

## ACCIONES SOBRE LAS ESTRUCTURAS

### Generalidades

Las estructuras resistentes, durante su vida útil, están generalmente sometidas a diversas acciones (*causas*) originadas por la propia naturaleza y por la interacción de aquellas con las actividades del hombre.

Las acciones que nos interesan particularmente son las originadas, en el *orden Natural*, por:

- La acción de la gravedad o fuerzas gravitatorias.
- La acción del viento.
- La nieve.
- Las acciones sísmicas o terremotos.
- La presión de las aguas.
- Las variaciones de temperatura.
- El empuje de los suelos, etc.

Las acciones que dependen de la actividad del hombre, son:

- El depósito de mercaderías.
- La concentración de personas.
- Máquinas y vehículos en reposo o en movimiento, etc.

Los efectos de estas acciones sobre una estructura en particular, determinan la necesidad del estudio y verificación de las condiciones de:

- Resistencia,
- Estabilidad,
- Deformabilidad,

que la estructura debe satisfacer, bajo la acción de las causas que sobre ella actúan.

Dichas condiciones se establecen a través de *especificaciones mínimas de cálculo* y que en el caso de no ser satisfechas, pueden determinar que la estructura quede *fuera de servicio*. Es así que podemos establecer, que una estructura ha quedado fuera de servicio, si:

Ha superado su resistencia (determinada por un estado límite último, real o convencional: límite elástico, plástico, etc.).

Por pérdida de su estabilidad (total, local o parcial, por vuelco, por inestabilidad del equilibrio, etc.).

Por adquirir deformaciones inaceptables (si supera un estado límite de servicio se pueden introducir problemas de vibraciones, de discomfort a los usuarios, etc.).

Estos requerimientos establecen, a su vez, la necesidad de conocer la intensidad (amplitud frecuencia, ubicación, superposición, etc.) de todas esas acciones, para poder diseñar y calcular estructuras que satisfagan esos requisitos mínimos mencionados, *prescriptos* en general, *reglamentariamente*.

## Clasificación de las Acciones

Las acciones que deben ser tenidas en cuenta en el cálculo de una estructura, están establecidas en los distintos reglamentos complementarios de las especificaciones de cálculo de las estructuras de acero, hormigón, de madera, etc.

No obstante, para comprender el modo en que dichas cargas se establecen (en intensidad, frecuencia, etc.), haremos algunas consideraciones que conducen a la determinación de sus valores representativos y a las formas en que los mismos deben ser combinados.

1) A tal efecto, realizaremos una primera clasificación de las acciones, teniendo como variable, el factor tiempo:

Desde el punto de vista de la **velocidad de aplicación de las cargas**, es decir, teniendo en cuenta el tiempo en que las mismas demoran en alcanzar su valor máximo, pueden ser clasificadas en cargas:

**Estáticas:** Cargas de lenta aplicación ( Son, en general, las que actúan en los edificios comunes de oficinas y viviendas).

**Dinámicas:** Cargas aplicadas en tiempos muy breves ( Acciones sísmicas, la acción del viento en determinadas circunstancias, vehículos, etc.)

Desde el punto de vista del **tiempo en que permanecen aplicadas**, pueden clasificarse en:

**Permanentes:** Son las originadas, en general, por el peso propio de la estructura, los cerramientos, etc.

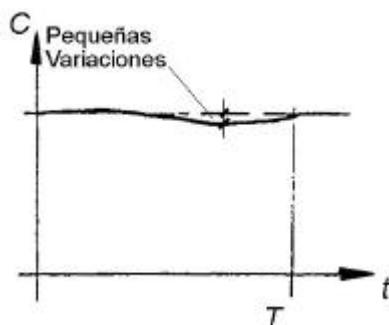
**Accidentales:** Son las cargas que actúan con cierta periodicidad como son las originadas por el viento, la nieve, el sismo, las variaciones de temperatura, etc.

