplicar uniformemente la cantidad necesaria de adhesivo a las tablas con una máquina con rodillos dobles de hule. La aplicación del adhesivo a una sola superficie de la tabla, es satisfactoria en algunos tipos de elementos de madera. Sin embargo, para madera laminada es necesario engomar las dos caras de las tablas. Las cantidades aproximadas de adhesivo a utilizar son las siguientes: ( TABLA 4.5 )

| TIPO DE APLICACION --> | SIMPLE (grs/m <sup>2</sup> ) | DOBLE   |
|------------------------|------------------------------|---------|
| CASEINA                | 294-441                      | 357-539 |
| FENOL-RESORCINOL       | 196-294                      | 245-367 |

TABLA 4.5: Cantidades de adhesivo a utilizar en las juntas de madera laminada.

Es necesario que la cantidad de adhesivo sea la requerida. Si la capa entre las laminaciones es muy pesada, producirá juntas de baja resistencia. Además, se requiere que los empalmes hayan secado completamente.

Después de que las tablas han sido engomadas, se colocan en camas horizontales en donde son dispuestas consecutivamente, colocando en las caras exteriores del elemento dos tablas adicionales en la dirección de las laminaciones. Para lograr que la junta engomada tenga un contacto adecuado y asegurar que las capas de adhesivo sean uniformes y delgadas, se debe aplicar presión uniforme al elemento. La manera de hacerlo varía dependiendo de las instalaciones disponibles y de la cantidad de vigas a fabricar. Cuando no se cuenta con equipo especial, es común colocar bloques de madera a lo largo del elemento en ambas caras, espaciados a una distancia "s", sujetos con tornillos largos, roscas y tuercas en los extremos, como se muestra en la siguiente figura: ( FIG 4.17 )

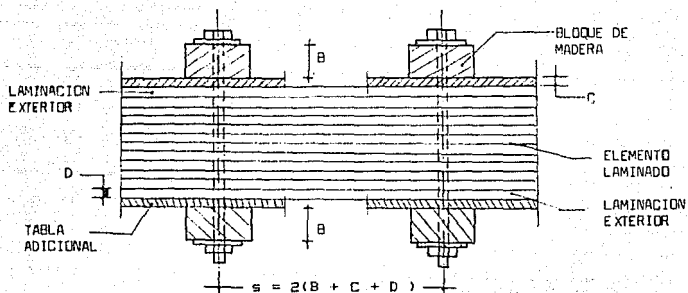


FIG 4.19: Sistema de prensado de vigas de madera laminada.

En un sistema hidráulico, se aplica presión a lo largo del elemento hasta alcanzar la requerida y se ajustan todos los bloques del elemento, de tal manera que pueda retirarse el sistema y se utilice en otro elemento. También se puede ejercer presión a las tuercas utilizando llaves indicadoras de la fuerza aplicada. Se recomienda, en este caso, aplicar una presión inicial uniforme a todos los bloques a lo largo del elemento, y después ajustando a la presión deseada partiendo del centro al extremo. Es recomendable utilizar compresímetros entre los bloques para obtener resultados más precisos.

Es importante que el tiempo máximo desde el engomado de las laminaciones hasta el inicio del prensado no sobrepase los 45 min, ya que el endurecimiento prematuro del adhesivo puede afectar la calidad del elemento terminado.

Las temperaturas a las que se prensan las laminaciones varían dependiendo del adhesivo utilizado. Cuando se usan

adhesivos provenientes de caseína, se ejerce una presión aproximada de 300 kgs/cm<sup>2</sup> durante 7 horas, a la temperatura ambiente de la planta ( t > 16°C ). Utilizando adhesivos provenientes de formaldeídos fenol-resorcinólicos, se recomienda una presión de 300 kgs/cm<sup>2</sup> durante 16 horas a una temperatura de 25°C, para elementos de uso interno, y de 40°C para elementos expuestos a cambios de humedad apreciables.

Después del engomado y prensado, las vigas se dejan expuestas a un periodo de acondicionamiento durante siete días a una temperatura de 20°C, de manera que las líneas de adhesivo logren su máxima resistencia. Sin embargo, si se requiere acortar este periodo, se pueden colocar las vigas prensadas en cámaras especiales que eleven artificialmente la temperatura hasta 90°C, construidas con materiales aislantes y con serpentines de vapor para proveer el calor necesario. Es importante el control de la humedad relativa del ambiente de la cámara, de tal manera que el elemento laminado mantenga el contenido de humedad en equilibrio. Para lograr ésto, se utilizan rociadores de agua y termómetros de bulbo. Por ejemplo, a una temperatura de 93°C, se requiere una humedad relativa del 90% para mantener un contenido de humedad del 15% en la madera. Si se utilizan altas temperaturas, sólo es necesario esperar a que enfrie la pieza, para seguir el proceso.



#### 4.6 ACABADOS.

Después del periodo de engomado y prensado, las vigas sufren imperfecciones provocadas por el escurrimiento lateral del adhesivo, por lo que es necesario realizar un cepillado final. Dependiendo de las instalaciones con que se cuenten, se utilizan generalmente cepillos manuales; sin embargo, éstos toman más tiempo en la operación y no se realiza en forma adecuada. En los Estados Unidos, se usan máquinas cepilladoras diseñadas especialmente para elementos de madera laminada, debido a que los adhesivos ya endurecidos tienden a desafilar rápidamente las cuchillas de equipo común.

En base a los requerimientos del proyecto, en ocasiones se manufacturan vigas de formas especiales, para lo que es necesario cortar los elementos a dimensiones especificadas previamente. Para realizar esta operación, se utilizan sierras portátiles circulares verticales o ajustables para diferentes ángulos. Sin embargo, dependiendo del equipo con que se cuente, se pueden adaptar sierras existentes en la planta.

Durante el procesamiento final, se deberán cumplir los requerimientos de apariencia del elemento, los cuales no se relacionan con los requisitos estructurales, sino establecen la manera de cómo se verá el elemento después de terminado.

De acuerdo al Instituto Americano de la Construcción en Madera ( AITC ), se deberá cumplir con lo siguiente:

- a. Las caras de las laminaciones expuestas a la vista, necesitan estar libres de nudos. Si existen, se insertará madera limpia en su lugar, procurando que sea del color de las laminaciones.
- b. Las superficies del elemento deberán estar correctamente cepilladas.
- c. Las laminaciones expuestas a la vista deberán cantearse.
- d. Las laminaciones deberán poseer las características naturales de crecimiento de la madera.

Después, se realizan las perforaciones y ranuras necesarias para colocar las conexiones que, de acuerdo al diseño, se necesiten.

Los miembros estructurales de madera laminada, en general, están expuestos a los siguientes factores:

- a. Pudrimiento.
- b. Ataque de insectos.
- c. Fuego.

Para elementos utilizados en altas condiciones de humedad, es necesario tratar la madera adecuadamente para protegerla de la pudrición y del ataque de insectos. Además, todos los elementos, en interiores y exteriores, requerirán diseñarse adecuadamente contra el fuego.

En general, existen dos métodos para proteger la madera bajo condiciones de humedad:

- a. Tratamiento después de que el proceso ha terminado.
- b. Tratamiento aplicado antes del engomado.

Como una regla general, es preferible engomar antes del tratamiento, lo cual provee una cubierta uniforme alrededor de todo el elemento. ( FIG 4.20 )



FIG 4.20: Tratamiento de la madera laminada..

Para vigas rectas el tratamiento se realiza después de manufacturar el elemento, ya que es más económico y menos laborioso. Las líneas de engomado en ocasiones bloquean la penetración del preservador, ocasionando pudrición cuando se desarrollan rajaduras en la capa exterior. Sin embargo, se ha comprobado una óptima protección de las vigas cuando han sido adecuadamente fabricadas y tratadas.

Los métodos de tratamiento pueden ser mediante presión aplicada antes del engomado, en donde la madera es colocada dentro de cilindros especiales y sometida a presiones mayores que la atmosférica. Los procesos sin presión, consisten en aplicaciones de preservador en forma superficial, inmersión, difusión, baños en caliente y frío, y procesos empleando vacío. Para elementos terminados de madera laminada generalmente se utilizan tratamientos mediante aplicaciones con brocha o aspersión.

Para los tratamientos sin presión se recomiendan los solventes orgánicos, con repelentes al agua que tienen como función bajar la tasa de absorción de agua por la madera y con la adición de un fungicida y un insecticida que confieren un grado bastante confiable de protección. Un preservador recomendado es el que se muestra en la siguiente tabla: ( TABLA 4.6 )

| PRESERVADOR REPELENTE AL AGUA      |                              |
|------------------------------------|------------------------------|
| INGREDIENTE                        | CANTIDAD PARA 10 LTS         |
| PENTAFLUOROFENOL                   | 1250 grs                     |
| INSECTICIDA ( LINDANO O CLORDANO ) | 250 ml                       |
| PARAFINA                           | 70 grs                       |
| ACEITE DE LINAZA                   | 825 ml                       |
| SOLVENTE ( TOLUENO, THINER )       | SUFICIENTE PARA HACER 10 LTS |

TABLA 4.6: Preservador para madera.

El pentaclorofenol es el más accesible en México y los insecticidas pueden presentarse en líquidos emulsionantes o en polvo. El rendimiento aproximado de la solución preservadora es de 3.0 m<sup>2</sup>/litro y es eficiente contra la pudrición y el ataque de insectos.

Los insecticidas y preservadores de madera son tóxicos para los humanos. Cuando se manejan se deben seguir las indicaciones marcadas por el productor. Además, los solventes de algunos preservadores son inflamables. Cuando se apliquen insecticidas disueltos en solventes orgánicos, los operarios deberán usar guantes de hule y ropa especial para este trabajo.

Por otro lado, se ha comprobado que la madera, cuando se ve expuesta al fuego, pasa a través de tres etapas: ignición, extendimiento de las flamas y penetración. La inflamabilidad de la madera depende de su tamaño. Los elementos de madera laminada son usualmente de secciones grandes y pueden considerarse en sí mismos como retardantes del fuego.

La resistencia al fuego es una propiedad de una estructura y no de un material en particular. Como se mencionó en un capítulo anterior, la madera no se encuentra en desventaja con otros materiales en condiciones de exposición al fuego. La madera puede arder, pero lo hace

lentamente y la falla del miembro se presenta menos crítica que en el acero. Es por eso que las propiedades de resistencia al fuego no se pueden mejorar grandemente.

Muy a menudo no se aprecia que el término "retardante" solamente indica una reducción en la combustión, y no hace al elemento "resistente al fuego". La resistencia al fuego implica inmunidad y, desafortunadamente, la madera tratada es igualmente susceptible que la no tratada.

El uso de químicos retardantes solamente reducen la intensidad de las flamas que rodean al elemento, aumentando las temperaturas hasta que la madera se convierte en exotérmica, produciendo gases incombustibles y formando una barrera entre la madera y las flamas; sin embargo, no previenen la descomposición y la madera tratada pierde resistencia a la misma velocidad que la madera sin tratar.

La reducción del desarrollo de las flamas sobre la madera es, entonces, el principal objetivo de los retardantes contra el fuego.

La aplicación de capas de sales solubles en agua en la superficie del elemento es el método recomendado para este tipo de tratamiento. Generalmente se utilizan sales provenientes de sulfato de amonio. Sin embargo, este tipo de retardantes elevan el contenido de humedad de la madera y

debe preverse cierta pérdida de resistencia que se tomará en cuenta en el diseño. Se ha comprobado en Estados Unidos que las sales también afectan el comportamiento de la madera al reducir su capacidad a la flexión y rigidez. Los retardantes contra el fuego presentan dificultades para el acabado decorativo de los elementos y el barnizado se vuelve difícil.

Un método efectivo de proveer seguridad contra el fuego en estructuras de madera es diseñarlas de tal manera que la combustión se presente en forma lenta, permitiendo de esta manera la rápida salida de los ocupantes en una edificación. Algunas naves industriales debidamente diseñadas y construidas con estructuras largas de madera arden lentamente y son más seguras que aquellas formadas por materiales "incombustibles".

El tratamiento de madera laminada contra el fuego es caro y generalmente innecesario, debido a que se puede dar una óptima seguridad con un diseño apropiado.

Por último, a los elementos tratados se les aplican varias capas de "primer" ( de preferencia de aluminio ) para prevenir absorción o pérdida de humedad, y dos capas de barniz, para darle protección a las líneas de adhesivo y ayudar a prevenir cambios dimensionales en la madera.

#### 4.7 TRANSPORTE Y MONTAJE.

Los elementos deberán ser envueltos debidamente con cubiertas resistentes al agua, generalmente de plástico y debidamente selladas, antes de que se envíen al sitio de los trabajos, de tal manera que se prevengan humedades que puedan ser absorbidas por la madera.

La madera laminada necesita de una protección adecuada durante la transportación y durante el montaje. Se recomiendan las siguientes especificaciones, según el AITC:

1. Los elementos laminados durante la transportación y la entrega en obra, no deben arrastrarse ni tirarse. Las maniobras bien realizadas son importantes para prevenir cualquier daño en la superficie del elemento.
2. Los sistemas de cables y ganchos no deberán usarse en las maniobras, a menos que exista un bloqueo adecuado entre el cable y el miembro.
3. El almacenamiento en el sitio de la obra deberá ser el adecuado, buscando que se cuente con un local techado.
4. La envoltura colocada para protección deberá permanecer intacta hasta que los elementos colocados sean aislados del exterior por la misma construcción. Si la envoltura se tiene que remover en ciertos puntos para las conexiones, deberá envolverse después de que la conexión se realice.

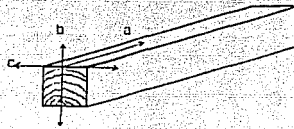


## 5. PROPIEDADES MECANICAS.

### 5.1 ANTECEDENTES.

La madera es un material celular constituido de fibras, que en general da su resistencia mecánica paralelamente al eje longitudinal del árbol. A diferencia de los materiales estructurales considerados isotrópicos, sus propiedades mecánicas y elásticas no son las mismas en todos los ejes y varían con la dirección de la carga aplicada y del grano, y la posición de los anillos anuales.

La madera tiene 3 ejes mutuamente perpendiculares de simetría elástica, que son los que se muestran en la siguiente figura: ( FIG 5.1 )



- a. Longitudinal
- b. Radial
- c. Tangencial

FIG 5.1: Ejes de simetría elástica de la madera.

Los tres ejes ortotrópicos de la madera L, T, R definen tres planos que son: LT, LR, RT. Como resultado de la naturaleza ortotrópica de este material se requieren 3 módulos de elasticidad: EL, ET, ER, 3 módulos de corte: GLT, GLR, GRT, así como seis módulos de Poisson:  $\mu_{LT}$ ,  $\mu_{TL}$ ,  $\mu_{LR}$ ,  $\mu_{RL}$ ,  $\mu_{RT}$ ,  $\mu_{TR}$ , para describir el comportamiento del material.

Los procedimientos experimentales para determinar los valores de estas constantes son muy complicados y existe muy poca información. Sin embargo, se ha comprobado que las propiedades en los sentidos tangencial y radial no difieren significativamente, de manera que para efectos prácticos de diseño, basta distinguir entre propiedades paralelas a las fibras y perpendiculares a ésta.

Las relaciones esfuerzo-deformación de la madera son variables según la especie, el tipo de acción, la forma en que se hace el ensayo o prueba, las características de crecimiento y otros factores. Sin embargo, el comportamiento de la madera se puede visualizar en pruebas en tensión y compresión axial, en una dirección paralela a las fibras. En general, la forma de la gráfica esfuerzo-deformación correspondiente es semejante a la que se muestra en la figura: ( FIG 5.2 )

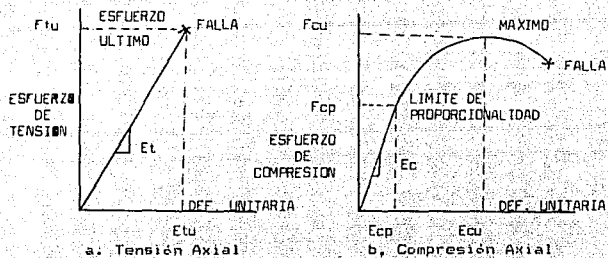


FIG 5.2: Comportamiento de la madera a tensión y compresión.

Como se observa, a medida que la carga se incrementa, la relación esfuerzo-deformación varía linealmente y la madera exhibe un comportamiento elástico en ambos casos.

En tensión paralela a las fibras, la variación lineal de esfuerzos y deformaciones termina hasta el punto de falla, que ocurre súbitamente al romperse las fibras en tensión, mostrando de esta manera un comportamiento frágil.

En compresión, la madera muestra un comportamiento lineal elástico hasta el límite de proporcionalidad. A partir de este punto, algunas fibras comienzan a pandearse y la probeta sufre mayores deformaciones para incrementos iguales de carga, lo que ocasiona que la relación esfuerzo-deformación siga una forma curva hasta alcanzar un valor máximo de esfuerzo y continúa en forma descendente hasta la

falla. En algunas especies y bajo condiciones secas, la ductilidad es mínima.

Para pruebas en probetas, libres de defectos, la resistencia última a la tensión,  $F_{tu}$ , es mayor que la resistencia última a compresión,  $F_{cu}$ . Se ha comprobado experimentalmente que las fibras en tensión muestran un comportamiento lineal elástico hasta la falla que normalmente ocurre a niveles de esfuerzo 2 o 3 veces mayor que la capacidad de carga en compresión. Esta forma de comportamiento se puede extrapolar a elementos de madera laminada de tamaño estructural de alta calidad, con nudos pequeños, sin desviaciones en las fibras y con un control de calidad adecuado en el proceso de fabricación.

## 5.2 COMPORTAMIENTO EN FLEXION.

Tanto para madera maciza como para madera laminada, el comportamiento a flexión tiene, en general, la siguiente forma: ( FIG 5.3 )

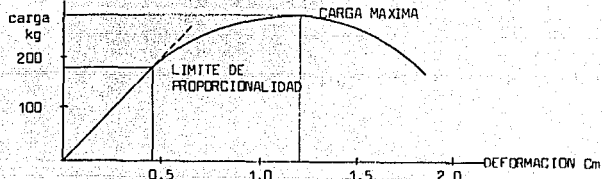


FIG 5.3: Comportamiento a flexión de la madera laminada.

A medida que la carga se incrementa, las relaciones esfuerzo - deformación varían proporcionalmente, y la viga se comporta elásticamente hasta el límite de proporcionalidad. La distribución de esfuerzos en esta etapa de carga es la siguiente: ( FIG 5.4 )

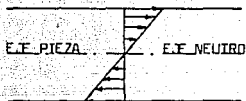


FIG 5.4: Distribución de esfuerzos a flexión en el rango elástico.

Bajo la acción de cargas, las fibras en la parte superior del elemento se contraen y en la parte inferior se extienden. Debido a que el módulo de elasticidad en tensión es un poco mayor que el de compresión, si la pieza es simétrica, el eje neutro no pasa exactamente por el centro de gravedad de la sección. Experimentalmente se ha encontrado que la relación de módulos de elasticidad  $E_T/E_C$  es aproximadamente 1.05, y se considera para fines de diseño, que la profundidad del eje neutro en el rango elástico se localiza a la mitad de la sección.

Si se incrementa la carga arriba del punto correspondiente al límite de proporcionalidad, la distribución de esfuerzos deja de ser lineal y la profundidad del eje neutro aumenta. Este comportamiento se

debe a las diferencias existentes en las relaciones esfuerzo-deformación de la madera sometida a compresión o tensión. La distribución de esfuerzos en esta etapa es la siguiente: ( FIG 5.5 )

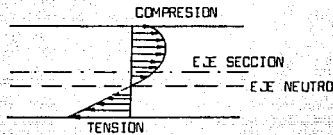


FIG 5.5: Distribución de esfuerzos correspondiente a la deformación plástica de las fibras a compresión en un elemento sujeto a flexión.

Debido a que la falla por tensión es frágil, en la sección inferior al eje neutro, la relación de esfuerzos continúa lineal, mientras que las fibras en compresión comienzan a pandearse y dejan de comportarse elásticamente.

En maderas blandas generalmente la falla por flexión se inicia con el aplastamiento de las fibras extremas a compresión, a lo que sigue la rotura de las fibras en tensión. Sin embargo, en algunas maderas duras de especies latifoliadas el comportamiento puede ser inverso, iniciándose la falla en las fibras extremas sometidas a tensión.

### 5.3 PRUEBAS DE LABORATORIO.

El estricto control de calidad en el proceso de fabricación de la madera laminada, permite al elemento trabajar en conjunto como si fuera una pieza maciza. Esto se ha comprobado experimentalmente y en condiciones de servicio en países como Estados Unidos y Canadá. El comportamiento de la madera laminada se puede obtener de las pruebas que se realizan para madera maciza, tomando en cuenta en el diseño algunos factores adicionales propios de la madera laminada.

#### 5.3.1 ENSAYES DE PROBETAS PEQUEÑAS.

La madera debido a sus características orgánicas y de crecimiento natural, presenta, como se ha visto, irregularidades en forma variada. En este tipo de ensayos, se elimina la influencia de estas irregularidades. Las pruebas se realizan para determinar la resistencia a diversas acciones y se escogen probetas pequeñas que no tengan nudos ni rajaduras y con las fibras rectas y paralelas a los lados.

Los pequeños especímenes a utilizar provienen de los árboles, generalmente identificados y seleccionados en campo, en donde serán representativos para cada una de las

especies. Se utilizan elementos libres de defectos de 2 x 2 cms de sección transversal, pero de diversas longitudes, dependiendo del tipo de prueba. En el laboratorio se controlan todos los factores que podrán influenciar los resultados, tales como el contenido de humedad y los defectos.

Los datos obtenidos en estas pruebas no son elementos específicos para propósitos de diseño. Un número elevado de factores de reducción han sido determinados, los cuales aplicados a la información obtenida, permiten establecer los esfuerzos de diseño.

Las pruebas más comunes son las siguientes:

a. Flexión estática.

La prueba de laboratorio provee generalmente la siguiente información:

- Máximo esfuerzo a flexión ( Módulo de Rotura ).
- Módulo de elasticidad.
- Trabajo a carga máxima.
- Trabajo total del espécimen.

Para esta prueba se preparan especímenes de 2 x 2 x 30 cms, los cuales se sostienen en apoyos móviles en un claro



de 28 cms. La carga es aplicada en el centro a través de una cabeza de carga a velocidad constante: ( FIG 5.6 )



FIG 5.6: Prueba de flexión estática.

El máximo esfuerzo por flexión indica el esfuerzo que la madera puede soportar cuando se aplica una carga lenta y constante. El módulo de elasticidad es la medida de la rigidez e indica la resistencia a la deflexión.

b. Flexión dinámica.

Esta prueba mide la capacidad de la madera de resistir cargas repentinas: ( FIG 5.7 )



FIG 5.7: Flexión dinámica ( Impacto ).

Se usan especímenes de 2 x 2 cms en un claro de 30 cms. La carga se aplica lanzando un martillo de 500 grs de peso en alturas sucesivas incrementándola regularmente, hasta que ocurre la ruptura por completo.

c. Compresión paralela al grano.

En esta prueba, se determina el máximo esfuerzo de ruptura de la madera bajo una carga aplicada lentamente paralela al grano. La información permite determinar la resistencia de columnas o elementos en compresión. (FIG 5.8)

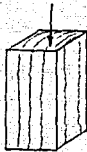


FIG 5.8: Compresión paralela al grano.

Las piezas de prueba son de 2 x 2 cms de sección transversal y de 20 cms de largo, comprimidas a lo largo mediante un bloque esférico, con velocidad creciente de 0.060 cm/seg. Se registra la falla y las deformaciones correspondientes.

d. Compresión perpendicular al grano.

Se utiliza la misma sección y se aplica una carga en dirección perpendicular al grano. La prueba se realiza en las superficies radial y tangencial: ( FIG 5.9 )

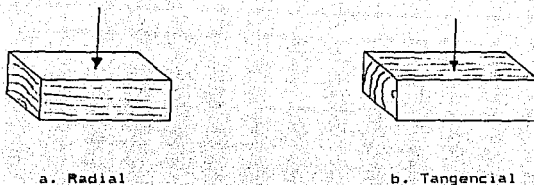


FIG 5.9: Compresión perpendicular al grano.

d. Dureza.

La dureza representa la resistencia al desgaste y al daño. Se mide la carga requerida para incrustar una bola de acero, con un diámetro de 1.13 cms, a una profundidad de 0.56 cms: ( FIG 5.10 )

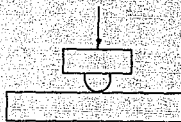


FIG 5.10: Medición de la dureza.

Los especímenes son de 2 x 2 cms de sección transversal y 15 cms de largo. La velocidad de penetración es de 0.65 cms/min.

e. Cortante paralelo al grano.

Esta prueba mide la resistencia de la madera a los esfuerzos cortantes que se producen a lo largo de la dirección del grano. También se realiza la prueba en dirección tangencial y radial: ( FIG 5.11 )



FIG 5.11: Cortante paralelo al grano.

Se escoge un espécimen de la misma sección transversal, utilizando un elemento deslizante que aplicará la carga simétricamente. Los esfuerzos se miden dividiendo la máxima carga que causa el corte por el Área de cortante. Los esfuerzos cortantes en el sentido longitudinal generalmente son más críticos que en el sentido tangencial o radial, y son los que gobiernan el diseño por cortante.

f. Tensión paralela al grano.

Este tipo de prueba, para fines de diseño, generalmente no se realiza en los laboratorios ya que es difícil en la madera determinar esta propiedad. Generalmente la madera no se hace trabajar a tensión debido a la falla frágil que se presenta cuando el elemento agota su capacidad. Cuando se

requiere realizar la prueba se usan especímenes de 6mm de espesor, 2 cms de ancho y 20 cms de largo. Se usan tenazas dentadas para dar la carga axial y se aplica a velocidad de 0.13 cms/min. ( FIG 5.12 )

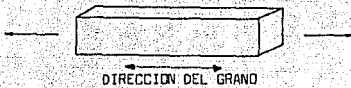


FIG 5.12: Tensión paralela al grano.

g. Tensión perpendicular al grano.

Es la capacidad de la madera de resistir los esfuerzos a través del grano. ( FIG 5.13 )

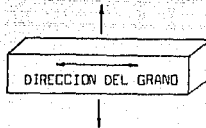


FIG 5.13: Tensión perpendicular al grano.

### 5.3.2 ENSAYES A ESCALA NATURAL DE PIEZAS ESTRUCTURALES.

La información obtenida por el procedimiento anterior es de utilidad limitada ya que los resultados no reflejan la influencia de características especiales de la madera tales como los nudos, la inclinación de las fibras y las rajaduras.

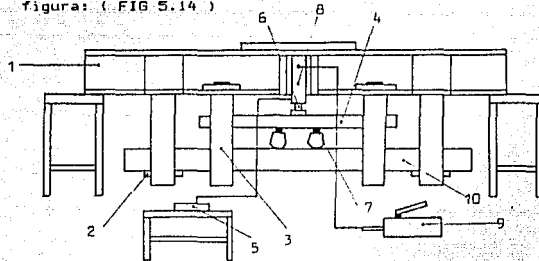
En este otro enfoque, se obtienen las propiedades de la madera ensayando especímenes de diferentes calidades estructurales a escala natural, sometidas a diversas acciones. Este tipo de pruebas proporciona información más completa, ya que se tiene en cuenta en forma directa la influencia de los defectos e irregularidades propios de la madera en la forma en que se utiliza en aplicaciones estructurales. En este tipo de ensayos, como en el de probetas pequeñas, los resultados obtenidos se extrapolan para madera laminada, verificando en laboratorio los resultados con especímenes laminados, y tomando en cuenta en el diseño algunos factores propios de estos elementos.

En algunos países, como Estados Unidos, Canadá e Inglaterra, en donde el uso de estructuras de madera es muy amplio, se han realizado pruebas de laboratorio en infinidad de especies durante muchos años, tanto en especímenes pequeños como en elementos a escala natural. Las propiedades de las maderas son por demás conocidas. Sin embargo, hasta hace algunos años no se contaba en México con suficiente información de las propiedades mecánicas de los pinos mexicanos para usos estructurales. El diseñador se veía en la necesidad de recurrir a las propiedades de maderas ya establecidas en otros países y aplicarlas en México, con la incertidumbre de corresponder a las propiedades de los pinos mexicanos, o recurrir a la escasa información proveniente de

pruebas en pequeñas probetas que se habían realizado hasta entonces.

Sin embargo, se desarrolló un amplio programa de investigación en LACITEMA ( Laboratorio de Ciencia y Tecnología para la Madera ) entre los años de 1978 y 1987, en donde se ensayaron aproximadamente 15000 piezas de tamaño estructural en condición seca y de donde se obtuvo información útil para el diseño.

