

1.- INTRODUCCIÓN A LAS ESTRUCTURAS

1.1 ¿QUÉ SE ENTIENDE POR ESTRUCTURA?

Puede definirse, en general, una estructura como:

..."conjunto de elementos resistentes capaz de mantener sus formas y cualidades a lo largo del tiempo, bajo la acción de las cargas y agentes exteriores a que ha de estar sometido"...

*La estructura soporta las **cargas** exteriores (acciones y reacciones), las cuales reparten su efecto por los diferentes elementos estructurales que resultan sometidos a diferentes **esfuerzos**, los cuales inducen un estado **tensional**, que es absorbido por el material que la constituye.*

Las estructuras son de diferentes tipos:

- Elementos lineales sencillos (vigas y pilares)
- Estructuras de barras
 - Estructuras articuladas
 - Estructuras reticuladas
- Estructuras laminares
- Continuos tridimensionales

1.2 LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL

Se conoce como Ingeniería Estructural el área o disciplina de la ingeniería que incluye el conjunto de conocimientos científico-técnicos necesarios en las fases del proceso de concepción, diseño y fabricación de los sistemas estructurales que son necesarios para soportar las actividades humanas. Este proceso se desglosa en fases consecutivas que son las siguientes:

Fase 1: Concepción.- Fase inicial que parte de una especificación de requisitos y que requiere imaginación creativa y juicio ingenieril para plantear alternativas y seleccionar una solución.

Fase 2: Análisis.- Fase que incluye las actividades conducentes a ratificar la adecuación de la estructura a su objetivo de soportar unas cargas dadas en unas condiciones predefinidas. En esta fase se precisa determinar (mediante cálculos que se basan en técnicas y métodos específicos) la respuesta de la estructura a cargas o acciones predefinidas; esta respuesta se mide,

usualmente, estableciendo los esfuerzos en los elementos de la estructura y los desplazamientos en sus puntos más representativos.

Fase 3: Diseño.- Dimensionamiento detallado de los elementos estructurales en base a los esfuerzos que han de soportar y los materiales de que están compuestos.

Fase 4: Construcción o fabricación.- Fase final en la que se realiza la estructura

Aunque puede parecer que está más directamente asociada con la ingeniería civil, tiene una fuerte relación con todas aquellas especialidades de ingeniería que requieren un sistema estructural o componente para alcanzar sus objetivos. Son ejemplos de proyectos que requieren el uso de los métodos y técnicas de la ingeniería estructural los proyectos de estructuras de vehículos, componentes de máquinas, estructuras civiles, plantas industriales, medios de transporte, almacenamientos de gases o de líquidos, mecanismos de transmisión, estaciones de generación de potencia, plantas de tratamiento de aguas, naves y plantas industriales,...

La evolución de la Ingeniería Estructural está asociada a la evolución de la Mecánica de Materiales y del Análisis Estructural, al desarrollo de técnicas computacionales, a la introducción de nuevos materiales constructivos, a la creación de nuevas formas estructurales y al desarrollo de las técnicas constructivas.

1.3 LA MECÁNICA ESTRUCTURAL.-

La base teórica de la Ingeniería Estructural es la **Mecánica Estructural** que tiene por objeto la investigación de las mejores formas y dimensiones que se han de dar a los elementos de una construcción para permitirle resistir a las acciones que la solicitan así como para obtener el resultado de la manera más económica posible.

La **Mecánica Estructural** es una teoría de los cuerpos deformables que se aplica, sobre todo, a las estructuras y cuyo carácter **técnico** contrasta con el carácter **matemático** de la Mecánica de Sólidos (de la que constituye una rama especialmente sencilla) o, más generalmente, de la Mecánica de los Medios Continuos. En lugar de exigir un razonamiento matemático rigurosamente complejo, la **Mecánica Estructural** admite hipótesis simplificadoras, razonables y plausibles, verificables por la experiencia; gracias a estas simplificaciones se pueden resolver eficazmente, con un grado de aproximación suficiente, un gran número de problemas de interés práctico.