Desde el punto de vista de la **variación de su intensidad y / o sentido en función del tiempo**, pueden ser:

**Fijas:** Permanecen prácticamente constantes a lo largo del tiempo

**Repetitivas:** Cargas de gran número de ciclos, determinantes en general del fenómeno de fatiga.

2) Podemos intentar otra clasificación de las acciones desde el punto de *vista probabilístico*:

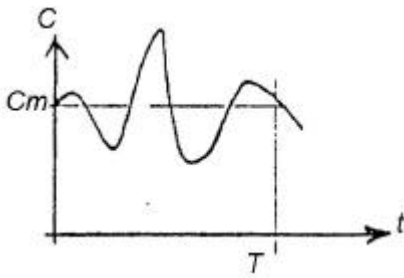


**Acciones Permanentes:** son acciones que tienen pequeñas variaciones, respecto de su valor medio e infrecuentes, con tiempo de acción prolongado.

- .Peso propio
- .Deformaciones impuestas por el proceso constructivo
- .Retracciones de soldadura.

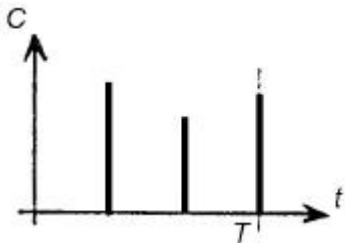
.c: es el valor característico de diseño o valor medio.

**Acciones Variables:** son acciones que tienen elevada "probabilidad" de actuación, variaciones frecuentes y continuas no despreciables en relación a su valor medio,



Cargas útiles o sobrecargas (ocupación y uso)  
Viento  
Nieve  
Acciones dinámicas (de máquinas y equipos)  
Sismo, etc.

**Acciones Accidentales:** son acciones de poca probabilidad de actuación, pero de valor significativo.



.Impacto de vehículos  
.Explosiones, etc.

Como quedó expresado al principio, estas cargas son, en general, un dato del problema, un dato para el cálculo de nuestra estructura y están de acuerdo a su destino, ubicación, geometría, etc.

En los reglamentos dedicados al capítulo de las cargas, se dan los datos de las cargas permanentes y de las sobrecargas útiles *en función del destino del edificio*. También se incluyen, en los mismos reglamentos, información sobre las acciones de viento, nieve y hielo, acciones sísmicas, etc. *de acuerdo a la ubicación de la construcción*, para lo cual, el país está subdividido en regiones, a las que se les asigna valores característicos de tales acciones, conforme a datos estadísticos de registros históricos realizados en cada lugar.

Todos los países tienen organismos encargados de elaborar los Reglamentos correspondientes a las Acciones y al Cálculo de las estructuras. Para poner esos reglamentos en vigencia, los mismos deben ser aprobados previamente por los organismos municipales, provinciales y nacionales correspondientes.

En nuestro país, el organismo elaborador de reglamentos para las construcciones civiles es el *Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles CIRSOC* ) que pertenece al sistema del *Instituto Nacional de Tecnología Industrial* ( INTI ).

Por ejemplo, el Reglamento CIRSOC 301 ( *Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Acero para Edificios* ), en su Capítulo 3, Art. 3.1 indica las *Acciones a considerar sobre las Estructuras* y las clasifica, para su aplicación y combinación, en *Acciones Principales (P)* y *Acciones Secundarias (S)*:

### **Acciones Principales (P)**

- .Acciones Permanentes
- .Acciones debidas a la ocupación y al uso.
- .Acciones debidas al viento Acciones originadas por la nieve.
- .Acciones sísmicas

.Acciones originadas por máquinas, equipos y vehículos

### **Acciones Secundarias (S)**

.Acciones del viento para ciertas condiciones particulares de exposición a la acción del viento.

.Acciones de la nieve para ciertas condiciones determinadas por la ubicación y número de plantas.

.Acción del hielo

.Acciones sísmicas en la zona 0. .Acciones térmicas .

.Acciones debidas al montaje, reparación o traslado.

