	<b>GESTIÓN DE RECURSOS Y SERVICIOS BIBLIOTECARIOS</b>		<b>Código</b>	FO-GS-15
			<b>VERSIÓN</b>	02
	<b>ESQUEMA HOJA DE RESUMEN</b>		<b>FECHA</b>	03/04/2017
			<b>PÁGINA</b>	1 de 1
<b>ELABORÓ</b>		<b>REVISÓ</b>		<b>APROBÓ</b>
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad		Líder de Calidad

### RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): CARLOS ARTURO APELLIDOS: ULLOA CUERVO

NOMBRE(S): JHON EDINSON APELLIDOS: DOMINGUEZ ACERO

NOMBRE(S): OSCAR MANUEL APELLIDOS: PADILLA GARCÍA

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS

DIRECTOR:

NOMBRE(S): SERGIO ANDRÉS APELLIDOS: VANEGAS HERRERA

CO-DIRECTOR:

NOMBRE(S): \_\_\_\_\_ APELLIDOS: \_\_\_\_\_

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): ESTADO DEL ARTE EN LA CONCEPTUALIZACIÓN Y APLICACIÓN DEL TEMA "CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL"

#### RESUMEN

Esta investigación se basó en un tema de confiabilidad estructural para la aplicación enfocada a edificaciones y puentes. Para ello, se implementó una investigación tipo documental y la información fue suministrada por la base de datos de la UFPS. Se logró conceptualizar el tema de confiabilidad estructural, partiendo de lo general hasta llevarlo a lo particular. Posteriormente, se indagó sobre las aplicaciones realizadas en el tema de confiabilidad a nivel nacional e internacional. Finalmente, se determinó hasta donde se ha llevado la investigación de la confiabilidad estructural a nivel nacional en comparación al nivel internacional.

PALABRAS CLAVE: Estado del arte, confiabilidad estructural, edificaciones y puentes.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 176 PLANOS:        ILUSTRACIONES:        CD ROOM: 1

ESTADO DEL ARTE EN LA CONCEPTUALIZACIÓN Y APLICACIÓN DEL TEMA  
“CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL”

CARLOS ARTURO ULLOA CUERVO  
JHON EDINSON DOMINGUEZ ACERO  
OSCAR MANUEL PADILLA GARCÍA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PLAN DE ESTUDIOS DE ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS  
SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2022

ESTADO DEL ARTE EN LA CONCEPTUALIZACIÓN Y APLICACIÓN DEL TEMA  
“CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL”

CARLOS ARTURO ULLOA CUERVO  
JHON EDINSON DOMINGUEZ ACERO  
OSCAR MANUEL PADILLA GARCÍA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:  
Especialista en Estructuras

Director:  
SERGIO ANDRÉS VANEGAS HERRERA  
Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PLAN DE ESTUDIOS DE ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS  
SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2022

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

**FECHA:** 22 DE AGOSTO DE 2022 **HORA:** 04:00 p.m.

**LUGAR:** LABORATORIO DE ESTRUCTURAS – UFPS

**PLAN DE ESTUDIOS:** ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS

**TÍTULO DE LA TESIS:** "ESTADO DEL ARTE EN LA CONCEPTUALIZACIÓN Y APLICACIÓN DEL TEMA "CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL".

**JURADOS:** ING. JORGE FERNANDO MÁRQUEZ PEÑARANDA  
ING. JOSÉ RAFAEL CÁCERES RUBIO  
ING. SERGIO ANDRÉS VANEGAS HERRERA

**DIRECTOR:** INGENIERO SERGIO ANDRÉS VANEGAS HERRERA.

NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	CÓDIGO	CALIFICACIÓN	
		NÚMERO	LETRA
CARLOS ARTURO ULLOA CUERVO	1010067	4.4	CUATRO, CUATRO

# APROBADA

  
\_\_\_\_\_  
ING. JORGE FERNANDO MÁRQUEZ  
PEÑARANDA

  
\_\_\_\_\_  
ING. JOSÉ RAFAEL CÁCERES RUBIO

  
\_\_\_\_\_  
ING. SERGIO ANDRÉS VANEGAS HERRERA

  
\_\_\_\_\_  
Vo. Bo. JOSÉ RAFAEL CÁCERES RUBIO  
Coordinador Comité Curricular  
Especialización en Estructuras

María del C.

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

**FECHA:** 22 DE AGOSTO DE 2022 **HORA:** 04:00 p.m.

**LUGAR:** LABORATORIO DE ESTRUCTURAS – UFPS

**PLAN DE ESTUDIOS:** ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS

**TÍTULO DE LA TESIS:** “ESTADO DEL ARTE EN LA CONCEPTUALIZACIÓN Y APLICACIÓN DEL TEMA “CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL””.

**JURADOS:** ING. JORGE FERNANDO MÁRQUEZ PEÑARANDA  
ING. JOSÉ RAFAEL CÁCERES RUBIO  
ING. SERGIO ANDRÉS VANEGAS HERRERA

**DIRECTOR:** INGENIERO SERGIO ANDRÉS VANEGAS HERRERA.

NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	CÓDIGO	CALIFICACIÓN	
		NÚMERO	LETRA
JHON EDINSON DOMINGUEZ ACERO	1010063	4.4	CUATRO, CUATRO

# APROBADA

  
\_\_\_\_\_  
ING. JORGE FERNANDO MÁRQUEZ  
PEÑARANDA

  
\_\_\_\_\_  
ING. JOSÉ RAFAEL CÁCERES RUBIO

  
\_\_\_\_\_  
ING. SERGIO ANDRÉS VANEGAS HERRERA

  
\_\_\_\_\_  
Vo. Bo. JOSÉ RAFAEL CÁCERES RUBIO  
Coordinador Comité Curricular  
Especialización en Estructuras

María del C.

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

**FECHA:** 22 DE AGOSTO DE 2022 **HORA:** 04:00 p.m.

**LUGAR:** LABORATORIO DE ESTRUCTURAS – UFPS

**PLAN DE ESTUDIOS:** ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS

**TÍTULO DE LA TESIS:** “ESTADO DEL ARTE EN LA CONCEPTUALIZACIÓN Y APLICACIÓN DEL TEMA “CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL””.

**JURADOS:** ING. JORGE FERNANDO MÁRQUEZ PEÑARANDA  
ING. JOSÉ RAFAEL CÁCERES RUBIO  
ING. SERGIO ANDRÉS VANEGAS HERRERA

**DIRECTOR:** INGENIERO SERGIO ANDRÉS VANEGAS HERRERA.

NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	CÓDIGO	CALIFICACIÓN	
		NÚMERO	LETRA
OSCAR MANUEL PADILLA GARCÍA	1010068	4.4	CUATRO, CUATRO

# APROBADA

  
\_\_\_\_\_  
ING. JORGE FERNANDO MÁRQUEZ  
PEÑARANDA

  
\_\_\_\_\_  
ING. JOSÉ RAFAEL CÁCERES RUBIO

  
\_\_\_\_\_  
ING. SERGIO ANDRÉS VANEGAS HERRERA

  
\_\_\_\_\_  
Vo. Bo. JOSÉ RAFAEL CÁCERES RUBIO  
Coordinador Comité Curricular  
Especialización en Estructuras

María del C.

## Contenido

	<b>pág.</b>
Introducción	17
1. Problema	19
1.1 Titulo	19
1.2 Planteamiento del Problema	19
1.3 Formulación del Problema	19
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo general	20
1.4.2 Objetivos específicos	20
1.5 Justificación	20
1.6 Alcance y Limitaciones	20
1.6.1 Alcance	20
1.6.2 Limitaciones	21
2. Algunos Conceptos de Confiabilidad y Probabilidad de Falla	22
2.1 Aspectos Generales	22
2.2 Concepto de Incertidumbre	25
2.3 Enfoques de la Confiabilidad Estructural	28
2.3.1 Enfoque determinístico	29
2.3.2 Enfoque semi-probabilístico	30
2.3.3 Enfoque probabilística	30
2.4 Medidas Determinísticas del Factor de Seguridad	32
2.4.1 Factor de seguridad	32
2.4.2 Invarianza del factor de seguridad	34



2.5 Medidas Probabilísticas del Factor de Seguridad	34
2.5.1 Factor de seguridad central	35
2.5.2 Factor de seguridad característico	33
3. Diseño Metodológico	37
3.1 Población y Muestra	37
3.1.1 Población	37
3.2 Instrumentos para la Recolección de Información	35
3.3 Técnicas de Análisis y Procesamiento de Datos	38
3.4 Fases y Actividades Específicas del Proyecto	38
4. Marco Teórico: Teoría de Confiabilidad Estructural, Definición del Índice de Confiabilidad $\beta$ y Métodos de Cálculo de la Probabilidad	37
4.1 Generalidades	39
4.2 Índice de Confiabilidad	45
4.3 Factores de Seguridad en Formato de Factores Parciales	52
4.3.1 Factores parciales basados en valores centrales	54
4.3.2 Factores parciales basados en valores característicos	56
5. Marco Teórico: “Simulación de Montecarlo”	57
5.1 Generación de Números Aleatorios	59
5.1.1 Generación de números aleatorios no correlacionados	60
5.2 Extracción de la Información Estadística y Probabilística	61
5.3 Cálculo de la Probabilidad de Falla	62
5.4 Precisión de la Simulación	63
5.4.1 Alternativa 1	63



5.4.2 Alternativa 2	64
5.4.3 Alternativa 3	64
5.5 Técnicas de Reducción de Varianza	65
6. Aplicaciones de la Confiabilidad Estructural	67
6.1 Aplicaciones en Sistemas y Elementos Simples y Complejos de Tipo Estructural	67
6.1.1 Reliability Engineering and System Safety	67
6.1.2 An efficient approach for high-dimensional structural reliability analysis	68
6.1.3 Decision making for probabilistic fatigue inspection planning based on multi-objective optimization	70
6.1.4 Reliability analysis of deteriorating structural systems	72
6.1.5 Multi-objective reliability based design optimization of coupled acousticstructural system	74
6.1.6 Reliability-based Robust Design Optimization with the Reliability Index Approach applied to composite laminate structures	76
6.1.7 Seismic reliability-based robustness assessment of three-dimensional reinforced concrete systems equipped with single-concave sliding devices	78
6.1.8 Optimal and acceptable reliabilities for structural design	79
6.1.9 Methodology for assessing the probabilistic condition of an asset based in concepts of structural reliability “PCBM - Probabilistic Condition Based Maintenance”	80
6.1.10 System reliability-based direct design method for space frames with cold-formed steel hollow sections	82
6.1.11 Hybrid control variates-based simulation method for structural reliability analysis of some problems with low failure probability	83

6.1.12 Probabilistic methods for planning of inspection for fatigue cracks in offshore structures	86
6.1.3 Detailed seismic risk analysis of buildings using structural reliability methods	88
6.1.14 Seismic reliability analysis of a timber steel hybrid system	91
6.1.15 Seismic reliability-based design of inelastic base-isolated structures with lead-rubber bearing systems	94
6.1.16 Reliability analysis of FRP strengthened RC beams considering compressive membrane action	95
6.1.17 Reliability analysis of H-section steel columns under blast loading	97
6.1.18 Stochastic harmonic function based wind field simulation and wind-induced reliability of super high-rise buildings	100
6.1.19 Structural reliability analysis with fuzzy random variables using error principle.	101
6.1.20 Structural reliability of biaxial loaded Short/Slender-Square FRP-confined RC columns	103
6.2 Aplicaciones y Análisis de Confiabilidad en Estructuras Tipo Puente y sus Elementos	105
6.2.1 Structural reliability of bridges realized with reinforced concretes containing electric arc furnace slag aggregates	105
6.2.2 Global sensitivity analysis of reliability of structural bridge system	107
6.2.3 Fatigue analysis of a railway bridge based on fracture mechanics and local modelling of riveted connections	109
6.2.4 Information-dependent seismic reliability assessment of bridge networks based on a correlation model	112

6.2.5 A probability-based reliability assessment approach of seismic base-isolated bridges in cold regions	114
6.2.6 Reliability-based progressive collapse analysis of highway bridges	116
6.2.7 Time-dependent reliability of strengthened PSC box-girder bridge using phased and incremental static analyses	117
6.2.8 Time-dependent reliability assessment of existing concrete bridges including non-stationary vehicle load and resistance processes	120
6.2.9 Probabilistic reliability framework for assessment of concrete fatigue of existing RC bridge deck slabs using data from monitoring	122
6.2.10 The importance of correlation among flutter derivatives for the reliability based optimum design of suspension bridges	123
6.2.11 Performance-based reliability analysis of bridge pier subjected to vehicular collision: extremity and failure	126
6.2.12 An efficient method of system reliability analysis of steel cable-stayed bridges	128
6.2.13 Target reliability for bridges with consideration of ultimate limit state	131
6.3 Aplicaciones y Análisis de Confiabilidad en Estructuras tipo Puente a Nivel Nacional	133
6.3.1 Estudio puente Puerto Salgar	133
6.3.2 Estudio viaducto Cesar Gaviria Trujillo	141
6.3.3 Desarrollo de un algoritmo computacional para la estimación de la tensión de cables en puentes atirantados, con base en la medición experimental en laboratorio y campo de sus modos y frecuencias naturales de vibración	147
6.3.4 Estudio del comportamiento dinámico del viaducto portachuelo basado en medición de vibraciones ambientales	155

7. Conclusiones	164
Referencias Bibliográficas	166

## Lista de Figuras

	<b>pág.</b>
Figura 1. Periodo de vida acumulada vs Probabilidad de falla (Pf). Nivel de probabilidad estimada para algunas industrias	23
Figura 2. Distintos Enfoques para el estudio de la confiabilidad estructural	29
Figura 3. Función de densidades marginales de la resistencia “R” y la Solicitación “S” en la definición de la probabilidad de falla	43
Figura 4. Función de densidad marginal de la sollicitación “S” y función de distribución de probabilidad acumulada de la resistencia “R” en la definición de la probabilidad de falla	43
Figura 5. Función de densidad marginal de la resistencia y la sollicitación y densidad marginal conjunta	13
Figura 6. Función de densidad marginal y y la función de densidad conjunta	13
Figura 7. Definición del Índice de Confiabilidad para cuando R y S son distribuidas normalmente	45
Figura 8. Ilustración de la definición de Hosofer y Lind para dos variables (R y S)	48
Figura 9. Confiabilidad cambiando con el tiempo	51
Figura 10. Relación entre Valores medios, nominales y factorizados para la Resistencia y la Solicitación	54
Figura 11. Procedimiento simple de la simulación de MonteCarlo	58
Figura 12. Convergencia de la probabilidad de falla y la varianza estimada vs número de iteraciones	65
Figura 13. Diagrama de flujo del procedimiento evolutivo de optimización de objetivos múltiples	76
Figura 14. Diagrama de flujo del enfoque de simulación propuesto	84

Figura 15. Desarrollo esquemático del plan de inspección con respecto a la fatiga	88
Figura 16. Esquema (a) sistema FFTT y (b) retención HSK para sistema FFTT	92
Figura 17. Diagrama de flujo de pasos de análisis probabilístico utilizando MCS	99
Figura 18. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto	102
Figura 19. Flujo computacional del procedimiento basado en FORM FDM	104
Figura 20. Diagrama de Flujo de trabajo de confiabilidad estructural general	106
Figura 21. Diagrama de Flujo de trabajo basado en la metodología propuesta	111
Figura 22. Esquema general del método de evaluación de confiabilidad basado en la probabilidad propuesta	115
Figura 23. Procedimiento de evaluación de confiabilidad dependiente del tiempo del componente de puente clave	121
Figura 24. Estadísticas aproximadas de las causas del colapso de algunos puentes en el mundo	135
Figura 25. Modelo estructural en SAP-2000 del puente Puerto Salgar.	139
Figura 26. Índices de confiabilidad de los elementos de las armaduras del puente. Se incluye el rango admisible recomendado por solamente el Eurocódigo	140
Figura 27. Resultados de los ensayos mecánicos del acero	143
Figura 28. Diagrama donde se muestran los desplazamientos en un cable excitado	150
Figura 29. Diagrama de flujo donde se explica el funcionamiento del aplicativo	152
Figura 30. Propiedades del cable 1 usadas para la calibración del algoritmo computacional	154
Figura 31. Resultados de las tensiones para las diferentes señales	155
Figura 32. Etapas y actividades del estudio realizado sobre el viaducto portachuelo	159
Figura 33. Resumen de calibración	161
Figura 34. Características dinámicas del modelo calibrado y el modelo sin aisladores	162

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Índices de confiabilidad para la calibración de algunos códigos de diseño	49
Tabla 2. Índices de confiabilidad según algunas combinaciones de carga	50
Tabla 3. Valores de índice de seguridad para un periodo de un año para el código Nórdico de diseño	50



## **Resumen**

Esta investigación se basó en un tema de confiabilidad estructural en la aplicación enfocada a edificaciones y puentes. Para ello, se implementó una investigación tipo documental, donde la información se obtuvo mediante estudios de las bases de datos de la Universidad Francisco de Paula Santander. Se logró realizar una revisión bibliográfica enfocada en el tema de la confiabilidad estructural y sus aplicaciones a nivel nacional e internacional. Seguidamente se realizó conceptualizar el tema de confiabilidad estructural, partiendo de lo general hasta llevarlo a lo particular. Posteriormente, se indagó sobre las aplicaciones realizadas en el tema de confiabilidad, a nivel nacional e internacional. Finalmente, se determinó hasta donde se ha llevado la investigación de la confiabilidad estructural a nivel nacional para compararla con los alcances logrados a nivel internacional.

## Introducción

Una estructura cualquiera, ya sea, por ejemplo, un puente, un edificio, un muro de contención, etc., debe garantizar un grado de seguridad para su operación. Este grado de seguridad conlleva a que las obras de ingeniería tengan una larga vida útil. Todas las estructuras se diseñan buscando un punto óptimo estructural y económico, dado que, si no fuera así, tendríamos obras de ingeniería antieconómicas. Por ello, no se pueden diseñar edificios ni puentes que duren para siempre, por tanto, existirá una probabilidad de falla en cualquier momento, la cual, debe ser muy pequeña para que la construcción sea confiable. La Confiabilidad de una estructura se define como la probabilidad de que un sistema llevará a cabo la función requerida en condiciones de servicio especificadas, durante un período de tiempo determinado (Lemaire, Chateaufort & Mitteau, 2009).

En esta investigación, se busca dar a conocer la conceptualización y algunas aplicaciones sobre el tema de la Confiabilidad estructural. La gran mayoría de códigos o normas de diseño estructural, los cuales, aunque parecen ser de naturaleza determinística, están basados en estudios probabilísticos por Confiabilidad. Por ejemplo, el método LRFD (Load Resistance Factor Design), es un enfoque semi-probabilístico, donde la magnitud de cada factor de seguridad depende de la variación de las magnitudes debidas a la Solicitación (las cargas), y la Resistencia, por lo cual, los códigos de diseño formulan los factores de seguridad sobre una base estadística.

El desarrollo de las concepciones y técnicas para el análisis de la confiabilidad de componentes, equipos y sistemas ha estado asociado al desarrollo de tecnologías complejas y de alto riesgo, tales como la aeronáutica, militar y nuclear. Las primeras preocupaciones surgieron en el sector aeronáutico.

Durante la guerra de Corea el Departamento de Defensa de los Estados Unidos realizó estudios de fiabilidad de equipos electrónicos militares, cuyos fallos estaban ocasionando graves pérdidas económicas y disminución de la efectividad militar. Debido a esto, la relación entre confiabilidad, costos y mantenimiento adquirió gran importancia. Desde entonces, las compras de equipos electrónicos por las fuerzas armadas de los Estados Unidos fueron reglamentadas según especificaciones de confiabilidad de los equipos (Coronel, 2003).

En la década de 1950 comenzó el desarrollo de la industria nuclear, y los conceptos relacionados con la confiabilidad fueron usados de forma creciente en el diseño de las plantas nucleares y de sus sistemas de seguridad.

Hasta principios de los años 60's, los estudios teóricos y prácticos sobre confiabilidad eran realizados fundamentalmente en los Estados y la Unión Soviética. En esta década los estudios se extienden hacia otros países y también hacia otras tecnologías, como, por ejemplo, la ingeniería civil.

En el tema de ingeniería civil, se han realizado varias investigaciones sobre el tema, con la dificultad de que, a diferencia de otras ramas del conocimiento, como por ejemplo la ingeniería electrónica, donde se pueden construir gran cantidad de componentes de iguales características, en ingeniería civil, no se tienen gran cantidad de edificios de iguales características para un estudio experimental real. Por lo cual, los estudios se realizan de manera probabilística, generando simulaciones de una gran cantidad de edificios y randomizando una gran cantidad de variables, para extrapolar la información estadística y generar resultados concluyentes.

## **1. Problema**

### **1.1 Título**

ESTADO DEL ARTE EN LA CONCEPTUALIZACIÓN Y APLICACIÓN DEL TEMA  
“CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL”

### **1.2 Planteamiento del Problema**

El tema de Confiabilidad Estructural ha sido poco estudiado en el ámbito nacional. Nuestras normas de diseño estructural, sea el Reglamento de Diseño y Construcción NSR-10 o el Código Colombiano de Puentes CCP-14, contienen intrínsecamente valores que han sido calculados usando este tema, por ejemplo, los factores de mayoración de cargas o los factores de reducción de los materiales, pero estos datos han sido traídos de otras normas internacionales, sobre todo las americanas (ACI – 318 – 08 y AASHTO LRFD 2012). Dado que hemos copiado estos valores, no tenemos amplia experiencia en la determinación de los mismos a nuestro territorio. Por tanto, se trae como investigación el tema de Confiabilidad Estructural, para empezar a entender el cómo determinar factores tan usualmente usados en el análisis y diseño estructural. Además, se desconoce qué tan lejos a llegado la investigación nacional e internacional en la aplicación de este tema en referencia a los puentes y a las estructuras simples o complejas, de tipo edificación.

### **1.3 Formulación del Problema**

¿En el ámbito nacional e internacional, que tan lejos se ha llevado la investigación del tema de Confiabilidad estructural?

## **1.4 Objetivos**

**1.4.1 Objetivo general.** Realizar una revisión bibliográfica enfocada en el tema de la Confiabilidad estructural y sus aplicaciones a nivel nacional e internacional.

**1.4.2 Objetivos específicos.** Los objetivos específicos se plantean a continuación:

Conceptualizar el tema de Confiabilidad estructural, partiendo de lo general hasta llevarlo a lo particular.

Investigar sobre las aplicaciones realizadas en el tema de confiabilidad, a nivel nacional e internacional.

Determinar hasta donde se ha llevado la investigación de la confiabilidad estructural, a nivel nacional y compararla con los alcances logrados a nivel internacional.

## **1.5 Justificación**

Se justifica este proyecto, debido a la carencia de información y conocimiento sobre este tema en el ámbito nacional, además que se hace necesario tener un documento investigativo que contenga la recopilación de la literatura más sobresaliente en el tema de Confiabilidad Estructural.

## **1.6 Alcance y Limitaciones**

**1.6.1 Alcance.** Esta tesis tendrá como alcance hacer una revisión bibliográfica para poder plasmar, en un estado del arte, el resumen de la teorización, las investigaciones nacionales e internacionales y lo último en el desarrollo de la confiabilidad estructural.

Se espera dejar un documento que sirva de base teórica para propiciar investigaciones aplicativas que se desarrollen a futuro, dado que sobre este tema existe mucha información, pero la misma está dispersa en otros campos ingenieriles, y en el campo de la ingeniería estructural y, sobre todo, para la aplicación en puentes y edificaciones, es reducida la información.

**1.6.2 Limitaciones.** Pueden existir limitaciones de tipo espacial y temporal, principalmente.

La limitación de tipo espacial se debe a nuestra ubicación con respecto a la Universidad Francisco de Paula Santander. Nosotros nos encontramos en Bucaramanga, Santander, mientras que la Universidad se encuentra en Cúcuta, Norte de Santander.

La limitación de tipo temporal, es debido a que nosotros tenemos trabajos de tiempo completo y es difícil dedicarle tiempo al desarrollo de la tesis.

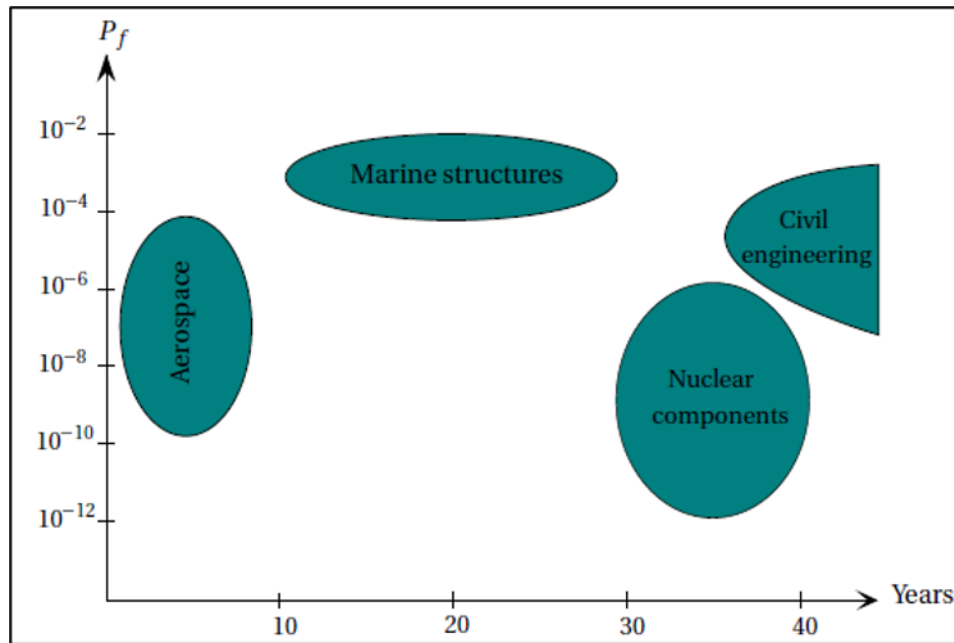
## 2. Algunos Conceptos de Confiabilidad y Probabilidad de Falla

### 2.1 Aspectos Generales

En los problemas de Confiabilidad, se debe medir la Probabilidad de falla que satisfaga algún criterio de rendimiento. Esa medida es llamada “Riesgo” y se define como las consecuencias esperadas asociadas a una actividad determinada que afecta el sistema (Melchers, 1999). La probabilidad es nuestra mejor y única forma de manejar la incertidumbre, que es a su vez, el grado de ignorancia que tenemos de un proceso (Sánchez, 2010). Ella solo nos permite hacer predicciones de los fenómenos que se conocen, y no de eventos que no existen. Sin embargo, las decisiones que se deban tomar sobre un inminente riesgo no solo terminan con determinar un nivel de seguridad, sino que van ligadas a aspectos como la calidad de vida y la maximización del beneficio.

En el caso de la ingeniería estructural, las *Probabilidades de Ocurrencia de Daños* o *Probabilidades de Falla* debidos a diversos riesgos son pequeñas (ver figura 1). Esto significa que tales eventos estarán en el campo de probabilidades, que son generalmente rechazados, haciendo que las comparaciones cuantitativas sean muy difíciles. Por lo tanto, una evaluación precisa de la ocurrencia de eventos puede variar significativamente con la rareza del evento (Uribe, 2012). Además, la Probabilidad de falla no puede definirse como una medida científica, puesto que es imposible su verificación (Sánchez, 2010). Como la Probabilidad de falla es de difícil validación, algunos autores sugieren que se debe mejor concentrar esfuerzos en la verificación de la solidez de las metodologías de análisis y manejo de información, para hacerlas más robustas.





**Figura 1. Periodo de vida acumulada vs Probabilidad de falla ( $P_f$ ). Nivel de probabilidad estimada para algunas industrias**

Fuente: Lemaire et al. (2009).

Freudenthal (1956), en la mitad del siglo pasado, uno de los primeros investigadores que aplicaron conceptos probabilísticos en confiabilidad estructural, afirmó que las probabilidades calculadas para la confiabilidad estructural son teóricas, y se debe utilizar en un sentido relativo para comparar diseños alternos. Esto se debe a la falta de información estadística de las propiedades de los materiales y esto genera mayor incertidumbre en la confiabilidad (Au, 2001). Las incertidumbres son inherentes a los problemas de ingeniería y es inevitable no tener dispersión en los parámetros estructurales con relación a sus valores ideales. La respuesta de los sistemas estructurales a veces puede ser muy sensible a las incertidumbres encontradas en las propiedades del material, la fabricación, las condiciones externas de carga, y al modelado analítico o numérico que se tenga.

La determinación de la probabilidad está ligada principalmente al modelo probabilístico y a la cantidad de variables aleatorias y asunciones determinísticas, estas últimas son las que simplifican el problema y convierten a los valores de la Probabilidad de falla en solo indicadores. Melchers (1999), sugiere que una evaluación completa de la Probabilidad de falla es una relación (que depende de la cantidad y calidad de los modelos), entre una probabilidad obtenida de las funciones de distribuciones de las variables aleatorias ( $p_{fv}$ ) y la Probabilidad de falla calculada a partir de valores fijos determinísticos que simplifican aquellos análisis difíciles de modelar numéricamente ( $p_{fu}$ ). La relación se muestra en la ecuación (1) Sánchez (2010):

$$p_f \approx p_{fv} \oplus p_{fu} \quad (1)$$

Donde:

$p_f$ : Probabilidad de falla

$p_{fu}$ : Probabilidad de falla calculada a partir de las variables determinísticas

$p_{fv}$ : Probabilidad de falla calculada de las variables aleatorias

$\oplus$ : Relación entre las probabilidades

La Teoría de Confiabilidad es entonces un método basado en la matemática estadística en el cual las propiedades de los materiales, el proceso de carga que varía con el tiempo y modelos inciertos, se describen mediante variables aleatorias y procesos estocásticos.

Los orígenes de la *Teoría de la Confiabilidad* provienen de la industria aérea y de los componentes electrónicos para establecer la tasa de fracaso de ciertos componentes. El campo de mayor experiencia es el de la industria espacial, donde un alto nivel de confiabilidad es esencial. Además, campos como la informática y las telecomunicaciones, requieren de niveles de confiabilidad elevados.

El ingeniero estructural, en comparación con el ingeniero electrónico, no tiene la posibilidad de construir cientos de estructuras exactamente iguales y probar de ellas cuales fallan, dado que cada edificación tiene una configuración única; sin embargo, la teoría de confiabilidad proporciona una ruta que permite determinar los casos de falla sin la necesidad de materializarlas.

Cuando se piensa en los códigos o normas de diseño de estructuras, éstas son por naturaleza determinísticas basadas en estudios probabilísticos. Los parámetros debidos a las propiedades de los materiales siempre son valores característicos bajos, los cuales se dividen en factores de seguridad para disminuirlos aún más; mientras que las cargas tienen valores característicos altos, los cuales son multiplicados por factores de seguridad para aumentarlos aún más (Jaimes, 2003). Estos factores de seguridad permiten compensar la incertidumbre involucrada en estos valores característicos y la incertidumbre de los modelos utilizados.

## **2.2 Concepto de Incertidumbre**

La incertidumbre, desde la definición de la Real Academia de la Lengua Española, es “la incapacidad de ser conocido con exactitud un evento, que cambia”. Entonces la incertidumbre es la falta de conocimiento sobre un tema y las dudas que se generan por esa falta de información. En ingeniería estructural tanto las propiedades de los materiales como las cargas son inherentemente aleatorias con un alto grado de incertidumbre en sus valores medios o promedios.

Conocer exactamente el grado de incertidumbre es de difícil determinación, además, depende del escenario del problema. Para Melchers (1999), la incertidumbre aleatoria o intrínseca es aquella inherente al problema. Por ejemplo, la variabilidad de la carga viva sobre una viga o el registro de lluvias en una cuenca.

Entender adecuadamente el tema de confiabilidad estructural lleva consigo conocer antes los tipos de incertidumbre que se dan en cualquier problema en ingeniería. Existen seis tipos de incertidumbre en la confiabilidad estructural (Lemaire et al., 2009; Melchers, 1999; Uribe Castillo, 2012), los cuales son:

- Incertidumbre física.
- Incertidumbre estadística.
- Incertidumbre de decisión.
- Incertidumbre del modelo o de la modelación.
- Incertidumbre de predicción.
- Incertidumbre del factor humano.

**Incertidumbre física.** La seguridad de un elemento estructural depende de los valores actuales de las propiedades de los materiales de la estructura. Esta incertidumbre se puede reducir con mayor disponibilidad de datos, sin embargo, hasta en las partes más íntimas de la estructura, existe una naturaleza aleatoria, que es difícil de estimar (por ejemplo, las propiedades físicas de los materiales usados en el concreto, como los agregados o el cemento). Por lo general algunas de estas variables se estiman a partir de observaciones o se toman subjetivamente.

**Incertidumbre estadística.** Son aquellas que se dan debido a los estimadores estadísticos (ej. la media, la desviación estándar) que se determinan a partir de los datos disponibles (los cuales dependen de la muestra tomada), para obtener la función de densidad de probabilidad apropiada. Esta incertidumbre puede ser incorporada dejando que los parámetros estadísticos sean también variables aleatorias.

**Incertidumbre de decisión.** Esta incertidumbre proviene de la dificultad para precisar si un evento ha ocurrido realmente; por ejemplo, la definición de una situación en la cual se ha violado un estado límite.

**La incertidumbre del modelo o de la modelación.** Está relacionada con la selección de las relaciones o ecuaciones simplificadas que representan las relaciones reales o del fenómeno de interés. Este tipo de incertidumbre surge de las deficiencias en la modelación del comportamiento físico.

**Incertidumbre de predicción.** La incertidumbre respecto a la predicción revela la dificultad para elaborar modelos que realmente describan escenarios futuros.

**Incertidumbre del factor humano.** Como resultado de la intervención humana en el diseño, documentación, construcción y uso de la estructura.

Para Blockley (1992), la incertidumbre se define por tener las siguientes características:

- Aleatoriedad.
- Dificultad en la definición.
- Disponibilidad de información.

**Aleatoriedad.** Se da por la naturaleza propia de los datos, y a la falta de toma de datos de las variables involucradas.

**Dificultad en la definición.** Está relacionada con la incapacidad de establecer los límites entre dos estados del sistema, ejemplo, daño leve, daño moderado y daño severo.

**Disponibilidad de información.** Es la identificación de todos los escenarios posibles, como, por ejemplo, la complejidad del comportamiento estructural dificulta la identificación de todos los escenarios de daño posibles en caso de un evento, como un sismo.

### 2.3 Enfoques de la Confiabilidad Estructural

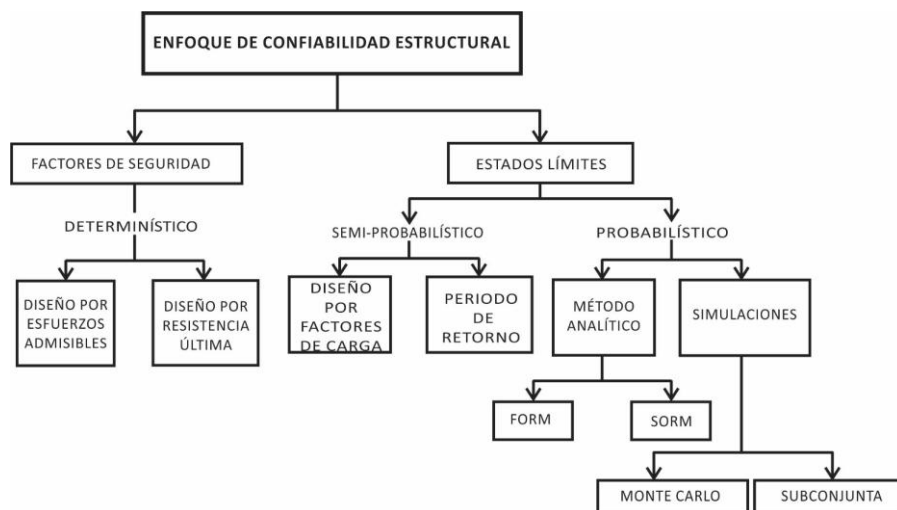
La confiabilidad estructural toma en cuenta las incertidumbres de manera racional mediante la implementación de variables aleatorias ajustadas a funciones de probabilidad y donde se evalúan las violaciones de los estados límites en cualquier momento en la vida del sistema estructural.

La literatura enfoca la confiabilidad estructural desde dos perspectivas. Una de ellas, se muestra en la figura 2; mientras que en la otra, muestra los métodos usados por los Eurocódigos (Cardoso, De Almeida, Dias & Coelho, 2008). Este último clasifica los métodos probabilísticos en tres niveles:

**Método semi-probabilístico o nivel 1.** Es el más usado en la práctica donde la Probabilidad de falla es considerada a través de la definición de los valores característicos y la aplicación de índices de seguridad parciales.

**Método probabilístico aproximado o nivel 2.** Aquí aparecen el método FORM (First Order Reliability Method) y el SORM (Second Order Reliability Method).

