

1.- SEGURIDAD ESTRUCTURAL

La estabilidad y la resistencia de una construcción deben estar aseguradas bajo las condiciones a que pueda estar normalmente sometida por acciones externas o internas.

Se hacen análisis y dimensionamientos sobre modelos (en la mayoría de los casos de forma matemática). Los modelos permiten interpretar la realidad de una manera más o menos fiel. Incluyen: los sistemas estáticos (isostáticos, continuos, superficiales, ...); el comportamiento de los materiales (elasticidad, plasticidad, fragilidad, fluencia, retracción, ...), las relaciones de comportamiento (flexibilidad, rigidez, ...), los estados de cargas y acciones, etc. Preparado el modelo se puede determinar la distribución de esfuerzos, solicitaciones y deformaciones en los miembros de la estructura en cuestión.

¿Cuál es el grado de certeza que se alcanza resolviendo el modelo? ¿El modelo interpreta todos los fenómenos que ocurren en la obra real? ¿Los estados de solicitaciones se mantendrán durante la vida de la construcción? ¿Los materiales se comportarán y mantendrán en el tiempo sin modificar sus cualidades?

Frente a estos interrogantes (que resultan en dudas e incógnitas difíciles de cuantificar) queda claro que la resolución del modelo sólo brinda una interpretación grosera de la realidad.

Dado que la dispersión de las solicitaciones y de la capacidad portante puede resultar en una situación de falla o colapso, se hace necesario diseñar con un *excedente de capacidad o resistencia*.

El excedente de capacidad (ΔR) viene dado por la diferencia entre la capacidad portante (R_n) y la solicitación máxima de la acción en servicio (Q_k),

$$\Delta R = R_n - Q_k > 0$$

El índice de sobrerresistencia, denominado comunmente *coeficiente o factor de seguridad (FS)*, resulta de la relación entre capacidad y solicitación:

$$FS = R_n / Q_k > 1$$

En el diseño, análisis y dimensionamiento de las estructuras el proyectista debe asegurar (y asegurarse) que estas condiciones se cumplen. Por ello debe prever las situaciones de fallo o colapso sea que resulten de deformaciones excesivas o por alcanzarse los esfuerzos máximos.

Así, entonces, para definir un valor de sobrerresistencia debe tener en cuenta:

- Las limitaciones de las hipótesis asumidas respecto del comportamiento estructural y la calidad de los materiales, que pueden modificar el valor de R_n ;
- Las inseguridades y dudas de los estados de solicitación que puedan modificar el valor de Q_k ;
- *Las consecuencias y la emergencia* por los daños sobrevinientes al fallo.

Analizamos someramente algunas situaciones que modifican las hipótesis asumidas al modelar.

1. Circunstancias que aumentan las solicitaciones

- a) Hipótesis de cargas: Las acciones que definen los reglamentos constituyen solicitaciones máximas o *características*. Sin embargo, pueden resultar valores aún más desfavorables. La más de las veces se asumen distribuciones de cargas que simplifican el proceso de análisis aunque distan mucho de reproducirse en la realidad. Por ejemplo: ¿cuál es la distribución de la carga de uso en un edificio de oficinas o escuela? ¿cuál es la magnitud de las presiones de tierra contra un muro de sostenimiento? ¿cuál es la distribución de fuerzas originadas en un evento sísmico? Cataclismos naturales como inundaciones, explosiones, tornados o huracanes pueden originar solicitaciones apenas calculables en las obras. En general se renuncia a considerarlos, en vistas de la viabilidad económica de la obra.
- b) Cálculo de solicitaciones y tensiones:
Lo mismo puede decirse de la determinación de tensiones y esfuerzos en las secciones y su

capacidad portante. Las tensiones propias y las resistencias internas a la deformación muchas veces no se analizan, aunque pueden originar esfuerzos importantes.

- c) Construcción: la ejecución del edificio y sus detalles constituye otra fuente de incertidumbres. El principio "construye como calculas" sólo es posible en muy determinadas obras. El constructor debe completar la estructura y la construcción con medidas constructivas adecuadas (encadenados, armadura adicional, detallado de uniones,), puesto que las obras se comportan tal como se las ejecuta y no como se las calcula. Modificaciones de la construcción, de la distribución de rigideces, del tipo de apuntalamiento, pueden alterar considerablemente el estado de esfuerzos respecto del verificado en el modelo.
La construcción y el proyecto de estructura deben coordinarse adecuadamente.
- d) La ejecución de una construcción puede influir, en forma imprevisible, en el estado de fuerzas. Corresponden a esta situación: subdivisión en etapas (juntas de trabajo, habilitaciones parciales,....), fuerza de pretensado, asentamientos del suelo, deformaciones de retracción o fluencia lenta, que modifican el estado tensional verificado en el modelo.

