

Curso Diseño de Puentes - AASHTO

Prof. Dr. Matías A. Valenzuela

Agradecimientos

- Dr. Rafael Foinquinos Mera
- Dr. Carlos G. Matos Flores-Guerra
- Dr. Sergio F. Breña
- Dr. Hernán Pinto Arancet

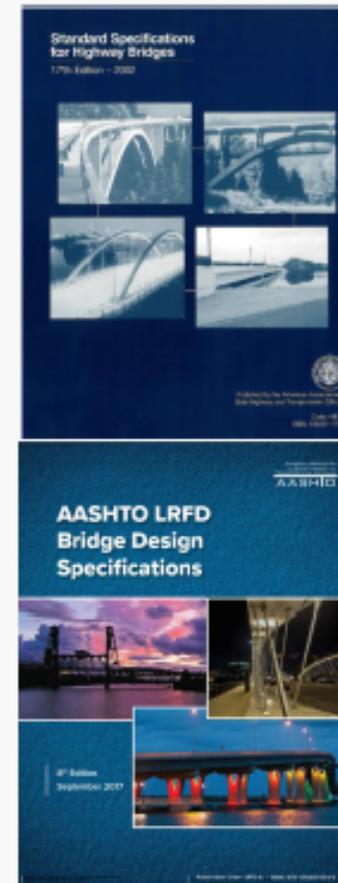
Tópicos del Curso

- **1. Filosofía del Código LRFD**

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

AASHTO Especificaciones para Diseño de Puentes (Cronología)

1. Especificaciones Estándar para Diseño de Puentes, 17th Edición (última), 2002
 - ASD (Allowable Stress Design), Diseño por Esfuerzos Permisibles
 - LFD (Load Factor Design), Diseño por Factores de Carga.
2. AASHTO LRFD Especificaciones para Diseño de Puentes
 - Diseño por Factores de Carga y Resistencia
 - 1^a Edición, 1994
 - 2^a Edición, 1998 a 4^a Edición, 2007
 - 5^a Edición, 2010 a 8^a Edición, 2017



Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

AASHTO LRFD: Breve Historia

Comité de Puentes de AASHTO

En 1986, el Comité concluyó:

- Las Especificaciones Estándar tenían inconsistencias y lagunas
- Estas especificaciones no estaban actualizadas con las tecnologías emergentes
- El desarrollo de nuevas especificaciones era necesaria.

Objetivos de la nueva especificación:

- Refleje el estado del arte (técnica)
- Completa y consistente consigo misma
- Formato de especificación (en lugar de como libro de texto)
- Multidisciplinario en el enfoque del diseño
- Reconocer la importancia de la redundancia y ductilidad

AASHTO publicó la 1ra Edición de la especificación en 1994.

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Filosofías de Diseño Estructural

Diseño por Esfuerzos Permisibles (ASD):

- También conocido como diseño por cargas de servicio.
- Basado en que el máximo esfuerzo aplicado en un componente estructural no exceda un cierto esfuerzo permisible bajo servicio normal o condiciones de trabajo.
- Ecuación de diseño:
$$\sum Q_i \leq \frac{R_n}{FS}$$
donde:
 - Q_i : es el efecto de la carga
 - R_n : es la resistencia nominal de la sección y
 - FS: es un factor de seguridad.
- El factor de seguridad es un numero mayor que 1 y proporciona reserva en el caso de que ocurra una carga inusualmente alta o, la resistencia real es menor de lo esperado.

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Diseño por Esfuerzos Permisibles (ASD):

- El diseño de las fundaciones se ha basado tradicionalmente en ASD.
- Ventajas: ASD tiene una simplicidad inherente. Los cálculos son relativamente simples e involucran solo cargas reales, la capacidad real del material y factores de seguridad empíricos.
- Limitaciones:
 - 1) En ASD, no se tiene en cuenta el hecho de que varios tipos de cargas tienen diferentes niveles de incertidumbre. Todos los tipos de cargas son tratadas igualmente en ASD.
 - 2) El FS aplicado al lado de la resistencia de la desigualdad esta basada en experiencia y juicio ingenieril, consecuentemente medidas consistentes de riesgo no pueden ser determinado para ASD.