Las intensidades de estas acciones y los modos de aplicarlas se indican en los Reglamentos complementarios correspondientes:

CIRSOC 101: *Cargas y Sobrecargas Gravitatorias para el Cálculo de las Estructuras de Edificios.*

CIRSOC 102: *Acción del Viento sobre las Construcciones* y su Recomendación 102-1: *Acción dinámica del Viento sobre las Construcciones.*

CIRSOC 103: *Normas Argentinas para Construcciones Sismorresistentes.* ( Partes I, II y III

CIRSOC 104: *Acción de la Nieve y del Hielo sobre las Construcciones.*

La norma alemana DIN 1050 (ver *Stahl im Hochbau* - El Acero en la Construcción, página 613) en su Art. 4.1 *Hipótesis de Carga*, clasifica las cargas en *Principales (H)* y *Secundarias (Z)*:

### **Cargas Principales (H)**

Carga Permanente

Sobrecarga ( incluso nieve sin viento)

Fuerzas libres ejercidas por las masas de las máquinas

### **Cargas Secundarias (Z)**

Carga de Viento

Fuerzas de Frenado

Fuerzas laterales horizontales

Efectos Térmicos

En Estados Unidos de América el ente regulador de las acciones sobre edificios, es el *American National Standards Institute ( ANSI )* con su código *American National Standards Minimum Design Loads for Buildings and other Structures - ANSI A58-1.*

## **Combinación o Superposición de Acciones**

Todos los reglamentos nacionales e internacionales, como los mencionados, establecen que las acciones consideradas individualmente, deben ser superpuestas, de manera de obtener en la estructura en su conjunto o en un miembro en particular, las condiciones más desfavorables de cargas determinantes del estado límite correspondiente al elemento estructuras analizado.

En el caso del Reglamento CIRSOC 301, en su artículo 3.2 de la *Superposición de las Acciones*, se establecen las siguientes combinaciones de acciones:

**Estado de carga P:** Superposición de acciones principales.

**Estado de carga P+S:** Superposición de acciones principales y secundarias,

Este reglamento considera también la posibilidad de una *Combinación Probabilística* de las acciones.

La norma DIN 1050, ya mencionada, establece también dos estados de carga combinados, con un criterio similar al adoptado por el CIRSOC:

**Estado de carga H:** Superposición de las cargas principales.

**Estado de carga HZ (H+Z):** Superposición de cargas principales y secundarias.

Las normas americanas ANSI A58-1 establecen las siguientes combinaciones de cargas para el caso en que se apliquen criterios de dimensionamiento basados en tensiones admisibles:

Para **Cubiertas:**

Cargas Permanentes ( DL ) + Nieve ( S )  
0.75 [ Cargas Permanentes DL + Viento W ]  
0.75 [ Cargas Permanentes DL + Viento W + Nieve ( S ) ]  
0.75 [ Cargas Permanentes DL + Viento W + Nieve Parcial ( S ) ]

Para **Pórticos Múltiples:**

Cargas Permanentes ( DL ) + Sobrecargas ( LL )  
0.75 [ Cargas Permanentes ( DL ) + Sobrecargas ( LL ) + Viento ( W ), Sismo (E)]

Naturalmente todas estas combinaciones deben ser aplicadas criteriosamente. Por ejemplo, cuando la acción de] viento sobre una cubierta, es de succión, esta acción no debe ser combinada con la acción de las sobrecargas accidentales o útiles, de origen gravitatorio, ya que ambas producen efectos contrarios como en el caso, por ejemplo, de los cordones superior e inferior de una cercha o viga reticulada.

También debe destacarse, que en el caso especial de cubiertas, las misma deben cargarse con estados asimétricos de carga, sobrecargas accidentales y nieve, para obtener las sollicitaciones más desfavorables en algunos miembros que constituyen los cordones y barras de alma de una cercha.

### **Consideraciones sobre la Seguridad de las Estructuras**

El objeto de una teoría de estructuras es *predecir*, con la mayor exactitud y seguridad posibles, el comportamiento estructura] como una combinación de los factores que se describen a continuación y que tendrán una influencia decisiva sobre la calidad y seguridad de la estructura como producto terminado:

**Factores Reglamentarios:** Cargas: Valores y combinaciones.

Acciones Especiales:

Dinámicas.  
Repetitivas.  
Vibraciones.

Variaciones de temperatura.

Atendiendo estos *factores reglamentarios y de funcionalidad* (o de servicio) el ingeniero comienza a diseñar su estructura, teniendo en cuenta los:

**Factores de Diseño:**

Esquema estructural: su geometría, hipótesis, etc.  
Cálculo estático.  
Dimensionamiento.  
Uniones: de los elementos estructurales entre sí.  
de la estructura con la tierra.