Por ejemplo, para la realización de las pruebas a flexión, se utilizó el equipo que se muestra en la siguiente figura: ( FIG 5.14 )



- |                           |                     |
|---------------------------|---------------------|
| 1. Viga 1 de 14" de Acero | 6. Escala de acero  |
| 2. Placas                 | 7. Rodillos         |
| 3. Soporte Lateral        | 8. Cilindro         |
| 4. Barra Aplicadora       | 9. Bomba            |
| 5. Indicadores Digitales  | 10. Viga a ensayar. |

FIG 5.14: Equipo utilizado en México para pruebas de flexión estática de madera de pino estructural.

El equipo consiste básicamente en una viga "I" de acero de 14" con dos soportes en los extremos. La carga es aplicada mediante un cilindro colocado al centro del claro, movido por una bomba de mano. El cilindro transmite la carga a una barra de sección rectangular que a la vez la transmite a la viga de madera en 2 posiciones fijas, distanciadas un tercio del claro, mediante dos aplicadores de madera sobre rodillos.

De las pruebas se observó lo siguiente:

1. No existe una tendencia consistente que indique que la madera de pino de una región sea más resistente que de otras.
2. Se comprobó que las propiedades de los pinos mexicanos se asemejan a la especie Douglas Fir ampliamente estudiada en Estados Unidos.
3. No existen diferencias apreciables entre la resistencia de la madera obtenida en diversas épocas de corte.



## **6. DISEÑO, NORMAS Y REGLAMENTOS.**

### **6.1 CONSIDERACIONES GENERALES.**

#### **6.1.1 CONCEPTOS BASICOS.**

De manera sencilla, se puede considerar que una estructura es todo aquello que impide que una construcción u obra se derrumbe. También se puede concebir como un sistema, es decir, un conjunto de elementos que se combinan en forma ordenada para cumplir una determinada función. Por ejemplo, un edificio está integrado por algunos subsistemas: elementos arquitectónicos, estructurales, de instalaciones, etc. La función de un sistema puede ser salvar un claro, encerrar un espacio o contener un empuje.

Se puede decir que el diseño estructural es un arte en el que en base a las leyes de la física y las matemáticas, las investigaciones en el laboratorio y la experiencia en construcciones anteriores, se obtiene la geometría y las dimensiones de estructuras de manera que aseguren un comportamiento seguro, eficiente, estéticamente agradable y económico.

En general, el diseño de un elemento es un proceso iterativo que sigue los siguientes pasos:

- a. Suponer las dimensiones de las secciones.

- b. Se determinan los efectos ocasionados por las cargas y demás solicitaciones sobre una estructura.
- c. Se revisa el comportamiento de los miembros sometidos a las solicitaciones calculadas.

Si el comportamiento es satisfactorio, el problema ha sido resuelto, de lo contrario, se repite el ciclo proponiendo nuevas dimensiones, realizando un nuevo análisis y revisando de nuevo el comportamiento.

En resumen, el diseño estructural es un proceso en el que se da forma a una estructura para que cumpla una determinada función con cierto grado de seguridad. Además, en condiciones de servicio, su comportamiento debe ser aceptable. El sistema estructural deberá resistir las fuerzas a las que va a estar sometido, sin colapso o mal comportamiento. Las soluciones estructurales están sujetas a las restricciones que surgen de la interacción con otros aspectos del proyecto y a las limitaciones generales de costo y tiempo de ejecución.

#### 6.1.2 ACCIONES.

La determinación de las acciones es una parte importante del diseño. Desde el punto de vista de seguridad estructural, la clasificación más conveniente se realiza en

base a la duración con que obran sobre la estructura. Estas pueden ser:

a. Permanentes.

Obran en forma continua sobre la estructura y su intensidad varía poco con el tiempo.

b. Variables.

Son aquellas que obran sobre la estructura y su intensidad varía significativamente con el tiempo.

c. Accidentales.

No se deben al funcionamiento normal de la construcción; pueden alcanzar intensidades significativas sólo durante lapsos breves.

Las acciones se deben a fenómenos físicos generalmente muy complejos y se tiene una gran incertidumbre en su conocimiento. Es por eso que los reglamentos especifican valores de diseño conservadores, es decir, que tienen una probabilidad pequeña de ser excedidas del lado desfavorable.

Las acciones no se presentan aisladas y en un instante de la vida útil de la construcción, estarán presentes diferentes acciones. Los reglamentos especifican que debe revisarse la seguridad de la estructura para el efecto combinado de todas las acciones que tengan una probabilidad no despreciable de ocurrir simultáneamente.

### 6.1.3 RESISTENCIA.

Para determinar la resistencia de una estructura, es necesario realizar procedimientos analíticos en base a sus propiedades geométricas y las características mecánicas de los materiales componentes.

Los procedimientos de cálculo pueden basarse en 2 aspectos:

- a. Modelos analíticos del comportamiento de la estructura, ajustados generalmente en función de resultados experimentales.
- b. Conocimiento empírico, cuando no se han podido establecer modelos teóricos suficientemente confiables.

En el cálculo de la resistencia de la estructura, existen incertidumbres significativas derivadas de la variabilidad de las propiedades del material y la falta de precisión de los métodos de cálculo. Al igual que en la determinación de las acciones de diseño, las fuentes de incertidumbre se suelen tomar en cuenta en los reglamentos especificando valores de diseño conservadores.

### 6.1.4 METODO DE DISEÑO.

A diferencia de versiones de normas y reglamentos tanto en México como en Estados Unidos, en donde se usaban métodos convencionales de diseño de estructuras de madera mediante esfuerzos permisibles, se está adoptando ahora un enfoque de diseño de estados límite en base al comportamiento esencialmente elástico del material.

En México, el cambio ha resultado conveniente porque el nuevo método de diseño es congruente con el enfoque general del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF/1987).

El formato utilizado es semejante al de varios reglamentos recientes para el diseño de estructuras de madera, tanto en Canadá, Europa y últimamente en Estados Unidos.

El enfoque de estados límite no es sino un formato en el que se consideran todos los aspectos del diseño en forma ordenada y racional. Se trata de lograr que las relaciones acción-respuesta de un elemento estén dentro de límites que se consideren aceptables. Según este enfoque, una estructura o un elemento estructural deja de ser útil cuando alcanza un estado límite, en el que deja de realizar adecuadamente la función para la cual fue diseñada.

Se definen estados límite de dos tipos:

a. De resistencia.

Corresponden a la capacidad máxima de carga asociada con el colapso total o parcial de la estructura. Dentro de este tipo de estados límite se tienen:

- Falla de una sección por cortante, flexión, compresión, torsión o alguna combinación de estos efectos.

- Inestabilidad.

- Fatiga.

b. De servicio.

Están relacionados con los criterios que gobiernan el uso normal de la construcción. Estos límites comprenden los siguientes:

- Deflexiones.

- Agrietamientos.

- Vibraciones.

- Daño a elementos no estructurales.

El objetivo del diseño estructural se puede replantear como el de proporcionar una seguridad adecuada ante la aparición de estados límite de falla y, además, procurar que en condiciones normales de operación no se sobrepasen los estados límite de servicio. La siguiente figura nos ayuda a ilustrar el concepto de estado límite: ( FIG 6.1 )

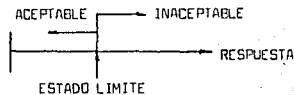


FIG 6.1: Respuesta de la estructura y estados límite.

El procedimiento para evaluar la seguridad consiste en comprobar que para las distintas combinaciones de acciones y ante la aparición de cualquier estado límite que pudiera presentarse, la resistencia de diseño sea igual o mayor que la fuerza o acción de diseño.

Las resistencias de diseño se obtienen multiplicando las resistencias teóricas por un factor de resistencia FR y las acciones de diseño se obtienen multiplicando las fuerzas internas por un factor de carga FC. Las fuerzas internas son las fuerzas axiales, cortantes y momentos producidos en los elementos estructurales por las acciones externas; se obtienen a partir de un análisis elástico. Las acciones externas son las diversas cargas que actúan sobre la estructura tales como el peso propio, el peso de muebles y personas, los sismos y el viento. El factor de carga tiene por objeto tomar en cuenta las consecuencias de la falla y las incertidumbres en la magnitud de las acciones y los métodos de análisis.

Esquemáticamente, el método de diseño por estados límite puede ilustrarse como sigue:

$$\text{RESISTENCIA DE DISEÑO} > \text{FUERZA INTERNA DE DISEÑO}$$
$$( FR \times \text{Resistencia Teórica} ) > ( FC \times \text{Fuerza interna debida a las acciones externas} )$$

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal adopta este método para todos los materiales, lo cual aporta ventajas apreciables. Quizá la más importante de ellas es la posibilidad de uniformizar el nivel de seguridad de estructuras de distintos materiales mediante una elección apropiada de los factores de reducción de resistencia. Además, los formatos de estados límite permiten la fácil incorporación de nueva información a medida que se cuente con ella, mediante sencillos ajustes en los valores de las resistencias de los materiales, los factores de reducción de resistencia y los factores de carga. La uniformización de criterios de diseño, por otra parte, hace más racional y sencillo el proyecto de estructuras compuestas de diferentes materiales. El que exista sólo un enfoque de diseño, indudablemente simplifica la labor del proyectista y evita errores originados por la mezcla de diferentes criterios. Aunque el alcance de este reglamento no incluye las estructuras de madera laminada, en la presente tesis se propone una metodología de diseño con el enfoque de estados límite, basada en normas y reglamentos de distintos países.

## 6.2 ESFUERZOS BASICOS.

Para el dimensionamiento de vigas, los esfuerzos de flexión, cortante, compresión perpendicular a las fibras y el módulo de elasticidad intervienen en el diseño.



En el capítulo anterior se mencionó que los esfuerzos básicos de diseño para estructuras de madera laminada provienen de pruebas realizadas en madera maciza, ajustando los valores a ciertos aspectos particulares de estos elementos.

Los esfuerzos obtenidos en pruebas hechas en Estados Unidos, provienen de ensayos de probetas "limpias". Los resultados obtenidos, sin embargo, no reflejan las propiedades resistentes de las piezas estructurales. El procedimiento a seguir es la obtención de un esfuerzo básico, que es un índice de la resistencia de la madera libre de defectos, al que se aplican factores según la calidad del elemento estructural en estudio.

Para obtener dicha información, se realiza un número elevado de ensayos de probetas limpias pequeñas. Las distribuciones probabilísticas de los resultados son parecidas a las normales o gaussianas. En lugar de tomar el valor promedio de los datos, se toma un valor bastante menor que la media de manera que la probabilidad de tener valores inferiores sea baja ( 5% de límite de exclusión ). Los esfuerzos básicos se obtienen dividiendo los valores correspondientes al límite de exclusión adecuado por un coeficiente de reducción, el cual, engloba un factor de seguridad que involucra lo siguiente:

- Posibilidad de sobrecarga.
- Procedimiento de construcción.
- Defectos de la madera.

Los coeficientes de reducción se basan en la interpretación de la experiencia acumulada a través de los años.

La obtención de los esfuerzos básicos de diseño en Estados Unidos para la madera en general se realiza mediante el siguiente procedimiento:

- a. Se escogen muestras representativas de diferentes especies libres de defectos.
- b. Se ensayan en laboratorio en condiciones secas.
- c. Se obtienen los esfuerzos básicos considerando distribuciones probabilísticas gaussianas, al límite de exclusión del 5% y utilizando los debidos factores de seguridad y coeficientes de reducción de acuerdo a la calidad estructural del elemento a diseñar.

Hasta hace algunos años, en México se realizaron pruebas en piezas pequeñas libres de defectos con un procedimiento semejante al expuesto en el párrafo anterior. El análisis de los resultados se efectuó considerando un límite de exclusión del 1%, obteniéndose resultados bastante

conservadores, ya que rigen las características de las especies menos resistentes.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, en los últimos diez años, se realizó un extenso programa en el Laboratorio de Ciencia y Tecnología para la Madera (LACITEMA) del Instituto Nacional Sobre Recursos Bióticos (INIREB). El estudio se basó en el ensayo de piezas de tamaño estructural en lugar de las pequeñas probetas libres de defectos, tradicionalmente usadas para determinar las propiedades mecánicas de la madera. Una de las principales ventajas del ensayo de piezas de tamaño estructural reside en que los resultados reflejan de manera directa la influencia de los defectos correspondientes a las diferentes clasificaciones que se hayan previsto.

Las pruebas se realizaron en piezas de madera maciza de tamaño estructural en condición seca, en donde los resultados se agruparon de acuerdo a cada propiedad y tamaño. Se ordenaron progresivamente los datos de las piezas falladas, empezando por el valor de resistencia más bajo. Se utilizó una técnica estadística no paramétrica para determinar el nivel de resistencia correspondiente a un nivel de confianza del 75%, para el 5o percentil de la distribución.

Los resultados de los experimentos no variaron consistentemente en la resistencia y rigidez de la madera clasificada como coníferas proveniente de diferentes regiones. En este estudio se incluyeron muestras de los estados de México, Durango, Chihuahua y Oaxaca.

Pruebas de laboratorio para vigas de madera laminada no se han realizado en México. Sin embargo, en Estados Unidos y en algunos países europeos, se ha comprobado que mediante algunos ajustes a los esfuerzos básicos para madera maciza, se pueden obtener valores característicos de esfuerzos para madera laminada.

#### 6.3 FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA DE VIGAS DE MADERA.

Debido a las características de la madera, los esfuerzos básicos no se utilizarán directamente en el diseño, sino que deberán ser modificados por algunos factores que tratan de reflejar su comportamiento.

Distintos organismos en varios países han realizado estudios sobre el comportamiento de la madera tendientes a formar normas y reglamentos. Se han tomado diferentes aspectos de cada uno de ellos para conformar la propuesta de diseño en la presente tesis. Los organismos y algunas normas serán referidos de acuerdo a las siguientes iniciales:

RCDF----- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

NTC/EM--- Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Madera.

LACITEMA- Laboratorio de Ciencia y Tecnología para la Madera del Instituto Nacional Sobre Recursos Bióticos.

IG/UNAM--- Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

AITC----- American Institute of Timber Construction (E.U.A.)

FPL/USDA- Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture.

NFPA----- National Forest Products Association ( E.U.A.).

CWC----- Canadian Wood Council.

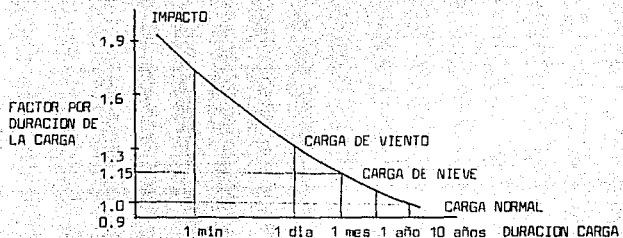
CSA----- Canadian Standards Association.

### 6.3.1 FACTORES PARA MADERA MACIZA Y MADERA LAMINADA.

#### 6.3.1.1 DURACION DE LA CARGA.

La madera tiene la propiedad de resistir cargas más grandes por periodos cortos de tiempo. Los esfuerzos básicos de diseño se proveen para condiciones normales de carga, en donde los esfuerzos cercanos a los de diseño no se exceden en un lapso de 10 años. Si la carga se aplica para periodos más largos o cortos que el de duración normal, los esfuerzos básicos tendrán que modificarse.

La influencia de la duración de la carga puede apreciarse en la siguiente gráfica ( NFPA ): ( GRAFICA 6.1 )



GRAFICA 6.1: Influencia de la duración de la carga.

En las normas canadienses, se proponen los siguientes valores de carga ( CWC ):

a. Duración de la Carga: Continua.

- Definición: Estructura sujeta a cargas continuas de diseño durante su vida útil, tales como cargas muertas o cargas muertas más vivas, sin variación significativa.

- Aplicación típica: tanques con material fluido o granular, muros de retención; cargas provocadas por maquinaria; pisos sujetos a carga continua.

- Factor: 0.90

b. Duración de la carga: Normal

- Definición: Estructuras sujetas a cargas menores que las de diseño y ocasionalmente a máximas, de manera que la

carga máxima de diseño no se exceda en un lapso de 10 años a través de su vida útil, y sujeta a esfuerzos menores por el resto del tiempo.

- Aplicación típica: Cargas muertas más cargas vivas en residencias, edificios comerciales y oficinas; puentes con tráfico normal.

- Factor: 1.00

c. Duración de la carga: 2 meses.

- Definición: Estructuras sujetas a cargas máximas de diseño sin exceder de 2 meses.

- Aplicación típica: Estructuras sujetas a cargas de nieve más carga muerta. Algunas estructuras temporales. Puentes con tráfico ligero a moderado.

- Factor: 1.15

d. Duración de la carga: 7 días.

- Definición: Estructuras sujetas a cargas de diseño máximo sin exceder 7 días.

- Aplicación típica: Cargas muertas más vivas en cimbras.

- Factor: 1.25

e. Duración de la carga: 1 día

- Definición: Estructuras sujetas a cargas máximas de diseño sin sobrepasar un día.

- Aplicación típica: Cargas muertas más viva combinada con viento, sismo ó granizo.

- Factor: 1.33

f. Duración de la carga: Instantánea.

- Definición: Estructuras sujetas a cargas máximas de diseño sin sobrepasar un minuto.

- Aplicación típica: Carga muerta más viva incrementadas por impacto.

- Factor: 2.00

Las NTC/EM del RCDF proponen los siguientes factores de modificación por duración de carga: ( TABLA 6.1 )

| CONDICION DE CARGA   | FACTOR |
|--|--------|
| 1. Carga continua.   | 0.90   |
| 2. Carga normal: muerta más viva.  | 1.00   |
| 3. Carga muerta más carga viva en cimbras, obras falsas y techos ( pendiente < 5% ).                           | 1.25   |
| 4. Carga muerta más carga viva más viento o sismo, y carga muerta más carga viva en techos ( pendiente > 5% ). | 1.33   |
| 5. Carga muerta más carga viva más impacto.  | 1.60   |

TABLA 6.1: Factores de carga según las NTC/EM



La elección del factor de incremento adecuado no es fácil, debido a que las acciones no obran aisladamente sobre la estructura. Es necesario determinar la combinación más desfavorable.

El IG/UNAM propone que se aplique la siguiente regla:

" Para cada combinación probable de carga calcúlese el cociente  $\Sigma P_i / K_i$  en donde  $\Sigma P_i$  es la suma de las cargas de la combinación  $i$ , y  $K_i$  es el factor de incremento correspondiente a la combinación  $i$ . La combinación más desfavorable es la correspondiente al cociente máximo. "

Supongamos el siguiente ejemplo:

| COMBINACION                        | CARGA ( TON ) | COCIENTE        |
|------------------------------------|---------------|-----------------|
| Carga Muerta más viva              | 1.5           | 1.5/1.0= 1.5    |
| Carga Muerta más viva<br>más sismo | 1.8           | 1.8/1.33 = 1.35 |

La combinación que rige el diseño es carga muerta más viva.

Los módulos de elasticidad no se afectan por los factores de modificación por duración de la carga.

#### 6.3.1.2 CONTENIDO DE HUMEDAD.

Las pruebas de laboratorio para la obtención de las propiedades mecánicas de la madera se realizan para ciertas condiciones de temperatura y humedad relativa, provocando en la madera ensayada ciertas condiciones de contenido de humedad. Generalmente se realizan en condiciones secas de humedad con un contenido de humedad menor del 16%. Sin embargo, los esfuerzos básicos se deben afectar por un factor si el contenido de humedad en condiciones de servicio excederá al 16%.

Los diferentes reglamentos en ocasiones proponen dos tablas de valores de esfuerzos básicos, tanto para condiciones húmedas ( Contenido de humedad > 16% ) o para condiciones secas ( Contenido de humedad < 16% ). Otros proponen los factores respectivos para cada uno de los esfuerzos básicos obtenidos en condiciones secas.

Para madera maciza, las NTC/EM proponen los siguientes factores para cada uno de los esfuerzos básicos: (TABLA 6.2)

| ESFUERZO                              | FACTOR |
|---------------------------------------|--------|
| Compresión paralela a las fibras      | 0.80   |
| Compresión perpendicular a las fibras | 0.45   |
| Cortante paralelo a las fibras        | 0.85   |
| Módulo de elasticidad                 | 0.80   |
| Flexión                               | 0.80   |

TABLA 6.2: Factores de contenido de humedad según NTC/EM.

Las especificaciones de la NFPA proponen los siguientes valores de los factores de reducción: ( TABLA 6.3 )

| ESFUERZO                          | FACTOR |
|-----------------------------------|--------|
| Flexión                           | 0.800  |
| Compresión perpendicular al grano | 0.667  |
| Cortante paralelo al grano        | 0.875  |
| Compresión paralela al grano      | 0.730  |
| Módulo de elasticidad             | 0.833  |

TABLA 6.3: Factores de contenido de humedad según NFPA.

Es importante determinar de manera aproximada el contenido de humedad en equilibrio de la madera en condiciones de servicio y considerar el efecto del cambio de humedad del elemento en el diseño.

En México, a través de LACITEMA, se han hecho estudios para determinar el contenido de humedad en equilibrio para madera en la República Mexicana. Los trabajos se realizaron en base a procedimientos del FPL/USDA y se aplicó a las condiciones climáticas del país.

Los resultados de la investigación reflejan los contenidos de humedad en equilibrio en las ciudades más importantes del país, como se muestra a continuación:

| CIUDAD                  | CONTENIDO DE HUMEDAD EN EQUILIBRIO +/- 5% |            |
|-------------------------|---|------------|
|                         | ABRIL                                     | SEPTIEMBRE |
| Acapulco, Gro.          | 15  | 16         |
| Aguascalientes, Ags.    | 8   | 13         |
| Campeche, Camp.         | 14  | 16         |
| Chihuahua, Chih.        | 6   | 6          |
| Chilpancingo, Gro.      | 13  | 19         |
| Colima, Col.            | 10  | 16         |
| Comitán, Chis.          | 15  | 17         |
| Córdoba, Ver.           | 14  | 17         |
| Cozumel, Groo.          | 17  | 20         |
| Culiacán, Sinaloa       | 10  | 16         |
| Durango, Dgo.           | 7   | 12         |
| Ensenada, BCS           | 16  | 18         |
| Guadalajara, Guad.      | 7   | 14         |
| Guanajuato, Guan.       | 7   | 12         |
| Guaymas, Son.           | 9   | 12         |
| Hermosillo, Son.        | 7   | 9          |
| Lagos de Moreno, Jal.   | 9   | 14         |
| La Paz, BCS.            | 11  | 12         |
| León, Guanajuato        | 9   | 13         |
| Manzanillo, Colima      | 14  | 16         |
| Mazatlán, Sinaloa.      | 15  | 16         |
| Mérida, Yucatán.        | 12  | 16         |
| Monclova, Coahuila.     | 9   | 12         |
| Monterrey, Nuevo León.  | 12  | 13         |
| Morelia, Michoacán      | 9   | 15         |
| Oaxaca, Oaxaca          | 9   | 12         |
| Orizaba, Veracruz       | 12  | 17         |
| Pachuca, Hidalgo        | 12  | 19         |
| Piedras Negras, Coah.   | 12  | 13         |
| Progreso, Yucatán       | 15  | 16         |
| Puebla, Puebla          | 8   | 13         |
| Querétaro, Querétaro    | 8   | 12         |
| Río Verde, SLP          | 12  | 16         |
| Salina Cruz, Oaxaca     | 13  | 15         |
| Saltillo, Coahuila      | 10  | 14         |
| San Cristóbal, Chis.    | 15  | 16         |
| San Luis Potosí, SLP    | 12  | 16         |
| Soto La Marina, Tamps.  | 15  | 16         |
| México, DF              | 9   | 14         |
| Tampico, Tamps.         | 17  | 18         |
| Tapachula, Chis.        | 13  | 16         |
| Tepic, Nayarit          | 15  | 20         |
| Texcoco, México         | 10  | 15         |
| Tlaxcala, Tlax.         | 9   | 13         |
| Toluca, México          | 9   | 15         |
| Torreón, Coahuila       | 8   | 10         |
| Tulancingo, Hgo.        | 12  | 19         |
| Tuxtla Gutiérrez, Chis. | 13  | 16         |
| Veracruz, Ver.          | 16  | 17         |
| Xalapa, Veracruz        | 14  | 18         |
| Zacatecas, Zac          | 6   | 15         |

Se recomienda tomar los valores mínimos del contenido de humedad en equilibrio al tratarse de madera destinada a interiores o sitios cubiertos, y los máximos cuando se utilice a la intemperie o en exteriores.

Conociendo el destino final de la estructura, es recomendable acondicionarla durante el proceso de fabricación para que tenga un contenido de humedad semejante al CHE que tendría en el lugar donde se va a emplear, ó en su defecto, tratarla de manera que no se provoquen cambios en el contenido de humedad en servicio.

#### 6.3.1.3 TRATAMIENTO.

Según la NFPA, si la madera es tratada para su preservación, los esfuerzos básicos deberán reducirse un 10%. El factor de ajuste es de 0.90.

#### 6.3.1.4 FORMA.

Estudios realizados en FPL/USDA, han demostrado que los módulos de ruptura de vigas de sección circular ó cuadrada, son mayores que los de secciones rectangulares de igual profundidad, debido al soporte que ejercen las fibras del elemento a diferentes niveles a las fibras extremas en compresión.

Se proponen los siguientes factores de forma:

Secciones circulares: 1.180

Secciones cuadradas: 1.414

### 6.3.2 FACTORES EXCLUSIVOS DE LA MADERA LAMINADA.

#### 6.3.2.1 TAMARO.

El módulo de ruptura de la madera, o sea, el esfuerzo de flexión en la fibra extrema ante carga última, varía con la profundidad del miembro. Se ha visto en estudios experimentales realizados en Estados Unidos, que el módulo de ruptura decrece mientras se incrementa la profundidad del miembro.

La NFPA y el AITC han adoptado el siguiente factor de ajuste por el efecto del tamaño de la pieza:

$$\text{Factor de Tamaño} = (12/d)^{1/9}$$

en donde "d" es la profundidad del miembro en pulgadas.

El factor obtenido con la fórmula anterior se aplica para carga uniformemente distribuida sobre un elemento

simplemente apoyado con una relación claro-profundidad: (l/d)  
de 21. Para diferentes condiciones de carga y relaciones  
claro-profundidad, el factor de tamaño se puede obtener de  
las siguientes gráficas: ( FIG 6.2 )

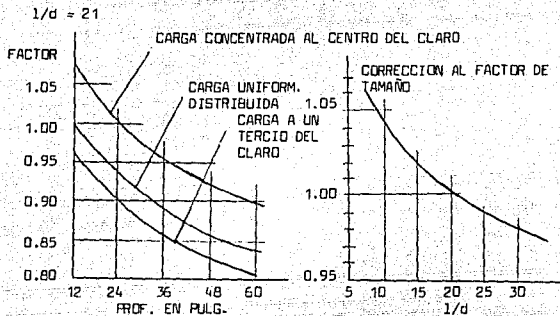
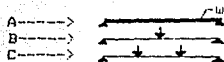


FIG 6.2: Gráficas para la obtención del factor de tamaño.

A continuación, se muestra la tabulación de algunos  
factores de tamaño de elementos laminados: ( TABLA 6.4 )

CONDICIONES DE CARGA:



PROFUNDIDAD  
( CMS )

CONDICION DE CARGA

|     | A    | B    | C    |
|-----|------|------|------|
| 30  | 1.00 | 1.06 | 0.97 |
| 50  | 0.95 | 1.02 | 0.92 |
| 80  | 0.90 | 0.97 | 0.89 |
| 130 | 0.85 | 0.92 | 0.82 |
| 230 | 0.80 | 0.86 | 0.77 |

TABLA 6.4: Factores de tamaño de elementos laminados.

Para propósitos prácticos, el factor de tamaño sólo es aplicable a elementos laminados, debido a que en vigas de madera maciza las profundidades de los elementos no exceden los 30 cms. Solamente cuando se utilizan viguetas de madera maciza para pisos ligeros, se recomiendan los siguientes factores de ajuste para las secciones mostradas, según LACITEMA: ( TABLA 6.5 )

| Tamaño b x d | Flexión | E    |
|--------------|---------|------|
| 40 x 140     | 0.85    | 1.0  |
| 40 X 190     | 0.80    | 0.80 |
| 40 X 240     | 0.80    | 0.80 |

Para otras secciones y propiedades mecánicas, el factor de ajuste es de 1.00

**TABLA 6.5: Factor de ajuste para viguetas de madera.**

Para miembros laminados, soportados lateralmente, se toma como la longitud del claro "l" como la separación entre soportes.

#### **6.3.2.2 CURVATURA.**

En la fabricación de elementos curvos de madera laminada, se incrementan los esfuerzos a flexión inducidos



en las laminaciones cuando se prensan en forma curva. Para tomar en cuenta el incremento en los esfuerzos a flexión, los esfuerzos básicos se multiplican por un factor de curvatura, dado por la siguiente expresión: ( NFPA )

Factor de curvatura:  $1 - 2000 ( t/r )^2$

"t" es el grueso de la laminación y "r" el radio de curvatura en la cara interna de la laminación.