Método probabilístico exacto o nivel 3: Es donde la Probabilidad de falla es calculada mediante variables aleatorias ajustadas a distribuciones de probabilidad, tanto para la resistencia o la sollicitación del sistema.



**Figura 2. Distintos Enfoques para el estudio de la confiabilidad estructural**

Fuente: Uribe, (2012), Hurtado (2004).

**2.3.1 Enfoque determinístico.** Es el enfoque que en los últimos años han tomado la gran mayoría de normas y códigos de diseño. Se caracteriza por usar valores específicos para las propiedades de los materiales y las cargas principalmente, para con ello diseñar, olvidándose del enfoque estadístico.

Este método tiene en cuenta *factores de seguridad*, los cuales hacen exceder las cargas y disminuyen la capacidad de resistencia de los materiales. Estos números tradicionalmente se tienen debido a la experiencia.

El *diseño por esfuerzos admisibles* y *por resistencia última* son los métodos que existen en este enfoque. Ellos no consideran las variables aleatorias, sino por el contrario, mantienen valores



constantes a los parámetros de entrada, junto con una serie de factores de seguridad (que normalmente van asociados con el análisis de la teoría elástica). Con esto, se pierde el carácter estadístico y, por ende, no se maneja la incertidumbre como variable.

**2.3.2 Enfoque semi-probabilístico.** Es un enfoque que solo tiene en cuenta algunas variables probabilísticas, como por ejemplo la carga, para con esto hallar una carga máxima de diseño, pero el diseño de la estructura se calcula de manera determinista. La Probabilidad de falla se asocia solo a un índice de seguridad o confiabilidad. En el caso del método Load Resistance Factor Design (LRFD), la magnitud de cada factor de seguridad depende de la variación de magnitudes debidas a la Solicitación (por ejemplo, las cargas) y la Resistencia, por lo cual, los códigos de diseño formulan los factores de seguridad sobre una base estadística de la Resistencia y la Solicitación.

**2.3.3 Enfoque probabilística.** Es un enfoque donde las cantidades deterministas se pueden interpretar como variables aleatorias y se necesita de un modelo matemático para describir la realidad de la estructura. Estos métodos se basan en *Estados Límites*. Un Estado Límite es una situación caracterizada por un valor de magnitud física, tal que, de ser rebasada, haría que la estructura dejara de ser apta para su uso, ya sea por ruina estructural total o parcial o por una pérdida significativa de funcionalidad. Es decir, si una magnitud  $M$  caracteriza un Estado Límite concreto, existirá un valor límite o valor último  $M_u$  tal que la condición  $M > M_u$  implica que la estructura sufrirá algún tipo de fallo estructural o de deterioro, que hará que en general deje de ser apta para su uso normal. Por esto, los estados límites se pueden dividir en dos categorías, lo *Estados Límites de colapso o últimos*, y los *Estados Límites de Servicio*.

El *Estado Límite Último o de Colapso*, es un estado tal que, al ser sobrepasado, la estructura completa o en parte puede colapsar y solo sería recuperable mediante la reparación o la reconstrucción. Puede causar daños cuantiosos y pérdida de vidas humanas, por lo cual, los factores de seguridad son mayores en este estado que cualquier otro.

El *Estado Límite de Servicio*, es el estado de aceptable condición de uso normal asociado con las condiciones de habitabilidad. Si es superado produce pérdidas de funcionalidad, pero reparables. Los márgenes de seguridad son más moderados que los del Estado Límite Ultimo.

Según la figura 2, se puede detallar que el enfoque probabilístico se puede orientar primeramente a un modelamiento analítico, el cual se clasifica en dos métodos, los cuales son el FORM (First Order Reliability Method) y el SORM (Second Order Reliability Method). Estos métodos se basan en una descripción del problema en el espacio Gaussiano. El objetivo de estos métodos es encontrar un punto de diseño  $\mathbf{x}^*$  en el espacio real, donde se sustituye la función actual por el primer o segundo término de la serie de Taylor, mediante algunas transformaciones de variables no correlacionadas, manteniendo la media en cero y la desviación estándar en uno. El punto de diseño  $\mathbf{x}^*$  se elige de manera que se maximice la Función de Distribución de Probabilidad (PDF) dentro del dominio del error. Geométricamente coincide con el punto de falla, que tiene la mínima distancia desde el origen hasta la función de Estado límite, cuando esta es igual a cero.

Por otro lado, el enfoque probabilístico se puede orientar o desarrollar por medio de Simulaciones, donde se pueden encontrar dos caminos: el Método de MonteCarlo y la simulación Subconjunta.

El método de MonteCarlo se basa en una descripción estadística de las variables y por medio de la generación de números aleatorios, estos valores ingresan a la simulación el número de iteraciones que el usuario convenga, obteniendo artificialmente los resultados del comportamiento de un sistema. Este método tiene el inconveniente de que requiere de un gran número de simulaciones para que sus resultados puedan considerarse aceptables estadísticamente.

El método de simulación Subconjunta, es un procedimiento adaptativo de simulación estocástica para calcular eficientemente pequeñas probabilidades de fallo en sistemas de ingeniería (Au, Ching & Beck, 2007). En este enfoque, la probabilidad de falla se expresa como un producto de grandes valores de probabilidades condicionados mediante la introducción de varios eventos de fallo intermedio, esto proporciona la posibilidad de convertir un problema que involucra la simulación de eventos raros en una secuencia de problemas que involucran eventos más frecuentes.

## 2.4 Medidas Determinísticas del Factor de Seguridad

**2.4.1 Factor de seguridad.** Estos factores aparecen en los análisis determinísticos, donde se suponen como valores fijos predeterminados. Para cualquier sistema se debe cumplir que:

$$R_{adm} \geq S \quad (2)$$

Donde:

$R_{adm}$  : Resistencia Admisible

$S$ : Solicitación

En general  $S$  es la combinación de varios tipos de solicitaciones donde  $S = \sum_i S_i$ , donde  $i$  representa los diferentes tipos de solicitación (ejemplo, la carga muerta y la carga viva).

La Resistencia Admisible  $R_{adm}$ , la Resistencia Última  $R_u$  y el Factor de Seguridad  $FS$  (que es la forma de manejar la incertidumbre que existe en el diseño) se relacionan mediante la ecuación (3):

$$R_{adm} = \frac{R_u}{FS} \quad (3)$$

Por ende, reemplazando en la ecuación (2) en la ecuación (3), tenemos:

$$R_{adm} \geq S \rightarrow \frac{R_u}{FS} \geq S \quad (4)$$

Existe otra forma de expresar el Factor de Seguridad, la cual se expresa como la relación entre las Fuerzas resistentes ( $F_{Resistentes}$ ) y las Fuerzas actuantes ( $F_{Actuantes}$ ), según la ecuación (5):

$$FS = \frac{F_{Resistentes}}{F_{Actuantes}} \quad (5)$$

Pero de esta última forma, por ejemplo, en los diseños de cimentaciones, los factores de seguridad oscilan entre 1.5 y 3, lo cual refleja la gran incertidumbre que existe sobre las variables de este sistema (Sánchez, 2010). Además, el factor de seguridad también puede presentar problemas de invarianza que reducen su credibilidad.

**2.4.2 Invarianza del factor de seguridad.** El problema de invarianza se presenta según como se determine la relación entre la Resistencia y la Solicitación. Un caso de ello es cuando se considera el factor de seguridad por medio de las Fuerzas o por medio de Esfuerzos, los cuales dan resultados diferentes. La invarianza es muy poco tomada en cuenta en los métodos determinísticos y resulta ser crítica en la evaluación y diseño del comportamiento de un sistema. El tema de la invarianza puede ampliarse conceptualmente en las siguientes referencias (Sánchez, 2010) y (Haldar & Mahadevan, 2000).

## 2.5 Medidas Probabilísticas del Factor de Seguridad

El problema básico de la confiabilidad considera la relación entre la Resistencia “R” y la Solicitación “S” de un sistema en estudio de manera aleatoria. Tanto R y S son variables de naturaleza incierta, que por ende pueden ser representadas aleatoriamente con alguna distribución de probabilidad estadística  $f_S(s)$  y  $f_R(r)$ . Sabiendo que las variables de Resistencia “R” y Solicitación “S” son de naturaleza aleatoria, en la literatura se pueden encontrar varios formatos de representación de la Probabilidad de falla (que es uno de los fines de cálculo de las mediciones probabilísticas), de los cuales se muestran algunos:

$$p_f = p(R - S < 0) \quad (6)$$

$$p_f = p\left(\frac{R}{S} < 1\right) \quad (7)$$

$$p_f = p(\ln(R) - \ln(S) < 1) \quad (8)$$

Entre las ecuaciones anteriores, la más usada en la literatura es la ecuación (6), donde  $g(R, S) = R - S$  se conoce como la *función de estado límite* o la *función de margen de seguridad* del sistema. La función de estado límite se define como la frontera que separa el margen seguro y

el margen de falla de un sistema estructural. La Probabilidad de falla aumentará cada vez que se viole la desigualdad dada en la ecuación (6).

En las medidas probabilísticas, se habla de dos tipos de factores de seguridad, el *Factor de Seguridad Central* y el *Factor de Seguridad Característico*.

**2.5.1 Factor de seguridad central  $(\lambda_0)$**  Los valores de Resistencia “R” y Solicitación “S” se deben evaluar en función de la distribución de probabilidad escogida (por ejemplo, Distribución Normal o Log Normal). En estas distribuciones se destacan sus medidas estadísticas, que son la *Media o Valor Esperado*  $\mu$ , la *Desviación Estándar*  $\sigma$ , el *Coefficiente de Variación*  $V$  y la *Varianza*  $S$ . Sabiendo esto, el Factor de Seguridad Central se define como la relación entre los valores esperados o medias de la Resistencia y la Solicitación:

$$\lambda_0 = \frac{\mu_R}{\mu_S} \quad (9)$$

Esta definición solo tiene en cuenta las medidas de tendencia central y no las medidas de sesgo de la Resistencia y la Solicitación, por ende, conduce en muchos casos a factor de seguridad impreciso.

**2.5.2 Factor de seguridad característico  $(\lambda_k)$**  El Factor de Seguridad Característico es una medida que refleja el sesgo o la relación de los valores extremos del comportamiento estadístico entre la Resistencia y la Solicitación. La Resistencia Característica  $R_k$  y la Solicitación Característica  $S_k$  se definen como:

$$R_k = \mu_R (1 - k_R V_R) \quad (10)$$

$$S_k = \mu_S (1 + k_S V_S) \quad (11)$$

Donde:

$k_R$  y  $k_S$ : Constantes que multiplican al coeficiente de variación.

$\mu_R$  y  $\mu_S$ : Medias o valores esperados de la Resistencia y la Solicitación, respectivamente.

$V_R$  y  $V_S$ : Coeficientes de Variación de la Resistencia y la Solicitación, respectivamente.

$$V_R = \frac{\sigma_R}{\mu_R} \text{ y } V_S = \frac{\sigma_S}{\mu_S}.$$

Entonces el factor de Seguridad Característico se define de la siguiente manera:

$$\lambda_k = \frac{R_k}{S_k} \rightarrow \lambda_k = \frac{1 - k_R V_R}{1 + k_S V_S} \lambda_0 \quad (12)$$

Para la definición de este factor de seguridad, se utilizan valores típicos de  $R_k$  entre 90 y 95% y para  $S_k$  entre 5 y 10%.

### **3. Diseño Metodológico**

Esta investigación es de tipo DOCUMENTAL, dado que este escrito se centra principalmente a describir tres partes:

- 1) la conceptualización del tema de Confiabilidad estructural,
- 2) las investigaciones más actuales y relevantes del ámbito internacional y
- 3) las investigaciones más importantes en el ámbito nacional.

#### **3.1 Población y Muestra**

**3.1.1 Población.** Integrantes del proyecto:

- Carlos Arturo Ulloa.
- Oscar Manuel Padilla.
- Jhon Domínguez.

Director del proyecto:

- Sergio Andrés Vanegas Herrera.

#### **3.2 Instrumentos para la Recolección de Información**

El instrumento principal para la recolección de la información fue el uso constante de las bases de datos de la Universidad Francisco de Paula Santander.



### **3.3 Técnicas de Análisis y Procesamiento de Datos**

Se creó una base de datos hecha en Excel, separando la información principalmente por años (desde el más reciente al más antiguo) y separándolas por tipologías estructurales (Puentes y Edificaciones), además de si eran de carácter nacional o internacional.

### **3.4 Fases y Actividades Específicas del Proyecto**

Hacer una revisión minuciosa en la literatura sobre las bases teóricas de la confiabilidad estructural, las incertidumbres, los enfoques de la confiabilidad, el índice de confiabilidad y los factores de seguridad.

Hacer una revisión minuciosa en la literatura sobre las investigaciones aplicativas, en el campo de la confiabilidad estructural, principalmente para edificaciones y puentes, en el ámbito nacional e internacional.

Se realizará una investigación de las últimas investigaciones internacionales, para compararlas con las investigaciones nacionales.

Realizar el documento de tesis estado de arte para Biblioteca y la Universidad.

## 4. Marco Teórico: Teoría de Confiabilidad Estructural, Definición del Índice de Confiabilidad $\beta$ , Métodos de Cálculo de la Probabilidad

### 4.1 Generalidades

La teoría de la confiabilidad estructural indaga principalmente sobre la probabilidad de ocurrencia de las fallas de los sistemas estructurales, se pregunta por la frecuencia en la que ocurren las mismas. Es una teoría de naturaleza estadística que no le importa dónde están las fallas, sino en que tiempo retornan las cargas que provocan las fallas en a la estructura. Además, tiene en cuenta las incertidumbres, mediante variables aleatorias ajustadas a alguna distribución de densidad de probabilidad. Se inicia con la recopilación de unos datos estadísticos iniciales, los cuales se llevan a un modelo matemático y a un modelo de la estructura como tal, para con esto, después de un análisis detallado, conseguir una respuesta de la estructura, que se expresa mediante las Probabilidades de falla ( $P_f$ ) y los índices de confiabilidad ( $\beta$ ).

Como se dijo anteriormente, las variables de Resistencia “R” y Solicitación “S” se pueden describir como variables aleatorias, así dejando a un lado el carácter determinístico. El margen de seguridad o función de estado límite, denotado  $g(R, S)$ , se puede representar de muchas maneras, como se mostró en las ecuaciones (6),(7) y (8), pero la forma más usada es:

$$g(R, S) = R - S \quad (13)$$

Las variables de la Resistencia R pueden ser, por ejemplo, el módulo de elasticidad ( $E_c$ ), el esfuerzo de fluencia del acero ( $F_y$ ), la resistencia a la compresión del concreto ( $F'_c$ ), las dimensiones de los elementos, como por ejemplo el área transversal (A), entre otras. La Solicitación “S” pueden ser las cargas de viento “W”, el tráfico de carga “P”, el peso propio de

“D”, etc.

La ecuación (13) se puede escribir en función de sus variables de la siguiente manera:

$$g(E, F_y, f'c, A, \dots, W, P, D, \dots) = R(E, F_y, f'c, A, \dots) - S(W, P, D, \dots) \quad (14)$$

O también se puede escribir en forma matemática general, así:

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) = R(X_1, X_2, \dots, X_n) - S(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (15)$$

Donde  $X_1, X_2, \dots, X_n$  son las variables básicas que no necesariamente aparecerán en la Resistencia “R” y en la Solicitación “S”.

La ecuación (13), definida como la *Función de Estado Límite o Margen de Seguridad*, divide el espacio  $x$  en dos espacios, uno llamado la *Zona Segura (ZS)*, cuando  $g(R, S) > 0$ ; y el otro es la *Zona de Falla (ZF)*, cuando  $g(R, S) < 0$ . El sector que divide estos dos conjuntos se llama *Superficie de Estado Límite o Superficie de Falla*, donde la función de estado límite  $g(R, S) = 0$ .

$$g(R, S) = 0 \rightarrow \text{Superficie de Estado Límite o Superficie de Falla} \quad (16)$$

$$g(R, S) > 0 \rightarrow \text{Zona Segura (ZS)} \quad (17)$$

$$g(R, S) < 0 \rightarrow \text{Zona de Falla (ZF)} \quad (18)$$

Entonces el problema básico de la confiabilidad es encontrar la Probabilidad de falla, en otras palabras, que  $p(g(R, S) \leq 0)$ , entonces matemáticamente se calcula mediante la función de densidades marginales de la Resistencia “R” y la Solicitación “S”, de la siguiente manera:

$$p_f = p(g(R,S) = R - S \leq 0) = \iint_D f_{RS}(r,s) dr ds \quad (19)$$

Donde:

$f_{RS}(r,s)$ : Función de densidad marginal conjunta de R y S.

$R$ : Resistencia del sistema.

$S$ : Solicitación del sistema.

La ecuación (19) se integra sobre la región D, que es la zona de falla. Esta ecuación es general para cualquier caso de dependencia, porque las variables de Resistencia “R” y de Solicitación “S” son dependientes. Si R y S son independientes, es decir que ninguna variable de la Resistencia depende de las de Solicitación, entonces se expresa de la siguiente manera:

$$p_f = p(g(R,S) = R - S \leq 0) = \iint_D f_R(r) \cdot f_S(s) dr ds \quad (20)$$

O definido en sus límites

$$p_f = p(g(R,S) = R - S \leq 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{r \leq s} f_R(r) \cdot f_S(s) dr ds \quad (21)$$

Donde se puede notar que los límites de la Solicitación en la integral, van desde  $-\infty$  hasta  $+\infty$ , mientras que la Resistencia se evalúa desde  $-\infty$  hasta cuando los valores de la resistencia son menores que los de la solicitud  $r \leq s$ , que es la condición de que ocurra falla.

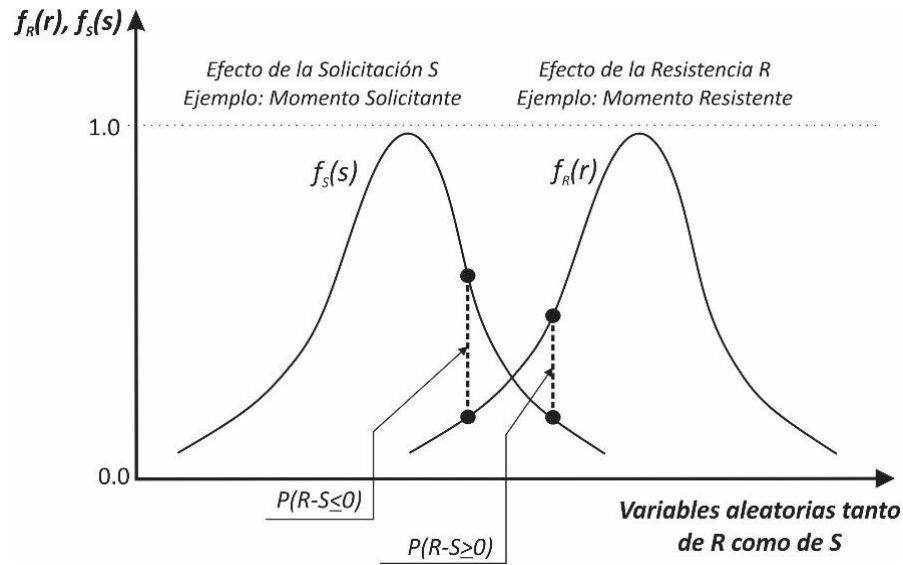
Las ecuaciones (20) y (21) están expresadas mediante funciones de densidad de probabilidad marginal  $f_R(r)$  y  $f_S(s)$ ; pero, en la ecuación (21), se puede expresar la Resistencia mediante una distribución de probabilidad acumulada, de la siguiente manera:

$$F_R = \int_{-\infty}^{r \leq s} f_R(r) dr \rightarrow \text{Distribución de densidad acumulada de R} \quad (22)$$

$$p_f = p(g(R,S) = R - S \leq 0) = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(s) \cdot f_S ds \quad (23)$$

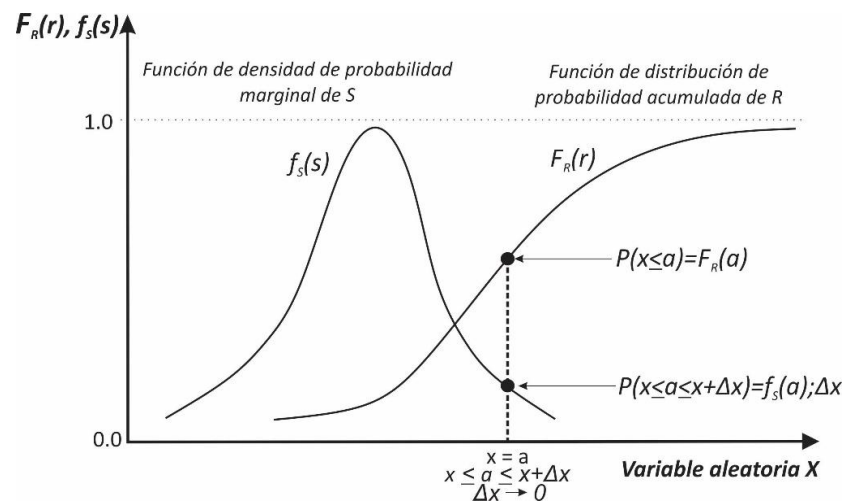
La ecuación (23) se conoce como la *Ecuación de Convolución*. Solo en algunas ocasiones es posible integrar esta ecuación analíticamente, por ejemplo, cuando las variables aleatorias están distribuidas normalmente y las formulaciones son sencillas y lineales. Cuando la Función de Estado Límite no se puede definir de manera explícita en términos de R y S, se dice que la función es implícita, que es un caso muy común en la realidad, por ejemplo, para estructuras complicadas que requieren análisis o modelado mediante elementos finitos. Para análisis de este tipo de situaciones existe la opción de la Simulación, como el método de MonteCarlo (Sánchez, 2010; Haldar & Mahadevan, 2000). La simulación de MonteCarlo se explicará más en detalle en el Capítulo 3.

En la figura 3 se representa gráficamente la ecuación (21) y en la figura 4 se representa la ecuación (23). Además, en las figura 5 y figura 6, se muestra el problema de la confiabilidad tridimensionalmente.



**Figura 3. Función de densidades marginales de la resistencia “R” y la Solicitación “S” en la definición de la probabilidad de falla**

Fuente: Sánchez (2010), Faber (2009).



**Figura 4. Función de densidad marginal de la sollicitación “S” y función de distribución de probabilidad acumulada de la resistencia “R” en la definición de la probabilidad de falla**

Fuente: Sánchez (2010).

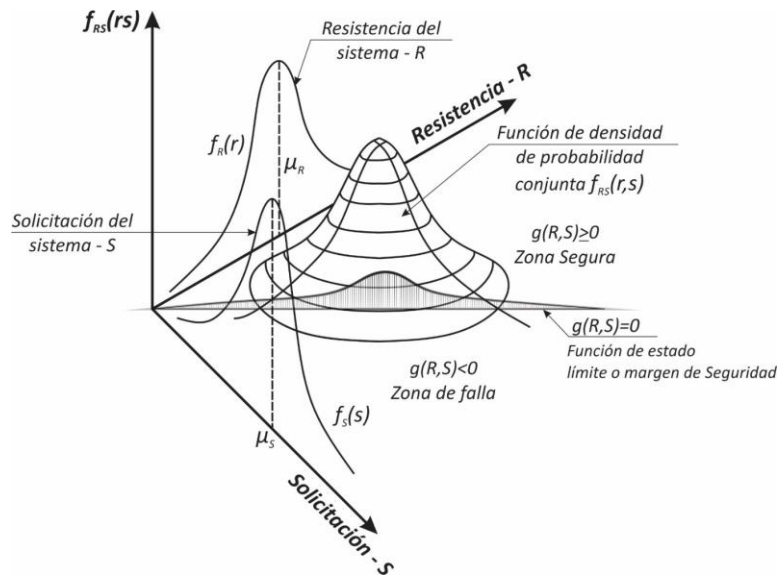


Figura 5. Función de densidad marginal de la resistencia  $f_R(r)$  y la solicitation  $f_S(s)$  y densidad marginal conjunta  $f_{RS}(rs)$

Fuente: Sánchez (2010).

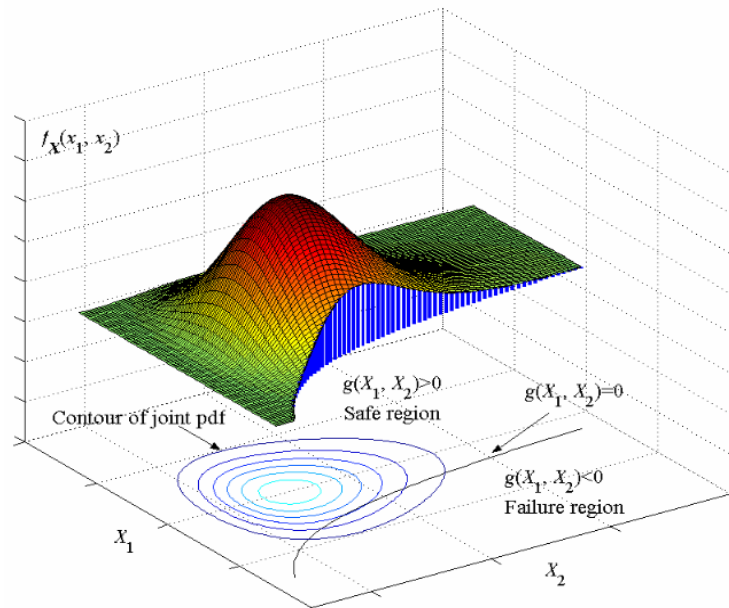
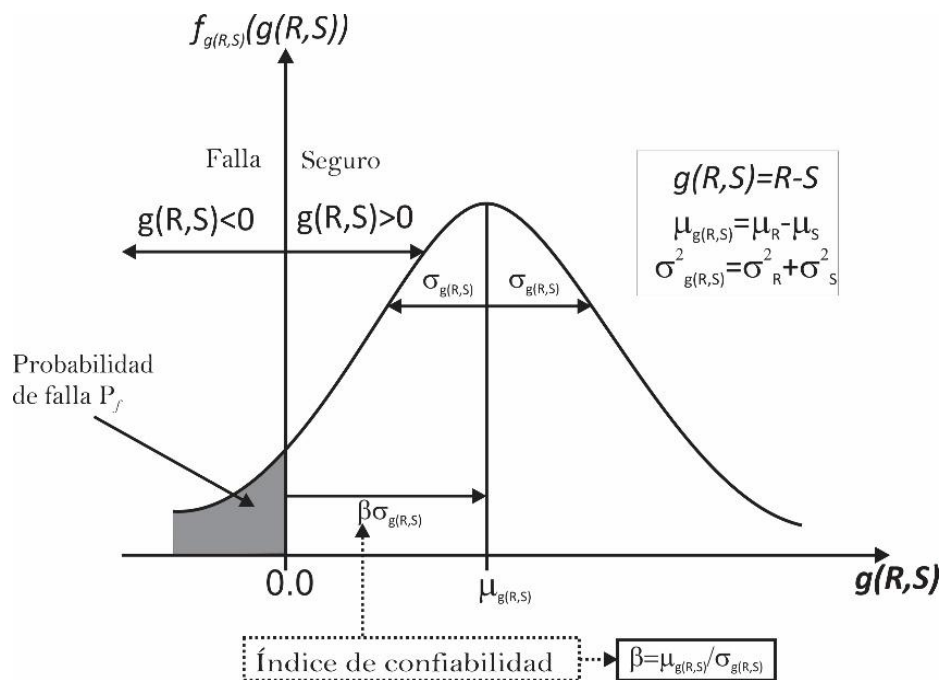


Figura 6. Función de densidad marginal  $f_X(x_1) = f_R(r)$  y  $f_X(x_2) = f_S(s)$  y la función de densidad conjunta  $f_X(x_1, x_2) = f_{RS}(r, s)$

Fuente: Du (2005).

## 4.2 Índice de Confiabilidad $\beta$

El índice de confiabilidad ( $\beta$ ) es el parámetro más usado para medir el nivel de seguridad de un sistema. Cuando las variables tanto de Resistencia “R” y Solicitación “S” están distribuidas normalmente o log-normal, se define como el número de desviaciones estándar entre el valor medio de la Función de Estado Límite o Margen de Seguridad  $g(R, S) = R - S$ , y el borde o línea que define la región segura (ver figura 7).



**Figura 7. Definición del Índice de Confiabilidad para cuando R y S son distribuidas normalmente**

Fuente: Sánchez (2010), Faber (2009).



El índice de Confiabilidad también se define como el inverso del coeficiente de variación del margen de seguridad, así:

$$\beta = \frac{1}{V_{g(R,S)}} = \frac{\mu_{g(R,S)}}{\sigma_{g(R,S)}} \quad (24)$$

Donde:

$\mu_{g(R,S)}$  : Valor medio del Margen de Seguridad.

$\sigma_{g(R,S)}$  : Desviación estándar del Margen de Seguridad.

$V_{g(R,S)}$  : Coeficiente de Variación del Margen de Seguridad.

Otra definición de este índice, y considerando que las variables tanto de Resistencia “R” como de Solicitación “S” están distribuidas normalmente, es por medio de la Probabilidad de falla. La ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$\mu_{g(R,S)} = \mu_R - \mu_S \quad (25)$$

$$\sigma_{g(R,S)}^2 = \sigma_R^2 - \sigma_S^2 \quad (26)$$

$$p_f = p(g(R,S) < 0) = \Phi(-\beta) \rightarrow \beta = -\Phi^{-1}(p_f) \quad (27)$$

$$p_f = 1 - \Phi(\beta) \rightarrow \beta = \Phi^{-1}(1 - p_f) \quad (28)$$

Donde:

$\mu_R$  : Valor medio de la Resistencia R.

$\mu_S$  : Valor medio de la Solicitación S.

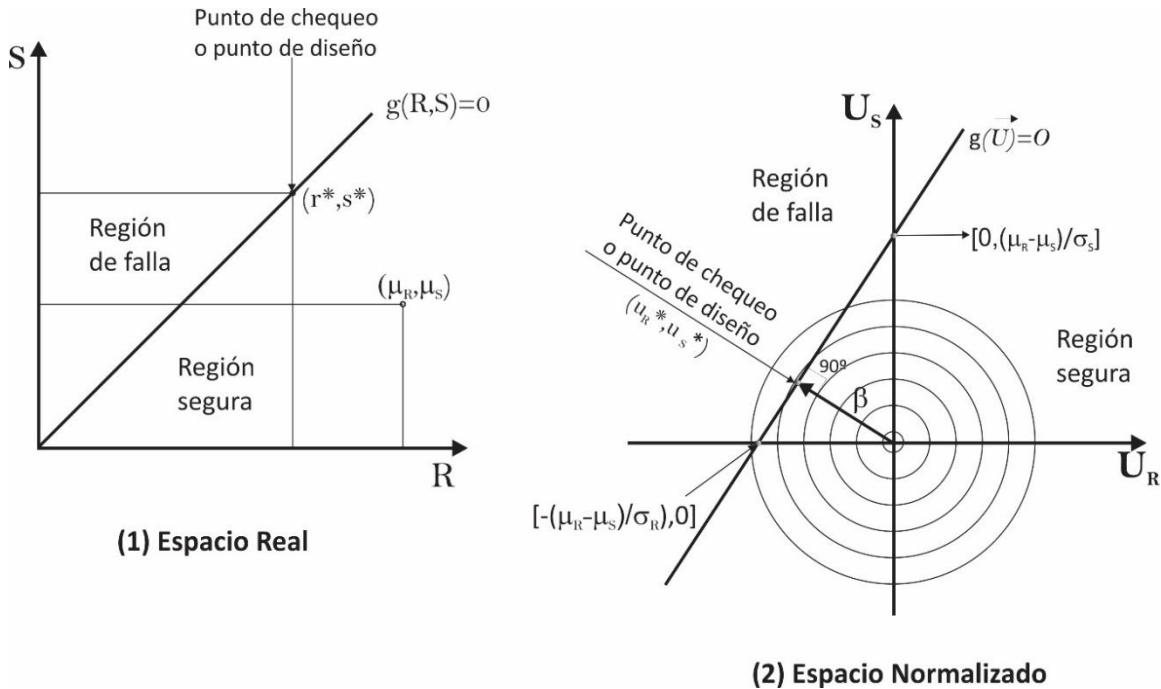
$\sigma^2_R$  : Desviación estándar al cuadrado de la Resistencia R.

$\sigma^2_S$  : Desviación estándar al cuadrado de la Solicitación S.

$\Phi(-\beta)$  : Función de distribución acumulada de probabilidad normal estándar con media 0 y desviación 1 del valor negativo del índice de confiabilidad  $\beta$ .

$-\Phi^{-1}(p_f)$  : Función inversa de la distribución de probabilidad normal acumulada estándar, con media 0 y desviación 1, de la Probabilidad de falla.

Sin embargo, la definición más general del índice de confiabilidad, la proponen Hasofer y Lind [16], quienes afirman que es la distancia más corta desde el origen hasta la función de estado límite  $g(R, S) = R - S$ , medida en el espacio normalizado. En el caso en que hallan solo dos variables, en la gráfica de Resistencia “R” vs Solicitación “S”, la función de estado límite es lineal. Esto se ilustra en la figura 8. El punto para el cual la distancia es mínima corresponde al punto de chequeo o de diseño (punto de falla más probable).



**Figura 8. Ilustración de la definición de Hosfer y Lind para dos variables (R y S)**

Fuente: Sánchez (2010).

Entonces la ecuación de la mínima distancia de la figura 8, es la siguiente:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (29)$$

Las ecuaciones (27), (28) y (29), que definen el índice de confiabilidad ( $\beta$ ) y la Probabilidad de falla (Pf), son exactas si R y S estas distribuidas normalmente; sino, entonces su resultado es un muy buen indicador que está muy próximo al índice real, con un error mínimo y aceptable (Ang & Tang, 2007).

El índice de Confiabilidad ( $\beta$ ) es el principal criterio para la definición de factores parciales para la carga y la resistencia, que se utilizan en los códigos de diseño. Según Moses (2001), una

vez tomada la metodología y una base de datos estadística de los materiales y de las cargas, el siguiente paso es seleccionar un índice de confiabilidad para la calibración del código. La selección del valor del índice de confiabilidad es un problema económico. Se debe seleccionar de acuerdo al coste ya la probabilidad de falla en el tiempo. Además, el índice de confiabilidad depende del tipo de elemento a analizar (viga, columna, placa, etc.). Normalmente los valores de  $\beta$  en el rango de 2.0 a 4.0 son utilizados en los criterios de diseño LRFD (Load Resistance Factor Design). El valor promedio calculado del índice de confiabilidad en los diseños de puentes, en el contexto internacional, es de 3,5 (Muñoz , 2012).

En la tabla 1, tabla 2 y tabla 3, se muestran algunas referencias de los índices de confiabilidad para la calibración de algunos códigos de diseño en el mundo, para algunas combinaciones de carga más usuales y para unos niveles de seguridad en estructuras de concreto.

**Tabla 1. Índices de confiabilidad para la calibración de algunos códigos de diseño**

<b>Estándar</b>	<b>Comentarios</b>	<b><math>\beta</math></b>
AISC, LRFD 1984, ANSI A 58.1 1982	Cargas Verticales (muertas, vivas y de nieve)	3.00
	Cargas verticales y de viento	2.50
	Cargas verticales y sísmicas	1.75
Código canadiense para acero, estructuras de concreto y puentes	Con un periodo de diseño de 30 años	3.50
Euro-código	Construcción normal	3.50
Códigos nórdicos (Dinamarca, Finlandia, Noruega, Groenlandia y Suecia)		4.30

Fuente: Martínez (2005).

**Tabla 2. Índices de confiabilidad según algunas combinaciones de carga**

<b>Descripción</b>	<b><math>\beta</math></b>
Combinaciones de Carga Muerta y Viva	3.00
Combinaciones de Carga Muerta, Viva y Viento	2.50
Cargas con Sismos	1.75
Mampostería	Varia de 4.0 a 8.0

Fuente: Ellingwood (1982).

