



CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CONFIABILIDAD β EN UNA VIGA POR LA VARIACIÓN DE RESISTENCIA DEL HORMIGÓN Y ACERO

Msc. Ing. Ronald Fernando Gonzales Soto
INGENIERO CIVIL

INTRODUCCIÓN

Casi todas las actividades de la vida se caracterizan por un cierto nivel de riesgo. Ejemplos de actividades de riesgo son casi todas las labores de ingeniería o simplemente montar en bicicleta o en coche, subir a un avión o vivir por debajo del nivel de estructuras, entre otras. En el ámbito de la ingeniería civil, el riesgo y la seguridad son conceptos clave que deben tenerse en cuenta explícitamente en el diseño y la gestión durante la elaboración, la ejecución y periodos de servicio. Los fallos de sistemas como edificios y otras infraestructuras tienen pocas probabilidades de producirse, pero pueden tener grandes consecuencias si estas llegaran a sufrir fallos.

Para determinar el grado de seguridad de una estructura o sistema, es necesario definir un nivel de riesgo aceptable, los ingenieros pueden desempeñar un papel importante en el debate y la toma de decisiones para tener estructuras confiables. Pueden aportar información sobre las probabilidades de fallo y las consecuencias (económicas, pérdida de vidas, etc.) de un sistema determinado y poner de relieve las compensaciones entre las inversiones en sistemas más seguros y la reducción del riesgo.

Hay que tener en cuenta los riesgos en las distintas fases de un proyecto: durante la construcción, el uso regular (servicio) y el desmantelamiento. Cada fase tiene un conjunto característico de riesgos. Por ejemplo, riesgos de lesiones entre los trabajadores y sobrecostos presupuestarios durante la fase de construcción, y pequeñas probabilidades de fallo durante la vida útil regular.

La Teoría de la Confiabilidad, aplicada inicialmente a procesos industriales de producción en serie, fue adaptada en 1960 al campo de la Ingeniería Estructural con objeto de elaborar métodos que permitiesen determinar los niveles de seguridad de los Sistemas Estructurales, en base a un tratamiento racional de las incertidumbres existentes en los mismos. Momento a partir del cual esta área de investigación ha experimentado un fuerte impulso, y las bases teóricas desarrolladas han pasado de ser un tema de investigación académica a un conjunto de metodologías con un amplio rango de aplicación práctica.

ANÁLISIS DETERMINÍSTICO Y PROBABILÍSTICO

Dentro de acercarnos al cálculo más cercano a la realidad de lo que sucede y puede suceder en las diferentes estructuras dentro de la ingeniería civil, nos familiarizamos con el uso de normativas para el diseño por que utilizamos los métodos determinísticos que tienen base en lo probabilístico, por otra parte ciertas susceptibilidades en el diseño o en la construcción puede llevar a errores o no considerar aspectos en el diseño que pueden cambiar o no realizar como se tenía especificado hay entra el análisis probabilístico. a continuación, algunas características de cada uno de los análisis y estas deben permanecer en equilibrio para tener una realidad más objetiva de lo que esta sucediendo.



Figura 1
Análisis determinístico vs probabilístico

Nota.- El grafico representa las diferencias de cada análisis y como este debe permanecer en equilibrio para una mejor comprensión del comportamiento de estructura, extraído de (Orta, 2019)

CÁLCULOS DE FIABILIDAD, CONCEPTOS BÁSICOS

La infraestructura que se diseña construye, opera y mantiene en cierto contexto tiene que ser confiable durante su ciclo de vida. El concepto de confiabilidad se asocia con la incertidumbre de que dicha infraestructura y que cumpla con el objetivo durante su ciclo de vida. En ingeniería estructural se aplica principalmente en la seguridad contra el colapso. El colapso ocurre cuando no hay equilibrio entre las fuerzas internas (resistentes) y las fuerzas externas (que actúan en la estructura).



Figura 2
Solicitaciones y resistencia de un sistema estructural
Nota.- La fiabilidad de un sistema puede evaluarse comparando dos magnitudes estocásticas: la resistencia R del sistema, por una parte, y la carga (o sollicitación) S , (Jonkman, 2017)

Cuando se habla de capacidad de carga o de respuesta, la geometría, y materiales de construcción de la estructura son fundamentales para estimar su resistencia. En la práctica, la determinación de la capacidad resistente, así como de las sollicitaciones o fuerzas actuantes, son problemas desafiantes. Esto se debe a que, para la toma de decisiones en la ingeniería, la información es normalmente incompleta, además de que la resistencia de una estructura y sus sollicitaciones pueden cambiar en el tiempo.

