

# ANÁLISIS ESTRUCTURAL

## 1. NACIMIENTO DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En 1857, **Clapeyron** presentó a la Academia Francesa su “*Teorema de los tres Momentos*” para el análisis de las vigas continuas, en la misma forma que BERTOT la había publicado dos años antes en las Memorias de la Sociedad de Ingenieros Civiles de Francia, pero sin darle crédito alguno. Puede decirse que a partir de este momento se inicia el desarrollo de una verdadera “*Teoría de las Estructuras*”.

En 1854 el Ingeniero francés BRESSE publicó su libro “*Recherches Analytiques sur la Flexion et la Résistance de Pieces Courbés*” en que presentaba métodos prácticos para el análisis de vigas curvas y arcos.

En 1867 fue introducida por el alemán **WINKLER** (1835-1888), la “Línea de Influencia”. También hizo importantes contribuciones a la Resistencia de Materiales, especialmente en la teoría de flexión de vigas curvas, flexión de vigas apoyadas en medios elásticos.

James Clerk **MAXWELL** (1830-1879) de la Universidad de Cambridge, publicó el que podríamos llamar el primer método sistemático de análisis para estructuras estáticamente indeterminadas, basado en la igualdad de la energía interna de deformación de una estructura cargada y el trabajo externo realizado por las cargas aplicadas; igualdad que había sido establecida por Clapeyron. En su análisis, presentó el Teorema de las Deformaciones Recíprocas, que por su brevedad y falta de ilustración, no fue apreciado en su momento. En otra publicación posterior presentó su diagrama de fuerzas internas para cerchas, que combina en una sola figura todos los polígonos de fuerzas. El diagrama fue extendido por CREMONA, por lo que se conoce como el diagrama de Maxwell-Cremona.

El italiano **BETTI** en 1872, publicó una forma generalizada del Teorema de Maxwell, conocida como *el Teorema Recíproco de Maxwell-Betti*.

El alemán Otto **MOHR** (1835-1918) hizo grandes aportes a la Teoría de Estructuras. Desarrolló el método para determinar las deflexiones en vigas, conocido como el método de las cargas elásticas o la Viga Conjugada. Presentó también una derivación más simple y más extensa del método general de Maxwell para el análisis de estructuras indeterminadas, usando los principios del trabajo virtual. Hizo aportes en el análisis gráfico de deflexiones de cerchas, con el complemento al diagrama de Williot, conocido como el diagrama de Mohr-Williot, de gran utilidad práctica. También obtuvo su famoso Círculo de Mohr, para la representación gráfica de los esfuerzos en un estado biaxial de esfuerzos.

Alberto **CASTIGLIANO** (1847-1884) presentó en 1873 el principio del trabajo mínimo, que había sido sugerido anteriormente por MENABREA, y que se conoce como el Primer Teorema de Castigliano. Posteriormente, presentó el denominado Segundo Teorema de Castigliano para encontrar deflexiones, como un corolario del primero. En 1879 publicó en París su famoso libro *Théoreme de l'Equilibre de Systèmes Elastiques et ses Applications*, destacable por su originalidad y muy importante en el desarrollo del análisis hiperestático de estructuras.

Heinrich **MÜLLER-BRESLAU** (1851-1925), publicó en 1886 un método básico para el análisis de estructuras indeterminadas, aunque en esencia era una variación de los presentados por Maxwell y Mohr. Le dio gran importancia al Teorema de Maxwell de las Deflexiones Recíprocas en la evaluación de los desplazamientos. Descubrió que la “Línea de Influencia” para la reacción o una fuerza interna de una estructura era, en alguna escala, la elástica producida por una acción similar a esa reacción o fuerza interna.

Conocido como el teorema de Müller-Breslau, es la base para otros métodos indirectos de análisis de estructuras mediante modelos.

**HARDY CROSS** (1885-1959) profesor de la Universidad de Illinois, publicó en 1930 su famoso método de Distribución de Momentos, que puede decirse revolucionó el análisis de las estructuras de marcos continuos de concreto reforzado y puede considerarse uno de los mayores aportes al análisis de estructuras indeterminadas. Este método de aproximaciones sucesivas evade la resolución de sistemas de ecuaciones, como las presentadas en los métodos de Mohr y Maxwell. La popularidad del método decayó con la disponibilidad de los computadores, con los cuales la resolución de sistemas de ecuaciones dejó de ser un problema. Los conceptos generales del método fueron extendidos posteriormente al estudio de flujo en tuberías. Posteriormente se hicieron populares los métodos de KANI y TAKABEYA, también de tipo iterativo y hoy en desuso.



Figura 1. Torres Europa: un desafío a la ley de la gravedad, concreto reforzado, Madrid

En la década de los 50, Turner, Clough, Martin y Topp presentan lo que puede llamarse como el inicio de la aplicación a estructuras de los métodos matriciales de la rigidez, que han obtenido tanta popularidad en la actualidad. Posteriormente, se desarrollaron los *métodos de elementos finitos*, que han permitido el análisis sistemático de gran número de estructuras y la obtención de esfuerzos y deformaciones en sistemas complejos como las presas de concreto usadas en las hidroeléctricas. Entre sus impulsores están: Clough, Wilson, ZIENKIEWICS y Gallagher.

## 2. LAS CARGAS ESTRUCTURALES

La actividad del diseño estructural que realiza el ingeniero civil, requiere un gran conocimiento de las cargas, los materiales y las formas estructurales y no solo de los modelos matemáticos usados para obtener las fuerzas internas: momento flector ( $M$ ), cortante ( $V$ ), fuerza axial ( $N$ ), y momento torsor ( $T$ ). Los estudiantes ya están acostumbrados a esos procedimientos matemáticos y es necesario que entiendan que una viga es un cuerpo real y no una ecuación diferencial o una matriz. Por tal razón se presenta aquí un resumen o referencia, para ir introduciendo al estudiante de ingeniería civil y arquitectura en ellos.