2. Factores que disminuyen la capacidad portante

- a) Las características de las materias primas (acero, cemento, áridos, hormigón,...) son variables aleatorias (están sujetas a dispersiones) y, aunque las normas exigen condiciones de límites mínimos, naturalmente, no puede excluirse la posibilidad que se hallen resistencias inferiores.
- b) La resistencia de los materiales tampoco es uniforme. La mayor uniformidad se logra con plantas e instalaciones fijas y cuando se prevén elementos prefabricados.
- c) Los errores locales de ejecución también influyen en la capacidad portante. Son ejemplos típicos los errores de laminación y de soldaduras, deficiencias en el posicionamiento de tornillos, desviación de la posición de las barras de armaduras, errores en las dimensiones y alineamiento de las piezas, agregados sucios y hoquedades en el hormigón, a uniones defectuosas en elementos prefabricados, a irregularidades locales del terreno,.....
- d) La fatiga de los materiales reduce la capacidad de carga sea por solicitaciones de larga duración o por alteraciones permanentes de la acción.
- e) El desgaste y la corrosión reducen las secciones resistentes modificando la capacidad portante y la distribución de esfuerzos.

3. Los daños y sus consecuencias

Los daños ocasionados por las imperfecciones mencionadas resultan muy importantes cuando comprometen la seguridad de las personas o el uso de la obra. Los defectos superficiales (decoloraciones, eflorescencias, coqueas, diferencias en las dimensiones, ...) pueden no perjudicar la estabilidad pero deben evitarse en lo posible, para reflejar también la calidad del trabajo.

Las previsiones de normas y reglamentos se refieren generalmente a la seguridad resistente y advierten respecto de situaciones como:

- a) Agrietamientos y fisuras
- b) Deformaciones perturbadoras elásticas y plásticas de los elementos estructurales: las flechas de gran magnitud pueden provocar daños en los elementos de construcción ubicados encima o debajo del elemento; pueden invertirse las pendientes de cubiertas y desagües; puede entorpecer el movimiento de puentes grúas; pueden causar intranquilidad o pánico a personas que transiten el entrepiso deformable; todo ello sin poner en peligro la estabilidad.
- c) Acciones físico-químicas: atacan las superficies de hormigón, de acero, de mamposterías debilitan las secciones y reducen la vida útil de los elementos de construcción. Los ácidos, las heladas y el agua salada son particularmente peligrosos.
- d) Agotamiento de un elemento de construcción. El estado límite puede definirse de varias maneras. Por ejemplo: se define el agotamiento del hormigón cuando alcanza una deformación del 2 al 3,5‰

en el acero para hormigón armado cuando alcanza alargamiento del 5 al 10‰; en las construcciones de acero cuando alcanza la tensión de fluencia. El colapso y la rotura se alcanzan después de superar esos límites. El aumento de capacidad portante con respecto al estado crítico es muy pequeño.

- e) Características del colapso: normalmente los fallos en flexión o tracción sobrevienen luego de amplias y grandes deformaciones con las que la estructura "avisa" de la inminencia de la caída, son fallas dúctiles. En cambio fallos debidos a inestabilidad local o general, o en secciones comprimidas (en forma directa o por corte), o de materiales frágiles (como el hormigón y la mampostería) sobrevienen "sin aviso", por lo que el riesgo es mayor.

2.- APRECIACIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE

La definición del excedente que es necesario tomar en el cálculo para la capacidad portante de una obra ha evolucionado en forma continua, y aún no ha sido fijada definitivamente. Un gran paso ha sido pasar de comprobar la seguridad sólo en las secciones más solicitadas a considerar la estructura total con todas sus características.

La primera forma de comprobación da lugar al Diseño o Verificación por Tensiones Admisibles y la segunda al Diseño o Verificación por Estados Límites.

2.1.- DISEÑO POR TENSIONES ADMISIBLES

Se verifica que en las secciones más solicitadas los esfuerzos actuantes no superen los esfuerzos definidos como "admisibles".

Por lo demás se supone que se tomen todas las medidas necesarias para evitar fallos localizados, refuerzos de armaduras y de conexiones, arriostramientos,.... El cumplimiento de las normas y reglas de la buena construcción garantizan después que la seguridad en todos los otros puntos es mayor que la de las secciones verificadas.