Para tomar en cuenta estas variaciones, tanto la resistencia como la demanda a que estará sujeta una estructura, se modelan a través de variables que, lejos de tomar valores puntuales, oscilan en un cierto rango. Estos valores son útiles para cuantificar la confiabilidad de los sistemas, que puede ser medida en términos de una probabilidad. Para ello, se tienen que definir dos conceptos, que a partir de ahora se asocian a las estructuras de interés:

R = Capacidad (Resistencia)

S = Demanda (Solicitaciones)

Mientras que la primera se refiere por ejemplo a la cortina de la presa, que es la encargada de resistir las fuerzas externas, la segunda está relacionada con los distintos fenómenos que actúan sobre ella (ejemplo: sismo, precipitación, empuje del embalse, empuje de azolves, oleaje, etc). Esto es, la capacidad está dada por la resistencia que tiene la estructura, mientras que la demanda se refiere a las fuerzas que actuarán sobre ella durante su vida útil. Así, ahora se discuten algunas cuestiones referentes al análisis de confiabilidad.

PROBABILIDAD DE FALLO

Esta función de densidad de probabilidad conjunta puede dibujarse mediante líneas de altitud en el espacio R, S . Ahora que la probabilidad de fallo de la estructura es igual al volumen de la función de densidad de probabilidad conjunta en la región insegura. la función de densidad de probabilidad conjunta en la región insegura.

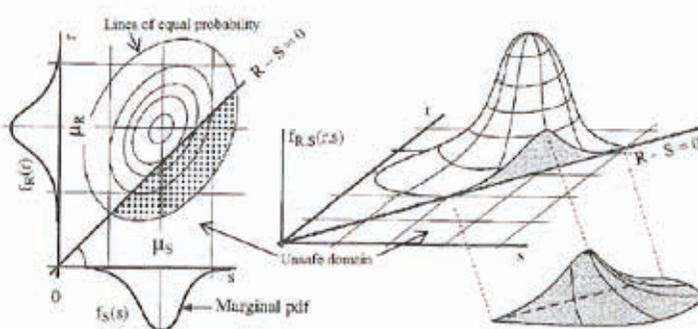


Figura 3
Probabilidad de fallo
Nota.- Diferentes normas mencionan valores objetivo para la probabilidad de fallo en función del periodo de referencia y de las consecuencias del fallo con respecto a vidas humanas y consideraciones económicas. (Jonkman, 2017)
La probabilidad de falla está estrechamente ligada al índice de confiabilidad, que es el parámetro más usado para medir el nivel de seguridad de un sistema (Sanchez Silva, 2015).

Este índice es usado en otras ramas de la ingeniería, como la ingeniería electrónica, en donde se construyen cientos de estructuras iguales, de las cuales un porcentaje muy pequeño presenta falla. Pero en la ingeniería civil no pasa eso, dado que solo se tiene una estructura (y no cientos de ellas), a la cual se le debe medir su seguridad ante eventos, como por ejemplo las cargas vivas o el sismo.

La teoría de confiabilidad es un método basado en la matemática estadística, donde las propiedades de los materiales y el proceso de carga –que varía con el tiempo y modelos inciertos– se pueden describir como variables aleatorias ajustadas a cualquier curva estadística.

El margen de seguridad o función de estado límite es la forma matemática de describir la relación entre la resistencia (R) y la sollicitación (S) en un sistema, o en este caso en una estructura. Tanto R como S pueden describirse por variables que pueden ser aleatorias o determinísticas, como por ejemplo $f'c$ y f_y , por el lado de la resistencia, y por el lado de la sollicitación las cargas de los camiones que pasan sobre el puente (representado por la letra P) o la carga muerta (representado por la letra D) (James, 2003).

