



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**“CONFIABILIDAD DEL PUENTE TAMPICO Y EL  
COSTO ESPERADO DEBIDO A FALLAS POR  
CARGAS DE VIENTO”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

**ARTURO MONROY BECERRIL**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. DAVID DE LEÓN ESCOBEDO**

TOLUCA, MÉX., OCTUBRE DE 2008



Universidad Autónoma del Estado de México  
Facultad de Ingeniería  
Cerro de Coatepec, s/n Ciudad Universitaria,  
Toluca, Méx. C.P. 50130  
Tel.: (01-722) 2 14 08 55 Fax: 2 15 45 12

Toluca, México a 23 de septiembre de 2008.

**C. ARTURO MONROY BECERRIL,  
PASANTE DE INGENIERÍA CIVIL  
P R E S E N T E**

En contestación a su solicitud, transcribo el tema que, aprobado por la Dirección de esta Facultad, propuesto y dirigido por el **DR DAVID DE LEÓN ESCOBEDO**, el cual ha sido desarrollado como trabajo escrito para su titulación en la modalidad de Tesis para que proceda a presentar su Evaluación Profesional.

**“CONFIABILIDAD DEL PUENTE TAMPICO Y EL COSTO ESPERADO DEBIDO A FALLAS  
POR CARGAS DE VIENTO”**

	Introducción
Capítulo 1	Antecedentes
Capítulo 2	Descripción del problema y metodología para determinar las acciones
Capítulo 3	Aspectos básicos para un análisis de riesgo
Capítulo 4	Análisis estructural y análisis de confiabilidad con base en riesgo eólico
Capítulo 5	Obtención del nivel de riesgo aceptable
	Conclusiones
	Recomendaciones
	Bibliografía
	Apéndices

Ruego a usted tomar nota de que, en cumplimiento a lo especificado por la Ley de Profesiones deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar su Evaluación Profesional.

Asimismo, para la elaboración de la Tesis y demás trámites, deberá sujetarse a la Reglamentación respectiva a esta Universidad.

**A T E N T A M E N T E**  
**PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO**  
*“El hombre pasa, pero la obra queda, Adolfo López Mateos  
Presidente de México (1956-1964)”*

**DR. EN ING. MARTÍN CARLOS VERA ESTRADA**  
DIRECTOR

**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**U.A.E.M.**

MCVE/arr

La universidad pública construye el futuro



2005-2009

## **DEDICATORIA**

### **A MIS PADRES.**

**Lupita Becerril Colín y Javier Monroy González por su apoyo incondicional y como una muestra de gratitud por haberme enseñado a enfrentarme a la vida, por ser mi guía y mi respaldo, deseo darle las gracias a mi mamá ya que ella ha estado siempre a mi lado y me ha dado todo sin esperar nada a cambio.**

### **A MI HERMANO RAUL.**

**Esperando que le sirva de ejemplo y motivación para ver que con un poco de dedicación se puede lograr lo que se quiere y nunca se de por vencido.**

### **A LA MEMORIA DE MI HERMANO.**

**Javier Monroy Becerril †**

**Arturo Monroy Becerril**

## **AGRADECIMIENTOS**

**A MI DIRECTOR DE TESIS.**

**Dr. David de León Escobedo, por darme la oportunidad de compartir con él su experiencia y conocimientos, deseo externarle mi admiración, ya que representa un modelo a seguir y haber sido su estudiante representa para mí un gran honor.**

**Agradezco también la valiosa colaboración de la Ing. Lorena Manjarrez Garduño y del Ing. Román Antemio Vargas ya que representaron para mí un gran estímulo y motivación, además quiero agradecer su paciencia continua y su tiempo.**

**Agradezco también a todos los maestros integrantes del CIE de la Facultad de Ingeniería por todo el apoyo que me brindaron en la realización de este trabajo.**

## ÍNDICE

<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
Índice	1
<b>CAPÍTULO 1. Antecedentes</b>	<b>2</b>
Justificación	4
Objetivo general	5
Alcance	5
Hipótesis	7
<b>CAPÍTULO 2. Descripción del problema y metodología para determinar las acciones</b>	<b>8</b>
2.1 Descripción del problema	8
2.2 Criterios de diseño	13
2.3 Metodología para determinar las acciones por viento	14
<b>CAPÍTULO 3. Aspectos básicos para un análisis de riesgo</b>	<b>17</b>
3.1 Análisis estructural	17
3.2 Confiabilidad estructural	20
3.3 Componentes esenciales de la función del costo esperado del ciclo de vida	23
3.4 Optimación estructural	26
<b>CAPÍTULO 4. Análisis estructural y análisis de confiabilidad con base en riesgo eólico</b>	<b>30</b>
4.1 Aplicación del análisis estructural	30
4.2 Análisis de confiabilidad en base a riesgo eólico del puente Tampico	36
4.3 Costo inicial y costo esperado de daño del puente Tampico	39
<b>CAPÍTULO 5. Obtención del nivel de riesgo aceptable</b>	<b>54</b>
5.1 Cálculo del índice de confiabilidad aceptable	54
5.2 Análisis de resultados	57
<b>Conclusiones</b>	<b>58</b>
<b>Recomendaciones</b>	<b>60</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>61</b>
<b>Apéndice A</b>	<b>64</b>
<b>Apéndice B</b>	<b>67</b>

## Capítulo 1

### ANTECEDENTES

Se sabe que en México y el mundo, históricamente la primer causa de desequilibrio social y económico, está asociada a la presencia de fenómenos naturales, aquí se hablará sobre los más devastadores; los huracanes, debido a que ocasionan los mayores daños acumulados por los efectos destructivos de sus precipitaciones masivas y la velocidad de sus vientos, que al adentrarse a tierra firme por periodos de tiempo que llegan a ser de hasta de varios días, afectan a la población de la costa debido que es el desastre natural que más pérdidas humanas ocasiona, afecta también las actividades de los puertos y a la infraestructura existente (edificios, carreteras, puentes, etc.). Según las estadísticas [15], en el pasado los estragos del paso de huracanes por tierra eran mucho mayores, debido a diversos factores, entre los que destacan: la intensidad y comportamiento del huracán, la imposibilidad de detectar su formación o aproximación a la costa, carencia de información para ubicar las áreas de inundación. Un evento representativo de la afectación de los huracanes a la economía de los países es el huracán Mitch, desastre que tuvo consecuencias a largo plazo. Honduras, fue el país más afectado, vio socavada su economía en una semana con la enorme destrucción de carreteras y demás parte de su infraestructura, así como 2.3 millones de damnificados (aproximadamente el 32% de su población nacional) [20].

Un ciclón tropical (huracán), consiste en una gran masa de aire con vientos fuertes que giran en forma de remolino alrededor de un centro de baja presión. El viento es aire en movimiento. El aire tiene una masa (densidad o peso) y se mueve con una dirección y velocidad particular [18]. Por consiguiente posee energía cinética expresada como

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.1)$$

Obsérvese que la velocidad está elevada al cuadrado por lo que se potencializa la energía. Cuando el aire en movimiento encuentra un objeto fijo, ocurren varios efectos que se combinan para ejercer una fuerza sobre el objeto.

**El efecto que provoca el viento en las estructuras ha sido motivo de investigación por parte de varias instituciones entre las que se puede destacar:**

**La Comisión Federal de Electricidad (CFE) que, por ejemplo, ha trabajado en el Manual de diseño de obras civiles desde hace varios años siendo la versión mas reciente la de 1993. En este manual, el apartado de diseño por viento presenta las velocidades regionales de viento para las ciudades de la República Mexicana. El Instituto de Ingeniería de la UNAM también ha contribuido desde hace varios años en la edición de las Normas Técnicas Complementarias para el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, la versión mas reciente es la de 2004 [10]. En este reglamento, el apartado de Diseño por Viento presenta los procedimientos para determinar la velocidad de diseño en base a la importancia de la construcción, la región, la topografía, etc., únicamente para las delegaciones del Distrito Federal. El CENAPRED en la edición de revistas y fascículos “Ciclones Tropicales” [6], dedicados al estudio de la estructura y evolución de los huracanes. Asimismo se han desarrollado estudios de regionalización eólica por parte de la Universidad Autónoma de Tamaulipas para este Estado en particular, considerando las velocidades máximas extremas de viento [24].**

**La seguridad de una estructura cualquiera está determinada por su respuesta ante un evento que puede presentarse o ser excedido con una probabilidad determinada. En el caso de un huracán, dicho evento es la velocidad del viento.**

**En un principio el concepto de seguridad estaba incluido explícitamente en la experiencia e intuición del diseñador, sin que existiera una definición del mismo, sin embargo, la preocupación constante y el esfuerzo de los diseñadores por mitigar los efectos de estos agentes perturbadores en la seguridad y economía nacional que anualmente suma miles de millones de pesos, ha hecho necesario el desarrollo de conceptos y técnicas de seguridad estructural, basadas en la premisa acuñada por el profesor Sueco Carl Forsell [28] y dice que: “una estructura debe ser proporcionada de tal manera que el costo total de la obra (incluyendo el costo inicial, el costo de mantenimiento, y el valor esperado del costo de falla), sea mínimo”. Para llegar a minimizar este costo deberá de hacerse un balance entre seguridad y economía a**

través de la utilización óptima de los recursos económicos bajo las demandas y la capacidad estructural.

De lo anterior, parte la intención de realizar la evaluación del riesgo eólico en la estructura del puente Tampico ubicado en la costa del Golfo de México, con el fin de mitigar tanto las pérdidas económicas como las pérdidas por posibles fatalidades (pérdidas de vidas humanas) que pudieran presentarse como consecuencia de la posible ocurrencia de velocidades máximas de viento en el sitio.

### *Justificación.*

Las obras de ingeniería civil, con frecuencia, se hallan expuestas a peligros que ponen en riesgo no solo la inversión económica realizada sino las vidas humanas de los usuarios o de la población cercana. Dado el tamaño de la inversión, y de las consecuencias de una posible falla, en este tipo de obras se justifica la realización de estudios costo-beneficio que consideren explícitamente las incertidumbres inherentes en la ocurrencia y consecuencias del peligro al cual está expuesta la obra y la población. Lo anterior ayuda a establecer criterios para proteger la obra del peligro y mitigar las consecuencias de fallas o daños potenciales sobre la misma. Sin embargo, para mitigar las consecuencias de fallas se requiere cuantificar el costo esperado de dichas consecuencias, las cuales van desde la pérdida de la estructura hasta la pérdida de vidas de sus ocupantes y de los individuos que pasen por debajo de ella en el momento de la falla.

En los estudios y diseños de puentes realizados en el pasado, no se ha incorporado información de riesgo para valorar de manera objetiva y sistemática el impacto socioeconómico ni se ha evaluado, explícitamente, el efecto benéfico de incluir las consecuencias de falla para racionalizar la inversión en seguridad estructural en este tipo de estructuras. Ni se ha calculado la relación de la reducción en pérdidas contra la utilidad generada mediante la protección de la estructura con un diseño balanceado. En puentes sujetos a viento, se suelen adaptar recomendaciones de otros



sítios sin estimar el nivel de riesgo específico para el sitio de la estructura en cuestión. Tampoco se ha determinado cuantitativamente cual es el nivel de riesgo aceptable que resulta al equilibrar costos de falla con los beneficios de mantener una confiabilidad que garantice condiciones de operación adecuadas por las que se obtiene una utilidad. De manera similar en el caso del Puente Tampico, hace falta estimar cuál es el nivel de riesgo y de las pérdidas asociadas a la interrupción de la navegación fluvial y el bloqueo del puerto, pues el puente está sobre el río que comunica el puerto con el mar. Al calcularse el nivel de riesgo del puente, podrá compararse con el nivel aceptable y generar recomendaciones para su posterior mantenimiento.

El desarrollo de la zona de Tampico amenazada por huracanes, se vería favorecido al contar con elementos para minimizar fatalidades y pérdidas económicas en el largo plazo, de acuerdo al nivel de riesgo existente en la zona.

Para cumplir con este objetivo se hará uso de las herramientas existentes sobre el tema de riesgo y confiabilidad, para que de ésta manera se pueda determinar el nivel óptimo de seguridad en la estructura del puente Tampico debido a velocidades de viento máximas en el sitio.

De manera conjunta se pretende establecer por medio de un análisis probabilístico, tasas ó porcentajes de pérdidas económicas y probables fatalidades, para evaluar el efecto benéfico de incluir las consecuencias de falla para racionalizar la inversión en seguridad estructural en este tipo de estructuras.

#### *Objetivo General.*

Evaluar la confiabilidad y los costos de consecuencias de falla para mitigar las fatalidades y pérdidas económicas debido al peligro eólico en el puente Tampico.

#### *Alcance:*

La presente tesis pretende evaluar el riesgo eólico en la estructura del puente Tampico ubicado en la costa del Golfo de México, con el fin de mitigar tanto las

**pérdidas económicas como las pérdidas por posibles fatalidades (pérdidas de vidas humanas) que pudieran presentarse como consecuencia de una posible ocurrencia de velocidades máximas de viento en el sitio.**

**Para facilitar el trabajo se limitó el alcance al análisis de confiabilidad de un solo elemento estructural, una de las dos pilas principales.**

**Una vez evaluados los posibles daños económicos y humanos, se generan recomendaciones para mantener un nivel óptimo en la estructura donde el nivel de riesgo sea aceptable, que resulta de equilibrar costos de falla con beneficios de mantener una confiabilidad que garantice condiciones de operación adecuadas para ofrecer el servicio por el que se obtiene una utilidad.**

### *Hipótesis.*

- Se analiza solo la parte de la superestructura del puente Tampico sin tomar en cuenta su cimentación, y con los métodos de selección empleados, se llega a que el elemento crítico de su estructura es la pila principal del margen izquierdo.
- El efecto de las cargas de viento en la estructura del puente Tampico se analiza por medio del método estático, pues se considera que la respuesta de la estructura ante este tipo de análisis es representativa.
- Se hace una transformación de la sección de concreto igualando la rigidez de la sección de concreto, y debido a falta de información se supone que la sección de acero tendrá la misma sección aunque una rigidez mayor, y solo se atenúa el valor de su peso, por medio de un arreglo en el peso volumétrico del acero.
- Se utilizan valores recomendados de los coeficientes de variación de las cargas actuantes y las cargas resistentes para simplificar la simulación de Monte Carlo.
- Para el análisis, se cubre un rango de posibles velocidades de viento en la región y van de los 20 km/hr a los 310 km/hr.
- El tiempo de reconstrucción, se infiere de acuerdo al modo de falla que se prevé se va a presentar que es de flexo-compresión, al nivel de daño en la estructura y por último de acuerdo al tiempo de construcción total de la obra que es de 2.2 años.
- El valor del costo inicial de la estructura se toma como el que reporta la literatura, y se asume que es un costo a valor presente para evitar entrar en conflictos de las devaluaciones y fluctuaciones de la economía del país en años posteriores a la construcción del puente.

## **Capítulo 2**

### **DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LAS ACCIONES.**

#### *2.1 Descripción del problema.*

Se ha trabajado un problema de ejemplo, se eligió el puente Tampico, para mostrar los cálculos de confiabilidad y riesgo, debido a que por su ubicación sobre la carretera Tampico-Tuxpan en la costa oriental de México, está expuesto a peligro eólico debido a los huracanes que año con año en el periodo de junio a noviembre azotan las costas del estado de Tamaulipas. Dada la aleatoriedad de las velocidades del viento y dada la importancia de la inversión para su construcción, es útil realizar un análisis de confiabilidad para poder evaluar la confiabilidad de la estructura del puente Tampico y los costos de las consecuencias de falla para mitigar las fatalidades y pérdidas económicas. Las variabilidades inherentes a la aleatoriedad de las fuerzas de viento y de las propiedades mecánicas de los materiales de construcción contribuyen a aumentar la probabilidad de falla de la estructura.

El puente Tampico, el cuál fue construido sobre el río Pánuco en 1988, sirve de nexo entre el estado de Tamaulipas y Veracruz y es el camino más corto para ir de Tampico a México D.F.