El AISC limita la relación t/r a 1/125. El factor de curvatura no se aplica a vigas rectas.

#### 6.3.2.3 EMPALMES.

Los empalmes de laminaciones se usan para dar a los miembros las longitudes requeridas.

Los empalmes más utilizados son los biselados, y pueden fabricarse adecuadamente de manera que den al elemento una resistencia adecuada.

En este aspecto, una medida importante para el diseño es la pendiente del empalme, que se obtiene mediante la relación del grueso de la laminación entre la longitud de unión. La resistencia de una junta se incrementa mientras la

pendiente decrece. Los factores de junta expresados en porcentajes del esfuerzo máximo del miembro se muestran a continuación: ( FPL/USDA ) ( TABLA 6.6 )



| PENDIENTE t/a | FACTOR DE JUNTA |
|---------------|-----------------|
| 1/12 o menos  | 0.90            |
| 1/10          | 0.85            |
| 1/8           | 0.80            |
| 1/5           | 0.65            |

TABLA 6.6: Factor de junta de vigas de madera laminada.

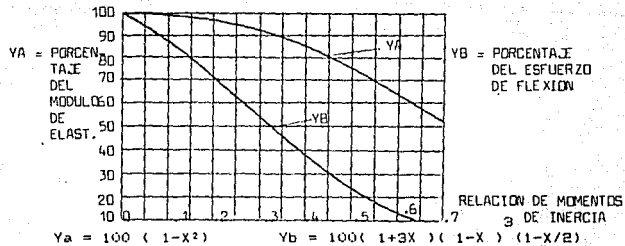
Independientemente del óptimo comportamiento de los empalmes bien fabricados en una estructura, es necesario dar una separación longitudinal adecuada en áreas de altos esfuerzos, para prevenir un posible debilitamiento del miembro.

El FPL/USDA, en su boletín técnico 1069, recomienda que el espaciamiento centro a centro de empalmes sea de por lo menos 24 veces el ancho de las laminaciones y que no coincidan los empalmes de laminaciones adyacentes. Cuando se tienen separaciones menores, algunas pruebas de laboratorio han demostrado que la falla de un empalme provoca la separación parcial de las laminaciones del resto del elemento.

#### 6.3.2.4 EFECTO DE LOS NUDOS.

La resistencia a flexión y rigidez de vigas laminadas son afectados por el número, tamaño y posición respecto al eje neutro de la pieza de los nudos próximos a la sección crítica.

Estudios estadísticos realizados en FPL/USDA muestran la relación existente entre la resistencia a la flexión y rigidez con el parámetro  $I_k/I_g$ , en donde  $I_k$  es la suma de los momentos de inercia respecto al eje neutro de las áreas ocupadas por todos los nudos que se encuentran a 15 cms a cada lado de la sección crítica e  $I_g$  es el momento de inercia de la sección total. Los resultados de los estudios se muestran a continuación: ( GRAFICA 6.2 )



GRAFICA 6.2: Curvas que relacionan los esfuerzos de flexión y módulos de elasticidad con la relación de momentos de inercia  $I_k/I_g$ .

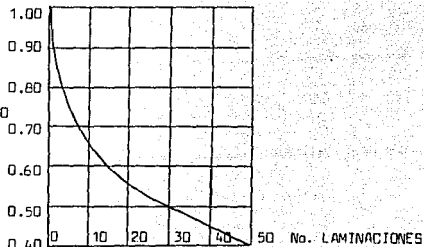
Las curvas muestran la variación en el porcentaje del módulo de elasticidad y el esfuerzo a flexión.

La investigación realizada se completó con el desarrollo de un método para poder estimar los valores  $I_k/I_g$ . No es obvio que los nudos de tamaño máximo que se permiten para cierta laminación se presenten en todas las laminaciones en una sección crítica. Existe un grado de dispersión que hace esa probabilidad de concentración baja. Un estudio muy amplio se realizó con un número considerable de arreglos de laminaciones escogidas al azar en donde se analizó la distribución de los valores de la relación  $I_k/I_g$ .

El resultado del estudio se muestra a continuación: (GRAFICA

6.3 )

RELACION DE  
 $I_k/I_g$  BASADO  
EN ESTUDIOS  
PROBABILISTICOS  
CON  $I_k/I_g$  BASADO  
EN CONSIDERAR  
QUE EL MAXIMO  
NUDO PERMITIDO  
SE PRESENTA EN  
CADA LAMINACION



GRAFICA 6.3: Valores probables de la relación  $I_k/I_g$  de

vigas de madera laminada con cierto número de laminaciones.

Los valores de las abscisas en la gráfica anterior representan la relación entre el valor de  $I_k/I_g$  basado en el

estudio probabilístico realizado con el valor de  $I_k/I_g$  que resulta de considerar que el máximo nudo permitido para la calidad de la madera se presente en cada laminación. En las ordenadas se muestra el número de laminaciones.

Si observamos la figura, se verifica que mientras el número de laminaciones se incrementa la probabilidad de que los nudos más grandes se presenten en cada laminación de la sección crítica decrece.

Si el elemento laminado está formado con una sola calidad estructural de la madera, es obvio que el valor de  $I_k/I_g$  es igual a la relación entre el tamaño del nudo "k" y el ancho de la laminación "b". Es decir,  $I_k/I_g = k/b$ .

Calculando  $k/b$ , y con el número de laminaciones del elemento, obtenemos el valor de  $I_k/I_g$  basado en los estudios probabilísticos y, finalmente, el porcentaje del módulo de ruptura y el módulo de rigidez.

Se han realizado extensos programas de investigación sobre elementos laminados en FPL/USDA, y se comprueba que los resultados obtenidos de las curvas anteriores se asemejan a los obtenidos en laboratorio.

#### 6.3.2.5 PENDIENTE DEL GRANO.

Se ha demostrado mediante estudios realizados en Estados Unidos e Inglaterra que la pendiente del grano de las laminaciones afecta a los esfuerzos a flexión y módulos de elasticidad de las piezas de madera. El FPL/USDA propone los siguientes factores de reducción por pendiente del grano: ( TABLA 6.7 )

| PENDIENTE DEL GRANO | FLEXIÓN Y MODULO DE ELASTICIDAD |
|---------------------|---------------------------------|
| 1:6                 | Inadmisible                     |
| 1:8                 | 0.53                            |
| 1:10                | 0.61                            |
| 1:12                | 0.69                            |
| 1:14                | 0.74                            |
| 1:15                | 0.76                            |
| 1:16                | 0.80                            |
| 1:18                | 0.85                            |
| 1:20                | 1.00                            |

TABLA 6.7: Factores de reducción por pendiente del grano.

En la práctica es conveniente establecer un factor de reducción proveniente del efecto de los nudos y después limitar la pendiente del grano de manera que la relación de esfuerzos para la pendiente del grano sea semejante que aquella para nudos. Además, se recomienda que piezas formadas por laminaciones con pendiente del grano menores que 1:8 no se usen para miembros de madera laminada.

### 6.3.3 PANDEO LATERAL DE VIGAS DE MADERA.

La mayoría de las vigas de madera son empleadas de manera que la zona de compresión está soportada lateralmente

para prevenir movimientos laterales. De lo contrario, la viga puede fallar por pandeo lateral por flexotorsión.

Si el momento de inercia de su sección transversal respecto al eje centroidal normal al plano de la viga es considerablemente mayor que el que corresponde al otro eje centroidal y principal, el pandeo lateral y el colapso pueden presentarse mucho antes de que los esfuerzos normales debidos a la flexión alcancen los valores característicos.

Mientras las cargas que actúan en el plano de la viga permanecen por debajo de una cierta intensidad, la viga se deforma únicamente en ese plano y su equilibrio es estable, de manera que si se obliga a adoptar una configuración ligeramente flexionada lateralmente, por medio de la aplicación de un agente externo, recupera la configuración plana al desaparecer éste. Sin embargo, al aumentar la intensidad de las sollicitaciones llega un momento en que se hace posible una forma de equilibrio deformada lateralmente y retorcida, además de la plana; la carga menor para la que puede presentarse esta segunda forma de equilibrio es la crítica de pandeo de la viga.

Las fórmulas para determinar el pandeo elástico de vigas y columnas están basadas en las ecuaciones generales de segundo orden que se deducen tomando como base la configuración deformada del eje de la barra y teniendo en

cuenta la interacción de las diferentes fuerzas exteriores al modificarse los efectos de algunas a causa de las deformaciones producidas por otras. Como las deformaciones y las fuerzas interiores dejan de ser independientes, al plantear las ecuaciones de equilibrio deben considerarse todos los elementos mecánicos simultáneamente.

El problema de pandeo lateral de vigas es un problema de inestabilidad que debe resolverse por medio de las ecuaciones generales de segundo orden. El procedimiento empleado para obtener las ecuaciones diferenciales de equilibrio están basadas en consideraciones geométricas y sigue las ideas generales de Timoschenko y Vlasov.

Consideremos la siguiente viga simplemente apoyada sin restricción lateral, sujeta a un par  $M_0$ , en su configuración deformada lateralmente; ( FIG 6.3 )

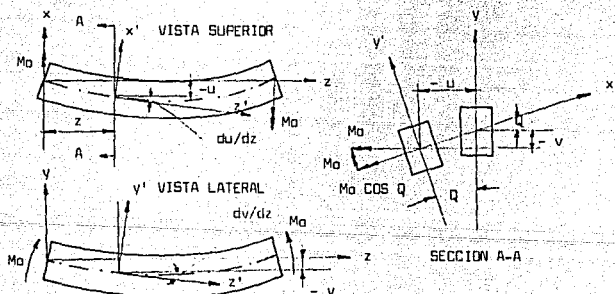


FIG 6.3: Pandeo lateral por flexotorsión.



Como resultado del movimiento lateral, la viga está sujeta a un momento de flexión lateral y un momento torsional, además de la flexión a lo largo del eje horizontal.

El momento aplicado  $M_0$  en el plano  $yz$  provoca componentes  $M_{x'}$ ,  $M_{y'}$  y  $M_{z'}$  alrededor de los ejes  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  respectivamente. Considerando pequeñas deformaciones, la flexión en los planos  $x'z'$  y  $y'z'$  y la torsión alrededor del eje  $z'$  pueden escribirse como sigue:

$$EI_x = dv^2 / dz^2 = M_{x'} = M_0 \cos Q = M_0$$

$$EI_y = du^2 / dz^2 = M_{y'} = M_0 \text{ Sen } Q = M_0 Q$$

$$GJ d\theta / dz = EC_w = M_{z'} = - du / dz M_0$$

En donde:

- $EI_x$ ,  $EI_y$  son las rigideces a la flexión alrededor de los ejes centroidales de la sección.
- $GJ$  es la rigidez a la torsión de la sección.
- $EC_w$  es la rigidez al alabeo de la sección.

A.R. Flint propuso la siguiente expresión basada en las anteriores, para calcular el valor del momento  $M_0$  que induce el pandeo lateral por flexotorsión en vigas de madera:

$$M_0 = M_{cr} = (3.1416 / l) \sqrt{(E I_y G J / l - I_y / I_x)}$$

l = longitud del claro.

Para secciones rectangulares:

$$I_x = (b)(d)^3 / 12$$

$$I_y = (d)(b)^3 / 12$$

$$J = [(d)(b)^3 / 3] (1 - 0.63 b/d)$$

Sustituyendo valores en la ecuacion de M<sub>cr</sub>:

$$M_{cr} = [ (3.1416)(E)(d)(b)^3 / 61 ] [ (G/E) \sqrt{(A/B)} ]^{1/2}$$

en donde:

$$A = 1 - 0.63 b/d$$

$$B = 1 - (b/d)^2$$

Tomando el mínimo valor del radical, que es 0.943 cuando b/d = 0.354, y un valor conservador de G = 0.064E, el momento crítico puede darse como:

$$M_{cr} = 0.125 E b d^3 / l$$

El esfuerzo crítico correspondiente al pandeo lateral de la viga es  $M_{cr} / [ (b)(d^2) / 6 ]$  ó:

$$f_{cr} = 0.75 E / [ l d / (b^2) ]$$

Las expresiones para  $f_{cr}$  correspondientes a diferentes condiciones de carga fueron desarrolladas por Hooley y Madsen en Estados Unidos.

La expresión anterior es válida sólo cuando el pandeo se presenta en el rango elástico con valores de esfuerzo menores a los del límite de proporcionalidad. Arriba de este punto, debido a las discrepancias en el comportamiento de la madera en compresión y tensión, la relación esfuerzo-deformación de la viga deja de ser lineal. Si el esfuerzo crítico se presenta arriba de este límite, el pandeo es inelástico. Para vigas con soportes laterales muy cercanos o con soporte lateral completo, el módulo de ruptura de la viga gobierna el diseño. Para vigas con longitudes largas, sin soporte lateral, los esfuerzos críticos dados por la ecuación anterior gobiernan. Para vigas intermedias, en donde se presenta el pandeo inelástico, se requieren ecuaciones de transición para obtener los esfuerzos críticos.

El procedimiento para determinar los esfuerzos críticos de pandeo lateral están basados en estudios realizados por los investigadores mencionados, y forman la base de los criterios de diseño de la NFPA.

Los tres posibles rangos del comportamiento de la viga

se definen mediante un factor de esbeltez, dado por la siguiente ecuación:

$$C_s = \sqrt{(l_e \pi^2 d / b^2)}$$

en donde:

b = ancho de la viga

d = peralte

$l_e$  = longitud efectiva no soportada lateralmente en función de  $l_u$ , que es la longitud no soportada lateralmente.

Las relaciones  $l_e / l_u$  para diferentes condiciones de carga se muestran a continuación: ( TABLA 6.8 )

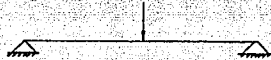
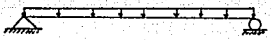
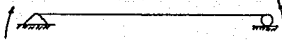
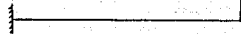
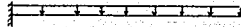
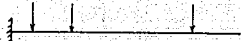
| Condición de Carga  | $l_e / l_u$ |
|---|-------------|
| 1.   | 1.61 *      |
| 2.   | 1.92        |
| 3.   | 1.84        |
| 4.   | 1.69 *      |
| 5.   | 1.06 *      |
| 6.  | 1.92 +      |

TABLA 6.8: Valores de  $l_e / l_u$  utilizados en pandeo lateral.

+ Para cualquier carga.

\* Valores basados en relaciones  $l_u / d = 17$ . Para valores diferentes de 17, multiplíquese  $l_e / l_u$  por  $0.85 + 2.55 ( l_u / d )$

Los tres diferentes rangos del comportamiento de la viga en función de la relación de esbeltez son:

|                  |                   |
|------------------|-------------------|
| $0 < C_s < 10$   | Vigas cortas      |
| $10 < C_s < C_k$ | Vigas intermedias |
| $C_k < C_s < 50$ | Vigas largas      |

en donde  $C_k = 0.811 \sqrt{ E / F_b^* }$

en donde:

$F_b^*$  = Esfuerzo básico de diseño a flexión modificado por todos los factores, excepto por tamaño, forma y esbeltez

La ecuación de pandeo elástico para  $f_{cr}$  modificada por factores que toman en cuenta la dificultad de prevenir la rotación por torsión queda como se muestra a continuación:

$$F'b = 0.428 E / C_s^2$$

en donde  $F'b$  = Esfuerzo de flexión ajustado por esbeltez.

Para valores de  $C_s$  menores que  $C_k$ , el pandeo será inelástico, y es necesario una curva de transición. El "Column Research Council" en Estados Unidos propone la siguiente ecuación:

$$F'b = F_b^* \left[ 1 - \frac{1}{3} \left( \frac{C_s}{C_k} \right)^4 \right]$$

Cuando  $C_s < 10$ , la reducción en los esfuerzos de flexión  $F_b^*$  es insignificante, por lo que:

$$F'b = F_b^*$$

La siguiente figura nos ilustra el comportamiento de la viga en relación al pandeo lateral; ( FIG 6.4 )

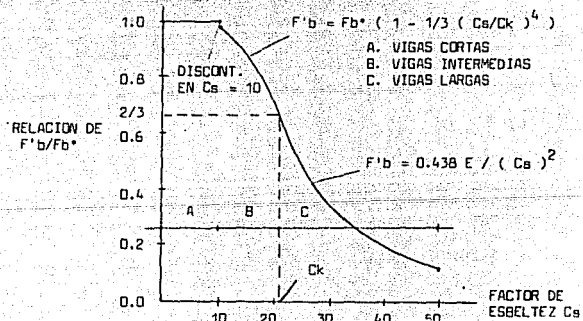


FIG 6.4: Variación de los esfuerzos de flexión con el factor de esbeltez:  $C_s$ .

#### 6.4 PROPUESTA DE DISEÑO.

Después de analizar los aspectos más importantes que se deben considerar en el diseño, se muestra a continuación una propuesta de lineamientos generales, basados en el concepto de estados límite y en la reglamentación y normatividad existentes en México y en otros países, para el dimensionamiento de elementos estructurales a base de madera laminada.

##### 6.4.1 ACCIONES DE DISEÑO.

El RCDF especifica tres tipos de acciones:

- a. Permanentes: Cargas Muertas, empuje estático de tierras y líquidos, movimientos diferenciales, etc.
- b. Variables: Cargas vivas, hundimientos, temperatura, etc.
- c. Accidentales: Sismo, viento, explosiones, incendios, etc.

Para las acciones permanentes, se tomará en cuenta la variabilidad de las dimensiones de los elementos, de los pesos volumétricos y de las propiedades relevantes de los materiales.

Para las acciones variables, se determinarán las intensidades siguientes que correspondan a las combinaciones de acciones para la que deba revisarse la estructura:

- a. Intensidad máxima, para combinaciones que incluyan sólo acciones permanentes.
- b. Intensidad instantánea, que se empleará para condiciones que incluyan acciones permanentes y accidentales.
- c. Intensidad media, cuyo valor nominal se sumará al de las acciones permanentes para estimar efectos a largo plazo.
- d. Intensidad mínima, que se emplea cuando el efecto de la acción es favorable a la estabilidad de la estructura. Se toma, en general, igual a cero.

La seguridad de la estructura se verificará para el efecto combinado de todas las acciones que tengan una probabilidad no despreciable de ocurrir simultáneamente:

- a. Combinaciones que incluyan acciones permanentes y variables. Se considerarán todas las acciones permanentes que actúen sobre la estructura y las distintas acciones variables, la más desfavorable con la intensidad máxima y el resto con la instantánea, o todas con intensidad media cuando se evalúan efectos a largo plazo.
- b. Combinaciones que incluyan acciones permanentes, variables y accidentales. Se considerarán todas las acciones permanentes, las variables con sus intensidades instantáneas y una sola acción accidental en cada combinación.



Dentro de las acciones permanentes, las cargas muertas se considerarán como los pesos de todos los elementos constructivos, de los acabados y de todos los elementos que ocupan una posición permanente y tienen un peso que no cambie sustancialmente con el tiempo.

En las acciones variables, se considerarán como cargas vivas las fuerzas que se producen por el uso y ocupación de la construcción y que no tienen un carácter permanente. Las cargas vivas se tomarán de acuerdo a la siguiente tabla: (RCDF)( Tabla 6.9 )

W = Carga media, para cálculo de asentamientos diferenciales y flechas diferidas.

Wa= Carga instantanea, para diseño sísmico y por viento.

Wm= Carga máxima para diseño por fuerzas gravitacionales.

| DESTINO DE PISO O CUBIERTA  | En kg/m <sup>2</sup> |     |     |
|---|----------------------|-----|-----|
|   | W                    | Wa  | Wm  |
| Habitación  | 70                   | 90  | 170 |
| Oficinas, despachos, laboratorios   | 100                  | 180 | 250 |
| Comunicación para peatones  | 40                   | 150 | 350 |
| Estadios, lugares de reunión sin asientos individuales                                  | 40                   | 350 | 450 |
| Otros lugares de reunión ( cines, iglesias, teatros, gimnasios, salones de baile, etc.) | 40                   | 250 | 350 |
| Comercios, fábricas, bodegas  | 280                  | 315 | 350 |
| Azoteas y cubiertas p < 5%  | 15                   | 70  | 100 |
| Azoteas y cubiertas p > 5%  | 5                    | 20  | 40  |
| Volados en vía pública  | 15                   | 70  | 300 |
| Garages y estacionamientos  | 40                   | 100 | 250 |

TABLA 6.9: Cargas vivas según RCDF.

Si el efecto de la carga viva es favorable ( succión del viento, por ejemplo ) su intensidad se considerará nula sobre toda el área. Además, para tomar en cuenta los efectos del granizo, éste se considerará como una acción accidental con valor de 30 kg/m<sup>2</sup>.

#### 6.4.2 FACTORES DE CARGA.

El factor de carga  $F_c$  es aplicable a las distintas combinaciones de acciones como se muestra a continuación: (RCDF)

- a.  $F_c = 1.4$  para combinaciones que incluyen sólo acciones permanentes y variables.
- b.  $F_c = 1.5$  en estructuras en las que haya con frecuencia aglomeraciones de personas. ( Centros de reunión, escuelas, teatros, cines, locales para espectáculos deportivos, iglesias, etc.) y en estructuras que contengan equipo muy valioso u obras de arte.
- c.  $F_c = 1.1$  para combinaciones que incluyan una acción accidental, además de las permanentes y variables.
- d.  $F_c = 0.9$  para acciones o fuerzas internas cuyo efecto sea favorable a la resistencia o estabilidad de la estructura.
- e.  $F_c = 1.0$  para la revisión de los estados límite de servicio.

#### 6.4.3 FACTORES DE REDUCCION DE RESISTENCIA.

Los factores de reducción resistencia propuestos son los siguientes: ( NTC/EM ) ( TABLA 6.10 )

| ACCION                                | FR  |
|---------------------------------------|-----|
| Flexión                               | 0.8 |
| Compresión perpendicular a las fibras | 0.9 |
| Cortante paralelo a las fibras        | 0.7 |

TABLA 6.10: Factores de resistencia de la madera.

#### 6.4.4 EVALUACION DE LA SEGURIDAD.

Se revisará que para las distintas combinaciones de acciones especificadas, y ante la aparición de cualquier estado limite de falla que pueda presentarse, la resistencia de diseño sea mayor o igual que el efecto de las acciones nominales que intervengan en la combinación de carga en estudio multiplicadas por el factor de carga correspondiente:

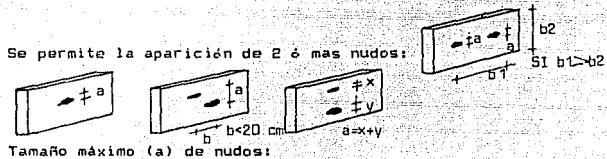
$$Fr R > \Sigma Fc S$$

También se revisará que no se rebase ningún estado límite de servicio.

#### 6.4.5 CLASIFICACION DE LA MADERA.

Se deberá clasificar la madera de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM C-239-1985. Se escogerá madera tipo A, de acuerdo a la regla industrial. ( NTC/EM ) ( La metodología de esta clasificación se expuso en un capítulo anterior ).

- Debido a que en estructuras de madera laminada es importante la distribución y colocación de los nudos y que no contempla esta norma de clasificación mexicana, se deberán dar las siguientes restricciones al tamaño de los nudos: (CSA) (FIGURA 6.5)



ANCHO NOMINAL

| ANCHO NOMINAL |     | (a)      |    |
|---------------|-----|----------|----|
| pulgadas      | mm  | pulgadas | mm |
| 4             | 87  | 3/8      | 10 |
| 6             | 140 | 1/2      | 12 |
| 8             | 190 | 3/4      | 19 |
| 10            | 240 | 7/8      | 28 |
| 12            | 290 | 1 1/8    | 28 |

FIGURA 6.5: Restricción del tamaño de los nudos ( CSA ).

Además de la restricción del tamaño de los nudos, se podrá presentar una restricción más severa en la pendiente del grano que la contemplada en las normas mexicanas de clasificación.

#### 6.4.6 ESFUERZOS BASICOS.

Los valores especificados de diseño provienen de pruebas hechas en pinos mexicanos de madera maciza (NTC/EM), y se muestran a continuación: ( TABLA 6.11 )

| ESFUERZO                            | CLASE A            | CLASE B |
|-------------------------------------|--------------------|---------|
|                                     | kg/cm <sup>2</sup> |         |
| Flexión                             | 170                | 100     |
| Compresión perpendicular a la fibra | 40                 | 40      |
| Cortante paralelo a la fibra        | 15                 | 15      |
| Módulo de elasticidad               | 100 000            | 80 000  |

TABLA 6.11: Esfuerzos básicos según NTC/EM.

Debido a que la madera debe clasificarse tipo A mediante la regla industrial, los valores de los esfuerzos básicos se incrementan un 25% exceptuando el módulo de elasticidad: ( NTC/EM ) ( TABLA 6.12 )

| ESFUERZO                            | SIMBOLO | VALOR kg/cm <sup>2</sup> |
|-------------------------------------|---------|--------------------------|
| Flexión                             | Fb      | 210                      |
| Cortante paralelo a la fibra        | Fv      | 18                       |
| Compresión perpendicular a la fibra | Fc      | 50                       |
| Módulo de elasticidad promedio      | E       | 100 000                  |

TABLA 6.12: Esfuerzos básicos finales para diseño a flexión.

#### 6.4.7 FACTORES QUE AFECTAN LOS ESFUERZOS BASICOS.

En base a las pruebas de laboratorio realizadas en México y en otros países, se resume a continuación los factores que afectan los esfuerzos básicos de la madera:

(TABLA 6.13)

| NO.                      | FACTOR               | SIMBOLO | Fb | Fv | Fc | E |
|--------------------------|----------------------|---------|----|----|----|---|
| MADERA MACIZA Y LAMINADA |                      |         |    |    |    |   |
| F-1                      | Duración carga       | kd      | X  | X  | X  |   |
| F-2                      | Contenido de humedad | kh      | X  | X  | X  | X |
| F-3                      | Tratamiento          | kt      | X  | X  | X  | X |
| F-4                      | Estabilidad lateral  | Cs      | X  |    |    |   |
| F-5                      | Factor de forma      | kf      | X  |    |    |   |
| MADERA LAMINADA          |                      |         |    |    |    |   |
| F-6                      | Tamaño               | Ct      | X  |    |    |   |
| F-7                      | Empalmes             | Ce      | X  |    |    | X |
| F-8                      | Nudos                | Cn      | X  |    |    | X |
| F-9                      | Pendiente del grano  | Cg      | X  |    |    | X |
| F-10                     | Curvatura            | Cc      | X  |    |    |   |

TABLA 6.13: Factores que afectan los esfuerzos básicos.

Notas a la tabla:

- a. Los factores F-1, F-2, F-3, F-4, F-5 son acumulativos.
- b. Los factores F-6, F-7, F-8, F-9 no son acumulativos.
- c. El factor F-10 es acumulativo.
- d. El factor F-4 no es acumulativo con el factor F-6.

FACTOR F-1: Factor de Carga.

De acuerdo a las NTC/EM, se proponen los siguientes factores de carga:

| CONDICION DE CARGA   | FACTOR |
|--|--------|
| a. Carga continua  | 0.90   |
| b. Carga muerta más viva   | 1.00   |
| c. Carga muerta más carga viva en cimbras, obras falsas y techos con pendiente < 5%                          | 1.25   |
| d. Carga muerta más carga viva más viento o sismo, y carga muerta más carga viva en techo con pendiente > 5% | 1.39   |
| e. Carga muerta más carga viva más impacto   | 1.60   |

Se deberá encontrar la condición más desfavorable de las combinaciones probables de carga.

FACTOR F-2: Factor por contenido de humedad.

Para contenidos de humedad  $CH > 16\%$  se tienen los siguientes valores: ( NTC/EM ).

| ESFUERZO | FACTOR |
|----------|--------|
| Fc       | 0.45   |
| Fv       | 0.85   |
| Fb       | 0.80   |
| E        | 0.80   |

FACTOR F-3: Factor de ajuste de tratamiento.

Según la CWC,  $kt = 0.90$

**FACTOR F-4: Estabilidad lateral.**

Según la NFPA,

$$C_s = \sqrt{l_e \times d / (b^2)}$$

- a. Para vigas simplemente apoyadas con carga concentrada en el centro,  $l_e = 1.61 \text{ lu}$
- b. Para vigas simplemente apoyadas con carga uniformemente distribuida,  $l_e = 1.92 \text{ lu}$
- c. Para vigas simplemente apoyadas con momentos iguales en los extremos,  $l_e = 1.84 \text{ lu}$
- d. Para vigas en cantiliver con una carga concentrada en el extremo,  $l_e = 1.69 \text{ lu}$
- e. Para vigas en cantiliver con carga uniformemente distribuida,  $l_e = 1.06 \text{ lu}$
- f. Para vigas simplemente apoyadas o en cantiliver con cualquier carga,  $l_e = 1.92 \text{ lu}$

Las longitudes antes mencionadas se basan en relaciones  $lu / d = 17$ . Para otras relaciones, los claros efectivos se multiplicarán por el siguiente factor:

$$0.85 + 2.55 (lu / d)$$

excepto para  $l_e = 1.84 \text{ lu}$  y  $l_e = 1.92 \text{ lu}$



El factor de esbeltez  $C_s$  no excederá de 50. Los esfuerzos de flexión  $F'b$  afectados por estabilidad se calculan con las siguientes expresiones:

$$C_s < 10 \quad F'b = Fb^*$$

$$10 < C_s < C_k \quad F'b = Fb^* \left[ 1 - \frac{1}{3} \left( \frac{C_s}{C_k} \right)^4 \right]$$

$$C_k < C_s < 50 \quad F'b = 0.498 E / ( C_s^2 )$$

en donde:

$$C_k = 0.811 \sqrt{ E / Fb^* }$$

$Fb^*$  = Esfuerzo básico modificado por todos los factores excepto por tamaño, forma y esbeltez.