**Tabla 3. Valores de índice de seguridad para un periodo de un año para el código Nórdico de diseño**

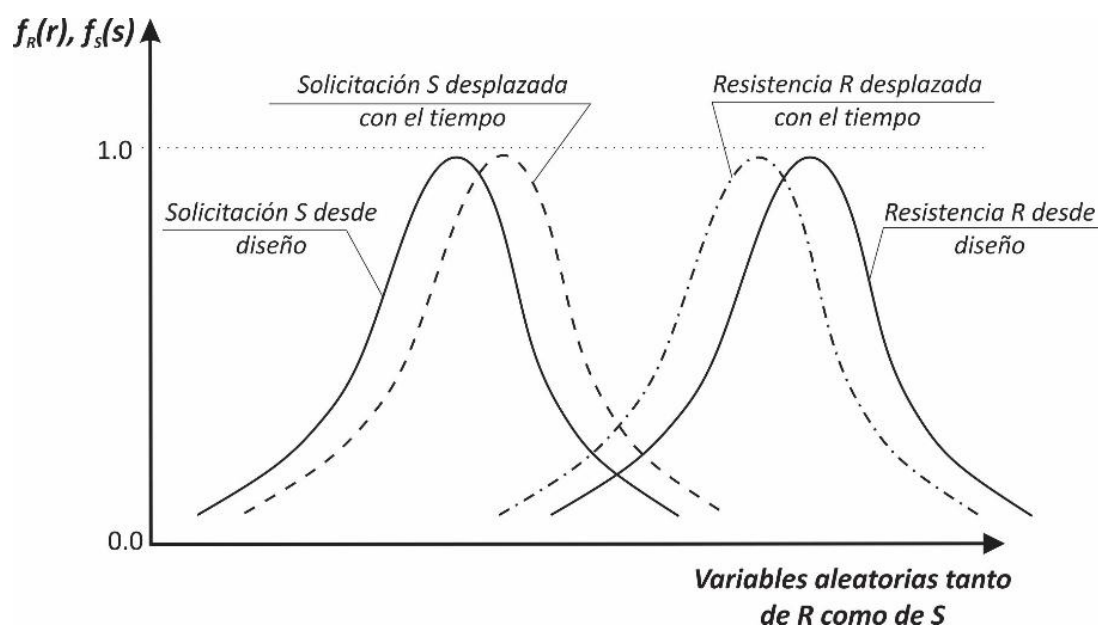
<b>Nivel de Seguridad</b>	<b>Índice de confiabilidad <math>\beta</math></b>
Bajo	3.71
Normal	4.26
Alto	4.75

Fuente: Nordic Committee on Building Regulations (1987).

Es importante saber que, altos valores de  $\beta$  muestran sistemas más seguros (menos Probabilidad de falla); y por el contrario, bajos valores de  $\beta$  demuestran sistemas menos confiables (mayor Probabilidad de falla). Contrario a lo que pasa con la Probabilidad de falla. Por ello el índice de confiabilidad y la Probabilidad de falla son inversos. Esto se puede ver en la ecuación (27), donde  $\beta$  es el negativo del inverso de la función de distribución normal estándar de la Probabilidad de falla. Además, el índice de confiabilidad ( $\beta$ ) o Probabilidad de falla (Pf) está siempre referenciado a un periodo de tiempo específico o de retorno.

El índice de confiabilidad es mucho mayor en la fase de evaluación o revisión que en la fase de diseño; visto desde otro punto de vista, en un proceso de revisión, la Probabilidad de falla es

mucho menor que en el diseño. Esto se debe principalmente a que, en la revisión, las cargas son mucho menores a las asumidas en el diseño (por ejemplo, la carga viva CV). Pero puede que en algún momento pueda ocurrir lo contrario a lo dicho anteriormente, en otras palabras, que la Probabilidad de falla aumente y el índice de confiabilidad disminuya. En la evaluación de puentes, las propiedades randómicas de los materiales que representa la resistencia “R” cambian con el tiempo y tienden a disminuir; mientras que las cargas vivas de la Solicitación “S” que pasan por el puente tienden a aumentar con el paso del tiempo (Moses, 2001). Eso significa que las variables aleatorias de R y de S tienden a variar con el tiempo, sujetas a la influencia del tráfico, el mantenimiento y el deterioro de los materiales. La figura 9 detalla el concepto anterior.



**Figura 9. Confiabilidad cambiando con el tiempo**

Fuente: Moses (2001).

En la evaluación de estructuras de tipo edificación, las variables que representan la resistencia “R” cambian con el tiempo y tienden a disminuir; mientras que las cargas vivas, que representan la Solicitación “S” tienden a mantenerse constantes, a no ser que haya un cambio de uso. Aunque

según Márquez (2011), en un promedio de 50 años, la carga viva puede aumentar de cinco (5) a seis (6) veces su valor, en un área determinada.

### 4.3 Factores de Seguridad en Formato de Factores Parciales

En la literatura existen varios formatos de factores parciales, pero el más usado es el formato LRFD de diseño (Ellingwood, 2000; Kim & Wen, 1987; Blockley, 1992; Ellingwood, 2000):

$$\phi R_n \geq \sum_{i=1}^n \gamma_i S_{N_i} \quad (30)$$

Donde:

$R_n$  : Resistencia Nominal o de diseño.

$S_{N_i}$  : Solicitación Nominal.

$\phi$  : Factor de Reducción de la Resistencia (Valores menores a 1).

$\gamma_i$  : Factores de Mayoración de la Solicitación  $i$  (Valores mayores a 1).

Siempre han existido dudas entre las definiciones de valores medios, nominales y factorizados. Si hablamos de la Resistencia, las relaciones entre los valores medios, nominales y factorizados serían los siguientes (ver figura 10):

$$\mu_R > R_n > \phi R_n \quad (31)$$

Donde:

$\mu_R$  : Valor medio de la Resistencia.

$R_n$  : Valor nominal o de diseño de la Resistencia.

$\phi R_n$  : Valor factorizado de la Resistencia.

Si hablamos de la Solicitación, las relaciones entre valores medios, nominales y factorizados sería lo contrario, de la siguiente manera (ver figura 10):

$$\mu_S < S_n < \gamma_i S_n \quad (32)$$

Donde:

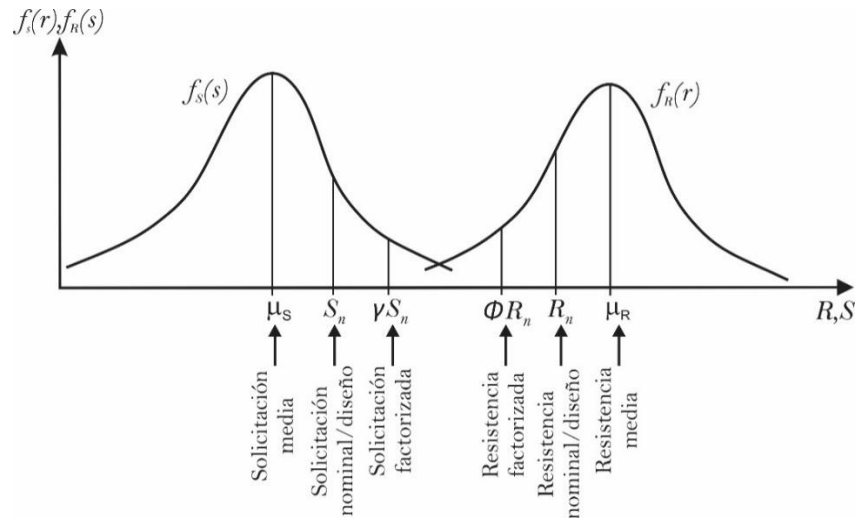
$\mu_S$  : Valor medio de la Solicitación.

$S_n$ : Valor nominal o de diseño de la Solicitación.

$\gamma_i S_n$ : Valor factorizado de la Solicitación.

En ocasiones el valor nominal suele ser el valor medio.





**Figura 10. Relación entre Valores medios, nominales y factorizados para la Resistencia y la Solicitud**

Fuente: Sánchez (2010).

**4.3.1 Factores parciales basados en valores centrales.** Suponiendo el caso en que solo hallan dos variables (Resistencia “R” y Solicitud “S”) y además que cada una está distribuida normalmente y son estadísticamente independientes, se puede llegar a esta ecuación:

$$\mu_R = \mu_S + \beta \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (33)$$

A esta ecuación se le puede introducir un factor  $\varepsilon$ , denominado *función de separación* (que toma valores de 0.75 casi siempre), además que se puede tener el valor de  $\beta$  así:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}{\sigma_R + \sigma_S} \quad (34)$$

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\varepsilon(\sigma_R + \sigma_S)} \quad (35)$$

Y despejando la Resistencia y la Solicitación en ambos lados tenemos:

$$\mu_R - \varepsilon\beta\sigma_R = \mu_S + \varepsilon\beta\sigma_S \quad (36)$$

O escrito en forma de coeficientes de variación tenemos:

$$(1 - \varepsilon\beta V_R)\mu_R = (1 + \varepsilon\beta V_S)\mu_S \quad (37)$$

Donde:

$V_S$  Y  $V_R$ : Coeficientes de Variación de la Solicitación y Resistencia, respectivamente.

Si lo volvemos al formato del factor de seguridad central (ecuación (9)) tenemos:

$$\lambda_0 = \frac{\mu_R}{\mu_S} = \frac{(1 + \varepsilon\beta V_S)}{(1 - \varepsilon\beta V_R)} \quad (38)$$

Entonces los factores de reducción y mayoración, desde el punto de vista de seguridad central, son respectivamente:

$$\bar{\Phi} = (1 - \varepsilon\beta V_R) \quad (39)$$

$$\bar{\gamma} = (1 + \varepsilon\beta V_S) \quad (40)$$

Donde:

$\bar{\Phi}$ : Factor de Reducción de la Resistencia para la seguridad central.

$\bar{\gamma}$ : Factor de Mayoración de la Solicitación para la seguridad central.

**4.3.2 Factores parciales basados en valores característicos.** Recordando la ecuación (12), donde se da la definición del factor de seguridad característico, llevándolo a la definición del índice de confiabilidad ( $\beta$ ), tenemos:

$$\lambda_k = \frac{R_k}{S_k} = \lambda_0 \frac{1 - k_R V_R}{1 - k_S V_S} = \left( \frac{\mu_R}{\mu_S} \right) \frac{1 - k_R V_R}{1 + k_S V_S} \quad (41)$$

Y reemplazando la ecuación (38) en la ecuación (41), tenemos:

$$\lambda_k = \left( \frac{(1 + \varepsilon\beta V_S)}{(1 - \varepsilon\beta V_R)} \right) \left( \frac{1 - k_R V_R}{1 + k_S V_S} \right) \quad (42)$$

Y reorganizando tenemos:

$$\lambda_k = \left( \frac{(1 - k_R V_R)}{(1 - \varepsilon\beta V_R)} \right) \left( \frac{(1 + \varepsilon\beta V_S)}{(1 + k_S V_S)} \right) \quad (43)$$

Entonces reorganizando al formato de  $\phi R_n = \gamma S_n$ , tenemos los factores reducción y mayoración, desde el punto de vista de seguridad característica, así [4]:

$$\phi = \frac{(1 - \varepsilon\beta V_R)}{(1 - k_R V_R)} \quad (44)$$

$$\gamma = \frac{(1 + \varepsilon\beta V_S)}{(1 + k_S V_S)} \quad (45)$$

Donde:

$\phi$ : Factor de Reducción de la Resistencia para la seguridad característica.

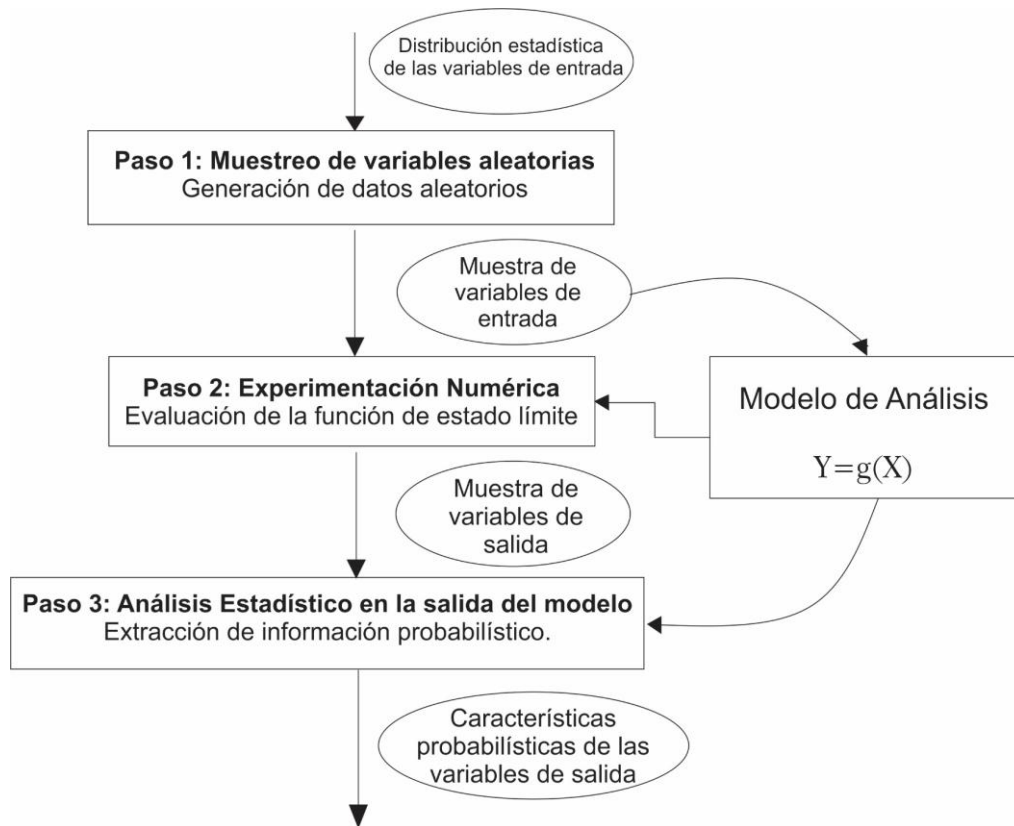
$\gamma$ : Factor de Mayoración de la Solicitación para la seguridad característica.

## 5. Marco Teórico: “Simulación de Montecarlo”

Los métodos de simulación son una herramienta poderosa para el desarrollo de funciones complejas o situaciones donde no existe una solución analítica. Estas técnicas son muy útiles, dado que son sencillas de implementar y no requieren de un manejo experimentado de la estadística o la probabilidad. La simulación consiste en generar aleatoriamente números y ajustarlos a una distribución estadística, para crear distintos escenarios a los cuales el sistema puede estar sujeto.

La simulación de MonteCarlo nace con los trabajos de Von Newman y Stanislaw Ulam en la II guerra mundial en el laboratorio Nacional de Los Álamos en Nuevo México, Estados Unidos. Pero el concepto nace en la ciudad de MONTECARLO, Mónaco, conocida como la “capital del juego y el azar” en donde los juegos de casinos tenían un gran parecido con el análisis aleatorio y probabilístico de la simulación.

Un procedimiento simple de este método se muestra en la figura 11, donde en tres simples pasos se explica la metodología de la simulación.



**Figura 11. Procedimiento simple de la simulación de MonteCarlo**

Fuente: Du (2005).

Un procedimiento más detallado para describir una simulación de MonteCarlo, de modo general, es la siguiente (Sánchez, 2010):

1. Definir las funciones del modelo matemático del problema.
2. Definir todas las variables aleatorias dentro del modelo matemático.
3. Determinar las distribuciones de probabilidad de cada una de las variables aleatorias escogidas.

4. Generar valores aleatorios para cada variable escogida en base a la distribución estadística escogida.

5. Ingresar en cada iteración los valores aleatorios de las variables a las funciones del modelo matemático. Este procedimiento se realiza un número  $N$  de veces suficientemente grande.

6. Extraer la información estadística y probabilística de los resultados de las funciones del modelo.

### 5.1 Generación de Números Aleatorios

Para la generación de números aleatorios, existen infinidad de herramientas computarizadas para calcular la cantidad de números aleatorios con la distribución de probabilidad estadística de su gusto. Ejemplos de estos softwares potentes son Matlab® o Excel®, que son algunos de los más usados en la actualidad.

Las computadoras usan generadores de números aleatorios por medio de funciones matemáticas y la mayoría de estos generadores utilizan alguna forma de regulación de congruencia. Ejemplos de estos generadores son el generador congruencial lineal, el generador multiplicativo y el generador mixto. Uno de los más usados es el primero que se mencionó, dado que varios sistemas de cómputo usan estos generadores. La ecuación que representa este generador es la siguiente:

$$x_{i+1} = (ax_i + c) \text{ módulo } m \quad (i = 0, 1, 2, \dots) \quad (46)$$

Donde  $x_i$  es la semilla,  $a$  es el multiplicador constante,  $c$  es el incremento y  $m$  es el módulo.

Usando esta ecuación, el valor de  $x_{i+1}$  es también igual al residuo de la división entre  $ax_i + c$  y

*m*. El número aleatorio entre 0 y 1 se genera entonces por medio de la siguiente ecuación:

$$R_i = \frac{(ax_i + c)}{m} \quad (47)$$

Para la generación de números aleatorios, se debe diferenciar entre las variables aleatorias que están correlacionadas y las que no. Una variable es correlacionable con otra cuando ellas tienen alguna dependencia matemática o física para su determinación. En otras palabras, sin conocer una, es imposible obtener la otra. Generar números aleatorios de variables no correlacionables es como se indica en la ecuación (46); mientras que la generación de números aleatorios correlacionados, existe un factor o matriz de correlación, que no es más que una matriz de covarianza. Debido a que este tema es de gran complejidad, se sugiere que sea estudiado a profundidad en las siguientes referencias: Sanchez (2010) y Haldar & Mahadevan (2000).

**5.1.1 Generación de números aleatorios no correlacionados.** El método más usado es el de la *Transformación Inversa*. Este método permite que se puedan obtener valores de  $X_i$  a partir de los números generados aleatoriamente en el rango de [0,1], con la siguiente función:

$$\begin{aligned} \hat{x}_i &= F_X^{-1}(u_i) \\ F_X(x_i) &= u_i, \quad u_i \in [0,1] \end{aligned} \quad (48)$$

Donde:

$F_X^{-1}(u_i)$ : Función de distribución acumulada inversa de la variable  $u_i$ .

Ejemplo:

Supóngase la siguiente función objetivo:

$$p(z) = e^{-z} \quad \text{donde } z \in [0, \infty] \quad (49)$$

La distribución de probabilidad acumulada sería entonces:

$$P(z) = \int_0^z e^{-z} dz = 1 - e^{-z} \quad (50)$$

Si se iguala esta función acumulada a  $u \in [0,1]$ , entonces  $P(z) = u$ , y se despeja la variable

$z = P^{-1}(u)$ , de la siguiente manera:

$$P(z) = u = 1 - e^{-z} \quad \rightarrow \quad z = -\log(1 - u) \quad (51)$$

Entonces el algoritmo para este ejemplo es:

1. Generar un número aleatorio con distribución uniforme  $u \in [0,1]$ .
2. Calcule el número aleatorio  $z = -\log(1 - u)$ .
3. Los números aleatorios obtenidos de  $z$  tienen distribución  $p(z) = e^{-z}$ .

## 5.2 Extracción de la Información Estadística y Probabilística

Cada simulación de MonteCarlo es un punto en el espacio muestral en donde el análisis estadístico del desarrollo del modelo en cada iteración provee información sobre la aleatoriedad



de la respuesta. Con esta información se pueden calcular histogramas de ocurrencia de frecuencias y para determinar que función de probabilidad es la que mejor se ajusta a los datos. Cuando la simulación se ha corrido un número  $N$  de veces, lo característico es obtener la media  $\mu$  y la desviación estándar  $\sigma$  de los resultados con las siguientes ecuaciones:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i \quad (52)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}} \quad (53)$$

### 5.3 Cálculo de la Probabilidad de Falla

Para evaluar la Probabilidad de falla por las simulaciones de MonteCarlo, se debe conocer de antemano la función de estado límite (ecuación (13), y que las simulaciones se evalúen en ella. Para  $N$  simulaciones la Probabilidad de falla es de la siguiente manera (Insua, Insua, Martin & Jimenez, 2008; Marek, 2001; Rubinstein & Kroese, 2008) y (Kalos & Whitlock, 2008):

$$P_f \approx \frac{N_f(\mathbf{g}(\vec{x}) \leq 0)}{N} \quad (54)$$

Dónde:

$\vec{x}$  : Vector de números randómicos de las variables  $R - S$ .

$N_f()$  : Número de simulaciones que producen falla del sistema ( $\mathbf{g}(\vec{x}) = R - S \leq 0$ ).

$N$  : Número total de simulaciones.

Una manera de mostrar la ecuación anterior, en forma vectorial y de fácil programación, puede ser mediante la función indicador, la cual se muestra en la ecuación (55):

$$I[\vec{x}] = \begin{cases} 1, & \text{si } \rightarrow g(\vec{x}) \leq 0 \\ 0, & \text{si } \rightarrow g(\vec{x}) > 0 \end{cases} \quad (55)$$

Una vez la función indicador  $I[\vec{x}]$  este completa, después de conseguido el número de iteraciones proyectadas, se realiza la sumatoria de los valores uno (1) que se hallan encontrado. La Probabilidad de falla será entonces la dada en la siguiente ecuación (Ecuación (56)):

$$p_f \approx \frac{\sum_{i=1}^N I(g(\vec{x}) \leq 0)}{N} \quad (56)$$

## 5.4 Precisión de la Simulación

Cuando se está desarrollando una simulación, siempre aparecen preguntas como las siguientes: ¿Cuándo detengo la simulación?, ¿Cuántas iteraciones debo realizar para alcanzar una precisión aceptable? Para responderlas, se tienen las siguientes alternativas, Sanchez (2010):

**5.4.1 Alternativa 1.** A continuación se presenta el desarrollo de la alternativa 1:

1. Escoger una Probabilidad de falla a alcanzar  $p_v$  y un coeficiente de variación  $V_{p_f}$ .

2. Calcular el Número de Iteraciones  $N$  con la siguiente ecuación:

$$N = \frac{(1 - p_v)}{V_{p_f}^2 \cdot p_v} \quad (57)$$

**5.4.2 Alternativa 2.** Si la distribución binomial se aproxima con una distribución normal se puede obtener el siguiente nivel de confianza  $C$  ( $0 \leq C \leq 1$ ) dentro de un rango de Probabilidad de falla así:

$$C = P \left[ -k \sqrt{\frac{(1 - p_v)p_v}{N}} \leq \frac{N_f}{N} - p_v \leq k \sqrt{\frac{(1 - p_v)p_v}{N}} \right] \quad (58)$$

Dónde:

$N_f$  : Número de simulaciones de falla.

$k$  : Número de desviaciones estándar que se toman para definir el intervalo.

Si  $k = 1$  entonces  $C \approx 68\%$ , si  $k = 2$  entonces  $C \approx 95\%$  y  $k = 3$  entonces  $C \approx 99\%$ .

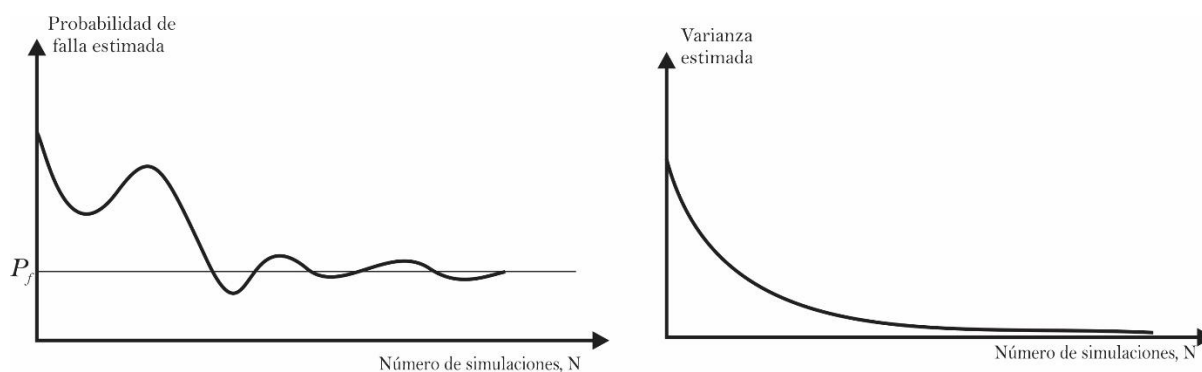
El error se puede calcular como:

$$\varepsilon(\%) = \sqrt{\frac{(1 - p_v)}{N \cdot p_v}} k \cdot 100 \quad (59)$$

**5.4.3 Alternativa 3.** En la mayoría de los problemas de ingeniería, la Probabilidad de falla oscila entre  $10^{-3}$  y  $10^{-6}$ . Se sugiere en la literatura un número de simulaciones diez veces mayor

a la probabilidad mínima esperada. Por ejemplo, si se espera una probabilidad de  $10^{-3}$ , el número de simulaciones a realizar sería de  $10^4 = 10,000$ .

En general, la simulación de MonteCarlo seguirá la tendencia de que a un mayor número de simulaciones  $N$ , mayor será la convergencia de los resultados, como se puede ver en la figura 12.



**Figura 12. Convergencia de la probabilidad de falla y la varianza estimada vs número de iteraciones**

Fuente: Sanchez (2010).

### 5.5 Técnicas de Reducción de Varianza

La simulación de MonteCarlo como se expuso anteriormente es un procedimiento muy simple, conocido como MonteCarlo crudo, en el cual su precisión depende fundamentalmente del número de iteraciones y de la eficiencia computacional de cada simulación. La eficiencia computacional de cada simulación depende de que tan compleja sea la evaluación de la función de estado límite, de la cantidad de variables aleatorias que involucre el problema y del número de iteraciones necesarias para obtener la precisión buscada. Debido a esto, los investigadores constantemente buscan metodologías que minimicen el número de iteraciones y el tiempo de cómputo. Esto se logra con las técnicas de reducción de varianza que fundamentalmente lo que

buscan es disminuir el número de iteraciones minimizando el error sin modificar el valor medio esperado.

En la literatura se pueden encontrar algunos métodos como los siguientes:

- Método de estimación puntual.
- Método Latín Hypercube.
- Método de muestreo estratificado.
- Método de Variables Anthithetic.
- Método de simulación direccional.
- Método de muestreo por importancia.
- Métodos basados en aprendizaje estadístico.
- Métodos adaptativos.
- Método de las cadenas de Markov.

La utilización de estos métodos implica mayor complejidad en programación, mayor tiempo de cómputo por iteración y no se sabría hasta qué punto es bueno perder la simplicidad del método por buscar reducir los tiempos de cálculo y cómputo. Este tema es una línea de desarrollo de investigación en donde se estudia la eficiencia de cada uno de estos métodos al desarrollo de problemas sencillos y complejos en la ingeniería civil.

## 6. Aplicaciones de la Confiabilidad Estructural

### 6.1 Aplicaciones en Sistemas y Elementos Simples y Complejos de Tipo Estructural

Puesto que el análisis de la confiabilidad estructural, es una herramienta que nos facilita realizar estudios y medir la eficiencia propia de las estructuras en términos de seguridad; existen variedad de métodos desarrollados con el paso del tiempo que forman parte de este análisis, los cuales facilitan la evaluación y la toma de decisiones a partir de enfoques específicos y parámetros modificables.

Diversos son los campos de aplicación de la confiabilidad estructural. Esta herramienta se fundamenta en un análisis estadístico que en conjunto con diversas funciones de distribución de probabilidad posibilitan determinar las características propias de un sistema, las cuales ayudan a verificar o garantizar que la estructura en estudio puede resistir los eventos y condicionantes que pueden ocurran durante su ejecución y vida útil basados en las estadísticas de ocurrencia.

A continuación, se presentarán brevemente artículos e investigaciones en donde se exponen sus metodologías y las conclusiones de sus estudios de confiabilidad que son aplicados en el campo de la ingeniería civil a nivel internacional algunos de ellos con enfoque en la optimización de cálculos computacionales.

**6.1.1 Reliability Engineering and System Safety.** Wang, Zhang & Li (2019), “Evaluación de la confiabilidad y seguridad del sistema estructural”. Debido a la gran importancia que se tiene de estudiar los problemas de seguridad en las estructuras civiles, es importante resaltar el uso de la teoría de confiabilidad, ya que son muchas las incertidumbres que se pueden plantear respecto al desempeño estructural de la edificación como de las acciones externas.

Muchos de los métodos que se han creado y mejorado son fundamentados en funciones de probabilidad aleatorias en las que las variables de entrada están asociadas con las incertidumbres derivadas de las características de la edificación. El artículo muestra su utilidad a la hora de resolver problemas multidimensionales con una eficiencia mejorada en comparación con métodos como la simulación Monte Carlo.

En este artículo se ha propuesto un método de análisis de confiabilidad basado en el momento, en este documento se muestra cómo se puede utilizar la información del momento de variables aleatorias en lugar de la distribución de probabilidad, con lo cual se pudieron establecer conclusiones como se mencionan a continuación:

La estimación de la probabilidad de falla estructural se puede basar en los momentos de variables aleatorias en lugar del problema de distribución de probabilidad, debido a que los momentos y distribuciones de probabilidad de variables aleatorias pueden determinarse únicamente, en el caso en que la variable aleatoria no tiene un MGE, se puede utilizar el método adaptativo según se explica en el artículo.

El método de evaluación de confiabilidad basado en el momento proporciona una diferente perspectiva para evaluar la confiabilidad estructural comparada con los enfoques convencionales que se basan en las simulaciones. El método funciona tanto para confiabilidad unidimensional como problemas multidimensionales. La implementación y precisión del método son verificados mediante ejemplos numéricos (Wang et al., 2019).

**6.1.2 An efficient approach for high-dimensional structural reliability analysis.** Zhu & Xu (2019), “Análisis de la confiabilidad estructural de alta dimensión”. Otro método a mencionar dentro de esta primera clasificación es el planteado en este artículo el cual se presenta un análisis

en función del método de entropía máxima (MEM), también enfocado en el análisis de momentos, pero esta vez fraccionales de orden inferior como una restricción.

Para abordar el desafío del análisis de confiabilidad de alta dimensión, un nuevo método basado en el método de máxima entropía (MEM) con los momentos fraccionales de orden inferior como restricciones desarrolladas se establece los pasos que se mencionan a continuación.

Se realiza una transformación de coordenadas, donde la función de rendimiento se transforma en el dominio donde las operaciones fraccionarias pueden funcionar bien.

Luego, se utiliza un esquema estimador-corrector para derivar rápidamente los órdenes fraccionarios y los multiplicadores de Lagrange para reconstruir la función de densidad de probabilidad (PDF). Además, se puede evitar un óptimo local utilizando el esquema estimador-corrector en MEM.

Se desarrolla una selección centrada en la discrepancia L2 (CL2) de simulaciones secuenciales de Latin-hypercube para la evaluación de momentos fraccionarios con alta eficiencia para problemas de alta dimensión.

El rendimiento del método propuesto para el análisis de confiabilidad de alta dimensión se valida por tres problemas típicos, en los que se realizan simulaciones de Monte Carlo (MCS) para proporcionar resultados para referencias.

El primer ejemplo implica una función de rendimiento lineal, donde la dimensión se adopta como 40, 100 y 250, respectivamente. Además, los resultados evaluados por el método propuesto se comparan con los de enfoques avanzados desarrollados previamente.



El segundo ejemplo considera una función de rendimiento no lineal típica, en la que la dimensión también varía entre 50, 100, 150 y 200.

El tercer ejemplo investiga el análisis de confiabilidad sísmica de una estructura histórica de DOF múltiple bajo movimientos de tierra estocásticos totalmente no estacionarios.

En los ejemplos 2 y 3, el método de simulación de subconjunto también se emplea para validar el método propuesto. Según las experiencias computacionales, en el método propuesto, el número requerido de muestras es inferior a 1000 cuando  $d < 300$ ; cuando  $d = 300-600$ , el número de muestras podría ser 1000—2000 y pueden ser necesarias más de 2000 muestras cuando  $d$  es muy grande, es decir,  $d > 600$ . Todos los resultados computacionales demuestran que el método propuesto es de precisión y eficiencia para problemas de confiabilidad de alta dimensión.

Dado que las densidades unimodales se consideran en este artículo, el método propuesto puede no ser capaz de manejar las densidades multimodales, donde podrían estar involucrados múltiples modos de falla. En segundo lugar, el número de restricciones de momentos fraccionarios siempre se elige empíricamente. Por ejemplo, en los Ejemplos 1 y 2, se emplean tres momentos fraccionarios como restricciones, mientras que

En el ejemplo 3 se utilizan restricciones de cuatro momentos fraccionarios para lograr buenos resultados. Puede ser necesario un criterio más racional para determinar este número (Zhu & Xu, 2019).

**6.1.3 Decision making for probabilistic fatigue inspection planning based on multi-objective optimization.** Kim & Frangopol (2018), “Toma de decisiones para la planificación probabilística de inspección de fatiga basada en la optimización de objetivos múltiples”. Dentro

de las condiciones del análisis de la confiabilidad estructural, está el estudio de la vida útil de una estructura, la toma de decisiones para la planificación probabilística de inspección de fatiga basados en la optimización de objetivos múltiples requiere una investigación a través de procesos sistémicos de evaluación y predicción de las edificaciones deterioradas los cuales buscan medir su rendimiento y establecer planes óptimos de inspección y reparación bajo incertidumbre. Para llevar a cabo la estrategia mencionada este artículo plantea que es necesario aplicar el enfoque del proceso de optimización probabilística de objetivos múltiples (MOPOP), el cual reduce en gran medida el alto costo computacional y la dificultad de las soluciones óptimas de Pareto pues el aumento en el número de objetivos requiere simulaciones probabilísticas muy avanzadas.

Debido a la probabilidad de detección de daños por grietas por fatiga, la demora esperada de detección de daños por fatiga y la demora de reparación esperada se han desarrollado y aplicado a la optimización de dos o tres objetivos para la planificación de la inspección. La planificación de inspección de MOPOP para estructuras de hormigón armado bajo corrosión a considerando cuatro objetivos que han sido introducido por Kim & Frangopol (2018). Ellos utilizan el enfoque de reducción objetiva para identificar los objetivos esenciales y redundantes del MOPOP.

Kim & Frangopol (2018), investigaron también la planificación del monitoreo de salud estructural de MOPOP, utilizando una simple toma de decisiones de atributos múltiples (MADM) para seleccionar una solución óptima de Pareto bien equilibrada. Sin embargo, es necesario desarrollar un marco de toma de decisiones sistémico para una planificación óptima de la inspección a fin de considerar varios métodos de toma de decisiones y abordar una gran cantidad de objetivos de manera eficiente. Además, debe investigarse la eficiencia computacional de la toma de decisiones y el efecto de las incertidumbres asociadas con la predicción del daño por grietas por fatiga en la toma de decisiones para una planificación óptima de la inspección. Todo

lo anteriormente mencionado generando un menor costo computacional y buscando reducir la ineficiencia en la selección de soluciones óptimas. Para lograr todo eso, los objetivos múltiples se convierten en un solo objetivo, como resultado, se obtiene una única solución óptima para la planificación de la inspección (Kim & Frangopol, 2018).

**6.1.4 Reliability analysis of deteriorating structural systems.** Straub, Schneider, Bismut & Kim, 2020), “Análisis de confiabilidad de sistemas estructurales deteriorados”. Otro de los grupos de utilidad de la confiabilidad estructural son las aplicaciones simples, en este estudio se detalla cómo los sistemas estructurales deteriorados y los problemas de confiabilidad exigen una solución respecto a la variación en el tiempo; el estudio puede plantearse por medio de una serie de incertidumbres invariables en el tiempo, siendo una táctica potencialmente efectiva para aquellas situaciones en las que las soluciones directas del problema son desafiantes para sistemas estructurales con muchos elementos o procesos de cargas arbitrarios. En el análisis de la confiabilidad de sistemas estructurales deteriorados se revisa detalladamente el planteamiento y se amplía la aproximación a edificaciones de las cuales se conservan datos de revisión y monitoreo. En general, este método plantea la combinación de procedimientos basados en muestreo con una aproximación FORM (método de confiabilidad de primer orden) del problema del sistema en serie que surge a partir del estudio de por vida.

El análisis de confiabilidad de los sistemas estructurales deteriorados requiere procedimientos computacionales eficientes, porque la confiabilidad necesita ser evaluada en múltiples puntos en el tiempo. Al calcular la confiabilidad condicional en los datos de inspección o monitoreo, el análisis debe repetirse durante todo el período cada vez que haya nueva información disponible. Todo esto motiva el desarrollo de enfoques eficientes para calcular la confiabilidad de las estructuras que se han visto deterioradas con el tiempo. En este artículo, sigue la estrategia de

discretizar el tiempo y representar el problema de confiabilidad de la variante del tiempo mediante una serie de problemas de confiabilidad invariables en el tiempo.

El cálculo secuencial inteligente de la confiabilidad invariante en el tiempo en diferentes momentos  $t$  puede reducir el número de evaluaciones de la función de estado límite por un factor del orden de 10, que es sustancial. Es importante destacar que presentamos una forma simple de calcular la probabilidad acumulativa de falla  $Pr [F (t)]$  basada en métodos de muestreo avanzados sin evaluaciones adicionales de la función de estado límite, lo que puede reducir aún más el costo computacional en un factor de 10 o más.

Mientras el problema involucre solo una variable de carga de variante de tiempo y los intervalos de tiempo se seleccionen suficientemente pequeños, el error es pequeño, limitado y siempre conservador. Si existen múltiples procesos de carga de variante de tiempo, la calidad de la aproximación depende de qué tan bien se puedan aproximar mediante variables aleatorias invariantes en el tiempo.