Aunque utiliza en sus planteamientos todas las nociones de la Estática, puede decirse que las que utiliza de forma constante son las

nociones de equilibrio, de reducción de sistemas de fuerzas y de seccionamiento de sólidos. Esquemáticamente, una estructura puede ser analizada planteando, solamente, tres conjuntos de ecuaciones:

a) las ecuaciones de la estática, que aseguran el equilibrio de la estructura y de cualquiera de sus partes,

b) las ecuaciones geométricas que aseguran que todas las partes de la estructura permanecen juntas antes y después de la deformación, y

c) las ecuaciones en las que, utilizando las propiedades del material, se establece la relación entre las deformaciones en los elementos de la estructura y las cargas aplicadas.

El comportamiento de un elemento constructivo no depende solamente de las leyes fundamentales de la estática, tales como el equilibrio de fuerzas, sino también de las propiedades físicas que caracterizan los materiales con los cuales aquellos se construyen. Estas propiedades recogen la manera con la que los materiales resisten y se deforman ante diversas sollicitaciones (tracción, flexión,...) aplicadas en diversas condiciones (rápidamente, lentamente, en frío, en caliente,...). Las propiedades físicas de los materiales (cuyos conocimientos detallados y determinación experimental son objeto de la **Mecánica de los Materiales**), son una de las componentes esenciales de la Mecánica Estructural.

Los problemas de Mecánica Estructural se presentan bajo dos aspectos diferentes, a saber: "conocidas las fuerzas actuantes, las dimensiones y los materiales, obtener las fuerzas internas (esfuerzos) en los elementos estructurales y **verificar** su adecuación" o, también, "conocidas las fuerzas actuantes, **dimensionar** la estructura a fin de que los esfuerzos o los desplazamientos no sobrepasen ciertos límites prefijados".

La Mecánica Estructural es por excelencia una ciencia de los ingenieros: su carácter aproximado requiere la intervención intensiva del juicio ingenieril para llegar a resultados numéricos con un valor práctico suficientemente satisfactorio. Es una disciplina de enorme interés en todas las ramas de la ingeniería: civil (puentes, edificios,...), industriales (naves,...), mecánica (máquinas, tuberías,...), aeronáutica (fuselajes, aviones,...), química (tanques, conducciones,...), naval (navíos, submarinos,...), minas (galerías, encofrados,...),...

1.4 EL INGENIERO Y LAS ESTRUCTURAS.-

La deducción, a partir de un conjunto de cargas o fuerzas exteriores y de las características mecánicas del material, de los estados de sollicitación de los elementos estructurales, es el objetivo inmediato de las técnicas de análisis de la Ingeniería Estructural. El Ingeniero que se enfrenta al diseño de una estructura, sea ésta un simple entramado plano de piezas prismáticas o sea una estructura tridimensional de

formas complejas, debe, naturalmente, conocer las técnicas analíticas asociadas a los necesarios cálculos. Estas técnicas habrán de ser utilizadas en el contexto de normativa cuya aplicación garantizará la estandarización de los métodos, el control de los resultados, la repetitividad de los cálculos,... El conocimiento de esta normativa y de su razón de ser y aplicabilidad debe ser simultáneo al estudio de los métodos y técnicas aplicables al cálculo de estructuras.

Pero el cálculo de estructuras no es, en si mismo, más que una herramienta que se utiliza para prever si las formas y dimensiones de una construcción son aptas para soportar las cargas de trabajo. El Ingeniero que se enfrenta al diseño de una estructura, debe ir más allá que a la simple aplicación (probablemente en la mayoría de los casos auxiliado por un ordenador que hará esta tarea más sencilla) de los métodos y técnicas del análisis estructural; debe, a nuestro criterio, conocer la razón de ser de la morfología de la estructura y las causas profundas de su comportamiento.