Se podrán despreciar los efectos de esbeltez si la cara de compresión de la viga está soportada en toda su longitud de manera que los desplazamientos laterales quedan impedidos. Para poder considerar que la cubierta proporciona suficiente restricción lateral, deberá estar firmemente unida a la viga y a los miembros periféricos de manera que se forme un diafragma rígido. ( NTC/EM )

FACTOR F-5: Factor de forma.

Segun la NPPA:

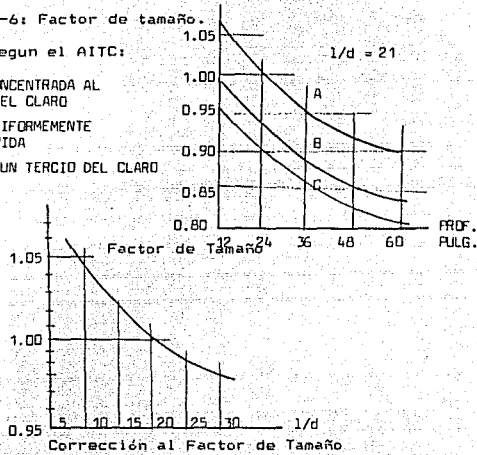
$k_f = 1.180$  para secciones circulares

$k_f = 1.414$  para secciones cuadradas

FACTOR F-6: Factor de tamaño.

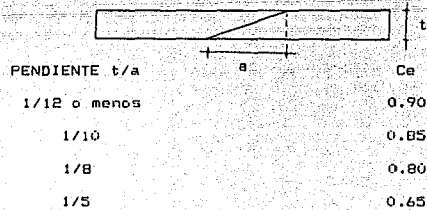
Según el AITC:

- A. CARGA CONCENTRADA AL CENTRO DEL CLARO
- B. CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA
- C. CARGA A UN TERCIO DEL CLARO



FACTOR F-7: Empalmes.

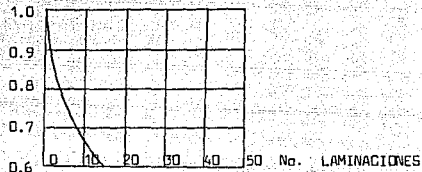
Según el FPL/USDA, se tiene:



El espaciamiento centro a centro de empalmes será de por lo menos  $24t$ , y no deberán coincidir los empalmes de laminaciones adyacentes.

**FACTOR F-8: Nudos.**

Según el FPL/USDA, se calcula la relación  $k/b$ , el ancho y número de las laminaciones, y se utiliza la siguiente gráfica para el cálculo de  $I_k/I_g$ :



Con las siguientes expresiones, o utilizando la gráfica, se calcula el factor de corrección:

$$\kappa = I_k/I_g$$

a. Para el esfuerzo a flexión.

$$C_n = (1 + 3\kappa) (1 - \kappa)^3 (1 - \kappa/2)$$

b. Para el módulo de elasticidad:

$$C_n = (1 - \kappa^2)$$

**FACTOR F.9: Pendiente del Grano.**

Según el FPL/USDA, para esfuerzos a flexión y módulo de elasticidad:

| PENDIENTE | F <sub>b</sub> | E           |
|-----------|----------------|-------------|
| 1:6       | Inadmisible    | inadmisible |
| 1:8       | 0.53           | 0.53        |
| 1:10      | 0.61           | 0.61        |
| 1:12      | 0.69           | 0.69        |
| 1:14      | 0.74           | 0.74        |
| 1:15      | 0.76           | 0.76        |
| 1:16      | 0.80           | 0.80        |
| 1:18      | 0.85           | 0.85        |
| 1:20      | 1.00           | 1.00        |

No se admiten valores menores que 1:8 para la pendiente del grano.

FACTOR F-10: Factor de curvatura.

Sólo es aplicable para miembros curvos. Según el AITC:

$$C_c = 1 - 2000(t/r)^2$$

en donde: t = grueso de las laminaciones

r = radio de curvatura en la cara interna

La relación t/r máxima es de 1/125

#### 6.4.8 REVISIÓN DE LOS ESTADOS LÍMITE DE FALLA.

##### 6.4.8.1 FLEXIÓN.

La notación utilizada en las expresiones para la revisión del estado límite de falla a flexión es la siguiente:

$M_R$  = Momento resistente a la flexión de una sección.

$\phi_R$  = Factor de reducción de resistencia = 0.80

$F_{bd}$  = Esfuerzo de diseño a flexión habiendo considerado los ajustes al esfuerzo básico.

$S$  = Módulo de sección elástico del elemento.

$F_b$  = Esfuerzo básico de diseño a flexión.

$F_{bl}$  = Esfuerzo básico de diseño, considerando las especificaciones para madera laminada, excepto el factor de tamaño.

$F_{bm}$  = Esfuerzo básico de diseño, considerando todas las especificaciones para madera laminada.

$F_b^*$  =  $F_{bl}$  afectado por los factores para la madera en general, exceptuando estabilidad lateral, el factor de tamaño y el factor de forma.

$F_b'$  = Esfuerzo  $F_b^*$  ajustado con las condiciones de estabilidad lateral.

$F_b''$  = Esfuerzo  $F_{bm}$  afectado por los factores de la madera en general.

$E_l$  = Módulo de elasticidad afectado por las consideraciones para madera laminada.  
 $E_d$  = Módulo de elasticidad de diseño.  
 $k_d$  = Factor de duración de la carga.  
 $k_h$  = Factor por contenido de humedad.  
 $k_t$  = Factor por tratamiento.  
 $C_s$  = Factor de esbeltez, utilizado en el análisis del pandeo lateral.  
 $k_f$  = Factor de forma.  
 $C_t$  = Factor por tamaño.  
 $C_e$  = Factor de junta ó empalme.  
 $C_n$  = Factor de reducción por el efecto de los nudos.  
 $C_g$  = Factor por pendiente del grano.  
 $C_c$  = Factor de curvatura. ( Sólo para miembros curvos )

La resistencia a flexión viene dada por la siguiente expresión:

$$M_R = ( F_R ) ( F_{bd} ) ( S )$$

Para encontrar el esfuerzo de diseño  $F_{bd}$ , se aplica la siguiente metodología:

a. Modificar el esfuerzo básico por el más desfavorable de los factores F-7, F-8, F-9:

$$F_{b1} = ( F_b ) ( C_e \text{ ó } C_n \text{ ó } C_g )$$

b. Modificar el módulo de elasticidad E por los factores de reducción F-7, F-8, F-9:

$$E1 = (.E)(.Ce \text{ ó } Cn \text{ ó } Cg)$$

c. Al esfuerzo Fbl, afectarlo por los factores F-1, F-2, F-3

$$Fb* = (.Fbl)(.kd)(.kh)(.kt)$$

d. Al módulo de elasticidad E1 afectarlo por los factores F-2 y F-3:

$$Ed = (.E1)(.kh)(.kt)$$

El valor obtenido se utilizará en el análisis de pandeo lateral y deformaciones.

e. Ajustar el valor de Fb\* por las condiciones de estabilidad lateral, para obtener F'b:

f. Modificar el esfuerzo básico Fb por el mayor de los factores F-6, F-7, F-8, F-9, para obtener Fbm

$$Fbm = Fb(.Ce \text{ ó } Cn \text{ ó } Cg \text{ ó } Ct)$$

g. Obtener el esfuerzo F''b, modificando el esfuerzo Fbm por los factores F-1, F-2, F-3:

$$F'b = ( Fbm ) ( kd ) ( kh ) ( kt )$$

h. Obtener el esfuerzo de diseño a flexión  $Fbd$  como sigue:

$$Fbd = ( \text{valor más pequeño de } F'b \text{ y } F'fb ) ( kf )$$

No se consideró el factor de curvatura  $Cc$  debido a que el alcance del presente trabajo se limita a vigas rectas de sección rectangular.

#### 6.4.8.2 CORTANTE.

La resistencia de la madera al cortante paralelo al grano es significativamente menor que la resistencia a flexión. Además, el valor del esfuerzo básico de la tabla corresponde al cortante horizontal debido a que el miembro falla antes por cortante paralelo a las fibras que por cortante vertical.

El esfuerzo por cortante horizontal viene dado por la siguiente expresión:

$$Fv = V Q / I b$$

en donde:



$F_v$  = Esfuerzo de corte a un nivel dado de la sección, a una distancia "y" del eje neutro.

$V$  = Fuerza de corte en la sección.

$Q$  = Primer momento de Área o momento estático del Área por encima del nivel dado.

$I$  = Momento de inercia de la sección con respecto al eje neutro.

$b$  = Ancho de la sección al nivel dado.

Para el caso de una viga rectangular de ancho "b" y profundidad "d", tenemos:

$$F_v = 3 V / 2 b d$$

Ordenando términos, se tiene: ( NTC/EM )

$$V_R = ( F_R ) ( F_{vd} ) ( b ) ( d ) / 1.5$$

en donde:

$V_R$  = Cortante resistente de la sección

$F_{vd}$  = Esfuerzo de diseño por cortante, obtenido de la modificación del esfuerzo básico  $F_v$ :

$$F_{vd} = ( F_v ) ( k_d ) ( k_h ) ( k_t )$$

Para calcular la fuerza cortante  $V_R$  en miembros a flexión, se deben hacer las siguientes consideraciones:

(NFPA)

a. Se permite ignorar el efecto de cargas muy próximas a los apoyos en vigas sujetas a cargas uniformemente distribuidas ó concentradas, a una distancia "d" del apoyo, tal como se muestra en la siguiente figura: ( FIGURA 6.6 )



Las cargas a la izquierda de la línea A-A pueden ser ignoradas.

FIGURA 6.6: Consideración sobre el efecto del cortante cerca de los apoyos de las vigas.

Para simplificar el procedimiento, el cortante puede calcularse con la siguiente expresión: ( NFPA )

Para carga uniformemente repartida w:

$$V = [ w l / 2 ] [ 1 - 2 d / l ]$$

Para carga concentrada al centro de la viga:

$$V = ( 10 P ( 1 - x ) ( x/d )^2 ) / ( 9.1 [ 2 + ( x/d )^2 ] )$$

#### 6.4.8.3 APLASTAMIENTO.

Los esfuerzos de aplastamiento por compresión perpendicular a la fibra deben verificarse en zonas de apoyo de la viga o en lugares donde se apliquen cargas concentradas, provenientes de otras vigas, columnas o muros apoyados sobre la viga. Cuando estas cargas son de gran magnitud deberá ser necesario utilizar placas de acero para transmitir los esfuerzos en los soportes.

La revisión por aplastamiento propuesta se realiza mediante la siguiente expresión:

$$P = (FR)(Fcd)(b)(lb)$$

en donde:

P = Carga concentrada o reacción en el apoyo que resiste la viga.

b = Ancho del área de soporte

lb = longitud de soporte

Fcd= Esfuerzo de diseño para compresión perpendicular a la fibra, que viene dado por la siguiente expresión:  $Fcd = (Fc)(kd)(kh)(kt)$

El esfuerzo básico  $F_c$  puede incrementarse cuando la longitud de soporte  $l_b$  es menor de 15 cms y su distancia al final de la viga no es menor que 7.5 cms: (FIGURA 6.7)(NFPA)

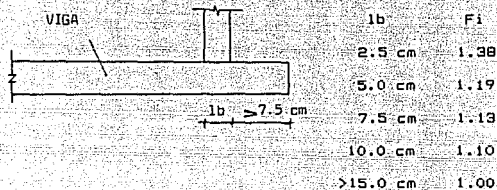


FIGURA 6.7: Condiciones para el incremento de  $F_c$ .

Para las longitudes de soporte no tabuladas, el factor puede calcularse mediante la expresión:

$$F_i = ( l_b + 0.375 ) / l_b$$

#### 6.4.9 REVISIÓN DEL ESTADO LÍMITE DE SERVICIO POR DEFORMACION

Las deflexiones de las vigas de madera laminada se pueden determinar usando los métodos clásicos desarrollados para estructuras isotrópicas, homogéneas y elásticamente lineales.

En general, deben considerarse deformaciones debidas a los esfuerzos cortantes y a la flexión. Sin embargo, las

primeras son del orden del 10% de la deflexión total del elemento y no necesitan ser calculadas, excepto para miembros cortos sujetos a cargas considerables en donde la deformación por cortante pueda ser apreciable.

Para una viga simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida, la deflexión se calcula con la siguiente expresión:

$$df = (5 w l^4) / (384 E d)$$

en donde Ed es el módulo de elasticidad de diseño:

$$Ed = E \times (C_e \text{ ó } C_n \text{ ó } C_g) \times (k_h) (k_t)$$

Debido a las deformaciones que experimenta la madera a largo plazo (deformaciones diferidas), se debe considerar una deflexión adicional por cargas gravitacionales, del 50% si se instala en condiciones secas, y de 100% si se instala en condiciones húmedas. (NTC/EM)

De esta manera, la deflexión será calculada mediante las siguientes expresiones:

Siendo wt la carga total uniformemente distribuida, y wd la carga uniformemente distribuida para el análisis de deformaciones diferidas, se tiene:

Para  $CH < 16\%$ :

$$df = (5.1)^4 (wt + 0.5 wd) / 384 Ed I$$

Para  $CH > 16\%$ :

$$df = (5.1)^4 (wt + wd) / 384 Ed I$$

Las deflexiones calculadas, tomando en cuenta los efectos a largo plazo, no deberán exceder los siguientes valores: (RCDF)

Para  $l < 3.5$  MTS:

$l / 240$  ó  $l / 480$  cuando se afecta a elementos no estructurales.

Para  $l > 3.5$  MTS:

$l / 240 + 0.5$  cms ó  $l / 480 + 0.3$  cms cuando se afecta a elementos no estructurales.

Las vigas de madera laminada generalmente se fabrican con contraflechas, para contrarrestar las deflexiones que se

ocasionan en condiciones de servicio. Se recomiendan los siguientes valores: ( TABLA 6.14 ) ( AITC )

| DESTINO           | VALOR                                   |
|-------------------|---|
| Vigas de cubierta | 1.5 veces la deflexión por carga muerta |
| Vigas de piso     | 1.5 veces la deflexión por carga muerta |
| Vigas en puentes  | 2.0 veces la deflexión por carga muerta |

TABLA 6.14: Contraflechas recomendadas para vigas de madera laminada.

#### 6.5 PROCEDIMIENTO GENERAL DE DISEÑO A FLEXION.

La manera de involucrar los factores que se deben considerar en el diseño de vigas rectas de sección rectangular se conjuntan en una metodología que se propone a continuación:

1. Selecciónese una viga de las siguientes dimensiones:

Profundidad: 5% de la longitud del claro.

Ancho: 1% a 2% de la longitud del claro.

2. Modificar los esfuerzos básicos de la siguiente manera:

FLEXION:

$$F_b1 = F_b ( C_e \text{ ó } C_n \text{ ó } C_g )$$

$$F_b^* = F_b (k_d)(k_h)(k_t)$$

$$F_{bm} = F_b (C_e \text{ ó } C_n \text{ ó } C_g \text{ ó } C_t)$$

$$F'_{b} = F_{bm}(k_d)(k_h)(k_t)$$

CORTANTE:

$$F_{vd} = (F_v)(k_d)(k_h)(k_t)$$

COMPRESION PERPENDICULAR AL GRANO:

$$F_{cd} = (F_c)(k_d)(k_h)(k_t)$$

MODULO DE ELASTICIDAD:

$$E_i = (E)(C_e \text{ ó } C_n \text{ ó } C_g)$$

$$E_d = (E_i)(k_h)(k_t)$$

3. Determinar el módulo de sección y área requerida de la siguiente manera:

Miembros soportados lateralmente en toda su longitud:

$$S = M_{max} / (FR)(F'_{b})$$

Miembros no soportados lateralmente en toda su longitud:

$$S = M_{max} / (FR)(0.75)(F_b^*) \rightarrow \text{(NPPA)}$$

Área:

$$A = (V_{max})(1.5) / (FR)(F_{vd})$$

La fuerza cortante puede ser estimada sin considerar una distancia de 1/20 del apoyo.



4. Seleccionar una viga de módulo de sección  $S$  y área  $A$  determinados en el paso 3.

5. Si la nueva viga tiene una geometría semejante a la propuesta en el paso 1, se podrá continuar con el diseño. De otra manera, se utilizarán las nuevas dimensiones de la viga, y se repetirán los pasos 1, 2, 3, 4.

6. Revisar la deflexión incluyendo las deformaciones diferidas, de manera que no se excedan los valores permisibles.

7. Determinar el esfuerzo de flexión  $F_{bd}$  mediante el procedimiento descrito anteriormente.

8. Revisar la flexión mediante la expresión  $MR = (FR)(F_{bd})(S)$ . Si la sección no cumple, se determinará un nuevo módulo de sección con un valor más racional de  $F_{bd}$ . (Diferente de  $0.75 F_b^*$  usado en el paso 3). Se recomienda que si existe una variación en la resistencia por el lado de la seguridad mayor que el 10%, se proponga una sección más ligera.

9. Revisar los esfuerzos de aplastamiento, si son conocidas las condiciones de apoyo, o determinar la longitud de soporte necesaria.

## 7. PROYECTO ESPECIFICO REAL.

### 7.1 ASPECTOS GENERALES.

#### 7.1.1 DESCRIPCION DEL PROYECTO.

Se trata de un salón de usos múltiples con capacidad de 800 personas, que será ubicado en el Municipio de Huixquilucan, Edo. de Mexico. El plano arquitectónico de las plantas se muestra en la siguiente hoja.

El problema a considerar consiste en salvar un área de aproximadamente 800 m<sup>2</sup>. De acuerdo al proyecto arquitectónico, se propone la siguiente distribución de columnas: ( FIG 7.1 )

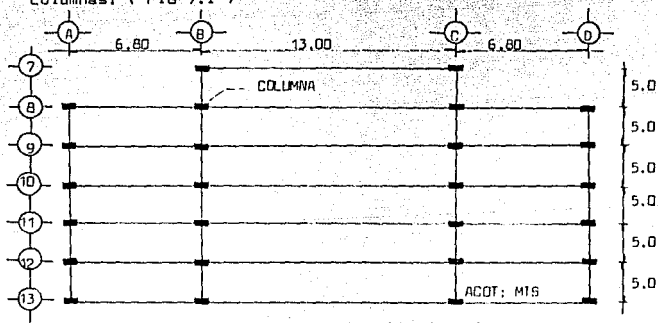
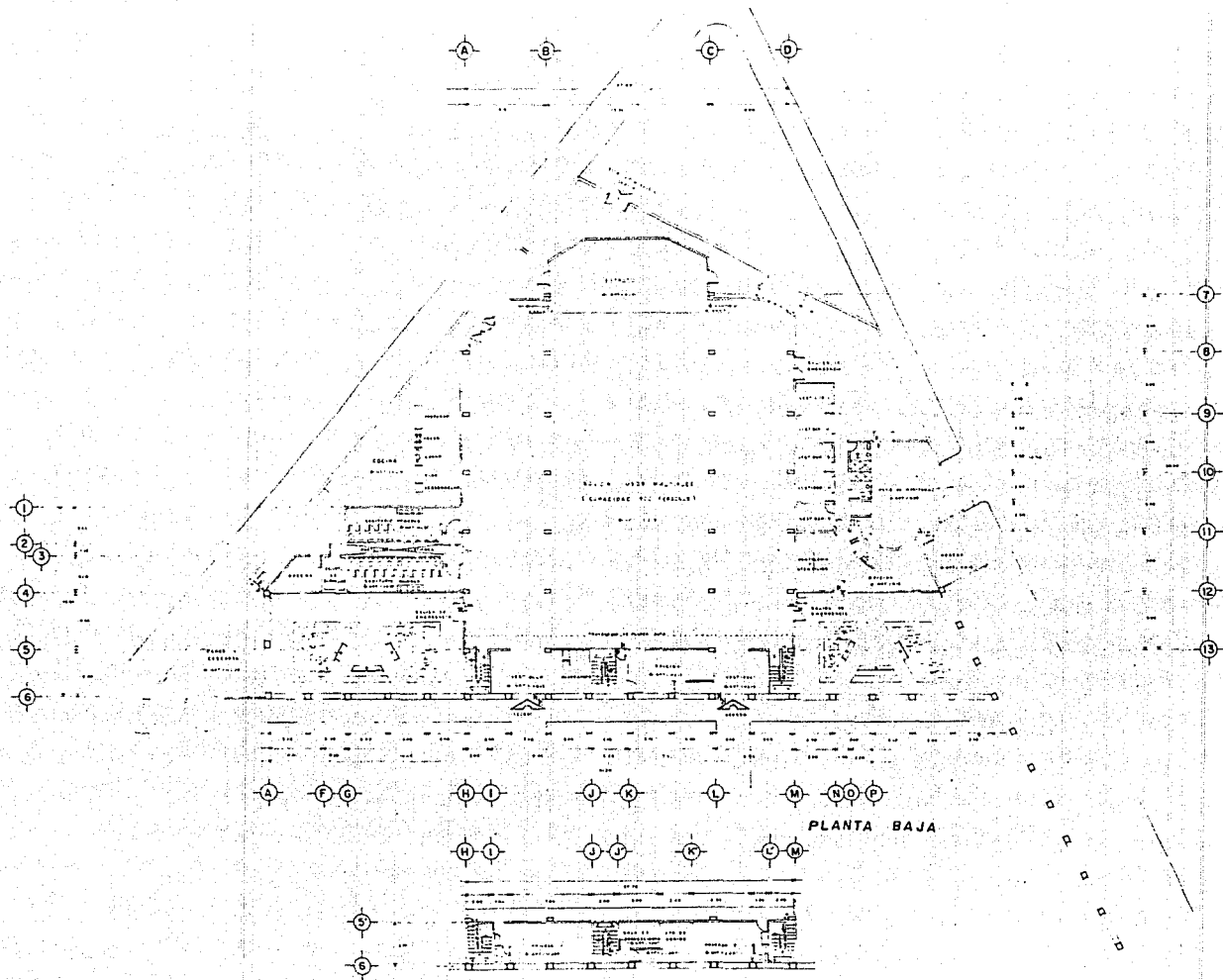


FIG 7.1: Propuesta de distribución de columnas.



PLANTA BAJA

PLANTA ALTA

|  |   |
|--|---|
|  | H. AYUNTAMIENTO DE HERRERILUCAN<br>EDO. DE MEXICO 1988-1990 |
|  | DIRECCION DE PROMOCION DE OBRAS                             |
|  | SALON DE USOS MÚLTIPLES                                     |

Se diseñará primeramente mediante vigas de madera laminada y después con armaduras de acero.

### 7.1.2 DISTRIBUCION DE AREAS TRIBUTARIAS.

En ambos diseños, las cargas se recibirán primeramente en elementos secundarios, los cuales a su vez las transmitirán a elementos principales. Se propone la siguiente distribución de elementos y áreas tributarias: (FIG 7.2)

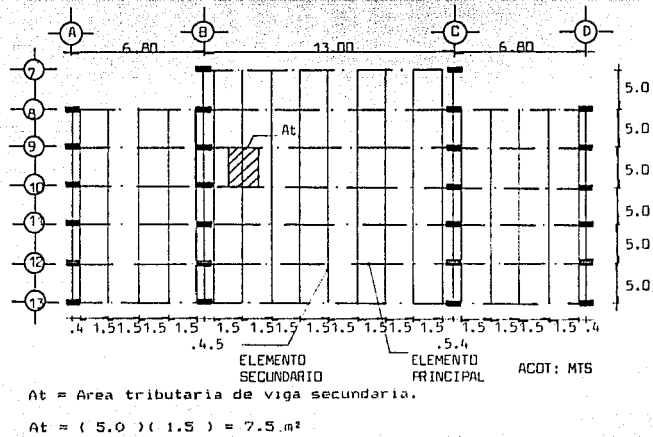


FIG 7.2: Distribución de elementos principales, secundarios y áreas tributarias.

### 7.1.3 CARGAS EN ELEMENTOS SECUNDARIOS.

#### a. Carga muerta.

|                                 |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Lámina de acero corrugada ----- | 15 kg/m <sup>2</sup> |
| Instalaciones -----             | 10 kg/m <sup>2</sup> |
|                                 | =====                |
|                                 | 25 kg/m <sup>2</sup> |

$$W_m = \text{Carga muerta} = 25 \text{ kg/m}^2 + W_p$$

en donde  $W_p$  es el peso propio del elemento.

#### b. Carga por viento.

Se tomarán los criterios de diseño por viento de las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

La presión de diseño viene dada por la siguiente expresión:

$$P = C_p C_z k P_o$$

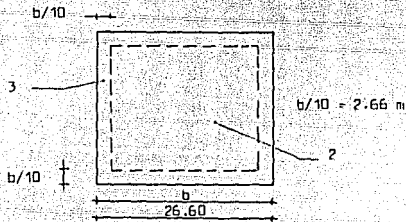
en donde:

$P_o$  = Es la presión básica de diseño, que se tomará igual a  $35 \text{ kg/m}^2$  debido a que se trata de una estructura tipo A según el RCDF.

$C_z$  = Factor correctivo por altura. Se tomará igual a 1, debido a que la altura de la estructura no excede 10 mts.

$K$  = Factor correctivo por condiciones de exposición. Debido a que la estructura se encuentra en promontorio, con pocas obstrucciones al viento, el factor se tomará igual a 1.6

$C_p$  = Factor de presión, que para elementos secundarios, se calcula como se muestra a continuación: ( Fig 7.3 )



$$C_{p2} = -1.4 + A/50 < -1.2$$

$$C_{p3} = -3.0 + A/10 < -2.0$$

A = Área tributaria del elemento

FIG 7.3: Factores de presión para elementos secundarios, con pendiente de cubierta menor que  $30^\circ$ .

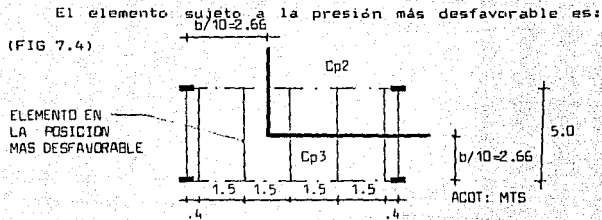


FIG 7.4: Elemento en la posición más desfavorable ante las presiones del viento.

Se tomará como factor de presión el siguiente:

$$C_p = -3.0 + A/10 < -2.0$$

$$C_p = -3.0 + 7.5/10 = -2.25$$

Considerando las presiones interiores por las aberturas de la edificación:

$$C_p = -2.25 - 0.25 = -2.50$$

La presión de diseño será entonces:

$$P = (-2.50) (1.0) (1.6) (35) = -140 \text{ kg/m}^2$$

c. Cargas vivas.