En el proceso de diseño se deben evaluar las cargas o solicitaciones a las que estará sometida la estructura durante su vida útil. Además, se debe hacer un esfuerzo por tenerlas todas en cuenta sin olvidar aquellas que aunque pequeñas puedan poner en peligro la resistencia o estabilidad de la estructura, (ver Fig. 2): el efecto de succión producido por un viento fuerte en una bodega o hangar, que puede levantarlo y separarlo de los apoyos, o los cambios fuertes de temperatura que puedan inducir efectos de acortamiento o alargamiento para los cuales no esté adecuadamente provista la estructura. Se deberán tener en cuenta no solo las que constituyan empujes, fuerzas exteriores o pesos permanentes, sino aquellos estados temporales durante la construcción y los mencionados antes, como los efectos térmicos y de retracción, para evitar accidentes y efectos imprevistos. En algunos casos se podrán despreciar, porque su incidencia es pequeña, pero siempre después de haber meditado en su efecto. Los modernos códigos de construcción le dan al ingeniero recomendaciones de cargas mínimas que deben usarse en el diseño de estructuras comunes. Sin embargo, siempre quedará en el calculista la responsabilidad de su evaluación y elección. Las cargas que deben considerarse en el diseño de estructuras, son:

Cargas Muertas (D)

Cargas vivas (L)

Cargas de sismo (E)

Cargas de viento (W)

Cargas producidas por presión lateral de tierras o presión hidrostática (H)

Cargas producidas por presiones de fluidos (F)

Efectos producidos por cambios de temperatura (T)

A continuación se expondrán brevemente algunas consideraciones sobre las cargas de gravedad: muertas y vivas y las producidas por fenómenos naturales: sismo, viento, por ser las más comunes en los diseños de edificaciones y puentes en nuestro medio.

### **3. CARGAS MUERTAS (D)**

Son aquellas cargas que actúan durante toda la vida de la estructura. Incluyen todos aquellos elementos de la estructura como vigas, pisos, techos, columnas, cubiertas y los elementos arquitectónicos como ventanas, acabados, divisiones permanentes. También se denominan cargas permanentes. Su símbolo “D”, corresponde a la inicial en inglés de Dead (muerto).

La principal carga muerta es el peso propio de la estructura. Sus valores se obtienen considerando el peso específico del material de la estructura y el volumen de la estructura. Aunque es el tipo de carga más fácil de evaluar, su monto depende de las dimensiones de los miembros de la estructura las cuales no se conocen al inicio del proceso. Es necesario recurrir entonces a estimaciones del valor inicial. Esta acción será más o menos aproximada, dependiendo de la experiencia del diseñador. En los casos comunes esta estimación inicial será suficiente; pero en casos no rutinarios, será necesario evaluar de nuevo el peso de la estructura y revisar el diseño.

Para elementos longitudinales (vigas), la carga se evalúa por unidad de longitud. Ha sido costumbre evaluarla en sistema MKS: “kg/m, t/m”. En el Sistema Internacional (SI) se debe hacer: N/m, kN/m.

El control de las cargas muertas es muy importante en estructuras de concreto reforzado construidas *in situ*, pues el volumen de los concretos colocados puede ser muy variable, conduciendo a sobre-espesores que producen masas adicionales a las contempladas en el diseño, afectando la evaluación de las cargas de sismo. En el acero estructural se controlan más fácilmente, pues los perfiles vienen de fábrica con tolerancias de peso pequeñas.

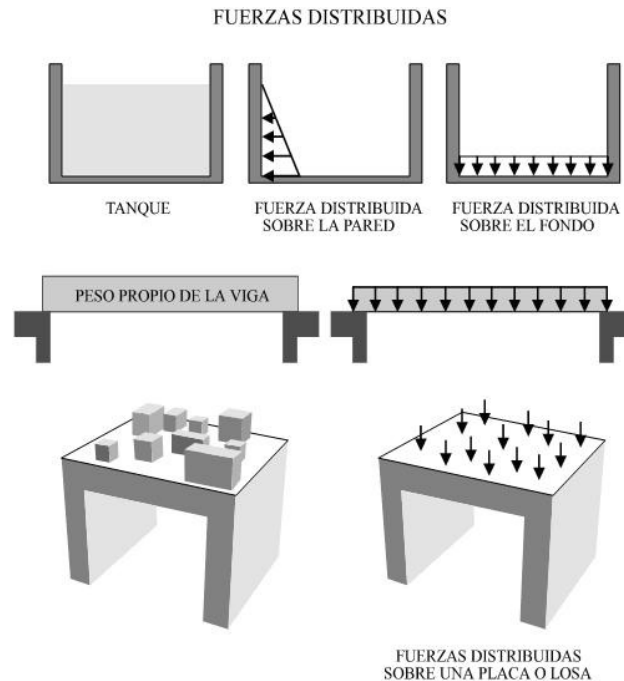


Figura 2. Fuerzas distribuidas

Para elementos de gran área, como las placas o pisos se evalúa por metro cuadrado: kN/m<sup>2</sup>, (kgf/m<sup>2</sup> en sistema MKS). Algunos ejemplos corrientes de pesos propios, propuestos son:

MATERIAL	PESO	DENSIDAD
Concreto simple	23 kN/m <sup>3</sup>	2300 Kg/m <sup>3</sup>
Concreto reforzado	24 kN/m <sup>3</sup>	2400 Kg/m <sup>3</sup>
Mampostería de ladrillo	18 kN/m <sup>3</sup>	1800 Kg/m <sup>3</sup>
Acero	78 kN/m <sup>3</sup>	7850 Kg/m <sup>3</sup>
Madera laminada	6 kN/m <sup>3</sup>	600 Kg/m <sup>3</sup>
Madera, densa, seca	7,5 kN/m <sup>3</sup>	750 Kg/m <sup>3</sup>
Arena, grava, tierra suelta	16 kN/m <sup>3</sup>	1600 Kg/m <sup>3</sup>
Arena, grava compactada	19 kN/m <sup>3</sup>	1900 Kg/m <sup>3</sup>
Macadam	22 kN/m <sup>3</sup>	2200 Kg/m <sup>3</sup>
Mampostería de piedra	27 kN/m <sup>3</sup>	2700 Kg/m <sup>3</sup>
Mortero de pega	21 kN/m <sup>3</sup>	2100 Kg/m <sup>3</sup>

#### OTRAS CARGAS MUERTAS (Por unidad de área)

Pisos de baldosa de cemento	1,0 kN/m <sup>2</sup>	100 kgf/m <sup>2</sup>
Entrepisos de madera	1,2 kN/m <sup>2</sup>	120 kgf/m <sup>2</sup>
Cielorrasos de mortero	0,8 a 1,0 kN/m <sup>2</sup>	80 a 100 kgf/m <sup>2</sup>
Cielorrasos de madera	0,1 a 0,5 kN/m <sup>2</sup>	10 a 50 kgf/m <sup>2</sup>
Teja de barro con mortero	0,75 kN/m <sup>2</sup>	75 kgf/m <sup>2</sup>
Placa ondulada a-c	0,18 kN/m <sup>2</sup>	18 kgf/m <sup>2</sup>