Las estructuras no se construyen solamente para que resistan, sean estables, mantengan sus formas, soporten la agresión del medio, tengan un aspecto estético,...; se construyen, también, para que cumplan unas determinadas finalidades o funciones (soporte, aislamiento, contención, transmisión de esfuerzos,...) cuya consecución en el tiempo es lo que condiciona, generalmente, su tipología y las características exigibles a su comportamiento; el conocimiento y comprensión de estas funciones es imprescindible en el proceso de diseño y cálculo de una estructura. Con la toma en consideración de estos factores (probablemente con énfasis diferentes de un caso a otro) así como de los posibles condicionantes o limitaciones (comportamiento del material disponible, técnica constructiva, costo,...) ha de comenzar el proceso de planteamiento del problema que trata de resolver el Ingeniero.

“Vano sería el empeño de quién pretendiese dar con la atinada traza de una estructura, sin haber asimilado, hasta la médula de sus huesos, los principios tensionales que rigen todos sus fenómenos resistentes; tan vano como el de un médico que se pusiese a recetar y ordenar el tratamiento de sus enfermos sin conocer la fisiología del organismo humano.

No basta haber estudiado las teorías resistentes y los procesos de desarrollo de sus cálculos; es necesario haber meditado y experimentado sobre todo ello hasta sentir como algo propio, natural y congénito, sus fenómenos de tensión y deformación, para intuir de golpe cómo va a trabajar la estructura y cual sería su forma de rotura, para que aparezca a sus ojos todo eso con la misma claridad y convicción con que prevé la caída de una piedra en el espacio o en el impulso ineluctable que empuja la flecha al salir del arco de la ballesta”

1.5 UN POCO DE HISTORIA.

Los precursores.-

La construcción de estructuras es una de las más antiguas ramas o especialidades de la ingeniería. Un punto de comienzo para la Ingeniería Estructural puede fijarse en el año 500 a.C. cuando los griegos empezaron a utilizar piedra para construir estructuras cuyas columnas soportaban vigas horizontales (el templo de Hera, el túnel de Eupalinos y la escollera del actual puerto de Pitagorion son las tres grandes obras de su ingeniería). A la vez que la experiencia y las reglas empíricas iban conformando el conocimiento, Aristóteles y Arquímedes establecían los principios de la Estática.

Utilizando algunos metales, madera, piedra y mampostería, los romanos continuaron construyendo, hasta la mitad del primer milenio, introduciendo nuevas formas como el arco, la bóveda y el marco; no fueron, sin embargo, los romanos demasiado analíticos pues concentraron sus esfuerzos más en las técnicas constructivas, sobre todo de ciertas formas.

También el arte de construir en hormigón fue dominado por los romanos. Construido por Agrippa hacia el año 27 a.J.C. y después reconstruido bajo el reinado de Adriano entre los años 115 y 125, el Panteón de Roma es, con su cúpula, una de las más notables realizaciones romanas en hormigón. En su bóveda se encuentra todo el saber hacer de la civilización romana en materia de construcción. Se trata de una semiesfera de 44 m de diámetro colocada sobre una base cilíndrica. El espesor variable de la bóveda proviene de la superposición de anillos concéntricos posibilitando una buena repartición de esfuerzos. El peso específico del hormigón se reduce a medida que disminuye el espesor de la cúpula; esta reducción se logró haciendo variar el tipo de áridos del hormigón, es decir utilizando sucesivamente y hacia arriba fragmentos de ladrillo, de toba volcánica y de piedra pómez.

Durante la Edad Media (500-1500) mucho de lo que los Griegos y los Romanos habían desarrollado se perdió; la principal aportación de la tecnología de la época fue la que llevaron a cabo los constructores góticos con sus espléndidas catedrales caracterizadas por arcos apuntados estabilizados horizontalmente por arbotantes voladores; estas fábricas demuestran por si solas que, indiscutiblemente, la

construcción de edificios supuso en sus inicios un conocimiento, aunque rudimentario, de la Estática.