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Diseño por Cargas Factoradas (LFD):

- El método de diseño LFD utiliza cargas multiplicadas por factores de carga y coeficientes de combinación de carga, que generalmente son mayores que la unidad.
- Las cargas se combinan para producir un efecto máximo en un miembro (demanda).
- Los factores de carga varían según el tipo de carga y reflejan la incertidumbre al estimar magnitudes de diferentes tipos de carga.
- Ecuación de diseño:

$$\sum \gamma_i Q_i \leq \phi R_n$$

donde:

γ_i factor de carga, y

ϕ es el factor de reducción de la resistencia (menor que 1)

Limitaciones:

Los factores de carga y el factor de reducción de resistencia no fueron calibrados basados en la variabilidad estadística de estos parámetros.

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Diseño por LRFD

- Factores de carga son aplicados a las cargas nominales y factores de reducción de resistencia a los materiales. Estos factores toman en cuenta la variabilidad de cargas y resistencias
- Los factores de carga y de resistencia están basados en las estadísticas y las probabilidades.

The diagram illustrates the LRFD design equation: $\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_r$. It includes the following labels and arrows:

- Resistencia Nominal**: Points to R_n .
- Factor de resistencia**: Points to ϕ .
- Resistencia de diseño**: Points to R_r .
- Modificador de carga**: Points to η_i .
- Efecto de carga (P, M, V, T)**: Points to Q_i .
- Factores de carga (Tablas 3.4.1-1 y 3.4.1-2 para cargas permanentes)**: Points to γ_i .

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Objetivo principal del uso de LRFD

Desarrollo de una especificación consistente y comprensiva basada en los principios del diseño con base en factores de carga y resistencia (LRFD). Las especificaciones deben calibrarse para obtener un nivel de confiabilidad uniforme para alcanzar el mismo nivel de seguridad en el estado límite de falla independiente del material utilizado.

Estado Límite – condición que si es violada impide a la estructura desarrollar su objetivo de diseño.

Los siguientes estados límite se consideran durante el diseño basado en el AASHTO LRFD:

- Estado Límite de Servicio
- Estado Límite de Fatiga y Fractura
- Estado Límite de Resistencia
- Estado Límite bajo Cargas Extremas

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Estado Límite de Servicio

- Estado límite de servicio – límites en esfuerzos, deformaciones, ancho de grietas bajo condiciones regulares de servicio.
- Para el estado límite de servicio, los factores de resistencia $\phi = 1.0$, y casi todos los factores de carga γ_i son iguales a 1.0
- Ejemplos (subestructura): asentamiento vertical de una fundación o desplazamiento lateral de un muro de contención.



Rotación del
balancín debido
al movimiento
del estribo

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Estado Límite de Servicio

- Servicio I: combinación de carga de servicio combinada con viento de 55 mi/hr.
- Servicio II: para el control de fluencia en estructuras de acero y para controlar el deslizamiento en conexiones por fricción.
- Servicio III: para el control de fisuras de tensión en superestructuras de concreto presforzado y para control de la tensión principal en almas de vigas de concreto de puentes segmental.
- Servicio IV: para el control de fisuras de tensión en columnas de concreto presforzado.

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Estado Límite de Fatiga y Fractura

- Este estado límite se refiere a las restricciones en el rango de esfuerzos causadas por el camión de diseño.
- Las restricciones dependen de las excursiones de rango de esfuerzos que se espera que ocurran durante la vida útil del puente
- Este estado límite se usa para limitar el crecimiento de grietas bajo cargas repetitivas y para prevenir la fractura debido a los efectos acumulativos de los esfuerzos en elementos, componentes y conexiones de acero.
- Para el estado de fatiga y fractura, $\Phi = 1.0$



Figura
derecha:
Colapso del
puente de
Minneapolis

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Estado Límite de Falla

- Condición límite de diseño que garantiza que se provean a los elementos estructurales la resistencia y estabilidad para resistir la combinaciones de carga críticas y así evitar el colapso total o parcial de la estructura.



