

# REVISIÓN DE LOS CRITERIOS DE CONFIABILIDAD DEL CÓDIGO DE DISEÑO ESTRUCTURAL COMO ALTERNATIVA PARA LA COMPETITIVIDAD

Juan Pablo Espinosa Céspedes<sup>1</sup>

Mauricio Sánchez Silva<sup>2</sup>

## Resumen

*Los códigos modernos de diseño de elementos y sistemas estructurales utilizan factores parciales de carga y resistencia para garantizar la confiabilidad de la estructura. La definición de criterios de aceptabilidad del riesgo y la variabilidad de la resistencia y solicitación son los aspectos principales para la determinación de esos factores parciales. Este documento presenta un análisis del ahorro en costos que significa la modificación de los factores parciales establecidos por la NSR-98 manteniendo el mismo nivel de seguridad. Aunque los ahorros son sustanciales, es necesario considerar otros factores que participan en la optimización de costos de una construcción antes de tomar una decisión sobre la modificación de la normas.*

## Palabras claves

*factores parciales, confiabilidad estructural, infraestructura.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La respuesta de un sistema estructural ante cualquier solicitación depende del tipo y magnitud de las cargas aplicadas; y de características de la estructura como la rigidez y la resistencia. El comportamiento estructural se considera satisfactorio cuando la respuesta a una solicitación impuesta no viola ningún estado límite (ej.: servicio, último) que comprometa el cumplimiento de su función.

La modelación de las cargas durante la vida útil de una estructura es muy incierta dado que es difícil determinar con precisión su magnitud; y en algunos casos su localización y variación en el tiempo. Por ejemplo, para los sistemas constructivos utilizados en Colombia, los procesos de fabricación y control de calidad son deficientes, y en consecuencia existen variaciones significati-

vas entre los valores utilizados para el diseño y los medidos *in-situ*. La naturaleza aleatoria de estas variables hace necesaria la determinación probabilística de los factores parciales de carga y resistencia para garantizar la confiabilidad de la estructura.

En este artículo se discuten las implicaciones de los procedimientos existentes para calcular los *factores parciales*, o factores de carga y resistencia, en el diseño a flexión de vigas de concreto reforzado. La discusión plantea fundamentalmente la importancia de revisar los criterios de diseño establecidos por la Norma Sismo Resistente NSR-98 [3], de tal forma que se puedan buscar alternativas para la optimización en la construcción de una infraestructura más competitiva para el país.

<sup>1</sup> Estudiante Maestría, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes.

<sup>2</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes.

## 2. CÁLCULO DE LOS FACTORES PARCIALES

Los factores parciales se desarrollaron en los años sesenta como parte de los códigos de concreto reforzado. Los factores parciales tienen en cuenta la variabilidad e incertidumbre de los diferentes tipos de sollicitación (cargas vivas, cargas muertas, cargas de viento) y de la resistencia [1]. El formato de los factores parciales se define de la siguiente forma:

$$\phi_i R_i = \gamma_{L1} S_{L1} + \gamma_{L2} S_{L2} + \dots + \gamma_{Ln} S_{Ln} \quad (1)$$

Donde  $\phi_i$  es el factor de resistencia o factor de reducción de capacidad para  $R_i$  y  $\gamma_{L_i}$  es el factor de carga para la sollicitación  $L_i$  (ej.: carga viva, carga muerta)

El cálculo de los factores parciales requiere la definición de un nivel de riesgo aceptable (sección 3). Para el cálculo de los factores parciales, la aceptabilidad del riesgo se tiene en cuenta a través del *índice de confiabilidad*  $\beta$ , el cual está determinado por la variabilidad de la resistencia y la sollicitación. El procedimiento utilizado para calcular los factores parciales se conoce como método probabilístico de segundo momento (SORM) ya que considera los dos primeros momentos (media y varianza) de las distribuciones de probabilidad de la resistencia y la sollicitación.

