



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Introducción a la Resiliencia de Puentes en México

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Juan Carlos Primero Venegas

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Roberto Gómez Martínez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A Dios, a mi padres y familia, sin duda a mis maestros y amigos, sin olvidar a la UNAM.

Índice

PREFACIO	1
INTRODUCCIÓN	2
Capítulo 1 CONCEPTO DE RESILIENCIA	6
Capítulo 2 LOS PUENTES EN MÉXICO	9
2.1 Definición de puente.	9
2.2 Red de puentes de la República mexicana.	11
2.3 Riesgos de los puentes en México.	13
2.4 Objetivos e hipótesis.	20
Capítulo 3 FALLAS EN PUENTES	21
3.1 Definición de falla en puentes.	21
3.2 Escenarios de falla.	23
3.3 Redundancia.	32
Capítulo 4 RESILIENCIA EN PUENTES	33
4.1 Concepto de resiliencia en puentes.	33
4.2 Variables que intervienen en la resiliencia en puentes.	36
Capítulo 5 MODELOS DE EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA	39
5.1 Evaluación mediante la cuantificación física.	39
5.2 Evaluación mediante la probabilidad de falla.	53
5.3 Evaluación mediante la combinación de modelos de vulnerabilidad, pérdida y recuperación.	54
5.4 Evaluación mediante la funcionalidad o calidad.	57
Capítulo 6 EJEMPLO DE APLICACIÓN	65
6.1 Características del puente en estudio.	65
6.2 Aplicación del método.	70
6.3 Comentarios a los resultados del método de evaluación de la resiliencia aplicado a un puente.	77
Capítulo 7 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	79
Literatura citada.	81

Lista de Figuras

Figura	Título	Página
1.1	Origen de la resiliencia elástica de una curva de tensión-deformación.	6
1.2	Comparación de graficas esfuerzo deformación de materiales resilientes.	7
2.1	Ubicación geográfica del Puente Rodolfo Robles.	10
2.2	Puente Internacional Rodolfo Robles, sobre el río Suchiate.	11
2.3	Distribución geográfica de puentes de acuerdo a ([RNC], 2019).	12
3.1	Sección de diagrama del árbol, de la falla de la superestructura de un puente compuesta por vigas de acero.	24
3.2	Parte del diagrama de árbol, de la falla de puentes de vigas de acero, muestra solo la categoría de diseño/operación.	24
3.3	Parte del diagrama de árbol de falla de puentes de vigas de acero. Solo muestra, la categoría de inspección y tres eventos básicos.	25
3.4	En esta parte del diagrama de falla de puentes de vigas de acero, muestra la categoría de construcción y varios eventos básicos.	26
3.5	Parte del diagrama de falla de puentes de vigas de acero, muestra la categoría de fabricación de la superestructura y cuatro eventos básicos.	27
3.6	Parte del diagrama de falla de la subestructura general, con las categorías de subestructura de concreto, de acero y subestructura en general, con varios eventos básicos.	28
3.7	Puente Tuzantla I. A la izquierda, en las dos primeras imágenes, se observa el puente dañado por la depresión y a la derecha, el puente rehabilitado.	29
3.8	Puente Coyuca de Benítez, dañado después del paso de los eventos meteorológicos Ingrid y Manuel.	30
3.9	Puente Coyuca de Benítez, rehabilitado y en funcionamiento.	30
3.10	Puente colapsado tramo 109+000 de la carretera Cuernavaca-Acapulco (La Razón Online, 2017).	31
5.1	Componentes del modelo de evaluación de riesgo de un puente. Tomada de (Ikpong, 2016).	49
5.2	Curvas de funcionalidad (a) Comunidad medianamente preparada, (b) Comunidad mal preparada, (c) Comunidad bien preparada.	56
5.3	Representación esquemática del concepto de resiliencia.	57
5.4	Representación del concepto de resiliencia en 3D.	58

Figura	Titulo	Pagina
5.5	Probabilidad que la respuesta exceda el espacio límite, diferente secuencia de estados límite.	59
5.6	Curva de resiliencia estructural ante sismo, si la estructura se deja sin reparar.	59
5.7	Definición de resiliencia.	60
5.8	Modelo de restauración.	62
6.1	Ubicación del Puente Cuerpo C.	66
6.2	Figura esquemática (corte y elevación) del proyecto PUENTE RÍO LERMA KM 7+650, CUERPO C.	68
6.3	Figura esquemática (sección transversal) del proyecto PUENTE RÍO LERMA KM 7+650 CUERPO C.	69
6.4	Coefficiente de Aceleración Espectral (S_{D1}).	71

Lista de Tablas

Tabla	Título	Página
2.1	Clasificación de puentes por el tipo de material de construcción.	12
2.2	Clasificación de los puentes por su longitud.	12
2.3	Eventos climáticos más frecuentes en México.	15
2.4	Escala Saffir-Simpson.	16
2.5	Programa Nacional de Conservación de Carreteras (puentes) 2020.	20
4.1	Propiedades de la resiliencia.	37
5.1	Valores sugeridos de riesgo (H).	40
5.2	Valores sugeridos de vulnerabilidad (V).	41
5.3	Factores de incertidumbre (UF).	41
5.4	Factor de importancia del puente (I).	42
5.5	Categorías de diseño sísmico AASHTO.	43
5.6	Tiempos básicos de restauración (t_{res}).	44
5.7	Factor de ajuste basado en las prácticas de administración ante eventos extremos de las agencias (α_1).	44
5.8	Factor de ajuste basado en la historia de eventos extremos en los pasados 12 meses (α_2).	45
5.9	Factor de ajuste basado en el tipo de puente (α_b).	45
5.10	Asociación de los indicadores de resiliencia con las medidas de capacidad.	51
6.1	Coeficientes sísmicos para el sitio de ubicación del puente en estudio.	71
6.2	Indicadores de peligro para el sitio de ubicación del puente en estudio.	74

PREFACIO

Existe una frase “Todos los caminos conducen a Roma”. El intrincado sistema de comunicación de esta ciudad se extendía desde África Oriental a los bosques de Germania, desde la Península Ibérica hasta el Cáucaso y desde Inglaterra al Golfo Pérsico, el objetivo era principalmente militar, administrativo y de comercio. Esta frase recuerda que al igual que para el antiguo imperio romano, los sistemas de comunicación terrestre actualmente permiten el comercio de bienes y servicios, el turismo, el desarrollo de las comunidades y como resultado de todo esto el desarrollo de una nación. En México se cuenta con una longitud carretera total de 750, 691 km Red Nacional de Caminos [RNC]. (2019). La interrupción del sistema carretero tiene impactos directos e indirectos en los campos técnico, económico y social. La interrupción más grave es la debida al colapso total o parcial de un puente que significa la pérdida económica directa que es el mismo puente y que es considerable, al igual que las pérdidas indirectas. Evaluar la interrupción debida a un evento extremo, reducir las consecuencias si este llegase a presentarse así como el tiempo y nivel de recuperación del puente es de vital importancia. La resiliencia del puente, permite evaluar estas características, tomando en cuenta, no solo las condiciones más desfavorables estructuralmente hablando, sino también, las condiciones existentes, como lo son la socavación y corrosión. El concepto de resiliencia se puede aplicar a proyectos de puentes nuevos, al igual que a los que ya se encuentran en funcionamiento.

En este trabajo se expone una introducción al concepto de resiliencia en puentes, que es una base para realizar adaptaciones al desarrollo, la aplicación y explotación de los beneficios de la implementación de este concepto. Se proporciona una introducción a los enfoques y tendencias en la evaluación de la resiliencia aplicada a los puentes. Se describe brevemente el contexto, los escenarios y potenciales causas de falla.

Incluyendo un ejemplo de aplicación que permite visualizar los beneficios y retos de la aplicación del concepto de resiliencia a los puentes de la red carretera nacional.

INTRODUCCIÓN

Los puentes son estructuras que se diseñan a partir de la necesidad de reducir trayectos, salvar claros sobre un cuerpo de agua de distinta envergadura y permitir el tránsito para el comercio de mercancías, también al de personas debido al turismo o negocios y de las muy variadas necesidades de una nación. Los puentes son elementos del sistema carretero, el cual es un modo de transporte terrestre que a su vez alimenta a otros modos de transporte, como lo son el marítimo, aéreo y ferroviario. Los puentes son estructuras de relevancia debido al monto de su inversión y la falla de estas representa una pérdida económica directa del presupuesto público destinado a su diseño, construcción y mantenimiento. Las pérdidas directas no solo se restringen al aspecto económico, se pueden perder vidas de los usuarios al momento del colapso. Al ser un elemento que no es aislado, sino que interactúa con el sistema del que forma parte, la red carretera, se producen pérdidas indirectas debidas al retraso e interrupción de actividades. Los puentes son de importancia en las labores de recuperación (respuesta) de las comunidades ante eventos extremos, al permitir el acceso a los servicios de emergencia.

La vida útil de los puentes varía de 30 a 100 años. Sufren deterioro por el uso y el transcurso del tiempo. Se ven expuestos a fenómenos naturales: lluvias, vientos, sismos, nieve, ciclones, los cuales pueden desarrollarse de una manera extrema, como las inundaciones debidas a avenidas extremas. Si bien estas tienen poca probabilidad de ocurrencia con periodos de retorno (intervalos de recurrencia) de 100 años o más, se han presentado estas avenidas extremas y han puesto en riesgo las estructuras o bien han rebasado su capacidad llevándolas al colapso. Al encontrarse la República Mexicana en una zona de alta actividad sísmica, los puentes están constantemente expuestos a estos eventos extremos de sismo de alta intensidad y poca duración que pueden tener grandes repercusiones desfavorables en su estructura. Los vientos tienen un gran impacto en el comportamiento de puentes, en especial los puentes atirantados y colgantes al inducir fuerzas aerostáticas y aerodinámicas en el puente, que causan inestabilidad y vibraciones. Los riesgos por el cambio climático, que producen el aumento del nivel del mar al derretirse los glaciares, se reflejan en una mayor intensidad de las precipitaciones, el aumento de los valores extremos en la temperatura en zonas árticas, y el derretimiento del permafrost (capa del suelo permanente congelada) que altera las cimentaciones de las estructuras.

A todas estas solicitaciones, a las que se ve expuesta una estructura de puente, se le incorporan el rápido crecimiento de la población en zonas urbanas, lo que en ocasiones llega a reducir la sección hidráulica en los cruces del puente con el cuerpo de agua; además, las presiones políticas y sociales que se ven reflejadas en variaciones en las características del diseño y la magnitud de la carga viva. Otro factor que influye en la carga viva es el desarrollo de nuevos tracto-camiones con mayor capacidad de carga y la mayor cantidad de ellos que circula por las redes carreteras.

Actualmente se invierten considerables montos de recursos para restablecer el sistema de red carretero después de eventos extremos. Por ejemplo, en marzo de 2009, se produjeron inundaciones en el noroeste de Queensland y en Mackay, Australia, que costaron a los gobiernos estatales y locales aproximadamente \$ 234 millones de dólares en daños a la infraestructura (Office of Climate Change, 2010). El 29 de agosto de 2005 el huracán Katrina tocó tierra y dio una perspectiva y evidencia del impacto de los huracanes y tormentas en el comportamiento de puentes y la red de transporte; cerca de 45 puentes fueron dañados considerablemente en los estados de Alabama, Luisiana y Mississippi (Padgett et al., 2008). El costo total de reparación se estimó mayor a 1 billón de dólares, basado en los reportes de inspección del daño y estimaciones de oferta de los costos de reparación (TCLEE, 2006 en Padgett et al., 2008).

Después de eventos extremos como lo son los atentados contra el World Trade Center de EU (2001), el huracán Katrina (2005) y Sandy (2012) en Estados Unidos y las inundaciones en Queensland Australia (2009), se ponen de manifiesto las repercusiones que se pueden presentar en la infraestructura, incluyendo el sistema carretero. El panorama para el futuro es incierto, existen predicciones de los efectos del cambio climático que revelan la necesidad de fortalecer la resiliencia ante el cambio climático (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2019).

De esta forma, los conceptos de vulnerabilidad, riesgo, sustentabilidad y recuperación, toman interés para su desarrollo en la ingeniería. Para poder evaluar la capacidad de soportar eventos extremos, recuperarse ante ellos y disminuir las consecuencias negativas, el concepto de resiliencia toma especial relevancia. Existen varias definiciones del concepto de resiliencia, una de las más conocidas es la proporcionada por Bruneau et al. (2006) que la define como la habilidad de las unidades sociales para mitigar riesgos, contener efectos de los desastres y cuando estos ocurren llevar a cabo actividades de recuperación para minimizar la interrupción de las actividades cotidianas y mitigar los efectos de futuros desastres.

Se describe en este trabajo, la importancia de la evaluación de la resiliencia, como propiedad intrínseca de la estructura de un puente, como una herramienta en la ayuda de toma de decisiones y en la administración de proyectos de rehabilitación de puentes en un inventario. También se presenta el uso de la resiliencia en la medida de la probabilidad de falla de la estructura del puente, en la capacidad de soportar un evento de riesgo sin pérdida de su funcionalidad, recuperar su funcionalidad en el menor tiempo posible y reducir las consecuencias de este.

El concepto de resiliencia se puede aplicar a nivel de sistema (red carretera) y de subsistema (estructura de puente), también es posible aislar el evento ante el cual se desea analizar la resiliencia, como calcular la resiliencia sísmica, o la resiliencia ante un evento extremo de socavación por inundación.

Existen diversos enfoques que permiten la evaluación de la resiliencia por lo que se presenta una introducción a los métodos más usuales para su evaluación. Algunos métodos usan funciones de la probabilidad de respuesta del comportamiento estructural del puente en función de una medida de intensidad para predecir la probabilidad de falla y la relacionan con la resiliencia de forma que entre menor sea la probabilidad de falla más resiliente es la estructura. Otros métodos usan modelos de pérdida con base en curvas de fragilidad que permiten establecer los estados de daño y con ello la pérdida esperada de la funcionalidad o comportamiento, asociada a cada estado de daño. Otros recurren a encuestas hechas a expertos, y algunos más proponen tablas en función del riesgo de la estructura debido a su ubicación, todos con el objetivo de evaluar la pérdida de funcionalidad esperada debido a un evento extremo (algunos también toman en cuenta el deterioro con el tiempo y cómo afecta en la ocurrencia de un evento extremo durante la vida útil de la estructura) los cuales se combinan con modelos de recuperación que se incluyen con base en el enfoque inicial de cada método. Se obtiene el modelo de funcionalidad o comportamiento completo, considerando la ocurrencia del evento extremo y la pérdida de funcionalidad asociada a este, su recuperación con el tiempo a través de actividades de rehabilitación hasta un nivel de funcionalidad objetivo que puede ser mayor o menor a la anterior, al evento extremo. La resiliencia se obtiene como la integral del modelo de funcionalidad o comportamiento con respecto del tiempo, para un periodo de tiempo horizonte definido y en algunos otros modelos a través de los indicadores de resiliencia considerados.