Colapso del puente de FIU (Universidad Internacional de la Florida)

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Estado Límite de Falla

- Resistencia I: Combinación básica sin la presencia de carga de viento.
- Resistencia II: Combinación usada con vehículos especiales (o con permiso especial) sin la presencia de carga de viento.
- Resistencia III: Combinación para puentes expuestos a velocidades de viento que exceden 55 mi/hr (90 km/hr).
- Resistencia IV: Relación de carga muerta a viva alta (puentes con claros que exceden 200 ft [61 m])
- Resistencia V: Uso vehicular normal de puentes con presencia simultánea de viento con velocidad de 55 mi/hr (90 km/hr).



Colapso de puente en China, 2012.

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Estado Límite para Cargas Extremas

- El estado límite de evento extremo se refiere a la supervivencia estructural de un puente durante un terremoto mayor, debido a colisión con un buque o vehículo, masa gigantes de hielo o explosiones.
- La probabilidad de que estos eventos ocurran simultáneamente es extremadamente bajo; por lo tanto, se especifica que se apliquen por separado.
- Considerable deformación inelástica pueden ocurrir durante estos eventos y consecuentemente los efectos debido a TU, TG, CR, SH y SE no se consideran.

Sismo de Kobe en
Japón



Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Modificador de Carga, η_i

$$\eta_i = \eta_D \eta_R \eta_I \geq 0.95$$

[AASHTO 1.3.2.1-2]

Aplicable cuando valores máximos de γ_i son usados.

$$\eta_i = \frac{1}{\eta_D \eta_R \eta_I} \leq 1.0$$

[AASHTO 1.3.2.1-3]

Aplicable cuando valores mínimos de γ_i son usados.

η_D = factor de ductilidad del sistema
= 1.05 componentes no-dúctiles
= 0.95 componentes dúctiles

η_R = factor de redundancia

η_I = factor de importancia operacional

$\eta_i = 1.0$ en estados límite que no correspondan al estado límite de falla

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Factor de Ductilidad, η_D

- La ductilidad es importante para la seguridad del puente. Una estructura dúctil podrá redistribuir la carga a otras menos cargadas una vez la capacidad ha sido alcanzada en las zonas sobrecargadas
- Esta redistribución depende de la capacidad del componente sobrecargado y sus conexiones para desarrollar deformaciones inelásticas sin falla.
- Se debe evitar el comportamiento frágil porque implica una pérdida repentina de la capacidad de carga cuando se excede el límite elástico.



Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Factor de Ductilidad, η_D



Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Factor de Redundancia, η_R

- Una estructura estáticamente indeterminada es redundante, es decir, tiene más restricciones de lo necesario para satisfacer el equilibrio.
- Por ejemplo, un viga continua de tres vanos (indeterminada de segundo orden) es redundante de segundo orden. Dos apoyos podrían perderse o un momento sin causar un inmediato colapso porque las cargas aplicadas podrían encontrar caminos alternativos. El concepto de rutas múltiples de carga es lo mismo que redundancia.



Puente de FIU

- El pilón y los falsos cables atirantados son solo adorno
- El sistema estructural consiste de una armadura de concreto
- El fallo de una de las diagonales junto al soporte intermedio provocó el colapso del puente
- Sistema no-redundante

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Factor de Redundancia, η_R



Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Factor de Redundancia, η_R



Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Ventajas del AASHTO LRFD sobre las Especificaciones Estándar

1. Se toma en cuenta la variabilidad en cargas y variabilidad en resistencia de elementos estructurales.
2. Provee un nivel uniforme de confiabilidad en el diseño, el cual esta basado en distribuciones estadísticas de cargas y resistencia. Fue calibrado utilizando aproximadamente 200 puentes en servicio.

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Implementación del AASHTO LRFD en los Estados Unidos