Ahora la estructura está proyectada, pero sólo en los papeles, pasamos luego a la construcción, a su realización y nos encontramos con los:

**Factores constructivos:**

Materiales: Acero, hormigón, madera, etc.  
Métodos constructivos: Sistematización, mano de obra, etc.  
Suelos-Fundaciones: Interacción.

Tenemos la estructura construida, pero en todas estas etapas de desarrollo, marcadas por la presencia de los factores mencionados, nos ha acompañado permanentemente la **"incertidumbre"** sobre *los datos utilizados* (de las resistencias adoptadas, de las cargas, etc.) y sobre *las operaciones con ellos realizadas* (modelización, procedimientos de cálculo, idoneidad profesional en el cálculo y en la conducción de la obra, etc.) y cuyo origen reconoce dos fuentes diferentes:

- 1) La **dispersión** (como magnitud estadística) de los valores, datos y procedimientos aplicados, *inherente* a cualquier magnitud del mundo físico.
- 2) La **ignorancia** sobre las verdaderas leyes ( *inalcanzables* ) que vinculan dichas magnitudes.

En general habrá diferencia, por la *dispersión* de los datos, entre *las cargas de cálculo y las cargas reales*, habrá diferencia entre las cargas dinámicas obtenidas mediante coeficientes de impacto dados por los reglamentos y las verdaderas fuerzas ejercidas por las máquinas. Habrá diferencia, por *ignorancia*, entre *la estructura real y el esquema estructural adoptado* para su tratamiento matemático (métodos de análisis estructural); **las hipótesis de cálculo son sólo una aproximación de nuestros conocimientos al mundo real de las estructuras.**

Como ejemplos de estos inevitables desajustes entre realidad y, modelo pueden mencionarse: las *excentricidades inevitables* en la aplicación de los esfuerzos en las barras comprimidas, la imposibilidad de lograr empotramientos perfectos en las uniones a momento en sistemas aporticados, la respuesta elasto-plástica de un suelo que debilita la hipótesis de empotramiento perfecto de una base, etc.

Esta suma de incertidumbres nos lleva a admitir y en definitiva a aceptar, que en una estructura construida *existe inevitablemente* un determinado *riesgo* (contingencia de un daño) que podremos medir mediante una *probabilidad de falla*.

Para reducir esta probabilidad de falla, o dicho de otro modo, para cubrir o disminuir la diferencia entre *lo inevitable de una estructura pensada, diseñada y ejecutada y la estructura real* debemos introducir un *coeficiente de seguridad*, cuyo efecto en primera instancia será magnificar el valor de las acciones o bien disminuir las resistencias nominales de comparación.

## Coeficiente de Seguridad

Es posible analizar el coeficiente de seguridad, como minorador de las resistencias nominales, desde distintos puntos de vista:

El llamado *Criterio Clásico o Determinista*.

*Un Criterio Semi-probabilístico* (reciente).

*Un Criterio Moderno o Probabilístico* (aun *parcialmente* probabilístico)

En todos los casos el coeficiente de seguridad resulta igual a:

$$g = \frac{R}{S}$$

en la que  $g$  es el coeficiente de seguridad,

$R$ : es la *Resistencia Nominal*, o sea, es el valor que toma una magnitud (o la función de un conjunto de magnitudes) cuando se produce un *estado límite*.

$S$ : es la *Solicitación*, o sea, es el valor que alcanza la misma magnitud anterior o función, cuando sobre el sistema actúa una determinada acción.

1) Según el *criterio determinista* el valor de  $v$  se fijaba de manera cualitativa y en general contemplaba aspectos, más relacionados con la ignorancia, que con la incertidumbre. Suponiendo, por ejemplo, que  $R$  es la tensión de fluencia ( $s_f$ ) de un acero y  $S$  la tensión de trabajo ( $s$ ) producida por las cargas en una fibra determinada, el coeficiente de seguridad para esa fibra es:

$$\frac{R}{S} = \frac{s_f}{s} \geq g$$

En este criterio,  $g$  es un valor fijado en forma arbitraria y subjetiva. De la expresión anterior, se obtiene:

$$s = \frac{s_f}{g} = s_{adm}$$

Aparece así el concepto de *tensión admisible* ( $\sigma_{adm}$ ) como estado límite.