#### 4. CARGAS VIVAS (L)

Son aquellas debidas al uso u ocupación de la construcción y que la identifican. Incluyen personas, objetos móviles o divisiones que puedan cambiar de sitio. Generalmente actúan durante periodos cortos de la vida de la estructura. También incluyen el impacto. Su símbolo corresponde a la inicial de Live (vivo). También se denominan cargas de “ocupación”. Debido a la dificultad de evaluarlas, se especifican por los Códigos de Construcción, en kN/m<sup>2</sup> en el SI o en kgf/m<sup>2</sup> en el MKS. Usualmente se considera que ocupan toda el área del piso como cargas uniformes, aunque en algunos casos puedan estar concentradas en un área específica, algunos valores típicos son:

	<b>S.I.</b>	<b>MKS</b>
Vivienda	1,8 kN/m <sup>2</sup>	180 kgf/m <sup>2</sup>
Oficinas	2,0 kN/m <sup>2</sup>	2 200 kgf/m <sup>2</sup>
Escaleras	3,0 kN/m <sup>2</sup>	300 kgf/m <sup>2</sup>
Salones de reunión:	3,0 kN/m <sup>2</sup>	300 kgf/m <sup>2</sup> (fijos)
	5,0 kN/m <sup>2</sup>	500 kgf/m <sup>2</sup> (sin fijar)
Hospitales:	2,0 kN/m <sup>2</sup>	2 200 kgf/m <sup>2</sup> (cuartos)
	4,0 kN/m <sup>2</sup>	400 kgf/m <sup>2</sup> (sala operaciones)
Coliseos	4,0 kN/m <sup>2</sup>	400 kgf/m <sup>2</sup> (gradería)
	5,0 kN/m <sup>2</sup>	500 kgf/m <sup>2</sup> (escaleras)
Garajes	2,5 kN/m <sup>2</sup>	250 kgf/m <sup>2</sup> (autos)
Hoteles	2,0 kN/m <sup>2</sup>	200 kgf/m <sup>2</sup>
Escuelas, univ.:	2,0 kN/m <sup>2</sup>	200 kgf/m <sup>2</sup>
Bibliotecas:	2,0 kN/m <sup>2</sup>	200 kgf/m <sup>2</sup> (lectura)
	5,0 kN/m <sup>2</sup>	500 kgf/m <sup>2</sup> (estante)

Para bodegas, los valores dependen del material y de la altura de almacenamiento, por lo cual es conveniente que se señalen en forma visible los valores máximos de la carga viva de diseño, para evitar sobrecargas cuando hay cambio de dueño. En general, es conveniente que los elementos muy pesados se almacenen directamente sobre el terreno y así evitar cargas concentradas muy pesadas en la estructura.

Las cargas vivas para PUENTES constituyen un campo muy especial y común para la Ingeniería Estructural. Generalmente es muy difícil predecir el tipo de vehículo que circulará por un puente. Solo en casos

especiales, en explotaciones mineras con volquetas de gran capacidad, serán conocidas. Casi siempre es una mezcla de vehículos livianos y pesados como automóviles, camiones, tractores. En los puentes de gran luz el efecto producido por el tránsito de los vehículos puede simularse adecuadamente por una carga uniforme por unidad de longitud y una carga concentrada, la denominada franja de carga por carril. En los puentes cortos la influencia de la carga de los ejes traseros es mayor y se acostumbra definir un vehículo tipo.



Figura 3. Ensayo de carga de puente, situación de máxima carga viva

Cuando un vehículo pasa por un puente se presentan deflexiones elásticas que varían en magnitud y posición según el avance del vehículo; se presentan vibraciones debido a irregularidades de la superficie que se aumentan con el efecto vertical de la suspensión del vehículo, denominado “muelleo”. Estos efectos aumentan los esfuerzos producidos por la carga viva. Este efecto dinámico ha sido costumbre llamarlo impacto y su magnitud se evalúa en función de la luz del puente. Es mayor para luces cortas y el valor máximo fijado es del 30% de la carga viva. Además de la fuerza vertical se especifican fuerzas horizontales. Una para tener en cuenta la fuerza centrífuga en sentido radial en los puentes curvos y otra la acción de frenado en sentido longitudinal.

## 5. CARGAS DE SISMO (E)

El efecto producido por los movimientos sísmicos en las estructuras depende de la situación de la edificación con respecto a las zonas de actividad sísmica en el mundo. Los movimientos del terreno le transmiten a las construcciones aceleraciones, que producen en las estructuras reacciones de “inercia”, según la masa y su distribución en la estructura. La fuerza total de inercia se considera igual al denominado “cortante de base”, el cual es un porcentaje del peso total de la construcción.





Figura 4. Daños causados por sismo debido a cambios de rigidez en la estructura

La respuesta de una edificación a los sismos depende de varios factores, como: la rigidez de la estructura (que se relaciona con la mayor o menor deformabilidad; un edificio de pocos pisos es un edificio más rígido que un edificio alto); la distribución de la masa, tanto en planta como en altura; el tipo de suelo sobre el que está apoyada, siendo mayor para suelos blandos que para roca; las características del terremoto (duración, magnitud, distancia del epicentro); la historia sísmica de la construcción. Los códigos sismorresistentes le dan al diseñador estructural, las recomendaciones para que sus diseños tengan un margen de seguridad adecuado para proteger la vida y bienes de los propietarios de las edificaciones situadas en zonas de gran actividad sísmica.



Figura 5. Destrucción total en un sismo (Armenia 1999)

La Norma sismorresistente fija los criterios y requisitos que deben cumplir las edificaciones que puedan verse sometidas a fuerzas sísmicas y busca como objetivo el que puedan resistirlas, reduciendo a un mínimo el riesgo de pérdidas de vidas humanas y la defensa del patrimonio del Estado y de los ciudadanos. Al respecto dice:

Una edificación diseñada siguiendo los requisitos consagrados en las normas que regulen las construcciones sismorresistentes, debe ser capaz de resistir, además de las fuerzas que le impone su uso, temblores de poca

intensidad sin daño, temblores moderados sin daño estructural, pero posiblemente con algún daño en elementos no estructurales y un temblor fuerte con daños a elementos estructurales y no estructurales pero sin colapso.

Estos objetivos de la norma, conocidos y entendidos por los calculistas profesionales, algunas veces no son claramente entendidos por la comunidad en general; muchos propietarios entienden que sus edificaciones construidas después del código son antisísmicas, es decir no se dañan en temblores. Los ingenieros y arquitectos deben explicarle a sus clientes que los diseños y procesos que se realizan para una determinada construcción, tienen unos factores de seguridad y riesgo asumidos por la sociedad al expedir la norma sismorresistente y que si desean una estructura especial que no sufra daños, tendrán que asumir unos costos adicionales que pueden ser muy altos. En la ingeniería existen estructuras, como las plantas nucleares, que se diseñan con altas especificaciones, para evitar daño alguno.