Para cubiertas con pendiente menor del 5%, se tienen las siguientes cargas:

$W_m = \text{Carga viva máxima} = 100 \text{ kg/m}^2$

$W_a = \text{Carga viva instantánea} = 70 \text{ kg/m}^2$

$W = \text{Carga viva media} = 15 \text{ kg/m}^2$

#### 7.1.4 COMBINACION DE CARGAS PARA ELEMENTOS SECUNDARIOS.

- Carga muerta más viva máxima para el diseño por cargas gravitacionales:

\* Revisión de estados límite de falla: (  $F_c = 1.5$  )

$$W_g = 1.5 ( 25 + W_p + 100 )$$

$$W_g = 187.5 \text{ kg/m}^2 + 1.5 W_p$$

\* Revisión de estados límite de servicio: (  $F_c = 1.0$  )

$$W_{gs} = 1.0 ( 25 + 100 + W_p )$$

$$W_{gs} = 125 \text{ kg/m}^2 + W_p$$

- Carga muerta más viva instantánea más viento:

Debido a que la carga viva es favorable a la estructura, se tomará  $W_a = 0$

\* Revisión de estados límite de falla: (  $F_c = 1.1$  )

$$W_v = 1.1 ( 25 + W_p - 140 )$$

$$W_v = -126.50 \text{ kg/m}^2 + 1.1 W_p$$

\* Revisión de estados límite de servicio: (  $F_c = 1.0$  )

$$W_{vs} = 1.0 ( 25 + W_p - 140 )$$

$$W_{vs} = -115 \text{ kg/m}^2 + W_p$$

- Carga muerta más viva instantánea más granizo:



\* Revisión de estados límite de falla: (  $F_c = 1.1$  )

$$W_{gr} = 1.1 ( 25 + W_p + 70 + 30 )$$

$$W_{gr} = 137.50 \text{ kg/m}^2 + 1.1 W_p$$

\* Revisión de estados límite de servicio: (  $F_c = 1.0$  )

$$W_{grs} = 1.0 ( 25 + W_p + 70 + 30 )$$

$$W_{grs} = 125 \text{ kg/m}^2 + W_p$$

- Carga muerta más viva para el análisis de deformaciones diferidas: (  $F_c = 1.0$  )

$$W_d = 1.0 ( 25 + 15 + W_p )$$

$$W_d = 40 \text{ kg/m}^2 + W_p$$

#### 7.1.5 CARGA POR VIENTO EN ELEMENTOS PRINCIPALES.

La presión de diseño viene dada por la siguiente expresión:

$$P = C_p C_z k P_o$$

en donde:

$$P_o = 35 \text{ kg/m}^2$$

$$C_z = 1.0$$

$$k = 1.6$$

Para cubiertas planas, siendo cualquiera la dirección del viento, se tomará un factor de presión  $C_p = -0.7$

Entonces:

$$P = (-0.7)(35)(1.0)(1.6)$$

La presión de diseño por viento para elementos principales es:

$$P = -35.20 \text{ kg/m}^2$$

#### 7.1.6 CONSIDERACION GENERAL.

En el diseño de elementos secundarios, la cara de compresión está soportada en toda su longitud, de manera que los desplazamientos laterales quedan impedidos. Para considerar que la cubierta proporciona suficiente restricción lateral, ésta deberá estar firmemente unida a la viga de manera que se forme un diafragma rígido. Sin embargo, esto sólo es válido para el diseño por cargas gravitacionales o granizo. En el diseño por viento, las succiones provocan que la porción inferior de la viga se comprima, por lo que la longitud sin soporte lateral se toma como la distancia entre los apoyos. Para fines prácticos, en el diseño por cargas gravitacionales, granizo y por viento, la estabilidad lateral se revisará utilizando esta longitud.

#### 7.2 DISEÑO MEDIANTE ELEMENTOS DE MADERA LAMINADA.

##### 7.2.1 TABLAS DE AYUDA DE DISEÑO.

El diseño se realizará de acuerdo a los lineamientos propuestos en el capítulo anterior de esta tesis. Además, en las siguientes hojas se muestran tablas de ayuda de diseño, donde se especifican las propiedades más importantes de las

secciones en función del ancho efectivo y el número de laminaciones horizontales. Se especifica la nomenclatura de referencia para las diversas secciones.

TABLA 7.1

| MADERA ASERRADA PARA USO EN ELEMENTOS LAMINADOS |           |         |        |                   |           |
|---|-----------|---------|--------|-------------------|-----------|
| NOMINAL   | CEPILLADA | SECA mm |        | ELEMENTO LAMINADO | TERMINADO |
| pulg mm   | EUA       | MEXICO  |        | pulg              | mm        |
| GROSOR  |           |         |        |                   |           |
| 2   | 50.80     | 38.10   | 38.00  | 1 1/2             | 38.00     |
| 1   | 25.40     | 19.05   | 19.00  | 3/4               | 19.00     |
| ANCHO   |           |         |        |                   |           |
| 4   | 101.60    | 88.90   | 87.00  | 3 1/8             | 79.27     |
| 6   | 152.40    | 139.70  | 140.00 | 5 1/8             | 130.17    |
| 8   | 203.20    | 184.15  | 190.00 | 6 3/4             | 171.45    |
| 10  | 254.00    | 234.95  | 240.00 | 8 3/4             | 222.25    |
| 12  | 304.80    | 285.75  | 290.00 | 10 3/4            | 273.05    |

LONGITUDES DE TABLAS DISPONIBLES EN MEXICO (MTS): 2.44, 3.05, 3.60, 4.20, 4.80, 6.10.

TABLA 7.2

| SECCION           | LAM | PROF.                                    | AREA            | MOD             | SECCION         | INERCIA         | PESO |
|-------------------|-----|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
|                   |     | CM                                       | CM <sup>2</sup> | CM <sup>3</sup> | CM <sup>4</sup> | CM <sup>4</sup> | KG/M |
| ANCHO NOMINAL: 4" |     | ANCHO SECCION TERMINADA: 3 1/8 (7.93 CM) |                 |                 |                 |                 |      |
| 4X4               | 2   | 7.62                                     | 60.42           | 76.74           | 272.38          | 3.9             |      |
| 4X6               | 3   | 11.43                                    | 90.63           | 172.66          | 986.80          | 5.8             |      |
| 4X8               | 4   | 15.24                                    | 120.85          | 306.96          | 2339.08         | 7.8             |      |
| 4X10              | 5   | 19.03                                    | 151.06          | 479.63          | 4568.53         | 9.8             |      |
| 4X12              | 6   | 22.86                                    | 181.27          | 690.67          | 7874.42         | 11.7            |      |
| 4X14              | 7   | 26.67                                    | 211.49          | 940.08          | 12526.05        | 13.7            |      |
| 4X16              | 8   | 30.48                                    | 241.70          | 1227.86         | 18712.71        | 15.7            |      |
| 4X18              | 9   | 34.29                                    | 271.91          | 1554.02         | 26643.69        | 17.6            |      |
| 4X20              | 10  | 38.10                                    | 302.13          | 1918.54         | 36540.27        | 19.6            |      |
| 4X22              | 11  | 41.91                                    | 332.34          | 2321.43         | 48645.75        | 21.6            |      |
| 4X24              | 12  | 45.72                                    | 362.55          | 2762.70         | 63155.41        | 23.5            |      |
| 4X26              | 13  | 49.53                                    | 392.77          | 3242.34         | 80276.55        | 25.5            |      |
| 4X28              | 14  | 53.34                                    | 422.98          | 3760.34         | 100288.66       | 27.4            |      |
| 4X30              | 15  | 57.15                                    | 453.19          | 4316.72         | 123350.42       | 29.4            |      |
| 4X32              | 16  | 60.96                                    | 483.41          | 4911.47         | 148701.72       | 31.4            |      |

| SECCION  | LAM | PROF. | AREA    | MOD SECCION | INERCIA    | PESO  |
|--|-----|-------|---------|-------------|------------|-------|
|  |     | CM    | CM²     | CM3         | CM4        | KG/M  |
| ANCHO NOMINAL: 6" ANCHO SECCION TERMINADA: 5 1/8 (13.017 CM) |     |       |         |             |            |       |
| 6X6  | 3   | 11.43 | 148.78  | 283.43      | 1619.82    | 9.6   |
| 6X8  | 4   | 15.24 | 198.37  | 503.88      | 3839.58    | 2.8   |
| 6X10   | 5   | 19.05 | 247.97  | 787.31      | 7499.19    | 16.1  |
| 6X12   | 6   | 22.86 | 297.56  | 1133.73     | 12958.60   | 19.3  |
| 6X14   | 7   | 26.67 | 347.16  | 1543.14     | 20577.78   | 22.5  |
| 6X16   | 8   | 30.48 | 396.75  | 2015.53     | 30716.69   | 25.7  |
| 6X18   | 9   | 34.29 | 446.35  | 2550.90     | 42735.30   | 29.0  |
| 6X20   | 10  | 38.10 | 495.94  | 3149.26     | 59993.55   | 32.2  |
| 6X22   | 11  | 41.91 | 545.54  | 3810.61     | 79851.41   | 35.4  |
| 6X24   | 12  | 45.72 | 595.13  | 4534.94     | 103668.86  | 38.6  |
| 6X26   | 13  | 49.53 | 644.73  | 5322.26     | 131805.83  | 41.9  |
| 6X28   | 14  | 53.34 | 694.32  | 6172.56     | 164622.31  | 45.1  |
| 6X30   | 15  | 57.15 | 743.92  | 7085.85     | 202478.24  | 48.3  |
| 6X32   | 16  | 60.96 | 793.51  | 8062.12     | 245733.59  | 51.5  |
| 6X34   | 17  | 64.77 | 843.11  | 9101.38     | 294748.32  | 54.8  |
| 6X36   | 18  | 68.58 | 892.70  | 10203.62    | 349882.40  | 58.0  |
| 6X38   | 19  | 72.39 | 942.30  | 11368.85    | 411495.78  | 61.2  |
| 6X40   | 20  | 76.20 | 991.89  | 12597.07    | 479948.42  | 64.4  |
| 6X42   | 21  | 80.01 | 1041.40 | 13888.27    | 555600.29  | 67.6  |
| 6X44   | 22  | 83.82 | 1091.08 | 15242.45    | 638811.35  | 70.9  |
| 6X46   | 23  | 87.63 | 1140.67 | 16659.52    | 729941.56  | 74.1  |
| 6X48   | 24  | 91.44 | 1190.27 | 18139.78    | 829350.88  | 77.3  |
| ANCHO NOMINAL: 8" ANCHO SECCION TERMINADA: 6 3/4 (17.145 CM) |     |       |         |             |            |       |
| 8X8  | 4   | 15.24 | 261.28  | 663.67      | 5057.21    | 19.9  |
| 8X10   | 5   | 19.05 | 326.61  | 1036.99     | 9877.36    | 21.2  |
| 8X12   | 6   | 22.86 | 391.93  | 1493.27     | 17068.08   | 25.4  |
| 8X14   | 7   | 26.67 | 457.25  | 2032.50     | 27103.49   | 29.7  |
| 8X16   | 8   | 30.48 | 522.57  | 2654.70     | 40457.69   | 33.9  |
| 8X18   | 9   | 34.29 | 587.90  | 3359.86     | 57604.80   | 38.2  |
| 8X20   | 10  | 38.10 | 653.22  | 4147.97     | 79018.93   | 42.4  |
| 8X22   | 11  | 41.91 | 718.54  | 5019.05     | 105174.20  | 46.7  |
| 8X24   | 12  | 45.72 | 783.86  | 5973.08     | 136544.71  | 50.9  |
| 8X26   | 13  | 49.53 | 849.19  | 7010.07     | 173604.59  | 55.1  |
| 8X28   | 14  | 53.34 | 914.51  | 8138.03     | 216827.95  | 59.4  |
| 8X30   | 15  | 57.15 | 979.83  | 9332.94     | 266488.90  | 63.6  |
| 8X32   | 16  | 60.96 | 1045.15 | 10618.81    | 323661.55  | 67.9  |
| 8X34   | 17  | 64.77 | 1110.48 | 11987.64    | 388320.01  | 72.1  |
| 8X36   | 18  | 68.58 | 1175.80 | 13439.44    | 460838.42  | 76.4  |
| 8X38   | 19  | 72.39 | 1241.12 | 14974.19    | 541990.87  | 80.6  |
| 8X40   | 20  | 76.20 | 1306.44 | 16591.90    | 632151.47  | 84.9  |
| 8X42   | 21  | 80.01 | 1371.77 | 18292.57    | 731794.35  | 89.1  |
| 8X44   | 22  | 83.82 | 1437.09 | 20076.20    | 841393.61  | 93.4  |
| 8X46   | 23  | 87.63 | 1502.41 | 21942.67    | 961423.37  | 97.6  |
| 8X48   | 24  | 91.44 | 1567.73 | 23892.33    | 1092357.75 | 101.9 |
| 8X50   | 25  | 95.25 | 1633.06 | 25924.84    | 1234670.85 | 106.1 |

| SECCION | LAM | PROF.  | AREA            | MOD SECCION | INERCIA         | PESO  |
|---------|-----|--------|-----------------|-------------|-----------------|-------|
|         |     | CM     | CM <sup>2</sup> | CM3         | CM <sup>4</sup> | KG/M  |
| 8X52    | 26  | 99.06  | 1498.38         | 28040.31    | 1388836.79      | 110.0 |
| 8X54    | 27  | 102.87 | 1743.70         | 30238.74    | 1555329.49      | 114.0 |
| 8X56    | 28  | 106.68 | 1829.02         | 32520.12    | 1734623.65      | 118.0 |
| 8X58    | 29  | 110.49 | 1894.35         | 34884.47    | 1927192.79      | 123.0 |
| 8X60    | 30  | 114.30 | 1959.67         | 37331.78    | 2133511.23      | 127.0 |
| 8X62    | 31  | 118.11 | 2024.99         | 39862.04    | 2354053.08      | 131.0 |
| 8X64    | 32  | 121.92 | 1090.31         | 42475.26    | 2589292.45      | 135.0 |

ANCHO NOMINAL:10" ANCHO SECCION TERMINADA:8 3/4 (22.225 CM)

|       |    |        |         |          |            |       |
|-------|----|--------|---------|----------|------------|-------|
| 10X12 | 6  | 22.86  | 508.06  | 1935.72  | 22125.30   | 33.0  |
| 10X14 | 7  | 26.67  | 592.74  | 2634.73  | 35134.15   | 38.5  |
| 10X16 | 8  | 30.48  | 677.41  | 3441.28  | 52445.15   | 44.0  |
| 10X18 | 9  | 34.29  | 762.09  | 4355.37  | 74672.89   | 49.5  |
| 10X20 | 10 | 38.10  | 846.77  | 5377.00  | 102431.95  | 55.0  |
| 10X22 | 11 | 41.91  | 931.44  | 6506.17  | 136336.92  | 60.5  |
| 10X24 | 12 | 45.72  | 1016.12 | 7742.88  | 177902.41  | 66.0  |
| 10X26 | 13 | 49.53  | 1100.80 | 9087.13  | 225042.59  | 71.5  |
| 10X28 | 14 | 53.34  | 1185.48 | 10538.93 | 281073.27  | 77.0  |
| 10X30 | 15 | 57.15  | 1270.15 | 12098.26 | 345707.83  | 82.5  |
| 10X32 | 16 | 60.96  | 1354.83 | 13765.13 | 419561.27  | 88.0  |
| 10X34 | 17 | 64.77  | 1439.51 | 15539.54 | 503248.18  | 93.5  |
| 10X36 | 18 | 68.58  | 1524.19 | 17421.49 | 597383.14  | 99.0  |
| 10X38 | 19 | 72.39  | 1608.86 | 19410.98 | 702580.76  | 104.0 |
| 10X40 | 20 | 76.20  | 1693.54 | 21508.02 | 819455.61  | 110.0 |
| 10X42 | 21 | 80.01  | 1778.22 | 23712.59 | 948622.31  | 115.0 |
| 10X44 | 22 | 83.82  | 1862.89 | 26024.70 | 1090695.00 | 121.0 |
| 10X46 | 23 | 87.63  | 1947.57 | 28444.35 | 1246289.56 | 126.0 |
| 10X48 | 24 | 91.44  | 2032.25 | 30971.55 | 1416019.31 | 132.0 |
| 10X50 | 25 | 95.25  | 2116.93 | 33606.28 | 1600499.25 | 137.0 |
| 10X52 | 26 | 99.06  | 2201.60 | 36348.55 | 1800343.99 | 143.0 |
| 10X54 | 27 | 102.87 | 2286.28 | 39198.36 | 2016168.11 | 148.0 |
| 10X56 | 28 | 106.68 | 2370.96 | 42155.72 | 2248586.21 | 154.0 |
| 10X58 | 29 | 110.49 | 2455.64 | 45220.61 | 2498212.88 | 159.0 |
| 10X60 | 30 | 114.30 | 2540.31 | 48393.04 | 2765662.71 | 165.0 |
| 10X62 | 31 | 118.11 | 2624.99 | 51673.02 | 3051550.29 | 170.0 |
| 10X64 | 32 | 121.92 | 2709.67 | 55060.53 | 3356490.21 | 176.0 |
| 10X66 | 33 | 125.73 | 2794.34 | 58555.58 | 3681097.07 | 181.0 |
| 10X68 | 34 | 129.54 | 2879.02 | 62158.18 | 4025985.45 | 187.0 |
| 10X70 | 35 | 133.35 | 2963.70 | 65868.31 | 4391769.95 | 192.0 |
| 10X72 | 36 | 137.16 | 3048.38 | 69685.98 | 4779063.17 | 198.0 |
| 10X74 | 37 | 140.97 | 3133.05 | 73611.20 | 5188485.68 | 203.0 |
| 10X76 | 38 | 144.78 | 3217.73 | 77643.95 | 5620546.09 | 209.0 |
| 10X78 | 39 | 148.59 | 3302.41 | 81784.25 | 6076160.98 | 214.0 |
| 10X80 | 40 | 152.40 | 3387.09 | 86032.08 | 6555644.95 | 220.0 |
| 10X82 | 41 | 156.21 | 3471.76 | 90387.46 | 7059712.59 | 224.0 |
| 10X84 | 42 | 160.02 | 3556.44 | 94850.37 | 7588978.48 | 231.0 |

| SECCION  | LAM | PROF.  | AREA            | MOD SECCION | INERCIA     | PESO  |
|--|-----|--------|-----------------|-------------|-------------|-------|
|  |     | CM     | CM <sup>2</sup> | CM3         | CM4         | KG/M  |
| ANCHO NOMINAL: 12" ANCHO SECCION TERMINADA: 10 3/4 (27.305 CM) |     |        |                 |             |             |       |
| 12X14  | 7   | 26.67  | 728.22          | 3236.95     | 43164.82    | 47.3  |
| 12X16  | 8   | 30.48  | 832.25          | 4227.86     | 64432.62    | 54.0  |
| 12X18  | 9   | 34.29  | 936.28          | 5350.88     | 91740.98    | 60.8  |
| 12X20  | 10  | 38.10  | 1040.32         | 6606.03     | 125844.97   | 67.6  |
| 12X22  | 11  | 41.91  | 1144.35         | 7993.30     | 167499.65   | 74.3  |
| 12X24  | 12  | 45.72  | 1248.38         | 9512.69     | 217460.10   | 81.1  |
| 12X26  | 13  | 49.53  | 1352.41         | 11164.19    | 276481.39   | 87.9  |
| 12X28  | 14  | 53.34  | 1456.44         | 12947.82    | 345318.59   | 94.6  |
| 12X30  | 15  | 57.15  | 1560.48         | 14863.57    | 424726.77   | 101.0 |
| 12X32  | 16  | 60.96  | 1664.51         | 16911.45    | 515460.99   | 108.0 |
| 12X34  | 17  | 64.77  | 1768.54         | 19091.44    | 618276.33   | 114.0 |
| 12X36  | 18  | 68.58  | 1872.57         | 21403.55    | 733927.80   | 121.0 |
| 12X38  | 19  | 72.39  | 1976.60         | 23847.78    | 863170.64   | 128.0 |
| 12X40  | 20  | 76.20  | 2080.64         | 26424.14    | 1006759.76  | 135.0 |
| 12X42  | 21  | 80.01  | 2184.67         | 29132.61    | 1165450.26  | 142.0 |
| 12X44  | 22  | 83.82  | 2288.70         | 31973.21    | 1339797.24  | 148.0 |
| 12X46  | 23  | 87.63  | 2392.73         | 34945.92    | 1531155.75  | 155.0 |
| 12X48  | 24  | 91.44  | 2496.76         | 38050.76    | 1739680.86  | 162.0 |
| 12X50  | 25  | 95.25  | 2600.80         | 41287.71    | 1966327.86  | 169.0 |
| 12X52  | 26  | 99.06  | 2704.83         | 44656.79    | 2211851.19  | 175.0 |
| 12X54  | 27  | 102.87 | 2808.86         | 48157.99    | 2477006.54  | 182.0 |
| 12X56  | 28  | 106.68 | 2912.89         | 51791.31    | 2762548.78  | 189.0 |
| 12X58  | 29  | 110.49 | 3016.92         | 55554.75    | 3069232.97  | 196.0 |
| 12X60  | 30  | 114.30 | 3120.96         | 59454.31    | 3397814.19  | 202.0 |
| 12X62  | 31  | 118.11 | 3224.99         | 63483.99    | 3749047.50  | 209.0 |
| 12X64  | 32  | 121.92 | 3329.02         | 67643.80    | 4123687.98  | 216.0 |
| 12X66  | 33  | 125.73 | 3433.05         | 71939.72    | 4522490.69  | 223.0 |
| 12X68  | 34  | 129.54 | 3537.08         | 76365.76    | 4946210.70  | 229.0 |
| 12X70  | 35  | 133.35 | 3641.12         | 80923.93    | 5395403.09  | 236.0 |
| 12X72  | 36  | 137.16 | 3745.15         | 85614.21    | 5871422.92  | 243.0 |
| 12X74  | 37  | 140.97 | 3849.18         | 90436.62    | 6374425.27  | 250.0 |
| 12X76  | 38  | 144.78 | 3953.21         | 95391.14    | 6905365.19  | 256.0 |
| 12X78  | 39  | 148.59 | 4057.24         | 100477.79   | 7464977.78  | 263.0 |
| 12X80  | 40  | 152.40 | 4161.28         | 105696.56   | 8054078.00  | 270.0 |
| 12X82  | 41  | 156.21 | 4265.31         | 111047.45   | 8673361.18  | 277.0 |
| 12X84  | 42  | 160.02 | 4369.34         | 116530.46   | 9323602.14  | 284.0 |
| 12X86  | 43  | 163.83 | 4473.37         | 122145.59   | 10005556.04 | 290.0 |
| 12X88  | 44  | 167.64 | 4577.41         | 127892.84   | 10719777.93 | 297.0 |
| 12X90  | 45  | 171.45 | 4681.44         | 133772.21   | 11467622.90 | 304.0 |
| 12X92  | 46  | 175.26 | 4785.47         | 139783.70   | 12249246.01 | 311.0 |
| 12X94  | 47  | 179.07 | 4889.50         | 145927.31   | 13065602.33 | 317.0 |
| 12X96  | 48  | 182.88 | 4993.53         | 152203.05   | 13927446.93 | 324.0 |
| 12X98  | 49  | 186.69 | 5097.57         | 158610.90   | 14805534.89 | 331.0 |
| 12X100   | 50  | 190.50 | 5201.60         | 165150.87   | 15720621.26 | 338.0 |

La nomenclatura al referir cierto elemento estructural de madera laminada se ilustra mediante el siguiente ejemplo:

Sección: 6 x 18

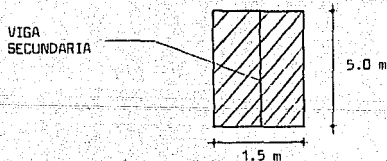
Ancho nominal de la sección: 6"

Profundidad nominal de 9 láminas de 2" de espesor: 18"

Debido a que los elementos serán utilizados en el interior de la edificación y tomando en cuenta el contenido de humedad en equilibrio del lugar, el contenido de humedad de las vigas variará entre un 9% y 14% en servicio, dependiendo de la época del año. La madera deberá ser tratada para que no sufra cambios dimensionales apreciables. El contenido de humedad después de la fabricación del elemento no excederá de 14%.

#### 7.2.2 DISEÑO DE VIGAS LAMINADAS SECUNDARIAS.

El Área tributaria de diseño es: ( FIG 7.5 )



$$A_t = 5.0 \times 1.5 = 7.5 \text{ m}^2$$

FIG 7.5: Área tributaria de diseño de un elemento secundario

### 7.2.2.1 DISEÑO POR CARGAS GRAVITACIONALES.

Claro sin soporte lateral: 5.0 m

Área: 7.5 m<sup>2</sup>

PASO 1:

Se escoge una sección con las siguientes medidas aproximadas:

Profundidad de la viga:  $5/100 \times 500 = 25$  cm

Ancho de la viga:  $2/100 \times 500 = 10$  cm

Después de realizar varias iteraciones, escogemos una sección 6 x 12 con las siguientes características:

No. laminaciones: 6

Ancho nominal: 6"

Profundidad nominal: 12"

Profundidad  $d = 22.86$  cm

Ancho  $b = 13.017$  cm

Área  $A = 277.16$  cm<sup>2</sup>

Módulo de Sección  $S = 1133.73$  cm<sup>3</sup>

Momento de Inercia  $I_x = 12958.60$  cm<sup>4</sup>

$W_p = 19.3$  kg/m

Carga de diseño para revisión de estados límite de falla:

$$W_g = (187.5)(7.5)/5.0 + (1.5)(19.3) = 310.57 \text{ kg/m}$$



Carga de diseño para revisión de los estados límite de servicio:

$$W_{gs} = (125)(7.5)/5.0 + 19.3 = 206.80 \text{ kg/m}$$

Carga de diseño para el análisis de deformación diferida:

$$W_d = (40)(7.5)/5.0 + 19.3 = 79.30 \text{ kg/m}$$

PASO 2:

- Factor de duración de carga:

Para carga normal, muerta más viva:  $k_d = 1.0$

- Factor por el contenido de humedad:

Debido a que la estructura no alcanzará un contenido de humedad mayor que el 16%:  $k_h = 1.0$

- Factor de ajuste por tratamiento:  $k_t = 0.90$

- Factor de forma:  $k_f = 1.0$

- Factor de tamaño:

$$1/d = 500/22.86 = 21.86$$

$$C_t = (12 / 9)^{1/9} = 1.03 \text{ para } 1/d = 21$$

- Factor por nudos:

Para ancho efectivo 5 1/8:

Ancho máximo de nudos: 1.2 cm

$$k/b = 1.2/13.017 = 0.092$$

de las gráficas mostradas anteriormente, obtenemos:

$$( I_k / I_g ) / ( k / b ) = 0.83$$

Entonces:

$$I_k / I_g = ( 0.83 ) ( 0.092 ) = 0.0763$$

$$C_n \text{ para flexión} = 0.93$$

$$C_n \text{ para el módulo de elasticidad} = 0.99$$

- Factor por pendiente de grano:

$$C_g = 0.85 \text{ para pendiente } 1:18$$

- Factor por empalmes:

$$C_e = 0.90 \text{ para pendiente } t/a = 1/12$$

Resumen de factores:

$$k_d = 1.0$$

$$k_d = 1.0$$

$$k_t = 0.90$$

$$C_t = 1.03$$

$$C_n \text{ ( flexión )} = 0.93$$

$$C_n \text{ ( mod. elást. )} = 0.99$$

$$C_g = 0.85$$

$$C_e = 0.90$$

Modificación de esfuerzos:

FLEXION:

$$F_b = 210 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{b1} = 210 ( 0.90 / 0.93 / 0.85 )$$

$$F_{b1} = 178.50 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{b*} = ( 178.50 ) ( 1.0 ) ( 1.0 ) ( 0.90 )$$

$$F_{b*} = 160.65 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{bm} = F_b ( 0.90 / 0.93 / 0.85 / 1.03 )$$

$$F_{bm} = 178.50 \text{ kg/cm}^2$$

$$F''b = (178.50)(1.0)(1.0)(0.90)$$

$$F''b = 160.65 \text{ kg/cm}^2$$

CORTANTE:

$$F_v = 18 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{vd} = (18)(1.0)(1.0)(0.90)$$

$$F_{vd} = 16.20 \text{ kg/cm}^2$$

COMPRESION PERPENDICULAR:

$$F_c = 50 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{cd} = (50)(1.0)(1.0)(0.90) = 45 \text{ kg/cm}^2$$

MODULO DE ELASTICIDAD:

$$E = 115\,000 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_1 = (115\,000)(0.90 / 0.85 / 0.99)$$

$$E_1 = 97\,750 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_d = (97\,750)(1.0)(0.90) = 87\,975 \text{ kg/cm}^2$$

FASO 3:

$$\text{Mom Máximo} = w l^2 / 8 = (310.57)(5^2) / 8 = 970.53 \text{ kg-m}$$

Módulo de sección aproximado sin considerar pandeo lateral:

$$S = (970.53)(100) / (0.8)(160.65) = 766.15 \text{ cm}^3$$

Módulo de sección aproximado, considerando el pandeo lateral mediante un factor de 0.85:

$$S = (970.53)(100) / (0.85)(0.80)(160.65)$$

$$S = 888.46 \text{ cm}^3 < 1133.73 \text{ cm}^3 \text{ ----> OK}$$

$$\text{Reacción en el apoyo: } (310.57)(5) / 2 = 776.42 \text{ kg}$$

$$\text{Cortante } V = 776 - (310.57)(5) / 20$$

$$V = 698.78 \text{ kg}$$

$$\text{Area necesaria } A = (698.78)(1.5) / (0.70)(16.20)$$

$$A = 92.43 \text{ cm}^2 < 297.56 \text{ cm}^2 \text{ ----> OK}$$

PASO 4 Y 5:

Se continúa el diseño con la misma sección.