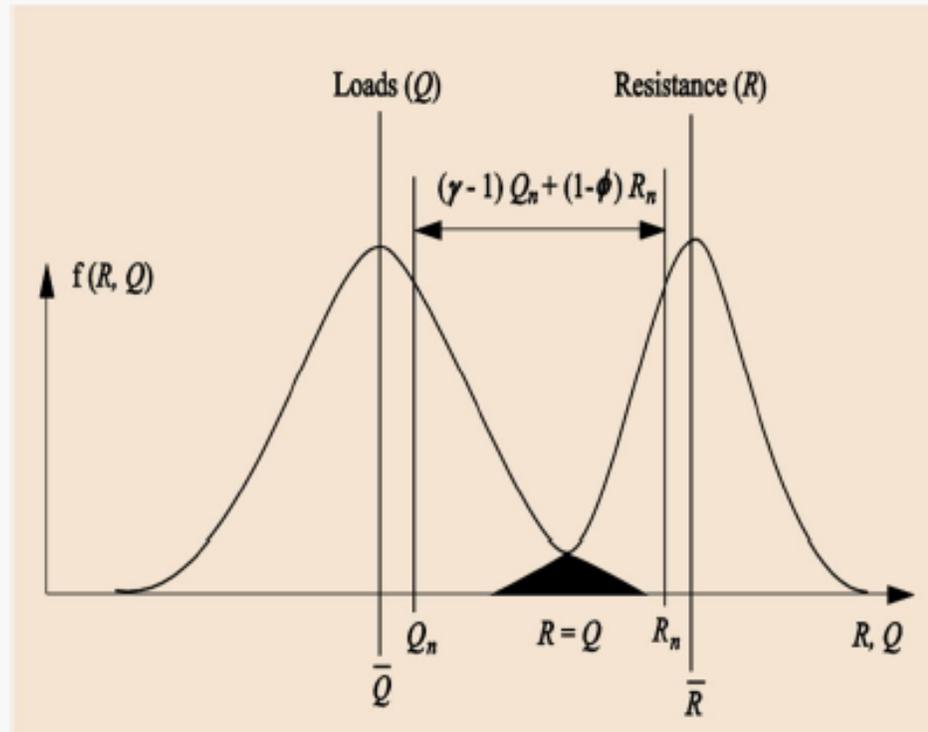
AASHTO, en concordancia con la Administración Federal de Caminos (FHWA), estableció la fecha límite del **1 de octubre de 2007** para que todos los estados adoptaran el uso del LRFD en diseño.

Después de esta fecha los estados deben diseñar puentes nuevos de acuerdo a la especificación basada en LRFD para calificar para fondos federales.

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Bases probabilísticas de las especificaciones LRFD

- Los efectos de la carga Q y las resistencias R son modeladas como variables aleatorias estadísticamente independientes.



\bar{Q} Carga Media
 \bar{R} Resistencia Media
 Q_n Carga nominal
 R_n Resistencia nominal

Distribución de frecuencia relativa de Q y R

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Bases probabilísticas de las especificaciones LRFD

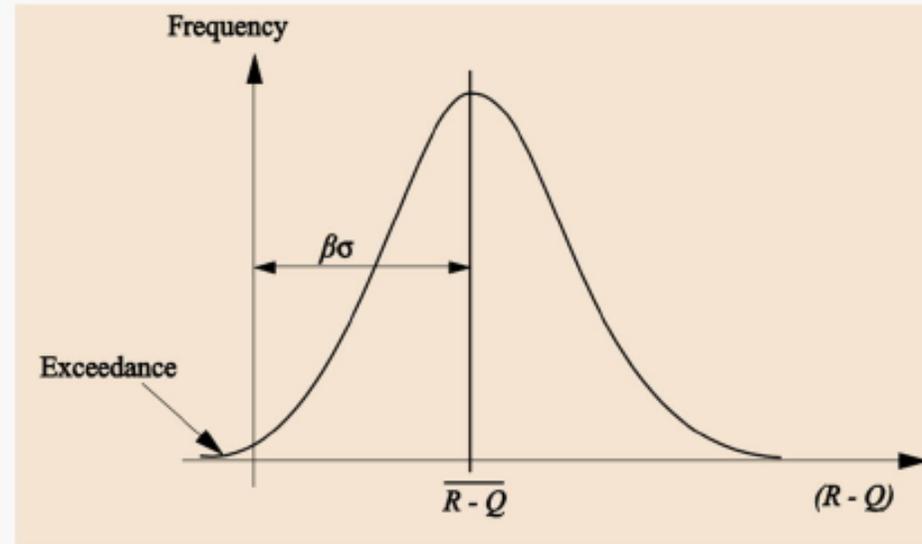
Observaciones de la figura previa:

- Siempre que $R > Q$, existe un margen de seguridad para un estado límite particular.
- Dado que Q y R son variables aleatorias, hay una pequeña probabilidad de que R sea menor que Q . (área sombreada en la figura). Esta probabilidad está relacionada con los valores relativos de \bar{Q} , \bar{R} y sus dispersiones.
- El objetivo del diseño basado en la confiabilidad es separar la distribución de la resistencia de la distribución del efecto de la carga, de modo que el área de superposición, es decir, $R < Q$, es aceptablemente pequeña.
- En AASHTO LRFD, se desarrollaron factores de carga y de resistencia de manera que el área de superposición ($R < Q$) sea menor o igual que el valor aceptable por AASHTO.

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Bases probabilísticas de las especificaciones LRFD

- La probabilidad de "excedencia" o "logro de un estado límite" puede ser examinada comparando R y Q como se muestra en la Figura de abajo. Si R y Q están normalmente distribuidas, la función $g(R, Q) = R - Q$ es usada.



Representación gráfica del índice de confiabilidad β

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Bases probabilísticas de las especificaciones LRFD

Observaciones de la figura previa:

- La distancia entre la “excedencia” y $\overline{R - Q}$ se define como $\beta\sigma$, donde σ es la desviación estándar de la función (R-Q) y β es el denominado “índice de confiabilidad”.
- Las probabilidad de falla o “excedencia” para diferentes valores del índice de confiabilidad β (para distribuciones normales) son como sigue:

β	P_f	P_f	β
2.5	0.62×10^{-2}	1.0×10^{-2}	2.32
3.0	1.35×10^{-3}	1.0×10^{-3}	3.09
3.5	2.33×10^{-4}	1.0×10^{-4}	3.72
4.0	3.17×10^{-5}	1.0×10^{-5}	4.27
4.5	3.4×10^{-6}	1.0×10^{-6}	4.75
5.0	2.9×10^{-7}	1.0×10^{-7}	5.20
5.5	1.9×10^{-8}	1.0×10^{-8}	5.61

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Bases probabilísticas de las especificaciones LRFD

- La probabilidad de $R < Q$ depende de las formas de distribución de cada uno de muchas variables (material, cargas, etc.). Valores medios y las desviaciones estándar o coeficientes de variación de las variables involucradas en R y Q pueden ser estimados.
- Asumiendo que tanto la resistencia como el efecto de las cargas son variables aleatorias independientes que siguen distribuciones normales, el índice de confiabilidad puede ser obtenido como:

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}$$

donde σ_R y σ_Q son los coeficientes de variación de la resistencia R y el efecto de carga Q, respectivamente.

El coeficiente de variación = Desviación Standard/Valor medio

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Calibración del código LRFD

La estimación de valores apropiados de los factores de carga y resistencia consistió de los siguientes pasos:

Paso 1. Compilación de datos estadísticos de parámetros de carga y resistencia (media y desviación estándar).

Paso 2. Estimar el nivel de confiabilidad inherente a las metodologías de diseño actuales (Especificación Standard)

Paso 3. Observar la variación de los niveles de confiabilidad para puentes con diferentes longitudes de vanos, relación de carga muerta a carga viva, combinaciones de carga, tipos de puentes y métodos de cálculo de resistencia.

Paso 4. Seleccionar un índice de confiabilidad objetivo basado en el margen de seguridad implícito en los diseños actuales.

Paso 5. Cálculo de los factores de carga y de resistencia consistentes con el índice de confiabilidad objetivo seleccionado. También es importante considerar la experiencia y el juicio ingenieril en los resultados de la calibración.

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Información Estadística

- En el diseño basado en estados límite, deben considerarse:
 - Variabilidad en las cargas
 - Tráfico: autos, camiones (número de ejes), etc.
 - Variabilidad en las resistencias de elementos
 - Resistencia a la compresión del concreto
 - Resistencia a la cedencia del acero
 - Variación en la geometría de la sección
 - Posición del acero de refuerzo

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Calibración del código LRFD

Se seleccionaron unos 200 puentes correspondiente a diferentes regiones geográficas en los Estados Unidos para los esfuerzos iniciales de calibración (Nowak, 1993). El énfasis fue en tipo de puente, longitud de vano, etc.