Es importante destacar que:

- Este error de aproximación puede evaluarse sin considerar el deterioro.
- En segundo lugar, se introduce un error al calcular las probabilidades de falla del intervalo con FORM / SORM o métodos basados en muestreo. Este error de aproximación se discute en la literatura general sobre métodos de confiabilidad estructural y, por lo tanto, se entiende bien.
- En tercer lugar, la aproximación basada en FORMULAR de la evaluación del sistema en serie introduce otro error. En todos los casos investigados, encontramos que este error es

tan pequeño que no puede cuantificarse en relación con una solución de referencia de Monte Carlo.

Como enfatizamos, se necesita cuidado especial al considerar los resultados de inspección y monitoreo. La literatura sobre la actualización bayesiana de la confiabilidad y sobre la planificación de las inspecciones y el monitoreo basada en la confiabilidad y el riesgo no siempre ha definido y calculado rigurosamente la confiabilidad exacta de las variantes de tiempo de los sistemas estructurales. (Para los componentes estructurales, las funciones de estado límite son principalmente de la primera clase y por lo tanto, la equivalencia entre la falla en un punto en el tiempo y el evento de falla acumulativa se mantiene, lo que evita el problema). La fiabilidad condicional debe calcularse considerando que todos los eventos de falla de intervalo desde el tiempo 0 en adelante no parecen haber sido reconocidos previamente.

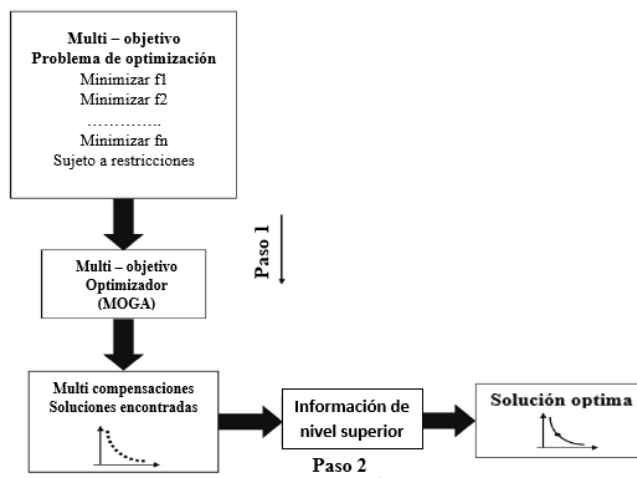
Las soluciones generales al problema del cruce, en la medida en que no están restringidas a algunos casos especiales, son exigentes conceptual y computacionalmente e introducen errores de aproximación propios. Sin embargo, a la luz de los nuevos desarrollos en métodos eficientes para el análisis de confiabilidad estructural, creemos que vale la pena revisar los algoritmos para resolver el problema general de cruzamiento (Straub, Schneider, Bismut & Kim, 2020).

**6.1.5 Multi-objective reliability based design optimization of coupled acousticstructural system.** Dammak & El Hami (2019), Optimización de diseño basada en confiabilidad multi-objetivo del sistema acústico- estructural acoplado”. Este trabajo busca presentar un método para diseñar los fenómenos vibroacústicos para un sistema acústico-estructural acoplado. El diseño confiable optimizado se obtuvo teniendo en cuenta las incertidumbres de las variables de diseño, para hacer una compensación entre la masa estructural, el desplazamiento de la placa y la presión

acústica, se adoptan los procedimientos de optimización de objetivos múltiples (MOO) y de optimización de diseño basado en confiabilidad de objetivos múltiples (MORBDO). Este último tiene como objetivo mejorar el rendimiento estructural del problema acoplado bajo restricciones probabilísticas relacionadas con la presión acústica interior. Para minimizar tanto la masa como el desplazamiento de la estructura mientras se satisfacen las restricciones probabilísticas que representan el problema de confiabilidad y la presión acústica, se adopta un algoritmo genético multiobjetivo (MOGA) que utiliza la caja de herramientas matlab gamultiobj para generar frentes óptimos de Pareto. El método de selección de distancia mínima (MDSM) se usó para encontrar la masa y el desplazamiento óptimos desde el frente de Pareto con respecto a la presión acústica y el objetivo de confiabilidad.

Este método es eficiente para confirmar la solución óptima para múltiples objetivos problema. Los resultados muestran que el MORBDO genera un frente de Pareto que se coloca dentro del frente de Pareto del MOO determinista, lo que indica que se debe hacer un compromiso entre las actuaciones y el nivel de fiabilidad.

La optimización vibro acústica es una de las aplicaciones en la que las investigaciones no han examinado incertidumbres, mientras que han demostrado que los sistemas acústico-estructural acoplado conllevan a uno de los temas claves de estudio para mejorar sus rendimientos. En el artículo se plantea el proceso con el cual se lleva a cabo este análisis como se ilustra en la figura 13.



**Figura 13. Diagrama de flujo del procedimiento evolutivo de optimización de objetivos múltiples**

Este proceso emplea dos placas flexibles acopladas con una cavidad rectangular acústica permitiendo el planteamiento analítico para investigar la presión acústica dentro de la cavidad y los desplazamientos de las placas, a través del acople entre el método híbrido con el algoritmo genético para integrar el análisis de confiabilidad. Los resultados indican que el método híbrido (HM) junto con el algoritmo genético multi-objetivo (MOGA) son capaces de generar soluciones de Pareto confiables y distribuidas (Dammak & El Hami, 2019).

**6.1.6 Reliability-based Robust Design Optimization with the Reliability Index Approach applied to composite laminate structures.** Das Neves & Conceição (2019), “Fiabilidad basados en la optimización del diseño robusto con la fiabilidad enfoque del índice aplicado a estructuras laminadas compuestas”. En el campo de la ingeniería, el diseño estructural es uno de los temas más relevantes de la investigación científica. En el advenimiento de nuevos materiales de alto rendimiento y tecnologías de fabricación avanzadas, los diseñadores tienen la oportunidad de ejecutar y explorar nuevas soluciones e ideas constructivas y, al mismo tiempo, tienen que lidiar con su incertidumbre inherente.

Ahora se requiere que los diseños sean óptimos, con respecto a algunos objetivos deseados, los diseños óptimos, sean únicos o no, son soluciones muy superiores al promedio y será más sensible a la incertidumbre en los parámetros y variables del sistema. Por lo tanto, no solo existe la necesidad de optimizar sino también hacerlo de acuerdo con los conceptos de robustez y confiabilidad. La robustez está relacionada con la capacidad de un sistema para mantener su respuesta a bajos niveles de variabilidad, bajo incertidumbre sobre las condiciones de operación, y la confiabilidad mide su probabilidad de falla.

La optimización bajo cada uno de estos conceptos se conoce como Optimización de diseño Robusta (RDO) y optimización de diseño basada en confiabilidad (RBDO). El comportamiento de los materiales compuestos se ve afectado en gran medida por incertidumbres sobre sus propios parámetros y acciones exteriores.

Otro enfoque de optimización es llevado hacia el campo del diseño robusto basado en la confiabilidad (RBRDO) de estructuras laminadas compuestas de capas angulares. Este método considera la minimización del peso (óptima) y el determinante de la matriz de varianza-covarianza de los funcionales de respuesta del sistema (robustez) como sus componentes principales. La medición de la confiabilidad se lleva a cabo mediante el enfoque del índice de confiabilidad (RIA) como un ciclo interno. Para esta metodología la clave está en el uso exclusivo de algoritmos evolutivos permitiendo la convergencia global en los ciclos de optimización. El problema se representa por medio de un ejemplo numérico y los resultados se evalúan en comparación con planteamientos RBRDO y RDO. Los resultados en esta aplicación señalan que para las estructuras compuestas de múltiples componentes las medidas de integridad estructural determinista y probabilística son bastante sensibles a las incertidumbres (Neves Carneiro & Conceição, 2019).



**6.1.7 Seismic reliability-based robustness assessment of three-dimensional reinforced concrete systems equipped with single-concave sliding devices.** Castaldo, Mancini & Palazzo, (2018), “Evaluación de robustez basada en la fiabilidad sísmica de sistemas de hormigón armado tridimensionales equipados con dispositivos de deslizamiento cóncavo simple”. Como anteriormente se menciona el diseño robusto es una de las aplicaciones a tener presentes, por ello la evaluación de robustez basada en la confiabilidad sísmica de sistemas de hormigón armado (RC) tridimensionales equipados con dispositivos de deslizamiento cóncavo simple como sistemas de péndulo de fricción cóncavo (FPS) requiere un análisis mediante la estimación de la confiabilidad sísmica en su vida útil (50 años) de diversos modelos a fines con múltiples escenarios de mal funcionamiento de los aisladores sísmicos. Entre los problemas, la pseudoaceleración de respuesta elástica correspondiente al período aislado se acepta como la variable aleatoria relevante y a través del uso de la técnica de muestreo de latin hypercube, se fijan los datos de entrada para desarrollar el análisis de historia de tiempo elásticos en 3D lo cual permite calcular las curvas de rendimiento estructural bivariado en cada nivel del RC comparándolas con el ábaco de diseño estructural basado en la confiabilidad sísmica para los dispositivos FP.

El objetivo de esta investigación es examinar la robustez sísmica de un 3D RC estructura equipada con dispositivos FP cóncavo simple, en términos probabilísticos. Específicamente, se presentan diferentes modelos relacionados con diferentes escenarios de falla de los dispositivos FP y, suponiendo una vida útil de 50 años y L’Aquila (Italia) como sitio de referencia, se asumen las principales características del terremoto como variables aleatorias relevantes.

Teniendo en cuenta los tres componentes de cada movimiento de tierra sísmica, se han llevado a cabo varias simulaciones inelásticas de la historia del tiempo en 3D para definir las

funciones de densidad de probabilidad logarítmica monovariada y bivariada (conjunta) en los parámetros de respuesta adoptados como parámetros de demanda de ingeniería. Después de eso, suponiendo dominios objetivos de rendimiento bidimensionales, las probabilidades bivariadas superiores se han calculado para cada modelo de las dos con configuraciones estructurales (con y sin las vigas de conexión a nivel de subestructura) todo con la finalidad de estudiar la confiabilidad estructural (Castaldo et al., 2018).

**6.1.8 Optimal and acceptable reliabilities for structural design.** Fischer, Viljoen, Köhler, & Faber (2019), “Fiabilidad óptima y aceptable para el diseño estructural”. Una perspectiva para determinar criterios para el desempeño de la confiabilidad de las edificaciones en el desarrollo de códigos de diseño semi-probabilístico consiste en utilizar las confiabilidades objetivos provisionales suministrados en el Código del Modelo Probabilístico JCSS. Para que la confiabilidad sea óptima y aceptable en el diseño estructural como se define en el documento ISO 2394, pueden emplearse las confiabilidades mínimas aceptables resultantes en combinación con las confiabilidades objetivo de JCSS para garantizar la aceptabilidad en términos de seguridad.

El Código del Modelo Probabilístico de JCSS proporciona objetivos tentativos derivados de la optimización monetaria utilizando un enfoque genérico desarrollado por Rackwitz. En esta investigación, este enfoque se revisa y se extiende para proporcionar un marco para elegir un nivel de fiabilidad adecuado tanto en términos monetarios optimización (confiabilidades óptimas) y aceptación del riesgo social con respeto a la seguridad de la vida (confiabilidades aceptables). Estos últimos se derivan del principio de costos marginales que salvan vidas. Para una implementación basada en el Índice de calidad de vida aceptable las confiabilidades se pueden usar, por ejemplo, para definir requisitos mínimos a la hora de la calibración de código o como condición límite para la optimización directa utilizando métodos probabilísticos. La optimización

monetaria y la aceptación del riesgo social se tratan como dos aspectos del mismo problema de decisión, lo que lleva a la formulación de un marco general para ambos. Este marco luego se aplica a la derivación de confiabilidades óptimas y aceptables para el diseño estructural, utilizando el enfoque de optimización de Rackwitz como punto de partida. Con base en estudios de parámetros simples, las confiabilidades objetivo (óptimas) dadas en el Código del Modelo Probabilístico de JCSS se reproducen en función de los costos relativos de las mejoras de seguridad y las consecuencias monetarias de la falla. Para la definición de confiabilidades mínimas aceptables basadas en el principio de costos marginales de salvamento, se ha derivado un formato basado en “costos relativos de salvamento de vidas”, que forma la base también para las confiabilidades aceptables dadas en el Anexo G de ISO 2394: 2015. La mayor ventaja del marco descrito en este documento es su simplicidad, lo que facilita la comprensión de la influencia de los diferentes parámetros utilizados por el modelo, lo que permite derivar estimaciones de "orden de magnitud" para confiabilidades óptimas y aceptables basadas en los factores de influencia más importantes (Fischer, Viljoen, Köhler & Faber, 2019).

**6.1.9 Methodology for assessing the probabilistic condition of an asset based in concepts of structural reliability “PCBM - Probabilistic Condition Based Maintenance”.** Teixeira & Junior (2016), “Metodología para evaluar la condición probabilística de un activo basada en conceptos de confiabilidad estructural "PCBM - Mantenimiento basado en condición probabilística”. La confiabilidad estructural y sus diferentes métodos se utilizan para evaluar la integridad estructural, unos de los métodos a implementar bajo la condición PCBM (Mantenimiento basado en condiciones probabilísticas) como una extensión de CBM (Mantenimiento basado en condiciones) se lleva a cabo a través de la probabilidad de falla y el índice de confiabilidad; Este artículo indica que bajo resultados experimentales y la correlación

entre el modelo probabilístico y determinístico verifican la posibilidad de utilizar esta metodología en el proceso de toma de decisiones, lo cual ampliaría el concepto de mantenimiento basado en análisis probabilísticos, también se sugiere la realización de más investigaciones de monitoreo en la utilización de la probabilidad de falla o índice de confiabilidad.

La metodología para la implementación del concepto y el desarrollo sigue los siguientes pasos:

- Se construyó un modelo experimental que consta de un motor eléctrico de 0.25cv, que acciona tres ejes con diámetros de 12.7 mm, 19.0mm y 25.4mm.
- En cada uno de estos ejes, un disco de acero yace acoplado. Este disco tiene como objetivo promover un esfuerzo dinámico para el eje.
- Se instaló en cada eje una lámina de acero para promover el desgaste. El sistema de recolección y medición se instaló en las placas de desgaste para medir tensiones.
- El modo de falla elegido para el estudio fue el modo de falla por fatiga.
- Los datos de deformación fueron recolectados por extensometría. Se realizaron en dos situaciones, con una velocidad de 970 CPM y 1512 CPM. Los datos recopilados fueron modelados por FEM para determinar la tensión en el eje.
- Con los esfuerzos máximos y mínimos que actúan sobre el eje, se determinó el modelo de distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los datos a las rotaciones de 970 CPM y 1512 CPM respectivamente.
- Se eligió el método FORM (Método de confiabilidad de primer orden).

A pesar de que las probabilidades de falla son muy pequeñas, este experimento muestra que los resultados de la probabilidad de falla fueron más altos para el 1512 CPM en comparación con el 970CPM, así como las tensiones en el eje. Para una situación simplificada como esta indicaría un "riesgo" mayor para un sistema con mayores tensiones. Los resultados aún son preliminares y necesitan más pruebas, pero abre una perspectiva para el uso de la probabilidad de falla o índice de confiabilidad como una variable de monitoreo. Por lo tanto, ampliará el concepto de mantenimiento basado en condiciones a mantenimiento basado en condiciones probabilísticas. Se requieren experimentos en sistemas reales y el desarrollo de límites para posibles modos de falla para la implementación y desarrollo completo de este concepto (Teixeira & Junior, 2016). Esto no lleva a ver como las simulaciones siendo una herramienta muy conocida en el campo de la ingeniería y análisis, para el diseño u optimización de sistemas, sigue siendo un campo vasto que requiere de mayores investigaciones que permitan prever situaciones inesperadas y de riesgo para las estructuras. Utilizar metamodelos multinivel permite una cuantificación más eficiente de la incertidumbre, la caracterización de estos problemas se convierte en la base fundamental a la hora de definir las variables de entrada; estas variables se modelan mediante cuadros de probabilidad, los cuales relacionan la incertidumbre epistémica y aleatoria. Aunque los metamodelos permiten una mayor estimación de la probabilidad de falla en un número limitado de ejecuciones de la función de rendimiento generalmente este método aumenta la complejidad de los análisis de confiabilidad estructural en comparación con los sistemas tradicional es (Schöbi & Sudret, 2017).

**6.1.10 System reliability-based direct design method for space frames with cold-formed steel hollow sections.** Liu, Zhang & Rasmussen (2018), "Método de diseño directo basado en la confiabilidad del sistema para marcos espaciales con secciones huecas de acero conformadas en frío". En este documento, el enfoque de diseño directo por análisis se denomina "Método de

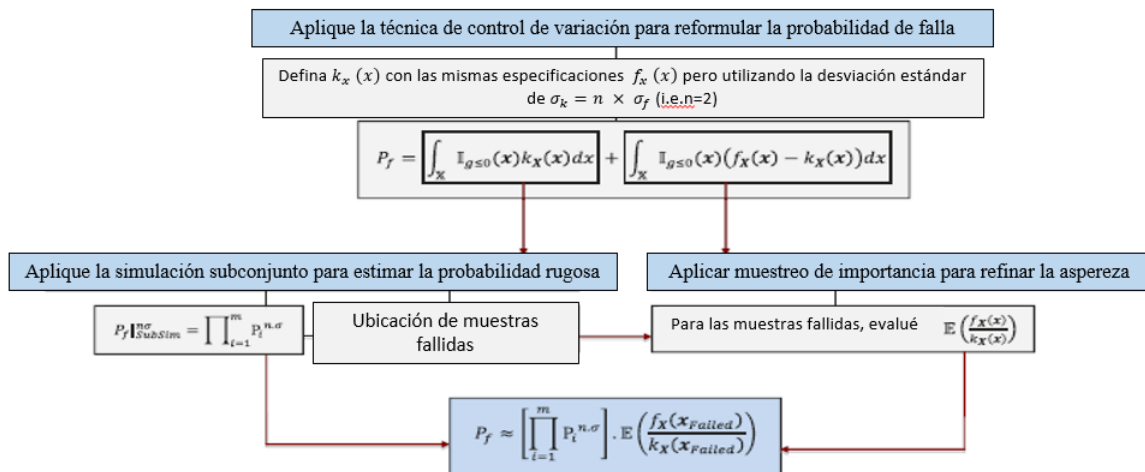
diseño directo" (DDM). El DDM proporciona la característica única de que la falla del sistema (resistencia máxima del cuadro) en lugar del estado límite del miembro se considera el criterio de diseño. El análisis del marco en el DDM incorporará todas las fuentes de acciones no lineales importantes que afectan el comportamiento estructural, en particular los efectos de segundo orden, la plasticidad, la semi-rigidez de las conexiones, la tensión residual, la imperfección geométrica inicial, y podrá detectar todos los estados límite relevantes (por ejemplo, rendimiento seccional y pandeo de miembros) cubiertos por las ecuaciones de especificación. La esencia del DDM es que la estructura se modela de la manera más realista posible, hasta el punto de simular con precisión la respuesta estructural que se lograría en las pruebas físicas de la estructura.

El método denominado Método de diseño directo (DDM), consiste en la implementación de elementos finitos inelásticos no lineales geométricos con el fin de establecer la resistencia final de los marcos estructurales de acero y postumo a ello facilitar un factor de resistencia del sistema ( $\phi_s$ ) según el estudio, esto permite tener en cuenta los efectos de las incertidumbres a la hora de seleccionar los parámetros geométricos, de rigidez y resistencia, los resultados del análisis de confiabilidad del sistema muestran que, aunque los marcos tienen diferentes diseños, geometrías y modos de falla, la dispersión de las características probabilísticas de la resistencia final de los marcos es bastante menor, con proporciones medias a nominales que varían entre 0.99 y 1.08, este rango de factor de resistencia del sistema conduciría a un índice de confiabilidad entre 2.25 y 2.5 para las cargas combinadas de gravedad y viento (Liu et al., 2018).

**6.1.11 Hybrid control variates-based simulation method for structural reliability analysis of some problems with low failure probability.** Rashki (2018), "Método de simulación basado en variantes de control híbrido para el análisis de confiabilidad estructural de algunos problemas con baja probabilidad de falla". El análisis de confiabilidad de sistemas con

función de rendimiento no lineal y poca probabilidad de falla ha generado un desafío en el área del análisis de confiabilidad. El método descrito en este estudio señala el enfoque a implementar para aproximar las probabilidades de fallas pequeñas, al introducir las variables de control de la función de densidad de probabilidad (PDF), la finalidad del método se cumple pues la integral de probabilidad de falla original se formula en base a la técnica de variables de control (CVT).

Como efecto de este planteamiento, la cooperación adaptativa entre la simulación de subconjunto (SubSim) y la CVT implica un término de probabilidad y uno de ponderación adaptativa que refina la probabilidad obtenida como se describe en su proceso en la figura 14.



**Figura 14. Diagrama de flujo del enfoque de simulación propuesto**

Al introducir variantes de control de PDF, PDF-CSS se presenta para el análisis de confiabilidad de los sistemas con una pequeña probabilidad de falla. Con este fin, se introducen variantes de control convenientes para el PDF al aumentar los momentos del PDF original y, en consecuencia, la probabilidad de falla se reformula en base a la CVT. La formulación propuesta consta de dos términos integrales separados. El uso del SubSim y la introducción de la función IS casi-óptima en consecuencia condujo a convertir las integrales propuestas en una formulación de probabilidad de falla bien organizada. Como resultado, el conocido SubSim se aproxima a una

probabilidad aproximada (que requiere muchas menos muestras en comparación con el SubSim original) y un término IS regula la probabilidad sin requerir ningún muestreo adicional. La eficiencia y la robustez del método se examinaron resolviendo problemas no lineales de confiabilidad numérica y de ingeniería. El resultado muestra que cuando el LS y el IS no pueden proporcionar resultados y el SubSim requiere un gran tamaño de muestra, el enfoque propuesto aproxima la probabilidad de falla con un tamaño de muestra sensible con precisión. Se muestra que, para algunos problemas no lineales, la llamada  $g$  requerida del enfoque propuesto es inferior al 1% del SubSim. Los resultados muestran que al implementar la combinación no solo el método se vuelve más eficiente, sino que más completo que los métodos de confiabilidad comunes (Rashki, 2018).

En el campo de la ingeniería civil, las fracturas por fatiga muestran uno de los mayores retos al momento de definir los sistemas de análisis, es frecuente observar anomalías en juntas soldadas en plataformas de acero ortotrópicas (ODS) al cabo de unos años de funcionamiento, estas se convierten en el principal mecanismo de deterioro que interfiere en la capacidad de servicio de los ODS. La evaluación dinámica a nivel de sistema basada en red bayesiana sobre la confiabilidad de fatiga de las cubiertas de acero ortotrópicas, establece un modelo dinámico para el análisis de la confiabilidad proponiendo la aplicación de un algoritmo de interferencia exacto con variables discretas. Empleando el modelo DBN (modelo dinámico de red bayesiana), la confiabilidad se puede predecir y actualizar con los resultados de evaluación y seguimiento a nivel de sistema. Estudios de este método se han implementado en China, donde se seleccionó un puente OSD típico con el fin de derivar el espectro de tensión requerido por el modelo DBN, empleando el modelo de tráfico estocástico generando las simulaciones Monte Carlo basados en la influencia; esta prueba mostro que la confiabilidad de la fatiga puede predecirse a nivel de



componentes y de sistemas (Zheng, Kaewunruen, Zhu, Heng & Baniotopoulos, 2019).

**6.1.12 Probabilistic methods for planning of inspection for fatigue cracks in offshore structures.** Lotsberg, Sigurdsson, Fjeldstad & Moan (2016), “Métodos probabilísticos para la planificación de la inspección de grietas por fatiga en estructuras costa afuera”. Debido a la naturaleza de los fenómenos, cuando se generan cambios en los supuestos para el análisis de fatiga, las consecuencias se observan significativamente. Para predecir el crecimiento de grietas es necesario un análisis mecánico que permite tener presente la probabilidad de detección después de un evento de inspección. Según la investigación los métodos probabilísticos para la planificación de la inspección de grietas por fatiga en estructuras, deben medirse según los datos S-N (datos de prueba).

Para fines de diseño, es apropiado usar valores conservadores para los parámetros requeridos para los análisis. Sin embargo, para planificar la inspección, es importante utilizar valores relevantes (esperados o mejores estimados) e incertidumbres asociadas para predecir resultados precisos que permitan que las inspecciones se dirijan a las áreas de puntos críticos donde es más probable que ocurran las grietas por fatiga primero. El uso de suposiciones inconsistentes en el análisis puede dirigir la inspección a áreas con una larga vida de fatiga y, por lo tanto, uno podría tener una falsa impresión de la confiabilidad de la estructura con respecto a la fatiga. Si se ha realizado un análisis de fatiga confiable para el diseño, este análisis también se puede usar para planificar la inspección del servicio. Sin embargo, el enfoque durante un diseño a menudo es diferente del de la planificación de la inspección donde se prefieren las vidas de fatiga calculadas "consistentes" para lograr una clasificación relativa sólida de dónde es más probable que ocurran grietas de fatiga. Por lo tanto, para aprender lo más posible de una inspección en servicio de una junta en una plataforma, la selección debe basarse en un análisis de fatiga que se haga para este

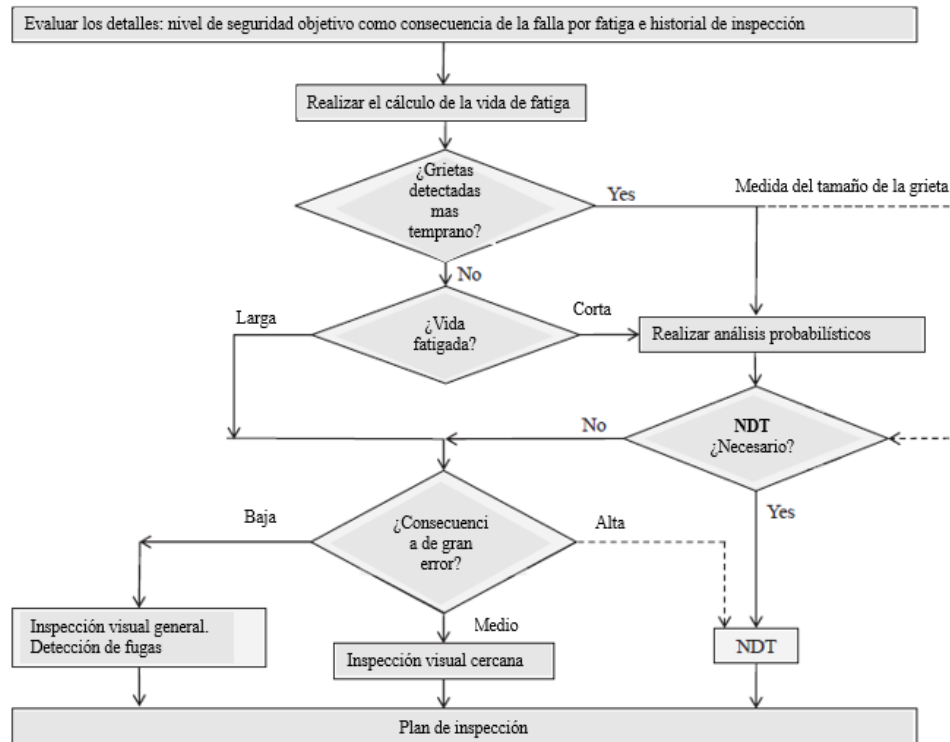
propósito y que sea lo más consistente posible (o donde se logre un rango correcto de las articulaciones en términos de vida real de fatiga). También se desea un valor absoluto realista de vidas calculadas de fatiga para diferentes detalles como base para la planificación de inspección probabilística para establecer un nivel de referencia sólido para la cantidad de inspección recomendada. Algunas diferencias típicas entre un análisis de fatiga destinado a ser la base para la planificación de la inspección y un análisis de fatiga utilizado para el diseño son:

1. No todas las áreas se analizan en detalle en una etapa de diseño. A veces se realiza un análisis de detección de la utilización de la fatiga, de modo que una evaluación adicional se concentra en los detalles que requieren un análisis adicional antes de que puedan concluirse para cumplir con los criterios de diseño de la fatiga.

2. Las suposiciones conservadoras con respecto a los factores de concentración de estrés de detalles complejos a menudo se hacen para evitar el análisis de elementos finitos que consume mucho tiempo, lo que podría proporcionar un estrés de punto crítico más bajo y documentar una vida de fatiga calculada más larga.

3. La estructura como está construida a menudo puede ser algo diferente de la de los dibujos de diseño utilizados para los análisis de diseño. Esto generalmente puede involucrar elementos sin carga que se han soldado a las partes primarias de las estructuras y donde una grieta por fatiga puede tener consecuencias significativas.

4. Las probabilidades que se obtienen a partir de la aplicación de estos métodos son sensibles a la metodología de análisis y a los parámetros de entrada utilizados en los análisis con el fin de determinar su confiabilidad como se plantea a continuación en la figura 15.



**Figura 15. Desarrollo esquemático del plan de inspección con respecto a la fatiga**

Esta calibración dio como resultado modelos probabilísticos recomendados para tamaños de defectos iniciales, factores de intensidad de tensión, parámetros de crecimiento de grietas, así como incertidumbres del modelo requeridas para lograr la correspondencia entre el análisis basado en la mecánica de fractura y los datos de SeN. Contrariamente al enfoque de SeN, la mecánica de fractura proporciona información detallada sobre el crecimiento de grietas que se puede utilizar para estimar el efecto de las inspecciones en la confiabilidad y, por lo tanto, planificar la inspección (Lotsberg et al., 2016).

### 6.1.3 Detailed seismic risk analysis of buildings using structural reliability methods.

Aghababaei & Mahsuli (2018). “Análisis detallado del riesgo sísmico de edificios utilizando métodos de confiabilidad estructural”. Los modelos probabilísticos y métodos para el análisis del riesgo sísmico utilizando los métodos de confiabilidad estructural, muestran una alternativa

enfocada en el análisis de riesgos que emplean el teorema de la probabilidad total y las distribuciones de probabilidad condicional, el análisis específico del riesgo, implica la cuantificación probabilísticas de los resultados, el daño resultante de los componentes estructurales y no estructurales individuales y las pérdidas económicas y sociales.

Esta investigación propone dos opciones de análisis: uno basado en el muestreo y otra basada en el método de confiabilidad de primer orden, las medidas de importancia y sensibilidad identifican las fuentes más importantes de incertidumbre y las decisiones de diseño más importantes a considerar para percibir las múltiples fuentes de peligro. Este método proporciona probabilidades de excedencia de pérdidas y su desagregación en pérdidas económicas directas e indirectas; la adaptación proporciona información acerca de los componentes más vulnerables, las fuentes sísmicas y de incertidumbre más influyentes.

Cada una de las opciones de análisis de riesgos presentadas requiere el cálculo de la función de estado límite a través de una cadena de probabilidad de modelos. Estos modelos deben cumplir con un conjunto de reglas enumeradas por Mahsuli y Haukaas, el más importante de los cuales son:

1. Las incertidumbres se describen mediante variables aleatorias que sirven como entrada al modelo
2. El modelo produce una respuesta física mensurable única dada la realización de variables aleatorias; sí no producen una probabilidad, que difiere fundamentalmente de la probabilidad condicional modelos, por ejemplo, curvas de fragilidad en el enfoque PEER, que generan una probabilidad.

3. El modelo produce salidas que son continuamente diferenciables en términos de las variables aleatorias de entrada; esto es crítico para convergencia de métodos de confiabilidad basados en gradientes, como FORM.

Para cada modelo, primero se describe la forma genérica del modelo, seguido de las entradas específicas para la aplicación de análisis de riesgos a un marco de momento especial de concreto reforzado de cuatro pisos en Teherán.

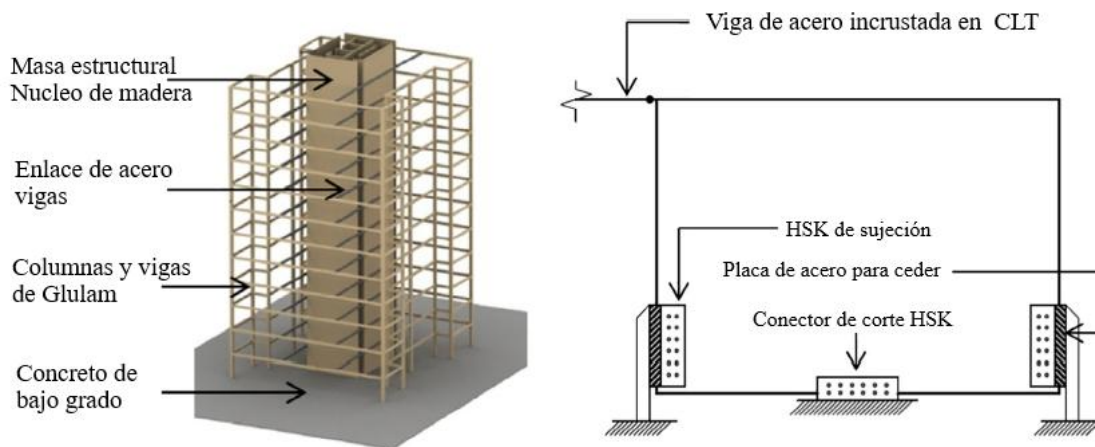
Este documento presenta un enfoque detallado de análisis de riesgos empleando métodos de confiabilidad estructural junto con una biblioteca de modelos probabilísticos interactuantes. El enfoque propuesto sirve como alternativas a los enfoques prevalentes de análisis de riesgo sísmico que se basan en la integración de probabilidad total y la probabilidad condicional de distribuciones. La biblioteca de modelos probabilísticos comprende modelos para peligro, respuestas estructurales, daño de componentes y económico.

En particular, el peligro de terremoto está modelado por la ocurrencia, la magnitud, la ubicación de la ruptura y los modelos artificiales de movimiento del suelo que explican las incertidumbres aleatorias y epistémicas en el movimiento del suelo. El modelo de respuesta estructural es un modelo de elementos finitos en el que las incertidumbres no solo en los materiales y las cargas, sino también en el error del modelo se describen mediante variables aleatorias. Los modelos de daños se desarrollan utilizando una metodología de regresión bayesiana basada en la mecánica y los datos experimentales o reales observados. Se proponen modelos de consecuencia para el costo de reparación de componentes considerando el descuento por volumen, para el tiempo de inactividad del edificio y los costos indirectos asociados, y para las víctimas que se traducen en pérdidas sociales utilizando la noción del valor de una vida

estadística. Se presta especial atención a garantizar que todos los modelos sean continuamente diferenciables, por ejemplo, mediante el uso de funciones de suavizado, para facilitar el uso de métodos eficientes de confiabilidad basados en gradientes.

Se presentan dos opciones de análisis de riesgos. Primero, el análisis de muestreo de escenarios que tiene en cuenta fenómenos que varían en el tiempo, como descuentos o variaciones en el número de ocupantes. Esta opción de análisis funciona para cualquier problema, independientemente de la diferenciableidad o el grado de no linealidad, pero es computacionalmente costoso. Segundo, el análisis basado en FORM que es eficiente pero limitado en la contabilidad de modelos que varían temporalmente y requiere diferenciableidad continua. Estos métodos son inmediatamente aplicables al análisis de riesgos de múltiples peligros de diversas estructuras e infraestructuras, siempre que estén presentes los modelos subyacentes para los peligros, las respuestas y las consecuencias (Aghababaei & Mahsuli, 2018).

**6.1.14 Seismic reliability analysis of a timber steel hybrid system.** Zhang, Shahnewaz & Tannert (2018). “Análisis de confiabilidad sísmica de un sistema híbrido de acero para madera”. Para pronosticar la probabilidad de falla de una edificación, la respuesta del sistema debido a cargas externas se aprecia mediante un método numérico, el análisis de confiabilidad sísmica de un sistema híbrido de acero para madera denominado FFTT (Finding the Forest Throught the Tress); que se plantea en el estudio emplea paneles de madera maciza para resistir la gravedad de las cargas laterales y miembros de acero interconectados para proporcionar la ductilidad necesaria para las demandas sísmicas.



**Figura 16. Esquema (a) sistema FFTT y (b) retención HSK para sistema FFTT**

Esta metodología emplea un método de optimización para los análisis computacionales aplicando y comparando algoritmos genéticos (GA) y análisis de varianza en combinación con métodos de superficie de respuesta. La media y la desviación estándar de la deriva máxima entre pisos se eligen como criterios de rendimiento al momento de formular las funciones en base a las propiedades de conexión del sistema de resistencia de carga lateral y el factor de ductilidad los movimientos del suelo y el peso sísmico. Para generar una base de datos de respuesta para el sistema FFTT se efectuaron análisis dinámicos no lineales de igual manera empleando métodos de confiabilidad de segundo orden se calculó el índice de confiabilidad. Los resultados obtenidos manifiestan que el método GA es superior y que dentro de los factores más significativos a la hora de evaluar la confiabilidad estructural encontramos el movimiento del suelo seguido del factor de ductilidad, el peso estructural, la sujeción y la rigidez de conexión.