Figura 6. Diversidad de efectos sobre estructuras en un área reducida (Popayán 1883)



Figura 7. Destrucción total en sismo de Armenia, 1999



La norma sismorresistente adopta el sistema internacional de medidas SI y por ende la unidad básica de fuerza, el newton N, por lo que las fuerzas inerciales deberán obtenerse a partir de las masas en kilogramos (kg). Los métodos de análisis aceptados por el código son:

- a) El Método de la fuerza horizontal equivalente.
- b) El Método del análisis dinámico elástico.
- c) El método del análisis dinámico inelástico.
- d) Otros alternos de tipo inelástico.



Figura 8. Colapso de estructura de concreto reforzado (Armenia 1999)

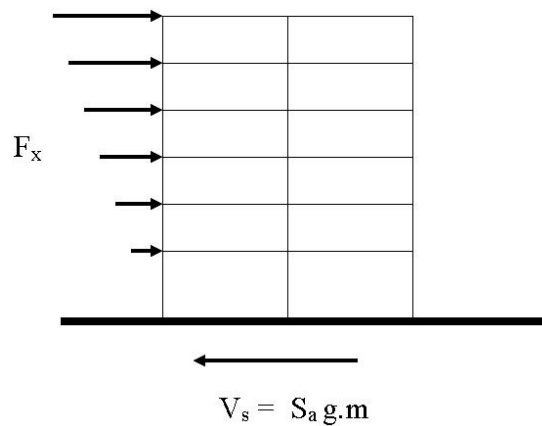


Figura 9. Equilibrio de fuerzas horizontales  $F_x$  en pisos y cortante de base  $V_s$

## 6. CARGAS DE VIENTO (W)

Las cargas de viento y explosiones producen presión o succión sobre las superficies expuestas de las construcciones. *La carga de viento es una carga muy importante en el diseño de estructuras altas o muy flexibles, como los puentes colgantes, o de gran superficie lateral, como las bodegas o grandes cubiertas.*

Los factores que influyen en la magnitud de esta carga son: la velocidad del viento y su variación con la altura, la magnitud de las ráfagas, las condiciones locales de la superficie del terreno circunvecino, la forma de la superficie expuesta al viento, la zona o región; es especialmente crítico el efecto en zonas sometidas a huracanes o ciclones, que producen velocidades del viento superiores a los 200 KMH.

La presión del viento ha causado muchos daños inesperados. Durante los procesos de construcción es común que las paredes de ladrillo o de bloques de concreto, queden sin apoyo hasta que se construyan los elementos de amarres de los techos, con lo que vientos ligeros pueden derribar estos muros sin apuntalamiento, debido a la gran superficie expuesta a la presión del viento.

Las estructuras muy flexibles como los cables de transmisión o los puentes colgantes pueden recibir fuerzas periódicas que inducen vibraciones, causando hasta la falla. Es famosa la falla del Puente de Tacoma (USA), en 1940, que con un viento suave entró en resonancia, produciéndose su colapso, que afortunadamente sirvió para impulsar el estudio del fenómeno y definió un nuevo rumbo en el diseño de puentes colgantes y en la consideración del efecto dinámico del viento como carga o acción estructural.

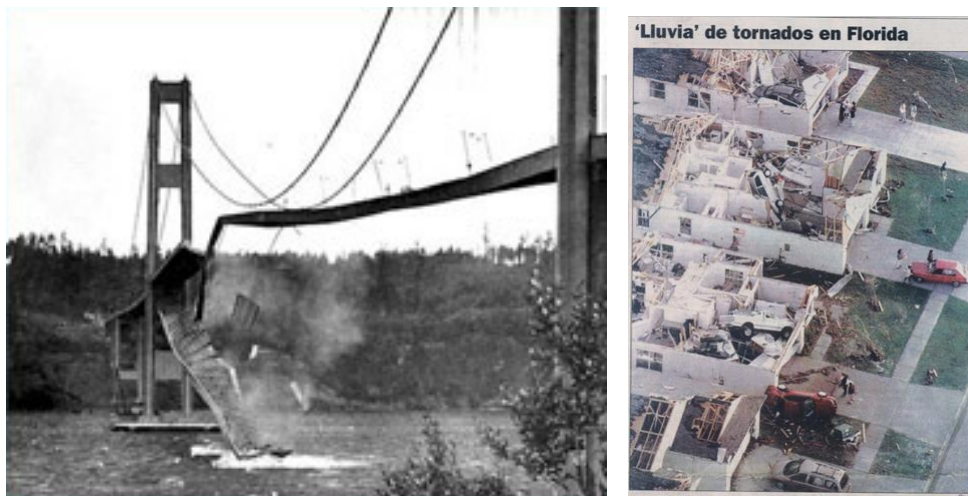


Figura 10.

La norma, presenta métodos para evaluar el efecto del viento sobre las edificaciones y sus componentes. En el denominado «método simple», que puede aplicarse cuando los efectos producidos por el viento no son fundamentales en el diseño, *la fuerza de viento  $W$  se obtiene multiplicando la presión del viento  $p$ , por el área lateral de la edificación.*

## 7. LAS ACCIONES DE FUEGO

Debido al rápido proceso de urbanización, es necesario tener en cuenta la acción del fuego sobre las construcciones, situación ya corriente en los países desarrollados. Las normas señalan los requisitos de

protección contra el fuego en edificaciones. Al contrario de otras cargas mencionadas anteriormente, las cargas de fuego no producen ningún esfuerzo en las estructuras, a menos que haya un incendio.

El concepto de carga de fuego, se relaciona con la cantidad de material combustible por unidad de área; puede expresarse como la cantidad de material en kg. o la energía térmica total del material en MJ (mega-Joules) o BTU. La carga de fuego se especifica según el tipo de ocupación de la edificación. Por ejemplo, un almacén de telas contiene más material combustible que una escuela. Para algunos casos en que se presentan materiales peligrosos, tales como solventes orgánicos, puede ser necesario determinar el volumen de material combustible y multiplicarlo por la energía térmica del material combustible liberada por el incendio; ésta última puede determinarse quemando el material en un calorímetro.