Antes del Renacimiento todas las estructuras fueron construidas sin cálculos, pero apoyándose sus constructores en un código de la buena práctica, código o manual cuyos contenidos fueron cimentando progresivamente el arte y la ciencia de construir estructuras: la "Ingeniería Estructural". Todos estos conocimientos fueron pasando de generación en generación, perfeccionándose con el propio devenir de la historia, pero siempre poseyeron un carácter marcadamente artesanal. Se conocen nombres de los diseñadores de estructuras desde hace dos a tres mil años y los "manuales de construcción" han sobrevivido durante el mismo período; así, por ejemplo, en el libro de Ezequiel ya se cita un manual del constructor.

Los artesanos anteriores al Renacimiento construían estructuras que trabajaban muy "holgadamente" con muy bajo nivel tensional y con muy pequeñas deformaciones. Las estructuras resultaban así masivas procediendo su belleza y airocidad de las formas y proporciones que brillantes consideraciones geométricas le conferían.

Del Renacimiento al siglo XIX: fundamentación científico-técnica.-

El Renacimiento imprimió en todas las ramas de las artes, las ciencias y la técnica un impulso renovador que todavía no se ha apagado y del cual no es una excepción el recibido por la Ingeniería Estructural. Es en los mentideros técnicos del Milán del 1400 cuando, contemplando las maravillas de las construcciones góticas, se empieza a oír "ars sine scientia nihil est". Y fue Leonardo da Vinci (1452-1519) quién, como principal exponente y detentador del conocimiento y de la inquietud científica de la época, formuló los principios de la entonces naciente teoría estructural. Otro importante personaje en relación con la Ingeniería Estructural fue A. Palladio (1518-1580) que introdujo el concepto de cercha o entramado.

El siglo XVII se abre con la legendaria figura de Galileo Galilei (1564-1642) quién estableció las primeras bases de lo que hoy conocemos como Mecánica y Resistencia de Materiales. Trató el problema de la determinación de la resistencia a la rotura de una ménsula empotrada con una carga en el extremo, intuyendo su dependencia respecto al momento en el empotramiento, pero obtuvo resultados erróneos al suponer que la distribución de tensiones consistía en un par de fuerzas puntuales cuyo brazo era el canto de la ménsula; Galileo no tuvo en cuenta la deformabilidad de los materiales y es Hooke (1635-1703) quien en 1660 emite la hipótesis mas sencilla sobre este fenómeno en la conocida forma "ut tensio sic vis". Fue Mariotte (1620-1684) quien aplicó la ley de Hooke al problema de Galileo llegando a la conclusión de que la resistencia a flexión procede de la extensión y contracción de las fibras de la ménsula (1680).

Johann Bernoulli llega, en 1705, a la conclusión de que el momento flector en una pieza prismática es proporcional a la curvatura de la misma, lo que dio lugar a estudios posteriores de Euler sobre la ecuación diferencial de la elástica y sobre la aplicación de métodos variacionales a problemas de flexión en vigas (1744) y pandeo de columnas (1757), y de Lagrange sobre la forma de una columna de óptima resistencia (1778).

Coulomb (1736-1806) desarrolló la actual teoría de la flexión y elaboró, también, una teoría de la torsión (1787) en la que supuso que la rigidez del elemento torsionado era proporcional al momento de inercia polar de la sección transversal, lo cual no era correcto como demostró más tarde Saint-Venant (1797-1886). Igualmente importantes son sus ideas sobre la deformación tangencial y sobre el rozamiento. Coulomb fue un hombre muy interesado por los problemas prácticos pero fue Young (1773-1829) el primero que acercó las teorías nacientes a la realidad definiendo el módulo de elasticidad (1807) como una constante dependiente del material y por lo tanto susceptible de ser determinada experimentalmente.