El sistema estructural y la geometría del puente Tampico pueden resumirse como sigue, es un puente de tipo atirantado con tirantes axiales dispuestos en forma de medio abanico con una longitud total de 1543m y un claro central de 360m, lo conforman a cada lado del claro central 3 tramos de 70m y 1 de 49m, un viaducto izquierdo de 476m, compuesto de 4 tramos de 63m y 4 de 56m y un viaducto derecho: 189m, 3 tramos de 63m cada uno. El ancho total es de 18.10m para 4 líneas de tráfico, dos en cada dirección.



**Figura 1.1 Vista General del Puente Tampico.**

**Para el alineamiento vertical destacan pendientes de 4.85% en ambos extremos y en el tramo central de 360m se aloja una curva vertical circular de 3023m de radio necesaria para dejar un espacio libre entre el nivel del agua y la parte baja de la superestructura no menor de 50m. En planta, destaca que entre las pilas 5 y 10 se localiza una curva horizontal de 1 grado con longitud de 306m.**

**La calzada es de concreto presforzado de sección tipo cajón, a excepción de los 293.50m centrales del tramo de 360m que es metálica de tipo ortotrópico y están soportadas por**

**La subestructura que está compuesta de 21 elementos de apoyo, (2 caballetes extremos y 19 pilas) de concreto reforzado. Resistencia de  $300 \text{ kg/cm}^2$  y altura que varía de 5m hasta 45m.**

**Las pilas son huecas, de  $6.40 \times 2.40\text{m}$ , el espesor para las paredes correspondientes a los viaductos y 50cm para el espesor del tramo principal. Y sirven de apoyo al viaducto.**

**La cimentación es de tipo profundo y está compuesta por cilindros de concreto reforzado, de sección circular de 6.4m de diámetro exterior y 80cm de espesor de sus paredes. En los apoyos de 8 al 12 y de 15 a 17. Fueron hincados en el terreno desde los 10 hasta los 65m. En los tramos 13 y 14, se tiene una sección elíptica de  $10.50 \times$**

13.40m, contiene 4 celdas y el espesor de sus paredes es de 1m, sus longitudes son de 65m para la 13 y de 30m para la 14. Los apoyos extremos y las pilas 2 a 6 y 18 a 20, se cimentaron a superficie con el uso de zapatas. Para la pila 1 y 7 se usaron pilotes colado en el lugar, de 1.5 m de diámetro y longitud máxima de 18.50m, (vea la figura 1).

Para el diseño fueron adoptadas cargas móviles tipo HS-20 de las normas AASHTO y las que establecen los reglamentos de operación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, así como las producidas por el efecto de ciclones con vientos de hasta 250 kilómetros por hora.

Como ya se dijo antes se busca obtener la confiabilidad de la estructura real del puente Tampico y también determinar el nivel de seguridad apropiado. Debido a la incertidumbre implícita en un diseño estructural por cargas de viento, el riesgo o la probabilidad de falla es inevitable, y por lo tanto es necesario acercarse a la base de la confiabilidad. Como consecuencia, una medida apropiada de seguridad es la confiabilidad óptima. En este estudio, la confiabilidad estará asociada con el mínimo costo esperado del ciclo de vida.

Esta confiabilidad óptima dependerá de lo siguiente:

Información del riesgo eólico del sitio.

La probabilidad de falla del puente bajo varias intensidades de viento.

El costo esperado de las consecuencias de falla o daño del puente.

Por tanto, necesita desarrollarse una función de costo realista para un tipo de estructura y un uso dado. Estas funciones deben incluir las prácticas de la construcción, la economía del país, y las tendencias locales en el uso de las estructuras y el impacto de la falla del puente en las actividades económicas de la zona. Por ejemplo, puede decirse que, el costo de la construcción depende de: la calidad de la mano de obra (producción por unidad de tiempo), la eficiencia en el uso de los

materiales, el costo que implica reparar el puente, las técnicas comunes de reparación practicadas en el sitio para el tipo de estructura considerada, el número de personas cuya vida esté en riesgo sobre el puente varía según el comportamiento diario del tránsito local y los pasajeros por vehículo así como del tráfico marítimo debajo del puente.

Se aplican las herramientas de probabilidad para evaluar la confiabilidad de la estructura del puente Tampico, debido al peligro eólico al que se encuentra expuesto, que pone en riesgo la integridad de la estructura y por tanto la inversión económica realizada además de las vidas humanas de los usuarios, considerando las incertidumbre inherentes en la ocurrencia y las consecuencias del peligro.

Con el fin de obtener el índice de confiabilidad de la estructura del puente Tampico, se recurre a modelarlo con ayuda del SAP-V11 [8], para obtener la respuesta de la estructura ante las solicitaciones dadas de carga viva, carga muerta, y cargas accidentales (viento). La respuesta de la estructura está dada por los elementos mecánicos (flexión, compresión, cortante). Para los fines de este estudio se toman en cuenta los elementos críticos de la estructura y se generaliza su resultado. Sin embargo, en los casos reales no se analizan casi nunca elementos aislados, de manera que su comportamiento depende, en gran parte de la estructura en su conjunto. Tampoco están, en general, sometidos a viento en una sola dirección, pero el estudio de una sección crítica constituye un antecedente en la solución de un problema mucho más complejo.

Por otra parte se necesita calcular las cargas resistentes de las secciones críticas para flexión y compresión, a fin de relacionarlas con las cargas actuantes, por medio del análisis de un estado límite que, en este caso, correspondió al evento donde la interacción en flexo-compresión es la combinación de esfuerzos más crítica y que será uniaxial, de acuerdo a las consideraciones usuales de análisis, dicha interacción no debe exceder de uno. La ecuación 3.3 muestra lo anterior.

Una vez que se tiene estos datos se realiza el cálculo de la probabilidad de falla con ayuda de la curva de peligro eólico que se muestra en la figura 4.1 y se desarrolla el procedimiento para obtener el índice de confiabilidad para la estructura real del puente Tampico.

Por otra parte se desea conocer el índice de confiabilidad óptimo de la estructura y por tanto deben de calcularse los costos esperados de daño asociados con los daños potenciales de futuros huracanes. Las posibles consecuencias de un huracán sobre el puente pueden ser extensas; además del posible colapso de la estructura y la pérdida de vidas humanas que deja el huracán, podría haber efectos sociales y económicos a largo plazo.

Los componentes principales del costo de daño  $C_d$  son:

$C_r$  = Costo de reparación o sustitución.

$C_f$  = Costo de fatalidad.

$C_e$  = Pérdidas económicas debido a la interrupción del servicio.

El primero de estos costos es:  $C_r$  = Costo de reparación o sustitución, y se refiere al costo que tiene retirar los escombros de la estructura que ha fallado y el volver a construir otra estructura, el segundo  $C_f$  = Costo de fatalidad que es el costo asociado con la pérdida de vidas humanas y finalmente,  $C_e$  = Pérdidas económicas debido a la interrupción del servicio que pueden estimarse en base al tiempo de reparación y/o restitución del mismo

El costo inicial de la estructura,  $C_i$ , y el costo de daño esperado,  $E[C_d]$ , para una velocidad de viento dada, estos son los componentes principales de la función del costo esperado del ciclo de vida.



De acuerdo a lo descrito anteriormente se obtiene el costo esperado del ciclo de vida como una función de probabilidad de falla media. Con el costo esperado del ciclo de vida se entra en la curva de la figura 5.2 y se obtiene el nivel de confiabilidad óptimo.

Finalmente se comparan los resultados el índice de confiabilidad aceptable ( $\beta_a$ ) contra el índice de confiabilidad asociado al diseño real de la estructura ( $\beta$ ) y se dan las recomendaciones. Básicamente existen tres posibles resultados. Si  $\beta_a > \beta$ , entonces la estructura debe ser atendida para alcanzar, y de ser posible, superar el valor aceptable de confiabilidad. En este sentido, las decisiones de mantenimiento y re-estructuración son relevantes para incrementar el valor de  $\beta$ . En el segundo caso  $\beta_a = \beta$ , es decir, la estructura es confiable aunque el deterioro provocado por el paso del tiempo la conducirá, seguramente, a reducir su índice actual y llegar a estar por debajo del óptimo. Al igual que en el primer escenario, es importante intervenir la estructura para incrementar su  $\beta$ .

Por último, se tiene el caso ideal en el que  $\beta_a < \beta$ , lo que implica que la estructura es confiable pues su  $\beta$  está por encima del óptimo. Aquí es recomendable tener medidas de mantenimiento preventivo para que la desigualdad no se invierta en el resto de la vida útil de la estructura del puente.

## *2.2 Criterios de Diseño.*

Para poder evaluar los efectos provocados por la acción del viento, deberá revisarse la seguridad de la estructura principal ante el efecto de las fuerzas que se generan por las presiones (empujes o succiones) producidas por el viento sobre las superficies de la construcción expuestas al mismo y que son transmitidas al sistema estructural. La revisión deberá considerar la acción estática del viento y la dinámica cuando la estructura sea sensible a estos efectos.

Los reglamentos actuales utilizan fundamentalmente dos diferentes enfoques para determinar las cargas de viento para diseño:

**Estático.** La fuerza del viento de diseño se idealiza como una fuerza estática equivalente, independientemente de las propiedades dinámicas de la estructura. La carga varía con la situación geográfica y la altura sobre la base de la estructura.

Algunos reglamentos no consideran explícitamente los efectos de las ráfagas, mientras que otros sí. El enfoque estático solo es admisible para aquellos casos en los que el periodo fundamental de vibración de la estructura está lejano del periodo de ráfaga.

**Dinámico.** La fuerza de viento se idealiza como una carga estática equivalente que depende de las propiedades dinámicas de la estructura. Este enfoque se puede aplicar a todas las construcciones, y deberá aplicarse a las estructuras con un periodo fundamental de vibración mayor a un segundo aproximadamente.

Sin embargo en casos especiales resulta necesario hacer uso de métodos experimentales como son las pruebas en túnel de viento.

**Túnel de viento.** Las fuerzas de viento de diseño se determinan a través del uso de pruebas de la capa límite u otros métodos experimentales en el túnel de viento.

Con frecuencia se utiliza este enfoque en construcciones de forma geométrica poco usual y con características que las hagan particularmente sensibles a los efectos de viento, el cálculo de dichos efectos se basará en resultados de estudios en túnel de viento. Podrán tomarse como base resultados existentes de ensayos realizados en modelos de construcciones de características semejantes.

Cuando no se cuente con estos resultados o cuando se trate de construcciones de particular importancia, deberá recurrirse a estudios de túnel de viento en modelos de la construcción misma.

### *2.3 Metodología para determinar las acciones por viento.*

#### **1.- Clasificación de la estructura.**

- a) *Según su importancia:* Grupo A.

b) *Según su respuesta: Tipo 2.*

## **2.- Determinación de la velocidad de diseño, $V_D$ .**

La velocidad de diseño, en km/h, se obtendrá de acuerdo con la ecuación:

$$V_D = F_T F_\alpha V_R \quad (2.1)$$

*2.1 Categoría de terreno según su rugosidad: R1.*

*2.2 Clase de estructura según su tamaño: Clases A.*

*2.3 Factor de topografía local:  $F = 1.0$ .*

*2.4 Factor de exposición,  $F_\alpha$ .*

El factor de exposición se calcula con la siguiente expresión:

$$F_\alpha = F_C F_{RZ} \quad (2.2)$$

*2.4.1 Factor de tamaño:  $F_C = 1.0$ .*

*2.4.2 Factor de rugosidad y altura,  $F_{RZ}$ , se hará uso de las siguientes ecuaciones:*

$$F_{RZ} = 1.56 \left[ \frac{10}{\delta} \right]^\alpha \quad \text{si } Z \leq 10 \text{ m} \quad (2.3)$$

$$F_{RZ} = 1.56 \left[ \frac{Z}{\delta} \right]^\alpha \quad \text{si } 10 \text{ m} < Z < \delta \quad (2.4)$$

Con los siguientes coeficientes:  $\delta = 245$  m y  $\alpha = 0.099$ . (Para escasas o nulas obstrucciones al flujo del viento, como el campo abierto)

### *2.5 Velocidad regional, $V_R$ , para el periodo de retorno requerido.*

La velocidad regional del viento,  $V_R$ , es la máxima velocidad media probable de presentarse con un cierto periodo de recurrencia en una zona o región determinada del país.

La importancia de las estructuras dictamina los periodos de recurrencia que deberán considerarse para el diseño por viento; de esta manera, los grupos A, B y C se asocian con los periodos de retorno de 200, 50 y 10 años, respectivamente. Para este caso en particular como se trata de una estructura del grupo A, se tiene un periodo de retorno de 200 años.

### *2.5 Presión de diseño.*

La presión de diseño en  $\left(\frac{kg}{m^2}\right)$ , se obtiene de la siguiente ecuación:

$$p_z = 0.048C_p V_D^2 \quad (2.5)$$

donde:  $C_p$  = coeficiente de variación (depende del tipo y la forma de la construcción).

$V_D$  = Velocidad de diseño (m/s)

### *2.5 Fuerza actuante de carga de viento.*

La fuerza de diseño en  $(kg)$ , se obtiene de la siguiente ecuación:

$$F_v = p_z (A) \quad (2.6)$$

donde:  $p_z$  = presión de diseño

$A$  = área tributaria expuesta a la presión del viento.  $(m^2)$

## Capítulo 3

### ASPECTOS BÁSICOS PARA UN ANÁLISIS DE RIESGO.

#### *3.1 Análisis Estructural*

El proceso de diseño, puede considerarse que está integrado por tres aspectos fundamentales que son: la estructuración, el análisis estructural, y el dimensionamiento.

En el presente estudio se hará énfasis al aspecto del *análisis estructural*, entendiendo como el proceso que incluye la determinación de la respuesta de una estructura ante las diferentes acciones exteriores, es decir, determinar los efectos de las cargas que pueden afectar a la estructura durante su vida útil. Es aquí donde se determinan las fuerzas internas (momentos flexionantes y de torsión, fuerzas axiales y cortantes), así como las flechas y deformaciones de la estructura.

#### *Integración de un modelo de Análisis Analítico.*

*Modelo geométrico.* Este es un esquema donde se representan las principales características geométricas de la estructura, su determinación implica identificar las partes de la construcción que desarrollan funciones estructurales y eliminar la parte que no influye significativamente en la respuesta de la estructura. Requiere presentar a la estructura por medio de un arreglo de componentes estructurales básicos cuyo comportamiento estructural puede conocerse y definir las propiedades geométricas “equivalentes” de estos componentes básicos. [21]

*Modelo de las condiciones de continuidad en las fronteras.* Debe establecerse cómo cada elemento está conectado a sus adyacentes, y cuales con las condiciones de apoyo de la estructura (empotramiento, apoyo libre etc.).

***Modelo de comportamiento de los materiales.*** Debe suponerse una acción – respuesta (o esfuerzo deformación) del material que compone la estructura. Generalmente se hace la hipótesis de comportamiento elástico lineal, aunque tiene limitaciones en algunos casos.

***Modelo de acciones impuestas.*** Las acciones que afectan a la estructura para una condición dada de funcionamiento, se representan por conjuntos de cargas o deformaciones impuestas.

Según Stahl (1986) [28], una estructura debe de ser diseñada de tal manera que el costo esperado total (incluyendo el costo inicial, el costo de mantenimiento y el valor esperado del costo de falla o daño) sea mínimo, y describe elocuentemente el objetivo desafiador de la ingeniería estructural moderna.

La meta última de la confiabilidad y análisis de riesgo es el balance entre seguridad y economía a través de la utilización óptima de los recursos económicos bajo las demandas compitiendo con la capacidad estructural, inspección de materiales, calidad de la construcción, mantenimiento y equipo de seguridad.

Para realizar estudios de costo- beneficio podemos ayudarnos de algunos conceptos de análisis de confiabilidad, y a continuación se presentan algunos de ellos.