Este artículo presentó análisis de confiabilidad sísmica para el sistema híbrido de madera y acero FFTT. Se utilizaron dos métodos optimizados de superficie de respuesta (GA y ANOVA por pasos) combinados con SORM para estimar la confiabilidad estructural. Además de la variabilidad de los movimientos del suelo, estaban implicadas siete incertidumbres diferentes,

incluida la intensidad del movimiento del suelo, el peso estructural, la rigidez de sujeción, la rigidez de la conexión de la viga de pared-acero CLT, el factor de reducción de la ductilidad, la media del error de ajuste de la superficie de respuesta y el estándar de error de ajuste de la superficie de respuesta desviación.

Los resultados se pueden resumir de la siguiente manera:

1. El sistema FFTT diseñado con  $R_d = 5.0$  tiene probabilidades de no exceder los límites de deriva del 1.5% y 2.5% mayores que 70% y 99%, respectivamente. Estas altas probabilidades demuestran la confiabilidad y robustez de este sistema estructural.

2. La variabilidad de los movimientos del terreno tiene la influencia más significativa en la confiabilidad sísmica estructural del sistema FFTT. Pequeños aumentos en el COV del espectro de diseño del movimiento de tierra conducen a grandes aumentos en la probabilidad de falla.

3. El factor de reducción de ductilidad  $R_d$  es otro parámetro significativo:

4. Con el aumento del valor de  $R_d$ ,  $\beta$  disminuye. El peso estructural tiene una influencia negativa en la fiabilidad del sistema FFTT:  $\beta$  aumenta con la disminución del peso. Para la rigidez de sujeción y la rigidez de la conexión de la viga de pared de acero CLT, ambos tienen una influencia positiva en la fiabilidad del sistema FFTT:  $\beta$  aumenta con el aumento de la rigidez.

Las diferencias obtenidas entre GA y el método ANOVA por etapas justifican el uso de GA. Aunque el uso del método de selección por pasos en ANOVA puede simplificar la regresión ajustada, el método GA proporciona una expresión más simple para la función polinómica de la superficie de respuesta. Al mismo tiempo, el índice de fiabilidad obtenido basado en el método GA es más preciso, ya que cada término del modelo en la regresión tiene su propio significado



físico (Zhang et al., 2018).

**6.1.15 Seismic reliability-based design of inelastic base-isolated structures with lead-rubber bearing systems.** Shoaeei, Tahmasebi & Zahrai (2018). “Diseño basado en confiabilidad sísmica de estructuras inelásticas aisladas en base con sistemas de cojinetes de plomo-caucho”. Basados en la confiabilidad sísmica de estructuras inelásticas aisladas en base con sistemas de cojinetes de plomo-caucho (LRB) se propone un sistema equivalente de dos grados de libertad en el que se asigna un comportamiento bilineal tanto a la superestructura como a la base. Los problemas asociados con la masa de la superestructura equivalente, la rigidez y las propiedades de rendimiento se asocian y se implementan como factor determinante al momento de plantear las funciones de densidad de probabilidad; este método consta de dos partes: las curvas de confiabilidad que devuelven los parámetros de diseño claves de la estructura inelástica de base aislada y las ecuaciones de regresión que consideran la demanda de ductilidad de desplazamiento de la edificación inelástica al igual que las propiedades óptimas de diseño del sistema incluyendo la rigidez inicial total y la fuerza de fluencia total

El procedimiento de diseño basado en la confiabilidad propuesto consiste en los siguientes pasos:

1. Determine el período natural de base fija de la superestructura.
2. Seleccione un objetivo de confiabilidad.
3. Determinar los parámetros de diseño  $\mathbf{q}$  y  $\mathbf{X}_{b \text{ objetivo}}$  para un objetivo dado.

4. Estime las variables de diseño de aislamiento base, es decir,  $F_{yt}$  y  $k_{Lt}$  y la ductilidad de desplazamiento demanda  $\mu$  de la superestructura.

Según la investigación se realizó un estudio paramétrico en 385 bases de estructuras aisladas diseñadas de manera óptima usando Algoritmo Genético. Cada base aislada sometida a análisis dinámicos incrementales (IDA). Usando la IDA se utilizan los resultados para derivar curvas de fragilidad para diferentes estados límite (Shoaei et al., 2018).

**6.1.16 Reliability analysis of FRP strengthened RC beams considering compressive membrane action.** Zeng, Botte & Caspeepele (2018). “Análisis de confiabilidad de vigas RC reforzadas con FRP considerando la acción de la membrana compresiva”. El análisis de la confiabilidad de vigas RC reforzadas con FRP considerando la acción de la membrana compresiva (CMA) indican el mejoramiento significativo de la capacidad de carga de estas vigas; por lo cual es conveniente investigar el efecto de CMA en la confiabilidad estructural de estas vigas y la forma de incorporar los beneficios de CMA en los diseños. Siguiendo un modelo de CMA y los planteamientos probabilísticos de sus variables de diseño, se estudiaron los efectos del CMA en los índices de confiabilidad, los parámetros que incluyen propiedades de FRP y refuerzo, en el concreto y su geométricas; las relaciones de la carga variable a las cargas totales se seleccionaron para cuantificar el efecto de CMA.

Este documento se centra principalmente en el análisis de la acción de la membrana compresiva (CMA) en vigas de hormigón reforzado con FRP desde la perspectiva de la fiabilidad como se expone a continuación:

- El modelo CMA se introdujo brevemente primero, seguido por la investigación de la incertidumbre del modelo de resistencia.
- Luego se realizó un estudio de parámetros y un análisis de sensibilidad y se calibró el factor parcial para la resistencia de FRP.

Con base en los resultados, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

La confiabilidad muestra que el efecto de CMA en los índices de confiabilidad de las vigas de concreto reforzado con FRP es significativo. Para simplificar el análisis de confiabilidad de un modelo basado en CMA, la incertidumbre de resistencia se puede combinar con la incertidumbre del modelo y la variable después de la combinación se puede sustituir por una variable lognormal.

El estudio de parámetros muestra que el efecto de la relación FRP disminuye al aumentar los valores de la relación. Sin embargo, si la viga está fuertemente reforzada con refuerzo de FRP, dicha disminución es insignificante. Una conclusión similar se aplica al módulo de FRP y la relación de acero, excepto que el efecto de la relación de acero es menos significativo que el de la relación de FRP. Es interesante señalar que la tensión máxima de FRP casi no tiene efecto en el índice de confiabilidad resultante, ya que los modos de falla considerados en este documento son dominantes en concreto. Para el esfuerzo elástico del refuerzo de acero, así como la resistencia del hormigón, un aumento del factor da lugar a un aumento del índice de fiabilidad resultante.

Los resultados exponen que el efecto CMA lo cual mejora notoriamente la confiabilidad estructural de las vigas, además los parámetros indican que el aumento de la resistencia del hormigón y la deformación del rendimiento influyen de forma positiva sobre la confiabilidad estructural, mientras que, si el aumento es de parte de la relación FRP, la relación de acero y la

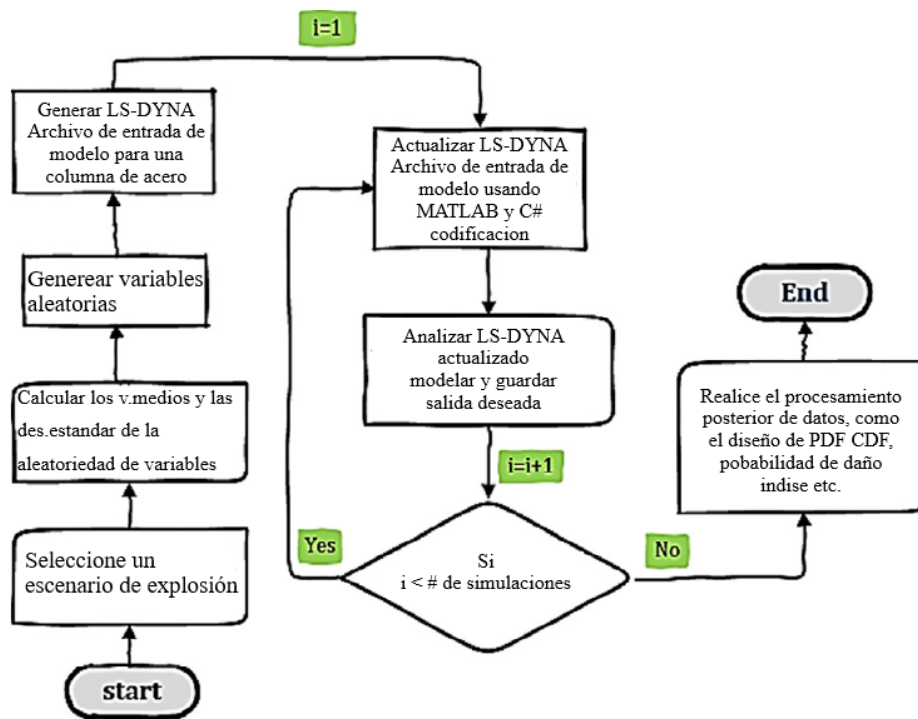
deformación final del hormigón la influencia será de manera negativa. Adicionalmente, se plantea que las variaciones de la resistencia del concreto, el módulo de FRP Young y la cubierta de concreto contribuyen de forma significativa en el índice de confiabilidad, las demás variaciones presentes en las deformaciones de FRP, del refuerzo del acero y final del hormigón influyen de manera moderada sobre el índice de la confiabilidad (Zeng, Botte & Caspeepele, 2018).

**6.1.17 Reliability analysis of H-section steel columns under blast loading** Hadianfard, Malekpour & Momeni (2018). “Análisis de confiabilidad de columnas de acero de sección H bajo carga explosiva”. Al igual que las vigas, las columnas también son un elemento de suma importancia dentro del estudio de la confiabilidad estructural, el comportamiento de la columna se resalta debido a que cuando esta presenta anomalías pierde su capacidad de carga además de que la falla se extenderá a toda la estructura provocando el colapso de la edificación. Empleando la teoría de la confiabilidad y contando con las incertidumbres asociadas con la carga de la explosión al igual que con las propiedades del material, se establece una metodología para determinar la probabilidad de daño de una columna de acero en diversos escenarios. El detrimento se determina dependiendo del índice de daño basado en la capacidad de carga axial. El método de simulación de Monte Carlo se emplea usando un método explícito de elementos finitos para obtener la probabilidad de falla, las muestras de las variables básicas independientes son generados de acuerdo a sus archivos PDF. Para cada muestra, se hace un modelo FE y LS-DYNA realiza un análisis completo. Un conjunto de LS-PrePost, La codificación MATLAB, LS-DYNA y C # se utiliza para el modelado FE, importar los modelos a LS-DYNA y extraer y postprocesar los resultados.

Los pasos para realizar el análisis de confiabilidad utilizando el método MCS y los análisis del modelo FE en LS-DYNA son los siguientes:

- Seleccione un escenario de explosión.
- Calcular los valores medios y las desviaciones estándar de la aleatoriedad de variables.
- Genere aleatoriamente variables de acuerdo a su PDF usando MATLAB.
- Genere el archivo de entrada del modelo LS-DYNA para el acero considerando columna basada en los valores medios de variables aleatorias en LS-PrePost.
- Actualice el archivo de entrada del modelo LS-DYNA para el número de variables aleatorias generados en el Paso 3 usando la codificación MATLAB y C #.
- Analice todos los modelos FE y extraiga las salidas deseadas. Este paso se realiza automáticamente al vincular LS-DYNA y C#.
- Obtenga resultados estadísticos utilizando los resultados del Paso 6.

Los pasos se muestran esquemáticamente en la figura 17.



**Figura 17. Diagrama de flujo de pasos de análisis probabilístico utilizando MCS**

Los avances obtenidos en esta metodología se establecen a partir de la probabilidad de daño, los efectos de las condiciones de contorno, del tipo de función de densidad de probabilidad y el análisis de sensibilidad. Los resultados muestran la importancia de considerar las incertidumbres en la evaluación del índice de daños de las columnas contra la explosión; además se encontró que a medida que la condición de soporte cambia de extremos fijos a fijos, la probabilidad de daño disminuye a medida que la distancia de separación de pliegues para diferentes pesos de carga. Este concepto puede ser usado para estimar la distancia de protección segura, además los análisis de sensibilidad mostraron que la presión máxima reflejada es el parámetro aleatorio más efectivo. (Hadianfard et al., 2018).

**6.1.18 Stochastic harmonic function based wind field simulation and wind-induced reliability of super high-rise buildings.** Chen, Chen, Peng, Zhu, Beer & Comerford, 2019).

“Simulación del campo de viento basada en la función armónica estocástica y confiabilidad inducida por el viento de edificios de gran altura”. La Simulación del campo de viento basada en la función armónica estocástica y confiabilidad inducida por el viento de edificios de gran altura es otra de las aplicaciones, que debido a las características de su algoritmo y base teórica permite el uso amplio del método de representación espectral (SRM) aunque menciona algunos desafíos computacionales debido al empleo de la descomposición de Cholesky con respecto a la matriz de densidad espectral de potencia de cruce (PSD), especialmente en la simulación de ejecuciones aleatorias multivariadas de campo de fluctuación de viento de gran tamaño. En esta investigación para dar solución a este inconveniente se ha propuesto en conjunto con el método de evolución de densidad de probabilidad (PDEM), abordar el análisis de respuesta estocástica y la evaluación de confiabilidad de la vibración aleatoria de estructuras inducida por el viento. En pruebas numéricas hechas del método se comprueba la efectividad de la representación espectral sustentada en la función armónica estocástica (SHF-SRM) en la simulación de los procesos aleatorios multivariados y muestra el valor de la evaluación de la confiabilidad en términos de la confiabilidad global y variante temporal para la mejora del diseño estructural.

En este artículo se presenta un acceso completo a la evaluación de la confiabilidad inducida por el viento de los edificios de gran altura, que implica la simulación del campo de velocidad del viento unidimensional y el análisis estocástico de la vibración del viento de las estructuras. Para evitar el desafío computacional asociado con la simulación de procesos aleatorios multivariados, se adopta el método de representación espectral basada en la función armónica estocástica (SHF-SRM). El esquema actualizado puede verse como una extensión de la simulación de proceso

aleatorio univariante en la simulación de proceso aleatorio multivariante. Junto con el método de evolución de densidad de probabilidad (PDEM), se llevan a cabo análisis de respuesta dinámica y evaluación de confiabilidad.

Con fines ilustrativos, se investiga la confiabilidad inducida por el viento de un edificio de gran altura. Algunas observaciones finales se hacen de la siguiente manera:

1. La introducción de frecuencias aleatorias en el SHF-SRM ofrece la posibilidad de reducir la influencia de la periodicidad y retener menos términos de expansión.

2. El método de representación espectral basado en la función armónica estocástica tiene principios teóricos para reproducir con precisión el espectro objetivo, utilizando un número arbitrario de particiones de frecuencia y un número arbitrario de variables aleatorias. El número de particiones de frecuencia necesarias en el SHF-SRM es mucho menor que el necesario en la representación espectral original.

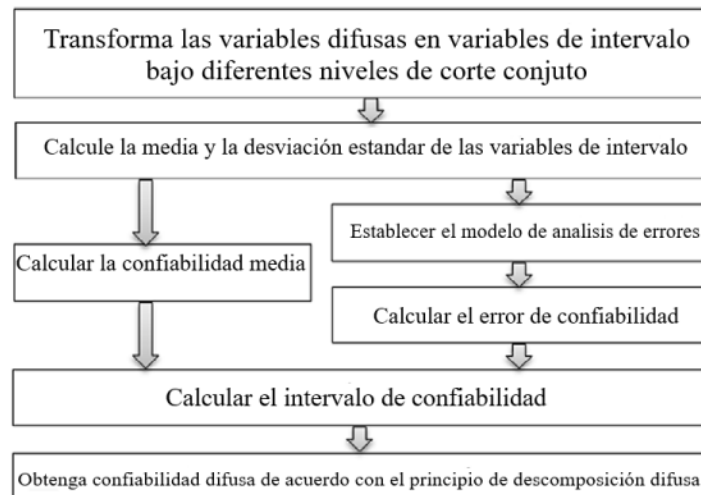
3. El ejemplo numérico revela que la evaluación de confiabilidad es una manera eficiente de definir el modo de falla y las historias débiles de estructuras complejas. La confiabilidad global y la confiabilidad de la variante de tiempo en el momento terminal coinciden bien entre sí, y ambas tienen valores significativos para la mejora del diseño resistente al viento de los edificios de gran altura. (Chen et al., 2019).

#### **6.1.19 Structural reliability analysis with fuzzy random variables using error principle.**

Li & Niem (2018), “Análisis de confiabilidad estructural con variables aleatorias difusas utilizando el principio de error”. Como se sabe en el cálculo de la confiabilidad estructural, se presentan incertidumbres confusas en los parámetros de distribución de las variables aleatorias, es



por ello que aparece el Análisis de confiabilidad estructural con variables aleatorias difusas utilizando el principio de error, el cual permite mejorar la precisión y la eficiencia de la confiabilidad estructural. Para emplear este método, las variables difusas se convierten en variables de intervalo inciertas siguiendo el teorema de descomposición difusa, luego, a través del principio de transferencia de errores se incluye la función en la función de confiabilidad lo cual permite aproximar la función de pase generando un modelo de análisis de errores de confiabilidad estructural enfocados en el método de integración directa, a continuación, se plantea esquemáticamente dicho proceso en la figura 18.



**Figura 18. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto**

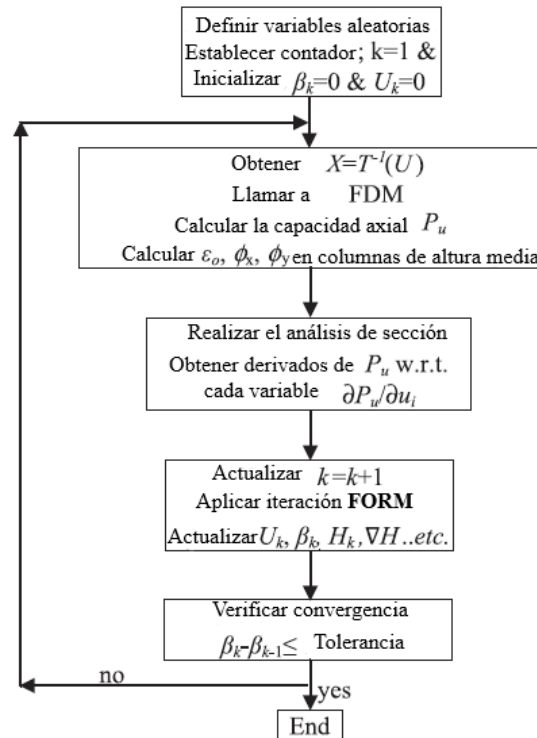
En el estudio de esta nueva metodología fueron estudiados varios ejemplos con el fin de demostrar la eficiencia y la precisión del método propuesto, el cual brinda una forma factible de analizar y hallar la confiabilidad estructural con varias variables inciertas como variables aleatorias difusas.

En este artículo, se propone un método de cálculo de confiabilidad difusa basado en el principio de síntesis de errores. De acuerdo con el teorema de descomposición de conjuntos

difusos, las variables difusas se transforman en una serie de variables de intervalo en diferentes niveles de corte. Sobre la base del principio de análisis de errores de función y síntesis de errores en lugar de la operación tradicional de expansión de intervalos, se realiza la solución efectiva de la confiabilidad de la estructura de la variable aleatoria difusa.

En el caso de la precisión, se adopta el método de integración directa, que es el único método analítico exacto para calcular la confiabilidad estructural. Por lo tanto, la precisión del cálculo está efectivamente garantizada. No es difícil ver que el intervalo de confiabilidad del método propuesto es más estrecho que el del método tradicional (conjunto de corte difuso + extensión de intervalo). Significa que se obtiene un resultado de cálculo de confiabilidad más claro y facilita el diseño estructural y la optimización de los técnicos de ingeniería (Li & Nie, 2018).

**6.1.20 Structural reliability of biaxial loaded Short/Slender-Square FRP-confined RC columns.** Ali (2017). “Fiabilidad estructural de columnas RC confinadas en FRP cortas / delgadas cuadradas cargadas biaxiales”. En las columnas también se realiza un análisis de la confiabilidad, según este artículo la investigación este proceso se realiza empleando el método de diferencia finita FDM y considerando el material y la no linealidad geométrica. La metodología denominada confiabilidad estructural de columnas RC confinadas en FRP cortas / delgadas cuadradas cargadas biaxiales consideran dentro de su propuesta los laminados de FRP y los efectos de confinamiento de los estribos de acero. Para la investigación se registraron aleatoriamente valores y tipos de excentricidades (simples y biaxiales), esta ejecución permitió la obtención de datos experimentales de 32 columnas RC confinadas y no confinadas las cuales fueron útiles para examinar la precisión del modelo, estos análisis se realizaron acorde al proceso que se explica en el siguiente diagrama figura 19.



**Figura 19. Flujo computacional del procedimiento basado en FORM FDM**

Esta metodología requirió de la implementación del método de confiabilidad de primer orden FORM, además de la inclusión de variables geométricas, materiales y cargas. Los frutos de esta investigación confirmaron que el confinamiento de la sección RC con material FRP mejora la confiabilidad en 0.1 a 0.5 dependiendo del valor y tipo de la excentricidad, estas pruebas contienen un análisis paramétrico que incluye la relación entre el grosor de los materiales de FRP, el índice de confiabilidad, la excentricidad y el porcentaje de aumento en la carga viva en relación con la esbeltez; además indican que el porcentaje de aumento de la carga está directamente relacionado linealmente con el grosor de FRP, mientras que la relación entre el índice de confiabilidad y el grosor se ven interferidos por la excentricidad y la esbeltez. Dentro de las consideraciones del método al momento de sugerir las reglas de diseño se propone considerar un factor de confiabilidad adicional equivalente a 0.65 en caso de alta excentricidad, además se

proporcionan factores de sensibilidad que evidencian la importancia de las variables de la carga viva y el error del modelo (Ali, 2017).

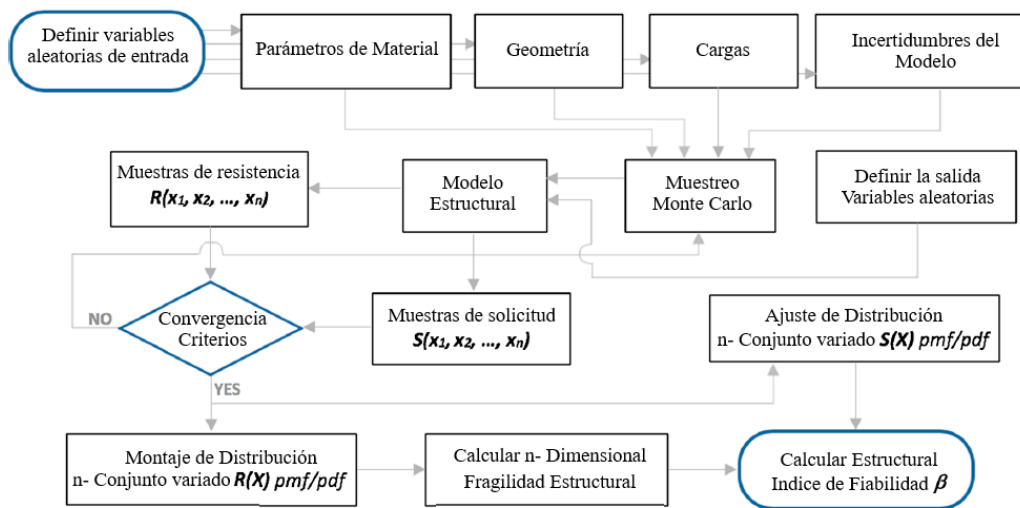
**Conclusión.** Al detallar cada una de las investigaciones mencionadas anteriormente se puede concluir que actualmente se busca la optimización de los procesos de cálculo y rendimiento computacional asociados a la confiabilidad esto en busca de mejorar y llevar a un nivel superior el conocimiento de las incertidumbres que pueden ocasionar fallas y deterioro en una estructura, lo cual es un aporte de gran relevancia para establecer márgenes o coeficientes de confiabilidad dentro de las normativas internacionales.

## **6.2 Aplicaciones y Análisis de Confiabilidad en Estructuras Tipo Puente y sus Elementos**

Las aplicaciones en puentes se pueden clasificar por sus parámetros de entrada, permitiendo mostrar una gran diversidad de métodos de aplicación para el análisis de confiabilidad, a continuación, se presentan algunos artículos y aplicaciones enfocadas en la mejora u optimización de procesos de diseño, construcción, materiales y elementos estructurales. Los artículos e investigaciones que se mencionarán a continuación serán expuestos de manera resumida tratando de abordar la metodología y conclusiones obtenidas de sus estudios.

**6.2.1 Structural reliability of bridges realized with reinforced concretes containing electric arc furnace slag aggregates.** Zanini (2019). “Fiabilidad estructural de puentes realizados con hormigones reforzados que contienen agregados de escoria de horno de arco eléctrico”. En el campo de los materiales se plantea el desarrollo de hormigones sostenibles lo que involucra investigaciones de avance para el sector de la construcción. Según el estudio los áridos reciclados son uno de los materiales que permiten desarrollar en gran medida las metas de sostenibilidad que se plantean en la fabricación del hormigón, además se ha demostrado que los

agregados de escoria del horno de arco eléctrico (EAF) tienen gran potencial para el desarrollo de estructuras de hormigón armado. Estudios han logrado demostrar en gran medida que las propiedades mecánicas de los hormigones EAF en comparación con los hechos con agregados naturales tienen mayor capacidad de resistencia, por otra parte, el uso de este material genera aumentos en las cargas propias del elemento construido, investigaciones han tenido como objetivo estudiar la confiabilidad de estructuras construidas con este tipo de hormigones enfocándose en estructuras tipo puentes. Para realizar el análisis de confiabilidad para el uso de este método se siguieron los pasos indicados en el siguiente diagrama de flujo figura 20.



**Figura 20. Diagrama de Flujo de trabajo de confiabilidad estructural general**

El presente trabajo investigó la influencia en los márgenes de confiabilidad estructural relacionados con el reemplazo de mezclas NAC comunes con EAF, con especial énfasis en el campo del diseño de tipos de puentes comunes. Primero se realizó una amplia revisión de la literatura con el objetivo de recopilar resultados experimentales relacionados con la caracterización mecánica de las muestras de EAF, lo que condujo a recopilar un conjunto de datos experimentales. Se utilizaron técnicas estadísticas para analizar el conjunto de datos y

cuantificar el aumento de la resistencia a la compresión y los parámetros de distribución de PDF de peso específico para cada una de las tres clases de hormigones EAF definidos en este trabajo con respecto a sus subclases de NA relacionadas. Dichas relaciones se utilizaron posteriormente para investigar la seguridad estructural de los puentes conformes al código con componentes RC diseñados como hechos con NAC, pero realizados con hormigones EAF sostenibles. Se propuso un flujo de trabajo de confiabilidad estructural general para formalizar la metodología que se utilizará en la evaluación del índice de confiabilidad estructural para un problema genérico n-dimensional.

Se estudió un conjunto de datos de 172 pruebas experimentales para determinar las características mecánicas de hormigones EAF y posteriormente analizar la resistencia a la compresión del concreto y las cargas de peso propio para tres tipos de concreto EAF (es decir, C1, C2, A) y dos tipos diferentes de puentes, al diseñarlos considerando mezclas de concreto ordinarias y compararlos en un análisis de confiabilidad para cada tipo de concreto EAF determinando la variación de los márgenes de seguridad estructural relacionados con el uso del EAF sostenible (Zanini, 2019).

### **6.2.2 Global sensitivity analysis of reliability of structural bridge system.** Kala (2019).

“Análisis de sensibilidad global de la fiabilidad del sistema de puente estructural”. El estudio de las cargas presentes en una estructura tipo puente en acero también genera incertidumbres sobre su probabilidad de falla ante la acción de estas, la falla se produce por fatiga ocasionada por el estrés periódico, al incidir sobre estas cargas repetitivas y múltiples producto del tráfico en el puente. Por ende, se define la falla como la presencia de una o varias grietas por fatiga de tamaño crítico, la propagación de estas y su estado límite de fatiga se describen utilizando la mecánica de fractura lineal; todos estos parámetros llevan a realizar un análisis de la probabilidad de falla en

función del rango de tensión equivalente, la longitud de grieta inicial, el número de ciclos de carga debidos a los cambios de tensión que aumentan con el tiempo y otras variables aleatorias de entrada. La probabilidad de falla se evalúa en lapsos de tiempo, que posteriormente se estudia mediante un análisis de sensibilidad global permitiendo evaluar su confiabilidad.

Los resultados del análisis de sensibilidad muestran que la tensión equivalente o longitud de grieta inicial es la variable dominante en cualquier caso para la correcta operación del puente, este efecto se asocia con valores más altos de probabilidad de falla al final de la vida útil del puente y los valores pequeños de probabilidad de falla están fuertemente relacionadas con las variables aleatorias de entrada, que no pueden ser expresadas como la suma de los efectos principales de las variables de entrada individuales, estos índices principales y de orden superior de cada variable se complementan mostrando su índice total que es el objetivo directo del análisis de probabilidad y sensibilidad es la confiabilidad estructural este análisis de sensibilidad confirma y profundiza el conocimiento obtenido del análisis de probabilidad dependiente del tiempo.

El artículo proporciona una metodología coherente de análisis probabilístico y de sensibilidad que se puede utilizar para la toma de decisiones sobre inspecciones, mantenimiento, reparaciones y capacidad de carga del puente en diferentes períodos de su vida útil. Se utilizaron análisis probabilísticos y de sensibilidad para examinar la confiabilidad y la vida útil de una viga de puente de acero sometida a falla por fatiga. El análisis de confiabilidad presentado tiene en cuenta la falla por fatiga causada por múltiples cargas de tráfico repetidas y no tiene en cuenta otras influencias negativas.

La metodología que se llevó a cabo se describe a continuación:

- Se implementó la interpretación bayesiana de la probabilidad y la mecánica lineal de fractura elástica para estimar la probabilidad de falla y proponer tiempos de inspección óptimos destinados a detectar el daño por fatiga del puente.
- Las inspecciones se planifican al momento de alcanzar la probabilidad de falla objetivo de 0.02277.
- El estudio de caso identificó inspecciones periódicas con una frecuencia de cada diez años, la primera inspección se llevó a cabo a los cincuenta años de operación del puente.
- Se demostró que las inspecciones deben planificarse mucho antes y deben ser más frecuentes si hay un aumento en el valor medio y / o la desviación estándar del rango de tensión equivalente  $\Delta\sigma$  causado por el paso de vehículos pesados.

Los resultados obtenidos por PSA identifican la influencia de las variables de entrada en Pf que cambian significativamente de 35 a 120 años de la vida útil del puente. El PSA identificó el rango de estrés equivalente  $\Delta\sigma$  como la variable dominante durante todo el período considerado. Además, se plantea este análisis utilizando la probabilidad bayesiana, que identifica los tiempos para planificar las inspecciones de puentes (Kala, 2019).

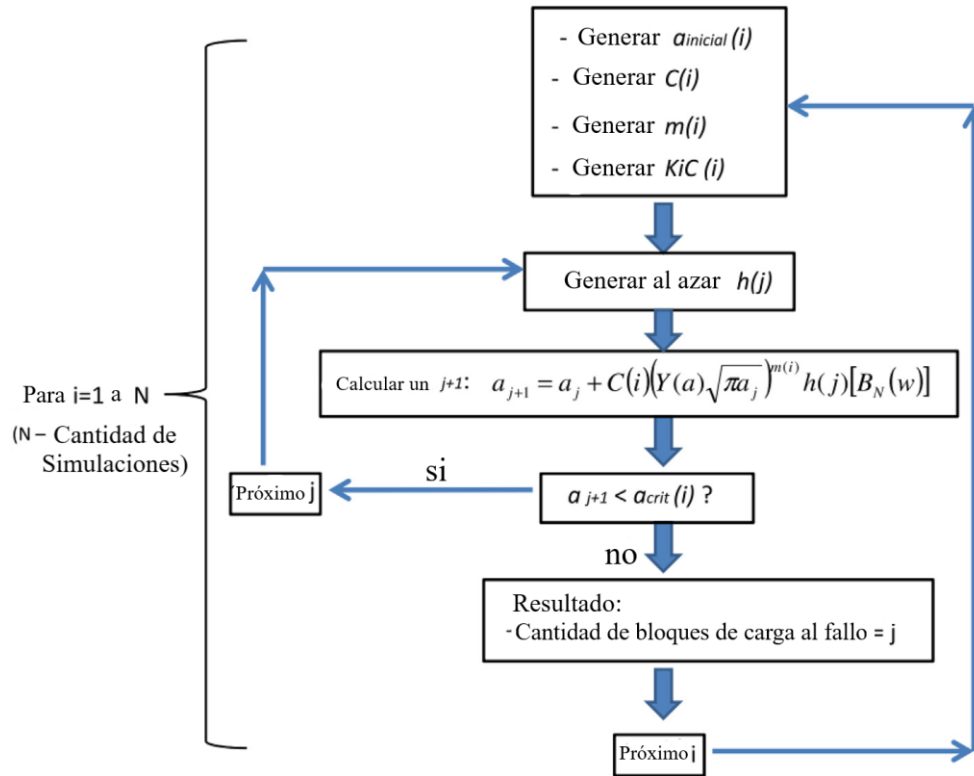
**6.2.3 Fatigue analysis of a railway bridge based on fracture mechanics and local modelling of riveted connections.** Marques, Correia, De Jesus, Cunha, Caetano & Fernandes (2018). “Análisis de fatiga de un puente ferroviario basado en la mecánica de fractura y modelado local de conexiones remachadas”. En puentes de ferrocarril remachados, las conexiones entre la viga transversal y la viga principal son con frecuencia detalles críticos para abordar el análisis de falla por fatiga, efectos secundarios, como la flexión fuera del plano y las



amplificaciones dinámicas en el caso de los puentes viejos no se pocas veces se tuvieron en cuenta en el diseño, por lo que estos factores pueden provocar un aumento significativo del daño por fatiga.

Para poder analizar este tipo de estructura y realizar su evaluación por fatiga en este artículo de investigación se ha abordado mediante el desarrollo de modelos locales de juntas remachadas críticas que están vinculadas a modelos globales, este enfoque de modelado local-global tiene como propósito evaluar las tensiones secundarias locales. Anteriores análisis probabilísticos de fatiga de articulaciones remachadas se han centrado en la variabilidad de la resistencia más que en la variabilidad de cargas y tensiones.

Estudios proponen un enfoque probabilístico para incluir la carga en el análisis de fatiga de juntas remachadas, asumiendo la carga como una variable aleatoria. En dichos estudios generaron modelos locales de elementos finitos y luego se combinaron con el modelo global para obtener las tensiones reales asociadas al flujo de trenes que se desplazan por este sector. Para reducir el tiempo de cálculo, los resultados obtenidos de estos modelos locales se introdujeron en un modelo de Mecánica de fractura lineal, respaldado por la ley de propagación de grietas por fatiga de París. La técnica de simulación de Monte Carlo se aplicó para calcular la confiabilidad de fatiga de un viejo puente de ferrocarril remachado, considerando los registros de tráfico de estudios previos en el puente, como se ilustra en el siguiente diagrama figura 21.



**Figura 21. Diagrama de Flujo de trabajo basado en la metodología propuesta**

Para llevar a cabo este análisis se implementaron los conceptos de Mecánica de fractura, se desarrollaron varias rutinas de Matlab para implementar una metodología basada en la integración de la ley de París junto con el concepto de carga aleatoria de bloques y la técnica de muestreo de Monte Carlo. Varios de los parámetros que influyen se consideraron variables aleatorias además de los rangos de tensión, como el tamaño de inicio de la grieta, la grieta crítica y su tamaño, las funciones de forma geométrica utilizadas para calcular los factores de intensidad de tensión para propagar grietas.

Se realizaron varios análisis de sensibilidad numérica. El primer análisis de sensibilidad permitió concluir que, en este caso, 10,000 simulaciones de muestreo son suficientes para estimar la vida de fatiga con buena precisión. Además, el crecimiento anual del tráfico tiene una incidencia en los resultados de la vida de fatiga. Por lo tanto, se debe prestar especial atención a

la definición de esta variable (Marques et al., 2018).