La mayoría de los métodos para la evaluación de la resiliencia, están fundamentados en modelos matemáticos bien desarrollados y estudiados, pero se concluye que aún están incompletos, debido a la falta de su desarrollo para que sea posible adaptarlos a la aplicación práctica. Continúan las

investigaciones y propuestas para el desarrollo de un enfoque unificado, que permita explotar todos los beneficios de aplicar el concepto de resiliencia a las estructuras de puentes.

En este trabajo se presenta la introducción del concepto de resiliencia en puentes y los métodos de evaluación de este, para realizar investigaciones posteriores que permitan desarrollar y adaptar las formas de evaluación y el concepto de resiliencia a los puentes de la red carretera nacional.

Al final del trabajo se presenta un ejemplo ilustrativo que permite visualizar los beneficios y retos de la implementación del concepto de resiliencia al igual que sus alcances y limitaciones, siendo este un primer acercamiento a la evaluación de la resiliencia de los puentes en México.

Capítulo 1 CONCEPTO DE RESILIENCIA

El concepto de resiliencia tiene una amplia variedad de definiciones y ha sido empleado en varias áreas del conocimiento, psicología, biología y en la ingeniería, por mencionar algunas.

En psicología, hace referencia a la capacidad de adaptarse ante una adversidad, trauma, tragedia o amenaza (American Psychological Association, 2020).

En biología, es la capacidad de adaptación de un ser vivo o ecosistema, frente a un agente perturbador y a un estado o situación adversos (Hauge et al., 2016).

La resiliencia, de acuerdo con el diccionario de la Real Academia Española [RAE] (2020), se define desde el enfoque de la mecánica de materiales como la “Capacidad de un material, mecanismo o sistema, para recuperar su estado inicial, cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometido”, este enfoque es de interés para la ingeniería, al aplicar este concepto en puentes.

La propiedad de los materiales que les permite volver a su estado original, es la energía de deformación por unidad de volumen. Relacionado al concepto de resiliencia se tiene el módulo de resiliencia, que es la máxima energía absorbida cuando se aplica una carga, (Brush Wellman Inc., 2010). En la figura 1.1 se muestra la curva esfuerzo-deformación y el área, bajo el rango elástico.

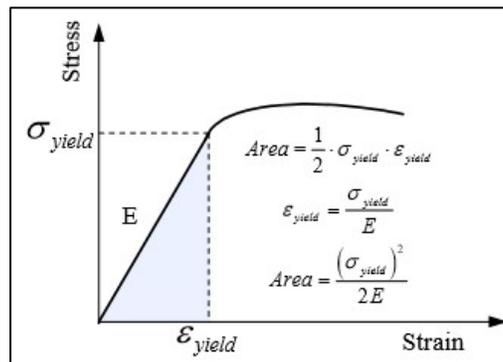


Figura 1.1 Origen de la resiliencia elástica de una curva de tensión-deformación (Brush Wellman Inc., 2010).

Existe la prueba de la resiliencia en los materiales que mide la máxima energía que puede absorber el material dentro del rango elástico lineal, sin considerar las deformaciones permanentes. En la figura 1.2 se muestra este rango y su comparación esquemática. La unidad de medida de la resiliencia, en los materiales es el $J \cdot m^3$ (joule por metro cúbico) en el sistema internacional (SI) que

es equivalente a la energía de deformación elástica por el volumen del espécimen de prueba (Tecnología, 2019).



Figura 1.2 Comparación de graficas esfuerzo deformación de materiales resilientes (Tecnología, 2019).

En la industria de la construcción, la resiliencia ante los eventos extremos en las ciudades, se ha tomado como un enfoque de diseño en la construcción que va de la mano del concepto del diseño sustentable. El diseño resiliente se define como el diseño intencional de construcciones, paisajes, comunidades y regiones en respuesta a su vulnerabilidad ante desastres o interrupción de su vida normal. Se propone el diseño resiliente en edificios de uso comercial, uso residencial y los que contribuyen a los servicios de la comunidad como hospitales, centrales eléctricas, bomberos, carreteras, por mencionar algunos. En el diseño resiliente se considera la durabilidad y la capacidad para soportar el uso rutinario de las construcciones; este es un punto de conexión con el desarrollo sustentable, ya que este implica literalmente soportar. Así bien, las llamadas construcciones o productos verdes, los cuales no soportan la prueba del tiempo, no son sustentables en realidad (Fehrenbacher, 2013).

En el ámbito de la ingeniería podemos encontrar variadas definiciones, como la que propone la Federal Highway Administration [FHWA] (2014), del Departamento de Transporte de EUA, la cual define a la resiliencia como “la capacidad de anticipar, prepararse y adaptarse a las condiciones cambiantes y resistir, responder y recuperarse rápidamente de las interrupciones”.

Con base en las definiciones anteriores se comprende que la resiliencia es un término muy flexible en su implementación y útil en muy variados campos, los cuales van desde las ciencias sociales a las ingenierías. Este concepto incluye el análisis en la capacidad de preparación, soportar y recuperarse de un material, estructura o psique ante un evento extremo.

Sin duda alguna el concepto de resiliencia es perfectamente aplicable a las estructuras; en el presente trabajo se aborda su aplicación a las estructuras de puentes, para poder aprovechar y explotar todos los beneficios de este concepto, ya que se adapta a las necesidades del actual panorama de desarrollo de la infraestructura de puentes en el país, considerando las características sustentables, de resistencia, durabilidad, prevención e impacto estratégico en la sociedad.

Capítulo 2 LOS PUENTES EN MÉXICO

2.1 Definición de puente.

Para definir adecuadamente el ámbito en el que se desenvuelve el presente trabajo se hará uso de la normativa para la infraestructura del transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT] (2019) en su norma N*PRY*CAR*6*01*001/01: en la cual N hace referencia a Normativa; PRY al libro que corresponde, en este caso es el libro de Proyecto; CAR al tema que es de Carreteras; 6 a la parte 6 que corresponde a Proyecto de Puentes y Estructuras; 01 es el título, para este caso Proyectos de Nuevos Puentes y Estructuras Similares y 001 que es la Ejecución de Proyectos de Nuevos Puentes y Estructuras Similares. En esta norma se encuentra la definición de puente y la clasificación según su propósito y ubicación. Se toma como base esta Normativa de la SCT, puesto que es una dependencia oficial, y las definiciones y términos descritos son de uso generalizado y aprobado en el país.

Puente.

Se define un puente como, “Estructura con longitud mayor a 6 metros, que se construye sobre corrientes o cuerpos de agua y cuyas dimensiones quedan definidas por razones hidráulicas”. Esta definición se encuentra en el inciso B1, el cual es parte del apartado B que corresponde al inciso de Definición y Clasificación.

Es importante hacer esta distinción, ya que la valoración de los riesgos de la estructura de un puente puede variar de una estructura a otra, así como también los impactos ambientales y sociales. Tal es el caso de estructuras similares como la de Viaducto, el cual es una estructura que se construye sobre barrancas, zonas urbanas u otros obstáculos y cuyas dimensiones quedan definidas por razones geométricas, dependiendo principalmente de la rasante de la vialidad y del tipo de obstáculo que cruce. Otro tipo de estructuras son: Paso Superior Vehicular (PSV), Paso Inferior Vehicular (PIV), Paso Superior de Ferrocarril (PSF), Paso Inferior de Ferrocarril (PIF) Paso Inferior Peatonal (PIP), Paso Inferior Ganadero (PIG), Puente canal y Puente ducto. Estas definiciones se encuentran en la misma norma.

Dentro de las principales diferencias con respecto a las otras estructuras, se tiene que un puente tiene dimensiones mínimas que se construye sobre cuerpos de aguas a diferencia de los “Pasos” los cuales se construyen sobre carreteras o vialidades. Estos pueden ser más susceptibles a choque por autos en su subestructura, a diferencia de los puentes que en su caso podrían ser embarcaciones.

Un muy buen ejemplo es el Puente Internacional Dr. Rodolfo Robles que une a Guatemala con Ciudad Hidalgo en el estado de Chiapas, el cual cruza sobre un cuerpo de agua, el río Suchiate, y tiene un claro mayor a 6 m. Este puente permite el tránsito de autos, peatones y el ferrocarril.

El puente descrito cumple con las características de la definición descrita en la normativa, y es un muy buen ejemplo, ya que muestra que este puede ser transitado al igual, por autos como otros medios de transporte y ser utilizado también como puente peatonal.

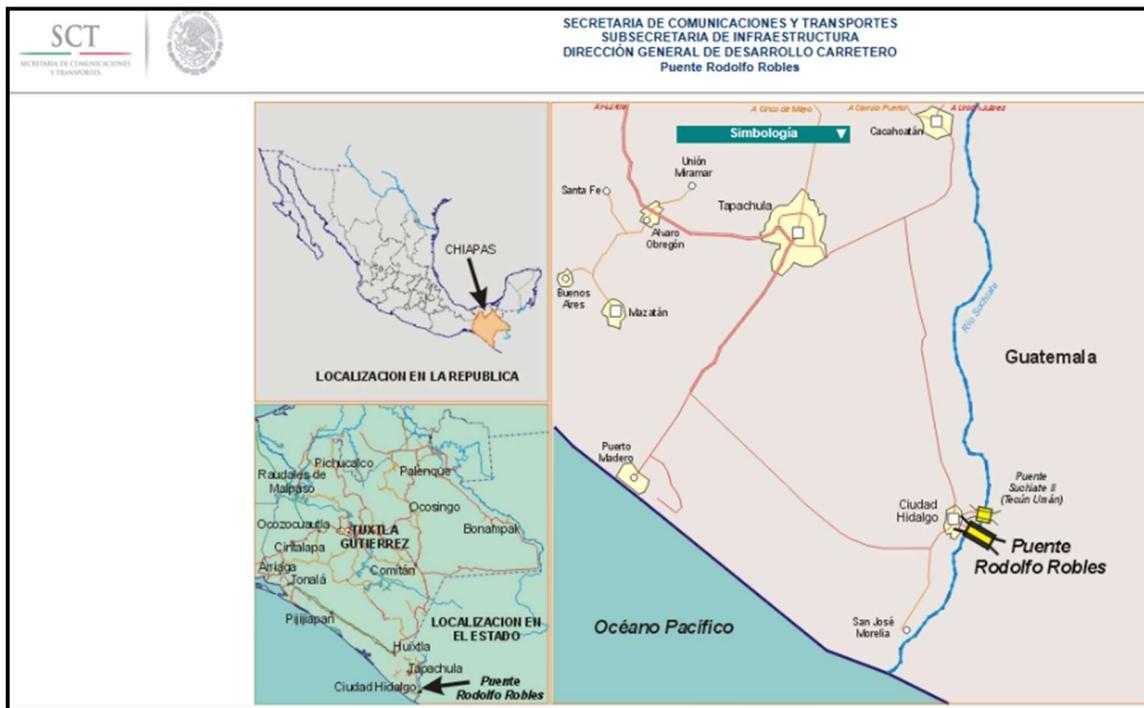


Figura 2.1 Ubicación geográfica del Puente Rodolfo Robles ([SCT], 2019).

En la figura 2.1, se ilustra la ubicación del puente mencionado y la zona a la que permite el tránsito y su conexión con el resto de la región, dando una perspectiva de su importancia y el impacto en las comunidades cercanas y al país. La figura 2.2 presenta a la izquierda una foto del puente, en la cual se observan vías de tren, la calzada y el paso peatonal el cual ha sido techado debido al flujo de

personas a través de esta importante conexión con Guatemala, como lo muestra la foto a la derecha de la misma figura, la imagen es del año 2018.



Figura 2.2 Puente Internacional Rodolfo Robles, sobre el río Suchiate (GETTY IMAGENES , 2018).

Puentes especiales.

Existe también la norma M*PRY*CAR*6*01*008/004 ([SCT], 2019). En esta se define el capítulo de “Consideraciones para Puentes Especiales y Estructuras Similares”. Se presenta a continuación lo más relevante de esta norma que atañe al tema tratado en este trabajo.

Los puentes especiales son puentes y estructuras cuya estructuración es diferente a la común y que consiste en superestructuras de tramos libremente apoyados o continuos, colados en sitio o prefabricados, de concreto reforzado o presforzado y/o de vigas metálicas. Estos puentes se clasifican en: puentes construidos en voladizo, puentes empujados y estructuras complementarias, puentes atirantados, y puentes en arco. Las características y consideraciones generales se encuentran en la norma referida.

2.2 Red de puentes de la República mexicana.

¿Cuántos y dónde? Al visualizar el número y distribución geográfica de los puentes, se observa una perspectiva de la importancia de los mismos en la red de transporte terrestre, y en la interconexión de las comunidades.

La Red Nacional de Caminos [RNC] (2019), tiene una representación cartográfica en formato digital y georreferenciada de la infraestructura vial del país, con alta precisión y escala de gran detalle. Esta es producto de un trabajo de colaboración de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) ([RNC], 2019). Con esta se puede obtener el número de puentes hay en el país, su

distribución geográfica a lo largo y ancho de la República Mexicana. El visualizador geocartográfico de la RNC, se muestra en la figura 2.3 y cada punto amarillo representa un puente.



Figura 2.3 Distribución geográfica de puentes de acuerdo con la ([RNC], 2019).

Existen en total 13,692 puentes, de los cuales se cuenta con información de sus características para 13,367, de estos se pueden obtener las clasificaciones de referencia presentadas en la Tabla 2.1 y Tabla 2.2 en función de su material de construcción y longitud ([RNC], 2019).

Tabla 2.1 Clasificación de puentes por el tipo de material de construcción.

Tipo de material	Número de puentes
Concreto	12,442
Metal	758
Madera	16
N/D (sin descripción de material)	151
Suma Total de puentes	13, 367

Nota. Fuente: Datos tomados del visualizador de la Red Nacional de Caminos ([RNC], 2019).

Tabla 2.2 Clasificación de los puentes por su longitud.

Tipo (Longitud)	Número de puentes
Grande (más de 100 m)	1,067
Mediano (31 – 100 m)	2,680
Chico (6 – 30 m)	9,620
Suma total de puentes	13, 367

Nota. Fuente: Datos tomados del Visualizador de la Red Nacional de Caminos ([RNC], 2019).

De los datos anteriores se infiere que la gran mayoría de puentes en México son de concreto y cortos en longitud. En la referencia se puede obtener información detallada de cada puente, como su ubicación y nombre y demás detalles.

En 1993 la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) de la SCT instrumentó un sistema de administración de puentes, denominado Sistema Integral de Puentes Mexicanos (SIPUMEX) ([SCT] y [IMT], 2010). SIPUMEX es una base de datos que tiene la información concentrada de más de 6,500 puentes de la red federal a su cargo, se incluyen datos sobre la estructura, características geométricas, ubicación con coordenadas geográficas, material, tipo de estructura y fecha de construcción. En 2014 se tenía un inventario detallado de 8, 493 puentes (Dirección General de Servicios Técnicos [DGST], 2014). Actualmente la DGCC tiene a su cargo a 9,167 puentes ([DGCC], 2019).