La ***seguridad*** de una estructura es la propiedad de que no presente falla alguna [28]. ***Confiabilidad*** es la probabilidad de seguridad (supervivencia), esto es la probabilidad de que la resistencia de los elementos exceda el elemento mecánico de la respuesta a las cargas impuestas sobre la estructura en el periodo de vida de la misma. Recíprocamente, la probabilidad de falla es la probabilidad de que la respuesta debido a las cargas impuestas exceda la capacidad de resistencia de los elementos de la estructura. La confiabilidad y la probabilidad de falla pueden ser evaluadas para los componentes del sistema estructural, así como para el sistema mismo, y puede ser

definido por varios estados límite (colapso, deflexión, servicio). Confiabilidad y probabilidad de falla tienen la siguiente relación el uno con el otro:

$$\text{Confiabilidad} = 1 - \text{Probabilidad de falla} \quad (3.1)$$

Se llama *estado límite* de una estructura a cualquier etapa de su comportamiento a partir de la cual su respuesta se considera inaceptable. Se distinguen dos tipos de estados límite:

Aquellos relacionados con la seguridad se denominan *estados límites de falla* y corresponden a situaciones en que la estructura sufre una falla total o parcial, o simplemente afectan su capacidad para resistir nuevas acciones. La falla de una sección por cortante, flexión, torsión, carga axial o cualquier combinación de estos efectos, así como la inestabilidad de la estructura, el pandeo de uno de sus miembros y la falla por fatiga. Se debe evitar que se presenten los estados límite de falla, debidos no solo a las acciones de operación normal, sino también a las acciones correspondientes a condiciones excepcionales.

Los estados límite de servicio, aunque sin poner en juego la seguridad de la estructura, afectan el correcto funcionamiento de la construcción, y comprenden las deflexiones, agrietamientos y vibraciones excesivas, así como el daño de elementos no estructurales de la construcción.

Para este caso en particular se puede decir que, el estado límite corresponde al evento donde la interacción en flexo-compresión es la combinación de esfuerzos más crítica y que será uniaxial, de acuerdo a las consideraciones usuales de análisis, dicha interacción no debe exceder de uno. La ecuación 3.3 muestra lo anterior.

El término *análisis de riesgo* es también usado en un contexto más amplio para referirse a análisis de valor económico para tomar decisiones, considerando la inversión de capital en la exploración y operación de productos [28].

Confiabilidad y riesgo son expresados en términos de probabilidad. El riesgo es el producto de la probabilidad de falla de la estructura por el costo de las consecuencias de esa falla y se caracteriza mediante el costo esperado en el ciclo de vida. La probabilidad se aplica a eventos que ya han pasado, pueden estar ocurriendo, o que todavía pueden ocurrir. Estadística por otro lado algunas veces se confunde con la probabilidad y aplica solamente a eventos que ya han pasado. Esta es la diferencia más importante. [28]. Los conceptos básicos de probabilidad son descritos con un poco de más detalle en el apéndice B.

### *3.2 Confiabilidad Estructural.*

La teoría de la *confiabilidad estructural*, parte de que toda obra de ingeniería está sujeta al riesgo de experimentar el colapso total o parcial, o de ser incapaz de cumplir con alguna de sus funciones. Cada una de las formas en que el sistema puede fallar se denomina modo de falla. Asociada a cada uno de dichos modos se puede establecer una correspondiente probabilidad de falla. A cada modo de falla le corresponden ciertas consecuencias, las que pueden ser de distintos tipos: pueden incluir, daños materiales, costos de reparación e interrupción del servicio, fatalidades, entre otros.

Al estimar estos costos, llamados costos de falla, se tiene la posibilidad de establecer criterios de diseño estructural y de control de calidad basados en niveles aceptables de riesgo y en estudios de optimación en términos de funciones que relacionen costos iniciales con riesgos y beneficios esperados.(Esteva 2001)[16].

Los siguientes beneficios principales, son atribuidos a la aplicación de la confiabilidad y análisis de riesgo de estructuras de ingeniería civil.

1.- Evaluación de los conceptos del diseño alternativo de obras civiles. Esto solo puede hacerse en base a una confiabilidad igual. Los factores de seguridad son inexactos, desde diferentes conceptos de diseño pueden tener diferentes modos de falla y diferente grado de incertidumbre.



**2.- El logro de la distribución óptima y equilibrada de los materiales los elementos de la estructura, como las pilas de apoyo y las traveses del viaducto de un puente.**

**3.- La optimización del diseño de las obras de ingeniería con el criterio de cargas que usa el análisis del valor y herramientas del valor de dirección así como la minimización de costos en el largo plazo, incluyendo el mantenimiento.**

**La ingeniería de confiabilidad estructural de puentes está en constante estado de evolución. Las técnicas de análisis de confiabilidad y la recolección y verificación de los datos necesarios no se han desarrollado al punto requerido, la única forma que está disponible, proporciona la absoluta respuesta final. De hecho la ingeniería de confiabilidad proporciona las herramientas para que las incertidumbres de los parámetros de diseño pueden ser estudiados y de que manera tomar decisiones más racionales e involucrarlas en el diseño de puentes.**

**Las variables que se involucran en el diseño de estructuras son propensas a tener incertidumbre. La incertidumbre se presenta en las cargas actuantes en la estructura (demandas), ya que pueden ser mayores a las consideradas en el proceso de diseño, la incertidumbre o variabilidad de la resistencia de la estructura surge de la no uniformidad de las propiedades de los materiales (acero, concreto) y de los elementos estructurales ante diferentes ensayos, ya que pueden ser menores de lo supuesto, y la calidad de la construcción.**

**En la realidad casi siempre existen incertidumbres en todo el proceso de diseño que hacen que no pueda fijarse con precisión, en la etapa de proyecto, el valor de ninguna de las variables que intervienen en la resistencia y en los efectos de las acciones.**

**Por muy conservador que sea el diseño, siempre habrá una probabilidad mayor que cero de que la acción máxima que se vaya a presentar en la vida útil exceda a la**

resistencia para algún estado límite de falla (Meli 2004) [21]. El diseño debe procurar que esta probabilidad sea muy pequeña dentro de los límites que permite la economía.

Dadas las incertidumbres presentes en la velocidad del viento, la seguridad del puente debe ser analizada mediante técnicas que incluyan de manera explícita dichas incertidumbres. Más aún el coeficiente de seguridad del puente, que es importante para decisiones sobre inspección, mantenimiento y reparación, requiere del cálculo de la confiabilidad y de los costos inherentes a las consecuencias de falla del mismo.

La confiabilidad de un elemento o sistema estructural, sujeto a cargas de servicio y accidentales (viento) se puede calcular con la ecuación (3.2)

$$\beta = \frac{E(G)}{\sigma_G} \quad (3.2)$$

En este caso  $\beta$  es el índice de confiabilidad, que representa la confiabilidad de un elemento estructural suponiendo, de manera simplificada, que tanto la resistencia como la carga actuante tienen una distribución normal,  $G$  es la función de desempeño del estado límite o conjunto de estados límite. Dichos estados límite se han simplificado conservadoramente describiendo el elemento crítico de la estructura [14],  $E(G)$  es la esperanza de que dicho estado límite se presente y  $\sigma_G$  es la desviación estándar asociada al estado. Así,  $G$  se calcula, para flexo-compresión, como:

$$G = I - \left[ \frac{P_A}{P_R} + \frac{M_A}{M_R} \right] \quad (3.3)$$

En donde  $P_A$  es la carga actuante,  $P_R$  es la carga axial resistente del elemento,  $M_A$  es el momento actuante que resulta de aplicar las cargas de diseño,  $M_R$  es el momento que resiste la sección. Es importante notar que, cuando se calcula la esperanza de  $G$  ( $E[G]$ ), se deben emplear los valores medios de estas variables. Además, de acuerdo con Ang and Tang (2007),  $\sigma_G$  puede ser aproximado mediante el empleo de una serie de Taylor, como se expresa a continuación:

$$\sigma_G \approx \sqrt{\sum_{i=1}^4 \left( \frac{\partial G}{\partial X_i} \right)^2 \sigma_{X_i}^2} \quad (3.4)$$

En la ecuación anterior  $X_i$  se refiere a las cargas y momentos actuantes y resistentes. De esta forma,  $X_1 = P_A$ ,  $X_2 = P_R$ ,  $X_3 = M_A$ ,  $X_4 = M_R$ . Al calcular las derivadas parciales de G (ecuación 3.3) con respecto a estas cuatro variables y al sustituir los resultados en (3.4) se llega a:

$$\sigma_G \approx \sqrt{\frac{\sigma_{P_A}^2}{P_R^2} + \left( \frac{P_A}{P_R} \right)^2 * \sigma_{P_R}^2 + \frac{\sigma_{M_A}^2}{M_R^2} + \left( \frac{M_A}{M_R} \right)^2 * \sigma_{M_R}^2} \quad (3.5)$$

Donde además intervienen  $\sigma_{M_R}$ , que es la desviación estándar del momento resistente,  $\sigma_{M_A}$  que es la desviación estándar del momento actuante,  $\sigma_{P_R}$  que es la desviación estándar de la carga resistente,  $\sigma_{P_A}$  que es la desviación estándar de la carga actuante. Al sustituir los resultados de 3.3 y 3.5 en 3.2, se obtiene el *índice de confiabilidad*, inherente a la geometría del elemento o estructura (diseño) sujeto a las cargas a las que ha sido analizado y diseñado ( $\beta$ ).

### 3.3 Componentes esenciales de la función del costo esperado del ciclo de vida.

Existen tres tipos de costos diferentes para integrar la función del costo del ciclo de vida de una estructura, que pueden ser clasificadas como sigue:

- 1) Aquellos que son funciones explícitas del riesgo y la confiabilidad, como el costo inicial a de la estructura.
- 2) Aquellos que son consecuencias del daño o el colapso de la estructura, como los costos de reparación y otras pérdidas económicas por el daño, que dependen de la ocurrencia y el nivel de daño.
- 3) Aquellos que son independientes del riesgo, por ejemplo el costo de los acabados.

Los costos que forman el primer grupo son funciones directas del estado de riesgo o confiabilidad asociado a dicho costo, (esto significa que estos dependen de la probabilidad de daño asociado al diseño), considerando que aquellas del segundo grupo dependen de la probabilidad del nivel de daño prescrito y, por tanto, deben valorarse con la respectiva probabilidad de todos los posibles niveles de daño para obtener el correspondiente costo de daño. Los costos tratados en la tercera categoría son constantes y pueden despreciarse ya que estos no tendrán influencia determinantes en el nivel de riesgo óptimo.

El costo inicial de la estructura,  $C_i$ , y el costo de daño esperado,  $E[C_d]$ , para un diseño dado, estos son los componentes principales de la función del costo esperado del ciclo de vida.

$$E[C_i] = C_i + E[C_d] \quad (3.6)$$

*Función del Costo Inicial:*

Para un tipo de estructura establecida y bajo una exposición al viento dada, que es función del sitio de la construcción, pueden desarrollarse varios diseños alternativos aumentando o disminuyendo la velocidad de diseño del viento (siguiendo los códigos actuales de diseño y prácticas de construcción). Comparando estas alternativas de diseño, puede observarse que un diseño sobrado tiene una alta confiabilidad pero un alto costo inicial, considerando un diseño pobre le corresponde un bajo costo inicial, pero también tendrá una confiabilidad baja. Además, para un diseño conservador el costo inicial es alto pero el de falla es bajo y viceversa por lo que debe existir un balance óptimo.

Los factores importantes para la estimación del costo inicial  $C_i$  son: el costo de los materiales que se necesitan para construir la estructura, el costo de la mano de obra, el costo de los elementos no estructurales, el costo de financiamiento. Los costos de

cimentación, acabados y utilidades, no son incluidos ya que puede asumirse que estos son independientes de la seguridad o confiabilidad de la estructura y, por tanto, no influyen de manera determinante en la confiabilidad del diseño.

Las técnicas tradicionales de estimación de costos que se utilizan para obtener el costo de las construcciones cuantifican el volumen de los principales materiales que se necesita para cada diseño y los costos por unidad de material. Para simplificar la estimación de costo inicial, puede para algunos casos tomarse como sigue. El costo de la mano de obra puede ser considerado igual al (100%) del costo total del material de la estructura. El costo de los elementos no estructurales puede ser considerado como una fracción del (30%) del costo total de la estructura. El costo de financiamiento puede ser considerado como una fracción del (20%) del costo total de la estructura [11].

Para cada alternativa de diseño de la estructura, hay una confiabilidad (o riesgo) bajo una velocidad de viento dada o todas las posibles velocidades, por tanto, el costo inicial a un particular diseño asociado con una confiabilidad dada, y así el costo inicial es una función explícita de la confiabilidad.

Por tanto el aumento del costo inicial se da con un aumento de la confiabilidad, ya que representa tener elementos estructurales mas robustos que requerirán mayor cantidad de material para su construcción. Pero, a la vez, el costo de falla disminuirá porque la probabilidad de falla se reduce.

#### *Componentes del costo de daño.*

En lo que se refiere al daño futuro esperado, y para una intensidad de viento dada, en una estructura fuerte puede esperarse un daño bajo (y por tanto un bajo costo esperado de daño), mientras que en una estructura débil puede asociarse con altos niveles de daño (y con un alto costo de daño), para los daños potenciales provocados por los fenómenos meteorológicos que se presenten durante la vida útil de la estructura.

Los componentes principales del costo de daño se clasifican en pérdidas directas e indirectas. El costo de daño puede ser expresado también, como:

$$C_d = C_r + C_f + C_e \quad (3.7)$$

**En donde:**

$C_r$  = Costo de reparación o sustitución.

$C_f$  = Costo de fatalidad.

$C_e$  = Pérdidas económicas debido a la interrupción del servicio.

*Costo de reparación / restitución:*

El costo de reemplazo de la estructura se refiere al costo que tiene retirar los escombros de la estructura que ha fallado y el volver a construir otra estructura, lo cual se puede considerar de manera relativa como  $1.20 C_i$ , que incluye los costos de demolición, limpieza, la evaluación del nuevo diseño ya que tratándose de una estructura edificada sobre un río (Pánuco), los trabajos implican sacar los segmentos de estructura que se precipiten al fondo del agua y que impidan el paso seguro de las embarcaciones al puerto, lo cual se ha estimado en el 20% de el costo inicial de la obra [11]

*Costo de fatalidad.*

Se refiere al costo asociado con la pérdida de vidas humanas debido al ingreso que van a dejar de recibir sus familias, en los 25 años de vida promedio.

*Pérdidas económicas debido a la interrupción del servicio.*

Son las pérdidas económicas que se refieren a la inactividad del puente tales como: pérdida de ingresos en el puerto, pérdida de peaje en la caseta, pérdida de vehículos en el puente al momento del colapso, operación vehicular extraordinaria al tener que tomar desvíos etc.

### ***3.4 Optimización estructural.***

De acuerdo con Meli (1994) [21], la confiabilidad adecuada de una estructura está asociada a un costo, que debe minimizarse, mediante la búsqueda de un factor de seguridad óptimo que equilibre la confiabilidad de la estructura con su precio. Por tanto, debe de resolverse un problema de optimización, donde la función objetivo debe incluir el costo total de la estructura  $C_T$ , siempre considerando la inversión inicial  $C_o$  y una medida de los posible daños que se causarían si se presenta una falla, integrada por el costo de las consecuencias de falla  $D$  y la probabilidad de que ocurra la falla  $P_f$ . Obsérvese la siguiente expresión:

$$C_T = C_o + D \cdot P_f \quad (3.8)$$

También aclara que  $D \cdot P_f$  es el valor esperado de los daños causados por una posible falla (riesgo) y se comporta inversamente proporcional al factor de seguridad empleado en el diseño. Es decir, cuando se tiene un factor de seguridad bajo en la estructura, su costo total tiende a ser elevado pues aunque la inversión inicial es baja, los costos de falla son importantes y provocan el encarecimiento de la estructura. Por otra parte, si se tiene un factor de seguridad alto, el costo también es elevado, ahora no por los costos de las consecuencias sino por la inversión inicial significativa que deriva de un sobredimensionamiento de los elementos de la estructura. Entre estos dos extremos, existe un punto para el cual la seguridad es adecuada y el costo es mínimo, la figura 3.1 muestra el procedimiento descrito.