Igual que para las piezas prismáticas, existieron ciertos intentos de Euler (1766), Daniel Bernoulli (1779), Lagrange (1811) y Sophie Germain (1821) para determinar la ecuación diferencial de las placas y de las láminas con objeto de hallar los modos de vibración de ciertas estructuras superficiales

Todos estos avances fueron paralelos a los nuevos desarrollos en materiales para la construcción (por ejemplo, los ingenieros griegos y suizos habían usado madera laminada para construir puentes con más de 100 m de luz). Pero la revolución en las dimensiones y formas de las estructuras así como en los métodos de su construcción surgió con la introducción, a finales del siglo XVIII, del hierro y el acero en la construcción. Son importantes hitos para la Ingeniería Estructural el año 1750 en el que se produjo la industrialización del acero fundido y el año 1779 en el que Abraham Darby construyó el primer puente metálico, en Coalbrookdale, sobre el Severn (Inglaterra); este puente, que sigue en uso, consiste en un arco metálico de 250 m. de luz y en numerosos tramos semicirculares, cada uno compuesto por dos partes.

La Ingeniería estructural en los siglos XIX y XX: los métodos clásicos de análisis.-

Fue durante el siglo XIX (la edad de oro en la Ingeniería Estructural) cuando se produjeron los avances más significativos del cálculo de estructuras debido por un lado a los estudios de grandes físicos y matemáticos y por otro lado a la influencia de la revolución industrial y al desarrollo de la industria de la construcción.

Al final del primer tercio del siglo XIX los trabajos de Navier, Cauchy, Poisson y Green posibilitaron el rápido desarrollo de la teoría de la Elasticidad que ya partía de bases ciertas y el tipo de trabajos que requería era más de índole matemática que física. En este momento se empiezan a separar las distintas ramas de la Mecánica de Sólidos y del Cálculo de Estructuras: Teoría de la Elasticidad, Cálculo de placas y laminas, Cálculo de estructuras de barras, Teoría de la Plasticidad, etc. La última figura de científico que domina toda la disciplina fue Saint-Venant (1797-1886), quien resolvió, entre otros problemas. el de la torsión y flexión de una ménsula empotrada con una carga en el extremo.

En el establecimiento del Cálculo de Estructuras como cuerpo de doctrina con unas sólidas bases físicas han tenido gran importancia los teoremas de tipo energético. Aunque ya Johann Bernoulli (1717) había enunciado el principio de los trabajos virtuales, y su hermano Daniel había contribuido a la comprensión del concepto de energía de deformación en flexión, hay que esperar hasta bien entrado el Siglo XIX para asistir al desarrollo de este tipo de teoremas que hoy consideramos tan importantes. Clapeyron (1799-1864) enunció en 1852 el teorema de conservación de la energía. Kirchoff (1824-1887) definió en 1850 la energía potencial en problemas de placas. Posteriormente, y de manera independiente, Maxwell (1831-1879), en 1864, y Mohr (1835-1918), en 1874, dedujeron, a partir del principio de los trabajos virtuales, lo que hoy conocemos como el método de Maxwell-Mohr para la determinación de desplazamientos en estructuras articuladas. De forma casi simultánea, en 1875, Castigliano (1847-1884) presentó con sus teoremas una alternativa más general al método de Maxwell-Mohr, determinando los esfuerzos hiperestáticos como aquellos que hacen mínima la energía de deformación. Menabrea enunció (1858) su famoso teorema por el cual el estado tensional inducido en un elemento estructural por una carga térmica puede obtenerse considerando la acción equivalente de una carga de volumen. El concepto de línea de influencia fue introducido de forma simultánea por Mohr y Winkler en 1868 y fue H. Müller-Breslau (1825-1925) el que desarrolló el principio de construcción de líneas de influencia. El teorema de reciprocidad fue enunciado por Betti en 1872, aunque ya antes Maxwell había trabajado sobre un problema similar en 1864.

Hacia finales del siglo XIX el desarrollo técnico había creado un serio problema de construcción. El progreso requería de edificios funcionales en los que ubicar fábricas, bancos, mercados cubiertos, estaciones ferroviarias,...; y para levantar estos edificios hacían falta nuevos materiales y nuevas teorías constructivas.