El inventario mencionado tiene el propósito de facilitar la administración de los puentes en las distintas actividades que esto involucra. Si bien, este sistema no contiene información de todos los puentes existentes en la red carretera nacional, si es un inventario muy completo y de importancia para la evaluación de los puentes en México.

La información proporcionada por SCT-IMT-INEGI y el sistema SIPUMEX permite valorar la importancia de los puentes en el sistema carretero, su cantidad, su distribución espacial y el contexto en el que se aplicará el concepto de resiliencia a estas estructuras.

Además, se tiene a Carreteras y Puentes Federales (CAPUFE), como dependencia responsable de sistemas de carreteras, puentes y túneles de cuota, de altas especificaciones. Dentro de la red operada, tiene a su cargo 16 puentes nacionales, 12 internacionales en la red propia, la red del Fondo Nacional de Infraestructura (FNI), un puente nacional y dos internacionales, dando un total de 31 puentes (CAPUFE, 2019).

2.3 Riesgos de los puentes en México.

Riesgo es el potencial resultado no deseado debido a un evento que está determinado por el producto de: a) la probabilidad del impacto y b) la consecuencia del impacto (Federal Highway Administration [FHWA], 2016).

Un ***análisis de riesgo***, involucra la identificación de los posibles eventos extremos que pueden ocurrir en el sitio de ubicación del puente, y en la región climática de ubicación del mismo (Ikpong,

2016). Estos posibles eventos extremos están íntimamente relacionados al concepto y evaluación de la resiliencia de las estructuras de un puente, ya que a estos se ven expuestos durante su vida útil.

La República Mexicana se encuentra dentro de la zona subecuatorial, tropical y subtropical del hemisferio norte. Estos son factores muy importantes en el régimen de vientos y de precipitaciones. Se presentan al norte climas cálidos y semicálidos; las regiones situadas al sur carecen de verdadero invierno, mientras las que quedan al norte tienen ya una estación fría bien marcada con posibilidad de nevadas.

Puesto que la mayor parte del país está situada al sur del paralelo 30°, los vientos dominantes son los de NE también conocidos como vientos alisios. Y así, casi sin transición, se pasa de climas húmedos a climas esteparios y aun desérticos.

El territorio mexicano se ve afectado por ciclones tropicales formados en el Pacífico, en el Golfo de México y en el Mar Caribe por el lado del Océano Atlántico. Prácticamente todos los estados costeros son vulnerables a estos eventos, pero existe mayor probabilidad de que un ciclón tropical penetre al territorio por Baja California Sur, Sinaloa, Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Jalisco, principalmente durante los meses de septiembre y octubre. Por el lado del Golfo de México y el Mar Caribe, los estados más afectados por estos fenómenos meteorológicos son Quintana Roo, Veracruz y Tamaulipas, principalmente durante los meses de agosto, septiembre y octubre.

Debido a la singular situación geográfica de la República Mexicana, las estructuras de puentes existentes en el país están expuestas a una gran variedad de riesgos, debidos a eventos extremos como los ciclones tropicales, tormentas intensas, ondas frías y el cambio climático.

México ocupó el lugar 44, en el nivel de vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos, de acuerdo con el análisis de realizado por Germanwatch que es una organización no gubernamental alemana que analiza el cambio climático. Para el periodo (1996-2015) este lugar representa una pérdida anual de 3,051.6 millones de dólares (USD), 0.19% del PIB ([SCT] y [IMT], 2017), al hacer uso de la base de datos del sistema de inventario de efectos de desastres (DesInventar), el cual es un sistema de adquisición, consulta y despliegue de información sobre desastres (DesInventar, 2020). Considerando los eventos que provocaron daños a la infraestructura terrestre, el IMT generó la tabla 2.3 con los eventos más recurrentes ([SCT] y [IMT], 2017).

Tabla 2.3 *Eventos climáticos más frecuentes en México.*

No.	Evento	Cantidad de eventos registrados entre 1970 y 2013, relacionados al transporte.
1	Inundación	518
2	Deslizamiento	380
3	Lluvias	277
4	Vendaval	237
5	Tempestad	234

Nota. Fuente: El clima y las carreteras en México (IMT) publicación técnica No. 489 (2017) ([SCT] y [IMT], 2017).

En la tabla 2.3 se puede observar que el evento con mayor incidencia es el de inundación, en la tabla no aparecen como relevantes las nevadas, pero eso no quiere decir que no se presenten y tengan repercusiones en la infraestructura terrestre.

Haciendo un inventario del impacto de los fenómenos climáticos en México, para el intervalo de tiempo de 1970 a 2013, con datos de DesInventar analizados por la SCT y IMT (2017), del registro de impactos de fenómenos climáticos en México y al tomar en cuenta solo los que han producido daños en puentes, se tiene:

Avenida torrencial. – Con 54 eventos en el periodo analizado, debido al arrastre de los ríos, se destruyeron 28 puentes vehiculares y 1 puente de madera.

Inundación. – Con 518 eventos para el periodo analizado, debido a las fuertes lluvias y desbordamiento de ríos, provocaron que 737 puentes vehiculares y 7 puentes peatonales fueran destruidos.

Lluvias. – Con 277 eventos en el periodo analizado, debido a las crecientes de ríos, 98 puentes vehiculares y 6 puentes colgantes fueron derrumbados o destruidos.

Tempestad. – Con 234 eventos para el periodo analizado, dio por resultado que 33 puentes vehiculares, 7 puentes colgantes y 2 puentes peatonales fueran derrumbados o destruidos por la creciente del agua, debido a las lluvias.

Nevada. – Con 228 eventos en el periodo analizado, 1 puente fue destruido por derretimiento de nieve y 7 cerrados por congelamiento.

Estos eventos climáticos provocan acciones que afectan a los puentes, como las que se presentan, a continuación:

Vientos

Son provocados por eventos extremos como los ciclones, tormentas intensas e incluso ondas frías. Los ciclones se clasifican según la escala Saffir-Simpson de acuerdo con la intensidad de los vientos sostenidos, presentada en tabla 2.4.

Los efectos del viento en estructuras de puentes pueden ser más evidentes e intensos, en puentes cuya superestructuras están formadas por trabes continuas de acero con grandes claros; debido a su flexibilidad se tienen deformaciones excesivas, causadas posiblemente por la amplificación dinámica o por vibraciones en torsión, ya que el puente es un obstáculo en el que, al chocar el aire ejerce una presión sobre él, mientras trata de rodearlo para seguir su trayectoria provocando zonas de succión.

Tabla 2.4 *Escala Saffir-Simpson.*

Categoría	Velocidad km/h	Tipo de daño debido a los vientos de los huracanes
Huracán 1	119-153	Vientos muy peligrosos que producirán algún daño
Huracán 2	154-177	Vientos extremadamente peligrosos, que causaran daños extensos.
Huracán 3	178-208	Se producirá un daño devastador.
Huracán 4	209-251	Podría ocurrir un daño catastrófico.
Huracán 5	≥252	Ocurrirá un daño catastrófico.

Nota. Fuente: (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2019).

Sismos

México se encuentra en una de las regiones sísmicas más activas del mundo, sobre 5 placas tectónicas las cuales son Caribe, Pacífico, Norteamericana, Rivera y Cocos, y enclavado dentro del área conocida como Cinturón Circumpacífico (Cinturón de Fuego) donde se encuentra la mayor actividad sísmica del planeta (lugar en el cual ocurren el 80% de los sismos). La alta sismicidad del país es debida principalmente a la interacción entre las placas tectónicas, así como las fallas locales que ocurren a lo largo de varios estados.

Con fines de diseño sísmico, utilizando catálogos de sismos del país desde inicios del siglo, la República Mexicana se dividió en 4 zonas sísmicas (Servicio Geológico Mexicano [SGM], 2020).

La Zona A, es una zona donde no se tienen registros históricos sísmicos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad, a causa de temblores.

Las Zonas B y C son intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente, o son zonas afectadas por las altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo.

La Zona D, es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, en la cual la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.

Corrosión

Debido a las lluvias, granizadas, heladas e inundaciones, las estructuras de los puentes están expuestas a un ambiente corrosivo. La corrosión es el retorno de los materiales metálicos a una condición energética más estable, esto es un estado oxidado, ya que se modifica su estado natural (forma mineral) para transformarlos en los materiales de construcción usados en puentes.

La corrosión se presenta en mayor o menor frecuencia en casi todos los materiales metálicos de uso común, esta es la causa general de alteración y destrucción de la mayor parte de los materiales naturales o fabricados por el hombre. Se da de manera natural, pero se ve intensificada en medios agresivos como los ambientes salinos o de agua contaminada, en los cuales la degradación del acero se da por los cloruros y es independiente del espesor del concreto utilizado. Las características físicas de los elementos de concreto reforzado que influyen en la susceptibilidad a la oxidación del acero de refuerzo usado en estos elementos de los puentes son: la permeabilidad del concreto, el espesor de recubrimiento de concreto y la formación de grietas superficiales que exponen el acero de refuerzo y permiten el ingreso de agentes corrosivos.

Socavación

El flujo normal de corriente de un río tiene capacidad de arrastre y suspensión de partículas, pero este se ve incrementado cuando existe una avenida. Cada temporada de lluvias, en puentes y carreteras se generan daños debidos a estas. La socavación es un riesgo presente en las estructuras del país, ya que es la principal causa de colapso de puentes. La socavación depende de las

características de la corriente y los materiales del fondo de cauce donde se encuentra la estructura. Existen varios tipos de socavación originada por causas distintas, las cuales en su conjunto determinarán la profundidad máxima del cauce de río:

- Socavación general: se da por avenidas que tienen mayor capacidad de arrastre y suspensión de material sólido del fondo y lo depositan aguas abajo.
- Socavación transversal: se da en la sección bajo el puente, debido a la reducción de la sección del río por la estructura de puente, aumentando la velocidad.
- Socavación en el lado exterior de las curvas: se presenta en el lado exterior de los meandros, debido al ataque de la corriente y al flujo helicoidal, pudiendo llegar a ser tres veces mayor en comparación con los tramos rectos.
- Socavación local: se produce al pie de las pilas y estribos, es causada por los vórtices que se presentan frente a las estructuras, debido a los cambios de dirección que produce la presencia de estas en las líneas de corriente.
- Erosión por debajo de los embalses: los embalses impiden el paso de materiales sólidos, y la corriente casi libre de sedimentos, al volver al río arrastra el material de las secciones adyacentes y este ya no se recupera.

Nevadas

Se menciona este evento en especial, ya que en la República Mexicana las nevadas se presentan en las regiones norte del país; las mayores afectaciones son a los pavimentos, sin embargo, también afectan a las estructuras. Estos fenómenos acompañados de viento y lluvia, provocan ciclos de congelado y descongelado del agua contenida en el suelo. En especial las capas superficiales se ven afectadas y provocan inestabilidad de las cimentaciones de las estructuras y de las capas base y sub-base de la carpeta asfáltica. Al saturarse el suelo con agua y esta al congelarse, el suelo no es capaz de absorber las precipitaciones e incrementa el nivel del agua y con esto la posibilidad de inundación. Las granizadas y nevadas provocan la acumulación de hielo en las estructuras y en la superficie de rodamiento, ocasionando el cierre parcial o total de puentes y carreteras. Por esto es importante considerar este riesgo climático en la infraestructura terrestre del país.

Cambio climático

Las condiciones climáticas han variado en los últimos años, provocándose eventos climáticos extremos. El cambio climático, debido al calentamiento global, es provocado principalmente por la

acumulación de gases de efecto invernadero. Como resultado del cambio climático se han presentado: ciclones tropicales, huracanes, marejadas, incremento de tormentas y precipitación, las cuales producen lluvias fuertes, vientos de alta intensidad, grandes oleajes y se producen ambientes de alta humedad, así como inundaciones y vendavales, es decir, vientos fuertes, las bajas temperaturas y ondas frías, se asocian a heladas, granizadas o nevadas, junto con lluvias y vientos fuertes.

El aumento de la temperatura en tierra y en mar, con ello el derretimiento de glaciares, son una fuente del aumento de nivel de mar, lo que da como resultado una mayor intensidad de las inundaciones debido a las marejadas, que aumentan la probabilidad, de que las estructuras de puente y las carreteras sean cubiertas por el nivel de agua.

En México, de acuerdo con Galindo (2009), se estima que el costo en la adaptación y mitigación de los efectos climáticos para el año 2050, representará aproximadamente el 3.2% del PIB (Secretaría de Marina y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2012). Sin embargo, estudios más recientes, indican que el costo acumulado del cambio climático para México en este siglo, representará aproximadamente 6% del PIB, bajo cualquier escenario de emisiones (Estrada et al., 2011).

Falta de mantenimiento

En 1925 comienza en México la construcción y administración de puentes, con la fundación de la Comisión Nacional de Caminos ([SCT] y [IMT], 1994). Esta comisión realizaba solo acciones de remplazo de puentes colapsados por socavación y en raras ocasiones acciones de mantenimiento; hasta 1982 se comenzó a dar importancia a la conservación por medio del mantenimiento. El nivel mínimo de los recursos destinados a mantenimiento debe ser el 2% de la inversión inicial, sin incluir la reparación o reforzamiento, ya que estas son acciones correctivas no propiamente de mantenimiento ([SCT] y [IMT], 1994).

Entre más grande es el sistema carretero, más puentes se tienen, los cuales hay que conservar en las mejores condiciones posibles. El mantenimiento de puentes es una rama de la administración de estos que garantiza:

- La seguridad de los usuarios.
- La protección al patrimonio de la nación.
- La continuidad del servicio.

En una evaluación realizada en 1994, se determinó que el 60% de los puentes requerían acciones importantes de rehabilitación ([SCT] y [IMT], 1994). Para 2011 se destinó 0.11% del PIB en la inversión de mantenimiento de la red carretera, el cual es menor, comparando con el promedio de los países desarrollados como EE. UU. con 0.30%, y la región que destina mayor inversión en el mantenimiento de la infraestructura de transporte es Europa Oriental con 0.82% del PIB ([SCT], 2011). Debido a las condiciones económicas, es de importancia refinar los métodos de administración de recursos en las actividades de mantenimiento de los puentes.

De acuerdo con la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC), en el programa de trabajo para el 2020, los recursos se invertirán de la siguiente manera ([DGCC], 2020):

Tabla 2.5 Programa Nacional de Conservación de Carreteras (puentes) 2020.

