

CAPITULO 1

1. CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO

INTRODUCCION

El *Método de Factores de Carga y Resistencia* adoptado por el *American Institute of Steel Construction* (AISC) en la primera edición del *Load and Resistance Factor Design Specification for Steel Buildings*, es un criterio de cálculo de estructuras de acero basado en los **Estados Límites de Resistencia y de Servicio**, que difiere del tradicionalmente utilizado: el *Método de las Tensiones Admisibles*.

Este nuevo método introduce e interrelaciona dos conceptos que en sí mismos, son independientes. Uno de ellos se trata de un concepto en general conocido, y se lo aplica para el dimensionamiento de componentes estructurales. El mismo se basa en la utilización de alguna teoría de cálculo plástico, de rotura o de *estados límites últimos* y que ha sido ya incluido en varios reglamentos, tanto en reglamentos de hormigón armado como de acero (DIN 1045, CIRSOC 201, etc.). El segundo concepto, se refiere a un enfoque basado en principios probabilísticos de primer orden, aplicado tanto para la obtención de las *resistencias de cálculo* de los componentes estructurales a partir de los estados límites últimos mencionados, como para establecer las combinaciones de cargas y/o solicitaciones que sobre ellos actúan.

Mediante este enfoque probabilístico, unido estrechamente al de estados límites, se trata de caracterizar un procedimiento que resulta coherente para evaluar la resistencia y la confiabilidad estructural.

A continuación realizaremos un análisis cualitativo y conceptual de ambos métodos, tratando de establecer las diferencias entre ambos procedimientos.

METODO DE LAS TENSIONES ADMISIBLES

El método basado en las tensiones admisibles que utilizamos hasta el presente y que está contenido en las Normas DIN 1050, DIN 4114, en el CIRSOC 301/302 y en la Especificación *Allowable Stress Design* (ASD) de la AISC (American Steel Construction), puede expresarse en forma compacta, por la inequación:

$$\sum Q_i \leq \frac{R_n}{FS} \quad (1)$$

En la cual, Q_i es el "**efecto**" (esfuerzo característico, deformación, etc.) debido a las causas (cargas, variaciones de temperatura, etc) en una sección de un miembro estructural.

$\sum Q_i$ es la sumatoria de los efectos Q_i de igual naturaleza (todos M o todos N, etc.) debidos a las causas combinadas, obtenidos mediante un procedimiento de análisis estructural. Esta sumatoria se denomina "**resistencia requerida**" por el miembro estructural.

R_n es la resistencia que posee el elemento o unión (capacidad resistente a la flexión, esfuerzo axil, corte etc) con su estado límite claramente definido y se denomina "**resistencia nominal**". Los Reglamentos o Especificaciones dan la información necesaria para determinar el valor de la resistencia nominal de un miembro, correspondiente al tipo de solicitación cuyo límite se verifica.

FS es el coeficiente de seguridad que tiene en cuenta, en forma integral, las incertidumbres del procedimiento.

$\frac{R_n}{FS}$ es la "**resistencia de cálculo**" admisible que no debe ser superada.

Si dividimos ambos miembros de la inequación por una característica geométrica adecuada (área, módulo resistente, etc.), el de la izquierda se transforma en una **Tensión de Trabajo** y el de la derecha en una **Tensión Admisible**.

Por otra parte, $\sum Q_i$ será el máximo valor absoluto del efecto resultante de las siguientes combinaciones dadas, en este caso particular, por la *AISC Specifications – ASD*:

$$\begin{aligned} &D + L' \\ &(D + L' + W).0.75 \\ &(D + L' + E).0.75 \\ &D - W \\ &D - E \\ &L' = L + (L_r \text{ ó } S \text{ ó } R) \end{aligned}$$

En las que:

- D : Son las cargas muertas o permanentes.
- L : Cargas vivas o sobrecargas útiles.
- W : Carga accidental del viento.
- E : Carga accidental sísmica.
- L_r : Carga viva de cubierta
- S : Carga de nieve.
- R : Carga debida a lluvia inicial o hielo (estancamiento o encharcado).