PASO 6:

Como el contenido de humedad de la viga no excederá el 16%, entonces la deformación, incluyendo los efectos a largo plazo, es:

$$df = [(5.0)(500)^4 / (384)(87975)(12958.6)] [2.06 + 0.79]$$

$$df = 2.03 \text{ cm}$$

$$\text{Flecha máxima} = 500 / 240 + 0.5 = 2.58 > 2.03 \text{ ----> OK}$$

PASO 7

$$lu = 500$$

Para vigas simplemente apoyadas, con carga uniformemente distribuida:

$$l_e = (1.92)(500) = 960$$

$$b = 13.017 \text{ cm}$$

$$d = 22.860 \text{ cm}$$

entonces:

$$C_s = \sqrt{(l_e)(d)/(b)^3} \quad C_s = \sqrt{(960)(22.86)/(13.017)^3}$$

$$C_s = 11.38$$

el factor  $C_k$  es:

$$C_k = 0.811 \sqrt{87975/160.65}$$

$$C_k = 16.97$$

$$\text{Como } 10 < 11.38 < 16.97$$

se trata de una viga intermedia.

$$F'b = (160.65) \left[ 1 - \left( \frac{1}{3} \right) \left( \frac{11.38}{16.97} \right)^4 \right]$$

$$F'b = 149.82 \text{ kg/cm}^2$$

$$F''b = 160.65 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{El esfuerzo de dise\u00f1o } F_{bd} = 149.82 \text{ kg/cm}^2$$

PASO 8:

$$MR = (0.80)(149.82)(1133.73)$$

$$MR = 135884 \text{ kg-cm} > 97053 \text{ kg-cm} \text{ ----> OK}$$

PASO 9:

Aplastamiento.

$$p = 776.42 \text{ kg (Reacci\u00f3n)}$$

$$b = 13.017 \text{ cm}$$

$$Fcd = 45 \text{ kg/cm}^2$$

$$FR = 0.90$$

la longitud de soporte lb necesaria es:

$$lb = 776.42 / ( 0.90 ) ( 45 ) ( 13.017 )$$

$$lb = 1.47 \text{ cm}$$

la longitud minima de soporte deberá ser de 2 cms.

#### 7.2.2.2 REVISIÓN POR CARGAS GRAVITACIONALES MAS VIENTO O GRANIZO.

La revisión se realiza comparando los cocientes de las diversas cargas entre los factores de duración de carga correspondientes. El diseño que rige es el del cociente máximo.

$$\text{Carga gravitacional } Wg = 310.57 \text{ kg/m}$$

Carga gravitacional más viento:

$$Wv = ( -126.50 ) ( 7.5 ) / 5.0 + 1.1 ( 19.3 )$$

$$Wv = -210.98 \text{ kg/m}$$

Carga gravitacional más granizo:

$$Wgr = ( 137.50 ) ( 7.5 ) / 5.0 + 1.1 ( 19.3 )$$

$$Wgr = 227.48 \text{ kg/m}$$

$$\text{Cociente 1: } 310.57 / 1.0 = 310.57$$

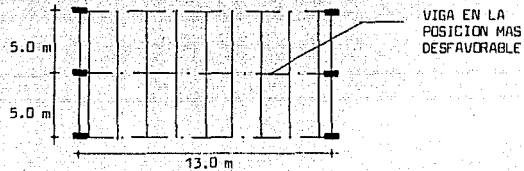
$$\text{Cociente 2: } 210.98 / 1.33 = 158.63$$

$$\text{Cociente 3: } 227.48 / 1.33 = 171.03$$

El cociente mayor es 310.57. El diseño que rige es el de cargas gravitacionales. Debido a que la sección es simétrica con respecto al eje horizontal, por inspección se concluye que las fuerzas provocadas por el viento y el granizo son resistidas por las vigas propuestas.

### 7.2.3 DISEÑO DE VIGAS LAMINADAS PRINCIPALES.

Se realizará el diseño en base a la viga en la posición más desfavorable, como se muestra a continuación: (FIG 7.6)



Las vigas estarán articuladas en las columnas

Longitud del claro: 13.0 m

Longitud no soportada lateralmente: 1.50 m

FIG 7.6: Viga tipo para diseño de elementos principales.

#### 7.2.3.1 DISEÑO POR CARGAS GRAVITACIONALES.

No de descargas = 11

Magnitud de descarga de 2 vigas secundarias:

Para estados límite de falla:  $2(776.42) = 1552.84 \text{ kg}$

Para estados límite de servicio:  $2(206.8)(5)/2 = 1034.00 \text{ kg}$

Para análisis de deformaciones diferidas:

$2(79.30)(5)/2 = 396.50 \text{ kg}$

**Cargas en la viga propuesta:**

$W_g = (1552.84)(11) / 13.0 + 1.5 W_p = 1313 \text{ kg/m} + 1.5 W_p$

$W_s = (1034.00)(11) / 13.0 + W_p = 875.92 \text{ kg/m} + W_p$

$W_d = (396.50)(11) / 13.0 + W_p = 335 \text{ kg/m} + W_p$

**PASO 1:**

Se selecciona una viga de las siguientes medidas aproximadas:

$b = (5/100)(1300) = 65 \text{ cm}$

$d = (2/100)(1300) = 26 \text{ cm}$

Después de varias iteraciones, ensayamos la siguiente sección  $12 \times 42$  con las siguientes propiedades:

No. laminaciones: 21

$d = 80.01 \text{ cm}$

$b = 27.305 \text{ cm}$

$A = 218.67 \text{ cm}^2$

$S = 29132 \text{ cm}^3$

$I_x = 1165450.26 \text{ cm}^4$

$W_p = 142 \text{ kg/m}$



$$W_g = 1313 + 1.5 ( 142 ) = 1526 \text{ kg/m}$$

$$W_{gs} = 874 + 142 = 1016 \text{ kg/m}$$

$$W_d = 335 + 142 = 447 \text{ kg/m}$$

PASO 2:

$$- k_d = 1.0$$

$$- k_h = 1.0$$

$$- k_t = 0.90$$

$$- k_f = 1.0$$

- Factor de tamaño:

$$1/d = 1300/80.01 = 16 \quad \text{Corrección} = 1.02$$

$$C_t = (1.02)^{1/9} (12/d)^{1/9} = (1.02)^{1/9} (12/31.5)^{1/9}$$

$$C_t = 0.91$$

- Factor por nudos:

Para ancho efectivo 10 3/4":

$$b = 2.8 \text{ cm}$$

$$k / b = 2.8 / 27.395 = 0.102$$

de gráfica:

$$( I_k / I_g ) / ( k / b ) = 0.56$$

$$I_k / I_g = 0.057$$

$$C_n \text{ Flexión} = (1 + 3(0.060)^3)(1 - 0.060)(1 - 0.060/2) = 0.95$$

$$C_n \text{ Mod Elasticidad} = (1 - 0.060^2) = 0.99$$

- Pendiente del grano:

$$C_g = 0.85 \text{ pendiente } 1:18$$

- Empalmes:

$$C_e = 0.90 \text{ para } t/a = 1/12$$

Debido a que el factor  $C_g$  sigue siendo el más crítico, los esfuerzos calculados para elementos secundarios se aplican también a los principales. Entonces:

$$F_b = 210.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$F''_b = 160.65 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_b^* = 160.65 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{vd} = 16.20 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{cd} = 45.00 \text{ kg/cm}^2$$

PASO 3:

$$M_{\text{Max}} = (1526)(13)^2 / 8 = 32\,236 \text{ kg-m}$$

Debido a que hay un soporte lateral continuo, el módulo de sección necesario es:

$$S_{\text{nec}} = (32\,236)(100) / (0.8)(160.65)$$

$$S_{\text{nec}} = 25\,082 \text{ cm}^3 < 29\,132 \text{ cm}^3 \text{ ----> OK}$$

$$\text{Reacción: } (1526)(13) / 2 = 9\,919 \text{ kg}$$

$$V = 9\,919 - (1526)(13) / 20 = 8\,927 \text{ kg}$$

$$\text{Area necesaria} = (8\,927)(1.5) / (0.7)(16.20)$$

$$A = 1180 \text{ cm}^2 < 2184.67 \text{ cm}^2 \text{ ----> OK}$$

PASO 4 Y 5:

Se sigue analizando la sección propuesta.

PASO 6:

La deflexión, incluyendo la deformación diferida es:

$$df = \frac{(5)(1300)^4}{(384)(27975)(1165450)} [110.16 + 4.77]$$

$$df = 5.41 \text{ cm}$$

$$\text{Flecha permisible} = 1300/240 + 0.5 = 5.91 > 5.41 \text{ ----> OK}$$

PASO 7:

$$l_u = 150$$

$$b = 27.305 \text{ cm}$$

$$d = 80.01 \text{ cm}$$

$$l_e = (1.92)(150) = 288 \text{ cm}$$

$$C_s = \sqrt{(288)(80.01)/(27.305)^2}$$

$$C_s = 5.55$$

Como  $C_s < 10$ , entonces:

$$F_{bd} = F_b^* = F''_b = 160.65 \text{ kg/cm}^2$$

PASO 8:

$$MR = (0.8)(29132)(160.65)$$

$$MR = 37\,440 \text{ kg-m} > 32\,236 \text{ kg-m} \text{ ----> OK}$$

PASO 9:

Aplastamiento:

$$p = 9\,919 \text{ kg}$$

$$b = 27.305 \text{ cm}$$

$$Fcd = 45 \text{ kg/cm}^2$$

$$lb = (9\,919) / ((0.9)(45)(27.305))$$

$$lb = 8.96 \text{ cm}$$

La longitud de soporte necesaria en apoyos será de 10 cm.

#### 7.2.3.2 REVISION PARA CARGA GRAVITACIONAL MAS VIENTO O GRANIZO.

Carga muerta: 25 kg/m<sup>2</sup>

Peso propio viga secundaria: 19.30 kg/m

Peso propio viga principal: 142 kg/m

Area tributaria de 1 viga secundaria: 7.5 m<sup>2</sup>

- Cálculo de la carga Wv en vigas principales.

Presión de diseño para miembros principales: -35.20 kg/m<sup>2</sup>

Carga Wv en viga secundaria, sin considerar carga viva instantanea:

$W_v = (1.1)(25 - 35.20)(7.5)/5 + (1.1)(19.30) = 4.4 \text{ kg/m}$  ( No hay succiones )

Carga  $W_v$  en viga secundaria, considerando la carga viva instantanea:

$W_v = (1.1)(25 + 70 - 35.20)(7.5)/5 + (19.30)(1.1)$

$W_v = 119 \text{ kg/m}$

$W_v$  más desfavorable = 119.90 kg/m

Descarga en viga principal = ( 119.9 ) ( 5 ) = 299.75 kg

Carga  $W_v$  en vigas principales:

$W_v = ( 11 ) ( 299.75 ) / 13 + 1.1 W_p$

$W_v = 507.26 + 1.1 ( 142 ) = 409.83 \text{ kg/m}$

- Carga  $W_{gr}$  en vigas principales.

$W_{gr}$  en vigas secundarias = 227.48 kg/m

Descarga de una viga secundaria = (227.48)(5)/2 = 568.70 kg

Descarga de dos vigas secundarias = 1137.40 kg

$W_{gr} = ( 11 ) ( 1137.40 ) / 13 + 1.1 ( 142 )$

$W_{gr} = 1118.61 \text{ kg/m}$

- Cálculo del cociente más desfavorable:

Cociente 1:  $W_g / k_d = 1526 / 1.0 = 1526$

Cociente 2:  $W_v / k_d = 409 / 1.33 = 308$

Cociente 3:  $W_{gr} / k_d = 1118 / 1.33 = 841$

El cociente 1, que corresponde a cargas gravitacionales, rige el diseño de elementos principales.

#### 7.2.4 ASPECTOS A CONSIDERAR EN LA FABRICACION PROVENIENTES DEL DISEÑO.

##### 1. Las vigas tienen las siguientes medidas nominales:

Secundarias: 6" x 12" . Se usan 6 tablas de 6" x 2" de sección nominal.

Principales: 12" x 42" . Se usan 21 tablas de 12" x 2" de sección nominal.

##### 2. Las vigas, al término del proceso de fabricación, deberán tener las siguientes dimensiones efectivas:

Secundarias: 5 1/8 x 6 tablas de 1 1/2

Principales: 10 3/4 x 21 tablas de 1 1/2

Las tablas se colocarán paralelamente al eje longitudinal de la sección.

##### 3. Clasificación:

Eje de la Tabla:



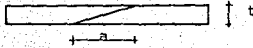
a. La madera deberá clasificarse Tipo A, mediante la regla industrial, según la Norma Oficial Mexicana NOM C-239-1985.

b. El tamaño máximo permisible de los nudos al clasificar la madera es, en elementos secundarios, de 1.2 cm y en elementos principales, de 2.8 cm. En dirección paralela al

eje de la tabla, podrán aparecer 2 ó más nudos de grosor máximo, en distancias no menores de 13 cm en vigas secundarias y de 27 cm en vigas principales. La suma de los anchos de los nudos en dirección recta, perpendicular al eje de la tabla, no deberá exceder al grosor máximo permisible.

c. La pendiente máxima del grano es de 1:18.

4. Los empalmes se fabricarán con pendiente  $t/a = 1/12$  como se ilustra:



### 7.3 DISEÑO MEDIANTE ELEMENTOS DE ACERO.

#### 7.3.1 ASPECTOS PRELIMINARES.

Se proponen viguetas "I" apoyadas en armaduras principales. El diseño se basa en el criterio de estados límite de acuerdo al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas.

Se utilizará acero A-36 con las siguientes propiedades:

Módulo de Elasticidad  $E = 2\ 040\ 000\ \text{kg/cm}^2$

Esfuerzo inferior de fluencia  $F_y = 2530\ \text{kg/cm}^2$

Esfuerzo de ruptura a tensión  $F_u = 4200\ \text{kg/cm}^2$

La nomenclatura de las secciones a utilizar se basan en el Manual del Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, AC. ( IMCA )

### 7.3.1.1 TENSION.

Se considerarán los estados límite de flujo plástico en la sección total y fractura en el área neta. La resistencia RT de un elemento estructural de acero en tensión es la menor de las calculadas con alguna de las siguientes ecuaciones:

#### a. Flujo plástico en la sección total:

$$RT = (AT)(Fy)(FR)$$

$$FR = 0.90$$

#### b. Fractura en la sección neta:

$$RT = (Ae)(Fu)(FR)$$

$$FR = 0.75$$

AT es el área total de la sección transversal del miembro; Ae es el área neta efectiva; Fy es el esfuerzo correspondiente al límite inferior de fluencia del material; Fu es el esfuerzo mínimo especificado de ruptura en tensión.



Debido a que los elementos se conectarán por medio de soldaduras en las secciones transversales correspondientes, el área neta efectiva es igual al área total.

### 7.3.1.2 COMPRESION.

a. Se limitarán las relaciones ancho-groeso de las secciones, de manera que el pandeo local no sea crítico.

Para las secciones que se utilizarán en este proyecto, los valores máximos de estas relaciones son:

Alas de ángulos dobles en compresión:  $640 / \sqrt{F_y}$

Alas de ángulos en cajón:  $2100 / \sqrt{F_y}$

b. Resistencia de Diseño.

La resistencia de diseño en compresión se evalúa de la siguiente manera:

- Secciones en cajón:

$$RC = F_y / [ 1 + \mu^{1/n} - 0.15^2 \mu ]^{1/n} (AT)(FR) \leq F_y AT FR$$

$$FR = 0.90$$

AT = Área total de la sección en compresión

$$\mu = kl/r [ F_y / \pi^2 E ]$$

k = 1.0 para miembros articulados en los extremos

El coeficiente n para secciones en cajón tiene un valor de 1.4.

- Para ángulos dobles:

$$\text{Si } k1/r \geq (k1/r)e \text{ RC} = 20 \cdot 120 \cdot 000 (AT) (FR) / (k1/r)^2$$

$$\text{Si } k1/r < (k1/r)e$$

$$\text{RC} = (AT)(Fy)[1 - (k1/r)^2 / (2)(k1/r)^2 e] (FR)$$

en donde:

$$(k1/r)e = 6340 / \sqrt{Fy}$$

$$FR = 0.85$$

Para facilitar el diseño, a continuación se muestran tablas que proporcionan las resistencias unitarias de diseño RC/AT para relaciones de esbeltez comprendidas entre 1 y 200 de acuerdo a las expresiones anteriores.

TABLA 7.3

| SECCIONES: H/I/CAJON<br>Fy = 2530 KG/CM <sup>2</sup> |       | ESFUERZO DE DISEÑO RC/AT EN KG/CM <sup>2</sup><br>FR = 0.90 n = 1.4 |       |      |       |      |       |
|--|-------|---|-------|------|-------|------|-------|
| k1/r   | RC/AT | k1/r  | RC/AT | k1/r | RC/AT | k1/r | RC/AT |
| 1  | 2277  | 51  | 1994  | 101  | 1214  | 151  | 686   |
| 2  | 2277  | 52  | 1980  | 102  | 1200  | 152  | 679   |
| 3  | 2277  | 53  | 1967  | 103  | 1187  | 153  | 673   |
| 4  | 2277  | 54  | 1952  | 104  | 1173  | 154  | 665   |
| 5  | 2277  | 55  | 1938  | 105  | 1159  | 155  | 658   |
| 6  | 2277  | 56  | 1923  | 106  | 1146  | 156  | 651   |
| 7  | 2277  | 57  | 1909  | 107  | 1132  | 157  | 644   |
| 8  | 2277  | 58  | 1893  | 108  | 1119  | 158  | 637   |
| 9  | 2277  | 59  | 1878  | 109  | 1106  | 159  | 630   |
| 10   | 2277  | 60  | 1863  | 110  | 1093  | 160  | 624   |
| 11   | 2277  | 61  | 1847  | 111  | 1081  | 161  | 617   |
| 12   | 2277  | 62  | 1832  | 112  | 1068  | 162  | 611   |
| 13   | 2277  | 63  | 1816  | 113  | 1056  | 163  | 605   |
| 14   | 2276  | 64  | 1800  | 114  | 1043  | 164  | 598   |
| 15   | 2274  | 65  | 1784  | 115  | 1031  | 165  | 592   |
| 16   | 2272  | 66  | 1768  | 116  | 1019  | 166  | 586   |

| k1/r | RC/AT | k1/r | RC/AT | k1/r | RC/AT | k1/r | RC/AT |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| 17   | 2269  | 67   | 1752  | 117  | 1007  | 167  | 580   |
| 18   | 2267  | 68   | 1735  | 118  | 996   | 168  | 574   |
| 19   | 2264  | 69   | 1719  | 119  | 984   | 169  | 568   |
| 20   | 2260  | 70   | 1703  | 120  | 973   | 170  | 563   |
| 21   | 2257  | 71   | 1686  | 121  | 962   | 171  | 557   |
| 22   | 2253  | 72   | 1670  | 122  | 950   | 172  | 551   |
| 23   | 2249  | 73   | 1653  | 123  | 940   | 173  | 546   |
| 24   | 2244  | 74   | 1637  | 124  | 929   | 174  | 541   |
| 25   | 2240  | 75   | 1620  | 125  | 918   | 175  | 535   |
| 26   | 2234  | 76   | 1604  | 126  | 908   | 176  | 530   |
| 27   | 2229  | 77   | 1587  | 127  | 897   | 177  | 525   |
| 28   | 2223  | 78   | 1571  | 128  | 887   | 178  | 520   |
| 29   | 2217  | 79   | 1554  | 129  | 877   | 179  | 515   |
| 30   | 2211  | 80   | 1538  | 130  | 867   | 180  | 510   |
| 31   | 2204  | 81   | 1522  | 131  | 857   | 181  | 505   |
| 32   | 2196  | 82   | 1505  | 132  | 847   | 182  | 500   |
| 33   | 2189  | 83   | 1489  | 133  | 838   | 183  | 495   |
| 34   | 2181  | 84   | 1473  | 134  | 828   | 184  | 490   |
| 35   | 2173  | 85   | 1457  | 135  | 819   | 185  | 485   |
| 36   | 2164  | 86   | 1441  | 136  | 810   | 186  | 481   |
| 37   | 2155  | 87   | 1425  | 137  | 801   | 187  | 476   |
| 38   | 2146  | 88   | 1409  | 138  | 792   | 188  | 472   |
| 39   | 2136  | 89   | 1394  | 139  | 783   | 189  | 467   |
| 40   | 2126  | 90   | 1378  | 140  | 774   | 190  | 463   |
| 41   | 2116  | 91   | 1362  | 141  | 766   | 191  | 459   |
| 42   | 2105  | 92   | 1347  | 142  | 757   | 192  | 454   |
| 43   | 2094  | 93   | 1332  | 143  | 749   | 193  | 450   |
| 44   | 2082  | 94   | 1317  | 144  | 741   | 194  | 446   |
| 45   | 2071  | 95   | 1302  | 145  | 733   | 195  | 442   |
| 46   | 2059  | 96   | 1287  | 146  | 725   | 196  | 438   |
| 47   | 2046  | 97   | 1272  | 147  | 717   | 197  | 434   |
| 48   | 2034  | 98   | 1257  | 148  | 709   | 198  | 430   |
| 49   | 2021  | 99   | 1243  | 149  | 701   | 199  | 426   |
| 50   | 2008  | 100  | 1229  | 150  | 694   | 200  | 422   |

TABLA 7.4

| SECCION: CUALQUIERA EGFUERZO DE DISERO RC/AT EN KG/CM <sup>2</sup> |       |      |       |           |       |      |       |
|--|-------|------|-------|-----------|-------|------|-------|
| Fy = 2530 KG/CM <sup>2</sup>                                       |       |      |       | FR = 0.85 |       |      |       |
| k1/r   | RC/AT | k1/r | RC/AT | k1/r      | RC/AT | k1/r | RC/AT |
| 1  | 2150  | 51   | 1974  | 101       | 1460  | 151  | 750   |
| 2  | 2150  | 52   | 1968  | 102       | 1446  | 152  | 740   |
| 3  | 2150  | 53   | 1960  | 103       | 1433  | 153  | 731   |
| 4  | 2149  | 54   | 1953  | 104       | 1419  | 154  | 721   |
| 5  | 2149  | 55   | 1944  | 105       | 1404  | 155  | 712   |
| 6  | 2148  | 56   | 1938  | 106       | 1390  | 156  | 703   |
| 7  | 2147  | 57   | 1931  | 107       | 1376  | 157  | 694   |
| 8  | 2146  | 58   | 1923  | 108       | 1361  | 158  | 685   |
| 9  | 2145  | 59   | 1915  | 109       | 1346  | 159  | 676   |
| 10   | 2144  | 60   | 1907  | 110       | 1332  | 160  | 668   |
| 11   | 2142  | 61   | 1899  | 111       | 1317  | 161  | 660   |
| 12   | 2141  | 62   | 1890  | 112       | 1302  | 162  | 652   |
| 13   | 2139  | 63   | 1882  | 113       | 1286  | 163  | 644   |
| 14   | 2137  | 64   | 1873  | 114       | 1271  | 164  | 636   |
| 15   | 2135  | 65   | 1865  | 115       | 1256  | 165  | 628   |
| 16   | 2133  | 66   | 1856  | 116       | 1240  | 166  | 621   |
| 17   | 2131  | 67   | 1847  | 117       | 1224  | 167  | 613   |
| 18   | 2129  | 68   | 1838  | 118       | 1208  | 168  | 606   |
| 19   | 2126  | 69   | 1828  | 119       | 1192  | 169  | 599   |
| 20   | 2123  | 70   | 1819  | 120       | 1176  | 170  | 592   |
| 21   | 2121  | 71   | 1809  | 121       | 1160  | 171  | 585   |
| 22   | 2118  | 72   | 1800  | 122       | 1143  | 172  | 578   |
| 23   | 2115  | 73   | 1790  | 123       | 1127  | 173  | 571   |
| 24   | 2112  | 74   | 1780  | 124       | 1110  | 174  | 565   |
| 25   | 2108  | 75   | 1770  | 125       | 1093  | 175  | 558   |
| 26   | 2105  | 76   | 1760  | 126       | 1077  | 176  | 552   |
| 27   | 2101  | 77   | 1749  | 127       | 1060  | 177  | 546   |
| 28   | 2097  | 78   | 1739  | 128       | 1044  | 178  | 540   |
| 29   | 2094  | 79   | 1728  | 129       | 1028  | 179  | 534   |
| 30   | 2090  | 80   | 1717  | 130       | 1012  | 180  | 528   |
| 31   | 2085  | 81   | 1706  | 131       | 997   | 181  | 522   |
| 32   | 2081  | 82   | 1695  | 132       | 982   | 182  | 516   |
| 33   | 2077  | 83   | 1684  | 133       | 967   | 183  | 511   |
| 34   | 2072  | 84   | 1673  | 134       | 952   | 184  | 505   |
| 35   | 2068  | 85   | 1662  | 135       | 938   | 185  | 500   |
| 36   | 2063  | 86   | 1650  | 136       | 925   | 186  | 494   |
| 37   | 2058  | 87   | 1638  | 137       | 911   | 187  | 489   |
| 38   | 2053  | 88   | 1626  | 138       | 898   | 188  | 484   |
| 39   | 2048  | 89   | 1614  | 139       | 885   | 189  | 479   |
| 40   | 2042  | 90   | 1602  | 140       | 873   | 190  | 474   |
| 41   | 2037  | 91   | 1590  | 141       | 860   | 191  | 469   |
| 42   | 2031  | 92   | 1578  | 142       | 848   | 192  | 464   |
| 43   | 2025  | 93   | 1565  | 143       | 836   | 193  | 459   |
| 44   | 2019  | 94   | 1553  | 144       | 825   | 194  | 454   |
| 45   | 2013  | 95   | 1540  | 145       | 813   | 195  | 450   |

| kl/r | RC/AT | kl/r | RC/AT | kl/r | RC/AT | kl/r | RC/AT |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| 46   | 2007  | 96   | 1527  | 146  | 802   | 196  | 445   |
| 47   | 2001  | 97   | 1514  | 147  | 791   | 197  | 441   |
| 48   | 1995  | 98   | 1501  | 148  | 781   | 198  | 436   |
| 49   | 1988  | 99   | 1487  | 149  | 770   | 199  | 432   |
| 50   | 1981  | 100  | 1474  | 150  | 760   | 200  | 428   |

### 7.3.1.3 FLEXION.

En el diseño de miembros a flexión, deben considerarse los estados límite de falla siguientes:

- Agotamiento de la resistencia a la flexión en la sección crítica. Debido a que las vigas a considerar son isostáticas, no hay redistribución de momentos.
- Resistencia del alma al cortante.
- Pandeo lateral por flexotorsión.
- Pandeo local.

También debe considerarse el estado límite de servicio relativo a las deformaciones.

#### a. Clasificación de la estructura.

La sección se clasifica tipo 1 o 2 en función de las relaciones ancho-grueso máximas de sus elementos planos. La sección tipo 1 (secciones para diseño plástico) pueden alcanzar el momento plástico y conservarlo durante las

rotaciones necesarias para la redistribución de momentos en la estructura. Las secciones tipo 2 ( compactas ) pueden alcanzar el momento plástico, pero no tienen capacidad de rotación bajo momento constante de esa magnitud.

Las relaciones ancho/grueso de las vigas no deben exceder los siguientes valores:

Patines de Sección I:

Tipo 1:  $460 / \sqrt{F_y}$

Tipo 2:  $540 / \sqrt{F_y}$

Alma de Sección I:

Tipo 1:  $2100 / \sqrt{F_y}$

Tipo 2:  $3300 / \sqrt{F_y}$

Las limitaciones geométricas anteriores aseguran que las secciones tipo 1 y 2 puedan alcanzar sus estados límite de resistencia sin que se presenten fenómenos prematuros de pandeo local.

#### b. Flexión.

La representación gráfica de la resistencia de diseño de miembros en flexión para secciones tipo 1 y 2 se muestra a continuación: ( FIG 7.7 )

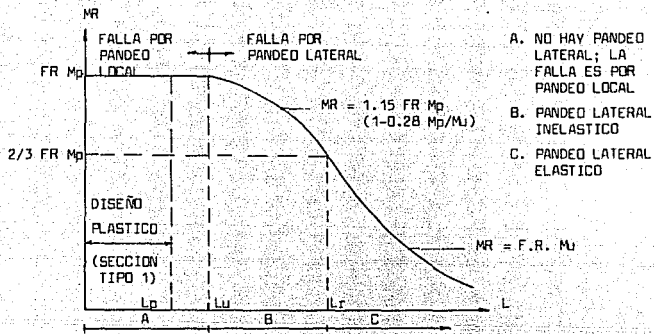


FIG 7.7: Representación gráfica de la resistencia de miembros de acero a flexión. ( NTC-RCDF )

En donde:

$L_p$  = Longitud máxima no soportada lateralmente para la que el miembro puede desarrollar todavía el momento plástico  $M_p$ , y conservarlo durante las rotaciones necesarias para la formación del mecanismo de colapso.

$L_u$  = Longitud máxima no soportada lateralmente para la que el miembro puede desarrollar todavía el momento plástico  $M_p$ ; no se exige capacidad de rotación.

$L_r$  = Longitud que separa los intervalos de pandeo lateral elástico e inelástico.

$M_R$  = Momento resistente de la sección.