PROGRAMA	ASIGNACIÓN	META
II. MANTENER EL ESTADO FÍSICO DE LA RED	2,547,406,645.00	(Inversión, en la Red)
CONSERVACIÓN RUTINARIA DE PUENTES	92,110,312.32	7,95 puentes
III. INCREMENTAR LA SEGURIDAD	1,922,388,215.67	(Inversión en seguridad)
RECONSTRUCCIÓN DE PUENTES	511,128,676.84	45 puentes
CONSERVACIÓN PERIÓDICA DE PUENTES	78,306,079.00	134 puentes

Nota. Fuente: Datos tomados de SCT ([DGCC], 2020).

El presupuesto total, destinado para la conservación de carreteras es de 10,139,443,645.89 (MXN), del cual 681,545,068.16 (MXN) del presupuesto es el asignado a puentes, que es el 6.72% del total previsto para el 2020 ([DGCC], 2020).

2.4 Objetivos e hipótesis.

El objetivo general de este trabajo es presentar una introducción al concepto de resiliencia en los puentes de la República Mexicana. Los objetivos secundarios son: presentar los beneficios de implementar el concepto de resiliencia en puentes, mostrar los conceptos básicos involucrados en el concepto de resiliencia, presentar una introducción a los modelos de evaluación de la resiliencia en puentes e ilustrar su aplicación, por medio de un ejemplo sencillo.

Capítulo 3 FALLAS EN PUENTES

3.1 Definición de falla en puentes.

Para que las estructuras de puentes cumplan su objetivo es necesario que, durante su planeación y diseño, se consideren las solicitaciones debidas al uso propio de la estructura, al igual que solicitaciones a las cuales estará expuesta la estructura durante su construcción y las debidas a eventos extremos. Los códigos y reglamentos de diseño proporcionan los requisitos básicos que se deben considerar, por lo que es de vital importancia que las autoridades correspondientes, dueños, constructores, concesionarios y diseñadores, consideren las acciones o requisitos que se prevé, actuaran en la estructura en específico.

3.1.1 Falla en puentes.

Cuando alguno de los componentes principales o la estructura de un puente, no puede realizar la función prevista en su diseño, se considera que existe una falla del puente, la que se puede presentar tanto en la superestructura como en la subestructura u obras complementarias (Federal Highway Administration [FHWA], 2011).

La falla de un puente puede resultar en un defecto crítico de la estructura, como lo son deformaciones, pérdidas de sección y condiciones indeseables, que lleven al mal funcionamiento del puente; sin embargo, pueden ser rehabilitadas o compuestas. La peor situación de falla del puente es cuando se presenta el colapso de la estructura, el cual puede ser un colapso parcial o total.

3.1.2 Causas de fallas en puentes.

Las fallas pueden ser causadas por factores naturales y factores humanos, o la combinación de estos. Dentro de las causas más comunes de una falla se encuentran las debidas a factores naturales, como lo son las inundaciones, las cuales provocan socavación e inundación de tableros. Con base en el trabajo de Reza Choudhury & Hasnat (2015) los principales mecanismos y causas de falla se presentan a continuación.

Factores naturales:

- *Terremotos*, producen comúnmente daño por flexión - cortante en las pilas de puente, fallas de las juntas de expansión, deslizamiento de vigas en direcciones transversales o longitudinales, y licuefacción del suelo, comprometiendo la capacidad de carga de las cimentaciones.

- *Vientos*, inducen fuerzas y vibraciones que resultan en un gran número de fallas, debido a la inestabilidad aeroelástica, en sus dos modos de inestabilidad estática. Se inducen oscilaciones flexionantes y torsionantes. Estas vibraciones son creadas por diferentes tipos de oscilaciones como lo son los fenómenos de flutter, buffeting y oscilaciones forzadas por vórtices.
- *Ciclones*, producen fuerzas hidrodinámicas causadas por una tormenta. Al combinar la elevación del nivel de agua y la alta velocidad del viento, puede ocurrir el golpeteo de la superestructura por estas fuerzas, provocando que los tableros salgan de sus apoyos, por esto la importancia de las conexiones entre la superestructura y la subestructura del puente.
- *Socavación*, fenómeno que provoca la erosión del lecho del río, exponiendo la cimentación de la estructura de puente, reduciendo la resistencia lateral del suelo que contiene a la cimentación, aumentando la deflexión lateral de la cabeza de cimentación, llegando a producir pandeo y flexión de la cimentación.
- *Deslaves*, provocados principalmente por la saturación de agua, terremotos y erupciones volcánicas, puede ocasionar el movimiento de materiales (deslave), los cuales pueden golpear el puente dañándolo, incluso llegando al colapso.

Factores humanos:

- *Diseño y construcción*, el uso de materiales de calidad dudosa o métodos constructivos inapropiados, al igual que no considerar el entorno ambiental y recomendaciones generales de almacenaje, para evitar su deterioro, como por ejemplo el acero, el cual en un entorno húmedo se oxida deteriorando su calidad. A partir de la experiencia, se ha observado que varias fallas de puentes están relacionadas con un diseño pobre de las conexiones y especificación de detalles, al cambiar las características del proyecto y no revisar que sean compatibles con el diseño y consideraciones iniciales.
- *Sobrecarga*, se debe usualmente al tránsito de autotransporte sobrecargado, provocando problemas de fatiga en los componentes del puente, acortando la vida útil y en casos extremos causando directamente el colapso.
- *Colisión*, ya sea de embarcaciones o vehículos los cuales pueden dañar algún componente estructural del puente y ocasionar desde un defecto crítico hasta el colapso parcial o progresivo de la estructura del puente.
- *Mantenimiento e inspección*, la ausencia, generalmente debida a la falta de recursos, conduce al deterioro acelerado de la estructura del puente. El deterioro se debe a las cargas vivas, cargas muertas y al medioambiente. Este deterioro se agrava con el tiempo si no existen actividades

de mantenimiento. Una gran cantidad de puentes, son diseñados con una vida útil de 100 años, tiempo que solo se logrará con un programa adecuado de mantenimiento y rehabilitación. Si bien, estas acciones no eliminan el deterioro si lo reducen a un nivel mínimo y aceptable que permite alcanzar la vida útil prevista.

- *Fuego*, puede ser causado por diversas fuentes como la colisión de tracto-camiones, pipas de transporte de combustible, la colisión múltiple de vehículos o accidentes de construcción, produciendo una temperatura que puede alcanzar hasta 1000°C los primeros 30 min. (Reza Choudhury & Hasnat , 2015), causando el desprendimiento del concreto y el pandeo local de los miembros de acero, disminuyendo su capacidad de carga, lo que puede ocasionar colapsos parciales o totales de la estructura.

3.2 Escenarios de falla.

La combinación de eventos (mecanismos) de falla, se denominarán escenarios de falla, ya que a estas combinaciones se ven expuestas las estructuras de los puentes en su uso diario. Existe una gran posibilidad de combinaciones de mecanismos de falla, y su estudio es una labor interesante. A continuación, se presenta de forma general estas combinaciones, haciendo uso de diagramas de árbol los cuales permiten apreciar la interacción de los eventos en las diferentes partes de las estructuras de los puentes que pueden resultar en la falla.

3.2.1 Marco de falla o defecto crítico de superestructuras de vigas de acero.

En este punto, se presenta la interacción de los mecanismos de falla que ocurren en la superestructura de un puente con travesaños de acero.

En la figura 3.1, se muestra la sección de diagrama de árbol de la falla de la superestructura de un puente compuesta por vigas de acero, se presenta cuatro categorías principales que permiten la clasificación de los mecanismos de falla, y así poder presentar la interacción de todos los eventos que las conforman. El evento cúspide del diagrama de árbol, es la falla de la súper estructura del puente, siendo este evento el que interesa atisbar su naturaleza. El símbolo intermedio indica, una compuerta “o”, que es una puerta lógica digital, la que se utiliza para conectar dos o más variables, y basta con que una de las variables se cumpla para que la función sea verdadera (Enciclopedia cubana (EcuRED), 2019). Indica que cualquiera de las categorías puede conducir al evento de falla.

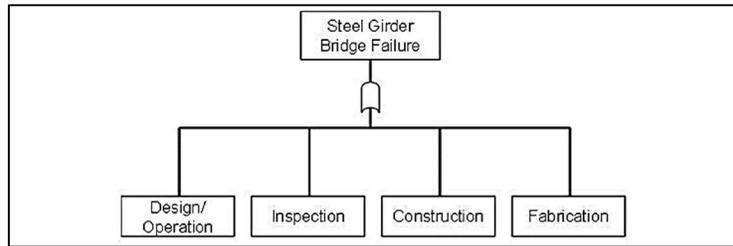


Figura 3.1 Sección de diagrama del árbol, de la falla de la superestructura de un puente compuesta por vigas de acero. Tomada de (Federal Highway Administration [FHWA], 2011).

En la figura 3.2 se puede observar la interacción y etapas o rutas de falla para la categoría de diseño/operación. Se presentan los eventos de vigas, diafragmas y marcos transversales, apoyos y tableros de concreto. Estos eventos, hacen referencia a las partes de la superestructura en las que se presentarán los mecanismos de falla, desde la etapa de diseño y hasta su operación.

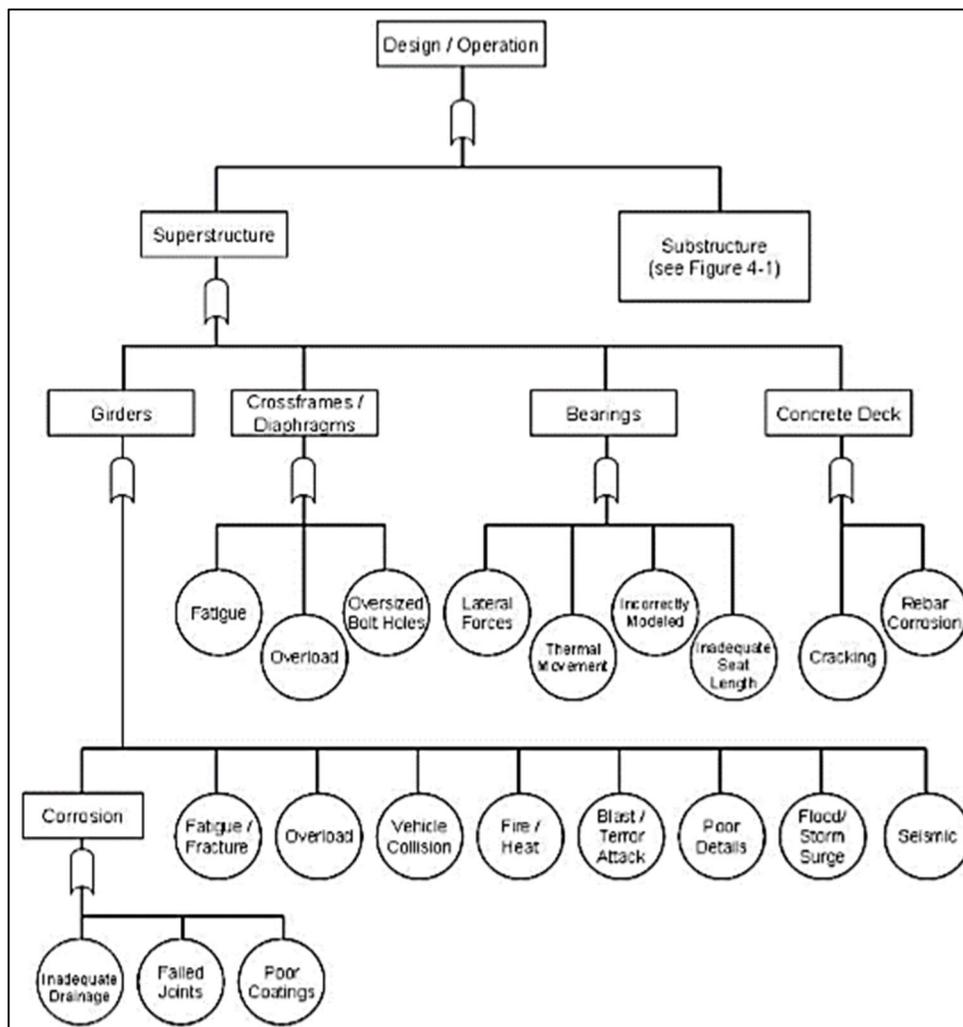


Figura 3.2 Parte del diagrama de árbol, de la falla de puentes de vigas de acero; se muestra, solo la categoría de diseño/operación. Tomada de (Federal Highway Administration [FHWA], 2011).

Por debajo de los anteriores se muestran eventos básicos que hacen referencia a los mecanismos de falla que se pueden presentar en cada tipo de evento, como lo son revestimientos pobres, perforaciones para tornillos demasiado grandes, inadecuada longitud de asentamiento, impactos, la fatiga y fractura. La fatiga ha sido ampliamente estudiada y se separa en dos categorías: carga que induce fatiga y deformaciones que inducen fatiga. La amplia variedad de estos eventos básicos se observa en la figura 3.2. También, el error o deficiencia en el diseño se puede presentar al no detallar adecuadamente, el drenaje de la estructura, los apoyos u otros elementos.

De los mecanismos más severos que es probable conduzcan a la falla, son los que ocurren en los elementos vigas, diafragmas y marcos transversales, apoyos o tableros de concreto.

La figura 3.3 muestra la categoría denominada inspección, en la que se observa que una inspección adecuada del estado de la estructura de puente, se traduce en una identificación efectiva de los eventos que pueden desencadenar en una falla, y en consecuencia realizar las respectivas estrategias de mitigación.

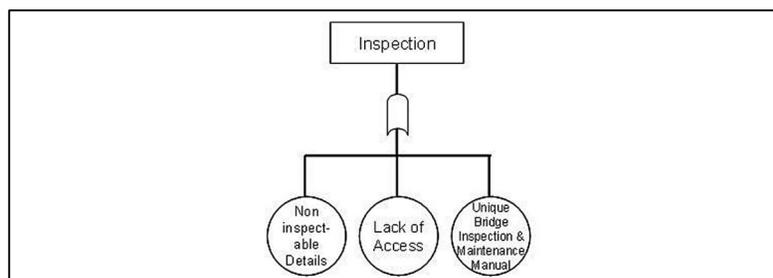


Figura 3.3 Parte del diagrama de árbol de falla de puentes de vigas de acero. Solo muestra, la categoría de inspección y tres eventos básicos. Tomada de (Federal Highway Administration [FHWA], 2011).

Se pueden encontrar elementos en la estructura que no son fáciles de inspeccionar por su misma naturaleza, como lo son los apoyos encapsulados. Un difícil acceso al interior de las vigas en toda su longitud, incluso la falta de este son obstáculos para una inspección adecuada de las vigas, apoyos, drenajes y juntas que conforma la superestructura.

En la figura 3.4 se muestra la sección de diagrama que corresponde a la categoría de construcción de una superestructura de vigas de acero. Se propone dividir en dos etapas el proceso de construcción, mediante los eventos de montaje de traveses de acero y construcción general. Se utiliza construcción general, ya que esta se puede aplicar a otras estructuras de puente.