Paso 1: Datos estadísticos:

Variabilidad de carga muerta y viva en puentes:

Load Component	Bias (λ_Q)	COV (V_Q)
Dead load		
Factory made	1.03	0.08
Cast in place	1.05	0.10
Asphalt wearing surface	1.00	0.25
Live load (with dynamic load allowance)	1.10–1.20	0.18

From Nowak (1993).

Bias Factor o Sesgo estadístico = (Valor Medio) / (Valor Nominal)

Coefficiente de variación = (Desviación Standard) / (Valor Medio)

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Calibración del código LRFD

Paso 1: Datos estadísticos:

Parámetros estadísticos de resistencia para puentes seleccionados

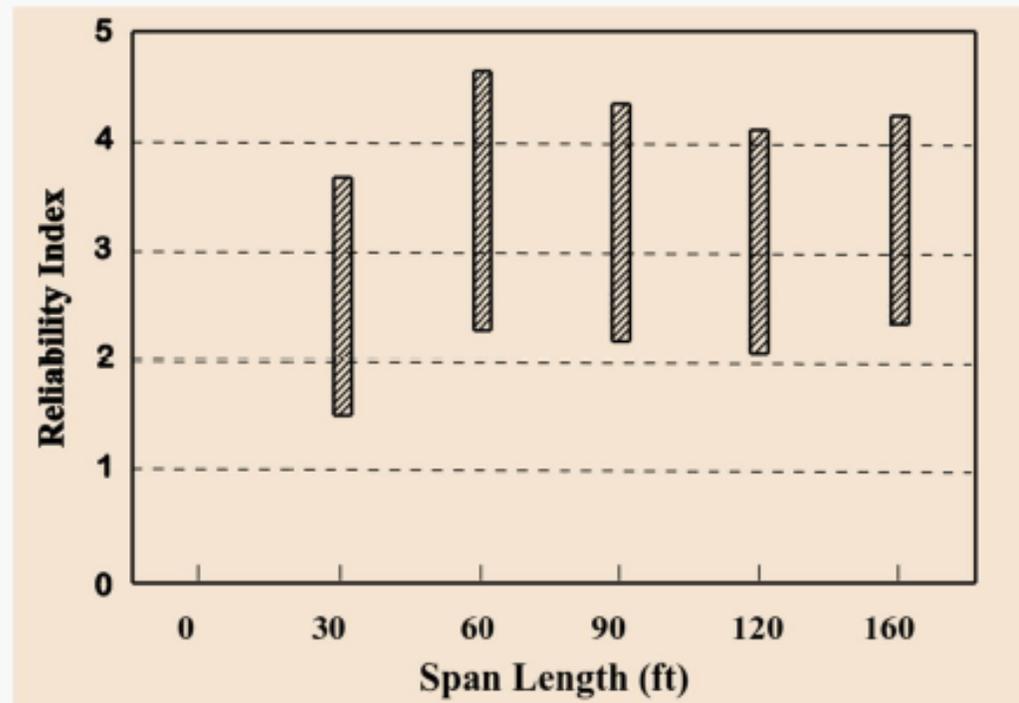
Type of Structure	Bias (λ_R)	COV (V_R)
Noncomposite steel girders		
Moment (compact)	1.12	0.10
Moment (noncompact)	1.12	0.10
Shear	1.14	0.105
Composite steel girders		
Moment	1.12	0.10
Shear	1.14	0.105
Reinforced concrete T-beams		
Moment	1.14	0.13
Shear w/steel	1.20	0.155
Shear w/o steel	1.40	0.17
Prestressed concrete girders		
Moment	1.05	0.075
Shear w/steel	1.15	0.14

From Nowak (1993).