ÍNDICE DE CONFIABILIDAD β

El índice de confiabilidad β es el parámetro más usado para medir el nivel de seguridad de un sistema. Cuando las variables tanto de resistencia (R) como de sollicitación (S) están distribuidas normalmente, el índice de confiabilidad se puede calcular como se muestra en la ecuación:

$$\beta = \frac{1}{Vg(R,S)} = \frac{\mu_Z(R,S)}{\sigma_Z(R,S)} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$\mu_Z(R,S)$: Valor medio del margen de seguridad

$\sigma_Z(R,S)$: Desviación estándar del margen de seguridad

$Vg(R,S)$: Coeficiente de variación del margen de seguridad

Por otra parte pueden ser calculados por las siguientes expresiones:

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \quad \text{Ec. 2}$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

μ_R : Valor medio de la resistencia (R)

μ_S : Valor medio de la sollicitación (S)

σ_R^2 : Desviación estándar al cuadrado de la resistencia (R)

σ_S^2 : Desviación estándar al cuadrado de la sollicitación (S)

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CONFIABILIDAD β

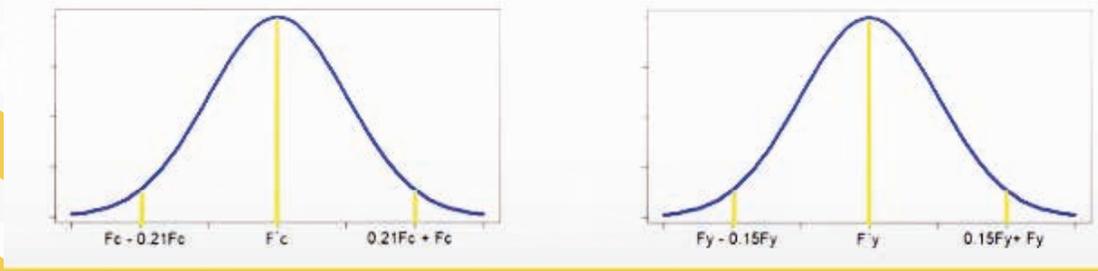
Para el siguiente cálculo se analizó una viga de sección rectangular de 45x25 cm y una luz de 7.50 metros, donde el coeficiente de variabilidad de los materiales es un cálculo estadístico de cómo podría variar estos materiales con relación a las diferentes etapas de construcción de la viga de hormigón armado.

Tabla 1.

MATERIAL	RESISTENCIA (Mpa)	COEFICIENTE DE VARIABILIDAD
CONCRETO	21	0,21
ACERO	420	0,15

Coeficiente de variabilidad
Fuente: elaboración propia
Realizamos las siguientes simulaciones de las variables que componen el material en función a combinaciones:

Figura 4.
Curvas de variabilidad de $f'c$ y f_y



Fuente: elaboración propia

Combinaciones de variables:

Simulación 1 (A1) = $(0.21f'c + f'c) + (0.15fy + fy)$

Simulación 2 (A2) = $(0.21f'c + f'c) + (0.15fy - fy)$

Simulación 3 (A3) = $(0.21f'c - f'c) + (0.15fy + fy)$

Simulación 4 (A4) = $(0.21f'c - f'c) + (0.15fy - fy)$

De las cuatro simulaciones obtenemos los valores de las variables de estudio:

Tabla 2.
Simulaciones de variación de $f'c$ y f_y

SIMULACIONES	$f'c$ PROBABLE DEL CONCRETO	f_y PROBABLE DEL ACERO
A1	25,41	483
A2	25,41	357
A3	16,59	483
A4	16,59	357

Fuente: elaboración propia

Se realiza el cálculo de la viga tanto de los momentos actuantes y los momentos resistentes de la viga con los valores de $f'c$ y f_y de las simulaciones de la tabla:

Tabla 3.
Valores de los momentos actuantes y resistentes de las simulaciones de $f'c$ y f_y

SIMULACION	Mactuante	Mresistente
1	158,40	159,37
2	158,40	166,92
3	158,40	172,51
4	158,40	165,63
	633,60	664,42

Fuente: elaboración propia

Con esos valores se calcula la media y desviación estándar de los momentos solicitantes y resistentes:

Tabla 4.
Media y desviación estándar de los momentos resistentes y solicitantes

Momento solicitante		Momento resistente	
media	desviacion	media	desviacion
μ_s	σ_s	μ_r	σ_r
158,4	0	166,105	4,67