### 2.1 FACTOR DE REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA

Dentro del formato de factores parciales, el factor de reducción de la resistencia no utiliza factores específicos para cada una de las variables que participan en el

cálculo de la resistencia. Por ejemplo, en la NSR-98 [3] el factor de reducción de la resistencia  $\phi$ , tiene un valor de 0.9 para elementos sometidos a flexión. El factor de reducción de la resistencia se calcula de la siguiente forma [1]:

$$\phi = \gamma_R e^{-\beta \alpha V_R} \quad (2)$$

Donde  $\beta$  es el índice de confiabilidad y  $\alpha$  la función de separación. Esta última es una corrección de las variabilidades de la resistencia y la sollicitación y toma valores entre 0.707 y 1.0. Para cocientes de variabilidad de la resistencia y la sollicitación que se encuentren entre 1/3 y 3,  $\alpha$  está entre 0.75±0.06. El parámetro  $\gamma_R$  es el cociente entre la resistencia media y la resistencia de diseño ( $\gamma_R = \bar{R} / R$ ). Para el caso de flexión,  $\gamma_R$  se calcula mediante la ecuación (3), en la cual  $R$  se evalúa utilizando

los valores especificados para el diseño y  $\bar{R}$  utilizando los valores medidos in-situ.

$$M_u = A_s f_y \left( d - \frac{A_s f_y}{2 \phi f'_c b} \right) / b \quad (3)$$

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los valores medios y las variabilidades de los principales parámetros que se utilizan en el cálculo de los factores parciales en Estados Unidos. Los factores parciales utilizados en la NSR-98 [3] utilizan información estadística obtenida para Estados Unidos porque en Colombia no existen valores confiables sobre el comportamiento de estas variables.

|  | ESPECIFICADO | MEDIA IN SITU | MED IN SITU/ESP<br>$\gamma$ | $\sigma$ | $V$   |
|--|--------------|---------------|-----------------------------|----------|-------|
| <i>Resistencia de los Materiales, M</i>          |              |               |                             |          |       |
| Resistencia del concreto (Kgf/cm <sup>2</sup> )  | 210          | 200           | 0.95                        | -        | 0.18  |
| Resistencia del acero (kgf/cm <sup>2</sup> )     | 4200         | 4339          | 1.033                       | -        | 0.07  |
| <i>Dimensiones, F</i>                            |              |               |                             |          |       |
| b (base)(cm.)                                    | 30           | 30            | 1.004                       | 0.75     | 0.025 |
| d (altura efectiva)(cm.)                         | 37           | 37            | 0.992                       | 0.925    | 0.025 |
| As (área de acero)(cm <sup>2</sup> )             | 20           | 20            | 1.0                         | -        | 0.06  |
| <i>Precisión de las ecuaciones del código, P</i> |              |               |                             |          |       |
| Mu-vigas simplemente reforzadas                  | -            | -             | 1.06                        | -        | 0.04  |
| <i>Cargas, S</i>                                 |              |               |                             |          |       |
| Carga muerta                                     | -            | -             | 1.0                         | -        | 0.07  |
| Máxima carga en el piso en 30 años               | -            | -             | 0.7                         | -        | 0.3   |
| <i>Análisis Estructural, E</i>                   |              |               |                             |          |       |
| Efectos de la carga muerta                       | -            | -             | 1.0                         | -        | 0.08  |
| Efectos de la carga viva                         | -            | -             | 1.0                         | -        | 0.2   |

Tabla 1. Variabilidad de los principales parámetros utilizados para el cálculo de factores parciales

## 2.2 Factores de mayoración de la carga

El factor de mayoración de cualquier tipo de carga  $i$ , (ej.: viva, muerta, etc.),  $\lambda_i$ , se calcula utilizando la siguiente ecuación [1]:

$$\lambda_i = \gamma_i e^{\beta \alpha^2 V_i} \quad (4)$$

Donde  $\gamma_i$  es el cociente entre el valor medio de la carga  $i$  el utilizado en el diseño;  $V_D$  y  $V_L$  corresponden a la variabilidad para la carga muerta y la carga viva respectivamente (Tabla 1). En la NSR-98 [3], para la combinación de carga viva y carga muerta únicamente, los factores  $\lambda_L$  y  $\lambda_D$ , tienen un valor de 1.4 y 1.7 respectivamente.