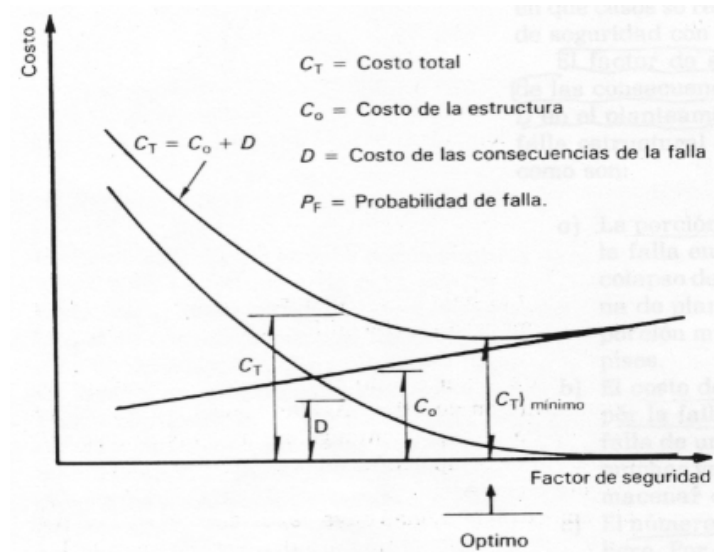


Figura 3.1 Representación del problema de optimación de la seguridad.

De forma similar, Stahl (1986) ha propuesto la ecuación 3.9 para calcular el costo esperado en el ciclo de vida de la estructura  $E[C_i]$ , que se expresa en términos del costo inicial  $C_i$  y el costo de falla  $E[C_d]$ .

$$E[C_i] = C_i + E[C_d] \quad (3.9)$$

donde:

$$E[C_d] = PVF \cdot [C_d] \cdot P_f \quad (3.10)$$

Siendo  $PVF$  un factor de valor presente,  $P_f$  la probabilidad de falla, y el costo de daño  $C_d$  se integra por los costos de las consecuencias:

$$C_d = C_r + C_f + C_e \quad (3.11)$$

Donde:

$C_r$ : Es el costo de reparación o restitución.

$C_f$ : Es el costo relacionado con fatalidades y lesiones.



$C_e$  : Se refiere a la pérdida económica debida a la interrupción del servicio mientras se restituye.

A su vez PVF depende de la tasa anual neta de descuento  $r$  y de la vida útil del puente  $T$ , como se muestra en la ecuación 3.12

$$PVF = \frac{1 - \exp(-rT)}{r} \quad (3.12)$$

Si el costo inicial  $C_i$  se expresa como una función de la probabilidad de falla, y se hace uso de las constantes  $C_1$  y  $C_2$ , donde esta última representa el incremento del costo inicial requerido para reducir  $P_f$  por un factor  $e \approx 2.71$ , como se observa en la ecuación 3.13, entonces la probabilidad aceptable (óptima) de falla se puede calcular mediante la minimización del costo total esperado en el ciclo de vida, como se indica en la ecuación 3.14

$$C_i = C_1 - C_2 \ln(P_f) \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial E[C_i]}{\partial P_f} = 0 \quad (3.14)$$

De hecho, la ecuación 3.13 se utiliza para hallar el valor óptimo de  $P_f$ . Sustituyendo las ecuaciones 3.13 y 3.10 en la 3.9 y resolviendo 3.14 se llega a:

$$P_f = \frac{0.435 * C_2}{PVF[C_d]} \quad (3.15)$$

Así, el índice de confiabilidad óptimo se calcula con el índice  $\beta_a$  (ver ecuación 3.16), que depende la función acumulada normal estandarizada  $\Phi(x)$ - el área bajo la campana de Gauss con media  $\mu = 0$  y desviación estándar  $\sigma = 1$  en el intervalo  $(-\infty, x]$ - y de la probabilidad de falla  $P_f$  (Stahl, 1986). Es importante mencionar que  $\Phi^{-1}(1 - P_f)$  es un indicador que equivale al valor de la abscisa que se produce, desde

–∞ hasta esa abscisa, el área bajo la curva sea  $1 - P_f$  y que se denomina “índice de confiabilidad aceptable”.

$$\beta_a = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (3.16)$$

En el caso del presente estudio, para obtener la confiabilidad aceptable se usó un valor de vida útil  $T$  de 200 años y una tasa de descuento  $r$  de 8%. Además, se empleó una relación  $C_2/C_1=0.045$  (De León et al, 2007) [13]. La confiabilidad aceptable se compara con el índice de confiabilidad real que se obtiene de la estructura, con la finalidad de hacer recomendaciones a los diseñadores, en caso de que se esté planeando la construcción, o a los operadores responsables del mantenimiento de la estructura, en caso de que ya se haya construido. Para el caso del puente Tampico, se utilizan los resultados para fines de mantenimiento.

## Capítulo 4

### ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD CON BASE EN RIESGO EÓLICO.

#### *4.1 Aplicación del Análisis Estructural al puente Tampico*

Ahora se aplicará lo anterior al objeto de estudio a fin de obtener la respuesta de su estructura para las solicitaciones dadas:

#### *Modelación y Análisis de la Estructura del Puente “Tampico” Construido con el Programa SAP2000-V11*

El SAP2000-V11 [8] es un programa de cálculo estructural en tres dimensiones mediante elementos finitos.

Con el fin de identificar el comportamiento de la estructura del puente Tampico ante las cargas de diseño, tales como la carga muerta (peso propio de la estructura), carga viva de diseño un HS-20, y velocidades de viento que pueden ir de 30 km/hr a 310Km/hr, se ha desarrollado un modelo que representa el “puente Tampico”. El modelo fue calibrado con datos obtenidos del libro dedicado al “Puente Tampico” editado por la SCT [26] y planos de la extinta SAHOP (Secretaria de Asentamientos Humanos y Obra Pública). Y a continuación se presentan algunas de sus características más importantes.

#### **GEOMETRIA.**

El puente tiene una longitud total de 1543 metros. Lo componen 3 partes, una principal de tipo atirantado y dos viaductos de acceso.

El alineamiento vertical del puente tiene pendientes de 4.85%, en ambos extremos y el tramo central de 360 metros aloja una curva vertical circular de 3023 metros de radio.

En planta entre las pilas 5 y 10 se utiliza una curva horizontal de 1 grado con una longitud de 306 m.

La *superestructura* es de concreto presforzado de sección cajón a excepción de los 293.5 metros centrales del tramo de 360m, donde es metálica de tipo ortotrópico de geometría exterior igual a la de concreto. El ancho total es de 18.10 metros, que permite alojar 4 líneas de tráfico, dos en cada sentido.

La subestructura, está compuesta de 21 elementos de apoyo (pilas huecas) de concreto reforzado con una resistencia de 300 kg/cm<sup>2</sup>. Existen 3 tipos de pilas (viaducto, sección atirantada y principales)

#### MATERIALES.

En el modelo se utilizaron 4 tipos de materiales para distintas secciones, estos son dos concretos, acero A-36 y acero de presfuerzo. A continuación se en listan las características de los materiales.

##### CONC300 (Concreto)

$$f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$$

$$E = 242487 \text{ kg/cm}^2$$

$$\gamma = 2400 \text{ kg/m}^3$$

##### CONC350 (Concreto)

$$f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$$

$$E = 242487 \text{ kg/cm}^2$$

$$\gamma = 2400 \text{ kg/m}^3$$

##### STEEL A-36 (Acero A-36)

$$f_y = 2531 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_u = 4077 \text{ kg/cm}^2$$

$$E = 2038901 \text{ kg/cm}^2$$

$$\gamma = 780 \text{ kg/m}^3$$

**STEEL PRT (Acero Presfuerzo)**

$$f_y = 19000 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_u = 35000 \text{ kg/cm}^2$$

$$E = 1960000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\gamma = 7800 \text{ kg/m}^3$$

## DEFINICIÓN DE SECCIONES.

El presente modelo esta compuesto de 9 secciones,

Tabla 4.1 Tipos de secciones del modelo y materiales

N.P	Nomenclatura	Elemento	Material
1	bca	base cajón	CON300
2	bpi	base pilas	CON300
3	cable	cable	STEEL PRT
4	mahex	mástil hexagonal	CON300
5	ph	pilas huecas	CON300
6	pi	pilas inclinadas	CON300
7	pprin	pilas principales	CON300
8	tc	trabe concreto	CON350
9	ta	trabe acero	STREEL A-37

## DEFINICIÓN DE CARGAS.

Para representar las acciones que afectan al puente se consideran las siguientes cargas:

**Cargas muertas o permanentes:** Contiene el peso propio de los elementos.

**Cargas vivas (variables):** Contiene el tren de cargas HS-20. MMP es una condición que representa una carga puntual de 4 HS-20 (dos por sentido) que provoca un momento máximo positivo, y MMN es una condición que representa 4 HS-20 (dos por sentido) y que ocasiona el momento máximo negativo.

**Cargas accidentales:** Contienen las acciones del viento a distintas velocidades (VIENTO 30, VIENTO 50, VIENTO 70, VIENTO 90, VIENTO 110, VIENTO 130, VIENTO 150, VIENTO 170, VIENTO 190, VIENTO 210, VIENTO 230, VIENTO 250, VIENTO 270, VIENTO 290, VIENTO 310).

## DEFINICION DE COMBINACIONES:

Para conocer los elementos mecánicos que actúan en cada elemento de la estructura se crean 30 combinaciones que incluyen los 3 estados de carga.

Tabla 4.2 Combinaciones de cargas definidas en el modelo.

COMBINACIÓN	ESTADO DE CARGA
COMB1	MUERTA+MMP+VIENTO30
COMB2	MUERTA+MMN+VIENTO30
COMB3	MUERTA+MMP+VIENTO50
COMB4	MUERTA+MMN+VIENTO50
COMB5	MUERTA+MMP+VIENTO70
COMB6	MUERTA+MMN+VIENTO70
COMB7	MUERTA+MMP+VIENTO90
COMB8	MUERTA+MMN+VIENTO90
COMB9	MUERTA+MMP+VIENTO110
COMB10	MUERTA+MMN+VIENTO110
COMB11	MUERTA+MMP+VIENTO130
COMB12	MUERTA+MMN+VIENTO130
COMB13	MUERTA+MMP+VIENTO150
COMB14	MUERTA+MMN+VIENTO150
COMB15	MUERTA+MMP+VIENTO170
COMB16	MUERTA+MMN+VIENTO170
COMB17	MUERTA+MMP+VIENTO190
COMB18	MUERTA+MMN+VIENTO190
COMB19	MUERTA+MMP+VIENTO210
COMB20	MUERTA+MMN+VIENTO210
COMB21	MUERTA+MMP+VIENTO230
COMB22	MUERTA+MMN+VIENTO230
COMB23	MUERTA+MMP+VIENTO250
COMB24	MUERTA+MMN+VIENTO250
COMB25	MUERTA+MMP+VIENTO270
COMB26	MUERTA+MMN+VIENTO270
COMB27	MUERTA+MMP+VIENTO290
COMB28	MUERTA+MMN+VIENTO290
COMB29	MUERTA+MMP+VIENTO310
COMB30	MUERTA+MMN+VIENTO310

## **AJUSTES.**

**En la calibración del modelo, se realizaron dos consideraciones importantes para representar las condiciones actuales del puente.**

**1.- En el diseño original se consideró un tramo principal de concreto que resultaba muy pesado y decidieron usar una sección de acero que resulto más ligera, para el caso de este estudio no se cuenta con la información suficiente de la sección de acero por lo que se consideraron las mismas características físicas de la sección de concreto que si se conoce, pero el peso volumétrico del STEEL A-36 (Acero A-36), fue considerado en un 10% del peso real ( $7800 \text{ kg/m}^3$  a  $780 \text{ kg/m}^3$ ), esto con la finalidad de representar la sección con geometría en forma de lámina (dobles).**

**2.- Se induce una fuerza de tensión en los cables para lograr la deflexión original calculada de 32 cm en el centro del claro principal**

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

**Se realizó el análisis para las 30 combinaciones antes mencionadas, cuya variante fue la velocidad de viento haciéndola variar en un rango realista, con la finalidad de obtener diferentes momentos máximos para conseguir distintas probabilidades de falla, correspondientes a cada velocidad de viento dada.**

**Al realizar el análisis de la estructura, se observó que para distintas velocidades de viento, los elementos críticos eran las pilas principales. Esto significa que fueron estos miembros los que estaban sujetos a cargas actuantes mayores que las cargas resistentes.**

**Así, para agilizar el ejercicio se decidió enfocar la atención en la pila del margen izquierdo, pues es el elemento más crítico. Aunque se reconoce que para un análisis completo de confiabilidad es necesario considerar la estructura completa, se juzga que**

los procedimientos aquí descritos son suficientes para ilustrar, de manera aproximada, los efectos de las cargas de viento en el nivel de seguridad del diseño estructural.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis estructural en SAP2000-V11 [8] de la estructura del puente Tampico, para la pila principal del margen izquierdo del río Pánuco. Los resultados son solo 15 debido a que la condición de carga viva que rigió fue MMP, que es una condición que representa una carga puntual de 4 HS-20 (dos por sentido) que provoca un momento máximo positivo

Tabla 4.3 Resultados del Análisis en SAP2000 para las pilas principales.

Combinación	Vel (km/hr)	Pa (Ton)	Ma (Ton-m)
M+V+W30	30	7663.05	490.75
M+V+W50	50	7663.12	1318.21
M+V+W70	70	7663.21	2546.21
M+V+W90	90	7663.35	4184.47
M+V+W110	110	7663.51	6225.25
M+V+W130	130	7663.71	8614.46
M+V+W150	150	7663.95	11593.92
M+V+W170	170	7664.21	14859.22
M+V+W190	190	7664.51	18532.63
M+V+W210	210	7664.84	22599.46
M+V+W230	230	7665.21	27100.40
M+V+W250	250	7665.61	32095.77
M+V+W270	270	7666.04	37390.22
M+V+W290	290	7666.50	43067.23
M+V+W310	310	7667.00	49203.99

donde:

**M:** Carga Muerta (Ton/m<sup>3</sup>)

**V:** Carga Viva (Condición crítica del tren de cargas HS-20) (Ton)

**W30:** Carga de viento de acuerdo a la velocidad dada (Ton)

**M+V+W30:** Es la combinación (carga muerta+ carga viva+ carga viento 30km/hr)

**Pa:** Fuerza axial máxima actuante (Ton)

**Ma:** Momento máximo actuante (Ton-m)



## 4.2 Análisis de Confiabilidad con base a riesgo eólico del puente Tampico.

El puente analizado está situado sobre el río Pánuco, en la parte poniente del Golfo de México, que es impactado por ciclones y por las avenidas extraordinarias del propio río Pánuco y el río Tamesí, debido al riesgo que existe que se presente este tipo de fenómenos meteorológicos y la importancia de la estructura, referida a que es el nexo de comunicación entre los Estados de Tamaulipas y Veracruz y por otra parte a la gran inversión que se ha hecho al construirlo, resulta útil determinar la confiabilidad de su estructura (seguridad en condiciones de incertidumbre), bajo las velocidades de viento dadas en el modelo. Lo anterior permitirá establecer el nivel de seguridad del diseño, incluyendo la incertidumbre en la velocidad del viento, y revisar y, en su caso, generar recomendaciones óptimas de mantenimiento.

### *Incetidumbre en la velocidad del viento.*

Para el cálculo de la confiabilidad del puente Tampico, se puede partir de la curva de riesgo eólico de la región, de análisis estadísticos previos (Sánchez, 2003) [24] se encontró que el mejor ajuste a los registros de huracanes en la zona corresponde a una distribución extrema Tipo II. Esta distribución es:

$$F_v(v) = \exp\left[-(21.82/v)^5\right] \quad (4.1)$$

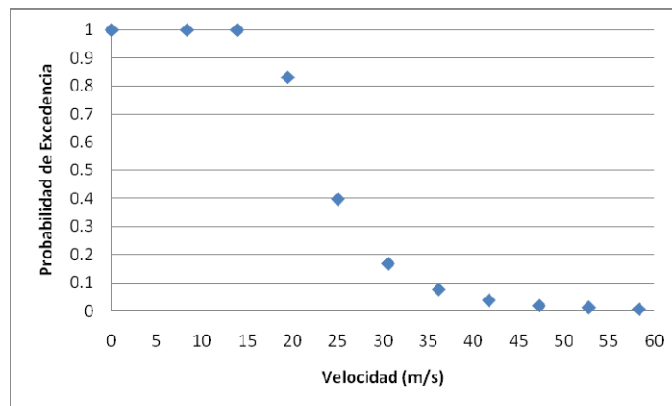


Figura 4.1 Curva de riesgo eólico, Tampico

### *Cálculo de la probabilidad de falla.*

El análisis de confiabilidad completo de una estructura es muy complejo, así que para la estructura del puente objeto del presente estudio, se simplifica de la siguiente manera:

1.- Se considera solamente al componente estructural más crítico que es la pila principal del margen izquierdo, a fin de simplificar los cálculos pero sin olvidar que un análisis completo comprende el estudio de todos los componentes de la estructura.