2) En el *criterio semi-probabilista* se tiene en cuenta la clasificación de las cargas (Principales y Secundarias) y sus combinaciones (Estados P, H, P + S, HZ, etc.) y permite, por ese motivo, una reducción de] coeficiente de seguridad en el caso de las combinaciones (P + S), de las cargas principales (P) más las cargas secundarias (S). De esta manera, en este criterio, existen dos o más coeficientes de seguridad aplicables a las distintas combinaciones de cargas

Así, por ejemplo, la norma DIN 1050 considera los coeficientes de seguridad:

$g = 1.71$	para el Estado H	Caso normal
$g = 1.50$	para el Estado H para el Estado HZ	Caso normal (Caso excepcional)
$g = 1.33$	para el Estado H-Z	(Caso excepcional)

es decir, toma en cuenta el hecho de que hay combinaciones de carga (caso normal) más probables que otras (caso excepcional) y considera además, el tipo de solicitación. (Ver Tabla 3 de la DIN 1050 de "Tensiones admisibles", del Manual Acero en la Construcción).

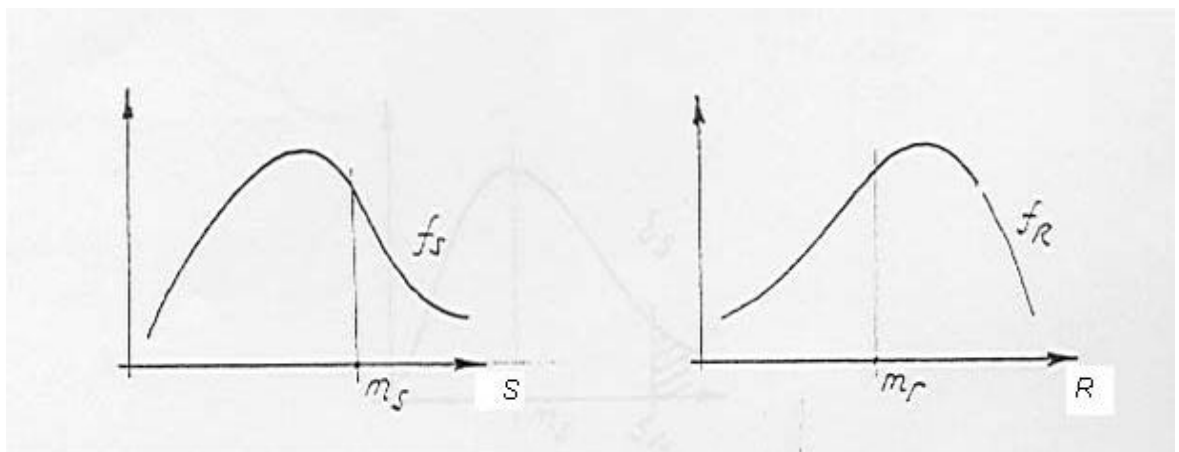
En nuestro país, la Norma CIRSOC 301-Tabla 6, procede de manera similar haciendo depender el coeficiente de seguridad  $g$  del "caso de carga" y de la "clase del destino" de la estructura resistente. Introduce también el concepto de "clase de recaudo constructivo" que tiene en cuenta aspectos relativos al cálculo (hipótesis, simplificaciones, modelizaciones, excentricidades, simetría de cargas, etc.) y a la construcción, fabricación y montaje de la estructura (con personal y equipo calificado o no, etc.).

El "caso de carga" tiene en cuenta el tipo de combinación que se analiza: Acciones Principales o Principales + Secundarias.

La "clase de destino" tiene en cuenta aspectos relativos al costo, a la seguridad nacional, a la función, al riesgo de vidas humanas, etc.

El criterio probabilista introduce el concepto de probabilidad de falla de un sistema a partir del hecho de que la resistencia  $R$  y la solicitación  $S$  son de carácter *no-determinístico o aleatorio*.