**6.2.4 Information-dependent seismic reliability assessment of bridge networks based on a correlation model.** Qin (2018). “Evaluación de la confiabilidad sísmica dependiente de la información de redes de puentes basada en un modelo de correlación”. En el estudio de confiabilidad en puentes es necesario incluir la evaluación de la confiabilidad ante acciones sísmicas que inciden en las redes de puentes, conocidas comúnmente como variaciones temporales y espaciales. La evaluación de este comportamiento cambia con la información disponible, la cual se divide en dos categorías, las propiedades básicas de la red junto con los peligros y el rendimiento real de parte de la red, haciendo tal aclaración son identificados los enfoques para la evaluación con categorías de información diferentes, y son planteados los parámetros para la evaluación de confiabilidad sísmica dependiente de las variables aleatorias de entrada o información de entrada.

Para esto se deriva un modelo de correlación que engloba características alternas para el correcto desempeño del puente a la hora de desempeñar su función, esto se enlaza con el análisis de fragilidad de puentes y así ejecutar la evaluación de confiabilidad de la red y estimar la relevancia de los componentes de mayor prioridad en la recolección de información. El marco propuesto, junto con el modelo de correlación, se demuestra en un ejemplo de una red de tráfico que conecta 8 ciudades por carreteras con 12 puentes de paso estándar de hormigón armado en California.

Se formula un marco para la evaluación de la confiabilidad sísmica de las redes de puentes, que depende de la información disponible. La información relevante se divide en dos categorías, es decir, las propiedades básicas de la red junto con los peligros y el rendimiento real de parte de

la red. Se demuestra cómo implementar la evaluación con diferentes categorías de información. Un modelo de correlación para el rendimiento sísmico de los puentes, que considera la influencia de la calidad de la construcción, la capacidad de resistencia del puente a las cargas laterales, los efectos del código de diseño que detalla las disposiciones y las propiedades del material, se deriva para facilitar la formulación de la estructura de dependencia y la base de la evaluación de la fiabilidad de la red.

En el análisis con solo la primera categoría de información, el modelo de correlación se combina con el análisis de fragilidad de puentes de concreto individuales para implementar el análisis de confiabilidad de las redes de puentes. Tan pronto como llegue el terremoto, se puede obtener el rendimiento de algunas partes de la red y se formula un modelo probabilístico para actualizar la confiabilidad de los puentes y toda la red mediante un enfoque bayesiano con diferentes tipos o escalas de información disponible. Se discute el rendimiento de varios componentes y se sugiere una nueva formulación. Finalmente, se toma la topología de una red de tráfico que conecta 8 ciudades para formular un ejemplo con 12 puentes de paso elevado estándar de hormigón armado en California. En el ejemplo, el marco presentado se aplica a la evaluación de confiabilidad de la red. La fragilidad de las columnas individuales y la estructura de dependencia dentro de la red se analizan como el primer paso. Mediante la combinación de los dos resultados, el rendimiento de los puentes individuales y toda la red se investiga posteriormente. La influencia de la información dada en el desempeño de algunos puentes sobre los demás en la evaluación de confiabilidad se ilustra más, junto con la medida de la importancia de la información (Qin, 2018).

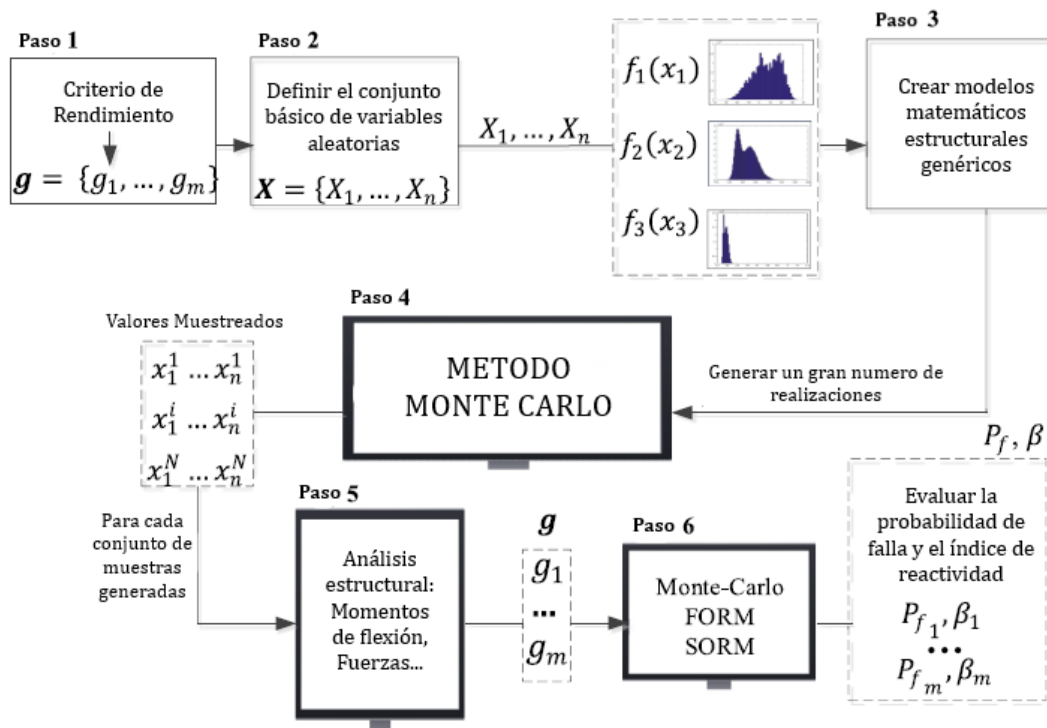
### **6.2.5 A probability-based reliability assessment approach of seismic base-isolated**

**bridges in cold regions.** Nassar, Guizani, Nollet & Tahan (2019). “Un enfoque de evaluación de confiabilidad basado en la probabilidad de puentes sísmicos con base aislada en regiones frías”.

Al entrar en el campo de la sismica se debe tener en cuenta la existencia de mecanismos de aislamiento de la base sísmica usados ampliamente para garantizar una mejor respuesta ante eventuales movimientos sísmicos o terremotos. La respuesta sísmica de los puentes aislados en base depende en gran medida de las propiedades del aislador sísmico, dichas propiedades varían dependiendo de las condiciones de trabajo a las que se expone como la temperatura. Los códigos de diseño cuando consideran estas variaciones recomiendan un enfoque que no tiene estrictamente en cuenta la probabilidad de ocurrencia simultánea de terremotos bajo este tipo de condiciones. Consecuencia de esto es que el diseño del puente con base aislada puede que no sea el más óptimo o no se realice su correcta optimización y la confiabilidad en estos casos sea una incógnita. En la investigación se describe un método de evaluación de confiabilidad basado en la probabilidad para considerar las variaciones de las propiedades de aislamiento sísmico bajo diversos parámetros o condiciones de estudio como la temperatura, peligro sísmico, las dimensiones y las propiedades mecánicas del material de construcción estas características se modelan como variables aleatorias. Una aplicación de la metodología se demuestra a través de un estudio de caso de un puente de hormigón armado de dos tramos aislado en una base. Se consideran dos estados límite:

1. En términos de la capacidad del momento flector de la pila del puente.
2. En términos de la capacidad de desplazamiento del aislador sísmico. Este análisis se lleva a cabo bajo simulaciones como se plantea a continuación.

- Paso 1. Formular los objetivos de rendimiento sísmico en funciones cuantitativas de estado límite.
- Paso 2. Definir las variables aleatorias (RV) que afectan el límite, estados del problema y sus distribuciones probabilísticas.
- Paso 3. Crear un modelo estructural para el puente de base aislada y relaciones con los RV.
- Paso 4. Genere una gran cantidad de valores muestreados (realizaciones) del vector de entrada de RVs.
- Paso 5: Realizar un análisis estructural de realizaciones y evaluar las funciones del estado límite.
- Paso 6: Calcule la probabilidad de falla y el índice de confiabilidad.



**Figura 22. Esquema general del método de evaluación de confiabilidad basado en la probabilidad propuesta**

Los resultados preliminares revelan que, para el puente de estudio de caso, la confiabilidad global del puente es igual a la confiabilidad del estado límite (2). Esto se debe a que la reserva proporcionada por los factores de sesgo y seguridad se aplica en el caso del estado límite (1) pero no se considera para el estado límite (2). Además, los resultados revelan que, para el puente de estudio de caso, La confiabilidad sísmica depende más de la severidad de la entrada sísmica que de la severidad de baja temperatura (Nassar et al., 2019).

**6.2.6 Reliability-based progressive collapse analysis of highway bridges.** Miao & Ghosn (2017). “Análisis de colapso progresivo basado en confiabilidad de puentes de carreteras”. Para el cumplimiento de los criterios y especificaciones de diseño descritas en las normativas vigentes, los sistemas estructurales optimizados deben satisfacer los niveles de robustez óptimos que garanticen el correcto funcionamiento de la estructura y puedan resistir una posible falla local ante las solicitaciones o un posible evento extremo imprevisto. La falla de un elemento estructural puede generar un efecto que desencadene en otras fallas que afecten la integridad total de la estructura o parte importante de la misma, llevando a un colapso. En Estados Unidos la Administración de Servicios Generales (GSA) estableció un conjunto de procedimientos y criterios para evaluar la robustez de los edificios utilizando métodos deterministas tradicionales con el fin de reducir la probabilidad de colapso de las estructuras bajo estas circunstancias. Este procedimiento ha sido ampliamente avalado y utilizado para el análisis del colapso progresivo de edificios, pero esto no quiere decir que los criterios de GSA sean los adecuados para realizar este tipo de análisis en puentes debido a la disparidad entre sus con figuraciones estructurales y los tipos y magnitudes de cargas permanentes y transitorias presentes.

En base a lo anterior no se puede definir con exactitud cómo los criterios existentes toman en consideración incertidumbres tan evidentes asociadas a las cargas aplicadas y la capacidad de

soporte que poseen las estructuras ante el colapso después del inicio de una falla local. Teniendo en cuenta la poca practicidad de algunos métodos para la calibración del sistema de análisis de colapso progresivo incremental, se calibran en base a conceptos de confiabilidad estructural para garantizar niveles consistentes de seguridad para el rango pertinente de aplicaciones. En esta investigación se describe una metodología para realizar análisis probabilísticos de colapso progresivo y calibrar criterios de análisis incremental para puentes de carreteras que tienen en cuenta las incertidumbres presentes producto de la aplicación de cargas y la resistencia de los elementos ante la aplicación de estas, así como del sistema. Dicha metodología de análisis de confiabilidad se ilustra utilizando modelos de un puente de viga de caja de acero y un puente de armadura de acero sujeto a diferentes escenarios de daños iniciales. Se ha descrito como son aplicados los resultados de varios análisis de confiabilidad para desarrollar criterios que permitan determinar niveles adecuados de confiabilidad y seguridad para los usuarios, estos criterios pueden, usarse para plantear a futuro pasos para el desarrollo del análisis de colapso progresivo para puentes que sean acorde a las indicaciones estipuladas por los métodos de Diseño de Factor de Carga y Resistencia (LRFD) (Miao & Ghosn, 2017).

**6.2.7 Time-dependent reliability of strengthened PSC box-girder bridge using phased and incremental static analyses.** Guo, Chen Liu & Han (2016). “Fiabilidad dependiente del tiempo del puente de viga de caja PSC reforzado mediante análisis estáticos escalonados e incrementales”. Los puentes pueden ser construidos de múltiples formas variando sus parámetros geométricos entre otras características por ello el análisis de sus elementos debe ser considerado, los puentes de viga cajón de hormigón pretensado (PSC) son ampliamente utilizados en la construcción de carreteras y ferrocarriles, en este tipo de puentes se suelen observar desviaciones excesivas a largo plazo y grietas de aparición súbita. Para poder controlar la desviación o



restaurar la capacidad de carga de los puentes, frecuentemente se toman medidas de reforzamiento en los elementos de la estructura. Estudios han propuesto un enfoque basado en análisis probabilísticos de elementos finitos para evaluar la confiabilidad dependiente del tiempo en puentes reforzados de viga cajón PSC.

El comportamiento de las vigas se simula en función del tiempo y teniendo en cuenta la contracción del hormigón, la fluencia y el agrietamiento, la corrosión y la relajación de la tensión del acero, etc. En concreto se analiza por fases para tener en consideración las afectaciones presentes, el estado de tensión sin la presencia del refuerzo y el incremento que se genera con este. El método de análisis estático es utilizado para calcular la confiabilidad estructural, para ello se evalúa la confiabilidad dependiente del tiempo de un puente de viga de caja PSC, y se realiza un paralelismo de la efectividad de tres métodos de reforzamiento que poseen placas de acero unidas externamente, compuestos de polímero reforzado con fibra (FRP) y postensado externo, todo esto con el fin de proporcionar referencias para el diseño basado en la confiabilidad y la optimización de estrategias de fortalecimiento para puentes de vigas de caja PSC.

Este artículo presenta una evaluación de confiabilidad dependiente del tiempo de un puente de vigas de caja PSC antes y después del fortalecimiento. De este estudio, se extraen las siguientes conclusiones:

1. Según los resultados del análisis, los índices de confiabilidad con respecto al estado límite de servicio disminuyen rápidamente en los primeros diez años de servicio, lo que se debe principalmente a la fluencia y contracción del concreto. Posteriormente, la disminución se vuelve menos significativa hasta que el efecto de corrosión se vuelve dominante después de aproximadamente cuarenta a cincuenta años de servicio. Bajo el efecto conjunto de fluencia y

corrosión, los índices de confiabilidad pueden caer por debajo del valor objetivo después de 58 años de servicio. Este proceso de deterioro parece coincidir con la experiencia real, lo que demuestra que el índice de confiabilidad dependiente del tiempo puede usarse como un indicador de la vida útil de "potencial" para muchos puentes de este tipo o similares.

2. De acuerdo con los supuestos y parámetros adoptados en este estudio, parece que el postensado externo es efectivo para aumentar los índices de confiabilidad con respecto a la capacidad de servicio, así como a los estados límite finales, y el control de la deflexión se realiza principalmente desde la inmediata deflexión restaurada debido al postensado. Por otro lado, los compuestos de placa de acero y FRP adheridos externamente son más efectivos para aumentar la capacidad de carga en lugar del control de deflexión a largo plazo, debido a que la contribución de rigidez de las placas de acero y FRP es relativamente limitada en comparación con la rigidez del puente. Vale la pena señalar que la influencia del FRP y las placas de acero en la fluencia y la contracción puede depender de los parámetros adoptados (es decir, espesor y / o capas).

3. El análisis por fases proporciona una predicción más precisa sobre el efecto de fortalecimiento que el análisis directo. Por lo tanto, para los análisis de confiabilidad de las estructuras modernizadas en las que se deben tener en cuenta las deformaciones y tensiones existentes antes del fortalecimiento, se recomienda adoptar el análisis por fases para una predicción rigurosa. Además, el método ISA puede obtener la confiabilidad estructural de una manera relativamente precisa y eficiente, especialmente cuando las salidas de alta no linealidad y el efecto dinámico de la carga pueden ser descuidados.

El trabajo futuro de este estudio en curso incluye el desarrollo de un modelo más realista con respecto al área transversal restante de los tendones PT y los análisis de confiabilidad teniendo en

cuenta la variabilidad espacial de la corrosión por picaduras, etc. Además, vale la pena señalar que este estudio tiene como objetivo mostrar el marco del método propuesto, mientras que los resultados simulados no han sido validados a través de mediciones de campo; por lo tanto, se necesitan datos de campo para validar y / o actualizar el método propuesto en futuros estudios. (Guo et al., 2016).

**6.2.8 Time-dependent reliability assessment of existing concrete bridges including non-stationary vehicle load and resistance processes.** Yuan, Han, Li, Xie & Guo (2019).

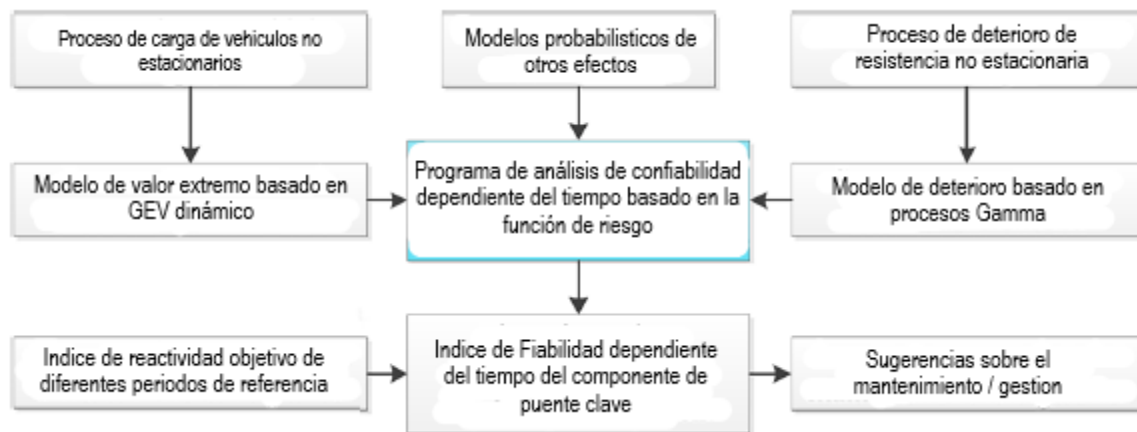
“Evaluación de la confiabilidad en función del tiempo de los puentes de hormigón existentes, incluidos los procesos de carga y resistencia de vehículos no estacionarios”. Este estudio establece que los puentes de concreto en la actualidad son sistemas estructurales que presentan variaciones con el pasar del tiempo, y por tanto debe establecerse un proceso de planificación para su mantenimiento que sea acorde con el rendimiento de la estructura y su capacidad de servicio que varía en el tiempo. Se propone un procedimiento de evaluación de confiabilidad dependiente del tiempo que toma en consideración las cargas no estacionarias producidas por vehículos y el proceso de deterioro de la resistencia simultáneamente, siendo estos dos factores los de mayor influencia en la capacidad de servicio de una edificación tipo puente que varía con el tiempo. Con la finalidad de lograr el objetivo del estudio se plantearon actividades en secuencia como se describen a continuación:

- a) Modelado de valor extremo del proceso de carga de vehículos no estacionarios
- b) Establecimiento de modelos y actualización del proceso de deterioro de resistencia no estacionario

c) Determinación del índice de confiabilidad objetivo de un componente de puente de concreto en la etapa de operación

d) Realizar un análisis de confiabilidad dependiente del tiempo mientras se consideran las propiedades no estacionarias.

Para realizar este análisis se realizan simulaciones en donde se involucran los procesos como se ilustra a continuación.



**Figura 23. Procedimiento de evaluación de confiabilidad dependiente del tiempo del componente de puente clave**

Para ilustrar la aplicación del procedimiento propuesto se estudió un puente de concreto existente como ejemplo. Se describe que el procedimiento de evaluación de confiabilidad dependiente del tiempo propuesto es factible, y se puede obtener cierta información crítica sobre el desempeño del servicio con el paso del tiempo, todo esto sirve para realizar una correcta planificación de las inspecciones estructurales necesarias, gestión y mantenimiento que sean requeridas en la estructura a lo largo de su vida útil (Yuan et al., 2019).

**6.2.9 Probabilistic reliability framework for assessment of concrete fatigue of existing RC bridge deck slabs using data from monitoring.** Mankar, Bayane, Sørensen & Brühwiler, (2019). “Marco de confiabilidad probabilística para la evaluación de la fatiga del concreto de las losas de cubierta de puente RC existentes utilizando datos de monitoreo”. Dentro de los elementos que conforman un puente también se encuentra presente la capa de rodadura, por ello el estudio de su resistencia es importante para monitorear su estado y definir alternativas de corrección en el artículo se explica como la evaluación del nivel de confiabilidad propio de las estructuras de puentes existentes o para la evaluación de su seguridad de por vida presenta una complejidad mayor que el diseño de una estructura nueva. Al incrementar la magnitud y la frecuencia de las cargas por eje que transitan por la estructura, las cubiertas del puente de hormigón armado son susceptibles a fallas generadas por fatiga para las cuales no se tuvieron en consideración para el diseño inicialmente. La verificación de la fatiga y la predicción de la duración restante del servicio pueden resultar críticas para que la infraestructura civil satisfaga la confiabilidad requerida. Estas estructuras están expuestas a cargas estocásticas (por ejemplo, cargas de vehículos, cargas de temperatura); Por el lado de la resistencia, el hormigón armado también se comporta de manera estocástica. El estudio presenta un marco de confiabilidad probabilístico para la evaluar el tiempo que durara en servicio la estructura, lo cual incluye el modelamiento probabilístico de acciones basadas en el monitoreo de datos y modelado probabilístico de resistencia a la fatiga basado en datos de prueba. La investigación presenta un estudio de caso para la losa de hormigón armado de acero del Viaducto Crêt de l'Anneau junto con la calibración de los factores de seguridad de resistencia parcial para la extensión de la vida útil.

El presente estudio propone una metodología para la evaluación de la fiabilidad de la fatiga de las estructuras de hormigón armado existentes que incluye un nuevo modelo SN estocástico para la fatiga del hormigón, dos modelos de tráfico diferentes (modelos de efecto de acción), un nuevo concepto de modelado de la relación entre el parámetro de evaluación y las tensiones en hormigón para estructuras existentes. El nuevo modelo SN estocástico captura los datos de la prueba de fatiga con mayor precisión y por lo tanto, reduce la incertidumbre del modelo.

Dos factores juegan un papel muy importante en la evaluación del nivel de confiabilidad para la fatiga de las estructuras de concreto, a saber, la precisión en la estimación de los efectos de la acción de fatiga y la incertidumbre relacionada con la resistencia a la compresión estática del concreto. Para el caso considerado, hay disponible una información muy precisa sobre los efectos de la acción. Sin embargo, falta información precisa sobre la resistencia a la compresión estática. Además, la resistencia a la compresión estática del hormigón mejora con los años. Se desconoce la información precisa sobre esta ganancia en la resistencia del concreto, a menos que se realice una Prueba no destructiva.

El estudio actual se centra en la confiabilidad a nivel de componente, sin embargo, un enfoque que considere la confiabilidad del sistema sería útil para la planificación de la inspección y para mantener una seguridad constante de toda la estructura durante toda la duración del servicio de fatiga planificado (Mankar et al., 2019).

**6.2.10 The importance of correlation among flutter derivatives for the reliability based optimum design of suspension bridges.** Kusano, Baldomir, Jurado & Hernández (2018). “La importancia de la correlación entre los derivados del aleteo para el diseño óptimo de puentes colgantes basado en la confiabilidad”. En los puentes es importante analizar los diferentes tipos

de movimientos que estos pueden presentar, en esta investigación se plantean que el diseño de puentes de tramo largo está limitado por la incertidumbre en la evaluación de la velocidad de aleteo. Entre todos los elementos que participan en la evaluación del aleteo, el nivel de incertidumbre en los derivados del aleteo obtenidos experimentalmente tiene el mayor impacto. Por lo tanto, es importante en la evaluación de la velocidad del aleteo evaluar la incertidumbre asociada con el método experimental adoptado para los derivados del aleteo. Al utilizar un método de movimiento acoplado solo para identificar ocho derivaciones de aleteo simultáneamente, también es esencial considerar las correlaciones entre los puntos que definen el conjunto completo de derivadas de aleteo ya que no son independientes entre sí.

Para el análisis se realizó una campaña experimental para obtener la información estadística de los derivados del aleteo y para ensamblar la matriz de correlación. En dicha investigación se realizaron varios casos de análisis de confiabilidad para ilustrar la importancia de considerar la correlación entre variables aleatorias, así como la importancia del nivel de incertidumbre en los derivados del aleteo en la falla del aleteo del puente. Además, se llevó a cabo un estudio de Optimización del diseño basado en la confiabilidad (RBDO) para ver la influencia de las correlaciones entre los derivados del aleteo en los diseños óptimos. El RBDO de un puente colgante se realizó bajo una restricción probabilística de aleteo utilizando el método de Enfoque del Índice de Confiabilidad (RIA), y esta metodología se aplicó al Puente Great Belt East.

El problema RBDO consiste en dos bloques principales de optimización de diseño y análisis de confiabilidad. Estas dos fases están anidadas en el método RIA utilizado en este estudio. Cada vez que el algoritmo de optimización modifica las variables de diseño de los espesores de la placa de la viga, el código principal de MATLAB realiza las siguientes tareas principales en Fase de optimización del diseño.

1. Calcule las propiedades mecánicas de la sección de la plataforma con variables de diseño actualizadas y modifique el archivo de entrada FEM (área, inercias, etc.)
  
2. Usando el modelo de cable Abaqus, realice un proceso iterativo para determinar la longitud inicial del cable principal y la tensión inicial para que el cable se posicione como se diseñó. Se conoce la posición final del tramo medio, pero se debe calcular la posición del tramo medio debajo del peso propio. Este paso es necesario ya que cualquier variación en el grosor de la placa de la viga afecta tanto la longitud inicial del cable principal como la tensión inicial, lo que en consecuencia modifica la rigidez de toda la estructura.
  
3. Escriba los archivos de entrada de Abaqus para modificar las propiedades de la plataforma, la posición inicial y las tensiones iniciales del cable principal y de suspensión, etc.
  
4. Realice el análisis estático no lineal de Abaqus para calcular la tensión inicial de todo el puente bajo peso propio, cuya matriz de rigidez se utiliza para el análisis modal posterior.
  
5. Realice un análisis modal para obtener frecuencias naturales y formas de modo del puente y, simultáneamente, ejecute un análisis estático para obtener el desplazamiento vertical máximo en caso de sobrecarga estática.

Estas tareas se realizan en paralelo.

6. Ejecute FLAS utilizando los resultados del análisis modal para obtener la velocidad de aleteo del diseño actual.

Como RIA es un método de dos niveles, el análisis de confiabilidad está integrado en la optimización del diseño. Para cada nuevo diseño de la cubierta del puente, se realizan los pasos 1 a 6 en la rutina de optimización del diseño. Luego se lleva a cabo el análisis de confiabilidad, en



el cual el algoritmo busca el MPP en la función de estado límite cero. El  $\beta$  obtenido del análisis de confiabilidad se usa para verificar la restricción de probabilidad junto con otras restricciones deterministas en la optimización. Finalmente, el algoritmo de optimización modifica el diseño y el proceso continúa hasta que se alcanzan los criterios de convergencia.

Como conclusiones, los análisis de confiabilidad y el RBDO del Great Belt East Bridge se llevaron a cabo bajo restricción probabilística de aleteo considerando derivados de aleteo correlacionados. Se realizó una campaña experimental para obtener momentos estadísticos y la matriz de correlación entre los puntos que definen los derivados del aleteo. Al realizar diferentes casos de análisis de confiabilidad del aleteo del puente, descubrimos que es esencial tener en cuenta las correlaciones entre los puntos que definen los derivados del aleteo. Debido a las altas correlaciones entre los puntos que definen la misma derivada de aleteo, las funciones de aleteo deben formar una curva suave; sin embargo, las gráficas MPP de derivados de aleteo no correlacionados revelaron las curvas en zigzag como resultado del análisis de confiabilidad. Además, el análisis de aleteo con derivados de aleteo no correlacionados puede o no producir una velocidad de aleteo más conservadora que la de las funciones de aleteo correlacionadas. En consecuencia, el análisis de confiabilidad del aleteo del puente debe realizarse con derivados de aleteo correlacionados; de lo contrario, el índice de confiabilidad resultante puede ser inexacto debido a derivados de aleteo poco realistas en el análisis de confiabilidad (Kusano et al., 2018).

**6.2.11 Performance-based reliability analysis of bridge pier subjected to vehicular collision: extremity and failure.** Hosseini, Ghasemi, Jalayer & Nowak (2019). “Análisis de confiabilidad basado en el rendimiento del muelle del puente sometido a colisión vehicular: Extremidad y falla”. Otros de los elementos a tener en consideración son los muelles en los puentes en este artículo se describe como se deben tomar en consideración varias funciones de

estado límite (LSF) para el diseño estructural para asegurar el nivel de rendimiento de las estructuras. En la especificación de diseño AASHTO LRFD, se han deliberado cuatro tipos de estados límite, incluidos la resistencia, el servicio, la fatiga y los eventos extremos. Los estados límite de eventos extremos se han dividido en una combinación de carga que incluye terremoto y colisión de vehículos. La provisión de colisiones vehiculares basada en la fuerza de corte estadística equivalente asociada con ningún factor de carga en una combinación de carga relacionada. Dado que la esencia de la especificación de diseño del puente AASHTO LRFD se ha establecido en base al análisis de confiabilidad, por lo tanto, existe la necesidad de un análisis de confiabilidad de este tipo de eventos extremos. La intención principal que describe el trabajo de investigación, es presentar un nuevo estudio para determinar un diseño basado en el rendimiento de los pilares del puente sometidos a la colisión vehicular. Como estado de la técnica en este estudio, los niveles de gravedad de las con figuraciones vehiculares se clasifican según los datos de impulso disponibles. En consecuencia, los niveles de rendimiento del muelle se clasifican según el estado del daño del muelle sujeto a la colisión vehicular. Para hacerlo, se modelaron numerosos muelles utilizando el método de elementos finitos (FEM). Además de la nueva definición de los niveles de severidad y rendimiento, los resultados mostraron que existe una correlación entre ambos límites de eventos extremos.

En este estudio, se investigó el estado del daño del muelle diseñado sometido al evento extremo II con la consideración de la colisión vehicular. La brillante innovación de este estudio fue establecer el nivel de extrema de los eventos de colisión vehicular. En este documento, basado en la vida útil del puente y la probabilidad aceptada de los eventos, se calculó el período de retorno de los eventos de colisión extrema. De manera fluida, gracias a los datos de impulso disponibles, la extrema extremidad de las colisiones vehiculares se clasificó en términos de clase,

peso y masa de los vehículos. La principal innovación de este documento fue el mecanismo de falla del muelle de puentes debido a la colisión del camión. En consecuencia, como el estado de la técnica, los niveles de rendimiento de los pilares se definieron en términos del estado de daño del material asociado con la consideración de la capacidad de reparación visual estructural.

Los resultados de este estudio pueden usarse para determinar la provisión mínima del diseño del muelle sujeto a la colisión vehicular con respecto a los niveles de rendimiento previstos. Por lo tanto, según este estudio, el muelle puede colisionar por cualquier gravedad aceptada de la carga, y luego, se puede evaluar el nivel de rendimiento del muelle. Como era de esperar, los muelles de mayor dimensión pueden presentar el mejor nivel de rendimiento de acuerdo con los resultados obtenidos del análisis FEM. De hecho, los muelles que ya se han diseñado en base a los terremotos más severos pueden representar un mejor nivel de rendimiento (Hosseini et al., 2019).

#### **6.2.12 An efficient method of system reliability analysis of steel cable-stayed bridges.**

Truong & Kim (2017). “(Un método eficiente de análisis de confiabilidad del sistema de puentes atirantados de acero”. Los puentes atirantados de acero se han aplicado ampliamente en el diseño y la construcción de la estructura del puente en los últimos años debido a sus beneficios de apariencia estética, utilización económica y técnica innovadora. Sin embargo, se conocen como estructuras a gran escala y altamente no lineales debido al efecto de pandeo del cable, los comportamientos de tensión de deformación de los materiales y la interacción del momento de flexión de fuerza axial en vigas y pilones. Como consecuencia, el análisis estructural de puentes atirantados de acero requiere un análisis inelástico no lineal, que exige un tiempo de cálculo excesivo. Actualmente, el análisis de confiabilidad ha atraído una atención significativa de los investigadores ya que las propiedades geométricas y materiales y las cargas de estructura

aplicadas son parámetros inciertos. El proceso de análisis de confiabilidad de estructuras altamente no lineales también exige un tiempo computacional excesivo porque incluye análisis estructurales repetidos. Por lo tanto, es necesario desarrollar un método eficiente de análisis de confiabilidad de puentes atirantados de acero, uno que sea: (1) un esquema de análisis estructural rápido y preciso y (2) un análisis de confiabilidad robusto.

El método IHS-EIS es propuesto para desarrollar el análisis de confiabilidad de puentes atirantados de acero mediante la integración del Latin Hypercube mejorado (IHS) y un muestreo de importancia efectiva (EIS). Todas las fuentes de puentes no lineales se capturan directamente mediante el análisis avanzado práctico propuesto (PAA) utilizando elementos catenarios para cables y elementos de columna de viga para pilones, vigas y vigas transversales. La innovación del método propuesto proviene tanto de PAA para realizar análisis estructurales como de IHS-EIS para resolver análisis de confiabilidad. En comparación con el software comercial ABAQUS, el costo computacional del análisis estructural se reduce significativamente mediante el uso del método PAA propuesto.

IHS-EIS puede capturar con precisión la probabilidad de falla de la estructura y disminuir considerablemente el número de muestras en comparación con la simulación de Monte Carlo, el muestreo de importancia, Latin Hypercube y métodos de simulación de subconjuntos. Primero se presentan tres ejemplos matemáticos y dos marcos de acero para demostrar la precisión y eficiencia de IHS-EIS. Este método se aplica luego para el tipo semi-arpa de un puente atirantado de acero. También se investiga la sensibilidad de confiabilidad del puente.

Las siguientes conclusiones se pueden extraer de este trabajo:

a) Se desarrolla un método robusto (IHS-EIS) para el análisis de confiabilidad de puentes atirantados de acero mediante la integración del Latin Hypercube mejorado (IHS) y un muestreo de importancia efectiva (EIS).

b) Las respuestas inelásticas no lineales de los puentes atirantados de acero se capturan mediante el uso de un método práctico de análisis avanzado (PAA), que se desarrolla utilizando elementos de catenaria para cables y elementos de columna de viga para pilones, vigas y cruces vigas

c) Los resultados numéricos muestran que el método propuesto calcula con precisión el valor medio y reduce significativamente el valor COV de la probabilidad de falla estructural en comparación con MCS, SS e IS.

d) El método propuesto es computacionalmente muy eficiente. El tiempo computacional del PAA propuesto para un solo análisis estructural se reduce más de 10 veces en comparación con ABAQUS. Además, el tiempo computacional del método propuesto usando computación paralela con 10 núcleos se reduce en aproximadamente 4.5 veces en comparación con el uso de SS.

e) El análisis de sensibilidad del puente atirantado de acero muestra que la tensión de acero y las cargas aplicadas son los factores más influyentes en la probabilidad de falla del puente. El número de variables aleatorias en el estudio de caso puede reducirse significativamente ya que el número de variables aleatorias, que influyen considerablemente en la probabilidad de falla del puente es menor que la mitad del número total de variables aleatorias (Truong & Kim, 2017).

### **6.2.13 Target reliability for bridges with consideration of ultimate limit state. Ghasemi &**

Nowak (2017). “Objetivo de confiabilidad para puentes con consideración del estado límite final”. Los inconvenientes que se presentan en las edificaciones llevan a generar anomalías que pueden someter a la estructura a un estado límite por ello se deben cumplir con niveles de seguridad óptimos, esto hace evidente el hecho de que la confiabilidad objetivo es una restricción de diseño que asegura el nivel de seguridad requerido para las estructuras, dado que la derivación de la confiabilidad objetivo es una tarea complicada y desafiante, para poder determinar la confiabilidad objetivo, se pueden considerar dos enfoques principales, el primer enfoque se basa en el juicio de ingeniería con respecto a las observaciones pasadas de fallas estructurales, mientras que el segundo método se basa en la teoría de optimización. En el pasado, los códigos de diseño estructural asumían implícitamente la confiabilidad del objetivo con respecto a las experiencias pasadas, sin embargo, el objetivo del enfoque de optimización es calcular la confiabilidad del objetivo utilizando la minimización de la función de falla de costo. Esta contribución intenta establecer un procedimiento de optimización para determinar la confiabilidad objetivo de las estructuras considerando el costo de construcción, el costo de falla, costo de mantenimiento, tiempo de vida estructural, tasa de descuento, dependencia del tiempo de la carga y resistencia, y factor de importancia estructural. En consecuencia, la relación entre la confiabilidad objetivo, el costo estructural, el factor de importancia estructural y el tiempo de vida estructural se representan utilizando el concepto de contorno. Finalmente, la confiabilidad objetivo para los puentes de vigas de acero se determina con respecto al estado límite final.

El objetivo principal de esta investigación fue proponer una metodología para determinar la confiabilidad objetivo de las estructuras. Esa metodología se estableció con base en la minimización del costo estructural con respecto al índice de confiabilidad en el tiempo de vida

previsto. La confiabilidad objetivo propuesta para los puentes de vigas de acero se calculó considerando varios supuestos. La función de estado límite dominante se consideró como estado límite último en relación con el modo de falla por flexión. Se supuso que la capacidad estructural se deterioraba según el modelo de corrosión. En consecuencia, se propusieron varias innovaciones nuevas para generar una función objetivo apropiada para determinar la confiabilidad objetivo.

1. Se introdujo un nuevo enfoque computacional para estimar la relación entre el costo inicial y el índice de confiabilidad para las estructuras. Como resultado, para los puentes de vigas de acero no compuestos, se observó una relación lineal entre el índice de confiabilidad y el costo inicial.

2. Esta investigación propuso el costo de falla basado en el costo inicial. La idea que respalda esta recomendación se deriva del costo general de la falla económica, que puede ser el mismo que el costo inicial.