Sin lugar a dudas, la seguridad del conjunto no resulta uniforme y no se puede predecir alguna situación de colapso.

Las tensiones o esfuerzos admisibles resultan de considerar posibles aumentos en las solicitaciones y disminuciones en las resistencias respecto de los valores medios dispuestos para el modelo de análisis.

$$R_m - \Delta R \geq Q_m + \Delta Q$$

$$R_m(1 - \Delta R/R_m) \geq Q_m(1 + \Delta Q/Q_m)$$

$$FS = R_m/Q_m = (1 + \Delta Q/Q_m)/(1 - \Delta R/R_m)$$

$\Delta Q/Q_m$ Desviación estimada en los valores de las solicitaciones

$\Delta R/R_m$ Desviación estimada en las resistencias previstas

Se estiman los valores de las desviaciones asumidas para las solicitaciones y para las resistencias en consideración de las incógnitas y dudas ya descrito, se determina el FS y se aplica como esfuerzo admisible que no puede ser superado por las solicitaciones máximas

$$R_{adm} = R_{lim}/FS \geq Q_{max}$$

Se verifica en el modelo que ninguna fibra de la sección más solicitada supere las tensiones admisibles definidas.

Dos ejemplos:

- a) Estructura de acero, combinación de acciones principales.

El esfuerzo límite es la tensión de fluencia. La fabricación del acero tiene control minucioso y está reglamentada la calidad mínima, por lo que pueden esperarse pocos desvíos de la resistencia. Las hipótesis de cálculo son confiables. Por ello se asume una desviación de la resistencia de un 10%. Las acciones principales son aquellas para las que se hace la obra, en sus combinaciones no se incluyen otras acciones, la posibilidad de variación es grande, se asume una desviación de las acciones de hasta 50%

El factor de seguridad resulta: $FS = (1 + 0,50)/(1 - 0,10) = 1,67$

$$F_{adm} = 240/1,67 = 144 \text{ MPa}$$

- b) Estructura de acero, combinación de acciones principales y secundarias.

El esfuerzo límite es la tensión de fluencia. La fabricación del acero tiene control minucioso y está reglamentada la calidad mínima, por lo que pueden esperarse pocos desvíos de la resistencia. Las hipótesis de cálculo son confiables. Por ello se asume una desviación de la resistencia de un 10%. Las acciones principales son aquellas para las que se hace la obra, se combinan ahora con acciones secundarias. Se tiene en cuenta que, simultáneamente con una acción principal actúa otra fuerza accidental (p.e.: cargas permanentes + cargas de uso + viento), la posibilidad de variación es pequeña o mediana, se asume una desviación de las acciones de hasta 25%

El factor de seguridad resulta:

$$FS = (1 + 0,25)/(1 - 0,10) = 1,39$$

$$F_{adm} = 240/1,39 = 172,8 \text{ MPa}$$

2.2.- DISEÑO POR ESTADOS LÍMITES

Se entiende por estados límites aquellas situaciones en que la estructura o la construcción, o alguna de sus partes queda fuera de servicio, sea porque pierde capacidad portante o porque deja de satisfacer la función para la que fue diseñada.

a) Estados límites últimos

Cuando se alcanza el colapso de la estructura o una de sus partes. Están ligados a la capacidad resistente y estabilidad frente a las cargas que la solicitan.

Cabe considerar:

- Estado límite de equilibrio: definido por la pérdida de estabilidad del conjunto o partes
- Estado límite por transformación del esqueleto en un mecanismo
- Estado límite por rotura frágil;
- Estado límite por inestabilidad global, pandeo de barras o abollamiento de placas
- Estado límite por fatiga
- Estado límite por fluencia o plastificación que modifican inaceptablemente la geometría de la construcción
- Estado límite por sensibilidad de la estructura al fuego, explosiones, choques...

b) Estados límites de servicio

Cuando se compromete el uso de la construcción o su durabilidad.

Cabe considerar, entre otros:

- Deformaciones o desplazamientos excesivos, cuando resultan incompatibles con la propia estructura o con elementos no estructurales
- Agrietamiento prematuro o excesivo
- Durabilidad
- Vibraciones que alteren la funcionalidad de la construcción

- Corrosión

Será necesario considerar todos los posibles estados límites, de modo que se garantice un grado de seguridad adecuado para la estructura, sus partes y la construcción.