En este caso tanto  $R$  como  $S$  tendrán una distribución aleatorio y estarán representadas mediante funciones de densidad:



Para cada una de ellas podemos definir:

$f_s(s)$ : Función densidad

$F_s(s)$ : Función de distribución

$m_s$ : media

$s_s$ : desvío estándar

$d_s = \frac{s_s}{m_s}$  coeficiente de variación de  $S$

en las que:

$$m_s = \frac{\sum S_i}{n_s}$$

$f_r(r)$ : Función densidad

$F_r(r)$ : Función de distribución

$m_r$ : media

$s_r$ : desvío estándar

$d_r = \frac{s_r}{m_r}$  coeficiente de variación de  $R$

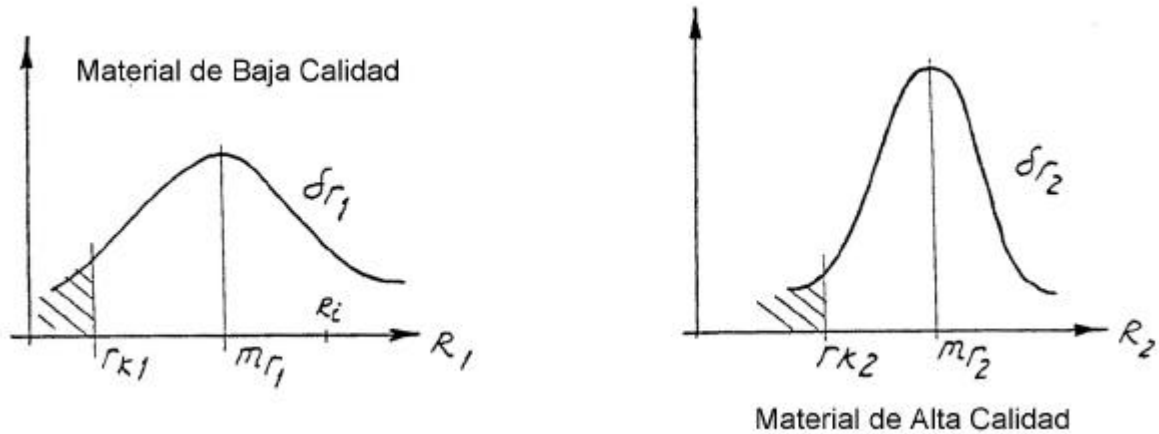
$$m_r = \frac{\sum R_i}{n_r}$$



$$y \quad s_s = \frac{\sum (S_i - m_s)^2}{n_s} \quad s_r = \frac{\sum (R_i - m_r)^2}{n_r}$$

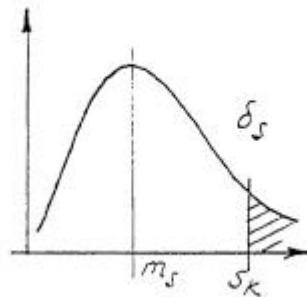
Los coeficientes de variación de la sollicitación  $d_s$  y de la resistencia  $d_r$  miden las incertidumbres con que ambas magnitudes son conocidas.

$$d_{r1} > d_{r2}$$

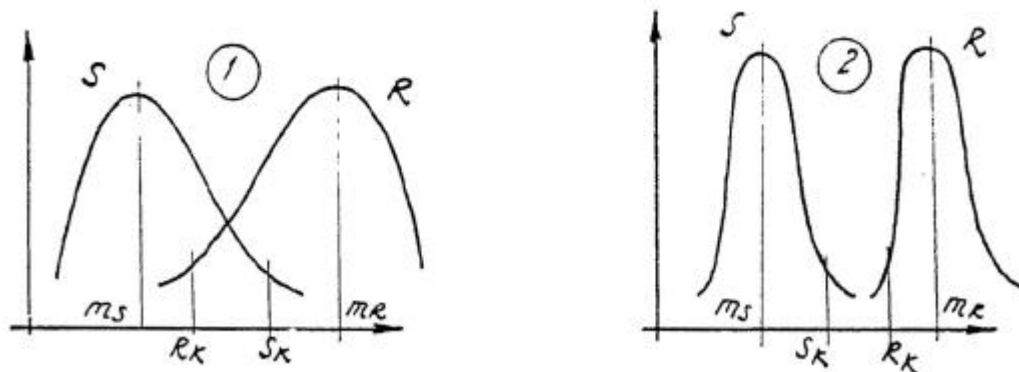


Definimos como resistencia característica  $R_k$  al fractil 0.05 de la distribución  $R$ . En las figuras anteriores resulta, que al tener un material de mejor calidad es:  $r_{k2} > r_{k1}$  y por lo tanto  $R_{k2} > R_{k1}$ .