Este método se caracteriza entonces, por el uso de **Cargas de Trabajo no factoreadas o mayoradas** (de valores nominales-medios o característicos, fijados por los códigos) y por la aplicación simultánea de un **coeficiente o factor único de seguridad FS** a la **Resistencia Nominal** (media o característica).

Debido a la gran variabilidad y en consecuencia a la impredecibilidad de las Cargas Vivas y Accidentales, en comparación con las Cargas Permanentes, sumado a los distintos valores de los coeficientes de variación (que indican la dispersión de los resultados) de las Resistencias Nominales (correspondientes a cada sollicitación) no es posible obtener, mediante este método una **confiabilidad uniforme** para una estructura determinada.

Entendemos por confiabilidad uniforme de una estructura cuando todos los miembros que la constituyen (barras, uniones, etc.) tienen igual probabilidad de falla para cualquier tipo de sollicitación.

METODO DE LOS ESTADOS LIMITES ULTIMOS O DE SERVICIO (Load and Resistance Factor Design – LRFD)

CONCEPTOS BASICOS

Este método de **Cálculo por Factores de Carga y de Resistencia** como su nombre lo indica, utiliza "**factores**" (multiplicadores) separados para cada tipo de carga y de resistencia. Como el objetivo del método era calcular una estructura para la que todos sus componentes tuvieran una confiabilidad uniforme, fue necesario establecer el valor de estos "**factores**", de naturaleza claramente aleatoria, mediante una considerable cantidad de investigaciones y experiencias.

Veremos que esos "**factores**" (de carga γ y de resistencia ϕ) reflejan el "**grado de incertidumbre**" de las diferentes cargas (intensidad, frecuencia, etc.) y de sus combinaciones (simultaneidad y valores relativos, etc.) y de la exactitud del tipo de resistencia pronosticada.

Este criterio de los **Estados Límites**, establece así, un método para dimensionar estructuras para las que **ningún estado límite predeterminado puede ser excedido** cuando las mismas están sujetas a cualquier **combinación pertinente de cargas factoreadas**.

Un *Estado Límite* es una condición aplicable a un único miembro estructural o a un conjunto de miembros (estructura), más allá de la cual no queda satisfecho el requerimiento, establecido en el proyecto, relativo al comportamiento esperado del miembro o del conjunto. Los Estados Límites se clasifican en:

- a) Estado límite último.
- b) Estado límite de servicio.

a) Los **Estados límites últimos** son los asociados al colapso de una estructura u otro modo de falla, que pone en peligro la vida humana, bienes de la sociedad, etc. Los Estados límites últimos (ELU) incluyen:

- Pérdida del equilibrio de la estructura o parte de ella;
- Pérdida de la capacidad portante de carga por rotura, inestabilidad, fatiga u otro límite acordado, tales como tensiones excesivas, etc.

b) Los **Estados límites de servicio** corresponden a estados más allá de los cuales dejan de ser satisfechos los criterios de servicio y condiciones de uso establecidos en el proyecto (condiciones de confort, de rigidez, etc.). Los Estados límites de servicio (ELS) incluyen:

- Deformaciones que afecten la apariencia, el uso efectivo de la estructura (incluyendo mal funcionamiento de máquinas o servicios) o que puedan causar daños a elementos de terminación o no estructurales.
- Vibraciones que causen discomfort a las personas, daño al edificio o a su contenido.

En general un mismo miembro estructural tendrá diferentes estados límites, por ejemplo en una viga:

ELU: resistencia a flexión, resistencia al corte, pandeo lateral, abollamiento, etc.

ELS: deformación vertical máxima, frecuencia de vibración, etc.

Cada **Estado límite** está asociado y definido por el valor de una determinada **Resistencia Nominal R_n** , la misma establece los límites de la aplicación estructural de un elemento.

FORMATO GENERAL DEL CÁLCULO POR FACTORES DE CARGA Y DE RESISTENCIA (LRFD).