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Calibración del código LRFD

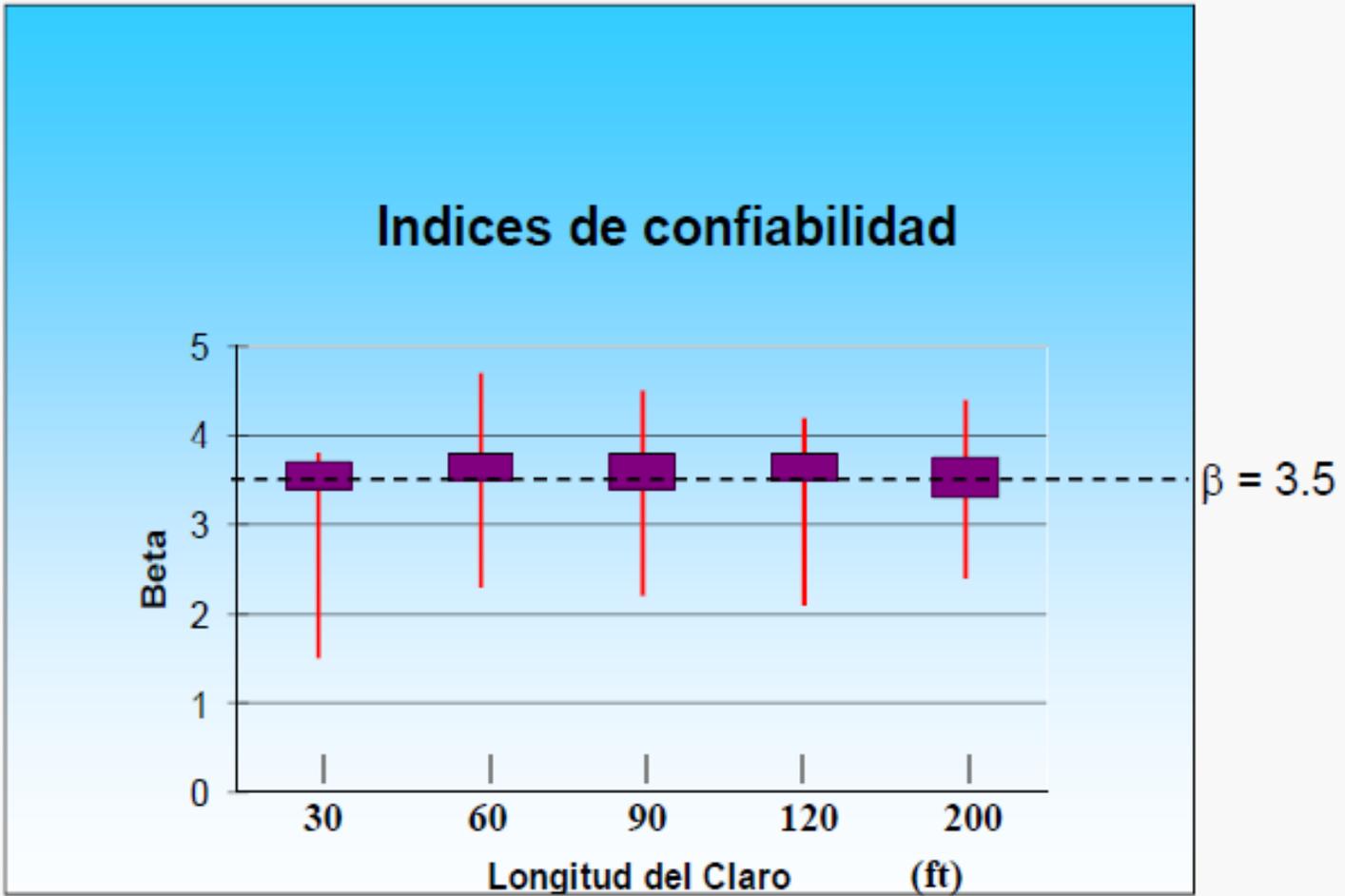
Pasos 2 y 3: Calculo del índice de confiabilidad de acuerdo a las especificaciones estándar.



Índices de confiabilidad inherentes a la norma AASHTO de 1989

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Calibración del LRFD



Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Calibración del código LRFD

Paso 4: Basado en el análisis de puentes existentes un índice de confiabilidad $\beta=3.5$ fue seleccionado.

Paso 5: Basado en el índice de confiabilidad $\beta=3.5$ y los datos estadísticos, se calcularon los valores de los factores de carga y resistencia.