2.3.- VERIFICACION DE LA SEGURIDAD ESTRUCTURAL POR ESTADOS LÍMITES - DISEÑO POR FACTORES DE CARGA Y RESISTENCIA

El diseño y la verificación de la capacidad se hacen todas las secciones y se consideran todas las posibilidades de estados límites como los ya indicados.

La condición de resistencia para la estructura, o cualquiera de sus miembros y sus conexiones es:

$$\text{RESISTENCIA REQUERIDA} \leq \text{CAPACIDAD ESTRUCTURAL}$$

que se expresa:

$$\sum_{i=1}^k \gamma_i * Q_i \leq \phi * R_n$$

Q_i representa tanto las acciones como sus consecuencias (esfuerzos y deformaciones)

R_n es la resistencia nominal del miembro, la estructura o la conexión analizada, conforme las normas de aplicación

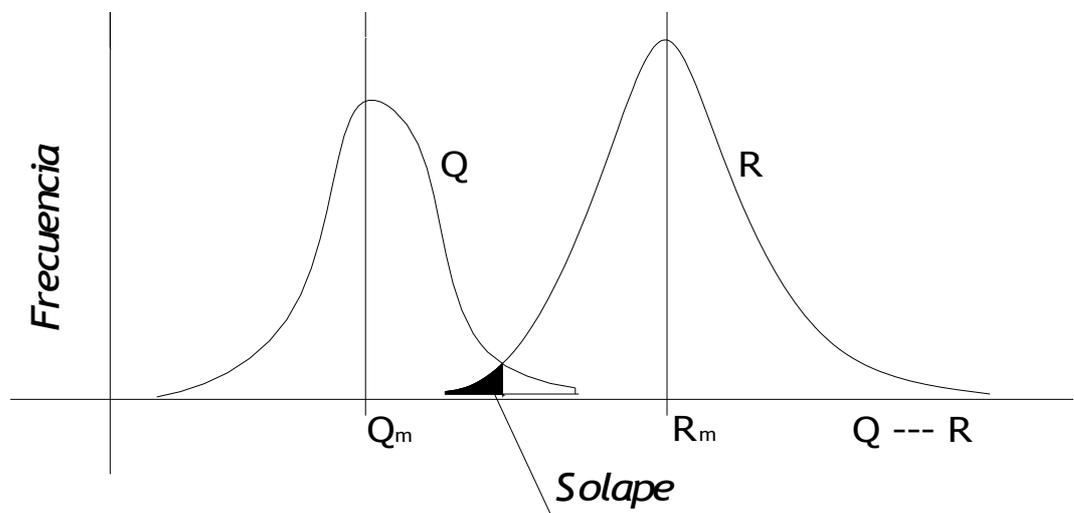
ϕ : Factor de resistencia correspondiente a R_n , tiene en cuenta el ajuste del modelo y la estructura real, validez de hipótesis, métodos elástico y plástico, fórmulas teóricas y prácticas, conocimiento del mecanismo de colapso

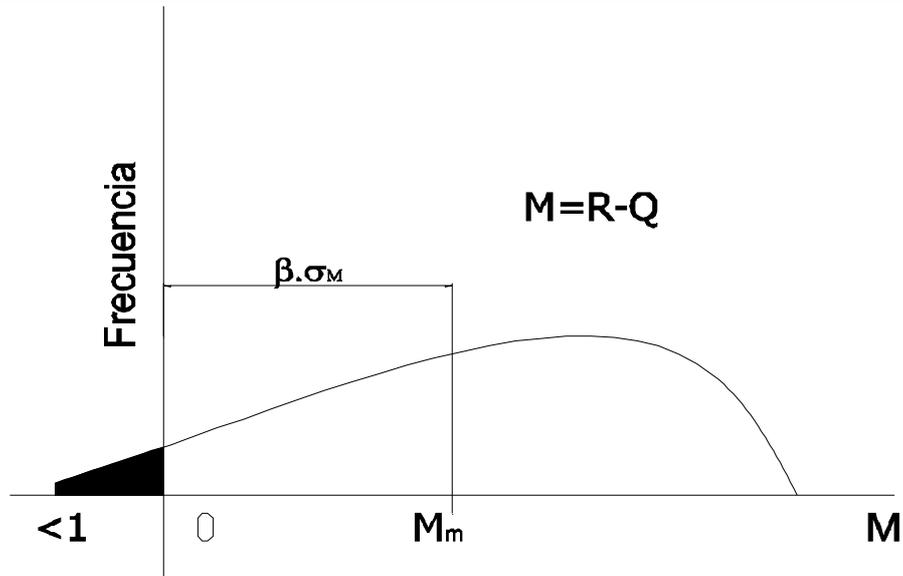
γ_i Factor de carga correspondiente a la acción nominal, tiene en cuenta la variabilidad de la acción y la posibilidad de actuación simultánea con las otras acciones contenidas en la combinación analizada