## 3. ACEPTABILIDAD DEL RIESGO

Los análisis de confiabilidad estructural se concentran en la evaluación de la probabilidad de violación de un estado límite. La violación de un estado límite está ligada a la aceptabilidad del riesgo, que es la medida en que los usuarios son tolerantes a un determinado nivel de pérdidas; usualmente especificado para un lapso de tiempo específico.

Existen dos alternativas para definir un nivel de aceptabilidad del riesgo: (1) utilizar evidencia experimental; o, (2) definir criterios de comparación. La primera alternativa consiste en seleccionar el índice de confiabilidad con base en evidencia histórica del comportamiento de elementos estructurales existentes. La segunda alternativa consiste en utilizar como referencia valores de riesgo relacionados con actividades cotidianas (ej: morir en un accidente de avión). En la Tabla 2 se muestra un estimativo de riesgos de muerte por año en actividades cotidianas [2]. Los valores presentados en la Tabla 2 varían de acuerdo con el país y la región. En Colombia no existen la mayoría de estos indicadores y claramente, algunos de ellos sobrepasan los valores mostrados (ej.: viajar en carro). El riesgo promedio de morir en un año, en un accidente de avión es del orden de  $24 \times 10^{-6}$ , viajando en automóvil  $200 \times 10^{-6}$ , y como resultado de una falla estructural es  $0.1 \times 10^{-6}$ . Es importante resaltar que las diferencias entre el riesgo de las actividades cotidianas y los riesgos relacionados con una falla estructural son significativas.

La aceptabilidad del riesgo se puede definir dentro de un rango en el cual el límite superior está definido por

| ACTIVIDAD                     | $\times 10^{-9}$ MUERTES / HORA<br>EXPUESTA | EXPOSICIÓN TÍPICA<br>(HORAS / AÑO) | RIESGO TÍPICO<br>DE MUERTE |
|-------------------------------|---|------------------------------------|----------------------------|
| Escalar                       | 30 000 - 40 000                             | 50                                 | 1500 - 2000                |
| Viajar en Bote                | 1500  | 80                                 | 120                        |
| Nadar                         | 3500  | 50                                 | 170                        |
| Fumar cigarrillo              | 2500  | 400                                | 1000                       |
| Viajar en avión               | 1200  | 20                                 | 24                         |
| Viajar en carro (UK)          | 700   | 300                                | 200                        |
| Viajar en tren (UK)           | 80  | 200                                | 15                         |
| Explotar minas de Carbón (UK) | 210   | 1500                               | 300                        |
| Trabajar en construcción      | 70-200                                      | 2200                               | 150-440                    |
| Trabajar en Manufacturas      | 20  | 2000                               | 40                         |
| Incendios en Edificios        | 1-3   | 8000                               | 8-24                       |
| Fallas Estructurales          | 0.02  | 6000                               | 0.1                        |

Tabla 2. Valores de riesgo asociados a actividades cotidianas (Allen 1978 y CRIA, 1977)

los riesgos que no son tolerables bajo ninguna circunstancia y el límite inferior por situaciones que no son preocupantes para ninguna persona en condiciones normales. El riesgo que se encuentra entre estos dos límites es lo que se considera un riesgo "razonable"[2]. Siguiendo estos criterios la clasificación de los niveles de aceptación del riesgo desarrollada por Rusch y Rackwitz (1972)

en términos de riesgos de accidentes por persona por año, es la siguiente: el riesgo aceptado por una persona atrevida corresponde a un evento con una probabilidad de ocurrencia de  $10^{-3}$  por año, mientras que para una persona cuidadosa este valor es de  $10^{-4}$  por año; y un riesgo inaceptable tiene una probabilidad de  $5 \times 10^{-5}$  por año.