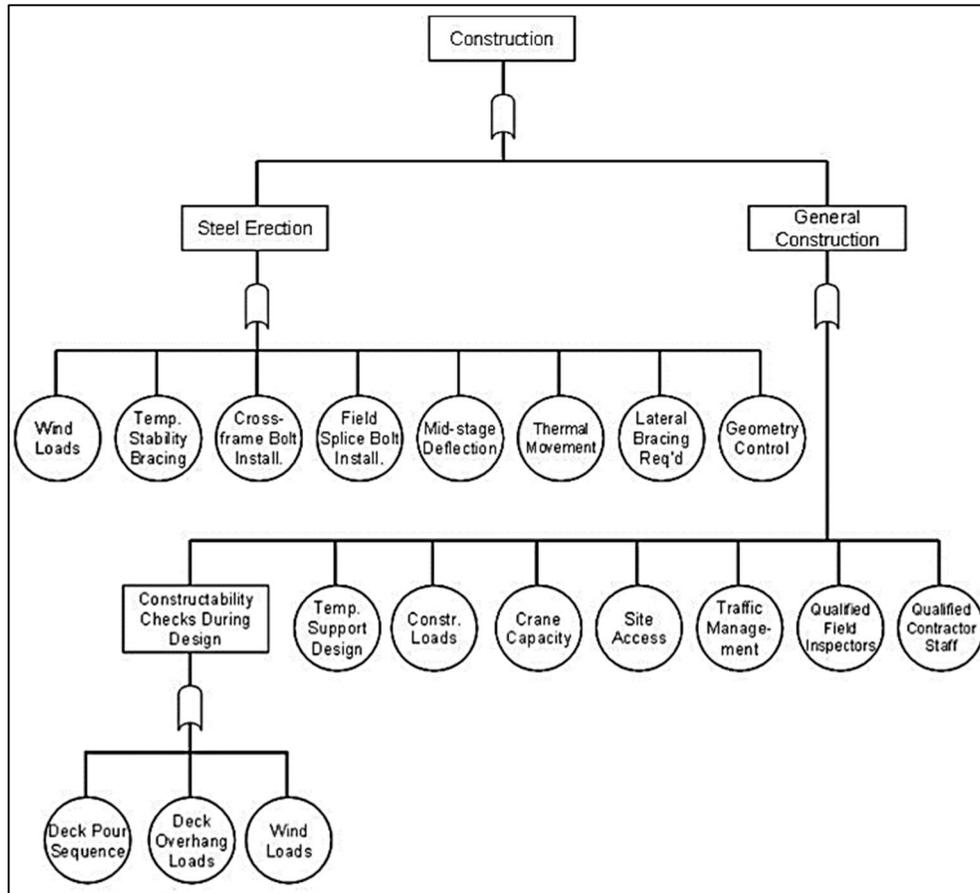


Figura 3.4 En esta parte del diagrama de falla de puentes de vigas de acero, muestra la categoría de construcción y varios eventos básicos. Tomada de (*Federal Highway Administration [FHWA], 2011*).

Los eventos básicos asociados van desde cargas por viento hasta los efectos por temperatura. Los procesos constructivos, la capacidad de las grúas y equipos, los accesos al sitio de construcción, la administración del tráfico, hasta contratistas capacitados son de los eventos considerados en la etapa de construcción general.

Los métodos constructivos deben ser considerados desde la etapa de diseño, y con mayor importancia en la construcción. Las consecuencias de la falla en la etapa de construcción, son la falla general del sistema al igual que en la pérdida de vidas y heridos, del personal y equipo de construcción que hay en el sitio en esta etapa.

En la figura 3.5 se presenta la parte del diagrama de árbol de la falla de puentes con vigas de acero, se muestra la categoría de fabricación de la superestructura y los eventos básicos: detallado de condiciones en planos, el traslado y su manipulación, ajustes por parte del fabricante y la inspección en el taller de los elementos fabricados.

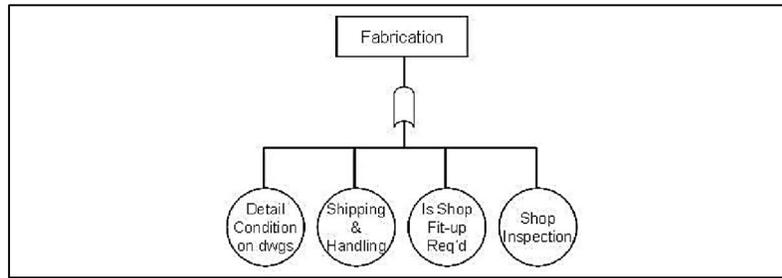


Figura 3.5 Parte del diagrama de falla de puentes de vigas de acero, muestra la categoría de fabricación de la superestructura y cuatro eventos básicos. Tomada de (*Federal Highway Administration [FHWA], 2011*).

Un análisis similar puede llevarse a cabo para puentes con superestructuras compuestas por vigas de concreto prefabricado e identificar los eventos pueden conducir a defectos críticos o falla de la superestructura de los puentes.

3.2.2 Falla o defecto crítico de la subestructura de puente.

Al igual que el caso de la superestructura se usa un diagrama de árbol general para presentar la interacción de los eventos y mecanismos de falla de la subestructura de un puente. Este se une en la categoría de diseño y operación, de la sección de diagrama de falla de superestructuras formadas mediante vigas de acero (Figura 3.2).

En la Figura 3.6 se muestra la parte del diagrama de árbol, asociada a la falla de la subestructura (para cualquier tipo de superestructura). Se pueden visualizar las interacciones entre los componentes y los mecanismos de falla y las muy variadas rutas (pasos o etapas) posibles de falla que pueden darse durante la vida útil de la estructura. Se presentan las categorías de subestructura de concreto, subestructura de acero y subestructura en general, provistas de varios eventos básicos.

Cada categoría puede desencadenar un defecto crítico de la subestructura, e incluso la falla parcial o total, eso es lo que nos indica la compuerta “o” en el diagrama.

Para las subestructuras de concreto se presentan eventos como la corrosión del acero de refuerzo y la mala colocación del acero de refuerzo (incluyendo mecanismo de pretensado y postensado). La calidad del concreto que hace referencia a la posibilidad de presencia de grietas en los elementos colados o que estos no cumplan con las características de diseño, y tener cuidado en el vertido de concreto para evitar la segregación.

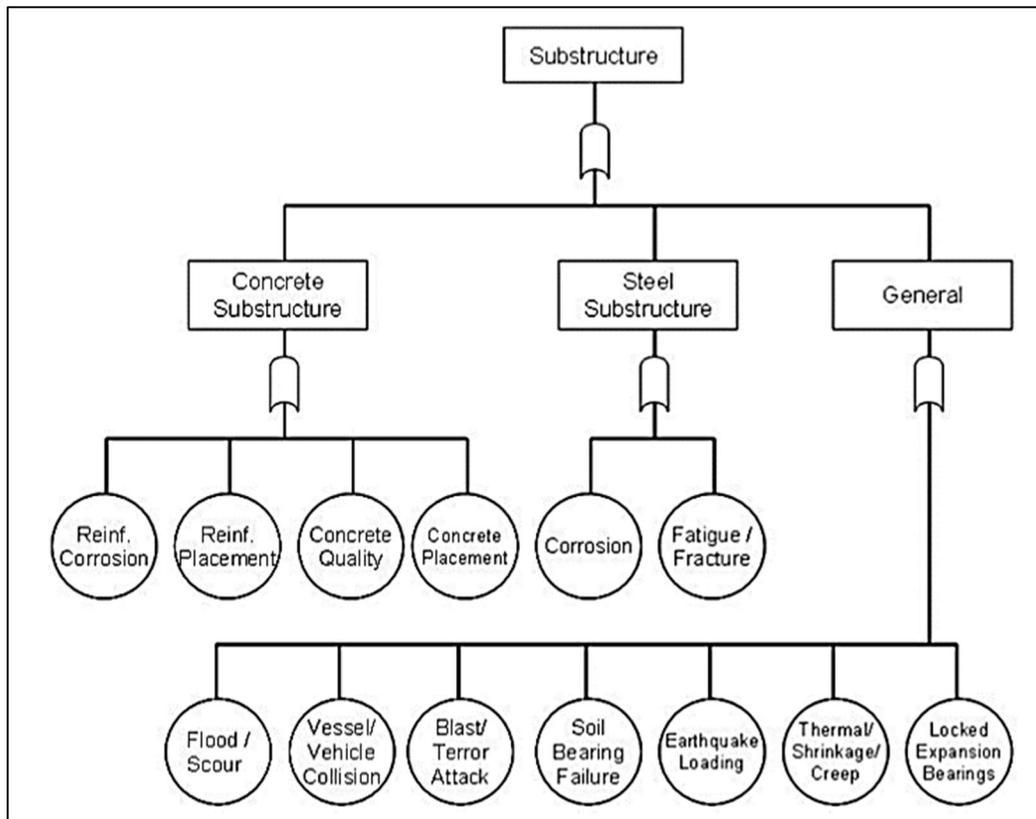


Figura 3.6 Parte del diagrama de falla de la subestructura general, con las categorías de subestructura de concreto, de acero y subestructura en general, con varios eventos básicos. Tomada de (Federal Highway Administration (FHWA), 2011).

En cuanto a subestructuras de acero los eventos son la corrosión, fractura y fatiga que se describieron anteriormente. La categoría general presenta eventos como inundación, socavación, colisión de vehículos/embarcaciones. Todos los eventos considerados se muestran en la figura 3.6.

Los diagramas de árbol permiten visualizar gráficamente la interacción entre los mecanismos, eventos y rutas o etapas de falla de forma cualitativa, aunque también puede ser usada de forma cuantitativa para calcular la probabilidad de falla de la estructura de un puente (Federal Highway Administration [FHWA], 2011).

Los diagramas y eventos identificados son de utilidad en un **análisis de vulnerabilidad**, el cual permite identificar los componentes del puente que son susceptibles a uno o más eventos extremos provocados por el clima, establece la naturaleza del impacto del evento extremo en el componente del puente e indica el mecanismo de la vulnerabilidad (Ikpong, 2016). La naturaleza del impacto de los eventos en los componentes de un puente, se asocia al mecanismo de vulnerabilidad.

Se debe tener cuidado, ya que no necesariamente todos los escenarios de falla expuestos en los diagramas de árbol, se presentan en todas las estructuras de puente y al considerar los mecanismos de falla expuestos en los diagramas de árbol, investigar si son aplicables. Para estructuras de puentes especiales, como lo son puentes formados por armaduras, en arco, puentes suspendidos y atirantados, es útil consultar la literatura de casos bien documentados de fallas y lecciones aprendidas para puentes especiales, al analizarlos.

3.2.3 Ejemplos de fallas de la subestructura de puentes.

La depresión tropical N°11 ocurrida entre el 3 y 4 de septiembre del 2010, con procedencia del Pacífico, provocó una avenida extraordinaria que desencadenó el colapso del puente Tuzantla I sobre el río del mismo nombre, en el estado de Michoacán. El puente estaba formado por 4 claros de 16.38m a base de mampostería, con una longitud total de 65m. Se reemplazó con un puente, conformado por una subestructura a base de pilas de cimentación profunda, una superestructura de tres claros de 26.7 m, con trabes postensadas AASHTO tipo IV, y juntas de dilatación tipo WOSD-75. El nuevo puente tiene una longitud de 15m más que la original, el área hidráulica se incrementó alrededor de 2m², y se incrementó la sección transversal de 9 a 12m. En los accesos, los muros se estabilizaron mecánicamente con un sistema de tierra armada con una altura promedio de 41.25m. La apertura al tráfico se realizó el 28 de mayo de 2010 (Freyssi news, s.f.). La figura 3.7 muestra al puente con el daño sufrido por el huracán, en el cual uno de los claros falló, y su estado posterior a la rehabilitación, es decir, su sustitución. Al comparar las fotos, se puede observar cómo se presentó el aumento sustancial en el nivel de aguas de diseño en el evento extremo.



Figura 3.7 Puente Tuzantla I. A la izquierda, en las dos primeras imágenes, se observa el puente dañado por la depresión y a la derecha, el puente rehabilitado. Tomada de (Freyssi news, s.f.).

En el año 2013, del 13 al 15 de septiembre se presentó el huracán Ingrid y la tormenta tropical Manuel, con vientos máximos de 110 y 140 km/h, respectivamente, los cuales afectaron 10,864 km de los 18,428km de la red carretera del estado de Guerrero con 11 puentes afectados, 7 de estos colapsados. El puente Coyuca 1 fue dañado por este evento. En la figura 3.8 se pueden observar el estado de daño del puente, en el cual se colapsó la parte central después del evento extremo. El nuevo puente Coyuca se entregó el 4 de diciembre de 2014, cuenta con dos carriles de circulación, una longitud de 785m, con andadores de 2m de ancho. Este nuevo puente, mejora la conectividad entre las poblaciones de Acapulco y Zihuatanejo. Se invirtieron 560 millones de pesos ([SCT], 2014).

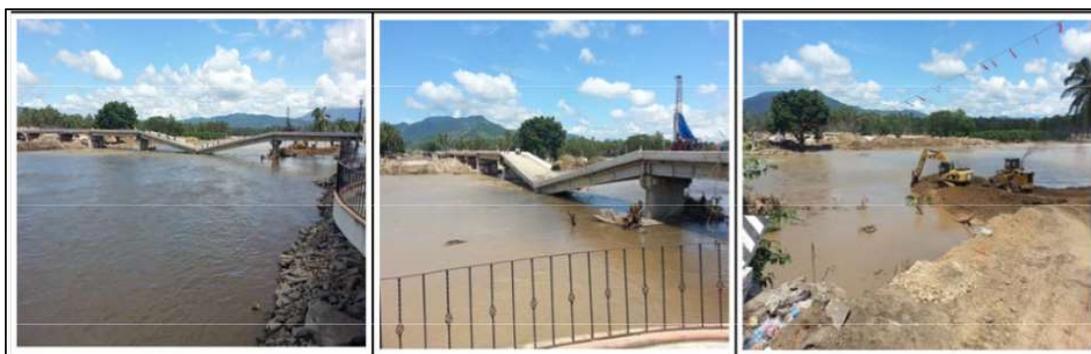


Figura 3.8 Puente Coyuca de Benítez, dañado después del paso de los eventos meteorológicos Ingrid y Manuel. Tomada de (Foto galería Excelsior, 2013).

En la figura 3.9 se puede observar el puente, posterior a la rehabilitación, lo que involucró su sustitución con un nuevo puente con dos carriles como calzada, provisto con parapetos, así como guarniciones que permiten encauzar el tránsito, y ser la base de un parapeto para permitir el paso de las personas.



Figura 3.9 Puente Coyuca de Benítez, rehabilitado y en funcionamiento. Tomada de ([SCT], 2014).