Otras formas de expresar la condición es:

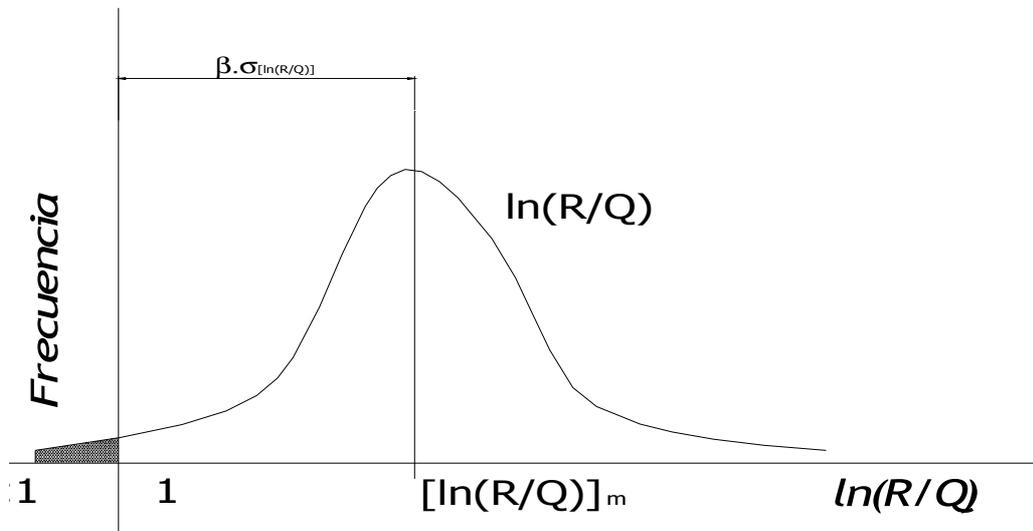
$$Q \leq R \quad , \quad R/Q \geq 1.0 \quad , \quad M = R - Q \geq 0$$

Recordemos que tanto Q_i como R_n son variables aleatorias. Esto queda indicado en los gráficas de distribución de frecuencias, tanto para esas variables por separado como para el cociente o la diferencia entre ellas.





Considerando la función $\ln(R/Q)$, que también es una variable aleatoria, la condición de seguridad toma la forma: $\ln(R/Q) \geq 1$



Para aumentar la seguridad, debe reducirse el área sombreada. Esto puede hacerse por una o ambas acciones siguientes:

1. Desplazando el valor medio de $\ln(R/Q)$ hacia la derecha
2. Reduciendo la extensión de la curva para una posición dada del valor medio respecto del origen.

Una forma conveniente de combinar las dos aproximaciones es definir la posición del valor medio usando como unidad de medida la desviación normal del $\ln(R/Q)$. Así, la distancia desde el origen al valor medio viene medida por $\beta \cdot \sigma_{[\ln(R/Q)]}$

β el número de desviaciones normales de la función $\ln(R/Q)$, se denomina *índice de confiabilidad*

La determinación estadística de los valores en juego es de particular complejidad, tanto por el universo de datos a verificar como por la escasez de datos relevados. La forma de distribución de cada una de las numerosas variables tiene influencia en la función $\ln(R/Q)$; a menudo sólo pueden ser estimados los valores medios y las desviaciones normales de las variables involucradas en la obtención de las resistencias y de los efectos de las acciones.

Los coeficientes especificados en AISC-LRFD (y en CIRSOC 301-EL), se fundamentan en:

1. Modelos probabilistas de cargas y resistencias
2. Calibración del criterio AISC-LRFD con las especificaciones anteriores AISC-ASD, realizada para algunos elementos estructurales y solicitaciones seleccionados
3. Evaluación del resultado mediante el juicio, la experiencia y el estudio comparativo de proyectos de estructuras representativos