3. Se propuso una nueva generación de la función objetivo dependiente del tiempo, que podría determinar la confiabilidad objetivo con respecto al costo de construcción, costo de falla, costo de mantenimiento, tiempo de vida estructural, tasa de descuento y dependencia del tiempo de la carga y resistencia.

4. El factor de importancia estructural, SI, fue deliberado como un factor de ajuste para el costo de falla. Usando el concepto de contorno, se ilustró la influencia de SI en la confiabilidad del objetivo. Como se esperaba, un valor más alto de SI requiere mayor confiabilidad objetivo.

5. La fiabilidad objetivo para los puentes de vigas de acero no compuestos se determinó para puentes con varias longitudes de tramo, teniendo en cuenta el deterioro estructural debido a las condiciones de corrosión. Se observó que para las condiciones severas de corrosión se requiere una mayor confiabilidad objetivo.

Aunque la fórmula propuesta se desarrolla para determinar la confiabilidad del objetivo para la función de estado límite de fuerza, existe hay varias funciones de estado límite (como fatiga, eventos extremos y servicio) que deben considerarse decentemente (Ghasemi & Nowak, 2017).

**Conclusión.** Se concluye que las investigaciones de confiabilidad realizadas en los últimos 5 años han sido enfocadas al estudio de la seguridad estructural buscando determinar tiempos adecuados de inspección de los puentes para garantizar su correcto funcionamiento además de establecer el mantenimiento necesario que debe brindarse a las estructuras para garantizar su vida útil y así reducir la probabilidad de que ocurran problemas estructurales por falla o fatiga ocasionados por las diversas incertidumbres que se generan a lo largo de la vida útil del puente.

### **6.3 Aplicaciones y Análisis de Confiabilidad en Estructuras tipo Puente a Nivel Nacional**

**6.3.1 Estudio puente Puerto Salgar.** Según el trabajo realizado por el grupo de investigación "estructuras y construcción" en el estudio de diversos puentes de acero llevados a cabo, usando la Confiabilidad Estructural, tomando como guía el monitoreo e instrumentación. La primera investigación que se realizó fue a el puente de Puerto Salgar. Primeramente, se expondrá un corto resumen de origen a través del tiempo de los puentes de armadura o celosía, tipología y/o antecedentes; para luego dar paso a presentar la metodología, resultados y conclusiones del estudio al Puente Salgar.



Todo este material histórico es de gran importancia por su aporte a dichas estructuras que fomentan el desarrollo de la infraestructura vial en el país.

Los primeros puentes de armadura o celosía se realizaron en madera en 1570 gracias a los documentos publicados por el arquitecto italiano Andrea Palladio Della Góndola en donde presentaba un compendio de obras en celosía lo que daría paso a su posterior implementación. Estos puentes de madera en celosía no contaban con las cualidades estructurales necesarias para dar soportes a diseños ferroviarios o viales, por ello alrededor del siglo XVII se dio origen al uso de acero, luego de haber empleado otros materiales como cáñamo, piedra y ladrillo.

Posteriormente y basados en Wittfoht (1975), que fue el ingeniero A. Darwy quien construyó el primer puente de arco en hierro en Coalbrookdale, usó una fundición quebradiza con capacidad estructural solamente a esfuerzos de compresión; de igual manera en 1784 Henry Cort (Inglaterra) fabricó por primera vez hierro maleable. Después de estos hallazgos se usó en la historia este material en la construcción de puentes.

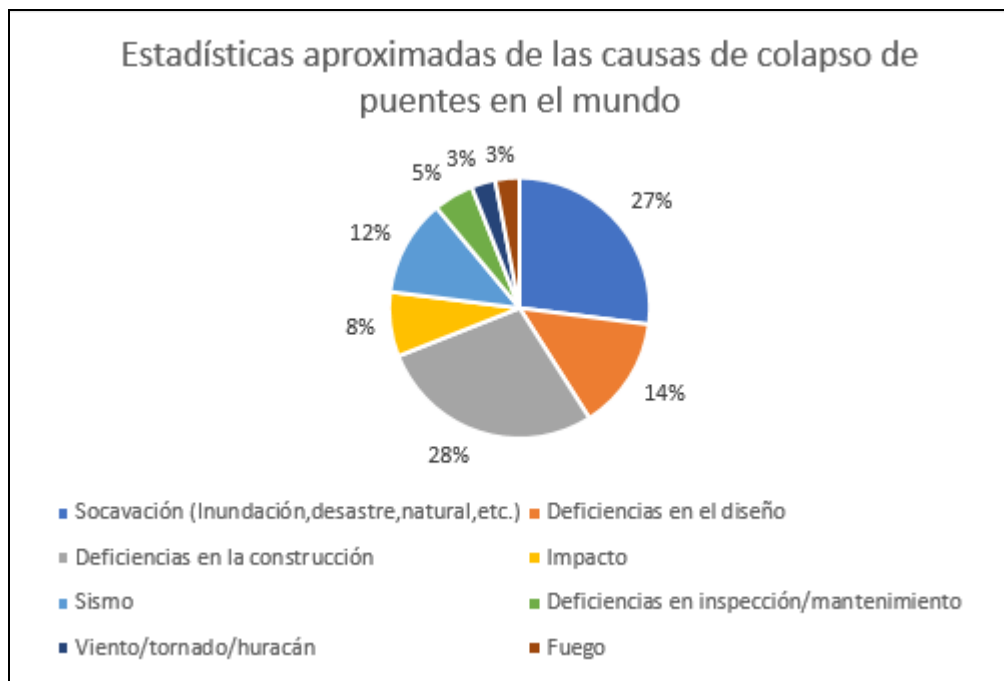
Uno de los principales beneficiados fue el ferrocarril ya que se aumentó la relación entre capacidad resistente y peso propio, y que a su vez con la ayuda del ingeniero norteamericano Squire Whipple se logró deducir el primer sistema para calcular los esfuerzos en las barras, que brindo múltiples ventajas como por ejemplo ubicando los tramos con asistencia de grúas y dejando de lado las construcciones falsas.

Con el transcurrir de los años y el auge de estos puentes en todo el mundo este método se acentuó en Colombia contribuyendo a gran escala en la construcción de autopistas y siendo el salvamento de diferentes impedimentos en el paso de ferrocarriles, el puente de Navarro ubicado en la ciudad de Honda junto al río Magdalena y es una de estas primeras estructuras en Colombia,

su construcción comenzó en 1894 y finalizó en 1899.

Se conoce según Muñoz (2012), de acuerdo con el inventario de puentes de Colombia, el 3% de los puentes de la red vial nacional son de acero. La mayoría de estos puentes están ubicados en los departamentos de Meta 9% y Norte de Santander 8,6%; cabe resaltar que los puentes de armaduras de acero son de tres tipos: paso superior, paso inferior e intermedio.

Por otra parte, se desarrolló un estudio el cual arrojó los fallos en puentes de armadura y se descubrió que los principales motivos de derrumbamiento son la socavación e insuficiencias en los diseños.



**Figura 24. Estadísticas aproximadas de las causas del colapso de algunos puentes en el mundo**

Fuente: Muñoz (2012).

Uno de estos grandes colapsos fue el del puente sobre el río Mississippi en Estados Unidos el cual era de tipo paso superior con losa en concreto reforzado, posteriormente a una revisión se dictaminó los daños que se habían presentado en este, una corrosión notoria y carencia de tornillos en conexiones fueron las causas. En Colombia al realizar obras de actualización en armaduras se presentaron fallos en el uso de la soldadura, el déficit de remaches y la corrosión.

Las primeras valoraciones realizadas por medio de técnicas de confiabilidad estructural del puente salgar se fundamentó en simulaciones numéricas utilizando el método de Montecarlo y en datos proporcionados por (INVIAS) de pesajes y análisis del tráfico; sumado a esto se hicieron pruebas mecánicas del acero y una muestra de carga (vertical) con la cual se graduó su modelo estructural, con el objetivo de una alta exactitud en los trabajos de simulación numérica y la deducción de las tasas de falla aplicando la confiabilidad estructural.

A continuación, se expondrá la metodología que se usó para dirigir este proyecto y así poder obtener avances y soluciones, dicha guía la podemos clasificar en cinco ítems principales:

**Compendio de datos.** Con el fin de calcular la capacidad de carga de los puentes de acero o concreto, es indispensable realizar un estudio detallado y poseer información verídica para así comprender de la estructura las siguientes características:

- Información de la geometría en general, partes transversales, clases de uniones, dimensiones de la losa, modelo de apoyo entre otros.
- Composición química del acero.
- Cualidades mecánicas y químicas de los materiales, así como la dureza o resistencia del concreto y el acero.

- Documentación histórica y actual de factores relevantes en esta estructural como lo es el tráfico (pesajes, TPDS, conteos, distancia entre ejes y configuración de los camiones) son algunos de los aspectos principales.

Se logró a través de una compilación de datos y documentos escritos realizar un estudio del puente el cual cuenta con planos de diseño, de construcción o de rehabilitación, algunas retentivas de cálculo de la superestructura e infraestructura, documentación de interventoría, estudios hechos con anterioridad sobre el refuerzo, mantenimiento o rehabilitación.

Cabe denotar que esta tarea es extensa teniendo en cuenta que en algunos casos los entes públicos no poseen un registro detallado y completo sobre sus puentes por lo cual es imprescindible complementar con datos obtenidos por constructoras y/o firmas consultoras. Por otra parte, se pudo constatar en ese trabajo que entre 1999-2000 el INVIAS realizó un convenio para la rehabilitación, mantenimiento y reforzamiento del puente; sumado a ello se sustituyó toda la losa existente (de la zona curva de acceso y de cada nave) por material nuevo, acatando así las características actuales del código.

**Aprobación y licencias.** Se realizó una petición al INVIAS solicitando licencias y autorizaciones para el monitoreo e instrumentación del puente Puerto Salgar. Se recibió un soporte logístico de gran relevancia por parte de este ente y del Ejército para poder llevar a cabo este proyecto.

**Croquis del sistema electrónico para la instrumentación.** El propósito del método electrónico que se planteó era calcular imperfecciones unitarias y fuerzas de los elementos primordiales del puente cuando es sometido a carga en el transcurso de su ejecución tradicional, y compilar dicha información en tiempo real en un computador. Para el ordenamiento y

planificación de las tareas de campo y el monitoreo del puente Puerto Salgar, se efectuó la construcción de su prototipo a escala 1:25.

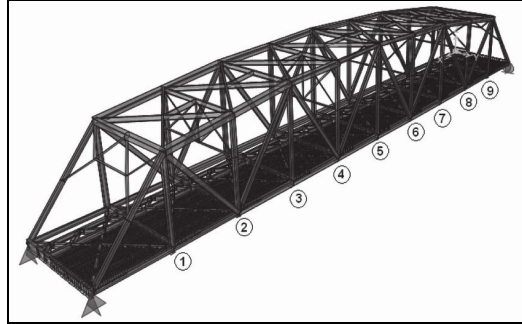
**Fases en campo.** Para comprender mejor este procedimiento se clasificó la información recolectada en seis etapas las cuales veremos a continuación:

- Personal y equipo; la parte de personal se conformó por: Ingenieros los cuales contribuyeron en cargos como jefe del proyecto, coordinadores de campo, asesoría electrónica y en el campo metalúrgica. Por otro lado, en la instrumentación se utilizaron la siguiente dotación y equipamiento: cables de comunicación, pegantes especiales entre otros.
- Levantamiento geométrico y estructural.
- Instalación del sistema electrónico.
- Prueba de carga.
- Extracción de muestras de acero del puente.
- Conteo de tráfico y adquisición de datos.

**Estudio de resultados.** Para obtener estos resultados se procedió a realizar diferentes procesos para sustentar una información veraz y fidedigna, dichos procesos se exponen a continuación:

- Ensayos mecánicos del acero.
- Calibración del modelo estructural: La medición de los modelos numéricos de estructuras es de vital importancia si se desea alcanzar una categoría admisible de confiabilidad en los resultados obtenidos por un modelo computacional.

- Modelo estructural en SAP-2000.
- Modelo estructural en ANSYS.

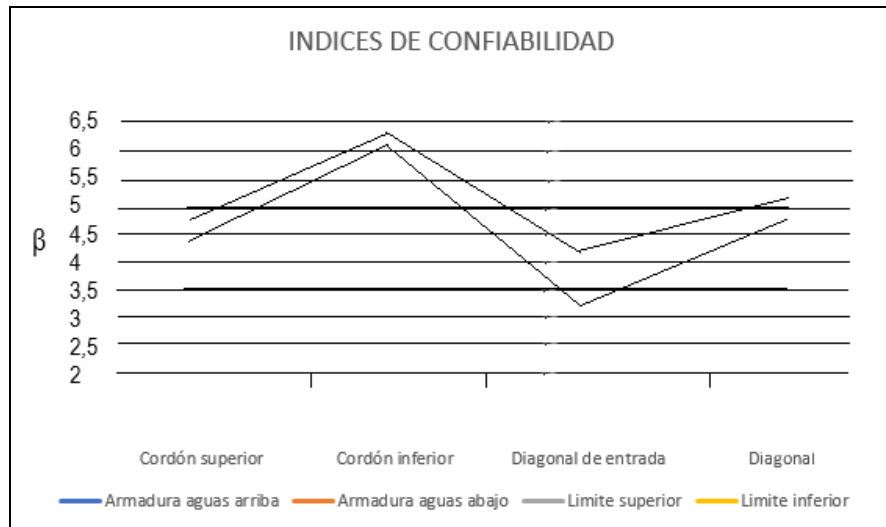


**Figura 25. Modelo estructural en SAP-2000 del puente Puerto Salgar.**

Fuente: Muñoz (2006).

- Descripción y conteo del tráfico.
- Comparación entre fuerzas internas reales y las máximas registradas para carga de diseño
- Evaluación de un solo camión por el puente.

Confiabilidad estructural; en esta etapa del estudio se analizaron y evaluaron procedimientos de resistencia, sollicitación e índices de confiabilidad, por medio de este último se logró obtener las siguientes cifras:



**Figura 26. Índices de confiabilidad de los elementos de las armaduras del puente. Se incluye el rango admisible recomendado por solamente el Eurocódigo**

Fuente: Muñoz (2006).

Comparación de confiabilidad basada en datos experimentales y analíticos.

**Conclusiones.** Podemos concluir que el sistema propuesto por medio de técnicas de confiabilidad soportada con monitoreo e instrumentación, es una elección preventiva que brinda un gran beneficio en comparación con el tradicional sistema determinista que avala el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCDSP) y que a través de los años se viene realizando indebidamente por parte de la ingeniería nacional para calcular la suficiencia de carga de los puentes existentes. Basados en la información de monitoreo y en los estudios de confiabilidad, se evidenció lo siguiente:

- Es pertinente establecer que se alcanzaron estos resultados, realizando un cotejo entre sollicitaciones y resistencias de servicio, sin tener en cuenta aspectos de mayoración y de reducción respectivamente.

- Esta sobrecarga es uno de los factores primordiales de los daños y desgaste en los elementos principales de los puentes y los pavimentos.
- Se contempla un sobrepeso indiscutible, que genera un alto riesgo y pone en duda la fiabilidad del puente.

Este proyecto es un estudio precursor pertinente para las necesidades del país y va en la misma dirección de obras similares internacionales.

**Recomendaciones.** Es por ello que se presentan unas recomendaciones como lo son aumentar por parte del INVIAS, el dominio de las cargas reales sobre los puentes y pavimentos por medio de la instauración de sistemas de pesaje estáticos y en movimiento en las primordiales vías a nivel nacional. A su vez es indispensable realizar un examen de la carga de diseño de puentes, ya que quedó evidenciado que causan fuerzas internas leves y/o menores (en ciertos casos) equiparadas con las reales, por otra parte, es prioritario instaurar en Colombia, una norma y/o ley para la valoración en la capacidad de carga de puentes existentes, fundamentados en las indagaciones realizadas por esta clase de estructuras y conforme con el estado del arte usado en el mundo.

**6.3.2 Estudio viaducto Cesar Gaviria Trujillo.** A través de diversos proyectos de investigación amparados por la Vicerrectoría Académica, el grupo de “estructuras y construcción” ha venido trabajando en el peritaje de puentes construidos por medio de la confiabilidad estructural basado en monitoreo e instrumentación como por ejemplo el estudio que fue realizado al viaducto Cesar Gaviria Trujillo el cual se llevó a cabo mediante un acuerdo con el Instituto Nacional de Vías (INVIAS).



En medio de las generalidades de puentes atirantados podemos constatar que desde el origen de este tipo de obras en la Edad Media como se podía observar en los puentes levadizos de algunos castillos, así como luego los puentes colgantes que utilizaban cables atribuyéndose así el nombre de puentes e “viento” por su tendencia a ser más ligeros.

Dichos puentes son conformados por uno o más pilones que deben resistir, con tirantes, las cargas impuestas. Los puentes atirantados están constituidos por tres partes primordiales en su estructura: el pilón, el tablero y los tirantes. Por el tablero circulan los vehículos, y está sostenido por los tirantes, que están asegurados al pilón que transfiere la carga a la cimentación. Cabe mencionar que también existen puentes atirantados que cuentan con un solo pilón y con una sola asignación principal de tirantes.

En Colombia la edificación de esta clase de puentes ha incrementado con el pasar de los años, ya que estos permiten conservar luces en una gran parte y disputa en algunas circunstancias con puentes en voladizos sucesivos, extradados, entre otros. El viaducto Cesar Gaviria Trujillo no es el único puente de este tipo en el país existen otros como: el puente Pumarejo, Enviado y Gilberto Echeverri Mejía.

A continuación, se presentan las etapas y estudio de resultados del viaducto:

- Datos generales y descripción: El viaducto Cesar Gaviria Trujillo está ubicado entre Pereira y Dosquebradas cimentado sobre el río Otún, esta obra fue inaugurada el 15 de noviembre de 1997. Se conoce que durante su edificación se presentaron algunas alteraciones en su diseño, las cuales se fijaron en obra y con la aprobación de los entes y empresas consultoras encargadas.

- Documentos y testimonios: Se requirió de datos técnicos y académicos como lo fueron una tesis de especialización, planos de diseño y una bitácora del método de construcción; todos estos aportados por diferentes fuentes como el INVIAS y Universidad Nacional de Colombia (sede Medellín).
- Maquinaria y pruebas: Se tuvieron especificaciones en los materiales tanto en el concreto como en los aceros de refuerzo, estructural, entre otros.

Acorde con los datos de la interventoría que intervino en la edificación del viaducto, se le efectuó vigilancia de calidad especificados a todo el material de este puente. A su vez con el objetivo de comprobar algunas cualidades mecánicas de los componentes esenciales, se desarrolló pruebas mecánicas del acero de las vigas armadas del tablero del puente, en este proceso se tomaron seis ejemplares del acero de las vigas del puente en zonas apropiadas y elegidas con el fin de no perjudicar su plenitud estructural. La siguiente figura muestra las pruebas mecánicas hechas al acero.

Muestra	Estructura de Fluencia (Kg/mm <sup>2</sup> )	Carga de Fluencia (Kg)	Esfuerzo máximo (Kg)	Carga	Alargamiento medio	Módulo de elasticidad (Kg/mm <sup>2</sup> )
1	35	33683	48,8	46406	30	1936491
2	40,3	20371	52,3	26355	27,5	2020294
3	35,9	32608	49,7	45370	31	2276623
4	36,4	32524	49,8	44188	29	
5	40,6	18750	52,5	24171	28,5	1852156
6	41,5	19715	53	25103	27	
Promedio	38,3					2021391,0

**Figura 27. Resultados de los ensayos mecánicos del acero**

Fuente: Muñoz (2009).

Sumado a estos se elaboraron pruebas mecánicas al concreto efectuadas a los pilones, losa, estribos y pórticos del puente.

Análisis de dictamen local: Se elaboró un análisis de la amenaza sísmica y de la réplica dinámica la cual permite reconocer los efectos de los suelos y de la topología en el lugar. Se tuvo en cuenta los eventos pertinentes al sismo de diseño conforme a la NSR-98. Se realizaron dichos análisis de respuesta usando modelos de difusión dinámica bidimensionales empleando el programa Plaxis, fruto de estos modelos se tuvo datos topográficos de planos correspondientes al diseño original del puente y a su vez se reconocieron las características dinámicas de los materiales de la superficie a partir de los resultados de pruebas de refracción sísmica y Down Holes.

Evaluación de un espectro de amenaza sísmica uniforme de aceleraciones en roca; Es de vital importancia poseer ciertos valores probabilísticos del riesgo sísmico para poder realizar un estudio de confiabilidad ya que nos dan la posibilidad de calcular los espectros de riesgo semejante de aceleraciones, desplazamientos o velocidad. Se debe tener en cuenta que para la ejecución de análisis de respuesta local es indispensable tener acelerogramas interpretativos del riesgo sísmico. A continuación, algunos de pasos a realizar en esta etapa:

- Modelo Sismológico.
- Evaluación probabilística de la amenaza sísmica.
- Evaluación de atenuación en ordenadas espectrales.
- Espectro de amenaza uniforme.
- Estudio de respuesta dinámica: En pro de obtener resultados verídicos y fidedignos se realiza una clasificación de todos los pasos a seguir que son de vital importancia en este análisis y en los cuales se basaron dichos resultados.

- Selección de acelerogramas.
- Tectónica local.
- Referentes reglamentarios (ley 400 de 1998 / Norma Sismo Resistente NSR-98).
- Análisis pseudo-determinísticos.
- Aceleración vertical.
- Aceleración horizontal.
- Selección de acelerogramas para análisis de respuesta.
- Exploración geofísica para estudio de la fundación del puente, los principales aspectos del estudio son (Refracción sísmica / Down Holes).
- Análisis de respuesta.
- Espectros de respuesta de acuerdo con el CCDSP.

Desarrollo y calibración de modelos estructurales: En el siguiente estudio se aplicaron dos modelos estructurales utilizando el programa SAP-2000, sustentados en los registros escritos de los planos de diseño; a dichos modelos se les efectuó un proceso de calibración, fundamentado en un ensayo de carga vertical. A continuación, las acciones que se realizaron:

- Calibración estática para cargas verticales.
- Calibración para vibraciones ambientales.

Monitoreo e instrumentación: Se desarrolló un método inalámbrico de monitoreo, por medio del cual se ejecutó el rastreo de los efectos de la carga viva para los principales componentes del puente.

Verificación de tensiones de tirantes: Se verificó a lo largo de la historia los esfuerzos de los 72 tirantes, todo esto se realizó:

- Mediante gato hidráulico en dos tirantes.
- Mediante Frecuencias naturales (validación y aplicación).

-Resumen de resultados; se conoció que el 44% de los tirantes tienen una rigidez por encima de la adecuada, teniendo en cuenta únicamente el incremento por carga viva; por otra parte, el 78% en los tirantes presentan una tensión por encima de la aceptable registrando la carga viva, carga muerta complementaria, las consecuencias de relajación, temperatura, entre otros.

Análisis de confiabilidad estructural: Al viaducto Cesar Gaviria Trujillo se le aplicó un estudio de confiabilidad dirigido a los efectos de la carga vertical (carga viva y muerta) y por sismo, a su vez para esta investigación se usaron los parámetros de probabilidad de falla aceptados por la normativa europea y los códigos estadounidenses que rigen estas estructuras; por lo cual se tuvo en cuenta los siguientes factores:

- Efectos de cargas verticales.
- Para cargas de sismo (factores de resistencia por ductilidad, redundancia y sobre resistencia).

**Conclusiones.** Basados en el análisis de valoración en vulnerabilidad sísmica y suficiencia de carga por medio de confiabilidad estructural soportadas en monitoreo e instrumentación de este puente, puede deducirse lo siguiente:

Se pudo indagar acerca de los esfuerzos y alteraciones en sus diversas etapas, convirtiéndose en un insumo en el estudio de la confiabilidad estructural y en un mecanismo necesario para

reconocer falencias y calcular con una mejor eficiencia las diversas opciones de mantenimiento y rehabilitación.

Sumado a esto se constató que la viga longitudinal de arranque del pilón de Dosquebradas presenta una probabilidad de falla por encima de las acordadas por las normas europeas y americanas. Por tal razón, esta pieza no satisface los parámetros de seguridad fundamentales, teniendo un riesgo básico el cual ha sido tenido en consideración por el INVIAS para las tareas de restauración.

Para finalizar, conforme con las labores de instrumentación y monitoreo realizadas, se hallaron esfuerzos superiores a los que ejerce la carga de diseño C40-95 (más impacto), los cuales con el paso de los años pueden alterar su durabilidad y vida restante es por ello que el INVIAS ha implementado las disposiciones necesarias para contrapesar este incidente. Es importante exponer que una de las posibles causas por las cuales se pueden presentar estos mayores esfuerzos es que el nivel de impacto sobre el tablero es mayor al convenido por el CCDSP, esto puede deberse a que el contorno longitudinal del tablero del puente tiene unas prominencias en la mitad de cada una de sus luces, principalmente la que se localizó en medio de los pilones de Pereira y Dosquebradas (alteración vertical ascendente de 24 cm) estas anomalías del tablero incrementan en cierto modo las cargas dinámicas y fijas sobre el puente.

**6.3.3 Desarrollo de un algoritmo computacional para la estimación de la tensión de cables en puentes atirantados, con base en la medición experimental en laboratorio y campo de sus modos y frecuencias naturales de vibración.** En la actualidad, la edificación de puentes atirantados en nuestro país se ha vuelto más común, la aplicación de esta clase de estructuras no cuenta solamente con beneficios estéticos y arquitectónicos visuales en su ambiente, sino que

también tiene mérito por las propiedades de integra.

Los puentes atirantados brindan una mayor evolución en luces de gran magnitud, las cuales pueden llegar a igualar cifras como 1.008 m [1] estos a su vez con los puentes colgantes, se posicionan como el método estructural más usado en el desarrollo de esta clase de obras. Algunos ejemplos de estructuras de esta tipología realizadas en Colombia son:

- El puente bicentenario (Bucaramanga).
- Intersección carrera 11 por carrera 9.
- Puente Gilberto Echeverri Mejía (Medellín).

Se conoce un constante mantenimiento y rehabilitación de las piezas que lo conforman con el fin de salvaguardar su óptimo funcionamiento y objetivo a cumplir a lo largo de su vida útil. En el mantenimiento y rehabilitación de los puentes atirantados se hace una evaluación del pilón, el tablero, y los tirantes. Para los primeros dos elementos se tienen diferentes muestras de laboratorios y procedimientos de instrumentación por medio de los cuales es posible corroborar y hacer un cálculo de las características mecánicas de los materiales que los integran, no obstante, en la situación de los tirantes, el proceso llevado a cabo hoy en día se fundamenta en un examen visible (con el objetivo de comprender la integridad de los cables cuando es expuesto a efectos químicos) y una validación de las tensiones de estos con el apoyo de un gato hidráulico, implemento que es muy eficaz pero que necesita una liberación fragmentada de los torones que integran el tirante, caso que compromete una pérdida de suficiencia de la estructura a lo largo del proceso, por lo que esta clase de evaluación requiere el cierre provisional (parcial o total) de la estructura para prevenir cualquier clase de falla.

En el presente fueron diseñados otros sistemas para calcular la tensión de los tirantes, en los cuales se trabajó para no causar destrucción en la estructura. Uno de estos medios es el que busca calcular la tensión y esfuerzos en los cables tomando como base sus frecuencias naturales en vibración; dicho proceso es posible gracias a un acelerómetro colocado en el tirante, que registra continuamente la aceleración del cable. En concordancia con esta aceleración, y atravesando un procedimiento matemático, es posible calcular la tensión de este.

**Metodología.** En la realización de este estudio, se desarrolló una amplia indagación del estado del conocimiento, tanto de trabajos vinculados en forma directa con la valoración de la tensión en los cables, como también, se analizaron contenidos relacionados a la modelación con elementos limitados de esta clase estructuras y todo lo relacionado al análisis e investigación de señales. Más adelante, se realizó un modelo a escala cuyo diseño fue esmeradamente reexaminado para prevenir fallas en el cálculo como resultado de alteraciones no esperadas; referente a la conducta de la estructura se crearon diferentes personificar con una mayor exactitud, el fenómeno de la vibración y conseguir frecuencias de un orden semejantes a las de un puente real que concedieran certificar una más alta confiabilidad el algoritmo.

Por otro lado, se elaboró la programación del aplicativo computacional, así como el proceso que este implementaría y los instrumentos a los que tendría disposición; para todo esto se diseñaron diagramas de flujo con la finalidad de clarificar el funcionamiento del programa.

Teniendo ya el aplicativo computacional en marca de manera apropiada, se inició el paso más significativo del trabajo, la implementación a un puente real, para este paso se obtuvieron las autorizaciones de la constructora Conconcreto S. A. y con los datos de los tensionamientos, los cálculos se elaboraron en los tirantes del puente Gilberto Echeverri Mejía localizado en Medellín.

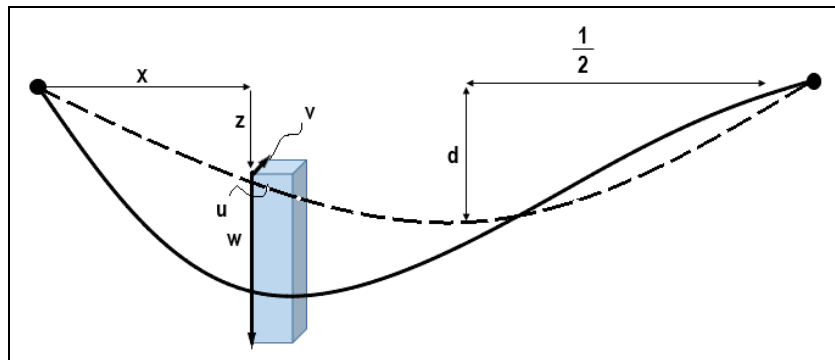


**Marco conceptual.** Dentro del marco conceptual propuesto se presentan dos teorías que presentan características esenciales de los elementos principales, las cuales se presentan a continuación:

**Teoría general de cables.** Los cables son comúnmente empleados en la ingeniería civil, ya sea por su implementación en la edificación de pre esforzados o en instrumentos a tensión para sostener elevadas cargas verticales (como los tirantes de los puentes atirantados), por su vínculo área/longitud, los cuales muestran una actividad particular, que incluye un análisis completo:

Primeramente, del comportamiento mecánico en el que la curvatura ocasionada por el producto de catenaria es un factor que limita considerablemente la rigidez del elemento (efecto originado por la alteración a la que se encuentra inducida por el peso propio).

El segundo parámetro es la tensión que se ejerce sobre el cable, que es una estimación recíprocamente proporcional a la alteración, producto del propio peso. En el momento en que un cable es sutilmente excitado, sus desplazamientos logran ser visibles, como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 28.** Diagrama donde se muestran los desplazamientos en un cable excitado

Fuente: Irvine (1981).

En la cual,  $u$  y  $w$  son los factores horizontal y vertical en concordancia del plano en movimiento,  $v$  es la componente que sale del plano y es la tensión sumada a esta la cual es originada por la vibración. En virtud de que la forma horizontal del cable no produce una extensión considerable en paralelismo con los modos que tienen en cuenta la componente vertical, se puede prescindir de este, por esta razón solo se labora con el plano vertical.

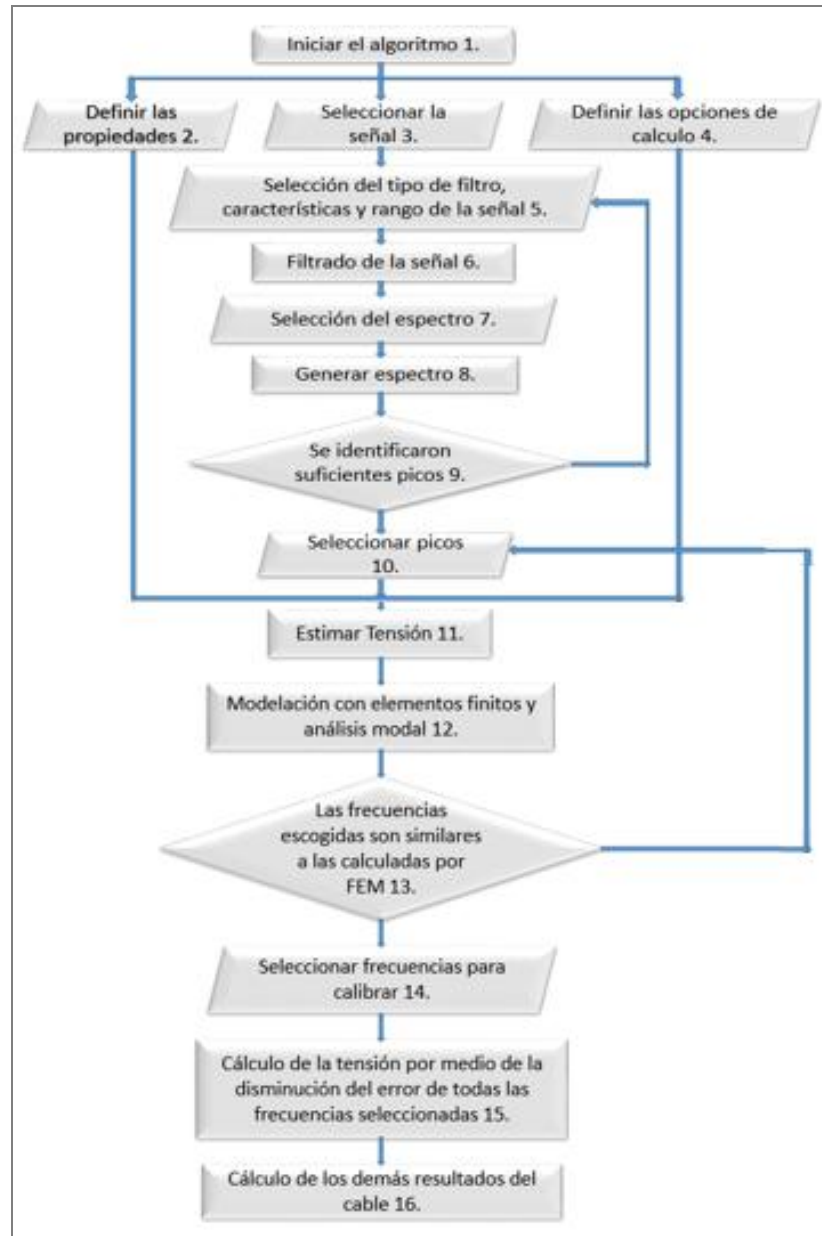
Esta etapa se basa en si se tiene en consideración o no el impacto y/o resultado de catenaria y de rigidez a flexión, los sistemas de vibración se pueden ordenar en las siguientes clases: en la primera categoría no se tiene en cuenta el efecto de catenaria ni la rigidez a flexión y en la segunda hace referencia a la teoría moderna de cables, teniendo en cuenta la rigidez.

**Teoría básica del método de los elementos finitos.** Se basa en un proceso matemático usado para valorar el comportamiento de un sistema, de manera que sea posible encontrar cifras de alteraciones, fuerzas y esfuerzos en componentes básicos empleando ecuaciones para cada uno de esos componentes. Se encuentran diversos tipos de elementos finitos, entre ellos mencionaremos los siguientes:

- Elemento de pórtico.
- Elemento de losa.
- Elementos sólidos.
- Elementos de membranas.

Las conclusiones para este sistema están en función de la matriz de rigidez correspondiente a cada elemento. Esta matriz está subordinada al tipo de elemento y a las características del material.

**Desarrollo del algoritmo computacional.** A continuación, se expone un diagrama de flujo el cual ilustra el comportamiento del aplicativo computacional.



**Figura 29. Diagrama de flujo donde se explica el funcionamiento del aplicativo computacional**

Fuente: Avellaneda (2011).

Los criterios de entrada son las características y geometría del cable, el peso y la ubicación del acelerómetro y el registro de las señales a usar originados de la instrumentación hecha. En función de tal modelación del cable y las conclusiones prácticas de las señales, se elabora una evaluación mediante una regresión múltiple.

**Diseño y construcción del modelo a escala.** Para el boceto de este modelo se elaboró originalmente un prototipo en SAP2000, en el que se valoró la alteración que presentada por el pilón cuando fuera expuesto a cargas de los tirantes y se verificó que fueran mínimas, de tal manera que no perjudicaran los requisitos de frontera al instrumentar los tirantes. De este modo, se determinó que el prototipo, en teoría, acata con las exigencias para que las medidas que se llevaron a cabo presentaran resultados similares a los deseados. En la elaboración de este patrón a escala, se hicieron diferentes apreciaciones en su diseño las principales serán presentadas a continuación:

- Los apoyos tienen un alto libre de 30 cm hasta el suelo, que asegura una extensión suficiente para cargar el cable con una o más pesas sin perder carga en el mismo.
- Se usaron platinas soldadas en trazos definidos para simplificar la localización de los cables y prevenir otros movimientos que se pudieran originar, gracias a ello se consiguió evitar que se perdiera carga de otras maneras en estos.