$M_p$  = Momento plástico resistente del miembro en estudio.

$L$  = Distancia entre puntos del patín comprimido de una viga soportada lateralmente.

Mu = Momento resistente nominal de la sección, cuando el pandeo lateral se inicia en el intervalo elástico.

Las expresiones para calcular los parámetros Lp, Lu, Lr, Mp y Mu, para vigas laminadas son las siguientes:

$$M_p = z F_y$$

$$M_u = (1/c) \sqrt{M^2 C_1 + M^2 C_2}$$

$$M C_1 = (E)(A)(t) / (L / r_y)$$

$$M C_2 = 4.7 (E)(A)(d) / (L / r_y)^2$$

$$L_p = [ 253\,000 + 155\,000 (M_1/M_p) r_y ] / F_y$$

$$L_u = [ (6.55)(d)(r_y)/(X_u)(t) ] \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_u^2}}$$

$$L_r = [ (6.55)(d)(r_y)/(X_r)(t) ] \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_r^2}}$$

$$X_u = 7.7 C (d/t)^2 F_y / E = 3.22 X_r$$

$$X_r = 2.4 C (d/t)^2 F_y / E$$

En las expresiones anteriores:

$$FR = 0.90$$

z = Módulo de sección plástico

C = 1.0 ( Para miembros simplemente apoyados, con carga uniformemente repartida y soportados lateralmente en los apoyos ).

Fy = Esfuerzo de fluencia del material.

M1 = El menor de los momentos en los extremos del tramo no soportado lateralmente.



$r_y$  = Radio de giro alrededor del eje de menor momento de inercia.

$E$  = Módulo de elasticidad del material.

$d$  = Peralte de la sección.

$t$  = Grueso del patín comprimido.

$A$  = Área total de la sección.

c. Resistencia de diseño al cortante.

La resistencia de diseño que se muestra a continuación se aplica al alma de vigas I con dos ejes de simetría, sometida a fuerzas cortantes alojadas en uno de los planos de simetría.

La resistencia viene dada por la siguiente expresión:

$$\phi R_n = (\phi V_n) (\phi V_r)$$

En donde:

$$\phi R_n = 0.90$$

$V_n$  = Resistencia nominal de la sección, que se determina como se indica a continuación:

a. si  $h/t \leq 1400 \sqrt{k/F_y}$   $V_n = 0.66 F_y A_a$

El alma falla por cortante en el intervalo de endurecimiento por deformación.

b. Si  $1400 \sqrt{k/F_y} < h/t \leq 1600 \sqrt{k/F_y}$

$$V_n = 922 \left( \sqrt{F_y k} \right) A_a / \left( h/t \right)$$

La falla es por plastificación del alma por cortante.

En las expresiones anteriores:

$A_a = \text{Area del alma} = (t)(d)$

$t = \text{Grosor del alma}$

$d = \text{Peralte total de la sección}$

$h = \text{Peralte del alma}$

No se permitirá que la relación  $h/t$  exceda de  $1600 \sqrt{k/F_y}$ , de manera que no se presenten los estados límite de falla por pandeo del alma, ni tensión diagonal. La sección no estará reforzada con atiesadores transversales, por consiguiente, en las expresiones anteriores,  $k$  se tomará igual a 5.0

#### d. Deformaciones.

Debido a que se trata de vigas secundarias, simplemente apoyadas, con carga uniformemente repartida, la deflexión máxima al centro de la viga se calcula mediante la siguiente expresión:

$$df = (5)(w)(L)^4 / (384)(E)(I)$$

La flecha máxima permisible, según el RCDF, es:

$$df_{\max} = L/240 + 0.5$$

### 7.3.2 DISEÑO DE LARGUEROS.

#### 7.3.2.1 DISEÑO POR CARGAS GRAVITACIONALES.

Las cargas para el diseño son las siguientes:

Para estados límite de falla:

$$W_g = 187.5 \text{ kg/m}^2 + 1.5 W_p$$

Para estados límite de servicio:

$$W_s = 125 \text{ kg/m}^2 + W_p$$

Después de varias iteraciones, se ensaya una sección IE 127 x 14.9, con las siguientes características y propiedades:

$$d = 12.7 \text{ cm}$$

$$t_w = 0.54 \text{ cm}$$

$$b_f = 7.63 \text{ cm}$$

$$t_f = 0.82 \text{ cm}$$

$$h = 8.6 \text{ cm}$$

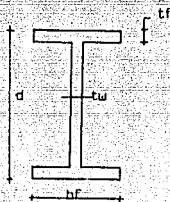
$$A = 19 \text{ cm}^2$$

$$W_p = 14.9 \text{ kg/m}$$

$$I_x = 512 \text{ cm}^4$$

$$r_y = 1.63 \text{ cm}$$

$$z = 92.91 \text{ cm}^3$$



a. Cálculo del momento máximo.

$$W_g = (187.5)(7.5)/5 + (1.5)(14.9)$$

$$W_g = 303.6 \text{ kg/m}$$

$$M_{\text{max}} = w l^2 / 8 = 948.75 \text{ kg-m}$$

b. Cálculo de los parámetros  $X_r$  y  $X_u$ .

$$X_r = (2.4)(1)(12.7/0.82)^2(2530)/2040000$$

$$X_r = 0.713$$

$$X_u = (3.22)(0.713)$$

$$X_u = 2.298$$

c. Cálculo de las longitudes características.

$$L_u = [(6.55)(12.7)(1.63)/(2.298)(0.82)]\sqrt{1+1+(2.298)^2}$$

$$L_u = 134 \text{ cm}$$

$$L_r = [(6.55)(12.7)(1.63)/(0.713)(0.82)]\sqrt{1+1+(0.713)^2}$$

$$L_r = 346 \text{ cm}$$

d. Cálculo de MR.

$$\text{Como } L = 500 \text{ cm} > L_r = 346 \text{ cm}$$

$$MR = (FR)(M_u)$$

$$MC1 = (2040000)(19)(0.82)/(500/1.63) = 103613$$

$$MC2 = (4.7)(2040000)(19)(12.7)/(500/1.63)^2 = 24587.84$$

$$M_u = \sqrt{(103613)^2 + (24587.84)^2}$$

$$M_u = 106490 \text{ kg-cm}$$

$$MR = (0.90)(106490)/100$$

$$MR = 958.41 \text{ kg-m} > 948.75 \text{ kg-m} \text{ ----> OK}$$

e. Revisión por sección compacta.

$$\text{Patin: } 7.63/0.82 = 9.30 < 540/\sqrt{F_y} = 10.73 \text{ ----> OK}$$

$$\text{Alma: } 8.6/0.54 = 15.85 < 5300/\sqrt{F_y} = 105.36 \text{ ----> OK}$$

**f. Resistencia de diseño por cortante.**

$$V_{\text{max}} = 303.6 \times 5 / 2 = 759 \text{ kg}$$

$$h/t = 8.6/0.54 = 15.92 < 1400 \sqrt{S/2530} = 62.23 \text{ ----> OK}$$

$$VN = (0.66)(2530)(8.6)(0.54) = 7754 \text{ kg} > 759 \text{ kg ----> OK}$$

**g. Deflexión.**

$$W_s = (125)(7.5)/5 + 14.9 = 202.4 \text{ kg/m}$$

$$d_{\text{max}} = 500/240 + 0.5 = 2.58 \text{ cm}$$

$$df = (5)(2.02)(500)/(384)(2040000)(512)$$

$$df = 1.57 \text{ cm} < 2.58 \text{ cm ----> OK}$$

Se usarán como largueros perfiles IE 127 x 14.9.

### 7.3.2.2 REVISIÓN PARA CARGAS GRAVITACIONALES MÁS VIENTO O GRANIZO.

**a. Viento.**

$$W_v = (-126)(7.5)/(5) + (1.1)(14.9) = -112.61 \text{ kg/m}$$

$$\text{Mom Max} = (112.61)(5)^2/8 = -351.9 \text{ kg-m} < 948.75 \text{ kg-m}$$

Debido a que la sección tiene dos ejes de simetría, por inspección se demuestra que el perfil es resistente a las succiones del viento.

b. Granizo.

$$Wgr = (137.5)(7.5)/(5.0) + (1.1)(14.9)$$

$$Wgr = 222 \text{ kg/m}$$

Como  $Wgr = 222 \text{ kg/m} < 303.6 \text{ kg/m}$ , por inspección la sección es suficiente.

### 7.3.3 DISEÑO DE ARMADURAS.

#### 7.3.3.1 COMBINACIONES DE CARGA DE DISEÑO.

Se revisará la descarga en la armadura de 1 larguero.

a. Descarga por fuerzas gravitacionales.

$$Wg = 303.6 \text{ kg/m}$$

$$\text{Descarga} = (303.6)(5)/2 = 759 \text{ kg}$$

b. Presiones de viento.

- Sin considerar carga viva instantánea:

$$\text{Peso larguero: } 14.9 \text{ kg/m}$$

$$\text{Presión de viento de diseño: } -35.20 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Carga muerta: } 25 \text{ kg/m}^2$$

$$Wv = (1.1)(25 - 35.20)(7.5)/5 + (14.9)(1.1) = -0.44 \text{ kg/m}$$

$$\text{Descarga} = (-0.44)(5)/2 = -1.1 \text{ kg}$$

- Considerando carga viva instantánea:

$$W_v = (1.1)(25+70-35.20)(7.5)/(5)+(14.9)(1.1) = 115.06 \text{ kg/m}$$

$$\text{Descarga} = (115.06)(5)/(2) = 287.65 \text{ kg}$$

c. Descarga por granizo.

$$W_{gr} = 222 \text{ kg/m}$$

$$\text{Descarga} = (222)(5)/2 = 555 \text{ kg}$$

La descarga más desfavorable que rige el diseño de las armaduras es la gravitacional. Al analizar las presiones del viento, la succión resultante ( 1.1 kg ) es muy pequeña, por lo que no es necesario revisar la armadura por succiones del viento.

### 7.3.3.2 PROPUESTA DE SECCIONES.

Las armaduras son tipo Pratt, para salvar claros de 13.0 mt y de 6.80 mt respectivamente.

Las cuerdas y diagonales estarán formadas por dos ángulos, unidos entre sí en el punto medio de cada tablero, como se muestra en la siguiente figura: ( FIG 7.8 )

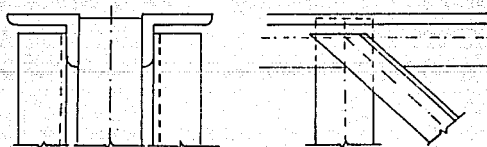


FIG 7.8: Sección de cuerdas y diagonales de las armaduras

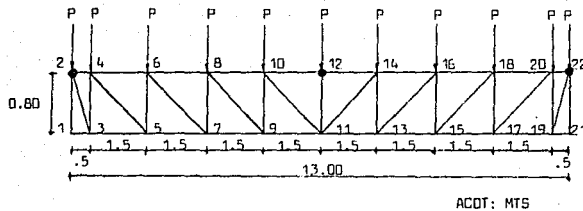
Los montantes estarán formados por dos ángulos en cajón y las conexiones serán soldadas. Las armaduras tendrán una altura de 80 cms.

### 7.3.3.3 DISEÑO.

#### 7.3.3.3.1 ARMADURAS CON CLARO DE 13.0 MTS.

La descarga de 2 largueros es:  $759 \times 2 = 1518$  kg.  
Para hacer congruente la comparación de alternativas, la descarga será la misma en cada uno de los nudos de la armadura.

La armadura tipo se muestra a continuación: ( FIG 7.9 )



$P = 1518$  kg

Las secciones extrema y media están soportadas lateralmente

FIG 7.9: Armadura tipo para un claro de 13.0 mts.



Las fuerzas en los elementos se muestran en la siguiente tabla: ( TABLA 7.5 )

| BARRA           |            | COMPRESION | TENSION |
|-----------------|------------|------------|---------|
| NUDO INICIAL    | NUDO FINAL | kg         | kg      |
| CUERDA SUPERIOR |            |            |         |
| SECCION I       |            |            |         |
| 2/20            | 4/22       | 4310       | -       |
| 4/18            | 6/20       | 14256 *    | -       |
| SECCION II      |            |            |         |
| 6/16            | 8/18       | 21361      | -       |
| 8/14            | 10/16      | 25625      | -       |
| 10/12           | 12/14      | 27046 *    | -       |
| CUERDA INFERIOR |            |            |         |
| SECCION I       |            |            |         |
| 1/19            | 3/21       | -          | 0       |
| 3/17            | 5/19       | -          | 4304    |
| 5/15            | 7/17       | -          | 14252 * |
| SECCION II      |            |            |         |
| 7/13            | 9/15       | -          | 21357   |
| 9/11            | 11/13      | -          | 25621 * |
| DIAGONALES      |            |            |         |
| SECCION I       |            |            |         |
| 2/19            | 3/22       | -          | 8132    |
| 4/17            | 5/20       | -          | 11304 * |
| 6/15            | 7/18       | -          | 8074    |
| SECCION II      |            |            |         |
| 8/13            | 9/16       | -          | 4845 *  |
| 10/11           | 11/14      | -          | 1615    |

| BARRA        |            | COMPRESION | TENSION |
|--------------|------------|------------|---------|
| NUDO INICIAL | NUDO FINAL | kg         | kg      |
| MONTANTES    |            |            |         |
| 1/21         | 2/22       | 8349 *     | -       |
| 3/19         | 4/20       | 6831       | -       |
| 5/17         | 6/18       | 5313       | -       |
| 7/15         | 8/16       | 3795       | -       |
| 9/13         | 10/14      | 2277       | -       |
| 11           | 12         | 1518       | -       |

\* FUERZAS DE DISEÑO

- Diseño de montantes.

Todos los montantes serán del mismo tamaño y estarán formados por dos ángulos de lados iguales en cajón.

P diseño = 8 349 kg. ( Compresión )

l = 80 cms

Después de varias iteraciones, ensayamos una sección formada por 2LI 38 x 5, con las siguientes características:

Area:  $AT = (3.43)(2) = 6.86 \text{ cm}^2$

Espesor: 0.5 cm

Peralte: 3.8 cm

Momento de inercia:

$$I_x = I_y = \left( \frac{3.8}{4} \right)^4 / 12 - \left( \frac{3.8 - 0.5}{4} \right)^4 / 12 = 7.50 \text{ cm}^4$$

Radio de giro:  $r = \sqrt{7.50/6.86} = 1.04$

Relación de esbeltez:  $l/r = (80)/1.04 = 77 \text{ ( } k = 1.0 \text{ )}$

De las tablas de diseño, para  $l/r = 77$ :

$RC/AT = 1322 \text{ kg/cm}^2$

de donde:

$$RC = (1322)(6.86) = 9068 \text{ kg} > 8.349 \text{ kg} \text{ ----> OK}$$

Se revisa el pandeo local, de la siguiente forma:

$$38/5 = 7.60 < 2100/\sqrt{F_y} = 41.75 \text{ ----> OK}$$

La sección formada por 2L1 38 x 5 es adecuada.

- Diseño de las cuerdas superiores.

Las secciones a diseñar estarán formadas por dos ángulos dobles unidos en los nudos y en los puntos medios de cada tablero, como se muestra a continuación: ( FIG 7.10 )

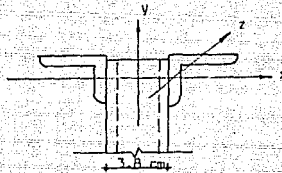


FIG 7.10: Sección de cuerdas superiores en armadura tipo de 13.0 mts.

Las longitudes características para pandeo alrededor de los ejes X y Y de dos ángulos, y de z de un solo ángulo son las siguientes:

$$\text{Para } l/r_x: \quad l = 150 \text{ cm}$$

Para  $l/r_y$ :  $l = 650 \text{ cm}$  ( La armadura está soportada lateralmente en las secciones extremas y media ).

Para  $l/r_z$ :  $l = 75 \text{ cm}$  ( los ángulos están unidos en los nudos y en la sección media de cada tablero ).

Para el cálculo de  $r_y$  de la sección de la figura 7.10 se realizó un programa de computadora en lenguaje basic. (Ver Anexo 1). El radio de giro  $r_x$  es el mismo para uno o dos ángulos en la posición mostrada en la figura. El radio de giro  $r_z$  se calcula para un solo ángulo.

#### SECCION I:

P diseño = 14256 kg ( Compresión )

Después de varias iteraciones, ensayamos una sección formada por 2LI 76 x 6, con las siguientes características:

$$A_T = (9.29)(2) = 18.58 \text{ cm}^2$$

$$r_x = 2.63 \text{ cm}$$

$$r_y = 4.53 \text{ cm}$$

$$r_z = 1.49 \text{ cm}$$

$$1/r_x = 150/2.63 = 57$$

$$1/r_y = 650/4.53 = 144$$

$$1/r_z = 75/1.49 = 51$$

La relación de esbeltez crítica es  $1/r_y$ .

De las tablas de diseño, para  $1/r = 144$ :

$$R_C/A_T = 825 \text{ kg/cm}^2$$

Por lo tanto:

$$R_C = (825)(18.58) = 15328 \text{ kg} > 14256 \text{ kg} \text{ -----> OK}$$

Revisión por pandeo local:

$$76/6 = 12.66 < 640/\sqrt{F_y} = 12.72 \text{ -----> OK}$$

La sección formada por 2LI 76 x 6 es adecuada.

#### SECCION II:

P diseño = 27 046 kg ( Compresión )

Después de varias iteraciones, se ensaya una sección formada por 2L1 89 x 8, con las siguientes características:

$$AT = (13.48)(2) = 26.96 \text{ cm}^2$$

$$rx = 2.74 \text{ cm}$$

$$ry = 5.22 \text{ cm}$$

$$rz = 1.75 \text{ cm}$$

$$1/rx = (150/2.74) = 55$$

$$1/ry = (650/5.22) = 125$$

$$1/rz = (75/1.75) = 43$$

La relación de esbeltez crítica es  $1/ry$ .

De las tablas de diseño, para  $1/r = 125$ :

$$RC/AT = 1093 \text{ kg/cm}^2$$

$$RC = (1093)(26.96) = 29467 \text{ kg} > 27046 \text{ kg} \text{ ----> OK}$$

Revisión del pandeo local:

$$89/8 = 11.125 < 640/\sqrt{F_y} = 12.72 \text{ ----> OK}$$

La sección formada por 2L1 89 x 8 es adecuada.

- Diseño de cuerdas inferiores.

SECCION I:

P diseño = 14 252 kg ( Tensión )

a. Flujo plástico en la sección total.

$$RT = (0.90)(F_y)(AT)$$

$$AT \text{ necesaria} = (14252)/(2530)(0.90)$$

$$AT \text{ necesaria} = 6.25 \text{ cm}^2$$

Escogemos una sección formada por 2L1 38 x 5, con una área

de:

$$AT = (3.43)(2) = 6.86 \text{ cm}^2 > 6.25 \text{ cm}^2 \text{ -----} \rightarrow \text{OK}$$

b. Revisión de fractura en el área neta.

$$RT = (Fu)(An)(0.75)$$

$$RT = (4200)(6.86)(0.75) = 21609 \text{ kg} > 14252 \text{ kg} \text{ -----} \rightarrow \text{OK}$$

La sección es adecuada.

#### SECCION II:

$$P \text{ diseño} = 25\ 621 \text{ kg (Tensión)}$$

a. Flujo plástico en la sección total

$$AT \text{ necesaria} = (25621)/(2530)(0.90)$$

$$AT \text{ necesaria} = 11.25 \text{ cm}^2$$

Escogemos una sección formada por 2LI 51 x 6, con un área de:

$$AT = (2)(6.06) = 12.12 \text{ cm}^2 > 11.25 \text{ cm}^2 \text{ -----} \rightarrow \text{OK}$$

b. Revisión de fractura en el área neta.

$$RT = (12.12)(4200)(0.75)$$

$$RT = 38178 \text{ kg} > 25621 \text{ kg} \text{ ----} \rightarrow \text{OK}$$

La sección propuesta es adecuada.

- Diseño de diagonales.

#### SECCION I:

$$P \text{ diseño} = 11\ 304 \text{ kg (Tensión)}$$

a. Flujo plástico en el área total.

$$AT \text{ necesaria} = (11304)/(2530)(0.9) = 4.96 \text{ cm}^2$$

Ensayamos una sección 2LI 32 x 5 con un área de:

$$AT = (2)(2.79) = 5.58 \text{ cm}^2 > 4.96 \text{ cm}^2 \text{ -----} \rightarrow \text{OK}$$

b. Revisión de fractura en la sección neta.

$$RT = (5.58)(4200)(0.75) = 17577 \text{ kg} > 11304 \text{ kg} \text{ ----> OK}$$

La sección propuesta es adecuada.

#### SECCION II:

$$P \text{ diseño} = 4845 \text{ kg ( Tensión )}$$

a. Flujo plástico en la sección total.

$$AT \text{ necesaria} = (4845)/(2530)(0.90) = 2.12 \text{ cm}^2$$

Ensayamos una sección formada por 2L1 25 x 3 con un Área de:

$$AT = (2)(1.52) = 3.04 \text{ cm}^2 > 2.12 \text{ cm}^2 \text{ ----> OK}$$

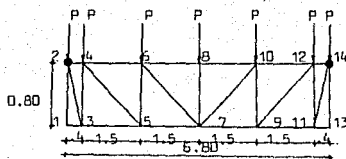
b. Revisión de fractura en la sección neta.

$$RT = (3.04)(4200)(0.75) = 9576 \text{ kg} > 4845 \text{ kg} \text{ ----> OK}$$

La sección propuesta es adecuada.

#### 7.3.3.2 ARMADURAS CON CLARO DE 6.8 MTS.

La armadura tipo con claro de 6.8 mts se muestra en la siguiente figura: ( FIG 7.11 )



$$\text{Descarga } P = 1518 \text{ kg} \quad \text{ACDT: MTS}$$

La armadura está soportada lateralmente en las secciones extremas.

FIG 7.11: Armadura tipo para un claro de 6.80 mts.

Las fuerzas en las barras se muestran a continuación:  
(TABLA 7.6)

| BARRA               |            | COMPRESION | TENSION |
|---------------------|------------|------------|---------|
| NUDO INICIAL        | NUDO FINAL | kg         | kg      |
| CUERDA SUPERIOR     |            |            |         |
| 2/12                | 4/14       | 1719       | -       |
| 4/10                | 6/12       | 6183       | -       |
| 6/8                 | 8/10       | 7604 *     | -       |
| CUERDA INFERIOR     |            |            |         |
| 1/11                | 3/13       | -          | 0       |
| 3/9                 | 5/11       | -          | 1919    |
| 5/7                 | 7/9        | -          | 6183 *  |
| DIAGONALES          |            |            |         |
| 2/11                | 3/14       | -          | 2164    |
| 4/9                 | 5/12       | -          | 4845 *  |
| 6/7                 | 7/10       | -          | 1615    |
| MONTANTES           |            |            |         |
| 1/13                | 2/14       | 5313 *     | -       |
| 3/11                | 4/12       | 3795       | -       |
| 5/9                 | 6/10       | 2277       | -       |
| 7                   | 8          | 1518       | -       |
| * FUERZAS DE DISEÑO |            |            |         |

- Diseño de montantes.

P diseño = 5313 kg (Compresión)

Después de varias iteraciones, escogemos una sección formada por 2LI 25 x 6, con las siguientes características:

$$AT = (2.80)(2) = 5.60 \text{ cm}^2$$

$$rx = ry = \sqrt{2.9^2 + 0.6^2} / 12 = 0.74 \text{ cm}$$

$$1/r = (80/0.74) = 108$$

De las tablas de diseño, para  $1/r = 108$ :



$$RC/AT = 1119 \text{ kg/cm}^2$$

$$RC = (1119)(5.60) = 6266 \text{ kg} > 5313 \text{ kg} \text{ -----} \rightarrow \text{OK}$$

Revisión del pandeo local:

$$25/6 = 4.1 < 2100 \sqrt{F_y} = 41 \text{ -----} \rightarrow \text{OK}$$

La sección 2LI 25 x 6 es adecuada.

- Diseño de cuerdas superiores.

La sección a considerar es la que se muestra a continuación: ( FIG 7.12 )

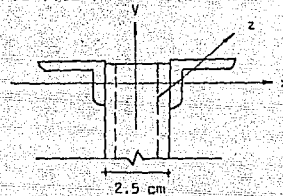


FIG 7.12: Sección de cuerdas superiores en armadura tipo de 6.80 mts.

Las longitudes características de pandeo son:

$$\text{Para } 1/r_x: l = 150 \text{ cm}$$

Para  $1/r_y: l = 680 \text{ cms}$  (La armadura está soportada lateralmente en las secciones extremas).

$$\text{Para } 1/r_z: l = 75 \text{ cm}$$

$$F \text{ diseño} = 7604 \text{ kg}$$

Después de varias iteraciones, ensayamos una sección formada por 2LI 51 x 8, con las siguientes características:

$$AT = (7.42)(2) = 14.84 \text{ cm}^2$$

$$r_x = 1.53$$

$$r_y = 3.81$$

$$r_z = 0.99$$

$$1/r_x = (150 / 1.52) = 99$$

$$1/r_y = (680 / 3.81) = 178$$

$$1/r_z = (75 / 0.99) = 76$$

La relación de esbeltez crítica es  $1/r_y$ .

De las tablas de diseño, para  $1/r = 178$ :

$$RC/AT = 540 \text{ kg/cm}^2$$

$$RC = (540)(14.84) = 8013 \text{ kg} > 7604 \text{ kg} \text{ ----> OK}$$

Revisión del pandeo local:

$$51/8 = 6.32 < 640/\sqrt{F_y} = 12.72 \text{ ----> OK}$$

La sección formada por 2LI 51 x 8 es adecuada.

- Diseño de cuerdas inferiores.

$$P \text{ diseño} = 6183 \text{ kg}$$

a. Flujo plástico en la sección total.

$$AT \text{ necesaria} = (6183)/(2530)(0.9) = 2.71 \text{ cm}^2$$

Escogemos una sección formada por 2LI 25 x 3, con un área de:

$$AT = (1.52)(2) = 3.04 \text{ cm}^2 > 2.71 \text{ cm}^2 \text{ ----> OK}$$

b. Fractura en la sección neta.

$$RT = (3.04)(4200)(0.75) = 9576 \text{ kg} > 6183 \text{ kg}$$

La sección es adecuada.

- Diseño de diagonales.

P diseño = 4845 kg.

a. Flujo plástico en la sección total:

$$AT \text{ necesaria} = (4845)/(2530)(0.90) = 2.12 \text{ cm}^2$$

Escogemos una sección formada por 2LI 25 x 3 con un área de:

$$AT = (1.52)(2) = 3.04 > 2.12 \text{ ----> OK}$$

b. Fractura en la sección neta:

$$RT = (3.04)(4200)(0.75) = 9576 \text{ kg} > 4845 \text{ kg} \text{ ----> OK}$$

La sección es adecuada.

#### 7.4 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL DISEÑO.

##### 7.4.1 VIGAS LAMINADAS.

A continuación se muestra la planta con las vigas secundarias y principales: ( FIG 7.13 )

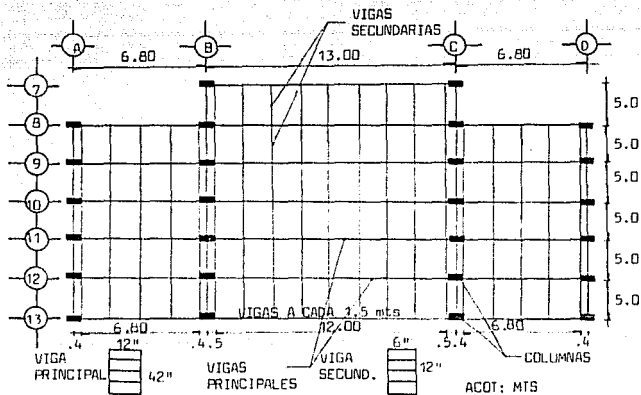
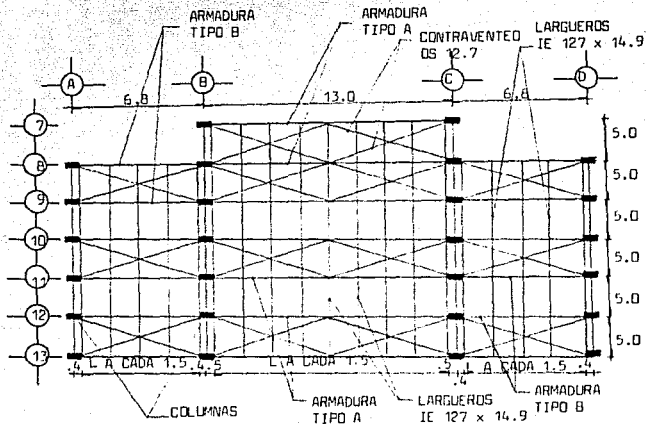


FIG 7.13: Vigas laminadas secundarias y principales.