Debido al auge de la construcción, durante el siglo XIX se fue desarrollando la teoría de **estructuras de barras**. S. Whipple (1804-1888), K. Cullman (1821-1881) y J.W.Schwedler (1823-1894) formularon los principios de los entramados planos estáticamente determinados. Navier estudió la flexión de vigas y desarrolló un método

para resolver problemas hiperestáticos basado en la integración de la ecuación diferencial de la viga (1821); fue también el primero en resolver el problema de una estructura articulada. En 1857 Clapeyron enunció su teorema de los tres momentos que permitió resolver, de forma relativamente sencilla, los problemas de vigas continuas. En 1859, Kirchhoff estudió los problemas de flexión y torsión combinadas, y Bresse analizó la deformación y distribución de tensiones en arcos. Jouravski en 1856, Rankine en 1858, y finalmente Grashof en 1878, perfeccionaron la teoría de la flexión simple introduciendo la influencia de las tensiones tangenciales en la deformación de las vigas. El trabajo de los ingenieros estructuralistas que diseñaban estructuras articuladas se vio facilitado con la aparición de los métodos gráficos de Mohren 1874, y Cullman en 1875, y con el método de Ritter en 1883.

Los problemas de **placas y láminas** se comienzan a estudiar a partir de la célebre memoria "De Sono Campanorum" de Euler publicada en 1766. Lagrange propuso, en 1811, la ecuación diferencial de las placas y Navier resolvió, en 1820, el problema de la placa rectangular apoyada en sus cuatro lados. Kirchhoff definió en 1850 la deformación de las placas de pequeño espesor mediante dos condiciones: las normales a la superficie media se mantienen rectas, y normales a la superficie media desplazada, y la superficie media se desplaza transversalmente pero no se deforma. Mindlin propuso, en 1936, una teoría aplicable a placas de gran espesor. Los problemas de placas han sido ya resueltos en la mayoría de los casos de aplicación práctica, mereciendo resaltarse los trabajos de Levy en 1899, y Nadai en 1915, sobre placas rectangulares apoyadas en dos lados opuestos, los de Koyalovich en 1902, y Boobnov en 1914, sobre placas empotradas y el método de las superficies de influencia de Westergaard, publicado en 1930, de una gran difusión entre los proyectistas. La teoría de láminas ha seguido un desarrollo más lento debido a su mayor complicación mereciendo citarse los trabajos de Love, quien enunció, en 1888, la teoría general de láminas cilíndricas, y los de Reissner, quien propuso, en 1912, un sistema de ecuaciones diferenciales para resolver los problemas de láminas con forma de superficie de revolución.

El **hierro** adquirió importancia en la construcción después de 1850. A la terminación del siglo XVIII sólo se utilizaba para cubiertas y en la fabricación de clavos, bulones,...; si se utilizaba alguna vez en la construcción era en elementos verticales para sostener pesos pues comportándose bien en compresión no resistía flexiones. Dos grandes innovaciones que potenciaron el uso del hierro en la construcción fueron el procedimiento de fabricación del acero Bessemer (1850) y la invención del laminado (1862) que permitió la producción en gran escala de hierro en planchas. Pronto se evidenció la ventaja del hierro laminado en la construcción; hasta 1770 se habían empleado barras por ejemplo en la construcción de arcos, pero su uso se hacía de forma restringida y pronto fue abandonado en favor de las viguetas IPN. Poco

después se calcularon las secciones más corrientes y se produjeron estas viguetas en forma masiva.

El desarrollo de la **construcción metálica** está marcado en los siglos XIX y XX por algunos **hechos relevantes** de los cuales se destacan los siguientes; en 1801 se construyó la primera estructura metálica de edificio en Inglaterra; Joseph Paxton construye en Londres el Crystal Palace, hecho con vidrio y metal, para que albergara la primera Exposición Universal de 1851; en 1820, Telford inició la construcción de un puente colgante (sus originales cables de hierro fueron substituidos en 1940 por cables de acero) sobre los estrechos Menai, en el norte del País de Gales; en 1881 se descubre y desarrolla la soldadura por arco eléctrico; en 1889 y con motivo de la Exposición Universal, se construye en París, utilizando viguetas metálicas ensambladas en el lugar, la torre Eiffel con 300 m de altura; en 1931, con una altura de 380 m se construye la estructura de acero del Empire State Building en New York y en el mismo año se utilizan hilos de acero estirado en frío en la construcción en New York, por el ingeniero suizo O.H. Ammann, del puente George Washington de 1067 m de luz; en 1973 construcción en New York de los dos edificios del World Trade Center con 442 m de altura; en 1974 construcción, en Chicago, de la Torre Sears con 110 pisos y 410 m de altura cada una; en 1981 realización del puente colgante Humber en Hull (Gran Bretaña) con 1410 m de vano central y en 1998 el puente colgante Akashi Kaikyo en Japón con 1990 m de luz central.