Por ejemplo para la Combinación de Resistencia 1:

$$\gamma_i = \lambda_{Q_i} (1 + 2.6V_{Q_i})$$

Factory made	$\gamma_{DC1} = 1.03(1 + 2.6 \times 0.08) = 1.24$
Cast in place	$\gamma_{DC2} = 1.05(1 + 2.6 \times 0.10) = 1.32$
Asphalt overlay	$\gamma_{DW} = 1.00(1 + 2.6 \times 0.25) = 1.65$
Live load	$\gamma_{LL} = 1.10 \text{ to } 1.20(1 + 2.6 \times 0.18) = 1.61 \text{ to } 1.76$

Los factores de carga seleccionados son:

$$\gamma_{DC1} = \gamma_{DC2} = 1.25 \quad \gamma_{DW} = 1.50 \quad \gamma_{LL} = 1.75$$

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Calibración del código LRFD

Paso 5:

Factores de resistencia calculados y recomendados

Material	Limit State	Eq. 3.44	ϕ , Selected
Noncomposite steel	Moment	0.90	1.00
	Shear	0.90	1.00
Composite steel	Moment	0.90	1.00
	Shear	0.90	1.00
Reinforced concrete	Moment	0.85	0.90
	Shear	0.85	0.90
Prestressed concrete	Moment	0.90	1.00
	Shear	0.85	0.90

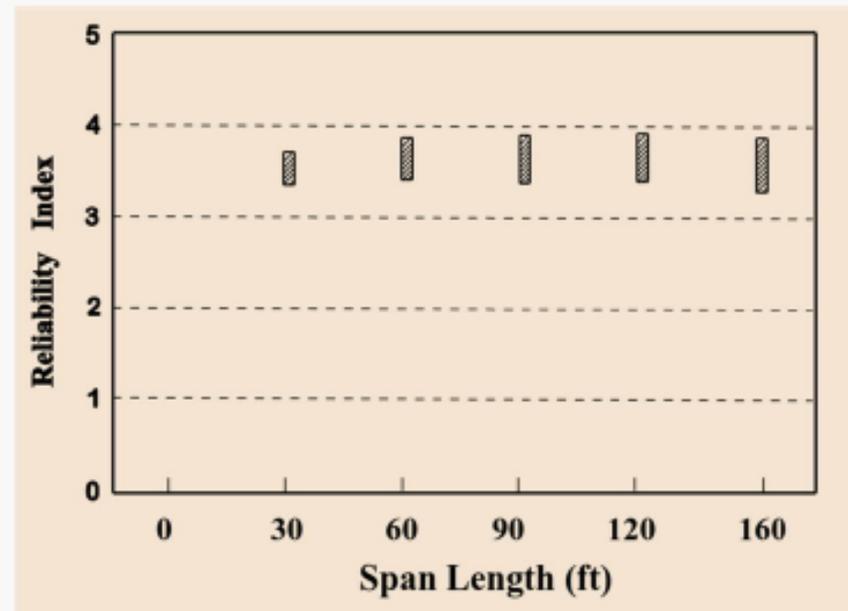
$$\phi = \lambda_R(1 - 2.0V_R)$$

Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Calibración del código LRFD

Paso 5:

Valores del índice de confiabilidad basado en los factores de carga y resistencia de AASHTO LRFD



Especificaciones para el Diseño de Puentes - Filosofía de Diseño LRFD

Calibración del LRFD

Comentarios:

1. Sólo los estados límite de falla en la especificación LRFD fueron calibrados utilizando la teoría de confiabilidad estructural
2. Los otros estados límite fueron basados en calibraciones con los criterios de diseño contenidas en las especificaciones estándar o bien mediante información basada en el estado del arte.
3. Los factores de carga y resistencia propuesta en la 1era edición de AASHTO (1994) aun son vigentes en la ultima edición (8va ed., 2017).
4. La calibración esta basada en estadística de los años 70 y 80 y en técnicas estadísticas de los 80.

Calibración del LRFD

Comentarios:

5. Basado en abundante información estadística actualizada con respecto a cargas y resistencia y en técnicas probabilísticas mas avanzadas, los factores de carga y resistencia necesitan se actualizados.
6. Calibraciones para los estados limites de Servicio necesitan ser incorporadas en el código.