El método LRFD puede ser expresado por la inecuación:

$$\sum \gamma_i \cdot Q_i \leq \phi \cdot R_n \quad (2)$$

Q_i :	Efectos debidos a las causas actuantes (ya definido);
γ_i :	Factor de carga;
$\sum \gamma_i Q_i$:	Resistencia requerida;
R_n :	Resistencia Nominal (obtenida a partir de las propiedades nominales del material y de la sección);
ϕR_n :	Resistencia de cálculo.

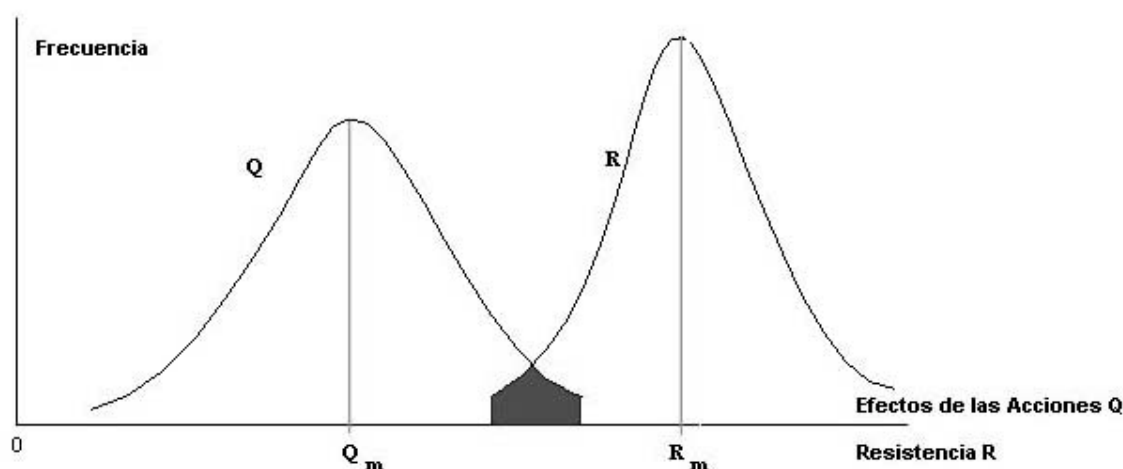
El miembro de la izquierda de la inecuación (2) es la **Resistencia Requerida** e igual a la suma de diferentes efectos (de la misma índole) debidos a las cargas o a las causas Q_i multiplicados por sus respectivos factores de carga γ_i . El miembro de la derecha es la **Resistencia de Cálculo** (Estado límite Ultimo o de Servicio) y es igual al producto de la **Resistencia Nominal** R_n por el factor de resistencia ϕ . Como se ha dicho más arriba, ϕ y R_n se obtienen de la Especificación LRFD.

FUNDAMENTOS DEL METODO LRFD

El método LRFD está basado en:

- a) Un *modelo probabilístico*
 - b) Una "calibración" del nuevo criterio (LRFD) con respecto al método ASD (AISC 1978).
 - c) La evaluación juiciosa del criterio resultante aplicando la experiencia pasada, ayudada por estudios comparativos de cálculos de estructuras representativas.
- a) El **modelo probabilístico** supone que los efectos de las cargas Q y las resistencias R son **variables aleatorias independientes** y que los factores adimensionales de carga γ y de resistencia ϕ son determinados aplicando los principios probabilísticos de primer orden.

En la Figura 1.1 se representa, para un caso supuesto, las distribuciones, de frecuencias Q y R .



Mientras $R > Q$ existirá un margen de seguridad para el estado límite considerado. No obstante existe una cierta probabilidad, dada por el área sombreada en la figura, que R sea menor a Q , ($R < Q$).

Si la expresión $R \geq Q$ es escrita en forma logarítmica: $\left[\text{Ln}\left(\frac{R}{Q}\right) \geq 0 \right]$ obtenemos una curva de distribución (Figura 1.2) que combina las incertidumbres de R y Q . La probabilidad de alcanzar un estado límite ($R < Q$) es igual a la probabilidad que $\text{Ln}\left(\frac{R}{Q}\right) \leq 0$, representada por el área rayada de la figura.