De igual modo definimos la sollicitación característica  $S_k$ :



### Coeficiente de seguridad central y característico



En las cuales:

$$g_o = \frac{m_R}{m_S}$$

$$g_k = \frac{R_k}{S_k}$$

$$g_{o1} = g_{o2}$$

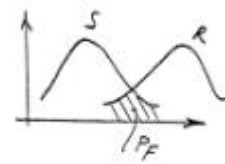
$$g_{k1} < g_{k2}$$

### Probabilidad de Falla

La probabilidad de falla es una medida absoluta de la seguridad de la sección:

$$P_F = \int_0^{\infty} [1 - F_R(x)] f_S(x) dx$$

$$P_F = \int_0^{\infty} F_R(x) f_S(x) dx$$



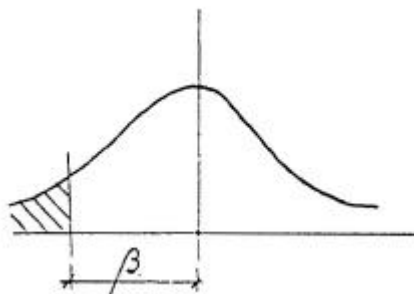
### Indice de Seguridad

Inconvenientes del uso de la probabilidad de falla  $P_F$

- 1) Cuanto menor es  $P_F$  mayor es la seguridad y viceversa.
- 2) Para niveles de seguridad usuales  $P_F$  toma valores muy pequeños.

Se recurre, entonces, al "*Indice de Seguridad b*" medido por la abscisa (en valor absoluto) de la función densidad normal de media cero y desvío 1, que deja a la izquierda un área igual a  $P_F$ .

$P_F$	$b$
0.50	0
$10^{-4}$	3.72
$10^{-5}$	4.26
$10^{-6}$	6.00
0	$\infty$



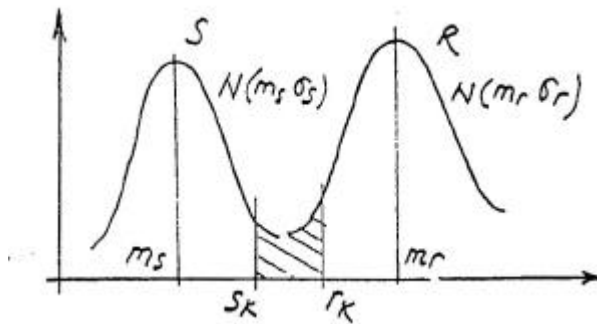
Luis Esteve propone:

$$P_F = 460 \cdot e^{-4,3 \cdot b}$$

(para  $2 < b < 6$ )

## Expresiones comunes en la práctica

1) Caso en que R y S son distribuciones normales



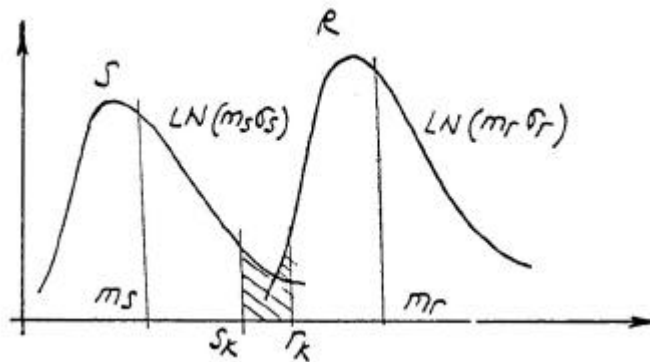
Resistencia Característica:  $r_k = m_R - 1.645 s_R$  ó  $r_k = m_R (1 - 1.645 d_R)$

Solicitación Característica:  $s_k = m_S + 1.645 s_S$  ó  $s_k = m_S (1 + 1.645 d_S)$