La resistencia al fuego de la estructura es el tiempo que tarda la estructura en fallar en un incendio o cuando la temperatura en el lado opuesto, por ejemplo de la placa, alcanza una temperatura tal que los materiales como las alfombras en esa zona se incendian. Para miembros estructurales sencillos puede calcularse a partir de suposiciones teóricas. Pero para miembros complejos o arreglos estructurales, esta resistencia al fuego debe determinarse mediante una prueba de fuego a escala natural, colocando el prototipo en un horno cuya temperatura se gradúa de acuerdo a una curva estándar de fuego, que corresponde al aumento de temperaturas observado en un incendio. Los diferentes países adoptan su curva de acuerdo a sus materiales y grado de desarrollo.

La resistencia al fuego especificada por los códigos de los países avanzados, depende de la carga de fuego y de la altura y finalidad de la construcción. Las reglamentaciones se basan en dos conceptos: debe ser posible evacuar todos los ocupantes de la edificación; o que el incendio se extinga autónomamente sin causar ninguna catástrofe, aún si los bomberos no son capaces de hacerlo.

Las edificaciones aisladas de un solo piso, en general, no requieren resistencia al fuego alguna, excepto cuando almacenan materiales altamente inflamables, puesto que los ocupantes pueden salir del edificio fácilmente. Las edificaciones de dos o tres pisos, requieren una resistencia al fuego baja; si contienen apartamentos unifamiliares; si la edificación corresponde a un hospital o a un hotel, la resistencia al fuego debe ser mayor.

Para efecto de los incendios se consideran “altas” las edificaciones cuya altura es superior al máximo alcance de las escaleras de los bomberos de la localidad, casi nunca superiores a 30 m; en este caso es imposible evacuar las personas por las ventanas del piso superior. Se deben proveer escaleras contrafuego o ascensores para la evacuación del edificio y el acceso de los bomberos o brigadas contra incendio. Sin embargo, las escaleras contra el fuego son imposibles para un edificio de gran altura. Se han diseñado pisos especiales, contra el fuego, en ciertos niveles, a donde son llevados los ocupantes; su resistencia al fuego debe ser tal, que las personas deben estar seguras aún durante un incendio excepcional que afectara los pisos vecinos. Además, la estructura del edificio debe tener una resistencia al fuego superior a la requerida para soportar el incendio más severo, que pueda presentarse en las peores condiciones, sin colapsar, aunque algunos pisos individualmente pudieran ser destruidos por el fuego.

Aunque las pérdidas de vidas humanas en incendios de edificios, especialmente hoteles, discotecas, son aún altas, sin embargo son menores que las que se presentan por accidentes en las carreteras. La mayor parte de las muertes y pérdidas se concentran en edificaciones antiguas y pequeñas, en las cuales las medidas de seguridad contra incendios están por debajo de los estándares requeridos. Sin embargo, son corrientes las pérdidas de vidas humanas por incendios en discotecas, casinos o lugares donde se presentan espectáculos artísticos, debido a que las salidas de evacuación o de emergencia permanecen con llave.

El atentado terrorista de septiembre del 2001 al World Trade Center de Nueva York demostró la gran vulnerabilidad de las estructuras de acero en situaciones de fuego incontrolado. La pérdida de resistencia de las columnas y vigas de acero por temperaturas superiores a los 800 °C, causaron el desplome progresivo de las torres (efecto pancake). Las Torres Petronas en Malasia, actualmente los edificios más altos del mundo, tienen columnas en la periferia y núcleo de concreto reforzado de alta resistencia, que les permiten soportar fuegos grandes con mayor probabilidad de éxito. De todas maneras, las circunstancias del 11 de septiembre eran imprevisibles desde el punto de vista del diseño estructural y debe llevar a los diseñadores a buscar la combinación de materiales para garantizar la estabilidad de la estructura aún en eventos como éste, no previstos en los diseños.

## 8. EL ACERO ESTRUCTURAL

Es el material estructural más usado para construcción de estructuras en el mundo. Es fundamentalmente una aleación de hierro (mínimo 98 %), con contenidos de carbono menores del 1 % y otras pequeñas cantidades de minerales como manganeso, para mejorar su resistencia, y fósforo, azufre, sílice y vanadio para mejorar su soldabilidad y resistencia a la intemperie. Es un material usado para la construcción de estructuras, de gran resistencia, producido a partir de materiales muy abundantes en la naturaleza. Entre sus ventajas está la gran resistencia a tensión y compresión y el costo razonable.

A pesar de la susceptibilidad al fuego y a la intemperie es el material estructural más usado, por su abundancia, facilidad de ensamblaje y costo razonable. Su mayor uso como material estructural ha correspondido a las varillas usadas en el concreto reforzado y a los perfiles livianos usados en estructuras de techos.



Figura 11. Uniones y arriostramientos en estructura de acero.

La industria de la construcción ha desarrollado diferentes formas de secciones y tipos de acero que se adaptan más eficientemente a las necesidades de la construcción de edificios.

Las aplicaciones comunes del acero estructural en la construcción incluyen perfiles estructurales de secciones: I, H, L, T, [ , 0, usadas en edificios e instalaciones para industrias; cables para puentes colgantes, atirantados y concreto pre-esforzado; varillas y mallas electro-soldadas para el concreto reforzado; láminas plegadas usadas para techos y pisos.

Como el acero tiene propiedades prácticamente idénticas a tensión y compresión, por ello su resistencia se controla mediante el ensayo de probetas pequeñas a tensión. Los elementos de acero pueden unirse fácilmente, mediante soldadura, pernos o remaches.

La “fatiga” puede reducir la resistencia del acero a largo plazo, cuando se lo somete a gran número de cambios de esfuerzos y aún fallarlo frágilmente, por lo que en estos casos deben limitarse los esfuerzos máximos. El acero más comúnmente usado es el denominado A-36, que tiene un punto fluencia de 36000 psi (2530 kgf/cm<sup>2</sup>), aunque modernamente la tendencia es hacia un acero de resistencia superior, el A-572 de punto de fluencia de 50.000 psi.

Las características estructurales del acero estructural tipo A-36 se pueden apreciar en las curvas “esfuerzo-deformación unitaria” a tensión, mostradas. En ella se muestran, también, los aceros estructurales A572 y A-36.