Fuente: elaboración propia

Reemplazando estos valores en las ecuaciones 1 y 2:

$$\mu_z = 166.105 - 158.400 = 7.705$$

$$\sigma_z = \sqrt{0^2 + 4.67^2} = 4.672$$

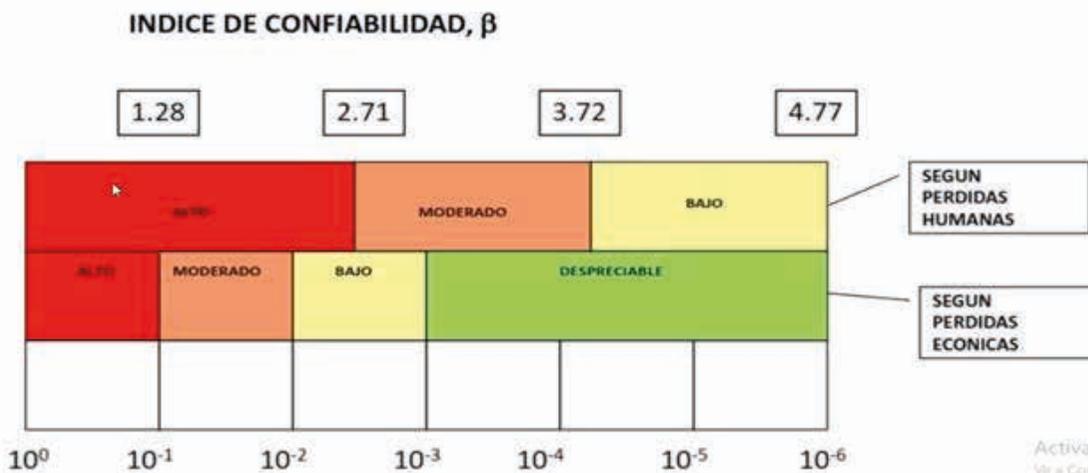
Los valores de la media y de la desviación estándar serán reemplazados en la ecuación 1 de donde se obtiene el valor del índice de confiabilidad:

$$\beta = \frac{7.705}{4.672} = 1.649$$

Con este valor se puede obtener el riesgo tolerable del sistema.

Se puede evidenciar en la figura 5, se tiene un riesgo alto según las pérdidas humanas que se pueda dar con las simulaciones establecidas de las variables $f'c$ y f_y , y un riesgo moderado según las pérdidas económicas que oscilan entre los valores de 1.28 y 2,71 que se encuentra el valor calculado para esta viga con un índice de confiabilidad de 1.649.

Figura 5
Riesgo tolerable en función del índice de confiabilidad



Nota. - información recolectada de Hays, 2008

CONCLUSIONES

Es evidente dentro del ejemplo para el cálculo de una viga, con las simulaciones establecidas de variación de $f'c$ y f_y acuerdo a criterios estadísticos y probabilísticos, podemos concluir que estas variaciones existen un riesgo alto-moderado de que se llegue a producir una falla en dicho elemento estructural.

La falta de estudios oportunos, adecuados y correctos durante la concepción del proyecto puede provocar que se presenten distintos modos de falla sobre la viga a lo largo de su vida, como lo simula el modelo desarrollado.

La idea detrás de uno de estos análisis es asegurar que R sea mayor que S ($R > S$), es decir, que el sistema resista más de lo que actúa sobre él, a lo largo de su ciclo de vida (desde las etapas de diseño y construcción, hasta la de reusó o disposición y desmontaje).

Investigadores en distintas latitudes han propuesto diversos métodos para evaluar los riesgos en obras de infraestructura. Entre ellos, se pueden mencionar: el período de retorno, la simulación de Montecarlo, el método del primer orden del segundo momento estadístico, el método de confiabilidad, y las redes Bayesianas, siendo estas últimas las que mejor permitieron evaluar los riesgos en las estructuras de interés.

Debe de existir mayor investigación e interés por parte de los constructores, proyectistas y demás personas que intervienen en la edificación de este tipo de obras, en lo que se refiere al análisis de riesgos.

BIBLIOGRAFÍA

James, G. (2003). Analysis of Traffic Load Effects on Railway Bridges. Stockholm, Sweden: Structural Engineering Division Royal Institute of Technology.

Jonkman, S. (2017). Probabilistic Design: Risk and Reliability Analysis in Civil Engineering. New York: Faculty of Civil Engineering and Geosciences.

Meli Piralla, R. (2021). Diseño Estructural . Mexico: LIMUSA.

Orta, L. (2019). Conceptos Básicos de Confiabilidad Estructural. Monterrey: Tecnológico de Monterrey.

Sanchez Silva, M. (2015). Introducción a la confiabilidad y Evaluacion de Riesgos. Bogota: Uniandes.

Villarreal Castro, G., & Diaz La Rosa Sánchez , M. (2016.). Edificaciones con disipadores viscosos . Lima.