**Calibración en laboratorio.** En la siguiente figura se presentan las propiedades generales del cable usadas para la calibración del algoritmo computacional.

Propiedades del cable	
Proyección horizontal	2.435 m
Proyección vertical	1.960 m
Área	7.917E-06 m <sup>2</sup>
Peso por unidad de long	0.0352 Kg/m
Módulo de Young	213772.92 Kg-f/cm <sup>2</sup>

**Figura 30. Propiedades del cable 1 usadas para la calibración del algoritmo computacional**

Fuente: Avellaneda (2011).

**Características del puente.** El puente Gilberto Echeverri Mejía está ubicado sobre el río Medellín, la vía del metro y la avenida las Vegas. Consta de una longitud de 560 m en total, de estos 213 m pertenecen a un puente atirantado y los 347 m residuales que están asignados en puentes prolongados con dos viaductos de acceso. Este puente posee tres planos diversos de tirantes que salen de los dos pilones de (Wittfoht, 1975) 47 m de alto y que tienen como propósito conservar suspendido un tablero-preesforzado y con múltiples dovelas- de 40.5 m de ancho con cuatro carriles en cada sentido, andenes espaciosos y un separador con jardines, el puente cuenta con 51 tirantes; 18 en el primer plano lateral, 17 en el segundo plano lateral y 16 en el plano central.

**Resultados de validación.** A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los estudios hechos a las tensiones para las diferentes señales, todo ello se basó en el tirante 18 el cual es uno de los más largos de todo el puente.

Tensión real	658.00 Ton-f	% Error
Tensión calculada con la señal 1	654.04 Ton-f	0.60
Tensión calculada con la señal 2	653.66 Ton-f	0.66
Tensión calculada con la señal 3	656.14 Ton-f	0.28
Tensión calculada con la señal 4	656.28 Ton-f	0.26
Tensión calculada con la señal 5	657.54 Ton-f	0.07
Tensión calculada con la señal 6	656.26 Ton-f	0.26

**Figura 31. Resultados de las tensiones para las diferentes señales**

Fuente: Avellaneda (2011).

**Conclusiones.** El aplicativo computacional desarrollado en MATLAB avala completamente su propósito, el cual logra valoraciones y evaluaciones de la tensión con fallas que alcanzan el 0.07%, se conoce que es probable determinar la tensión sin ningún margen de error si se tiene información específica de todos los factores que se presentan en el procedimiento.

La herramienta que brinda la conducta del cable para cada forma de vibración, es un factor importante para agilizar la selección de las frecuencias más características.

Las conclusiones de las pruebas en el prototipo a escala mostraron que las frecuencias más comunes en el cable medido son las responsables de los movimientos perpendiculares que se puedan presentar hacia la dirección del cable y suceden en el plano del cable.

**6.3.4 Estudio del comportamiento dinámico del viaducto portachuelo basado en medición de vibraciones ambientales.** Uno de los principales fines del diseño estructural es disminuir las afectaciones producidas por los sismos en estructuras y de esta manera tener un control y garantizar un buen funcionamiento durante todo el movimiento telúrico. En función de esto se crearon diversos procesos; la habitual se basa en proporcionar un balance apropiado entre rigidez, resistencia y capacidad de distorsión. Por otra parte, se puede debilitar la magnitud de la

fuerza de inercia, mediante la aislación de la obra o la disolución de la energía transferida por el sismo, y así realizar una estructura que sea ampliamente rígida y resistente para estar en el rango lineal de respuesta (daño mínimo) en medio de un terremoto podría ser excesivamente costoso. Debido a esto se han indagado otras formas, generalmente en aislación sísmica.

La aislación sísmica se basa en disminuir las fuerzas inerciales que son transferidas por el sismo a la edificación, mediante un aumento del periodo estructural o sumando amortiguamiento al sistema. Para conseguir esto, se emplean mecanismos en los apoyos llamados “aisladores sísmicos” que incrementan el periodo estructural producido por su flexibilidad y que intensifica el amortiguamiento del sistema dependiendo de los materiales con el que se elaboren.

Esta técnica se ha implementado desde el 2007 en Colombia, en la construcción de puentes, una de estas es el Viaducto Portachuelo, el cual está ubicado a dos kilómetros del municipio de Zipaquirá. El viaducto se edificó con el objetivo de impedir el ingreso a Zipaquirá del tráfico que se destina al municipio de Ubaté, es por esto que posee dos calzadas paralelas independientes, la primera en sentido Bogotá-Ubaté y otra en sentido Ubaté-Bogotá, en la construcción de las dos calzadas se usó la misma tipología.

En esta indagación se analizó el comportamiento dinámico de la calzada en el sentido Ubaté-Bogotá, ya que esta es la obra con más curvatura.

**Marco conceptual y evaluación del estado del arte.** En las estructuras los sismos causan movimientos en la base, similares a los presentados por fuerzas horizontales conservando esta base inmóvil. Para disminuir esta consecuencia, las estructuras sismos resistentes deben crearse considerando un balance óptimo entre resistencia, rigidez y ductilidad.

Esta aislación sísmica tiene como principal finalidad alcanzar una mitigación del efecto del movimiento de entrada causado por el sismo en la edificación, todo esto es posible gracias al control hecho a las vibraciones. La aislación sísmica, logra que la energía transferida por un sismo al edificio o puente sea disminuida, a través del uso de elementos flexibles horizontalmente denominados aisladores sísmicos, estos son ubicados normalmente en la base de la obra para edificios sin sótano y en la unión pilalosa, para los puentes. Por otra parte, si posee sótano o son edificios muy altos, comúnmente se ponen los aisladores sísmicos en un nivel intermedio del edificio, además se debe tener presente hacerse siempre bajo un diafragma rígido para tener certeza de que la fuerza se disipe equitativamente.

#### **Descripción del viaducto portachuelo:**

**Características generales.** Tomando como referente a Muñoz (2012), el viaducto Portachuelo es un componente de la variante Cajicá-Zipacquirá dirigida por la concesión Devinorte. Esta obra es un puente ininterrumpido con curvatura en planta. En la investigación realizada a esta calzada se encontró que cuenta con 14 luces, 12 de ellas con 27 m y los dos restantes de 20,2 m y 19,2 m para así constituir una longitud total de 363,4 m. La geometría en planta del eje del viaducto es una curva espiralizada de 229 m de radio.

**Superestructura.** Según Muñoz (2012), la superestructura es una losa aligerada de concreto postensado con un ancho total de 10,3 m, lo suficiente para dos carriles de 3,65 m, una berma principal de 1.8 m de ancho en la parte externa de la curva, otra berma secundaria de 0,5 m en la parte interna de la curva y barandas de concreto a cada lado.

**Subestructura.** Basados en Muñoz (2012), la calzada izquierda en el sentido Bogotá-Ubaté, se apoya en 13 pilas, todas de dos columnas circulares de 1,4 m de diámetro de concreto



reforzado sin viga cabezal. Cada una de las columnas tiene un apoyo elastomérico de neopreno en su parte superior. La fundición de las pilas y los estribos es profunda, consta de un dado de cimentación de 1 m de espesor, con dimensiones en planta de 3 por 5,3 m, con 6 pilotes de 35 m de longitud y 0,6 m de diámetro.

**Criterios de diseño sísmico:**

**Carga muerta y masa.** Los pesos del tablero del puente están constituidos por losa, pavimento y barandas. Por medio de los diversos tipos de tablero en el puente, se poseen los pesos por metro lineal, que fueron empleados para el estudio dinámico de la estructura.

**Espectro de diseño.** Estos espectros de diseño, para perfiles del suelo definidos por Áreas Ltda., para la norma sismo resistente del momento (NSR-98) y el CCDSP. En este diseño se tienen en cuenta los conceptos de: coeficiente de disipación de energía y amortiguamiento.

**Materiales.** A lo largo de todo el proceso de construcción del viaducto se elaboraron pruebas al concreto conforme a las indicaciones exigidas en la construcción colombiana, las cuales demandan un registro permanente de calidad por medio de la producción y ensayos a la compresión de cilindros de concreto.

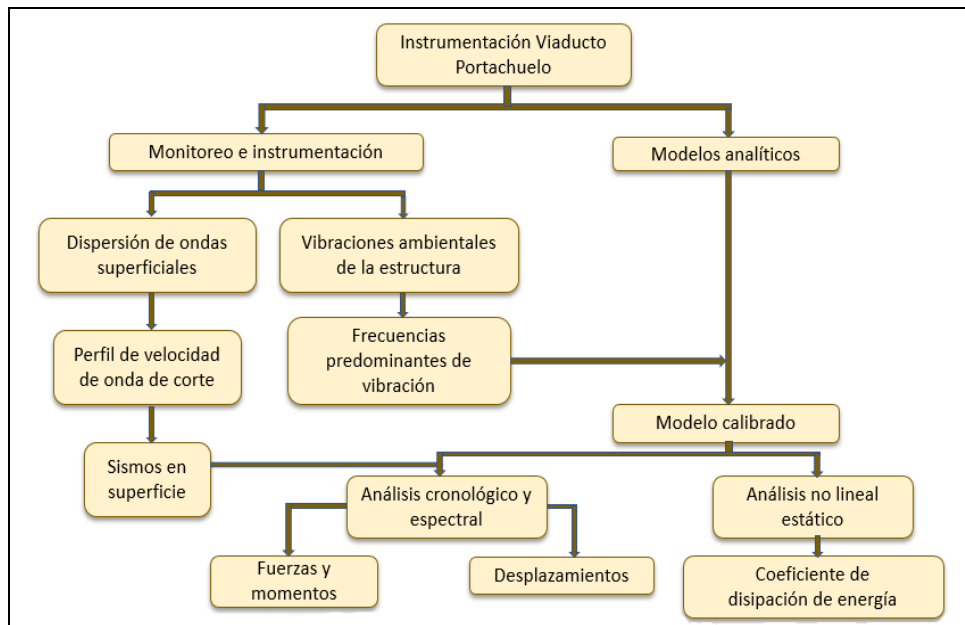
**Apoyos.** El viaducto Portachuelo posee apoyos elastoméricos laminados goma-metal de leve amortiguamiento, elaborados por la empresa italiana AGOM International. Dichos aisladores son diseñados con el fin de conservar un soporte a compresión, aceptando movimientos horizontales inclusive grandes alteraciones.

**Comportamiento ante carga vertical:** Se desarrolló una prueba bajo carga vertical hecho para un apoyo de 0,21 m de espesor y 0,75 m de diámetro, el cual se basó en efectuar tres ciclos

de carga a una velocidad de 900 kN/minuto, imponiendo sobre el apoyo una carga máxima de 4.500 kN.

**Comportamiento ante carga horizontal:** El comportamiento ante carga horizontal de los apoyos es casi lineal hasta la falla, y está subordinada solamente por la geometría del módulo de corte G y de la goma.

**Metodología y resultados.** A continuación, se muestra un esquema de las fases puestas en marcha para alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación.



**Figura 32. Etapas y actividades del estudio realizado sobre el viaducto portachuelo**

Fuente: Muñoz (2012).

**Monitoreo e instrumentación.** El análisis de respuesta sísmica local se realiza con el fin de conocer el comportamiento estructural del viaducto Portachuelo para efectos de movimientos horizontales, corte de la pila y fuerzas en la cimentación, se elaboró un estudio de respuesta dinámica aproximado del suelo bajo el puente.

Para poder llevar a cabo dicha investigación se utilizó datos del estudio de suelos, resultados de pruebas de dispersión de ondas superficiales, documentación de sismos para el examen de respuesta y por último el sistema lineal equivalente.

### **Vibraciones ambientales de la estructura:**

**Etapas de la instrumentación:** Se desarrollaron dos etapas en este procedimiento, en la primera se usaron registros de aceleración contra el tiempo frente a excitación ambiental y de tráfico en las 13 pilas de la calzada externa del viaducto Portachuelo y en los estribos; los cálculos se efectuaron en las tres direcciones del espacio, una pila a la vez. Por otra parte, en la segunda etapa las mediciones consideraban indicaciones como tomar registros de manera continua ya que esto logra que la mayoría de los modos se exciten lo suficiente y sean reconocibles, así como también registrar datos con la más alta sensibilidad para mitigar el efecto del ruido.

**Modelo conceptual.** Con el objetivo de conocer de manera promedio el comportamiento dinámico en dirección horizontal (de forma radial y longitudinal) de esta obra y tener un ordenamiento de magnitud de los periodos de vibración deseados en los modelos refinados en 3D, se elaboró un modelo abreviado de cada pila. En este prototipo se tiene en cuenta que las pilas son un péndulo invertido que está empotrado en la base al nivel de la parte baja del dado de cimentación y libre de momento en la parte alta.

En esta investigación, se consideró que la totalidad de la masa se centraliza en la parte superior de las pilas y se estimó un apoyo empotrado en la base de las pilas, cabe resaltar que la cimentación puede presentar desplazamientos leves en alusión a los que tienen los aisladores y las pilas. En este sentido, la aproximación de empotramiento en la base es comprensible.

**Desarrollo de modelos estructurales en el programa SAP2000.** Para poder ejecutar dichos modelos se utilizaron datos de los planos estructurales de construcción, pruebas de resistencia a la compresión del concreto empleado en la edificación de estructuras y análisis de suelos dados por la empresa Áreas Ltda.

Debido a anomalías en planta y en el perfil de la estructura, se precisó elaborar un prototipo en tres dimensiones, empero, se conocen cuantiosas variables y condiciones de frontera que perjudican este comportamiento, y que se incorporan a las diversas maneras de modelación.

**Selección modelo calibrado.** Las etapas de vibración esenciales evaluados en todos los modelos (cuatro modelos), se cotejaron con los obtenidos experimentalmente para escoger el modelo que se emplearía en los estudios posteriores. Dichos diseños se adquieren de un agente de participación de masa del 70% con los dos modos de vibración iniciales, por esta razón el estudio de sensibilidad y calibración se elaborará en función de estos dos periodos únicamente. El resumen presentó:

		<b>Módulo de corte (G) = 0.9 Mpa</b>							
Sentido	Periodo medido (s)	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4	
		Periodo analítico (s)	Diferencia porcentual	Periodo analítico (s)	Diferencia porcentual	Periodo analítico (s)	Diferencia porcentual	Periodo analítico (s)	Diferencia porcentual
Ux	1,95	1,79	8%	2,08	7%	1,86	4%	2,14	10%
Uy	1,91	1,82	7%	2,00	3%	1,89	3%	2,09	7%
X = Sentido longitudinal de la estructura general									
Y = Sentido radial de la estructura general									

**Figura 33. Resumen de calibración**

Fuente: Muñoz (2012).

**Cálculo del coeficiente de disipación de energía.** Se conoce que el coeficiente de disipación de energía  $R$ , es el producto de tres agentes que son la ductilidad, resistencia y redundancia.

El factor de ductilidad nos proporciona la suficiencia de deformación inelástica que presenta la estructura y se estima mediante ecuaciones experimentales en servicio de la ductilidad y el periodo de vibración. Posteriormente encontramos el factor sobre la resistencia que considera el diseño conservador y el suministro de elementos protegidos por capacidad. Por último, encontramos el factor de redundancia el cual hace referencia a la suficiencia de la estructura para reasignar fuerzas una vez falle un miembro particular.

**Análisis cronológico y espectral.** Teniendo como principal finalidad el calcular la eficacia de los aisladores como dispositivos de protección para el viaducto Portachuelo, se elaboró un prototipo de referencia similar al modelo calibrado, pero sin aisladores. A continuación, se ilustra las discrepancias entre el modelo calibrado y el modelo sin aisladores.

	Modelo sin aisladores		Modelo con aisladores	
	% participación de masa $U_x$	% participación de masa $U_y$	% participación de masa $U_x$	% participación de masa $U_y$
Modo 1	19%	0,6%	2,2%	79%
Modo 2	1%	1,6%	86%	2%
Modo 3	4%	14%	0,1%	0,1%
$U_x$ = Sentido longitudinal de la estructura general. $U_y$ = Sentido radial de la estructura general.				

**Figura 34. Características dinámicas del modelo calibrado y el modelo sin aisladores**

Fuente: Muñoz (2012).

Se evidencia que la edificación presenta mayor rigidez sin los aisladores, ya que el periodo fundamental disminuye por un agente cercano a cuatro (en términos de un estudio de un sistema de un grado de libertad semejante, la estructura sin aisladores es 14 veces más rígida que la

estructura real). También cabe resaltar que en el modelo sin aisladores la masa se dispersa en un rango más extenso de frecuencias.

**Conclusiones.** La calibración dinámica del diseño estructural, se elaboró desde la elección del modelo que expondrá una discrepancia porcentual inferior al 10%, entre su periodo fundamental y el obtenido empíricamente. En todos los diseños elaborados se hallaron discrepancias de periodos en la categoría especificada, lo cual señala que todos los modelos se aproximan al comportamiento dinámico real del viaducto.

El diseño en 3D elegido como modelo calibrado, es el más básico, ya que no incorpora la flexibilidad de la cimentación y personifica la superestructura de manera unifilar.

En este estudio en particular, las circunstancias de la estructura posibilitan una modelación como un método de un grado de libertad, que presenta resultados fidedignos como modelos estructurales específicos.

No obstante, estos últimos fueron esenciales en esta investigación, ya que en base a ellos se logró evaluar el coeficiente de respuesta y ejecutar los estudios cronológicos y espectrales.

Al momento de cotejar la respuesta lineal elástica del modelo real del viaducto Portachuelo y un modelo supuesto del mismo puente, pero con la ausencia de aisladores, se verificó que las fuerzas cortantes y momentos que se originan en las pilas y estribos son menores considerablemente en su magnitud en frente a los aisladores.

## 7. Conclusiones

Dada la investigación realizada sobre el tema, se puede concluir lo siguiente:

El tema de Confiabilidad Estructural es un tema de características estadísticas, donde mediante un modelo matemático, se debe generar un proceso de simulación, el cual, debe iterar una gran cantidad de veces para abarcar cualquier escenario posible, y con esto, disminuir el error. Con lo anterior, se puede extrapolar la información estadística y llevarla a un escenario determinístico para facilidad de aplicación en la ingeniería.

En el tema de Confiabilidad Estructural, las probabilidades calculadas son teóricas, y se debe utilizar en un sentido relativo para comparar diseños alternos. Esto se debe a la falta de información estadística de las propiedades de los materiales y esto genera mayor incertidumbre en la confiabilidad. Las incertidumbres son inherentes a los problemas de ingeniería y es inevitable no tener dispersión en los parámetros estructurales con relación a sus valores ideales.

La respuesta de los sistemas estructurales a veces puede ser muy sensible a las incertidumbres encontradas en las propiedades del material, la fabricación, las condiciones externas de carga, y al modelado analítico o numérico que se tenga.

Las soluciones analíticas siempre son de difícil y compleja solución, por lo que utilizarlas en problemas de la ingeniería civil es impensable. Por lo cual, el uso del método de la “Simulación de MonteCarlo”, es un camino más sencillo de encontrar soluciones aproximadas con gran precisión, pero se requiere de un sistema de cómputo de altas especificaciones para agilizar y disminuir el tiempo por simulación. Actualmente, las investigaciones están centrando sus esfuerzos en el estudio de metodologías que disminuyan o reduzcan el campo de convergencia en

el espacio numérico de las variables aleatorias.

Mediante la revisión bibliográfica de cada una de las investigaciones internacionales mencionadas anteriormente se puede concluir que actualmente se busca la optimización de los procesos de cálculo y rendimiento computacional asociados a la confiabilidad, esto en busca de mejorar y llevar a un nivel superior el conocimiento de las incertidumbres que pueden ocasionar fallas y deterioro en una estructura, lo cual es un aporte de gran relevancia para establecer márgenes o coeficientes de seguridad dentro de las normativas internacionales, esto hace notar la necesidad de desarrollar nuevas investigaciones en el campo de la confiabilidad estructural, ya que siguen existiendo muchas incógnitas por resolver y mejoras por realizar .

Se concluye que las investigaciones a nivel internacional de confiabilidad estructural realizadas en los últimos 5 años han sido enfocadas a determinar tiempos adecuados de inspección de los puentes para garantizar su correcto funcionamiento además de establecer el mantenimiento en función del objetivo dependiente del tiempo que se desee analizar para así poder garantizar su vida útil y así reducir la probabilidad de que ocurran problemas estructurales por falla o fatiga ocasionados por las diversas incertidumbres que se generan a lo largo de la vida útil, todo esto reduciendo los costos inesperados como consecuencia de estos problemas.

La investigación de este campo en Colombia no es de gran notoriedad, son pocos los estudiosos de esta área por lo que está abierta la puerta a futuras investigaciones que brinden un cambio a la forma como se diseña, determinan inspecciones, mantenimientos y costos a nivel nacional siendo todo lo anteriormente mencionado de gran aporte para la mejora de las normativas nacionales.



### Referencias Bibliográficas

- Aghababaei, M. & Mahsuli, M. (2018). Detailed seismic risk analysis of buildings using structural reliability methods. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 53(1), 23–38.
- Ali, O. (2017). Structural reliability of biaxial loaded Short/Slender-Square FRP-confined RC columns. *Construction and Building Materials*, 151(2), 370–382.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2012). *AASHTO LRFD Bridges: Design Specifications*. United States of America: AASHTO
- Ang, A. & Tang, W. (2007). *Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering*. Wiley. Recuperado de: <https://www.wiley.com/en-us/Probability+Concepts+in+Engineering%3A+Emphasis+on+Applications+to+Civil+and+Environmental+Engineering%2C+2e+Instructor+Site-p-9780471720645>
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (1995). Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes CCDSP-95. Bogotá: Asociacion Colombiana de Ingeniería Sísmica ACIS.
- Au, S. (2001). *On the solution of first excursion problems by simulation with applications to probabilistic seismic performance assessment*. Tesis doctoral. California Institute of Technology. Pasadena, California.
- Au, S. Ching, J., & Beck. J. (2007). Application of subset simulation methods to reliability benchmark problems. *Structural Safety*, 29(3), 183-193.
- Avellaneda, G. (2011). Desarrollo de un algoritmo computacional para la estimación de la tensión de cables en puentes atirantados con base en la medición experimental en laboratorio

y campo de sus modos y frecuencias naturales de vibración. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(3), 1-17.

Baez, D. (2007). *Matlab: Con aplicaciones a la Ingeniería, física y finanzas*. México: AlfaOmega.

Blockley, D. (1992). *Engineering safety*. Bristol: Mcgraw-Hil.

Bruce, E. (2000). LRFD: Implementing structural reliability in professional practice. *Engineering Structures*, 22(2), 106-115.

Cardoso, J., De Almeida, J., Dias, J. & Coelho, P. (2008). Stuctural Reliability analysis using Monte Carlo simulation and neural networks. *Advances in Engineering Software*, 39(6), 505-513.

Castaldo, P., Mancini, G. & Palazzo, B. (2018). Seismic reliability-based robustness assessment of three-dimensional reinforced concrete systems equipped with single-concave sliding devices. *Engineering Structures*, 163(2), 373–387.

Chen, J., Chen, Y., Peng, Y., Zhu, S., Beer, M. & Comerford, L. (2019). Stochastic harmonic function based wind field simulation and wind-induced reliability of super high-rise buildings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 133(1), 106-264.

Chevrolet. (s.f.). *Chevrolet Colombia*. Recuperado de:

[http://www.chevrolet.com.co/vehiculos/buses-camiones/showroom\\_camiones.html](http://www.chevrolet.com.co/vehiculos/buses-camiones/showroom_camiones.html)

Coronel, M. (2003). *Calibración Basada en Confiabilidad de la primera hipótesis de diseño de la norma tecnica E060*. Tesis de grado. Universidad de Piura. Piura, Perú.

- Crespo, C. & Casas, J. (1997). A comprehensive traffic load model for bridge safety checking. *Structural Safety*, 19(4), 339-359. Recuperado de:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167473097000167>
- Dammak, D. & El Hami, A. (2019.). Multi-objective reliability based design optimization of coupled acoustic-structural system. *Engineering Structures*, 197(2), 109-389.
- Das, D. & Conceição, C. (2019). Reliability-based Robust Design Optimization with the Reliability Index Approach applied to composite laminate structures. *Composite Structures*, 4(1), 844–855.
- Du, X. (2005). *Chapter 7: First Order and Second Reliability Methods, in Probabilistic Engineering Design*. Missouri: University of Missouri.
- Eldred, M. & Bichon, B. (2006). *Second-Order Reliability Formulations in DAKOTA/UQ*. Newport, Rhode Island: Structural Dynamics, and Materials Confere.
- Ellingwood, B. & Galambos, T. (1983). Probability-Based Load Criteria for Structural Desing. *Structural Safety*, 1(1), 1982–1983.
- Ellingwood, B. (1982). Probability based load criteria: load factors and combinations. *Journal of the Structural Division*, 4(108), 1-16.
- Ellingwood, B. (2000). LRFD: Implementing structural reliability in professional practice. *Engineering Structures*, 22(2), 106-115.
- Ellingwood, B., Macgregor, J., Galambos, T. & Allin, C. (1982). Probability based load criteria: load factors and combinations. *J. Structural Division*, 108(5), 1-15.

- European Committee for Standardisation. (2002). Basis of structural desing. *Load of Bridge*, 4(3), 1-15.
- Faber, M. (2001). *Methods of Structural Reliability theory - an Introduction: Lecture Notes on Risk and Reliability in Civil Engineering*. Zurich, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology.
- Faber, M. (2003). *Basic of Structural Reliability*. Zurich, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology ETH.
- Faber, M. (2009). Basics Of Structural Reliability. Zurich: Draft. Swiss Fed.
- Fischer, K., Viljoen, C., Köhler, J. & Faber, M. (2019). Optimal and acceptable reliabilities for structural design. *Structural Safety*, 76(2), 149–161.
- Freudenthal, A. (1956). Safety and the Probability of Structural Failure. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 121(1), 337-1375.
- Ghasemi, S. & Nowak, A. (2017). Target reliability for bridges with consideration of ultimate limit state. *Engineering Structures*, 152(1), 226–237.
- González, V., Botero, J., Rochel, R., Vidal, J. & Álvarez, M. (2005). Propiedades Mecanicas del Acero de refuerzo utilizado en Colombia. *Ingeniería y Ciencia*, 67(1), 67-76.  
<https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/view/504>
- Guo, T., Chen, Z., Liu, T. & Han, D. (2016). Time-dependent reliability of strengthened PSC box-girder bridge using phased and incremental static analyses. *Engineering Structures*, 117(2), 358–371.

Hadianfard, M., Malekpour, S. & Momeni, M. (2018). Reliability analysis of H-section steel columns under blast loading. *Structural Safety*, 75(2), 45–56.

Haldar, A. & Mahadevan, S. (2000). *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*. Mahadevan: John Wiley.

Hasofer, A. & Lind, N. (1973). *An Exact and Invariant First-order Reliability Format*. Solid Mechanics Division. Waterloo, Canadá: University of Waterloo.

Hasofer, A. & Lind, N. (1973). *An exact and invariant first-order reliability format*. Waterloo, Ont: Solid Mechanics Division.

Hosseini, P., Ghasemi, S., Jalayer, M. & Nowak, A. (2019). Performance-based reliability analysis of bridge pier subjected to vehicular collision: Extremity and failure. *Engineering Failure Analysis*, 106(1), 104-176.

Hurtado, J. (2004). *Structural Reliability, Statistical Learning Perspectives. Lecture notes in applied*. Germany: Springer.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1997). *NTC 2275. Ingeniería Civil y Arquitectura. Procedimiento recomendado para la evaluación de los resultados de los ensayos de resistencia de concreto*. Bogotá: ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2000). *NTC 4788-1. Tipología de vehículos de transporte terrestre*. Bogotá: ICONTEC.

Instituto Nacional de Vías. (2008). *Manual de Diseño Geométrico INV-2008*. Bogotá: INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (s.f.). *Volúmenes de tránsito 2008*. Recuperado de:

<http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq>

Insua, D., Insua, S., Martín, A. & Jiménez, J. (2008). *Simulación Métodos y aplicaciones*.

Andalucía: RA-MA S.A Editorial y Publicaciones.

Irvine, M. (1981). *Cable structures. Boston, Massachusetts*. United States of America: The

Massachusetts Institute of Technology.

Jaimes, G. (2003). *Analysis of Traffic Load Effects on Railway Bridges*. Estocolmo, Suecia:

Royal Institute of Technology.

Kala, Z. (2019). Global sensitivity analysis of reliability of structural bridge system. *Engineering*

*Structures*, 194(2), 36–45.

Kalos, M. & Whitlock, P. (2008). *Monte Carlo Methods*. Recuperado de:

<https://www.wiley.com/en-us/Monte+Carlo+Methods%2C+2nd+Edition-p-9783527407606>

Kim, S. & Frangopol, D. (2018). Decision making for probabilistic fatigue inspection planning

based on multi-objective optimization. *International Journal of Fatigue*, 111(2), 356-368.

Kim, S. & Wen, Y. (1987). *Reliability-based structural optimization under stochastic time*

*varying loads*. Tesis doctoral. University of Illinois at Urbana-Champaign. Champaign, IL,

Estados Unidos.

Kim, S. & Wen, Y. (1987). *Reliability-based structural optimization under stochastic time*

*varying loads*. Recuperado de: <https://www.ideals.illinois.edu/items/14157>

- Kusano, I., Baldomir, A., Jurado, J. & Hernández, S. (2018). The importance of correlation among flutter derivatives for the reliability based optimum design of suspension bridges. *Structural Engineering*, 173(1), 416–428.
- Lemaire, M., Chateauneuf, A. & Mitteau, J. (2009). Preliminary Approach to Reliability in Mechanics. *Structural Reliability*, 4(1), 1-15.
- Li, H. & Nie, X. (2018). Structural reliability analysis with fuzzy random variables using error principle. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 67(1), 91–99.
- Liu, W., Zhang, H. & Rasmussen, K. (2018). System reliability-based Direct Design Method for space frames with cold-formed steel hollow sections. *Engineering Structures*, 166(1), 79–92.
- Lotsberg, I., Sigurdsson, G., Fjeldstad, A. & Moan, T. (2016). Probabilistic methods for planning of inspection for fatigue cracks in offshore structures. *Marine Structure*, 46(1), 167–192.
- Mankar, A., Bayane, I., Sørensen, J. & Brühw, E. (2019). Probabilistic reliability framework for assessment of concrete fatigue of existing RC bridge deck slabs using data from monitoring. *Engineering Structures*, 201(2), 109-788.
- Marek, P (2001). Probabilistic assessment of structures using Monte Carlo Simulation: background, exercises and software. *Institut of Theoretical and Applied Mechanics*, 4(2), 1-15.
- Marek, P., Brozzetti, J., Gustar, M., & Tikalsky, P. (2003). *Probabilistic Assessment of Structures using MonteCarlo Simulation*. Recuperado de:  
<https://www.semanticscholar.org/paper/Probabilistic-assessment-of-structures-using-Monte-Marek-Brozzetti/f93415bc8aa5d899b7ea7271de2c6d71a3ccf9af#related-papers>

- Marques, F., Correia, J., De Jesús, M., Cunha, A., Caetano, E. & Fernández, A. (2018). Fatigue analysis of a railway bridge based on fracture mechanics and local modelling of riveted connections. *Engineering Failure Analysis*, 94(1), 121–144.
- Marquez, J. (2011). Variabilidad estadística de cargas vivas en edificios. *Ecomatematico*, 2(1), 27-33.
- Martínez, A. (2005). *Confiabilidad del puente Cáceres de Piura ante eventos del fenómeno del niño*. Tesis pregrado. Universidad de Piura. Piura, Perú.
- Melchers, R. (1999). *Structural Reliability Analysis and Prediction*. England: John Wiley and Sons.
- Miao, F. & Ghosn, M. (2017). Reliability-Based Dynamic Analysis of Progressive Collapse of Highway Bridges. *Procedia Engineering*, 199(4), 1170–1174.
- Moses, F. (2001). *NCHRP REPORT 454: Calibration of Load Factors LRFR Bridge Evaluation*. Washington: National Research Council.
- Muñoz, E. (2006). Confiabilidad estructural de un puente en acero apoyada en monitoreo e instrumentación. *Ingeniería y Universidad*, 10(1), 31-54.
- Muñoz, E. (2009). Vulnerabilidad sísmica y Capacidad de carga de un puente atirantado basados en confiabilidad estructural. *Ingeniería de Construcción*, 4(1), 1-15.
- Muñoz, E. (2012). *Ingeniería de puentes*. Bogotá: Gente Nueva.
- Nassar, M., Guizani, L., Nollet, M. & Tahan, A. (2019). A probability-based reliability assessment approach of seismic base-isolated bridges in cold regions. *Engineering Structures*,



197(1), 109-353.

National Cooperative Highway Research Program. (2001). *Calibration of Load Factors for LFRD Bridge Evaluation - Report 454*. Washington: NCHRP.

Neves, A., Gomes, S., Dias, S. & Fernández, P. (2019). Time-dependent reliability analyses of prestressed concrete girders strengthened with CFRP laminates. *Engineering Structures*, 196(2), 109-297.

Nordic Committee on Building Regulations. (1987). *Guidelines for loading and safety regulations for structural design*. Stockholm: NKB Committee and Works Reports, Report No. 55E.

Páez, D. (2007). *Diseño Simplificado de Puentes*. Bogotá: INVIAS.

Qin, J. (2018). Information-dependent seismic reliability assessment of bridge networks based on a correlation model. *Engineering Structures*, 176(2), 314–323.

Rashki, M. (2018). Hybrid control variates-based simulation method for structural reliability analysis of some problems with low failure probability. *Applied Mathematical Modelling*, 60(1), 220–234.

Reuven, Y. & Dirk, P. (2007). *Simulation and the Monte Carlo Method*. Nueva York: Wiley.

Ríos, D. (2009). *Simulación: Métodos y Aplicaciones*. México: AlfaOmega.

Rubinstein, R. & Kroese, D. (2008). *Simulation and the Monte Carlo Method*. Nueva York: Wiley.

- Sánchez, M. (2005). *Introducción a la Confiabilidad y Evaluación de Riesgos*. Bogotá: Ediciones Uniandes.
- Sánchez, M. (2010). *Introducción a la Confiabilidad y Evaluación de Riesgos*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Schöbi, R. & Sudret, B. (2017). Structural reliability analysis for p-boxes using multi-level meta-models. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 48(1), 27–38.
- Shoaei, P., Tahmasebi, H. & Zahrai, S. (2018). Seismic reliability-based design of inelastic base-isolated structures with lead-rubber bearing systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115(4), 589–605.
- Straub, D., Schneider, R., Bismut, E. & Kim, H. (2020). Reliability analysis of deteriorating structural systems. *Structural Safety*, 82(2), 101-877.
- Teixeira, F. & Junior, J. (2016). Methodology for assessing the probabilistic condition of an asset based in concepts of structural reliability ‘pCBM - Probabilistic Condition Based Maintenance. *Procedia Structural Integrity*, 1(2), 181–188.
- Truong, V. & Kim, S. (2017). An efficient method of system reliability analysis of steel cable-stayed bridges. *Advances in Engineering Software*, 114(1), 295–311.
- Uribe, F. (2012). *Implementation of simulation methods in structural reliability*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Vallecilla, C. (2004). *Curso de Puentes en Concreto*. Bogotá: Bauen.

- Wang, C., Zhang, H. & Li, Q. (2019). Moment-based evaluation of structural reliability. *Reliability Engineering & System Safety*, 181(1), 38-45.
- Whitney, C. (1956). Guide for Ultimate Strength Design of Reinforced Concrete. *Engineering Structures*, 53(1), 455-475.
- Wittfotht, H. (1975). *Puentes. Ejemplos internacionales*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Yuan, Y., Han, W., Li, G., Xie, Q. & Guo, Q. (2019). Time-dependent reliability assessment of existing concrete bridges including non-stationary vehicle load and resistance processes. *Engineering Structures*, 197(1), 109-426.
- Zanini, M. (2019). Structural reliability of bridges realized with reinforced concretes containing electric arc furnace slag aggregates. *Engineering Structures*, 188(2), 305–319.
- Zeng, Y., Botte, W. & Caspeepe, R. (2018). Reliability analysis of FRP strengthened RC beams considering compressive membrane action. *Construction and Building Materials*, 169(2), 473–488.
- Zhang, X. Shahnewaz, M. & Tannert, T. (2018). Seismic reliability analysis of a timber steel hybrid system. *Engineering Structures*, 167(2), 629–638.
- Zheng, K., Kaewunruen, S., Zhu, J., Heng, J. & Baniotopoulos, C. (2019). Dynamic Bayesian network-based system-level evaluation on fatigue reliability of orthotropic steel decks. *Engineering Failure Analysis*, 105(2), 1212–1228.
- Zhu, S. & Xu, J. (2019). An efficient approach for high-dimensional structural reliability analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 122(1), 152–170.