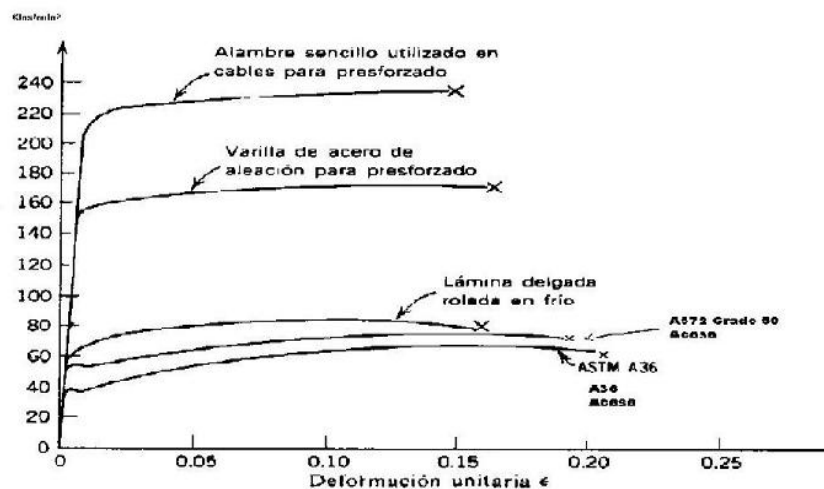


Figura 12. Curvas esfuerzo-deformación en aceros estructurales.

En la figura se pueden ver varias zonas:

Un **comportamiento elástico** hasta un esfuerzo alto. Se aplican las relaciones lineales entre el esfuerzo y la deformación, definidas por la Teoría de la Elasticidad. Los parámetros básicos son el Esfuerzo de Fluencia ( $f_y$ ) y la deformación unitaria de fluencia ( $E_y$ ).

Una zona de **comportamiento plástico**, en la cual el esfuerzo permanece prácticamente constante, pero aumenta continuamente la deformación unitaria.

Un **punto de falla o de ruptura**. La deformación unitaria en la falla es de 0,20 (curva inferior de la figura) para el acero estructural usado corrientemente en la construcción de estructuras.



Los aceros de "**alta resistencia**" como los usados para los cables de preesforzado y aceros especiales, no presentan la fluencia definida que se muestra en la figura para los aceros tipo A-36 (curva inferior de la figura), ni tienen el grado de ductilidad del acero estructural. En ellos, el **esfuerzo de fluencia** no se presenta tan claro como en los tipo A-36 y debe definirse. El acero para pre-esforzado tiene la resistencia más alta de las mostradas:  $f_{pu} = 240 \text{ ksi}$  ( $240.000 \text{ psi} = 17.500 \text{ kgf/cm}^2$ ).

La deformación del acero a partir de la fluencia es denominada *ductilidad*. Esta es una cualidad muy importante en el acero como material estructural y es la base de los métodos de diseño plástico. Permite, que la estructura absorba grandes cantidades de energía por deformación, circunstancia muy importante en zonas sísmicas, en las cuales es necesario que la estructura libere la energía introducida en su base por los terremotos.

El Módulo de Elasticidad es prácticamente independiente del tipo de acero está alrededor de  $2000000 \text{ kgf/cm}^2$ .

## 9. CONCRETO ESTRUCTURAL

El CONCRETO, también denominado hormigón, es un material artificial, creado de materiales comunes: piedra, arena y cemento, de gran resistencia a la compresión, pero muy poca a la tensión. Es el material estructural más usado en el país para construcción de estructuras de edificios de oficinas y vivienda y puentes.

El concreto es un material muy durable, resistente al fuego y a la intemperie; muy versátil, y puede adoptar cualquier forma, dependiendo de la formaleta usada. Posee una resistencia a la compresión buena, con valores típicos en el país entre  $210$  y  $350 \text{ kgf/cm}^2$  ( $21$ - $35 \text{ Mpa}$ ). Sin embargo, se producen actualmente concretos de «alta resistencia» con valores de resistencia hasta de  $1200 \text{ kgf/cm}^2$  ( $120 \text{ Mpa}$ ).

También tiene desventajas, como su poca resistencia a la tracción, aproximadamente la décima parte de la de compresión y tal vez su peso. Además, sus propiedades mecánicas pueden ser muy variables, ya que dependen de la calidad, la dosificación de los materiales, del proceso de producción, transporte, colocación y curado.

La fisuración por tracción del concreto se presenta en casi todos los miembros de concreto reforzado a flexión, excepto en aquellos que están poco cargados o los que funcionan básicamente a compresión. La ausencia de fisuras también se da en las estructuras de «concreto preesforzado», en las cuales se mantiene un estado controlado de esfuerzos internos de compresión, o pequeños de tracción, con el fin de contrarrestar los esfuerzos de tensión producidos por las cargas externas.

La deficiente resistencia a tracción del concreto simple dificulta su uso como material en vigas o elementos a flexión. Es necesario combinarlo con acero que tiene alta resistencia a la tensión, dando origen al *concreto reforzado* (con varillas) y al *concreto preesforzado*, que introduce esfuerzos de compresión que contrarrestan los esfuerzos de tracción en las secciones donde se presentan.

### COMPOSICIÓN DEL CONCRETO SIMPLE

El concreto se elabora con *arena* y *grava* (agregado grueso) que constituyen entre el 70 y 75 por ciento del volumen y una pasta cementante endurecida formada por *cemento hidráulico* con *agua*, que con los vacíos forman el resto. Usualmente, se agregan *aditivos* para facilitar su trabajabilidad o afectar las condiciones de su fraguado y contenido de vacíos para mejorar la durabilidad.

**La grava** (gravilla) varía en tamaños desde 5 mm hasta 50 mm para los concretos usados en edificaciones y puentes; en concretos especiales como los usados en presas de gravedad los tamaños pueden ser mayores. Requiere buena gradación, resistencia al desgaste, durabilidad, superficies libres de impurezas. El tamaño máximo está determinado por el proceso de construcción; especialmente influye la separación del refuerzo y las dimensiones del elemento que se pretende construir.

**La arena** es el material granular que pasa el tamiz N° 4, y debe estar libre de impurezas, especialmente orgánicas.

**El cemento** suministra las propiedades adhesivas y cohesivas a la pasta. Se usa el cemento hidráulico tipo Portland. Para su hidratación requiere cerca del 25% de agua. Sin embargo para mejorar la movilidad del cemento dentro de la pasta se requiere un porcentaje adicional del 10 al 15 %. La relación agua-cemento (a/c) mínima es de 0,35; en la práctica es mayor para darle trabajabilidad a la mezcla de concreto. La relación a/c es uno de los parámetros que más afecta la resistencia del concreto, pues a medida que aumenta, aumentan los poros en la masa y por ende disminuye la resistencia.

**El agua** de la mezcla debe ser limpia y libre de impurezas y en general debe ser potable. El proceso de hidratación genera calor, que produce aumento de temperatura en la mezcla y expansión volumétrica y que debe controlarse sobre todo en vaciados masivos. Con el fin de controlar el exceso de agua en la mezcla, necesario para facilitar la trabajabilidad del concreto fresco, la tecnología moderna del concreto, facilita los aditivos plastificantes, los cuales además de facilitar el proceso constructivo, permiten obtener concretos de resistencia más uniforme.