Teniendo en cuenta que el usuario de un edificio considera el colapso estructural como un riesgo inaceptable, la probabilidad de falla de diseño debe ser del orden de  $5 \times 10^{-5}$  por año, lo que corresponde a una probabilidad de falla del orden de  $3 \times 10^{-4}$  para una vida útil de 30 años. En general la probabilidad de falla se puede estimar como  $pf \approx 10^{-\beta}$ ; esto quiere decir que el diseño debe realizarse para valores de  $\beta$  entre 3 y 4 (Ecuaciones 2 y 4).

#### 4. IMPORTANCIA DE LA VARIABILIDAD

Una característica fundamental en la determinación de los factores parciales es la variabilidad de la resistencia y la sollicitación. Aspectos tales como la calidad de los materiales, la confiabilidad de los diseños, el error que involucra la utilización de un modelo matemático específico y el error humano juegan un papel fundamental en la determinación de su variabilidad. La variabilidad es un factor fundamental en las ecuaciones 2 y 4 y en consecuencia es una de las características más importantes en la deducción de los factores parciales. La variabilidad  $V_p$  de los factores de carga o resistencia se puede despejar de las ecuaciones (2 y 4) como:

$$V_R = \frac{\ln \gamma_R - \ln \phi}{\alpha \beta} \quad (5)$$

$$V_{cv} = \frac{\ln \lambda_L - \ln \gamma_L}{\alpha^2 \beta} \quad (6)$$

$$V_{cm} = \frac{\ln \lambda_D - \ln \gamma_D}{\alpha^2 \beta} \quad (7)$$

Manteniendo constantes los factores de carga (carga muerta y carga viva) y resistencia exigidos por la NSR-98 [3]; y tomando  $\alpha=0.75$ ;  $\gamma_R = 1.071$ ,  $\gamma_L = 0.7$  y  $\gamma_D = 1$  se pueden obtener las curvas que se muestran en la Figura 1, para diferentes índices de confiabilidad  $\beta$ .

En la figura 1 se observa que la variabilidad de la resis-

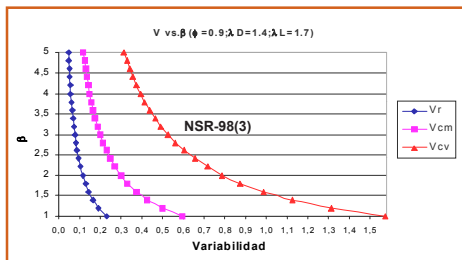


Figura 1. Índice de Confiabilidad vs. Variabilidad.

tencia es pequeña debido a que la incertidumbre asociada a la resistencia de los materiales es comúnmente baja. La variabilidad de la carga muerta, es mayor que la de la resistencia pero menor que la de la carga viva. Las diferencias encontradas entre los valores calculados y los valores encontrados in situ de la viga y los elementos estructurales son el resultado aspectos tales como los procesos constructivos y los errores humanos. La carga viva presenta grandes incertidumbres que dependen de la naturaleza aleatoria de las cargas temporales.

En la Figura 1 se puede observar que cuando la variabilidad aumenta, el índice de confiabilidad disminuye, en consecuencia la probabilidad de falla de la estructura aumenta. Esto muestra claramente que la variabilidad de la resistencia y de las cargas, es un aspecto fundamental en la determinación de la confiabilidad de la estructura. Una estructura diseñada bajo los criterios de la NSR-98 [3] y que se construya con bajos estándares de calidad (Variabilidad significativa) pueden conducir a probabilidades de falla muy altas. De forma contraria, un nivel de calidad exigente conduce a estructuras más confiables. Por lo tanto, el control tanto en los diseños como en los métodos constructivos es fundamental.