El 19 de septiembre de 2017 se produjo un sismo de 7.1 grados con epicentro entre los estados de Puebla y Morelos a 120 km de la Ciudad de México, el cual produjo el colapso del cuerpo A del puente Ricardo Baena, a cargo de CAPUFE, ubicado en la carretera Cuernavaca-Acapulco, en el tramo 109+000, dirección Cuernavaca-Chilpancingo ([SCT], 2017). Como se ve en la figura 3.10, falló uno de los estribos, lo que desencadenó la falla de la superestructura del puente. Se habilitó el cuerpo B en contraflujo para permitir el paso.



Figura 3.10 Puente colapsado tramo 109+000 de la carretera Cuernavaca-Acapulco (*La Razón Online*, 2017).

Al ser conscientes y poder identificar posibles mecanismos y rutas de falla, se puede diseñar tomando precauciones para los escenarios de falla más comunes. Al evaluar estructuras existentes, este proceso se vuelve más eficiente al reconocer estos mecanismos y prever potenciales rutas de falla en una etapa temprana de su desarrollo.

Es más económico el costo de una rehabilitación temprana, a una posterior donde el mecanismo de falla se ve agravado y el horizonte de falla es más cercano. Debido a ello la importancia del conocimiento de los mecanismos de falla descritos, su interacción con los componentes del puente y otros mecanismos, en la prevención, evaluación y rehabilitación de los eventos de falla en los puentes.

3.3 Redundancia.

La redundancia adquiere importancia, ya que se entiende como la capacidad del puente para soportar el daño sin llegar al colapso. En los sistemas redundantes, dos o más componentes deben fallar antes de que el sistema colapse. La Federal Highway Administration [FHWA] (2011) distingue tres componentes en la redundancia de puentes:

- Redundancia interna: relaciona el hecho, de que la falla de un elemento, no resulta en la falla de otros elementos o miembros, como por ejemplo las armaduras.
- Redundancia estructural: hace referencia a elementos estructurales continuos, como un elemento de un marco o una barra continua, la cual es estáticamente indeterminada y puede ser clasificada como estructuralmente redundante.
- Redundancia por trayectoria alternativa: indica la habilidad de la estructura para soportar cargas ante la pérdida de un elemento, por ejemplo, un puente con superestructura conformada por dos vigas no es redundante en trayectoria alterna, porque no tiene esa trayectoria alterna para soportar la carga.

También redundancia es la cualidad de un puente que le permite realizar su función de diseño en un estado dañado, y un miembro redundante es aquel cuyo fallo no causa el fallo del puente ([FHWA], 2015). Es decir, un sistema redundante es un sistema de elementos, en el cual la falla de uno de estos no se espera desencadene un colapso.

La redundancia toma un papel de importancia en el estudio del colapso progresivo, después del colapso del Edificio Federal Alfred P. Murrah en la ciudad de Oklahoma en 1995 (N. POLLALIS, 2006), el colapso progresivo de las Torres Gemelas del The World Trade Center en New York en 2001 (Seffen, 2008), y el colapso del puente en la autopista I-35W en la ciudad de Minnesota en el año 2007 (National Transportation Safety Board, 2008).

Los componentes estructurales de un puente que trabajan en conjunto, interactúan con otros componentes estructurales. La gran mayoría de los códigos de diseño actuales ignoran este comportamiento y los tratan como componentes individuales; al tomar en cuenta la redundancia del sistema se considera este efecto de sistema.

Uno de los temas actuales de estudio, es el diseño y rehabilitación para tener estructuras resilientes, y prevenir un colapso progresivo, mediante elementos redundantes en la estructura del puente.

Capítulo 4 RESILIENCIA EN PUENTES

4.1 Concepto de resiliencia en puentes.

Para poder realizar el cálculo de la resiliencia en puentes, es necesario conocer lo que involucra este concepto aplicado a las estructuras, particularmente a estructuras de puentes, ya que, como se mencionó anteriormente, su campo de aplicación es amplio. Se presentarán a continuación las definiciones más usuales de la resiliencia en la ingeniería.

Bruneau y Andrei (2006). Definen la Resiliencia Sísmica, como la habilidad de un sistema, para reducir la probabilidad de un shock (abrupta reducción del comportamiento), así como absorber ese shock, si este ocurriera. Identifican que un sistema resiliente muestra las siguientes características:

- 1.- Reducción de la probabilidad de falla.
- 2.- Reducción de las consecuencias de la probabilidad de falla, en términos de pérdida de vidas, daños y consecuencias negativas sociales y económicas.
- 3.- Reducción del tiempo de recuperación (restauración del sistema específico o conjunto de sistemas, a su nivel normal de funcionalidad).

Lounis (2014). Define un puente resiliente, como aquél que tiene la capacidad de reducir la magnitud y/o duración del daño estructural, y la pérdida de funcionalidad cuando se somete a shocks normales o extremos.

Banerjee et al. (2014). Definen la Resiliencia Sísmica, como una cantidad adimensional, que representa la rapidez del sistema para retornar, desde una condición dañada hasta el nivel de funcionalidad previo al daño. La pérdida debida a un evento natural, y la recuperación del rendimiento del sistema posterior al evento, son las dos principales componentes. Es decir, la resiliencia representa una medida integrada del comportamiento sísmico, pérdidas esperadas y recuperación después de un evento sísmico.

Bocchini y Frangopol (2012). Consideran a la resiliencia (en un sistema de puentes a lo largo de un segmento de carretera) como una medida de la capacidad para recuperar la funcionalidad de los puentes a lo largo de un segmento de autopista, sujeto a un evento extremo de cualquier tipo, de una manera rápida y económicamente eficiente.

Cimellaro et al. (2010). Define una comunidad resiliente, como aquella que puede soportar un evento extremo, natural o hecho por el hombre, con un nivel tolerable de pérdidas y es capaz de tomar acciones de mitigación consistente con el nivel de protección deseado. Definen la resiliencia (R) como una función que indica la capacidad para sostener un nivel de funcionalidad o comportamiento para un edificio, puente, red vital o comunidad en un periodo de tiempo que se define como tiempo de control (T_{LC}), el cual es usualmente decidido por los propietarios o la sociedad (usualmente la vida útil, etc.).

Minaie y Moon (2017). Definen la resiliencia en puentes como la habilidad de un puente para mantener un nivel de robustez, durante y después de un evento extremo, y retornar al nivel deseado de rendimiento en el menor tiempo posible, para minimizar el impacto a la comunidad.

Weena et al. (2013). Según su definición, un sistema resiliente (infraestructura, sistema de puentes) es aquél que debería tener una baja probabilidad de fracaso, e incluso si falla, un impacto muy bajo en la sociedad en términos de pérdida de vidas, daños, consecuencias económicas y sociales negativas y lo que es más importante, un tiempo corto de recuperación.

Andrić y Lu (2017). Indican que la Resiliencia en la Ingeniería Civil (en puentes) representa la habilidad para brindar cierto nivel de servicio, incluso después de la ocurrencia de un evento extremo, y de recuperar la funcionalidad, lo más rápido posible.

Mueller et al. (2016). La resiliencia (del puente) puede representar una propiedad variable que fluctúa con las decisiones de diseño; está directamente relacionada a la topología (configuración estructural ante los riesgos), y a la geometría (configuración de los elementos estructurales) y los riesgos (amenazas consideradas).

Biondini et al. (2017). Definen a la resiliencia (en la red de puentes) como la capacidad de un sistema para soportar los efectos de un evento disruptivo, y recuperar rápida y eficientemente la funcionalidad que se tenía antes del evento. Proponen la formulación de la resiliencia, como un indicador del comportamiento que varía con en el tiempo durante la vida útil, para apoyar adecuadamente la toma de decisiones, en la administración de infraestructuras críticas.

Tamvakis y Xenidis (2013). Definen a la resiliencia (en los sistemas de infraestructura), como una propiedad del sistema que describe la capacidad de confrontar el efecto de un evento disruptivo y recuperarse a un nivel de comportamiento/calidad predefinido.

Woods y Hollnagel (2006). Identifican la resiliencia con un marco novedoso que representa una percepción de la seguridad en sistemas complejos que interactúan con áreas como la social, técnica, económica y facetas ambientales.

Rollin et al. (2014). Conciben la resiliencia, como una característica de algunos sistemas que les permite responder a una perturbación imprevista que puede conducir a fallas y luego reanudar las operaciones normales rápidamente, con una disminución mínima en su rendimiento.

Leu et al. (2006). Representan a la resiliencia como la capacidad del sistema para seguir enfocándose y cumplir objetivos clave, cuando se enfrentan a desafíos en el entorno operativo circundante. Por lo tanto, proponen que la resiliencia, debe abordar el desafío de optimizar el sistema en su conjunto para hacer frente a los cambios, los choques y las interrupciones.

National Infrastructure Advisory Council (2009). Define a la resiliencia como la habilidad de reducir la magnitud y/o duración de los eventos perturbadores. La efectividad de una empresa o infraestructura resiliente depende de su capacidad para anticipar, absorber, adaptarse y/o recuperarse rápidamente a un evento potencialmente perjudicial.

La *Academia Nacional de Ciencias [NAS] (2019)*. Define a la resiliencia como la habilidad de planear y preparar para absorber, recuperarse de y adaptarse más rápidamente a eventos adversos.

A partir de las definiciones mencionadas, se infiere que la resiliencia es una actividad multifuncional que depende de la escala y nivel deseado de detalle. Puede ser aplicada a una estructura en específico, hasta a un conjunto de estructuras de puentes que conforman un tramo carretero, es decir, sistemas de puentes. Se aplica a la administración de puentes dentro de un inventario, para la selección de actividades de intervención, posterior a un evento extremo o bien para maximizar la resiliencia de una red carretera mediante estos.

Con respecto a la resiliencia de un puente en específico, hace referencia a la capacidad de la estructura de reducir la magnitud del daño, y mantener un nivel de robustez para poder brindar cierto nivel de servicio, incluso después de un evento extremo y recuperar el nivel o condición de servicio lo más rápido posible.

La resiliencia se puede evaluar ante un escenario de amenaza específico o múltiple: la resiliencia ante sismos, socavación, acumulación de hielo e inundación en estructuras de puente. Es usual

considerar que los escenarios mencionados ocurren de manera extraordinaria, sin embargo, también se pueden incluir eventos de larga duración como el deterioro y el cambio climático.

Con base en lo anteriormente mencionado, se considera en el presente trabajo que la resiliencia hace referencia a la habilidad de un material o estructura, cómo es el caso de los puentes para anticipar y soportar o adaptarse a las condiciones cambiantes en un evento agresivo como un sismo, inundación, socavación u otro, natural o causado por el hombre, así como la habilidad del puente para recuperarse de ese evento a un nivel funcional aceptable, minimizando las consecuencias sociales, económicas y el tiempo de recuperación.

4.2 Variables que intervienen en la resiliencia en puentes.

Debido a que el concepto de resiliencia es amplio, y abarca campos del conocimiento desde el técnico hasta el social, existen variables, conceptos y características que se relacionan, afectan y varían la resiliencia de un puente. A continuación, se presentan a grandes rasgos los conceptos, propiedades y variables que se consideran generalmente en el concepto de resiliencia aplicado a puentes:

Nemeth & Hollnagel (2008), introducen los conceptos que intervienen en la resiliencia como lo son la rehabilitación, el riesgo, vulnerabilidad, conciencia, adaptación, flexibilidad y administración de recursos, los cuales a su vez son parámetros críticos para el diseño y monitoreo de los sistemas.

Vulnerabilidad, se define en ISO (2009), como la propiedad intrínseca del sistema que resulta en la susceptibilidad a una fuente de riesgo que puede llevar a un evento con una consecuencia.

Riesgo, de acuerdo con la Federal Highway Administration (2016). Es la posibilidad de un resultado no deseado debido a un evento que está determinado, por el producto de:

- (a) la probabilidad del impacto y (b) la consecuencia del impacto.

Retomando la definición de la resiliencia de Bruneau et al. (2006), estos reconocen las propiedades, las características y las medidas de la resiliencia, como se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 *Propiedades de la resiliencia.*

Propiedades de la Resiliencia	Características de la resiliencia	Medidas de la resiliencia
Robustez	Reducir la probabilidad de ocurrencia de una falla	Técnica
Redundancia	Reducir las consecuencias de una falla (si esta llegara a ocurrir)	Operativamente / Organización
Inventiva	Reducir el tiempo de recuperación	Socialmente
Rapidez		Económicamente

Nota. Fuente: Información tomada de (Bruneau et al., 2006).

Robustez, definida como la resistencia, es la habilidad de los sistemas para soportar un nivel de estrés o demandas sin sufrir degradación. En algunas publicaciones como la de Minaie y Moon (2017), se considera a la robustez como un producto del riesgo, la vulnerabilidad y un factor de incertidumbre.

El concepto de *redundancia* se comentó en el capítulo 3.3 del presente trabajo.

Inventiva, es la capacidad de identificar problemas, establecer prioridades y movilizar recursos materiales y humanos para alcanzar metas.

Rapidez es la capacidad de cumplir prioridades para alcanzar metas en tiempo y forma, de esta forma contener pérdidas restablecer la funcionalidad y evitar una interrupción futura (Bruneau et al., 2006).

Comportamiento del puente o índice de la condición del puente (bridge condition index [BCI]), se define como la principal medida objetiva para la calificación de puentes de carreteras. Esta incluye la seguridad y la funcionalidad estructurales y operativas del puente. Este también es conocido como (bridge health index [BHI]), y es usado por las agencias como una medida del comportamiento que se utiliza para preservar la condición de las estructuras de puentes y priorizar los proyectos de

mantenimiento y remplazo, dentro de un inventario de los mismos. Es una herramienta útil en la evaluación estructural o funcional de un puente. Para los propósitos de administración de puentes su uso más importante es el de identificar las estructuras de inventario que están más deterioradas o necesitan reparaciones más urgentemente. Se calcula con base en la condición de los elementos estructurales y el servicio proporcionado por el puente (Federal Highway Administration [FHWA], 2016).

Utilidad, (o beneficios de la agencia) se define como el ahorro de costos por unidad de proyecto de puentes de carretera que se acumula desde la implementación temprana de un proyecto en comparación con la postergación del mismo, hasta el final del horizonte de planificación, cuando un mayor deterioro atrae un mayor costo (Department of Highways & Public Works of Yukon 2010 en Ikpong 2016).

La *evaluación cuantitativa de riesgos* se compone por tres componentes que son el análisis de riesgo, el análisis de vulnerabilidad y el análisis de las consecuencias. Los dos primeros análisis se comentaron anteriormente en los capítulos 2.3 y 3.2, respectivamente (Zhu & M. Frangopol, 2013).

En el *análisis de consecuencias*, se estiman las consecuencias de la falla considerando a la estructura y la sociedad, con lo que las consecuencias asociadas a la falla se pueden evaluar con tres componentes; el costo de reconstrucción, el costo de funcionamiento y el costo por el tiempo perdido (Zhu & M. Frangopol, 2013).