#### 7.4.2 LARGUEROS Y ARMADURAS DE ACERO.

A continuación, se muestra la planta con la distribución de largueros y armaduras, así como el contraventeo requerido. ( FIG 7.14. )

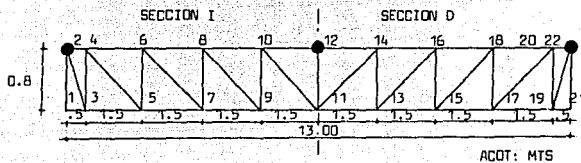


ACOTACION: MIS

FIG 7.14: Distribución de largueros y armaduras.

Las armaduras están formadas por los siguientes perfiles:

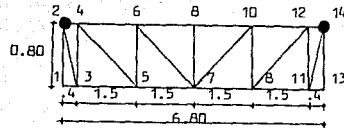
ARMADURA TIPO A: ( FIG 7.15 )



La armadura está soportada lateralmente en las secciones media y extrema:

| BARRA               |       | PERFIL     |
|---------------------|-------|------------|
| SECCION I SECCION D |       |            |
| CUERDA SUPERIOR     |       |            |
| 2-4                 | 20-22 | 2LI 76 X 6 |
| 4-6                 | 18-20 | 2LI 76 X 6 |
| 6-8                 | 16-18 | 2LI 89 X 8 |
| 8-10                | 14-16 | 2LI 89 X 8 |
| 10-12               | 12-14 | 2LI 89 X 8 |
| CUERDA INFERIOR     |       |            |
| 1-3                 | 19-21 | 2LI 30 X 5 |
| 3-5                 | 17-19 | 2LI 30 X 5 |
| 5-7                 | 15-17 | 2LI 38 X 5 |
| 7-9                 | 13-15 | 2LI 51 X 6 |
| 9-11                | 11-13 | 2LI 51 X 6 |
| DIAGONALES          |       |            |
| 2-3                 | 19-22 | 2LI 32 X 5 |
| 4-5                 | 17-20 | 2LI 32 X 5 |
| 6-7                 | 15-18 | 2LI 32 X 5 |
| 8-9                 | 13-16 | 2LI 25 X 3 |
| 10-11               | 11-14 | 2LI 25 X 3 |
| MONTANTES           |       |            |
| TODOS               |       | 2LI 38 X 5 |

ARMADURA TIPO B: ( FIG 7.16 )



ACOT: MTS

La armadura está soportada lateralmente en las secciones extremas.

PERFILES:

CUERDAS SUPERIORES: 2 LI 51 X 8

CUERDAS INFERIORES: 2 LI 25 X 3

DIAGONALES: 2 LI 25 X 3

MONTANTES: 2 LI 25 X 6

Tanto en las armaduras tipo A y tipo B, las cuerdas y diagonales están formadas por dos ángulos, unidos entre sí en los nudos y en el punto medio de cada tablero. Los montantes están formados por dos ángulos en cajón.

## 7.5 COMPARACION DE ALTERNATIVAS.

La decisión de utilizar un sistema de construcción dado, en muchas ocasiones, no sólo depende del aspecto económico sino de motivaciones de tipo arquitectónico, tal como la belleza del conjunto resultante. Sin embargo, es siempre conveniente tener alternativas que nos permitan comparar algunos aspectos importantes, tales como el de costos, tiempos y vida económica.

La determinación del costo de vigas de madera laminada no es tarea fácil debido a la poca utilización que se les da en nuestro país. Además, el proceso de fabricación es relativamente complejo lo que trae como consecuencia una baja producción de este tipo de elementos en la industria maderera. No existen empresas dedicadas a la elaboración de elementos laminados.

Sin embargo, han existido profesionales que han recurrido a este sistema estructural en México. En base a su experiencia y la existente en Estados Unidos, se ha podido determinar en este trabajo un costo general aproximado de vigas rectas de madera laminada. El análisis detallado de este aspecto podría ser un tema completo de investigación.

Los costos de la madera laminada están esencialmente relacionados con el proceso de fabricación. A continuación, se muestran las etapas de elaboración de vigas rectas con un costo unitario aproximado por pie-tablón para cada una de ellas.

A. OPERACIONES FORESTALES.

MADERA DE 1a:

|                            |                 |
|----------------------------|-----------------|
| Corte -----                | \$ 62.00 / PT   |
| Arrime -----               | \$ 141.00 / PT  |
| Carga -----                | \$ 48.00 / PT   |
| Transporte promedio -----  | \$ 599.00 / PT  |
| Caminos -----              | \$ 161.00 / PT  |
| Administración -----       | \$ 177.00 / PT  |
| Impuestos forestales ----- | \$ 159.00 / PT  |
|                            | =====           |
| SUB TOTAL -----            | \$ 1367.00 / PT |

B. ASERRIO.

Los costos se basan en la producción de un aserradero moderno con capacidad de 165 M3/día.

|                                     |                |
|-------------------------------------|----------------|
| Mano de Obra -----                  | \$ 214.00 / PT |
| Energía Eléctrica -----             | \$ 102.00 / PT |
| Aire de Presión -----               | \$ 43.00 / PT  |
| Administración -----                | \$ 59.00 / PT  |
| Productos Químicos -----            | \$ 41.00 / PT  |
| Unidades Centrales Auxiliares ----- | \$ 53.00 / PT  |



|                                 |                 |
|---------------------------------|-----------------|
| Herramientas y materiales ----- | \$ 18.00 / PT   |
| Carburantes y Lubricantes ----- | \$ 13.00 / PT   |
| Seguros -----                   | \$ 44.00 / PT   |
| Asesorías -----                 | \$ 14.00 / PT   |
| Teléfonos y Telex -----         | \$ 14.00 / PT   |
| Gastos de Ventas -----          | \$ 66.00 / PT   |
| Previsión Social -----          | \$ 53.00 / PT   |
|                                 | =====           |
|                                 | \$ 734.00 / PT  |
| Depreciaciones y Amort. -----   | \$ 177.00 / PT  |
| Gastos Financieros -----        | \$ 93.00 / PT   |
|                                 | =====           |
| SUB TOTAL -----                 | \$ 1004.00 / PT |

C. SECADO.

En base a una instalación moderna, con producciones anuales de 23000 M3 para secar madera de especies coníferas, se ha estimado la siguiente estructuración de costos:

|  |                |
|--|----------------|
| Mano de Obra -----                       | \$ 143.00 / PT |
| Energía Eléctrica -----                  | \$ 68.00 / PT  |
| Administración -----                     | \$ 50.00 / PT  |
| Herramientas y materiales auxiliares --- | \$ 12.00 / PT  |
| Unidades Centrales -----                 | \$ 24.00 / PT  |
| Carburantes y lubricantes -----          | \$ 6.00 / PT   |
| Seguros -----                            | \$ 20.00 / PT  |
| Asesorías -----                          | \$ 6.00 / PT   |
| Teléfonos y Telex -----                  | \$ 6.00 / PT   |

|                                       |                |
|---------------------------------------|----------------|
| Viajes -----                          | \$ 8.00 / PT   |
| Gastos Oficina -----                  | \$ 3.00 / PT   |
| Correos -----                         | \$ 3.00 / PT   |
| Otros Gastos -----                    | \$ 3.00 / PT   |
| Previsión Social -----                | \$ 36.00 / PT  |
|                                       | =====          |
|                                       | \$ 388.00 / PT |
| Depreciaciones y Amortizaciones ----- | \$ 79.00 / PT  |
| Intereses -----                       | \$ 37.00 / PT  |
|                                       | =====          |
| SUB TOTAL -----                       | \$ 504.00 / PT |

#### D. FABRICACION EN PLANTA.

De acuerdo con la experiencia en otros países, se calculará el costo unitario de una fábrica pequeña con una producción de 50 pies cúbicos por hora de producto terminado.

##### Costo de producción:

|                                       |                |
|---------------------------------------|----------------|
| Adhesivos -----                       | \$ 277.00 / PT |
| Mano de Obra directa -----            | \$ 474.00 / PT |
| Mano de Obra indirecta -----          | \$ 605.00 / PT |
| Previsión Social -----                | \$ 324.00 / PT |
| Energía Eléctrica -----               | \$ 198.00 / PT |
| Mantenimiento -----                   | \$ 73.00 / PT  |
| Depreciaciones y Amortizaciones ----- | \$ 533.00 / PT |
|                                       | =====          |

|                                  |                        |
|----------------------------------|------------------------|
|                                  | \$ 2454.00 / PT        |
| <b>Gastos de Administración:</b> |                        |
| Sueldos -----                    | \$ 565.00 / PT         |
| Prestaciones Sociales -----      | \$ 170.00 / PT         |
| Depreciaciones -----             | \$ 19.00 / PT          |
| Varios -----                     | \$ 37.00 / PT          |
|                                  | =====                  |
|                                  | 791.00 / PT            |
| <b>Gastos de Venta:</b>          |                        |
| Sueldos -----                    | \$ 596.00 / PT         |
| Prestaciones Sociales -----      | \$ 179.00 / PT         |
| Depreciaciones -----             | \$ 60.00 / PT          |
| Varios -----                     | \$ 37.00 / PT          |
|                                  | =====                  |
|                                  | 872.00 / PT            |
| Gastos Financieros -----         | \$ 435.00 / PT         |
| <b>SUB TOTAL -----</b>           | <b>\$ 4552.00 / PT</b> |

El costo total de fabricación del elemento desde el aserrio hasta la terminación en la planta es:

|                                 |                        |
|---------------------------------|------------------------|
| A. Operaciones Forestales ----- | \$ 1367.00 / PT        |
| B. Aserrio -----                | \$ 1004.00 / PT        |
| C. Secado -----                 | \$ 504.00 / PT         |
| D. Fabricación en planta -----  | \$ 4552.00 / PT        |
|                                 | =====                  |
| <b>COSTO UNITARIO -----</b>     | <b>\$ 7427.00 / PT</b> |

Ahora calcularemos el costo total, incluyendo el montaje, de una viga principal.

La viga tiene una sección nominal de 12" x 21 laminaciones de 2". Calculamos los pie-tablón existentes en un metro lineal de viga, de la siguiente manera:

$$( 21 ) ( 2" ) ( 12" ) ( 3.28 ) / 12 = 137.76 \text{ pt / ml}$$

El costo por metro lineal de madera laminada es:

$$( \$ 7427 ) ( 137.76 ) = \$ 1,019,430.00/\text{ml}$$

Montaje: ( \$ 372 / kg ) ( 142 kg / ml ) = \$ 52,824.00/ml

El costo total de una viga es:

$$( 1,019,430 + 52,824 ) ( 13 ) = \$ 13,939,302.00$$

El peso de una armadura principal de acero se calcula a continuación:

| PERFIL     | PESO KG/ML | METROS LINEALES  | TOTAL     |
|------------|------------|------------------|-----------|
| 2LI 76 X 6 | 14.58      | 4.00             | 58.32 KG  |
| 2LI 89 X 8 | 21.42      | 9.00             | 192.78 KG |
| 2LI 98 X 5 | 5.36       | 6.00             | 32.16 KG  |
| 2LI 51 X 6 | 9.50       | 6.00             | 57.00 KG  |
| 2LI 32 X 5 | 4.40       | 10.20            | 44.88 KG  |
| 2LI 25 X 3 | 2.38       | 6.80             | 16.18 KG  |
|            |            |                  | 401.32 KG |
|            |            | 15% DESPERDICIOS | 60.19 KG  |
|            |            | PESO TOTAL       | 461.51 KG |

La integración del costo de la armadura es:

| UNIDAD: KG   |        | RENDIMIENTO: 50 KG/J |             |             |
|--|--------|----------------------|-------------|-------------|
| CONCEPTO   | UNIDAD | CANTIDAD             | P.U         | IMPORTE     |
| <b>MATERIALES:</b>                                   |        |                      |             |             |
| - Angulos ligeros de acero estructural A-36          | Kg     | 1.0000               | 2340        | 2340        |
| - Soldadura E-7018                                   | Kg     | 0.0400               | 8540        | 342         |
| - Pintura Anticorrosiva                              | Lt     | 0.0070               | 5838        | 41          |
| - Andamios Tubulares                                 | R/D    | 0.0650               | 3200        | 208         |
|  |        |                      | <b>SUMA</b> | <b>3139</b> |
| <b>MANDO DE OBRA:</b>                                |        |                      |             |             |
| - 1 soldador calificado + 2 soldadores + 3 ayudantes | Jor    | 0.0200               | 144479      | 2890        |
|  |        |                      | <b>SUMA</b> | <b>2890</b> |
| <b>COSTO UNITARIO</b>                                |        |                      |             | <b>6029</b> |

El costo de una armadura principal es:

$$( 461.51 ) ( 6029 ) = \$ 2,782,449.00$$

El costo de una viga laminada es mucho mayor que el de una armadura equivalente. Las razones por las cuales el costo resultó elevado son las siguientes:

- Se tomaron en cuenta la mayoría de los factores de la producción en serie de plantas de elementos laminados en otros países, lo que hace que los costos se incrementen considerablemente.
- La producción de vigas laminadas requiere un proceso altamente tecnificado, con personal y equipo especializado.

La construcción de estructuras de acero es muy común en México. Sin embargo, la utilización de elementos laminados es escasa y no se tiene experiencia en su fabricación. La integración de un costo real probablemente resultaría menor en nuestro país para las condiciones existentes de la industria maderera. Sin embargo, esta integración del costo sería motivo de otra investigación.

El tiempo de fabricación de elementos de madera laminada depende básicamente de la capacidad y disponibilidad de la planta. En una planta con capacidad de 50 pies cúbicos/hora de producto terminado, 1 viga de 13.00 mts de longitud se fabricaría y montaría en aproximadamente 30 días, a partir de la fecha del pedido.

Por otro lado, una armadura de acero, con una cuadrilla de 3 soldadores y tres ayudantes, tardarían en fabricarla y colocarla en aproximadamente 10 jornadas de trabajo:

Rendimiento cuadrilla: 50 kg/Jor

Peso de la estructura: 461.51 kg

No. Jornadas =  $461.51 / 50 = 9.23$  Jor -> 10 Jornadas aprox.

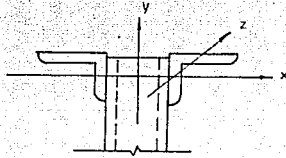
Podemos decir que el tiempo de fabricación de elementos laminados tardaría el doble que en armaduras de acero.

Finalmente, se ha visto en Estados Unidos que la vida económica de las estructuras de madera laminada depende esencialmente del óptimo tratamiento que se les den en contra de los cambios de humedad durante el proceso de fabricación. El mantenimiento continuo ayudará a que los elementos tengan una vida económica de 30 años en promedio. Existen actualmente estructuras de madera laminada con más de 50 años de antigüedad. Las estructuras de acero, debidamente protegidas contra la corrosión y un mantenimiento adecuado, tienen una vida económica semejante.

El utilizar vigas de madera laminada incrementa sensiblemente los costos y los tiempos en la construcción. Sin embargo, los bellos efectos estéticos mediante este tipo de elementos no se logran con ningún otro sistema estructural.

ANEXO 1:

A continuación se muestra el programa realizado para calcular el radio de giro con respecto al eje Y de la siguiente sección:



```
090 PRINT " PROGRAMA RADIO DE GIRO "
100 INPUT " ANCHO DEL ALA = "; A
110 INPUT " GROSOR DEL ANGULO = "; T
120 INPUT " SEPARACION ENTRE ANGULOS = "; S
125 L=(0.166)*(A^3)*T
130 B=(2*A*T*((.5*A)+(.5*S))^2)
135 C=(0.166)*T^3*(A-T)
140 D=2*T*(A-T)*((.5*T)+(.5*S))^2
150 I=L+B+C+D
160 INPUT "AFEA=";AR
170 RY=SOR(I/AR)
180 PRINT "RY=";RY
190 END
```



## **8. CONCLUSIONES.**

En muchos países del mundo, la madera no es un material usado comúnmente en el diseño estructural, a pesar de que en muchos de ellos se cuenta con recursos forestales abundantes.

Los problemas esenciales en México en cuanto a la utilización estructural de la madera no obedecen a la escasez del recurso, sino a los problemas inherentes a su explotación e industrialización, al desconocimiento de las propiedades de las maderas disponibles y de la forma de aprovecharlas estructuralmente, y a la falta de profesionistas y técnicos debidamente capacitados.

Actualmente, a través de diversos organismos gubernamentales y privados, se realizan estrategias encaminadas al uso racional del recurso y su fomento en las diversas ramas de la industria.

Por otro lado, se ha demostrado que la madera, en general, es un material de versatilidad estructural, de atractivo estético, que, en muchas circunstancias, compite favorablemente con el acero y el concreto.

En cuanto a la madera laminada, se pueden mencionar las siguientes ventajas significativas:

a. Debido a que en la fabricación de elementos laminados se usan piezas pequeñas, la madera proveniente de árboles más pequeños se usa eficazmente.

b. La sección y tamaño de los miembros estructurales de madera laminada no se limitan al tamaño del árbol; se han utilizado miembros para cubrir claros de 50 metros con elementos hasta de 2 metros de profundidad.

c. Debido a que en condiciones secas, se utiliza madera con bajos contenidos de humedad, los esfuerzos de diseño se incrementan.

d. Debido a que las tablas son de espesor pequeño, la influencia de los defectos es menor que en la madera maciza.

e. Se pueden diseñar y fabricar miembros con profundidad variable.

f. Con miembros laminados, se pueden lograr excelentes efectos arquitectónicos. Ningún material puede compararse con la madera laminada en cuanto a estilos decorativos en interiores. Puede fabricarse virtualmente en cualquier tamaño y forma.

g. Se pueden fabricar un número ilimitado de formas curvas, lo que no es posible con otros materiales.

h. La oportunidad de diseñar elementos que varían en su sección a lo largo del claro.

i. Las secciones tienen un óptimo comportamiento ante el fuego, debido a que éstas arden difícilmente. Los miembros se consumen lentamente y resisten la penetración del calor; además, el material sin arder conserva su escuadria. La madera laminada no se expande ni se deforma excesivamente en altas temperaturas, como el acero.

j. Mediante un adecuado tratamiento, es resistente a humedades altas y ambientes corrosivos.

k. Su comportamiento como aislante térmico y acústico es óptimo.

l. El montaje es económico debido a que los elementos son prefabricados en la planta y llegan a la obra listos para una inmediata instalación. Además, los trabajos se facilitan debido a su peso relativamente bajo.

1. La madera es relativamente inerte químicamente. Es resistente a casi todos los ácidos y agentes corrosivos, incluyendo la sal y el agua.

Sin embargo, la madera laminada tiene desventajas importantes, que son:

a. En estructuras pequeñas, donde se pueden disponer vigas de madera maciza, o en claros grandes, donde se pueden recurrir a elementos de acero, los elementos laminados tienen un costo más elevado por las siguientes razones:

- Se requiere más tiempo en secar la madera y en realizar la fabricación del elemento.
- El proceso de laminación requiere una planta y equipo especial con un alto control de calidad en cada una de las etapas de fabricación.

b. Se necesita una transportación especial para miembros de gran tamaño.

A pesar de ello, la madera laminada con frecuencia resulta conveniente gracias a sus cualidades estéticas, la uniformidad de su calidad, su estabilidad dimensional y la posibilidad de producir miembros con dimensiones y formas totalmente fuera del alcance de la madera maciza y de otros elementos estructurales.

En México todavía es poco común el uso de la madera en el diseño estructural y, mas aún, son contadas las estructuras construidas con madera laminada. Es necesario

realizar un mayor esfuerzo tendiente a resolver los problemas inherentes de la madera en nuestro país, para hacer crecer el uso de esta alternativa estructural.

## 9. BIBLIOGRAFIA.

- Cámara Nacional de la Silvicultura e Industrias Derivadas  
" LA SILVICULTURA NACIONAL " ( PROBLEMAS ACTUALES Y LAS  
PERSPECTIVAS PARA SU DESARROLLO )  
México DF, 1970
- Secretaría de Agricultura y Ganadería  
Subsecretaría Forestal y de la Fauna  
" FOMENTO EN EL USO DE LA MADERA EN LA VIVIENDA "  
México DF, 1975
- Freas, Alan D.  
" LOS PRODUCTOS DE LA MADERA Y SUS USOS EN LA  
CONSTRUCCION "  
Cámara Nacional de las Industrias Derivadas de la  
Silvicultura.  
México DF, 1972
- Cámara Nacional de la Industria Forestal  
" LEY FORESTAL "  
" REGLAMENTO DE LA LEY FORESTAL "  
" LEY DE DISTRITO DE DESARROLLO RURAL "  
" LEY GENERAL DE EQUILIBRIO ECOLOGICO Y PROTECCION AL  
AMBIENTE "  
México DF, 1986
- Christiansen, Per.  
Anaya, Hector  
" APROVECHAMIENTO FORESTAL "  
Centro de Educación e Investigaciones Forestales

Medellín, Colombia, 1972

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

" LA EXPLOTACION MADERERA Y EL TRANSPORTE DE TROZAS  
EN EL MONTE ALTO TROPICAL "

Roma, Italia, 1974

- Conway, Steve

" TIMBER CUTTING PRACTICES "

Miller Freeman Publications

San Francisco, E.U.A., 1968

- Centro Regional de Ayuda Técnica

" SECADO DE MADERA "

Agencia para el Desarrollo Internacional ( A.I.D. )

México DF, 1965

- Revista " OBRAS "

" CON MADERA Y PARA LA MADERA "

Edición Especial

México DF, 1982

- Publicaciones del Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera, del Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos en Jalapa, Veracruz, México:

\* Pérez, Victor

Heras, Graciela

Echenique, Ramón

" RIESGO A LA PUTRIDICION DE LA MADERA EN DIFERENTES  
CLIMAS DE MEXICO "

La Madera y su Uso en la Construcción No 1, 1980

- \* Dávalos, Raymundo  
Wangaard, Frederick  
Echenique, Ramón  
" CLASIFICACION DE LA MADERA DE PINOS MEXICANOS "  
La Madera y su Uso en la Construcción No 2, 1980
- \* Erdoiza, José  
Echenique, Ramón  
" PRESERVACION DE MADERA DE PINO CON SALES DE BORO "  
La Madera y su Uso en la Construcción No 4, 1980
- \* Robles, Francisco  
" USOS ESTRUCTURALES DE LA MADERA EN MEXICO "  
La Madera y su Uso en la Construcción No 5, 1984
- \* Pérez, Víctor  
Bárcenas, Guadalupe  
Echenique, Ramón  
" PREVENCION Y CONTROL DE DAÑO POR TERMITAS EN  
ESTRUCTURAS CON MADERA "  
La Madera y su Uso en la Construcción No 7, 1988
- \* Robles, Francisco  
Dávalos, R.  
Ricalde, M.  
" COMENTARIOS A LAS NORMAS TECNICAS COMPLEMENTARIAS  
PARA DISEÑO Y CONSTRUCCION DE ESTRUCTURAS DE MADERA  
VERSION 1987 "  
La Madera y su Uso en la Construcción No 15, 1989
- \* Robles, Francisco



- Dávalos, R.  
Ricalde, M  
" NUEVAS NORMAS PARA ESTRUCTURAS DE MADERA "  
La Madera y su Uso en la Construcción No 17, 1989
- \* Dávalos, R.  
" DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE MADERA "  
Nota Técnica No 1, 1984
- \* Erdoiza Sordo, J.J.  
" TRATAMIENTO POR INMERSION PARA PRESERVAR MADERA DE PINO  
Y ENCINO A BASE DE PENTAFLOROFENOL "  
Nota Técnica No 3, 1985
- \* Erdoiza Sordo, J.J.  
" TRATAMIENTO PARA MADERA DE PINO POR LOS METODOS DE  
BROCHA, INMERSION Y ASPERSION "  
Nota Técnica No 4, 1985
- \* Salinas, J.J.  
" ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE MADERA EN FLEXION "  
Nota Técnica No 6, 1982
- \* Enrique Martínez, E.  
" SECADORA SOLAR PARA MADERAS "  
Nota Técnica No 10, 1983
- \* Bárcenas, Guadalupe M.  
" RECOMENDACIONES PARA EL USO DE 80 MADERAS DE ACUERDO  
CON SU ESTABILIDAD DIMENSIONAL "  
Nota Técnica No 11, 1985
- \* Ordoñez, Víctor R.  
Dávalos, Raymundo

- " MANUAL DE CLASIFICACION VISUAL PARA MADERA ESTRUCTURAL  
DE PINO "
- Nota Técnica No 12, 1985
- \* Riba, Ramón  
Ricalde, Mario
- " DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EQUILIBRIO  
PARA MADERA EN LA REPUBLICA MEXICANA "
- Nota Técnica No 13, 1987
- \* Riba, Ramón  
Ricalde, Mario
- " SECADO DE LA MADERA AL AIRE "
- Nota Técnica No 14, 1987
- Parker, Harry
- " DISEÑO SIMPLIFICADO DE ESTRUCTURAS DE MADERA "
- Ed. Limusa, México DF, 1972
- Robles, Francisco  
Echenique, Ramón
- " ESTRUCTURAS DE MADERA "
- Ed. Limusa, México DF, 1986
- Hayle, Robert
- " WOOD TECHNOLOGY IN THE DESIGN OF STRUCTURES "
- 4th Edition, E.U.A.
- Breyer, Donald
- " DESIGN OF WOOD STRUCTURES "
- Mc Graw Hill, E.U.A.
- Gorfinkel, German
- " WOOD ENGINEERING "

- Southern Forest Products Association, E.U.A.
- Heritage, Clark
    - " WOOD: ENGINEERING DESIGN CONCEPTS "
    - Memorial Series of Wood, E.U.A.
  - Freas, A.D.
    - Selto, M.L.
    - " FABRICATION AND DESIGN OF GLUED LAMINATED WOOD  
STRUCTURAL MEMBERS "
    - Forest Products Laboratory  
United States Department of Agriculture  
Washington, E.U.A., 1954
  - Dietz, Albert
    - " ENGINEERING LAMINATES "
    - John Wiley and Sons Inc, New York, 1949
  - Chugg, W.A.
    - " THE MANUFACTURE OF GLUED LAMINATED STRUCTURES "
    - Ernest Benn Limited, London, 1964
  - American Institute of Timber Construction
    - " TIMBER CONSTRUCTION MANUAL "
    - John Wiley and Sons, New York, 1966
  - American Institute of Timber Construction
    - " STRUCTURAL GLUED LAMINATED TIMBER SYSTEMS "
    - Englewood, Colorado, E.U.A., 1974
  - Publicaciones del Forest Products Laboratory, Madison,  
Wis, en E.U.A.
  - \* Schannan, Billy
    - Moody, R.C.

- " LARGE GLUED LAMINATED TIMBER BEAMS WITH TWO GRADES  
OF TENSION LAMINATIONS "
- 1969
- \* Bohannon, Billy
    - " FLEXURAL BEHAVIOR OF LARGE GLUED LAMINATED BEAMS "
    - 1966
  - \* Bohannon, Billy
    - Moody, R.C.
    - " LARGE GLUED LAMINATED BEAMS WITH AITC GRADE TENSION  
LAMINATIONS "
    - 1970
  - \* " GLUED STRUCTURAL MEMBERS "
  - 1974
  - National Forest Products Association
    - " NATIONAL DESIGN SPECIFICATION FOR WOOD CONSTRUCTION "
    - 1982 Edition, Washington, U.S.A.
  - National Forest Products Association
    - " DESIGN VALUES FOR WOOD CONSTRUCTION "
    - 1982 Edition, Washington, U.S.A.
  - Canadian Wood Council
    - " STRUCTURE AND PROPERTIES "
    - Ottawa, Canada, 1971
  - Canadian Wood Council
    - " GLUED LAMINATED TIMBER: SPECIFICATION AND DESIGN DATA "
    - Ottawa, Canada, 1977
  - Departamento del Distrito Federal
    - " REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES PARA EL DISTRITO FEDERAL "

México DF, 1987

- Centro de Actualización Profesional

" 7 NORMAS TECNICAS COMPLEMENTARIAS DEL REGLAMENTO DE  
CONSTRUCCIONES PARA EL DISTRITO FEDERAL "

Colegio de Ingenieros Civiles de México

México DF, 1988

- Meli, Roberto

" DISEÑO ESTRUCTURAL "

Ed. Limusa, México DF, 1987

- De Buen, Oscar

" ESTRUCTURAS DE ACERO: COMPORTAMIENTO Y DISEÑO "

Ed. Limusa, México DF, 1988

- Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, A.C.

" MANUAL DE CONSTRUCCION EN ACERO "

Ed. Limusa, México DF, 1987

- Cia. Fundidora de Fierro y Acero de Monterrey, S.A.

" MANUAL PARA CONSTRUCTORES "

México DF, 1958

- Robb, Louis

" DICCIONARIO PARA INGENIEROS "

Ed. CECSA, México DF, 1974

- González, Raúl

" MANUAL DE COSTOS PARA CONSTRUCTORES "

México DF, Octubre, 1989