#### 5. SELECCIÓN DE LOS FACTORES PARCIALES

La adecuada selección de los factores parciales determina el costo de la estructura; y esto es particularmente importante para la competitividad de un país. A continuación se presenta a manera ilustrativa el caso de una viga empotrada en sus extremos (Figura 2). Para el cálculo de los factores parciales se utilizaron los valores de diseño especificados en la NSR-98[3] para la resistencia de los materiales, dimensiones de la viga y cargas; los valores in-situ de las variables principales se tomaron de la Tabla 1.

Para los valores de  $\gamma_R, \beta, \alpha, \gamma_D, \gamma_L$  que aparecen como constantes en la Figura 3, se realizó un análisis de sensibilidad de los factores de carga y resistencia (co-

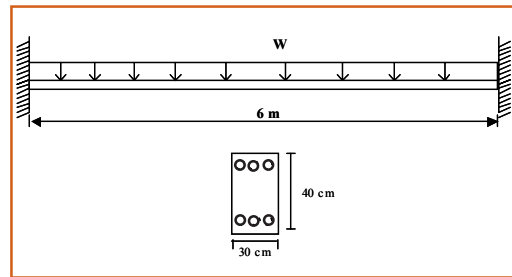


Figura 2. Viga empotrada

lumnas 2, 4 y 6), modificando las variabilidades dentro de los rangos indicados (columnas 1, 3 y 5). Los valores resaltados corresponden a los factores especificados por la norma NSR-98 [3].

Para los valores seleccionados en el recuadro se realizaron todas las combinaciones posibles entre los tres factores, y se diseñó la viga para cada combinación mante-

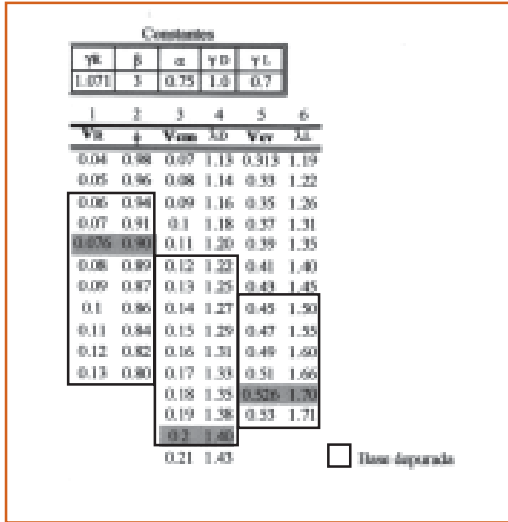


Figura 3. Cálculo de los factores parciales con la variación de las variabilidades.

niendo constantes sus dimensiones:  $L = 6$  m;  $b = 30$  cm;  $d = 35$  cm. Finalmente para cada una de estas vigas se calculó su costo.

Una vez calculado el costo de todas las vigas se determinó el porcentaje de ahorro de cada una con relación al

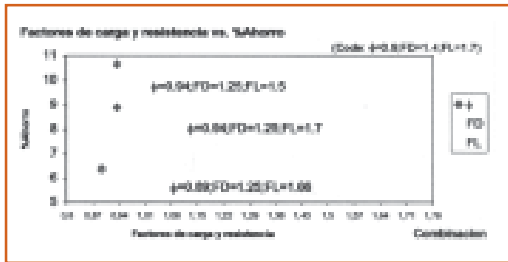


Figura 4. Porcentaje de ahorro con relación a la combinación de la norma NSR-98.

costo de la viga diseñada usando la combinación de factores estipulada por el código [3]. Los datos obtenidos de las distintas combinaciones se presentan en la Figura 4 de tal forma que una línea horizontal representa una combinación [4]. En la Figura 4, se presentan tres

combinaciones de factores parciales que muestran el porcentaje de ahorro contra los factores de carga y resistencia; y en la Figura 5 se presenta la totalidad de las combinaciones analizadas.