Definido el valor medio en función de la desviación normal -

$$[\ln(R/Q)]_m = \beta * \sigma_{\ln(R/Q)}$$

Para salvar los inconvenientes de la falta de datos, la dispersión de resultados puesta en término de la desviación estándar se reemplaza por el *coeficiente de variación V*, que tiene la ventaja de resultar adimensional e independiente del número de muestras. Así se define la siguiente condición de proyecto:

$$\beta * \sigma_{\ln(R/Q)} = \beta * \sqrt{(V_R^2 + V_Q^2)} \leq \left[\ln \left(\frac{R_m}{Q_m} \right) \right]$$

donde la desviación normal ha sido reemplazada por la aproximación:

$$\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}$$

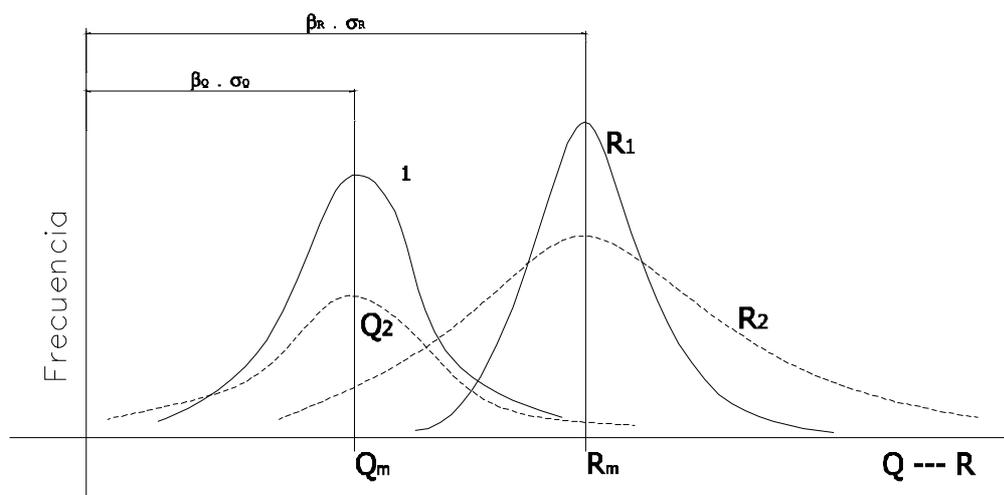
$$V_R = \frac{\sigma_R}{R_m} \quad \text{tiene en cuenta variaciones de Material, de Fabricación y de Proyecto}$$

$$V_Q = \frac{\sigma_Q}{Q_m} \quad \text{tiene en cuenta la variabilidad de las acciones}$$

$$\beta = \frac{\ln(R_m / Q_m)}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}}$$

Indica que la probabilidad de falla no viene definida sólo por la relación entre los valores medios de resistencia y acciones, sino también por la variación de esos valores. En el gráfico de la siguiente figura, las distribuciones de resistencia y solicitación son diferentes para las situaciones (1) y (2), tienen los mismos valores medios (R_m ; Q_m) pero presentan distintas variaciones, lo que hará diferente el índice de confiabilidad.

Esta determinación de β es una forma sencilla de definir el método probabilístico utilizado en la Especificación AISC. El proceso de definición del valor β se denomina *calibración*.



Así es que se pueden determinar los índices de confiabilidad asociados a diferentes miembros estructurales diseñados conforme algún reglamento conocido, a su función y a las cargas que lo solicitan.

El punto de calibración con las normas AISC-ASD (que diseñaba por tensiones admisibles), se fijó para una relación 3 entre cargas variables y permanentes ($L/D = 3$), con lo que resultan los siguientes índices de confiabilidad:

- $\beta = 2.60$ Para combinaciones de cargas permanentes y útiles
- $\beta = 4.0$ a $4,5$ Para conexiones, en las que se espera resulten más fuertes que las piezas unidas
- $\beta = 2.50$ Para combinaciones de cargas permanentes y viento
- $\beta = 1,75$ Para combinaciones de cargas permanentes y sismo

Estos diferentes valores del índice se manifiestan en los factores de resistencia (ϕ) adoptados en las especificaciones AISC y en los Reglamentos CIRSOC 301-EL y 201. Los factores de combinación (γ_i) están implícitos en la relación **L/D**.

Bibliografía

- (1) FRANZ, Gotthard – Tratado del Hormigón Armado – Ed. Gustavo Gili – Barcelona – 1971 - Tomo II – Capítulo 5 – pág. 380 y ss.
- (2) Comentarios CIRSOC 301-EL – capítulos A.4 y A.5
- (3) DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO con LRFD - Galambos - Lin – Johnston – Prentice Hall – México - 1999
- (4) DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO - Bresler - Lin – Scalzi – Limusa – México – 1990
- (5) DISEÑO ESTRUCTURAL – Rafael Ridell C. - Pedro Hidalgo – Ediciones Universidad Católica de Chile - 1997