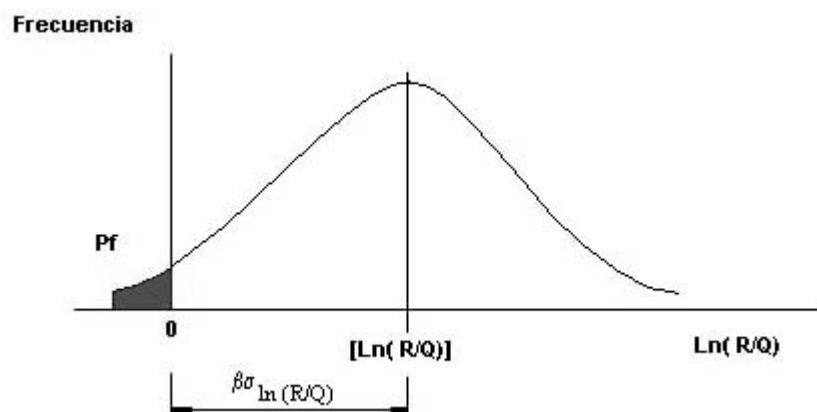


Figura 1.2

Para reducir la posibilidad de falla o lo que es equivalente, disminuir el área sombreada, tenemos dos posibilidades:

1. Desplazar el valor medio $\text{Ln}\left(\frac{R}{Q}\right)_m$ hacia la derecha,
2. Reducir la amplitud de la curva $\text{Ln}\left(\frac{R}{Q}\right)$

La forma conveniente de combinar ambas posibilidades es definiendo la posición del valor medio $\text{Ln}\left(\frac{R}{Q}\right)$ usando la desviación estándar σ de la curva $\text{Ln}\left(\frac{R}{Q}\right)$. De esta manera, la distancia desde el origen al valor medio estará medida por la cantidad β de desviaciones estándar σ , o sea $\beta \cdot \sigma_{\text{Ln}\left(\frac{R}{Q}\right)}$. El factor β es denominado **índice de confiabilidad o seguridad**. Este índice está asociado a la probabilidad de falla P_f mediante la expresión aproximada propuesta por ESTEVA:

$$P_f = 460 \cdot e^{-4,3\beta} \quad (\text{para } 2 < \beta < 6) \quad (3)$$

La utilización de la P_f como parámetro tiene el inconveniente que cuanto mayor es la seguridad menor es P_f y viceversa y además P_f toma valores muy pequeños para los niveles de seguridad habituales. En cambio β es creciente con la confiabilidad del elemento estructural.

Si se conociera la distribución real de $\text{Ln}\left(\frac{R}{Q}\right)$ y se acordara un valor razonable de la probabilidad de alcanzar un estado límite, se podría establecer un criterio de cálculo con base totalmente probabilística.

La forma de distribución de cada una de las muchas variables (materiales, hipótesis de cálculo, procesos constructivos, etc.) tienen influencia sobre la forma de distribución de $\text{Ln}\left(\frac{R}{Q}\right)$.

En general, **sólo pueden ser estimados los Valores Medios y las Desviaciones Estándar** de las variables involucradas en la composición de la resistencia y en los efectos de las cargas.

No obstante, esta información es suficiente para desarrollar un criterio de cálculo aproximado, independientemente de la "exactitud" con que se conoce la distribución de $\text{Ln}\left(\frac{R}{Q}\right)$.