Figura 12. Diferentes tamaños de los moldes para fabricación de los cilindros para medir la resistencia del concreto

Las proporciones de los materiales del concreto deben permitir la mayor compactación posible, con un mínimo de cemento. Las proporciones de una mezcla se definen numéricamente mediante fórmulas: 1:2:4 que representa: "1" parte de cemento, "2" partes de arena, "4" partes de grava, al peso o al volumen. Las proporciones (dosificaciones) al peso son las más recomendables.

Las proporciones en volumen son cada vez menos usadas; se usan donde no se requiere una resistencia muy controlada: aplicaciones caseras o poblaciones pequeñas alejadas de los centros urbanos, y siempre presentan grandes variaciones en su resistencia, no siendo modernamente recomendables. En la ciudades grandes la producción se hace generalmente en plantas de premezclado, lo que permite un control de calidad estricto y una resistencia del concreto más uniforme, con reducción en el consumo de cemento. Una mezcla típica de concreto en el país tiene una resistencia de 210 kgf/cm<sup>2</sup> (3000 psi), o 21 MPa.

Siendo la compresión la propiedad más característica e importante del concreto, las demás propiedades mecánicas se evalúan con referencia a ella. La resistencia a compresión ( $f'_c$ ) se mide usualmente mediante el ensayo a compresión en cilindros de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura y con 28 días de edad. Últimamente se ha ido popularizando la medida de la compresión con cilindros de menor diámetro, 100 y 75 mm, con las ventajas de menor consumo de concreto para el programa de control de calidad y menor peso para el transporte de los cilindros; en este caso el tamaño máximo del agregado debe limitarse a 2,5 cm (una pulgada).

La resistencia a compresión ( $f'_c$ ) varía significativamente con la variación de algunos parámetros, tales como: la relación agua-cemento (a/c), el tamaño máximo de la grava, las condiciones de humedad durante el curado, la edad del concreto, la velocidad de carga, la relación de esbeltez de la muestra (en casos de ensayos sobre núcleos extraídos de concretos endurecidos es diferente de 2, que es la relación de los cilindros estándar, usados para determinar la resistencia del concreto).

Ya se mencionó que el concreto posee una resistencia a la tensión baja y cercana al 10% de la resistencia a compresión; en la actualidad esta resistencia se mide mediante el ensayo de los cilindros apoyados en su arista, denominado "ensayo brasileño".



Figura 13. Falla por tensión diagonal de vigas a escala reducida en microconcreto reforzado

La resistencia a flexión del concreto, denominada **Módulo de Ruptura ( $f_R$ )** se evalúa mediante el ensayo a flexión de viguetas de concreto simple de 50 cm de longitud y sección cuadrada de 15 cm de lado, con cargas aplicadas en los tercios de la luz. Este parámetro es usado para controlar el diseño de pavimentos de concreto. La norma NSR-98 sugiere un valor de 2 ( $\text{kg/cm}^2$ ).

**Módulo de Elasticidad** es la pendiente de la parte inicial de la curva esfuerzo-deformación unitaria del concreto y aumenta con la resistencia del concreto a compresión. Se usa normalmente el denominado *módulo secante*, que se obtiene de la pendiente de la recta que une el origen de la curva de esfuerzos v.s. deformación unitaria del concreto, con un punto correspondiente a un esfuerzo de  $0,45 f'_c$ . Esta propiedad del concreto es muy importante para la predicción de las deflexiones producidas por cargas de corta duración en los elementos a flexión. Aunque es un valor que es variable según la resistencia del concreto a compresión, su valor puede asumirse como  $200000 \text{ kg/cm}^2$ , para muchos casos en que no sea necesaria demasiada precisión. La norma sugiere un expresión para su cálculo de:  $E_c = 12500 (\text{kg/cm}^2)$

## CONCRETO PREESFORZADO

En las secciones anteriores se ha mencionado la debilidad del concreto para resistir tensión. El refuerzo convencional solo puede usarse económicamente si se acepta fisuración en el concreto. El preesforzado es una solución alterna a este problema y permite que los miembros se mantengan sin fisuración en un rango de cargas más amplio, con ventajas adicionales de deflexiones pequeñas y una durabilidad mucho mayor, por su menor fisuración y la posibilidad de cubrir mayores luces, para la misma altura.

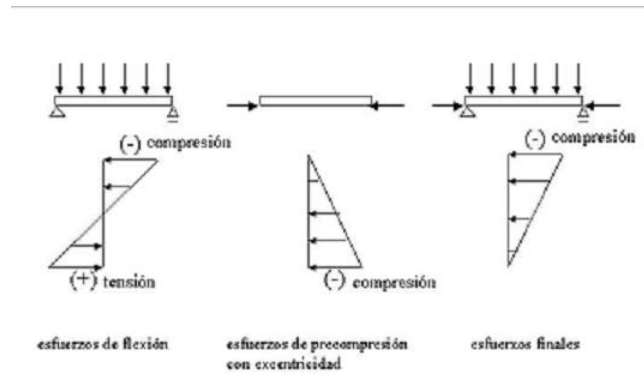


Figura 14. Mecanismo resistente en el concreto preesforzado.

El principio básico del preesforzado consiste en aplicar una fuerza de compresión en la sección, que contrarreste los esfuerzos de tracción producidos por la flexión. Este preesfuerzo es aplicado generalmente mediante una fuerza excéntrica producida por un cable paralelo o con inclinación ligera respecto al eje del elemento. Estos cables de acero de alta resistencia denominados tendones, pasan a lo largo del elemento y transmiten su fuerza generalmente en los extremos; pueden ser alambres o hilos individuales (usualmente de diámetro 5mm) o torones trenzados de 7 hilos (generalmente de diámetros de 3/8, 1/2 o 5/8 pulgadas). Según el momento de aplicación del preesfuerzo al concreto se consideran dos clases: concreto pretensado, concreto postensado.