2.- De análisis estructurales preliminares, se encontró que el modo de falla bajo las cargas de diseño es de flexo-compresión, y se analiza bajo estas condiciones.

3.- Se utilizan valores recomendados de los coeficientes de variación y se simplifica la simulación de Monte Carlo mediante la consideración de probabilidades condicionales de falla ante velocidades de viento dadas que cubre el rango de posibles velocidades. Finalmente, mediante convolución, se multiplican las probabilidades condicionales por las probabilidades de ocurrencia de las distintas velocidades y se suman, para obtener así la probabilidad anual incondicional de falla, es decir, ante cualquier velocidad de viento que se pueda presentar.

A continuación, se presentan los cálculos para obtener el índice de confiabilidad del elemento crítico de la estructura del puente Tampico, para obtener estos resultados fue necesario hacer las siguientes consideraciones.

La geometría del elemento crítico es rectangular hueca de 1250x350cm de dimensiones exteriores y 50cm de espesor de las paredes, la resistencia a momento de dicho elemento se obtiene en la dirección que actúa el viento. La resistencia a compresión de la sección de la columna crítica es  $P_R = 28518 \text{ Ton.}$  y el momento resistente de la misma sección es  $M_R = 60778 \text{ Ton} \cdot \text{m.}$

Se usó un coeficiente de variación para las cargas actuantes  $CV_A=0.025$  y otro para las cargas resistentes  $CV_R=0.01$ , así que de acuerdo con (De León y Delgado, 2007) [14] se ha asumido que:

$$CV_A = \frac{P_A}{\sigma_{P_A}} = \frac{M_A}{\sigma_{M_A}} \quad (4.2)$$

$$CV_R = \frac{P_R}{\sigma_{P_R}} = \frac{M_R}{\sigma_{M_R}} \quad (4.3)$$

Esto significa que la variación de las cargas actuantes representa 2.5 veces aquella asociada a las cargas resistentes. Dicha situación se presenta debido a que el diseñador tiene cierto control sobre la resistencia del elemento y no lo tiene sobre las cargas actuantes.

Por lo que se tiene:

$$\sigma_{P_R} = 285.18 \text{ Ton}$$

$$\sigma_{M_R} = 607.78 \text{ Ton-m}$$

Tabla 4.4 Cálculos del índice de confiabilidad para el elemento crítico del puente Tampico

Vel (km/hr)	P act	M act	E[G]	$\beta_G$	$\beta  _{cond}$	$P_f   V_{m\acute{a}x}$	Pocurr	P Total
30	7663.05	490.75	0.723	0.007	99.91268	0.000000	0.95297	0
50	7663.12	1318.21	0.710	0.007	97.79467	0.000000	0.04072	0
70	7663.21	2546.21	0.689	0.007	94.29248	0.000000	0.00481	0
90	7663.35	4184.47	0.662	0.007	89.06277	0.000000	0.00101	0
110	7663.51	6225.25	0.629	0.008	81.92659	0.000000	0.00029	0
130	7663.71	8614.46	0.590	0.008	73.16826	0.000000	0.00011	0
150	7663.95	11593.92	0.541	0.009	62.36655	0.000000	0.00004	0
170	7664.21	14859.22	0.487	0.009	51.38793	0.000000	0.00002	0
190	7664.51	18532.63	0.426	0.011	40.55862	0.000000	0.00001	0
210	7664.84	22599.46	0.359	0.012	30.50629	0.000000	0.00001	0
230	7665.21	27100.40	0.285	0.013	21.46792	0.000000	0.00000	0
250	7665.61	32095.77	0.203	0.015	13.49102	0.000000	0.00000	0
270	7666.04	37390.22	0.116	0.017	6.82393	0.000000	0.00000	5.6393E-18
290	7666.50	43067.23	0.023	0.019	1.17945	0.119110	0.00000	9.86077E-08
310	7667.00	49203.99	-0.078	0.021	-3.64817	0.999868	0.00000	5.53998E-07
							1	6.52605E-07

Y se llega a un valor del índice de confiabilidad de la estructura real del puente Tampico de:  $\beta = 4.84$

En base a los resultados obtenidos en el modelo del puente Tampico, es decir, la respuesta del elemento crítico (pila principal del margen izquierdo) ante las acciones y calculando su resistencia, se calcula su estado límite G como se marca en la ecuación (3.3), también se obtiene  $\sigma_G$  (desviación estándar) como lo marca la ecuación (3.5), lo anterior sirve para calcular el índice de confiabilidad asociado a cada velocidad de viento de la ecuación (3.2), esto puede observarse en las columnas 1 a 6 de la tabla 4.4, en la misma tabla también se incluyen las probabilidades de falla del puente condicionales a la ocurrencia de dichas velocidades y se integró todo aplicando el teorema de la probabilidad total.

$$P_{Total} = \sum [P_f | V_{m\acute{a}x}] \cdot P_{ocurr} \quad (4.4)$$

Como puede observarse, se consideraron valores de velocidad del viento que cubren todo el rango posible de velocidades en el sitio considerado. También se incluyeron las probabilidades de falla del puente condicionales a la ocurrencia de dichas velocidades y se integró todo aplicando el teorema de la probabilidad total.

Por otro lado, se llega a un valor del índice de confiabilidad  $\beta = 4.84$ , del elemento crítico de la estructura del puente Tampico, como ya se dijo antes este valor puede ser extrapolado de tal manera que se asocia con el diseño real de la estructura del puente Tampico.

### *4.3 Costo inicial y estimación del costo esperado de daño del puente Tampico*

El costo inicial para fines de este estudio, debido a que es evaluación del diseño de una construcción existente, se tomará como el costo que reporta la literatura y que además se considera como un costo a valor presente, aunque convendría en estudios posteriores hacer un análisis detallado de costos, el cual, como se explica

anteriormente ya incluye el costo de los materiales, el costo de la mano de obra, el costo del financiamiento.

$$\text{Costo inicial. } C_i = \$140 \text{ (millones)}$$

#### Estimación del costo esperado de daño

Por otra parte, para obtener el costo esperado de daño se estiman los costos que lo integran, el costo de reparación/sustitución, costo de fatalidad, pérdidas económicas debido a la interrupción del servicio, por lo que se comenzará con el costo de reparación/restitución.

##### a) Costo de reparación / restitución:

El costo de reemplazo de la estructura se refiere al costo que tiene retirar los escombros de la estructura que ha fallado y el volver a construir otra estructura, y su valor es como ya se indicó aproximadamente es de  $1.20 C_i$ , Tomando en cuenta que:

$$C_i = \$140 \text{ (millones)}$$

Entonces el costo de reemplazo de la estructura asociado con un estado límite donde las cargas actuantes son mayores que las cargas resistentes), sería de  $1.20 C_i$ :[11]

$$C_r = \$168 \text{ (millones)}$$

En segundo plano se tiene el costo por interrupción del servicio:

##### b) Costo por interrupción del servicio.

Se consideran las condiciones particulares del puente Tampico. Por tanto, las pérdidas económicas pueden estimarse en base al tiempo de reparación y/o restitución del mismo, dichas pérdidas están asociadas con la falla de la pila principal del margen izquierdo, y es un estimado de los ingresos perdidos a causa de que el puente Tampico no será usado, tales como: la pérdida de peaje en la caseta, los vehículos que circulen sobre el puente en el momento del colapso, las pérdidas de productos y tiempos para las industrias para transportar sus productos, costo por operación vehicular

extraordinaria (costo por combustible y las horas hombre para rodear y tener acceso a las ciudades que une el puente), y quizá la fracción mas importante del costo por interrupción del servicio, el costo que se refiere a la paralización de las actividades portuarias por la posible fragmentación del claro central del puente y su precipitación al caudal del Río Pánuco impidiendo el paso de los barcos. En base al tiempo de construcción de la totalidad de la obra que es de 2.2 años y el tiempo empleado para colocar las dovelas del tramo central que fue de 5 meses, Asumiéndose entonces un periodo de reconstrucción y/o restitución de 6 meses para el tramo central que es el más crítico y las pilas principales que unen dicho claro.

Con base a lo descrito anteriormente, se estiman los costos por la interrupción del servicio como sigue:

**Pérdidas de peaje en la caseta:**

Las pérdidas de peaje en la caseta, se refieren a la cantidad monetaria que dejara de recibirse por la interrupción del servicio durante el tiempo de reconstrucción del puente (se estima sea de 6 meses), y se relaciona explícitamente con la tarifa de la caseta de acuerdo al número de ejes de los vehículos y con la cantidad de vehículos que transitan por esa carretera (tránsito diario promedio anual).

Según los datos estadísticos de la SCT [27] se tiene que:

Tabla 4.5 Peaje de la caseta del km 191 de la carretera Tuxpan-Tampico

CAMINOS Y PUENTES	AUTOS	AUTOBUSES			CAMIONES									EEA	EEC
	A	B2	B3	B4	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9			
PTE. PANUCO	\$15	\$30	\$30	\$30	\$30	\$30	\$57	\$57	\$81	\$81	\$81	\$81	\$8	\$15	

EEA EJE EXCEDENTE AUTOS  
EEC EJE EXCEDENTE CAMION

La tabla 4.5 contiene los datos del peaje de la caseta de acceso al puente Tampico de acuerdo a la clasificación vehicular (autos, autobuses y camiones), las cifras están en moneda nacional, y son las que están vigentes desde el 20 de diciembre de 2007, en tabla expedida por Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos [5].

Ahora se necesita conocer el volumen de TDPA (Tránsito Diario Promedio Anual), que se conoce como el número total de vehículos que pasan durante el periodo de un año [19], dividido entre el número de días del año, dado en vehículos por día. Esto es:

$$TDPA = \frac{TA}{365}$$

donde:

**TA: Tránsito Anual (Número total de vehículos que transitan en un año)**

De los datos de la SCT, se tiene que el TDPA= 4358 vehículos/día

Tabla 4.6 Porcentaje de vehículos de acuerdo al número de ejes [5].

LUGAR	PORCENTAJE DE VEHICULOS DE ACUERDO AL NÚMERO DE EJES							
	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS
TAMPICO	66	9.6	7.8	3	5.9	3.8	2.1	1.8

En primera instancia, con ayuda de las tablas 4.5 y 4.6 puede estimarse la máxima pérdida económica por la interrupción de cobro de peaje en la caseta en un día, y se presenta en la tabla 4.7.

Tabla 4.7 Pérdidas por peaje en un día

Pérdidas de peaje por día			
Clasificación	# Vehículos	Peaje	Importe
A	2876	\$15.00	\$43,144.20
B	418	\$30.00	\$12,551.04
C2	340	\$30.00	\$10,197.72
C3	131	\$30.00	\$3,922.20
T3S2	257	\$57.00	\$14,655.95
T3S3	166	\$57.00	\$9,439.43
T3S2R4	92	\$81.00	\$7,412.96
OTROS	78	\$5.00	\$392.22
		Suma	\$101,715.72

De acuerdo al resultado anterior, y considerando los 6 meses de reconstrucción, el costo máximo estimado por ese periodo es:

$$P_p = 101715.72 * 30 * 6$$

$$P_p = 18.31 (\$ \text{ millones})$$

### Pérdida de vehículos sobre el puente al momento del colapso:

De los datos estadísticos de la SCT [27], se tiene que el tránsito diario promedio anual TDPA= 4358 vehículos por día, pero debido a que el mayor número de afluencia vehicular se realiza durante el día entonces solo se toman 12 horas para que transiten estos vehículos:

$$\frac{4358}{12} = 363 \frac{\text{vehículos}}{\text{hora}}$$

Si se tiene una longitud del puente de 1543m y es transitado a una velocidad promedio de 60km/h, entonces el tiempo de recorrido de los vehículos de aproximadamente 1.5 min, así que ahora solo habrá que considerar los vehículos que estarían sobre el puente en ese lapso de tiempo.

$$\frac{363}{60} = 6 \frac{\text{veh}}{\text{min}}$$

Así que, si en los 1.5 min se encuentran en el puente 9 vehículos por carril, se tiene un total de 36 vehículos por cada 1.5 min en los 4 carriles que conforman la calzada del puente.

$$6 \text{ vehículos} * 1.5 \text{ min} * 4 \text{ carriles} = 36 \text{ vehículos}$$

Ahora se obtiene la distribución de estos 36 vehículos en base al porcentaje de clasificación vehicular obtenida la página de la SCT [27], y se presenta el costo por pérdida de vehículos sobre el puente al momento del colapso.

Tabla 4.8 Pérdida de vehículos sobre el puente

Pérdida de vehículos sobre el puente al momento del colapso				
Clasificación	# vehículos	\$ vehículo	\$ mercancía	Importe
A	24	\$45,000.00	\$0.00	\$1,080,000.00
B	3	\$200,000.00	\$0.00	\$600,000.00
C2	3	\$220,000.00	\$250,000.00	\$1,410,000.00
C3	1	\$220,000.00	\$300,000.00	\$520,000.00
T3S2	2	\$270,000.00	\$400,000.00	\$1,340,000.00
T3S3	1	\$270,000.00	\$450,000.00	\$720,000.00
T3S2R4	1	\$500,000.00	\$600,000.00	\$1,100,000.00



OTROS	1	\$5,000.00	\$0.00	\$5,000.00
			Suma	\$6,775,000.00

La tabla 4.8 muestra la secuencia de cálculo del costo de la pérdida de vehículos sobre el puente al momento del colapso, en la primera columna aparece la clasificación vehicular, en la segunda el número de vehículos de acuerdo a la clasificación, en la tercera columna se incluye un valor promedio de adquisición de cada tipo de vehículo, en la cuarta columna se estima un valor de la mercancía que transportan los camiones de acuerdo a su capacidad y en la última columna se muestra el importe perdido de acuerdo al número de vehículos, su clasificación, el valor del vehículo, el valor de la mercancía que transportan.

En el último renglón se muestra la suma de los importes, que representan en sí, la máxima pérdida económica por los vehículos que se encuentran sobre el puente en el momento del colapso, incluyendo los productos que transportan. Así este valor es:

$$P_v = 6.76 (\$ \text{ millones})$$

#### Pérdida de ingresos al Puerto:

Una parte muy importante del costo por interrupción del servicio es el costo que se refiere a la paralización de las actividades portuarias por la posible fragmentación del claro central del puente y su precipitación al caudal del Río Pánuco impidiendo el paso de los barcos. Así que se tienen que estimar las pérdidas de ingresos al puerto como sigue:

Se parte de los datos estadísticos por año más completos que se tienen en la página del puerto de Tampico [22] que son los siguientes:

Tabla 4.9 Arribo de embarcaciones al puerto de Tampico en el año 2006

MES	ARRIBO DE EMBARCACIONES A PUERTO EN 2006					
	COMERCIAL	PETROLEOS	CRUCEROS	TOTAL	% Comercial	% Petróleo
ENERO	53	26	1	80	66.3	32.5
FEBRERO	49	22	0	71	69.0	31.0
MARZO	44	32	0	76	57.9	42.1
ABRIL	50	24	0	74	67.6	32.4

MAYO	46	23	0	69	66.7	33.3
JUNIO	46	23	0	69	66.7	33.3
JULIO	53	26	0	79	67.1	32.9
AGOSTO	53	30	0	83	63.9	36.1
SEPTIEMBRE	46	28	0	74	62.2	37.8
SUMAS	440	234			65%	35%

En la tabla 4.9 se puede observar que el porcentaje de embarcaciones comerciales (alimentos, acero, madera, minerales) por año es del 65% y el de embarcaciones de petróleo (petróleo crudo, gasolina y diesel) es el 35%.