En efecto, si escribimos la siguiente condición de cálculo:

$$\beta \sigma_{\text{Ln}\left(\frac{R}{Q}\right)} = \beta \sqrt{V_R^2 + V_Q^2} \approx \text{Ln}\left(\frac{R_m}{Q_m}\right) \quad (4)$$

podemos observar que la desviación estándar $\sigma_{\text{Ln}\left(\frac{R}{Q}\right)}$ ha sido puesta en función de los coeficientes de variación V_R y V_Q :

$$\sigma_{\text{Ln}\left(\frac{R}{Q}\right)} = \sqrt{V_R^2 + V_Q^2} \quad (5)$$

en las que:

$$V_R = \frac{\sigma_R}{R_m} \quad \text{y} \quad V_Q = \frac{\sigma_Q}{Q_m} \quad (6)$$

σ_R y σ_Q : son las **desviaciones estándar** de R y Q ;

R_m y Q_m : son los **valores medios** de R y Q ;

V_R y V_Q : son los **coeficientes de variación** R y Q .

Para un componente estructural dado y cargas usuales, los valores medios R_m y Q_m y los coeficientes de variación V_R y V_Q , pueden ser estimados, y de esta manera, reemplazando en la (4), obtendremos:

$$\beta = \frac{\text{Ln}\left(\frac{R_m}{Q_m}\right)}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}} \quad (7)$$

De esta manera es posible evaluar el índice de seguridad β a partir de valores que son relativamente simples de obtener.

b) **Calibración o ajuste del método**

Basándose en datos estadísticos, se evaluaron los valores de β implícitos en la ASD-AISC Specification de 1978, para diferentes combinaciones de cargas y componentes típicos. Se encontró en los valores de β , así determinados, una considerable variación y una cierta tendencia. Por ejemplo:

Para vigas típicas $\beta \approx 3$

Para uniones comunes $\beta \approx 4$ a 5

Para combinaciones que incluyen W y E , β tendía a valores menores.

Una de las características del método probabilístico utilizado en el desarrollo de la LRFD es que, seleccionando diversos factores de carga γ y de resistencia ϕ , las variaciones de β pueden ser reducidas a valores específicos predeterminados. Para la LRFD fueron seleccionados los siguientes valores de :

- | | |
|------------------|---|
| 1) $D+L$ y/o S | $\beta = 3$ para barras
$\beta = 4,5$ para uniones |
| 2) $D+L + W$ | $\beta = 2,5$ para barras |
| 3) $D+L + E$ | $\beta = 1,75$ para barras |

En las cuales el valor mayor de $\beta = 4,5$ para uniones refleja el hecho de que se espera que las uniones sean más fuertes que las barras que vinculan. Los menores valores de β para las combinaciones que incluyen W y E son coherentes con la Especificación del AISC de 1978.

Basándose en estos valores de β se obtuvieron factores de carga γ_i y de resistencia ϕ para la LRFD mediante las siguientes expresiones:

$$\phi = \left(\frac{R_m}{R_n} \right) e^{(-0.55\beta V_R)} \quad (8)$$

$$\gamma_i = 1 + 0.55\beta V_{Q_i} \quad (9)$$

en las que:

- V_{Q_i} : es el **coeficiente de variación de la carga**;
- R_m : es la **resistencia media** obtenida de ensayos;
- R_n : es la **resistencia nominal** obtenida de LRFD;
- V_R : es el **coeficiente de variación de la resistencia**.

De esta manera los factores de carga γ y resistencia ϕ , quedan asociados a las **incertidumbres** de las cargas y de las resistencias.

FACTORES DE CARGA γ_i

Desarrollando el primer miembro de la (2) y de acuerdo a la LRFD, $\sum \gamma_i Q_i$ es el efecto máximo (en valor absoluto) de las combinaciones siguientes:

- 1) $1,4 D$
- 2) $1,2 D + 1,6 L + 0,5 (L_r \text{ ó } S \text{ ó } R)$
- 3) $1,2 D + 1,6 (L_r \text{ ó } S \text{ ó } R) + (0,5 L \text{ ó } 0,8 W)$
- 4) $1,2 D + 1,3 W + 0,5 L + 0,5 (L_r \text{ ó } S \text{ ó } R)$
- 5) $1,2 D + 1,5 E + (0,5 L \text{ ó } 0,2 S)$
- 6) $0,9 D - (1,3 W \text{ ó } 1,5 E)$

Los efectos D , L , L_r , etc. ya han sido definidos antes. Los valores de las intensidades de las cargas deben adoptarse de los Códigos vigentes (CIRSOC, ANSI, etc.). El factor de carga γ_i correspondiente a L en las ecuaciones (3), (4) y (5) **debe tomarse igual a 1** en garages, áreas destinadas a reuniones publicas y en toda área donde $L \geq 4,9 \text{ kNm}^{-2}$.