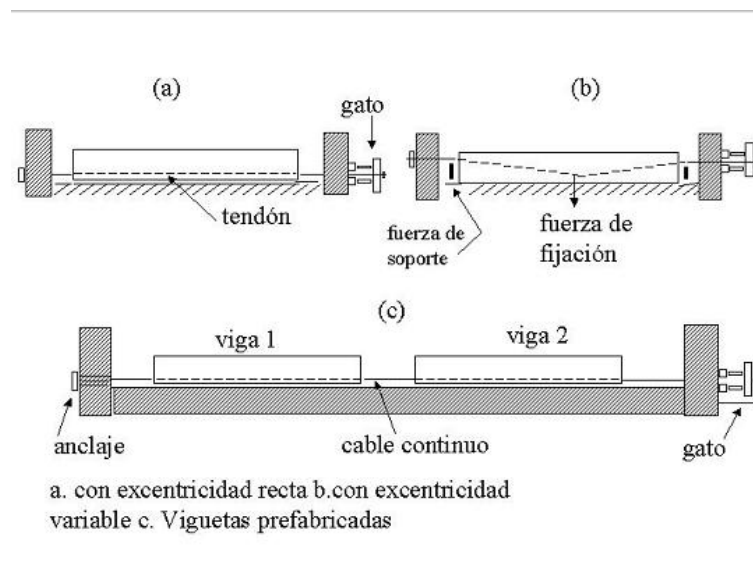


Figura 15 Métodos de pretensado.

Los tendones en el *concreto pretensado* están adheridos al concreto a lo largo del elemento, como en el refuerzo no tensionado y transmiten su fuerza por adherencia. Para construir un elemento **pretensado** es necesario que antes de colocar el concreto se mantengan tensionados los tendones o alambres entre anclajes externos, hasta que el concreto se haya endurecido; entonces se pueden liberar los tendones y se produce la transmisión del preesfuerzo al elemento (figura 15).

Los tendones **postensados** se tensionan después de que el concreto de la viga se ha endurecido y se anclan mecánicamente en los extremos, mediante cuñas.



Figura 16. Colocación de ductos en viga postensada.

Es necesario que antes de colocar el concreto se haya dejado un ducto con los tendones dentro de la viga; en algunos pocos casos los tendones pueden ir por fuera; este sistema denominado «postensado exterior» es muy usado para la reparación o mejoramiento de la capacidad de carga de puentes o estructuras (figura 16).



Figura 17. Ensayo en laboratorio, de la UPC-Barcelona, de vigas con postensado exterior.

El postensado requiere de un gato portátil y anclajes permanentes; su costo hace que sea empleado para miembros de gran luz, pesados, cuyo transporte no es económico.



gran luz.

Figura 18. Uso de vigas postensadas en pórticos y vigas de puentes de



En cambio, el pretensado se usa para elementos livianos que se pueden construir en planta y transportar fácilmente.



Figura 19. Uso de viguetas pretensadas en sistemas de piso aligerados.

## 10. LA MADERA ESTRUCTURAL

La madera es un material natural, de poco peso y buena resistencia, pero de propiedades mecánicas muy variables. Aunque es combustible, sus propiedades mecánicas no se afectan con el fuego, como sí ocurre con los materiales metálicos como el acero y el aluminio. Es muy susceptible a los cambios de humedad y al ataque de insectos; sin embargo esta desventaja puede eliminarse con tratamientos químicos adecuados mediante el proceso de *inmunización*.

Aunque la madera ha sido un material muy abundante en nuestro país, su uso se ha dedicado principalmente a la carpintería para muebles o acabados arquitectónicos, a la exportación, y como combustible en las regiones rurales y semi-urbanas. La madera como material estructural se usa poco e inadecuadamente en muchas de las regiones del país. No hay en el país una cultura ingenieril bien difundida para el uso de la madera como material estructural con buen conocimiento de los métodos y elementos de unión de los elementos.

Existen algunos pocos diseñadores y constructores en el país que sí aprovechan eficientemente las propiedades estructurales de nuestras maderas y algunos arquitectos que las usan ampliamente.

Tal vez debido a la popularización del acero en las estructuras de techos, se abandonó la práctica constructiva con madera. Aún existen ejemplos importantes de cubiertas soportadas por grandes arcos y cerchas de madera en nuestras ciudades.

### MADERA LAMINADA

A medida que se han ido agotando los árboles robustos en los bosques debido a la sobreexplotación o a que algunos países han prohibido su explotación y a que la sociedad ha ido demandando estructuras que soporten cargas y luces mayores, las secciones grandes que pueden extraerse de los bosques existentes son difíciles de obtener con maderas aserradas. El avance tecnológico en los pegantes ha permitido que la madera pueda

unirse, tanto en los extremos como lateralmente; así se han desarrollado productos como la madera terciada, aglomerada, laminada.



Figura 20. Vigas rectangulares de madera laminada en el taller.

La madera laminada (gluelam) está constituida por láminas o duelas de espesor pequeño, de longitudes diversas, ensambladas mediante uniones múltiples, tipo *finger joints*, y pegadas unas a otras, para la obtención de elementos macizos de sección rectangular. Este sistema permite obtener elementos de características superiores a las maderas tradicionales, debido a la eliminación de defectos en las duelas. Por el proceso de fabricación, que no permite continuidad en la fibra, se obtienen elementos más estables dimensionalmente y con menores deformaciones. Es un material adecuado para conformar las estructuras de las cubiertas de espacios con grandes luces, más liviano y resistente que la madera original, con una relación resistencia a peso superior. Se puede trabajar en distintas formas, siendo las más usuales la viga, el arco triarticulado y los marcos; se pueden obtener elementos de cualquier longitud y sección.

La laminación permite la construcción de vigas con sección variable, que responden a la variación de los momentos y por ende de los esfuerzos, concentrando mayor cantidad de material en las zonas de tensión y compresión de la viga, dejando la zona intermedia de la sección con menor cantidad de material (más estrechas) o con maderas de menor calidad.

Aunque las gluelam ofrecen grandes ventajas sobre las maderas aserradas, tienen algunas desventajas asociadas a su uso. Puesto que el proceso de pegado requiere un control de calidad estricto y cierto grado de sofisticación tecnológica, es necesario contar con personal especializado e instalaciones que permitan una manufactura con buen control de calidad. Esto hace que las maderas laminadas sean en general más costosas que las maderas aserradas. Cuando se comparan las maderas comerciales de longitudes semejantes, la madera laminada no es competitiva económicamente frente a la madera aserrada. Sin embargo, la madera laminada les ofrece a los diseñadores estructurales y arquitectos constructores una opción útil e importante para planear construcciones de madera de grandes dimensiones.

La madera laminada es considerada como uno de los materiales de mejor comportamiento y más seguros frente al fuego, en caso de incendio. Su resistencia al fuego es excelente, garantizando un tiempo suficiente para obtener la evacuación de bienes y vidas. La formación de una costra de carbón de madera en la superficie de la madera, disminuye la conductividad térmica, protegiendo de la combustión al elemento de madera por un tiempo relativamente largo, manteniendo su estabilidad estructural. Los elementos de materiales de alta conductividad, como el acero, aluminio, pierden rápidamente sus características estáticas, si no son protegidos suficientemente por costosas capas protectoras, en caso de aumentos de temperatura.