También es necesario saber datos históricos sobre el movimiento anual de productos que se importan o se exportan en el puerto de Tampico (en miles de toneladas), y se presenta una gráfica en la figura 4.2 con los datos de movimientos anuales de carga desde 1996 hasta el 2005.

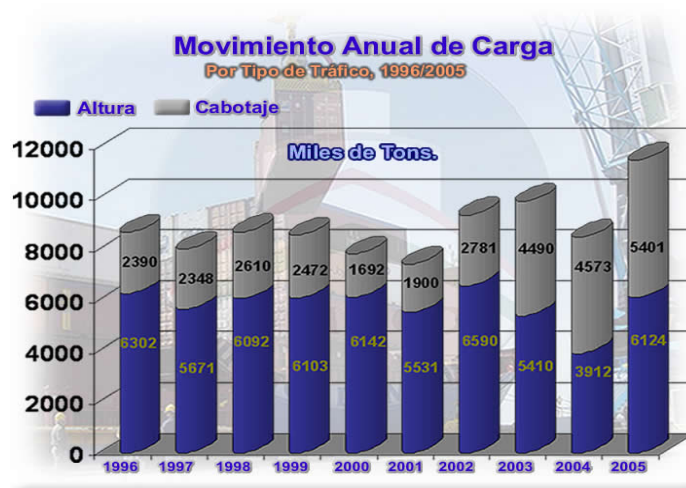


Figura 4.2 Movimiento Anual de Carga por tipo de Tráfico.

La figura 4.2 muestra los movimientos de carga anual por tipo de tráfico, distingue las cifras del tráfico de altura y el de cabotaje.

El término de tráfico de altura se emplea cuando se atienden embarcaciones, personas y bienes en navegación entre puertos, terminales o marinas nacionales con puertos en el extranjero, mientras que el término tráfico de cabotaje se refiere a la navegación entre distintos puertos sin llegar a perder de vista la costa.

Las estadísticas de carga de las embarcaciones del puerto de Tampico que se muestra en la tabla 4.10, está compuesta en un 65% de embarcaciones comerciales que transportan (alimentos, acero, madera, minerales), y el otro 35% está compuesto por embarcaciones petroleras que transportan (petróleo crudo, gasolina y diesel)

Tabla 4.10 Movimiento anual de carga por tipo de tráfico.

Año	Altura	Cabotaje	Carga (Miles de Ton)
1996	6,302	2,390	8,692
1997	5,671	2,348	8,019
1998	6,092	2,610	8,702
1999	6,103	2,472	8,575
2000	6,142	1,692	7,834
2001	5,531	1,900	7,431
2002	6,590	2,781	9,371
2003	5,410	4,490	9,900
2004	3,912	4,573	8,485
2005	6,124	5,401	11,525
2006	4,722	4,452	9,174
		Suma:	97,708

Con base a los datos históricos de movimientos anuales de carga que se explican anteriormente se hace un promedio para saber la carga promedio que se mueve en un año en el Puerto de Tampico [22].

$$C_{ap} = \frac{97708}{11} \quad ; \quad C_{ap} = 8883 \text{ (miles de toneladas)}$$

Ahora se debe de considerar que el tiempo que se perjudicará el paso de los barcos debe ser minimizado, así que solo se verá afectado el tránsito marítimo por 3 días debido a que es el tiempo en que se tomarían las medidas de emergencia para restablecer el movimiento marítimo en el río.

Con lo cual puede determinarse la carga que no podrá entrar al Puerto de Tampico, y es del orden de:

$$\frac{8883\text{Ton}}{365\text{Días}} * 3\text{Días} = 73 \text{ (miles de toneladas)}$$

Si se sabe que el promedio de carga de cada buque es de 12.5 (miles de toneladas), esto representaría la necesidad de transportar las 73 (miles de toneladas) en 6 buques, como sigue:

Tabla 4.11 Buques de transporte

Tipo de carga	# Buques
Carga Comercial	4
Carga Petróleo	2

Ahora bien, con estos datos y las tarifas que se presentan en la página del Puerto de Tampico [22] se obtendrá el valor de las pérdidas por inactividad del Puerto de Tampico. Y se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 4.12 Pérdidas por inactividad en el Puente Tampico.

Pérdidas por inactividad en el Puerto de Tampico				
Concepto	Unidad	P.U.	Cantidad	Importe
Cuota fija de puerto (por embarcación)	Buque	\$25,004.25	6	\$150,025.50
Muellaje (por tonelada)	Tonelada	\$8.46	73000	\$617,580.00
Servicio a Pilotos	Hora	\$2,259.65	24	\$54,231.60
Servicio a autoridades portuarias, tripulación	Hora	\$2,259.65	24	\$54,231.60
Desembarque/Embarque	Tonelada	\$140.69	72328	\$10,175,826.32
Entrega/recepción	Tonelada	\$45.93	72328	\$3,322,025.04
Maniobras integradas	Tonelada	\$69.88	72328	\$5,054,280.64
Maniobra de contenedores llenos	Pza.	\$1,075.04	30	\$32,251.20
Reacomodo de contenedores	Pza.	\$963.34	30	\$28,900.20
Maniobra de contenedores en tierra (de patio a vehículo terrestre)	Pza.	\$582.56	30	\$17,476.80
Maniobra de contenedores de vehículo a bodega	pza.	\$115.16	30	\$3,454.80
Amarre y desamarre	hora	\$436.77	12	\$5,241.24
Grúa Portuaria "Gottwald" capacidad 100 Ton	Hora	\$8,030.00	36	\$289,080.00
Remolque CMP	Buque	\$27,159.00	6	\$162,954.00
Renta de Buque capacidad de 15 mil Toneladas	Buque	\$385,000.00	6	\$2,310,000.00
Renta de Buque Grúa capacidad de 15 mil Toneladas que están en el Puerto	Buque	\$385,000.00	10	\$3,850,000.00
			<b>Pérdidas:</b>	<b>\$26,127,558.94</b>

La tabla 4.12 presenta el cálculo de las pérdidas máximas por inactividad en el puerto Tampico por 3 días, en la primera columna se encuentran los conceptos más importantes en la operación de el puerto, en la segunda columna se presenta la unidad de medida del concepto, en la tercera columna se encuentra el precio unitario del concepto, en la cuarta columna se presenta la cantidad de unidades de cada concepto, y en la última columna se calculan los importes de cada concepto. En el último renglón está la suma de los importes, y representa en sí las pérdidas del puerto de Tampico en los 3 días necesarios para resolver la contingencia.

$$P_{puerto} = \$26.2 \text{ (millones)}$$

#### **Costos de operación vehicular extraordinaria:**

Representa el gasto que tendrán los usuarios del puente en tener que rodear el lugar para poder llegar a su destino, para poder estimar este costo es necesario tener información acerca de la ruta alternativa, precios de los combustibles, el rendimiento de los vehículos, salarios, y depreciación de los vehículos.

Se puede partir de explorar y marcar una ruta alternativa, en la figura 4.3 se muestra el recorrido extraordinario que tendrían que hacer los vehículos para llegar a su destino, la nueva alternativa significará para los usuarios 20km más de recorrido, que bajo el supuesto de una velocidad promedio de 60 km/hr, tardarían 20 min en recorrer esta distancia.



**Figura 4.3** Ruta alternativa por inactividad del Puente Tampico.

Considerando que los precios actuales de los combustibles, y los rendimientos de los vehículos en kilómetros por litro son los que se muestran en las tablas 4.13 y 4.14, y los datos se han recabado en campo.

**Tabla 4.13** Precio de los combustibles.

Combustible	Precio \$
Gasolina	7.17
Diesel	6.10

**Tabla 4.14** Rendimiento de los vehículos

Vehículo	Rendimiento (km/litro)
Camión	15
Autobús	13
Automóvil	9

También se hace la consideración que durante la vida útil de los vehículos recorren 700 mil kilómetros, y se parte de ello para calcular un porcentaje de depreciación que se tiene por recorrer los 20 km.

Por último se deben tomar en cuenta las horas hombre para recorrer la distancia extra de la ruta alternativa, suponiendo una velocidad de 60 km/h.

Los salarios mínimos generales (para una jornada de trabajo de 8 horas) que tiene vigencia desde del 7 de Enero de 2008 en las áreas geográficas en que para fines salariales se ha dividido a la República Mexicana, se señalan a continuación [25]:

Área Geográfica “A”	\$ 52.59
Área Geográfica “B”	\$ 50.96
Área Geográfica “C”	\$ 49.50

El municipio de Tampico del Estado de Tamaulipas forma parte del área Geográfica “B”. Esta información se obtuvo de Internet [25].

Tabla 4.15 Costo por operación vehicular extraordinaria en 1 día.

Costo por operación vehicular extraordinaria en 1 día								
Clasificación	# Vehículos	# km	\$ Gasolina	\$ Diesel	\$ Vehículo	Depreciación	Horas Hombre	Importe
A	2876	20	9.560		\$45,000.00	\$1.26	\$2.12	\$37,228.65
B	418	20		9	\$200,000.00	\$5.60	\$2.12	\$7,157.42
C2	340	20		14	\$220,000.00	\$6.16	\$2.12	\$7,423.56
C3	131	20		14	\$220,000.00	\$6.16	\$2.12	\$2,855.22
T3S2	257	20		14	\$270,000.00	\$7.56	\$2.12	\$5,975.23
T3S3	166	20		14	\$270,000.00	\$7.56	\$2.12	\$3,848.45
T3S2R4	92	20		14	\$500,000.00	\$14.00	\$2.12	\$2,716.15
							Suma	\$67,204.68

En la tabla 4.15 se presenta el cálculo del costo por operación extraordinaria en 1 día, en la primer columna se muestra la clasificación vehicular, en la columna siguiente se presentan las cantidades de vehículos que se consideran por cada clasificación vehicular, en la tercera columna la distancia de la ruta alternativa, en la cuarta y quinta el importe de combustible gastados en el recorrido de la distancia de la ruta alternativa, la quinta columna se usa como base para calcular la depreciación del vehículo, en la sexta columna se toma la fracción correspondiente de salario que las personas estarían dejando de percibir, en la última columna se encuentra el importe perdido por cada tipo de vehículo. En el último renglón está la suma de los importes,

que representan en sí, el costo máximo por operación vehicular extraordinaria durante un periodo de 6 meses.

$$P_{oe} = \$67204.68 * 30 \text{ días} * 6 \text{ meses}$$

$$P_{oe} = \$12.10 \text{ (millones)}$$

El costo por la interrupción del servicio se integra como sigue, y es el valor máximo que se puede presentar en caso de un colapso del puente Tampico:

Tabla 4.16 Integración del costo de interrupción del servicio del puente Tampico.

Integración del costo de interrupción del servicio	\$ (millones)
Perdidas de peaje en la caseta:	18.31
Pérdida de vehículos sobre el puente	6.76
Perdidas de ingreso al Puerto	26.2
Perdidas por operación vehicular extraordinaria	12.10

La tabla 4.16 presenta un resumen de la integración del costo por interrupción del servicio en el puente Tampico, de tal manera que al sumarlos obtenemos el costo total máximo.

$$C_e = \$63.37 \text{ (millones)}$$

**Costo de fatalidad ( $C_f$ ).**

Por otra parte, debido al gran número de decesos que se presentan en fenómenos meteorológicos, y en este caso en particular sobre una posible falla del puente Tampico, se hace necesario tomar en cuenta los costos de fatalidad.



Para el cálculo del costo asociado con la pérdida de vidas humanas (fatalidad), se necesita el número promedio de pasajeros de los vehículos que transitan por el puente Tampico en el momento del colapso. En suma, esto es suponiendo que:

- (a) El promedio individual anual de ingreso es \$18600 (para la zona “B” Tampico, Tamaulipas). Con un Salario diario de \$50.96
- (b) El promedio de vida individual se sitúa en los 25 años [11].

La tabla 4.17 muestra la secuencia de cálculo del costo por fatalidad, basada en los pasajeros promedio por vehículo, en la primera columna, se da la clasificación de los vehículos, en la segunda columna el número estimado de vehículos que se encuentran en el puente al momento del colapso, de acuerdo a su clasificación vehicular, en la tercera columna el número promedio de pasajeros por cada tipo de vehículo, en la cuarta columna el salario percibido en un año por una persona, en la quinta columna el promedio de años de vida individual para la población de México, en la sexta columna se calcula el importe por cada tipo de vehículo. En el último renglón se calcula el importe total del costo por fatalidad

Tabla 4.17 Costo por fatalidad.

Costo por Fatalidad (Pasajeros promedio por vehículo)					
Clasificación	# Vehículos	# Pasajeros	\$ salario año	Promedio vida (años)	Importe
A	24	3	18600	25	\$33,480,720
B	3	25	18600	25	\$34,875,750
C2	3	1	18600	25	\$1,395,030
C3	1	1	18600	25	\$465,010
T3S2	2	1	18600	25	\$930,020
T3S3	1	1	18600	25	\$465,010
T3S2R4	1	1	18600	25	\$465,010
				Suma	\$72,076,550.00

Por lo tanto, el valor máximo del costo de fatalidad  $C_f$  puede ser estimado en:

$$C_f = \$72.08 \text{ millones}$$

Una vez que se han estimado los costos de daño, en la tabla 4.18 se presenta el resumen que incluye los costos por reparación/restitución, interrupción del servicio y fatalidad.

Tabla 4.18 Resumen de los costo de daño.

Costo	Importe (millones de pesos)
Costo de reparación/restitución	168.00
Costo por interrupción del servicio.	63.37
Costo de fatalidad.	72.08

Por último se tiene el costo estimado máximo de daño es la suma de los costos presentados en la tabla 4.18. Por tanto el costo estimado máximo de daño es:

$$C_d = \$303.45 \text{ (millones de pesos)}$$

## Capítulo 5

### OBTENCIÓN DEL NIVEL DE RIESGO ACEPTABLE.

#### 5.1 Cálculo de índice de confiabilidad aceptable.

El problema de optimización estructural como ya se dijo, se basa en la búsqueda de un nivel de seguridad óptimo que equilibre la confiabilidad de la estructura con su precio. Esto denota que para conseguir un diseño óptimo la estructura debe de ser sometida a un estudio de confiabilidad que indique su comportamiento y la forma de salvaguardar la inversión. Sin embargo para una construcción existente como es este caso, se debe tener primero el índice de confiabilidad del diseño real de la estructura (calculado en el capítulo 3), y el índice de confiabilidad óptimo de la estructura, y en el desarrollo de esta capítulo se mostrará cómo obtenerlo.

Con base a las ecuaciones de la sección de optimización estructural del Capítulo 3 se calcula el índice de confiabilidad óptimo  $\beta_a$ . En el caso del presente estudio, se usó un valor de vida útil T de 200 años y una tasa de descuento r de 8%. Además se empleó la relación  $C_2/C_i = 0.045$  (De León et al, 2007) [13].

$$CM = \frac{FVP * CF}{C_2} \quad (5.1)$$

Donde CM es una medida de las consecuencias de falla en términos económicos, aunque es adimensional, PVF es factor de valor presente, CF es el costo esperado de falla, y  $\Delta C_i$  es la pendiente de la curva de costo inicial, es decir, el costo necesario para incrementar la seguridad en un margen especificado (un ciclo de la escala de logaritmos).

Datos: T=200 años

r=0.08

FVP=12.499

La tabla 5.1 muestra los cálculos para obtener el índice de confiabilidad óptimo de la estructura, en la primer columna se muestran valores de costos de falla en un intervalo razonable, la columna 2 muestra una medida de las consecuencias de falla calculada con las formula 5.1, las últimas dos columnas muestran la probabilidad de falla y el índice de confiabilidad asociado a la probabilidad de falla, respectivamente.

Tabla 5.1 Cálculo del índice de confiabilidad.