Como en el contenido de la LRFD está enfatizada la seguridad de las estructuras, se incluyen en la misma, las combinaciones 1) a 6) que permiten calcular las **resistencias requeridas** $\sum \gamma_i Q_i$ que deberán ser comparadas con los **estados límites últimos** o **resistencias de cálculo** (R_n) obtenidos también de la LRFD.

Los factores de carga γ_i de la LRFD están basados en valores estadísticos de cargas y son los mismos que los recomendados por el ANSI. **Los factores de carga γ_i son independientes del material utilizado para construir la estructura.**

Los factores de carga γ_i de la AISC-ANSI reconocen que cuando actúan distintas cargas (en una combinación) **una sola** alcanza el **valor máximo** correspondiente a la vida útil de la estructura (acción de base), mientras que **las otras** cargas (acciones de acompañamiento) se encuentran en **valores arbitrarios** con los que actúan sobre la estructura en cualquier momento, **todas con igual probabilidad de ocurrencia simultánea**. Las combinaciones de cargas indicadas de 1) a 6), modelan, cada una, la condición de carga de cálculo cuando una carga particular se encuentra en su valor máximo (acción de base), así tendremos para cada caso:

COMBINACION DE CARGA	CARGA MAXIMA (ACCION DE BASE DENTRO DEL PERIODO DE VIDA (50 AÑOS))
1	D
2	L
3	L_r ó S ó R
4	W (Actuando en la dirección de D)
5	E (Actuando en la dirección de D)
6	W ó E (Opuestas a D)

Mientras que las otras cargas (acciones acompañantes) tienen valores medios considerablemente menores a los máximos correspondientes a la vida útil. Para alcanzar una confiabilidad uniforme cada carga factoreada (ya sea de base o acompañamiento) es mayor que su valor medio en una cantidad que depende de su variabilidad.

FACTORES DE RESISTENCIA

Los **factores de resistencia** ϕ de la AISC están basados en las recomendaciones que resultan de las investigaciones realizadas y publicadas por la Washington University (St. Louis) y revisadas por el comité asesor de la AISC.

Los **factores de resistencia** son menores que la unidad y tienen en cuenta:

- La variación en la resistencia del material F_y y en el módulo de elasticidad E .
- Las incertidumbres relacionadas con la fabricación incluyendo las variaciones en las propiedades geométricas producidas por el laminado, tolerancias de fabricación y soldadura, distorsiones iniciales, variaciones producidas en el montaje, etc.
Las variaciones son las diferencias existentes e inevitables entre el componente ideal calculado y el mismo después del montaje.
- Las incertidumbres en las hipótesis utilizadas al determinar las resistencias a partir de los modelos de cálculo. Estas incertidumbres pueden ser el resultado del uso de aproximaciones en lugar de fórmulas teóricas exactas y de hipótesis tales como elasticidad perfecta, plasticidad perfecta, homogeneidad, teoría de flexión de vigas en lugar de teoría de la elasticidad, etc.

Para determinar la variabilidad de cada resistencia se realizaron numerosos ensayos de los que se analizaron gran cantidad de datos obtenidos.

Para obtener una confiabilidad uniforme, cuanto mayor es la dispersión de los datos de una resistencia dada, menor será el factor ϕ .

Los siguientes son algunos de los factores representativos de la LRFD, para miembros estructurales:

$\phi = 0,90$ para fluencia en tracción

$\phi = 0,75$ para rotura en tracción

$\phi = 0,85$ para compresión

$\phi = 0,90$ para flexión

$\phi = 0,90$ para fluencia por corte.

En la **LRFD Specification** se dan también factores de resistencia para otros miembros y medios de unión.