Coeficiente de Seguridad Característico:  $g_k = \frac{r_k}{s_k} = g_o \frac{1 - 1.645 d_R}{1 + 1.645 d_S}$

Índice de Seguridad:  $b = \frac{g_o - 1}{\sqrt{g_o^2 d_R^2 + d_S^2}}$

2) Caso en que R y S son distribuciones Log-normal

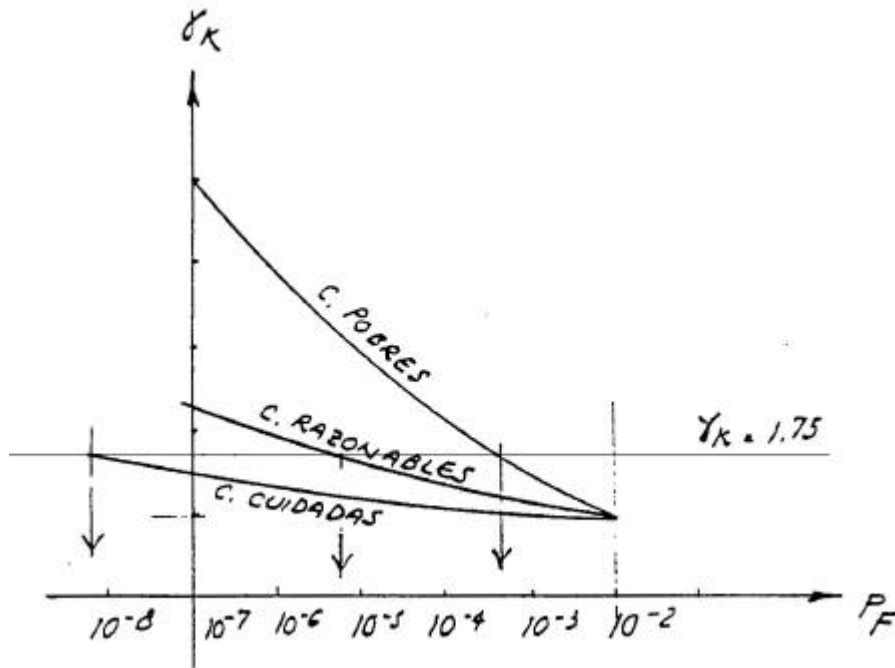


Resistencia Característica:  $r_k = \frac{m_R}{\sqrt{1 + d_R^2}} e^{-1.645 d_R}$

Solicitación Característica:  $s_k = \frac{m_S}{\sqrt{1 + d_S^2}} e^{-1.645 d_S}$

Coeficiente de Seguridad Característico:  $g_k = g_o e^{-1.645(d_R + d_S)}$

Índice de Seguridad:  $b = \frac{\ln g_o}{\sqrt{d_R^2 + d_S^2}}$



#### Valores típicos de probabilidades de acontecimientos

Terremoto destructivo:  $10^{-4}$  a  $10^{-6}$   
 Impacto de Aviones:  $10^{-6}$  a  $10^{-8}$   
 Impacto de vehículos:  $4 \times 10^{-5}$

#### Probabilidades de accidentes personales:

Accidente automovilístico:  $3 \times 10^{-4}$   
 Transporte por agua:  $9 \times 10^{-6}$   
 Transporte aéreo:  $9 \times 10^{-6}$   
 Transporte en tren:  $4 \times 10^{-6}$

#### Gráficos comparativos

Elaboración del Material	$d_M = 0.20$	$d_M = 0.10$	$d_M = 0.10$
Ejecución de la Obra	$d_E = 0.25$	$d_E = 0.12$	$d_E = 0.10$
Dimensionamiento	$d_D = 0.20$	$d_D = 0.10$	$d_D = 0.05$
Cargas	$d_C = 0.30$	$d_C = 0.15$	$d_C = 0.05$
Análisis Estructural	$d_A = 0.25$	$d_A = 0.15$	$d_A = 0.05$
	$d_R = 0.3775$	$d_R = 0.1844$	$d_R = 0.15$
	$d_S = 0.3905$	$d_S = 0.2121$	$d_S = 0.0707$