El **cemento** adquirió importancia como material constructivo después que el acero. Aunque el cemento Portland apareció al principio del siglo XIX (en 1824, J. Aspdin era beneficiario de una patente inglesa para la "fabricación del cemento Portland"), no es hasta la invención del **hormigón armado** que este material ocupó un lugar de primera línea en el mundo de la construcción, abriendo nuevos horizontes y posibilidades en el diseño de estructuras. Los ingenieros constataron enseguida que el cemento resultaba particularmente eficaz combinado con el acero. La idea de combinar la piedra y el metal en la construcción data de comienzos del siglo XIX pero solo con el cemento Portland pudo ser puesta en práctica. Entre las principales ventajas que se encontraron enseguida al hormigón armado estaban su carácter monolítico, la libertad en la elección de formas, la buena durabilidad, su buena resistencia al fuego y la economía de ejecución gracias a la utilización de materias primas poco costosas; sin embargo, resultaban evidentes desventajas la influencia desfavorable del elevado peso propio, un aislamiento térmico débil que requiere la previsión de medidas de protección suplementarias y la necesidad de complicados trabajos de modificación o demolición.

El proceso de avance en la **técnica del hormigón armado** a lo largo de los siglos XIX y XX está jalonado por **hitos reseñables**; en 1848, J.L. Lamblot construye una barcaza de hormigón armado (para

el transporte de flores!); en 1852, F. Coignet diseña y construye el primer inmueble de hormigón con perfiles de hierro embebidos; en 1875, J. Monier proyecta el primer puente para peatones y obtiene patentes para tuberías, depósitos, traviesas de ferrocarril,...; en 1886, G. Wayss plantea las bases teóricas de aplicación del nuevo material constructivo; en 1892, F. Hennebique y E. Coignet utilizan el hormigón en diferentes estructuras monolíticas (placas nervadas, vigas continuas,...); entre los años 1888 y 1900, se proyectan diversos puentes y viaductos en toda Europa; en 1902, E. Mörsch desarrolla la primera teoría completa del hormigón armado; a lo largo del primer cuarto del siglo XX empiezan a surgir las primeras ideas sobre el hormigón pretensado.

La aparición del hormigón armado modificó los tipos estructurales y complicó, de forma apreciable, el cálculo de estructuras al aparecer los entramados de barras con nudos rígidos. Aunque Clebsch ya había definido en 1862 el método de los desplazamientos (método posteriormente modificado en 1815 por Maney, y en 1926 por Ostenfeld), el paso decisivo lo dio Cross con la publicación, en 1932, de su método iterativo para resolver problemas de entramados intraslacionales. Este método se ha ido perfeccionando desde entonces e incluso se han propuesto otros métodos iterativos semejantes, como son el de Kani o el de los grados de empotramiento de Torroja.

A lo largo del siglo XX los ingenieros estructuralistas han asistido, también, al nacimiento de nuevos materiales, técnicas y formas estructurales. El aluminio, los aceros de alta resistencia, hormigones especiales, plásticos, maderas laminadas y materiales compuestos han irrumpido con fuerza en el mundo de la Ingeniería Estructural. Las nuevas técnicas incluyen la introducción de investigación experimental, el uso de la soldadura eléctrica, el hormigón pretensado, el desarrollo de nuevos métodos constructivos y el cálculo con ordenadores. Los avances en formas estructurales incluyen los grandes tableros de los puentes, los records de altura en los edificios, las láminas y paneles, las estructuras membrana,...