Los conceptos mencionados dan un panorama de las variables que intervienen en el comportamiento y evaluación de la resiliencia, ya que esta abarca una gran cantidad de áreas del conocimiento.

Capítulo 5 MODELOS DE EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA

5.1 Evaluación mediante la cuantificación física.

Minaie & Moon (2017), describen la resiliencia como la habilidad de un puente, de mantener un nivel de robustez durante y después de un evento extremo, así como recuperar un nivel deseado de comportamiento en el menor tiempo posible.

En el marco propuesto para el cálculo de la resiliencia, se plantea una recuperación simplificada en una sola etapa y medidas cuantitativas basadas en la severidad del daño provocado por el evento extremo. La resiliencia se expresa como la relación entre el área bajo el comportamiento post-disrupción y el área bajo el nivel de comportamiento objetivo (que en la publicación mencionada se considera como el 100%, es decir, el comportamiento anterior al evento), para un periodo de control de 1 año, 365 días, la cual es una forma de cálculo similar a la propuesta por Reed, Kapur, & Christie (2009). Y se expresa matemáticamente como:

$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_0+365 \text{ days}} P(t) dt}{\int_{t_0}^{t_0+365 \text{ days}} P(100\%) dt} = 2.74 \times 10^{-5} \times \int_{t_0}^{t_0+365 \text{ days}} P(t) dt$$

(Ecuación 1. Tomada del artículo (Minaie & Moon, 2017). Expresión matemática de la resiliencia)

donde $P(t)$ = comportamiento del puente, $P(100\%)$ = comportamiento del puente al nivel 100% (no interrumpido), t_0 = es el tiempo de ocurrencia del evento extremo (evento disruptivo), 2.74×10^{-5} es una constante, calculada con base en el área bajo el nivel del 100 % del comportamiento dentro del periodo de control de 1 año, e incluso si el tiempo de recuperación excede este intervalo de tiempo. El tiempo en la ecuación está expresado en días.

Para poder hacer uso de la ecuación anterior, es necesario determinar el comportamiento del puente $P(t)$ y el tiempo de recuperación después del evento extremo (t_{rec}). Para determinar el comportamiento del puente, se define a la pérdida inmediata de comportamiento posterior a un evento extremo o disruptivo, como la robustez del sistema o estructura de puente (P_R). Esta se define como el producto del riesgo (H), la vulnerabilidad (V) y un factor de incertidumbre (UF), tal como se define en la ecuación 2. Por lo tanto, la robustez (P_R) o comportamiento residual, después de un evento extremo se puede calcular como:

$$P_R = [100\% - \max(9.259 \times H \times V \times UF) \times I] > 0\%$$

(Ecuación 2. Tomada del artículo (Minaie & Moon, 2017). Robustez)

donde H es el riesgo, V la vulnerabilidad, UF es el factor de incertidumbre, e I es el factor de importancia del puente. La constante 9.259 en la fórmula se utiliza para poner a P_R , en una escala de 0 - 100%.

Riesgo (H) es la probabilidad de ocurrencia de un riesgo, en un periodo de tiempo de retorno que depende la naturaleza de este. La vulnerabilidad (V) es la probabilidad de falla, dado un riesgo. Los valores de H y V se calculan de forma separada con las tablas 5.1 y 5.2, respectivamente, y se utiliza la combinación de valores máximos H-V, que representan el peor escenario que se puede presentar de todas las combinaciones de riesgo y vulnerabilidad que pueden causar la interrupción del puente.

Tabla 5.1 *Valores sugeridos de riesgo (H).*

Hazards considered	Hazard values		
	1	2	3
Scour; debris and ice; vessel collision; seismic—liquefaction; settlement; flood	Outside of a 500 year flood plain	Outside of a 100 year flood plain	Within the 100 year flood plain
	Seismic design category A (low probability of earthquake leading to liquefaction)	Seismic design category B, C (moderate probability of earthquake leading to liquefaction)	Seismic design category D, E, F (high probability of earthquake leading to liquefaction)
	Low hurricane risk [3 s gust wind speed less than 90 mph (145 kph)]	Moderate hurricane risk [3 s gust wind speed more than 90 mph (145 kph) and less than 130 mph (210 kph)]	High hurricane risk [3 s gust wind speed more than 130 mph (210 kph)]
	Over a non-navigable channel	Navigable channel for mid-sized vessels	Navigable channel for large vessels
	Located more than 500 mi (800 km) from coast	Located more than 50 mi (80 km) from coast	Located within 50 mi (80 km) from coast
	No potential for scour	A rating of NBI Item 113 (scour) of 5 or higher	A rating of NBI Item 113 (scour) of 4 or lower
	No records of significant earthquake, floods, or storm surge	Records of moderate earthquake, floods or storm surge	Observed drift and debris at piers/abutment history of ice flows in waterway
Seismic; fatigue; vehicle collision; overload; fire	Seismic design category A (low probability of seismic damage)	Seismic design category B, C (moderate probability of seismic damage)	Seismic design category D, E, F (high probability of seismic damage)
	No records of significant earthquake	Records of moderate earthquake	Records of significant earthquake
	ADTT less than 5,000 (low probability of fatigue failure)	ADTT less than 10,000 (moderate probability of fatigue failure)	ADTT more than 10,000 (high probability of fatigue failure)
	Not spanning over a roadway	Spanning over a roadway with ADTT less than 1,000	Spanning over a roadway with ADTT more than 1,000
	Located more than 20 mi (32 km) from heavy industry	Located more than 10 mi (16 km) from heavy industry	Located less than 10 mi (16 km) from heavy industry
No history of overloads, collision, fire under the bridge	History of moderate level of overloads, collision, fire under the bridge	History of high level of overloads, collision, fire under the bridge	

Note: ADTT = annual average daily truck traffic.

Nota. Fuente: Artículo (Minaie & Moon, 2017).

Tabla 5.2 Valores sugeridos de vulnerabilidad (V).

Vulnerabilities considered	Vulnerability values		
	1	2	3
Safety—geo/hydraulic	Founded on deep foundations or bedrock	Founded on shallow foundations on cohesive soil	Founded on shallow foundations or non-cohesive soil
	No evidence of liquefaction in the vicinity of the bridge	Evidence of liquefaction in the vicinity of the bridge	Evidence of liquefaction in the vicinity of the bridge
	No history and no evidence of scour or settlement	Evidence of minor scour/ undermining during past/present underwater inspections	Evidence of moderate to significant scour/undermining during past/present underwater inspections
	Meets current pier impact and scour protection standards	Pier protection system in fair condition	Pier protection system missing or in poor condition
	Superstructure above 500 year flood level	Superstructure above 100 year flood level but below 500 year flood level	Superstructure above 50 year flood level but below 100 year flood plain
	No tilt of substructure elements	Minor tilt of substructure elements	Significant tilt of substructure elements
Safety—structural	Meets all current design specs	May not meet design specs, but does not impact structural integrity and capacity	Does not meet current standards
	Structure displays bi-directional redundancy	Simply-supported constructed with transverse distribution capabilities	Simply-supported construction with minimal transverse distribution capabilities
	20 years or less since construction or major renewal	50 years or less since construction or major renewal	50 years or more since construction or major renewal
	A and B fatigue details	C and D fatigue details	E and E' fatigue details
	Neoprene bearings	Steel plate bearings	Rocker bearings; intrinsic force dependency; exposed prestressing strands; pin and hanger details
	No evidence of structural damage	Minor evidence of structural damage within the critical load path	Evidence of structural damage within the critical load path
	No history of excessive displacements, vibrations, deformations, tilt	History of significant displacements or vibrations, deformations, tilt	History of excessive displacements or vibrations, deformations, tilt

Nota. Fuente: Artículo (Minaie & Moon, 2017).

Se hace uso del factor de incertidumbre (UF), entre 1 (para enfoque más objetivos) y 2 (para enfoques más subjetivos). Es aquí, donde se considera la evaluación física de la estructura que permite determinar la resiliencia, ya que en función del tipo de inspección será el factor de incertidumbre utilizado. El factor UF está dado en la tabla 5.3.

Tabla 5.3 Factores de incertidumbre (UF).

Bridge evaluation practice	UF
Visual inspection	1.20
Visual inspection and analytical techniques	1.10
Visual inspection, analytical and NDE techniques	1.0

Note: NDE = nondestructive evaluation.

Nota. Fuente: Artículo (Minaie & Moon, 2017). Está asociado a la evaluación física de la estructura.

El factor de importancia (*I*) está basado en valores sociales del puente para la comunidad y su importancia en la red carretera. Se sugiere la tabla 5.4 con valores de este factor.

Tabla 5.4 Factor de importancia del puente (I). (Los criterios más altos gobiernan).

Impact factor	Criteria
0.75	<ul style="list-style-type: none"> • Bridge is located on local routes; • Replacement costs less than 5% of total agency budget; • Bridge does not carry utility lines; • Average daily traffic less than 10,000; and • Detour length less than 3 mi OR level of service on detour is A or B.
1.0	<ul style="list-style-type: none"> • Bridge is located on National Highway System (NHS) or state routes; • Replacement costs more than 5% and less than 25% of agency budget; • Bridge carries utility lines such as fiber optics, communication lines, or other low-risk utilities (colocation); • Average daily traffic more than 10,000 and less than 50,000; and • Detour length more than 5 km (3 mi) and less than 16 km (10 mi) OR level of service on detour is C or D.
1.25	<ul style="list-style-type: none"> • Bridge is located on evacuation routes, critical infrastructure, the Strategic Highway Network, or national network for trucks; • Replacement costs more than 25% of agency budget; • Bridge carries utility lines such as electricity, gas, or other high-risk utilities (colocation); • Average daily traffic more than 50,000; and • Detour length more than 16 km (10 mi) OR level of service on detour is E or F.

Nota. Fuente: Artículo (Minaie & Moon, 2017).

Para el cálculo de la resiliencia, es necesario el cálculo del tiempo de recuperación (t_{rec}) y el tiempo de control. El tiempo de control se propone sea de un año (365 días).

El tiempo de recuperación de un puente después de un evento extremo está estrechamente relacionado con el área afectada y la severidad del riesgo, ya que estos determinan el acceso a servicios de emergencia y equipos de trabajo de reparación, así como el nivel del daño. Para tomar en cuenta estos factores, se utilizan para la severidad del riesgo ante los sismos las categorías de diseño sísmico de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO, por sus siglas en inglés) (AASHTO, 2007). Se considera en el coeficiente de aceleración espectral de diseño (S_{D1}), que es el valor ajustado del coeficiente de aceleración espectral al tipo de sitio de ubicación del puente para un periodo de $T_m=1$ s, y se presentan en la tabla 5.5. Para los huracanes se usa la escala de viento Saffir-Simpson sugerida por la National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA, 2019], que se mencionó en el tema 2.3 Riesgos de los puentes en México, vientos, tabla 2.4, pp.- 16, del presente trabajo. El área afectada, puede ser clasificada

como aislada cuando un puente o parte de este se ve afectado, local cuando más de un puente de una red es afectado y regional cuando múltiples redes de puentes son afectadas.

Tabla 5.5 *Categorías de diseño sísmico AASHTO.*

Value of S_{D1} (g)	AASHTO SDC	Proposed severity level
$S_{D1} < 0.15$	A	Low
$0.15 \leq S_{D1} < 0.30$	B	Moderate
$0.30 \leq S_{D1} < 0.50$	C	Severe
$0.50 \leq S_{D1}$	D	Catastrophic

Nota. Fuente: Artículo (Minaie & Moon, 2017).

El periodo de recuperación es complejo, por ejemplo, el National Institute of Standards and Technology [NIST] Vol. I (2016) y [NIST] Vol. II (2016), propone cuatro fases de restauración: fase 1, que corresponde a la evaluación y respuesta, se evalúa la extensión de los daños y comienza la recuperación; fase 2, restauración mínima a corto plazo, se tiene como objetivo restaurar la funcionalidad al 30% permitiendo el acceso a equipos de emergencia y de restauración; fase 3, restauración funcional intermedia, en esta etapa se tiene como objetivo el de restaurar a un 60% la funcionalidad, permitiendo la circulación restringiendo la carga y camiones por la red carretera, en esta etapa el tipo y tamaño de los puentes (por ejemplo, claros cortos contra claros largos, o puentes tipo armadura contra puentes tipo viga-tablero) tienen una gran influencia en el tiempo de restauración de esta fase, el periodo de tiempo se estima de 12 meses; fase 4, restauración operacional a largo plazo, en esta fase la meta, es restablecer la funcionalidad al 100%, el tiempo para alcanzar este nivel de comportamiento depende del tipo de daño, en esta fase los trabajos de restauración no tienen planes de emergencia, sino que se aplican los esquemas tradicionales de construcción, pudiendo permanecer un nivel de daño para algunos eventos extremos. Algunas comunidades aprovechan estos eventos para mejorar sus comunidades y poder alcanzar un nivel de comportamiento mayor al anterior a la disrupción.

En el método propuesto por el artículo se considera una sola etapa de recuperación, la que abarca desde el inicio de la recuperación, hasta la recuperación operativa (100%), por simplicidad y practicidad se considera que el modelo de recuperación es continuo y lineal. Se propone el tiempo de recuperación como una función de los tiempos básicos de restauración y factores de ajuste como:

$$t_{rec} = t_{res} \times \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_b$$

(Ecuación 3. Tomada del artículo (Minaie & Moon, 2017). Tiempo de recuperación)

donde t_{rec} = tiempo de recuperación, t_{res} = tiempo básico de restauración, para el cual se propone la tabla 5.6 en el mismo artículo; α_1 = es un factor de ajuste, el cual se toma de la tabla 5.7, con base en las prácticas de gestión de eventos extremos de la agencia (Freckleton et al., 2012). El factor α_2 = es un factor de ajuste basado en la historia de eventos extremos suscitados en el año anterior al evento extremo de análisis, el cual se presenta en la tabla 5.8; α_b es un factor de ajuste que depende del tipo de puente, y sus valores se presentan en la tabla 5.9.

Tabla 5.6 *Tiempos básicos de restauración (t_{res}).*

Affected area	Severity of the hazard			
	Low	Moderate	Severe	Catastrophic
Isolated	1 day	2 weeks	6 months	N/A
Local	3 days	6 months	9 months	N/A
Regional	1 week	9 months	12 months	24 months

Nota. Fuente: Artículo (Minaie & Moon, 2017).

Tabla 5.7 *Factor de ajuste basado en las prácticas de administración ante eventos extremos de las agencias (α_1).*

Disaster management practices	α_1
At least three of the following criteria:	0.8
<ul style="list-style-type: none"> • Public extreme event preparedness educational programs, scheduled test, and drill programs; • Designated evacuation routes; • Designated shelters; • Extreme event management plans and designated centers; • First responders equipped with necessary tools and equipment to manage the postextreme event conditions; • On-call emergency contractors for incident management; • Local access to equipment, goods, and materials for minimal restoration; • Available modes of transportation for individuals: >2 [8-km (5-mi) radius around the bridge]; • Access to number of emergency facilities (including emergency, hospital, gas stations): ≥ 20 [8-km (5-mi) radius around the bridge]; and • Emergency response management (ERM)^a Level III or higher. 	
Not meeting the above criteria	1.0

^aEmergency response management levels (Freckleton et al. 2012): Level I = police officers directing traffic; Level II = traffic signals; Level III = dynamic traffic signal timing and ramp metering; Level IV = traffic cameras and variable message signs; Level V = intelligent transportation systems and advanced traveler information systems.