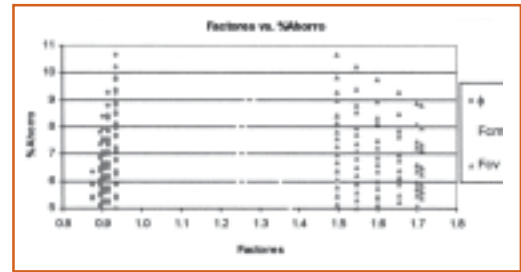


Figura 5. Resumen de todas las combinaciones posibles de factores parciales

Es claro que existe un gran número de combinaciones de factores de carga y resistencia que presentan un ahorro significativo en el costo de la viga, con relación a la combinación establecida por el código NSR-98 [3], y que proveen el mismo nivel de seguridad. Los ahorros encontrados varían entre el 5% y el 11%, y son ahorros de combinaciones razonables como es el caso de las combinaciones:  $0.9 R = 1.25$  CM +  $1.6$  CV que representa un ahorro del 7.74% y  $0.94 R = 1.25$  CM +  $1.7$  CV que representa un ahorro del 8.9%.

Es importante resaltar que estos ahorros corresponden al mismo valor de  $b$ , pero a diferentes niveles de variabilidad. La reducción de la variabilidad implica un aumento en el factor de reducción de la resistencia y una disminución en los factores de mayoración de la carga, por lo tanto, tiene como resultado un ahorro en los costos.

## 6. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas de esta investigación exploratoria son:

- El elemento principal en la determinación de los factores parciales de un código de diseño estructural es la definición de un nivel de aceptabilidad del riesgo. Su escogencia se materializa a través del índice de confiabilidad  $\beta$ . Mayores índices de confiabilidad conducen a menores valores de probabilidad de falla. El índice de confiabilidad  $\beta$  es inversamente proporcional al factor que modifica la resistencia y proporcional a los factores de mayoración de las cargas.
- Un aspecto determinante para la definición de los factores parciales es la diferencia que existe entre los valores medios encontrados *in situ* y los valores uti-

lizados para el diseño. La diferencia es el resultado, entre otros, de los métodos constructivos, de la calificación de la mano de obra, de la calidad de los equipos utilizados y de aspectos socioeconómicos y culturales. Puesto que la diferencia entre los valores de diseño y los medidos *in-situ* es directamente proporcional al valor de los factores parciales, la falta de un control de calidad conduce al diseño y construcción de edificaciones más costosas.

- Para edificaciones de vivienda, la importancia que tiene el factor de mayoración de la carga viva en los costos de la viga es mucho menor que la que tiene el factor de mayoración de la carga muerta. Esto se debe a que la carga muerta en las vigas es usualmente mucho más grande que la carga viva. Los resultados muestran que la reducción de los factores de mayoración de la carga viva y el incremento de los factores de carga muerta permitirían diseñar estructuras con el mismo nivel de confiabilidad pero más económicas.
- El futuro de los códigos de diseño está en el desarrollo de normas flexibles que permitan utilizar criterios diferenciales para el diseño y construcción de edifi-

caciones de acuerdo con los intereses del propietario y los usuarios. Esto permitiría utilizar diferentes niveles de confiabilidad para ser usados en países con diferentes entornos socioculturales. Adicionalmente, una estructura de código flexible permitiría acelerar el desarrollo de los países mediante la definición de políticas de renovación y construcción más dinámicas.

## 7. REFERENCIAS

1. MAC.GREGOR J.G. "*Safety and limit states design for reinforced concrete*". En Canadian Journal of Civil Engineering Vol 3,1976 pp484-511.
2. MELCHERS, Robert E. "*Structural Reliability Analysis and Prediction*". 1999.
3. NSR-98. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente.
4. ESPINOSA, Juan Pablo. "*Análisis de Probabilidad de Falla, Costo y Factores de Seguridad en Vigas*". Tesis Pregrado. Universidad de los Andes. Bogotá 2001