CF	CM	$P_f$	$\beta$
1200	333333.296	1.305E-06	4.70
1000	277777.747	1.566E-06	4.66
750	208333.31	2.088E-06	4.60
500	138888.873	3.132E-06	4.52
400	111111.099	3.915E-06	4.47
303.45	84291.6572	5.1607E-06	4.41
300	83333.324	5.22E-06	4.40
200	55555.5493	7.83E-06	4.32
100	27777.7747	1.566E-05	4.16

Se genera una curva que presenta las variaciones de la probabilidad de falla  $P_f$ , contra el costo de consecuencias de falla, esto se muestra en la figura 5.1

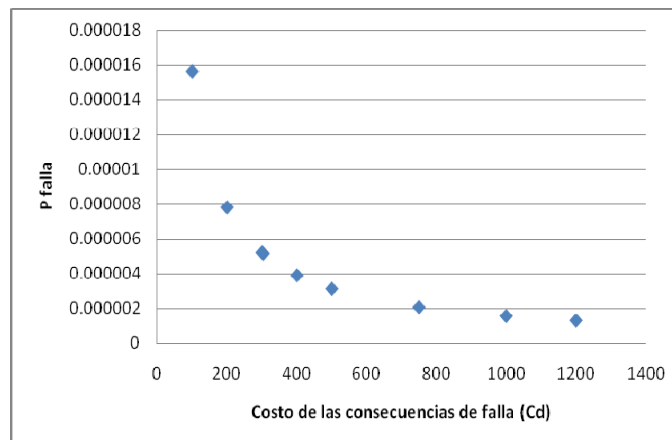


Figura 5.1 Probabilidad de falla contra costos de consecuencias de falla (mill. de pesos).

En base a la figura 5.1, se genera otra curva, donde esta vez se presenta la variación de la confiabilidad aceptable  $\beta$ , contra el costo de consecuencias de falla.

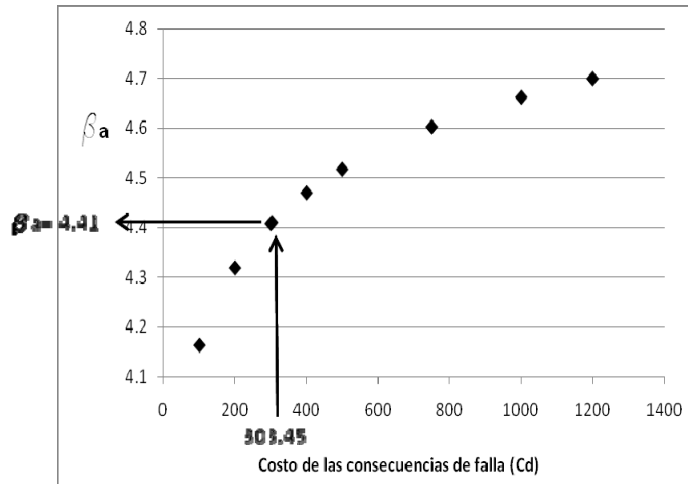


Figura 5.2 Índice de confiabilidad contra costos de consecuencias de falla (mill. de pesos).

Como se esperaba, cuando el costo de las consecuencias de falla crece, se debe de tener un índice de confiabilidad mayor, para garantizar que la estructura no colapsará, lo que provocaría los daños que se quieren evitar.

Ahora, puesto que se estima que el costo de las consecuencias de falla es de \$303.45 millones de pesos, se observa que al entrar a la gráfica (de la figura 5.2) con esta abscisa, se llega a un valor del índice de confiabilidad aceptable de ( $\beta_a=4.41$ ). Este valor se compara con el índice de confiabilidad del diseño real, con la finalidad de hacer recomendaciones a los operadores responsables del mantenimiento de la estructura del puente Tampico.

## 5.2 Análisis de resultados

En este estudio se toma en cuenta la incertidumbre del parámetro principal de diseño que es la velocidad del viento, debido a que con los recientes cambios meteorológicos, están volviéndose una preocupación para los requerimientos de seguridad y medidas de mitigación, especialmente para una infraestructura localizada en la costa y expuesta a viento muy intenso.

Como se puede apreciar, el índice de confiabilidad inherente al diseño real del puente Tampico  $\beta = 4.84$ , resultó mayor que el índice de confiabilidad óptimo  $\beta_a = 4.41$ , se aclara que este último valor se refiere a la confiabilidad óptima total de la estructura. Sin embargo, se puede comparar directamente con el valor de confiabilidad de la pila pues en la estructura va a regir el valor más pequeño de la confiabilidad, independientemente de si se encuentra en la cimentación, en la calzada o en la propia pila. Consecuentemente esto implica que la estructura es confiable pues su  $\beta$  está por encima del aceptable.

El resultado se puede traducir, entonces, en que la estructura del puente tiene una probabilidad de falla aceptable, de hecho, su nivel de seguridad es comparable con el de estructuras marinas, como las plataformas petroleras, y solo es recomendable tener medidas de mantenimiento preventivo para que la desigualdad no se invierta en el resto de la vida útil de la estructura del puente.

Al realizar una comparación del costo inicial del puente Tampico  $C_i = \$140$  millones y el costo evaluado de las posibles consecuencias de falla  $C_d = \$303.45$  millones queda explícitamente comprobado por qué es conveniente invertir en análisis de confiabilidad ya que los costos de consecuencias de falla representan 2.17 veces la inversión inicial, además de que incluyen un desprestigio de los diseñadores y problemas legales, entre otros.



## CONCLUSIONES

1. Se concluye que los resultados de este trabajo están sujetos a las hipótesis planteadas y por tanto se requerirá profundizar en el desarrollo de la metodología para tener un mayor control sobre el valor de los coeficientes empleados.
2. Se ha ilustrado una valoración de la confiabilidad estructural de una obra de infraestructura muy importante de México, por su función y por la inversión inicial para su construcción, el puente Tampico, que une los estados de Veracruz y Tamaulipas, considerando los rasgos de incertidumbre de la velocidad de viento de la región y también fue estimada la probabilidad de falla óptima. Para ello se presentan las ecuaciones para estimar la confiabilidad inherente a una estructura de acuerdo a sus dimensiones. Del mismo modo se plantearon las ecuaciones que permiten calcular el nivel de confiabilidad óptimo en función del tiempo que tendrá como vida útil, de la tasa de interés en el mercado y de la magnitud de las consecuencias que tendría la discontinuidad del servicio que ofrece la obra. Al comparar los resultados de ambos índices de confiabilidad es posible de algún modo tomar decisiones sobre si el nivel de seguridad de la estructura es aceptable o requerirá de un tipo de mantenimiento o en el peor de los casos una re-estructuración.
3. Para facilitar el trabajo se limitó el alcance al análisis de confiabilidad de un solo elemento estructural, una de las dos pilas principales. En realidad es necesario tomar en cuenta todos los elementos que componen la estructura del puente, sin embargo, se puede comparar directamente con el valor de confiabilidad de la pila pues en la estructura va a regir el valor más pequeño de la confiabilidad, independientemente de si se encuentra en la cimentación, en la calzada o en la propia pila.



4. Se llegó a la conclusión de que, el índice de confiabilidad inherente al diseño real del puente Tampico  $\beta = 4.84$ , resultó mayor que el índice de confiabilidad aceptable  $\beta_a = 4.41$ , lo que indica que se está en el caso ideal donde,  $\beta > \beta_a$ , esto implica que la estructura tiene una probabilidad de falla suficientemente baja y solo es recomendable tener medidas de mantenimiento preventivo para que la desigualdad no se invierta en el resto de la vida útil de la estructura del puente.
5. Es claro entonces, que un análisis de confiabilidad ayuda al administrador y operador de la obra a tener una idea de qué tan cerca o lejos del comportamiento óptimo se encuentra la estructura que se está revisando, esto es, que se puede confiar en que la estructura tiene un nivel de confiabilidad y un comportamiento adecuado, lo que lleva a pensar que la probabilidad de falla está en un rango aceptable. Esto evita muchos problemas futuros como un alto riesgo en cuanto a la pérdida de vidas humanas, y pérdidas económicas.
6. Un análisis de confiabilidad puede ser aplicado en la etapa de diseño o de planeación de la obra importante para alcanzar y mantener niveles óptimos de confiabilidad para minimizar costos en el largo plazo.
7. Para determinar si es factible o no en la intervención de una estructura cuando sus niveles de confiabilidad no son óptimos, se deben comparar con los costos de consecuencias de falla de la obra en particular con las primas que cobran las compañías aseguradoras, para elegir la que represente el menor costo. Además, este tipo de análisis permite revisar si el costo de las primas de seguros es el adecuado.

## RECOMENDACIONES

1. El procedimiento expuesto puede extenderse más allá, para lograr tener el comportamiento óptimo al planear la inspección y tiempo de mantenimiento. También al análisis puede aplicarse a otros tipos de infraestructura importantes, expuestos a altas velocidades de viento en orden con las políticas y dispositivos de seguridad para las regiones costeras basados en la valoración de riesgo y administración. Así, estas herramientas permiten respaldar la planeación de la infraestructura de puentes y también la marítima y portuaria del país. Se recomienda extender su aplicación en estos ámbitos.
2. Se recomienda hacer un levantamiento físico sobre la geometría de las secciones y el estado de deterioro de la estructura del puente, a fin de determinar de forma mas precisa el valor de su confiabilidad. Además de hacer reevaluaciones periódicas de la confiabilidad del puente para darle mantenimiento y evitar que se incremente excesivamente el riesgo de pérdidas humanas y económicas.
3. Se recomienda hacer un análisis detallado a costos actuales para obtener resultados más precisos.
4. Con el desarrollo de este tipo de metodologías para evaluar la confiabilidad es posible tomar la decisión de: atender un elemento de la estructura para evitar una falla o de suspender el paso de vehículos con cierta velocidad de viento.
5. Se recomienda hacer un análisis de las acciones de viento por el método dinámico a fin de considerar los efectos de las vibraciones de la estructura y llegar a un valor de confiabilidad más preciso.

### *Bibliografía.*

- [1.] ASHTO, (2002) “Standard Specifications for Highway Bridges”, American Association of State Highway and Transportation Officials, US.
- [2.] Ang, A. H.S., and Tang, W. H. (1985) “Probability Concepts in Engineering Planning and design . Vol 2, Risk, Reliability and decisions. John Wiley & Sons, New York.
- [3.] Ang, A H.S and Tang W., (2007), “Probability Concepts in Engineering Planning and design . Vol 1, Basic Principles, John Wiley & Sons, 2a. Edition, New York.
- [4.] Benjamin, J. R. and Cornell, C. A (1970) “Probability, Statics, and Decisions for Civil Engineers”, Mc Graw Hill, New York.
- [5.] CAPUFE <http://www.transporte.com.mx>
- [6.] CENAPRED (2003), “Ciclones Tropicales”, CENAPRED, México D.F.
- [7.] CFE, (1993), “Manual de diseño de obras civiles, Diseño por Viento”, Instituto de investigaciones eléctricas, México D.F.
- [8.] COMPUTERS & STRUCTURES INC., SAP2000-V11, “Programa de Análisis Estructural”, Universidad De California Berkeley.
- [9.] Cornell, C. A., (1969) “Structural Safety Specification Based on Second-Moment Reliability” Symp. Of the Int. Assoc. of Bridges and Structures. London, England.

- [10.] Departamento del D.F., (2004), “Normas Técnicas Complementarias. Manual de Diseño por Viento”, México, D.F.
- [11.] De León, D (1996) Tesis Doctoral, “Integrating Socio-Economics in the Development of Criteria for optimal Aseismic Design of R/C Buildings” University of California
- [12.] De León, D., Ang A y Manjarrez L. (2006), “Structural Reliability of the Tampico Bridge under Wind Loading “, CIENCIA Ergo sum vol 15.Universidad Autónoma del Estado de México.
- [13.] De León, Ang A. y Manjarrez L. (2007), “Confiabilidad Estructural y Medidas de Riego para el Puente Tampico Bajo Cargas de Viento”, Revista Ingeniando, Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de México.
- [14.] De León D y Delgado D, (2007), “Hacia la Administración del Riesgo Sísmico en Obras de Infraestructura” XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.
- [15.] Dirección Estatal de Protección Civil de Tamaulipas (2007), “Diagnóstico de los Efectos Hidrometeorológicos en el Estado de Tamaulipas”, Cd Victoria Tamaulipas.
- [16.] Esteva, L. (2001) “Confiabilidad Estructural, Fundamentos y aplicaciones”, Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, D.F.
- [17.] González Cuevas R y Robles N,(2000), “Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado”, México D.F.
- [18.] James A y Dimitry V(1995) “ Diseño simplificado de edificios para cargas de viento y sismo” Limusa México D.F.

- [19.] Kraener y Pardillo (1993), **Ingeniería de tránsito en Carreteras**, Ed. Mc Graw Hill.
- [20.] Lugo Hubp J, **“Desastres naturales en América latina”**, Fondo de Cultura económica, México D.F.
- [21.] Meli, R., (1991), **“Diseño Estructural”**, Limusa, México, D.F.
- [22.] Puerto de Tampico <http://www.puertodetampico.com.mx>
- [23.] Sánchez Cortes F. (2007), Tesis de Licenciatura, **“Diseño Estructural de un Edificio de Acero Ubicado en una Zona Eólica con Base en Riesgo”**, Universidad Autónoma de Estado de México.
- [24.] Sánchez de León C., (2003), Tesis de Licenciatura, **“Regionalización eólica para el estado de Tamaulipas y aplicaciones prácticas en el diseño estructural de un edificio para la ciudad de Tampico, Tamaulipas”**, Universidad Autónoma de Tamaulipas.
- [25.] Secretaria de Administración Tributaria <http://www.sat.gob.mx>
- [26.] SCT (1994), **“Puente Tampico”**, México D.F.
- [27.] Secretaria de Comunicaciones y Transportes <http://www.sct.com.mx>
- [28.] Stahl, Bernhard, (1986), **“Reliability Engineering and Risk Analysis”**, Chapter 5, in **planning and design of fixed offshore platforms**, McClelland., B. and Reifel., M (Eds), VNR, New York.
- [29.] Walpole E. y Myers H. (1999), **“Probabilidad y Estadística para Ingenieros”**, Ed. Prince Hall, México D.F.

## Apéndice A

### *Características de Puente Tampico.*

El puente tiene una longitud de 1,543 metros. Lo componen tres partes una principal, de tipo atirantado y dos viaductos de acceso. La primera es de 878 metros, con un tramo central de 360 y a cada lado tres de 70 y uno de 49 metros. El viaducto de la margen izquierda es de 476 metros, con cuatro tramos de 63 y cuatro de 56, el de la margen derecha, de 189 metros con tres tramos de 63 metros cada uno.

El alineamiento vertical del puente tiene pendientes de 4.85%, en ambos extremos, y el tramo de 360 metros se aloja en una curva vertical circular de 3023 metros de radio, con lo que se logra un espacio libre vertical de entre el nivel del agua y la parte baja de la superestructura, no menor de 50 metros, par permitir el paso de embarcaciones de gran altura.

En planta, entre las pilas 5 y 10, se localiza una curva horizontal de 1 grado, con una longitud de 306 metros.

La superestructura es de concreto presforzado de sección cajón, a excepción de los 293.50 metros centrales del tramo de 360, donde es metálica de tipo ortotrópico. El ancho total es de 18.10 metro, permite alojar dos calzadas de 7 metros para la circulación de 4 líneas de tránsito, dos en cada dirección.

La subestructura está compuesta por 21 elementos de apoyo, dos caballetes extremos y 19 pilas, todos de concreto reforzado. Tiene una resistencia de 250 a 300 kg/cm<sup>2</sup> y su altura varía desde 5 hasta 45 metros. Las pilas son huecas, de sección rectangular de 2.40 por 6.40 metros con un espesor de 40 cm en sus paredes, para las correspondientes a los viaductos y 50 centímetros para las del tramo principal. Las que sirven de apoyo al tramo de 360 metros son de sección variable. En el arranque son rectangulares y están divididas en tres cuerpos: uno central vertical y dos laterales inclinados, que se unen por medio de un elemento horizontal a 48 metros de altura, en

el que queda contenida la sección de la superestructura. A partir de este nivel se levantan lateralmente dos columnas inclinadas, huecas, que convergen y se unen a 33 metros de altura, para continuar formando en sentido vertical la porción denominada “mástil” con una sección constante hexagonal, también hueca, de 2 metros por lado y 42 metros de altura.

El conjunto de las columnas y el mástil es denominado “pilón”, el cual, en este caso, por sus características geométricas, es una “Y” invertida. En el interior de las columnas y el mástil se dispuso de una escalera metálica con alumbrado que tiene como finalidad facilitar el acceso desde el nivel de calzada del puente hasta la parte superior del mástil. La altura del pilón es de 119 metros, por lo que, tomando en cuenta la longitud del elemento de cimentación, la altura total resulta de 185 metros.

El atirantamiento del tramo principal es axial, dispuesto en forma de medio abanico. Está formado por 44 cables de longitud variable, desde 58 hasta 206 metros. Los cables están constituidos por torones galvanizados, su diámetro nominal es de 160 milímetros y su área efectiva es de  $150 \text{ mm}^2$ . El número de torones varía de 33 hasta 60 por cable, se alojan en tobos de polietileno de alta densidad, de 20 cm de diámetro por 2 cm de espesor. En el interior del tubo fue inyectada una cera especial de alto punto de fusión, derivada del petróleo, contiene inhibidores químicos de corrosión y proporciona al acero una amplia protección contra el ambiente agresivo de la zona.

Los cables se fijaron al mástil en uno de sus extremos, mediante un sistema de anclaje pasivo y, por el otro extremo. Al tablero de la superestructura, mediante un anclaje activo, que permite poner pensión a cada uno, tanto en el proceso de construcción como durante la operación para verificarlos y ajustarlos, en caso necesario.

Fundamentalmente la cimentación es de tipo profundo, lograda con cilindros de concreto reforzado de sección circular hueca de 6.40 metros de diámetro exterior y 80 cm de espesor, en los apoyos del 8 al 12 y del 15 al 17. Fueron hincados en el terreno desde los 10 hasta los 65 metros de profundidad. En los apoyos números 13 y 14 del

tramo de 360 metros, fueron usados cajones de concreto reforzado con sección elíptica, miden 13.40 metros, en su eje mayor, y 10.50 en su eje menor. Contienen 4 celdas y el espesor de las paredes es de 1 metro; sus longitudes son de 65 y 30 metros, respectivamente. Los apoyos extremos, así como las pilas números 2 al 6 y 18 al 20, se cimentaron a superficie con la utilización de zapatas. Para la pila número 7 se usaron pilotes colados en el lugar, de 1.5 metros de diámetro y con una longitud máxima de 18.50 metros.

El puente Tampico fue diseñado con vehículo de proyecto HS-20 de las normas AASHTO, que se refiere a un camión con 3 ejes. Otro importante efecto de carga que soporta la estructura, es la acción de los vientos, hasta 250 km/hr.



## Apéndice B

El planteamiento y los conceptos mostrados, son los que aplicados por Stahl [28] en la revisión de confiabilidad de plataformas petroleras, y se aplicaron al desarrollo de este trabajo.

Hay varios textos en la teoría de probabilidad para ingenieros civiles [2][4] Solo los resultados mínimos se presentarán aquí como exigidos para desarrollar este ejemplo de aplicación al puente Tampico.

### *Aplicaciones de la teoría de probabilidad.*

Si el resultado de un experimento para medir un factor de diseño particular es absolutamente conocido, entonces se dice que el factor de diseño es determinístico, que el resultado puede caracterizarse por ser un simple número real. Sin embargo en la ingeniería práctica la capacidad de tensión del acero, y la velocidad del viento, por ejemplo, nunca tiene exactamente los mismos valores observados aún bajo condiciones aparentemente idénticas. En este caso la variable es llamada aleatoria.

### *Variable aleatoria.*

Una variable aleatoria, denotada por una letra mayúscula cursiva, es un juego de números reales asignados a los resultados de un experimento. La variable aleatoria puede ser discreta (ej.  $N$ = el número de huracanes) o continua sobre un intervalo (ej.  $X$ = la resistencia última del acero). La función de masa de probabilidad en el caso de variables discreta y la función de densidad de probabilidad en el caso de continua, definen completamente las probabilidades que se asocian con la variable aleatoria. La función masa de probabilidad esta definida como:

$$p_N(n) = P(N = n), \quad n = n_1, n_2, n_3, \dots \quad (\text{B.1})$$

donde  $N$  denota la variable aleatoria,  $P(\cdot)$  denota “probabilidad de”, y  $n$  denota valores específicos de la variable aleatoria. En el caso de variables continuas, la función de densidad de probabilidad es definida tal que:

$$P[a \leq X \leq b] = \int_a^b f_x(x) dx \quad (\text{B.2})$$

La función de distribución acumulada  $F_X(x)$  también da una descripción completa de de probabilidad de  $x$ . Su relación a la función de densidad se da por:

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f_x(x) dx \quad (\text{B.3})$$

Esto también debe de notar que:

$$f_x(x) = \frac{d}{dx} F_X(x) \quad (\text{B.4})$$

Una función de densidad de probabilidad típica y su relación con la función de distribución acumulada la figura B.1 lo ilustra. Vale la pena analizar la notación usada. Con  $f$  minúscula se denota la función de densidad y  $F$  mayúscula representa la función de distribución acumulada. La letra  $X$  mayúscula denota una variable aleatoria y la letra  $x$  minúscula representa un valor específico de la variable aleatoria  $X$ .

La media, promedio, o valor esperado de  $X$  se define como:

$$m_x \equiv E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x f_x(x) dx \quad (\text{B.5})$$

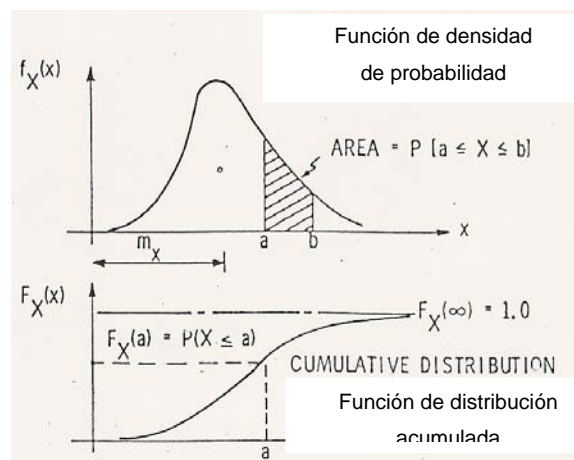


Figura B.1 Función de densidad de probabilidad y de distribución acumulada

Es una medida de la tendencia central de  $X$ . Geométricamente  $m_x$  es el centroide del área bajo la curva  $f_x(x)$ . La varianza se define como:

$$\sigma_X^2 \equiv E[(X - m_X)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_X)^2 f_X(x) dx \quad (\text{B.6})$$

Es una medida de la variabilidad de  $X$ , y geométricamente es el momento de inercia de el área bajo la curva de  $f_x(x)$  sobre  $m_x$ . La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza y tiene las mismas unidades que  $X$  y  $m_x$ . Una medida no dimensional de la variabilidad es el coeficiente de variación, se define como:

$$V_X = \sigma_X / m_X \quad (\text{B.7})$$

Para el caso de variables discretas, la integral indicada en las ecuaciones (B.4) y (B.5) se reemplaza por un signo de sumatoria.

Se ha desarrollado una variedad de funciones estándar para describir la distribución de una variable aleatoria. Estas en forma de funciones o modelos analíticos proporcionan una manera compacta de describir la distribución y también hace posible la extrapolación estimada de probabilidades, de una manera racional, más allá de los límites de los datos existentes. Algunas de las distribuciones normalmente usadas en el diseño en Ingeniería son: Poisson, normal, lognormal, gamma, Weibull, valores extremos tipo I y exponencial [28], y se muestran por Meli [21] en la siguiente figura B.2

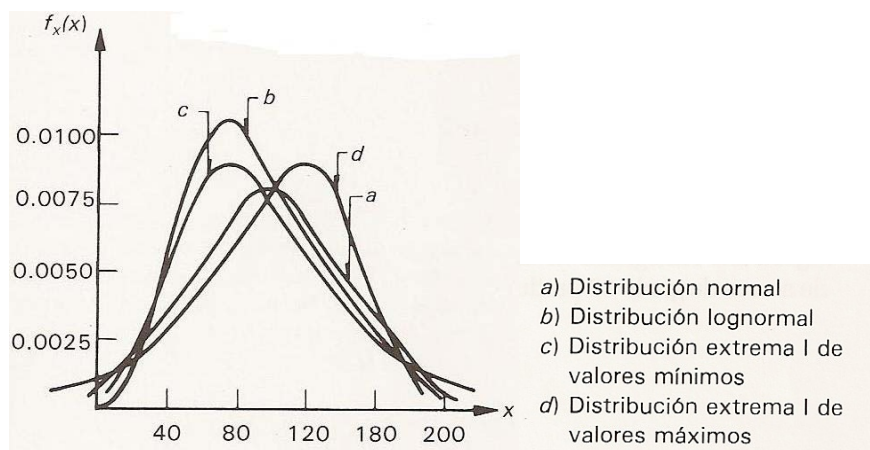


Figura B.2 Algunas funciones de distribución de probabilidades comunes de problemas de seguridad estructural (trazadas para una variable con media  $m_x = 100$  y desviación estándar  $\sigma_x = 50$ ).

**Análisis de confiabilidad.**

Si la carga de una estructura es también permitido que sea aleatoria, la probabilidad de falla (quizá en buenos términos sería el estado límite de probabilidad) de la estructura puede ser calculada. La carga y la resistencia son variables aleatorias que comprenden elementos de análisis de confiabilidad. Esto puede ser entendido examinando el punto de la función de densidad de probabilidades de cargas y resistencias ilustradas en la figura B.3. Por que se asume que hay independencia estadística entre variable de carga y resistencia, el punto de la función de densidad de distribución, pueden ser escritas como el producto de funciones de densidad individuales.

$$f_{R,L}(r, l) = f_R(r)f_L(l) \tag{B.8}$$

La probabilidad de falla se obtiene por la evaluación de la probabilidad de que un evento en el que la carga excede la resistencia. Esto se hace integrando sobre todos los valores de  $r$  y  $l$  donde la carga es mayor que la resistencia, como el mostrado en la región achurada de la figura B.3

$$\begin{aligned} P_f &= P(L > R) \\ &= \iint_{\varepsilon > r} f_{R,L}(r, l) dr dl \end{aligned} \tag{B.9}$$

Sustituyendo la ecuación (B.8), el resultado puede ser escrito de diferentes maneras, dependiendo del orden de integración de la región de falla:

$$p_f = \int_{-\infty}^{\infty} f_R(r) [1 - F_L(r)] dr \tag{B.10}$$

o también:

$$p_f = \int_{-\infty}^{\infty} f_L(l) F_R(l) dl \tag{B.11}$$

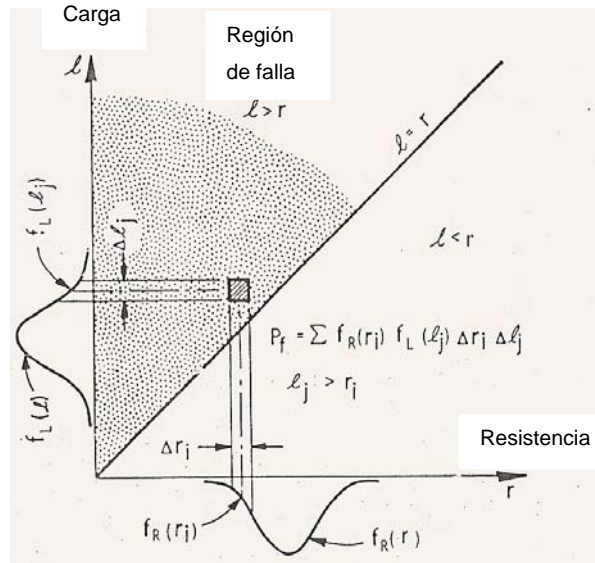


Figura B.3 Región de falla conjunta para las variables de carga distribuida y resistencia.

Debido a que la distribución de resistencias y cargas son consideradas estadísticamente independientes, el cálculo de la probabilidad de falla puede ser ilustrado de otra manera, y se muestra en la figura B.3 en el caso de distribución normal de las variables. La probabilidad de falla  $p_f$  es mostrada por la región sombreada bajo las dos colas de distribución. La función que limita la región sombreada es integrando la ecuación B.10 o B.11: la región de mayor sombreado, es la mayor probabilidad de falla. La esperanza de carga y resistencia se indica por  $\sigma_L$  y  $\sigma_R$ . Aproximadamente dos terceras partes de los valores pueden caer en  $\pm\sigma$  y sus límites se muestran por las regiones punteadas. Debe de notarse que la carga de diseño  $L_d$  y en valor nomina de la resistencia  $R_n$  son del lado seguro de los valores medios  $m_L$  y  $m_R$ , respectivamente. Y también puede ser visto como un incremento de los márgenes de seguridad cambiando la distribución aparte reducirían el área de sombreado de las colas de distribución y consecuentemente reduce la probabilidad de falla.

Esto lleva a la discusión de que el factor de seguridad nominal es en ocasiones llamado “factor de ignorancia”. El factor de seguridad nominal es la proporción de resistencia nominal a la carga de diseño (carga de diseño). Esto separa la resistencia de la carga. Si fuera posible predecir el límite inferior de la resistencia y el límite superior de la

carga con completa certeza, la distribución de probabilidad se truncaría, e incluso una separación más ligera entre la mínima resistencia y la máxima carga asegurarían la integridad estructural con probabilidad de falla cero. El hecho es, sin embargo, justamente que se usan factores de seguridad grandes en el diseño. Esta es realmente una admisión tácita de que las incertidumbres permanecen, y que determinísticamente solo aproximarse no es adecuado.

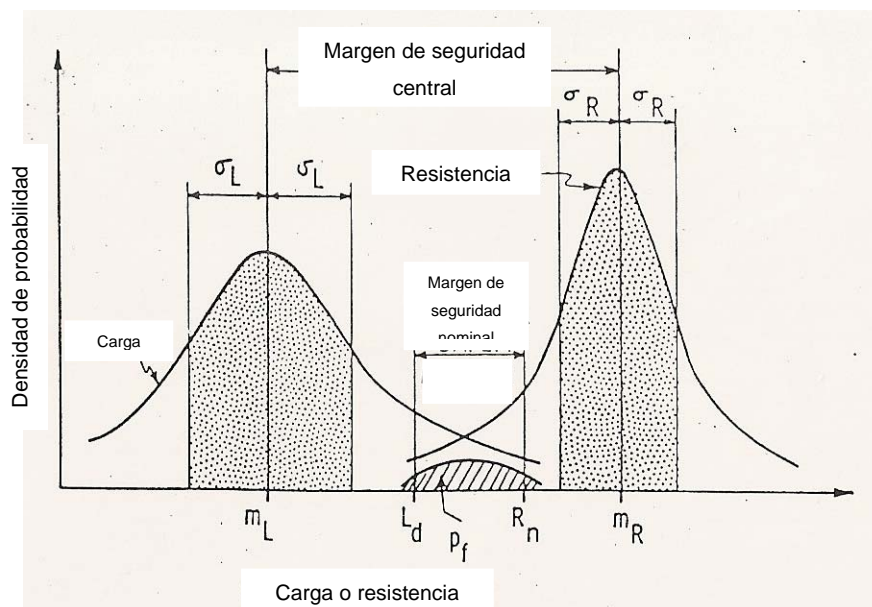


Figura B.4 Interferencia de distribuciones de carga y resistencia.

El análisis de confiabilidad proporciona un acercamiento a través de que las incertidumbres y tendencias pueden ser examinadas y cuantificadas, y tomar decisiones racionales a partir de ellas.

A la probabilidad de que la estructura no falle,  $1 - P_F$ , se llama *confiabilidad* de la estructura y el término confiabilidad estructural se ha adoptado para indicar el estudio con bases probabilistas de la seguridad de las estructuras, el cual lleva a la determinación racional de los factores de seguridad que deben adoptarse en el diseño. Para lograr una confiabilidad prefijada, se requiere adoptar cierto valor de seguridad que será menor mientras mayores sean las desviaciones estándar de la resistencia y de la acción, o sea mientras menor sea la incertidumbre que existe en las variables que intervienen en la seguridad.