Nota. Fuente: Artículo (Minaie & Moon, 2017).

Tabla 5.8 Factor de ajuste basado en la historia de eventos extremos en los pasados 12 meses (α_2).

Agency's contracting practices	α_2
No history of disruptive events	1.0
History of low event	1.1
History of moderate event	1.2
History of severe event	1.4
History of catastrophic event	1.6

Nota. Fuente: Artículo (Minaie & Moon, 2017).

Tabla 5.9 Factor de ajuste basado en el tipo de puente (α_b).

Type of bridge ^a	α_b
Single-span bridges [up to 15-m (50-ft) span], or multiple simply supported spans	1.00
Medium-size bridges [up to 50-m (165-ft) span], multiple continuous spans, movable bridges	1.15
Large-span bridges [from 50-m (165-ft) to 150-m (500-ft) span]	1.30
Complex bridges [generally longer than 150-m (500-ft) span]	1.50

^aBridge categories from Pennsylvania DOT (2015).

Nota. Fuente: Artículo (Minaie & Moon, 2017).

Con los valores de H, V y los factores UF e I, se calcula la robustez del sistema al sustituirlos en la ecuación 2, que es la funcionalidad residual posterior al evento extremo. Con la ecuación 3 del artículo y con ayuda de las tablas para obtener los factores de ajuste y el tiempo básico de restauración, se obtiene el tiempo de recuperación. El tiempo de control se definió al inicio, y este se ve reflejado como un valor en días (365) en la ecuación 1 de artículo. Sabiendo que la funcionalidad objetivo es la funcionalidad anterior al evento, es decir, un 100%, y que se relaciona a la funcionalidad residual por medio del modelo de recuperación considerado como lineal, continuo y de una sola etapa, se sustituyen los valores obtenidos en la ecuación 1 y se obtiene la resiliencia de la estructura de la estructura de puente en %.

Andrić y Lu (2017), definen a la resiliencia matemáticamente, como la funcionalidad del sistema en un periodo de tiempo, y retoman la definición proporcionada por Bruneau & Reinhorn (2006). Debido a que la evaluación de la resiliencia está llena de incertidumbre, y a que requiere un análisis complejo de varios factores, los cuales contribuyen a diferentes tipos de incertidumbre, aparte de la aleatoriedad, en el proceso aparece una incertidumbre ambigua. Por ejemplo, en el juicio de decisión por parte los especialistas responsables, de cuantas líneas de autopista deben cerrarse después de un sismo, es decir en la relación entre el daño del puente y la funcionalidad residual. Se

propone el uso de la teoría de conjuntos difusos/borrosos, ya que la incertidumbre ambigua tiene la característica de ser difusa/borrosa.

En su trabajo desarrollan la aplicación de la lógica difusa/borrosa y de la teoría de conjuntos difusos/borrosos para modelar la resiliencia ante sismo y su recuperación. Los conocimientos individuales y el juicio subjetivo de los expertos son propuestos como las herramientas más confiables, para la evaluación de los riesgos en la industria de la construcción, por ello la clasificación de este método en la evaluación de la resiliencia mediante la cuantificación física, es decir, la cuantificación física de la funcionalidad residual, estimada por los expertos.

Se definen los parámetros de la resiliencia ante sismo para puentes, mediante la teoría de representación de conocimiento difuso. El proceso de recuperación de los puentes se modela en términos de funciones difusas y los conceptos de la teoría de medición difusa se usan en la determinación de las medidas de la resiliencia.

En el trabajo de **Ikpong (2016)**, se propone un modelo de administración de puentes carreteros contra eventos extremos provocados por el clima en regiones frías, se usa la clasificación (ranking) de la resiliencia de los puentes ante el cambio climático. Así, se cuantifica el impacto del cambio climático en términos de parámetros de ingeniería para llevar a cabo medidas correctivas en tiempo y forma.

El método propuesto cuenta con indicadores de la resiliencia (R_i) para cuantificar la resiliencia de varios componentes de los puentes ante eventos extremos. Este método también provee de medidas de capacidad para cada indicador de la resiliencia, que indican qué tan bien está diseñado el puente para soportar el impacto de un evento extremo. En la formulación de este método se requiere asignar pesos o importancias a cada indicador, de modo que, al asignar una clasificación a cada una de las medidas de capacidad, se pueda determinar una única clasificación de la resiliencia del puente. Incluso, si durante su vida útil el puente no se ve afectado por un evento extremo, no se puede descartar el deterioro con el tiempo. Por esta razón es importante, incluso en este escenario, administrar las acciones de mantenimiento e intervención de un puente y obtener la máxima vida útil por unidad monetaria del costo total de la vida útil, es decir, la máxima utilidad por cada unidad monetaria invertida.

En el trabajo mencionado, se propone un procedimiento práctico para la calificación/clasificación de la resiliencia de los puentes carreteros. Se desarrolla un método de ponderación y un esquema de clasificación para complementar la clasificación de la resiliencia. Se desarrolla un método para determinar la magnitud de cargas extremas provocadas por el clima (socavación y acumulación de nieve) que pueden causar la falla del puente. Así mismo se desarrolla un procedimiento para la clasificación de proyectos de puentes el que considera múltiples criterios en regiones frías, y se compara con el proceso de jerarquía analítica [AHP], por sus siglas en inglés.

En el presente trabajo es de interés el método de evaluación de la resiliencia, propuesto por (Ikpong, 2016). En un primer acercamiento, a continuación, se presentan los conceptos utilizados y el contexto, como base de desarrollo del método.

Se evalúa la resiliencia de puentes carreteros ante el cambio climático en regiones frías de Canadá, con el propósito de desarrollar metodologías subjetivas. Por ejemplo, entre mayor sea el claro vertical bajo el puente, es menos vulnerable a la falla de estribos e inundación de tableros. En esta línea de pensamiento, el claro vertical bajo el puente es una medida objetiva de la resiliencia de los estribos y tableros de puente; otro atributo importante es el de que es un método general y adaptable.

Se usa la definición hecha por la National Infrastructure Advisory Council (2009) para la Infraestructura Resiliente. Para la vulnerabilidad se retoma la definición hecha por la ISO (2009), para la definición de riesgo se utiliza la propuesta por la Federal Highway Administration (2016), para definir la optimización se utiliza The Concise Oxford Dictionary 1990 en Ikpong (2016). La utilidad se define como los costos salvados o ahorrados de la pronta implementación de un proyecto de puente, comparado con posponerlo hasta el final del tiempo horizonte, cuando el probable deterioro puede tener un mayor efecto y con ello un mayor costo (Ikpong, 2016).

Para la evaluación de la resiliencia, se necesita llevar a cabo la evaluación de riesgo, el que tiene por componentes: el análisis de peligro, el análisis de vulnerabilidad y el análisis de consecuencias, los cuales son:

En el *análisis de peligro*, se identifican los eventos extremos que pueden ocurrir, y los eventos a los cuales está expuesto el puente, lo que permite al análisis ser adaptativo y general para cualquier ubicación del puente. Para el trabajo de (Ikpong, 2016), en el cual los puentes se ubican en el ártico canadiense, estos eventos incluyen la inundación inducida por el derretimiento de glaciares, la

socavación en pilas y estribos asociada al flujo del cauce y el derretimiento del permafrost bajo las cimentaciones de puente. El permafrost es una capa de suelo permanentemente congelado en regiones muy frías como la tundra (Sheshpari & Khalilzad, 2016).

El *análisis de vulnerabilidad* permite identificar los componentes que son susceptibles a uno o varios de los eventos extremos identificados en el análisis de peligro, se identifica también su naturaleza y mecanismos de vulnerabilidad. Esto permite establecer relaciones entre los eventos extremos y los componentes del puente. La vulnerabilidad de varios componentes del puente se determina con los **indicadores de resiliencia (Ri)**.

Así mismo, en el análisis de vulnerabilidad se identifican las **medidas de capacidad**, las cuales indican qué tan bien está preparado el puente para soportar los efectos de los eventos extremos provocados por el clima, y están relacionadas con los indicadores de la resiliencia (Ri).

El *análisis de consecuencias* es utilizado como una componente del riesgo, en el que se tiene por un lado la severidad o probabilidad de la ocurrencia de un evento y por el otro lado la consecuencia que es el resultado de la ocurrencia del evento. Si la vulnerabilidad (severidad del evento) es alta la consecuencia es grave y el resultado es un alto riesgo, por el contrario, la baja vulnerabilidad combinada con una consecuencia insignificante produce un riesgo muy bajo.

El estudio del riesgo (R) es una función, del producto de la gravedad (vulnerabilidad) de un evento y la consecuencia (C) del evento, el cual queda definido como:

$$R = V * C$$

(Ecuación 4. Tomada del trabajo (Ikpong, 2016). Evaluación de riesgos)

en dónde R = riesgo, V =vulnerabilidad y C =consecuencias. La figura 5.1 muestra la correlación entre las tres componentes de la evaluación del riesgo para los puentes analizados, para el método de evaluación propuesto en el trabajo de (Ikpong, 2016).

El modelo propuesto por Ikpong (2016) para evaluar la resiliencia, está basado en indicadores. Cada indicador de la resiliencia, es resultado del producto del peso en porcentaje (importancia) por la clasificación en su respectiva medida de capacidad. Un aspecto importante, es la teoría que hay detrás de la determinación de los pesos de los indicadores, los que se propone determinarlos con base en los costos iniciales de construcción de los componentes afectados (considerados) por el

indicador, al igual que las consecuencias en el servicio cuando son impactados por el evento extremo, así mismo se consideran los costos/inconvenientes a los usuarios de la red carretera.

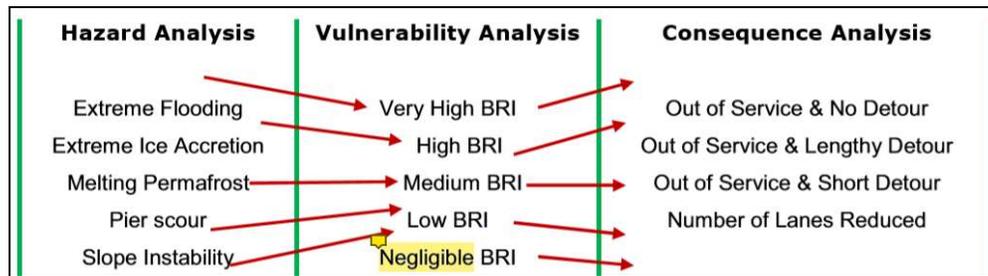


Figura 5.1 Componentes del modelo de evaluación de riesgo de un puente. Tomada de (Ikpong, 2016).

Cabe recalcar que la suma de los pesos de los indicadores suma 100%. De acuerdo con este criterio, es de esperar que los componentes más costosos sean relacionados con mayores pesos. En esta misma línea de pensamiento un componente al que sea asignado un peso alto y tenga una clasificación baja en la medida de capacidad asociada, dará como resultado una resiliencia baja para este índice y resultará en una reducción de la resiliencia total del puente, con ello señalando la urgencia de acciones de intervención. El peso (importancia) de cada indicador queda definido por las siguientes ecuaciones:

$$W(x) = (\alpha\beta\Phi)_i / \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i\beta_i\Phi_i(x)$$

(Ecuación 5. Tomada del trabajo (Ikpong, 2016). Peso de cada indicador de la resiliencia)

$$BR(W, R) = \sum_{i=1}^{i=n} W(x_i) * R(x_i)$$

(Ecuación 6. Tomada del trabajo (Ikpong, 2016). Cálculo de la resiliencia del puente)

en las cuales; W = peso calculado para cada indicador de la resiliencia (R_i), R = clasificación del puente en su medida de capacidad asociada con el indicador de resiliencia (R_i), BR = resiliencia del puente que se calcula como la suma de todos los indicadores de resiliencia (R_i), por el producto de sus respectivos pesos (W) y la clasificación en la medida de capacidad asociada al índice de resiliencia (R_i). x_1 a x_n son los indicadores de la resiliencia identificados para cada puente, α es el costo del componente dañado del puente por el evento extremo provocado por el clima, β es la consecuencia en el servicio o disponibilidad del puente debido al evento extremo, Φ es el costo o inconveniente

a los usuarios de la carretera si el comportamiento o disponibilidad son comprometidos en un evento extremo.

En resumen, a cada indicador de resiliencia se le asocia un peso (importancia) en función de parámetros de peso. Los indicadores de resiliencia están relacionados y se asocian con la clasificación en las medidas de capacidad, y mediante el producto del peso en porcentaje y su clasificación se calcula la resiliencia para cada indicador, y mediante la suma de la resiliencia de todos los indicadores, se determina la resiliencia del puente completo.

En el trabajo de Ikpong (2016), se considera que los indicadores de resiliencia son representativos del efecto del clima en el puente y para las regiones frías de Canadá son:

- Falla de estribo.
- Socavación de pila de puente.
- Erosión de estribo.
- Inundación de tablero.
- Estabilidad del estribo en permafrost.

Sus correspondientes medidas de capacidad son:

- Capacidad hidráulica.
- Protección contra socavación en pilas de puente.
- Aislamiento térmico de pilar de puente o presencia de pilas de cimentación (cimentación profunda)

La tabla 5.10 muestra la asociación de los indicadores de resiliencia con sus medidas de capacidad respectivas. La asociación de los indicadores muestra que se tendrán tres medidas de capacidad, ya que los indicadores de resiliencia, como por ejemplo la inundación del tablero está asociada a la medida de capacidad hidráulica, la que corresponde de igual forma al indicador de falla de estribo. El indicador inestabilidad del estribo en permafrost está asociado a la medida de capacidad de aislamiento térmico del estribo o presencia de pilas de cimentación que es la misma medida de capacidad para el indicador erosión de estribo.

Tabla 5.10 Asociación de los indicadores de resiliencia con las medidas de capacidad.

Resilience Indicators	Capacity Measures
Abutment washout	Hydraulic capacity
Pier scour	Pier protection
Abutment erosion	Presence of pile (deep) foundation
Deck flooding	Abutment thermal insulation or the presence of pile (deep) foundation
Abutment permafrost instability	Abutment thermal insulation or the presence of pile (deep) foundation

Nota. Fuente: Trabajo de (Ikpong, 2016).

Para poder determinar la resiliencia, se necesita determinar los indicadores de la resiliencia, por lo que se requiere calcular el peso de cada indicador, es decir su relativa importancia en la resiliencia total del puente. Retomando la teoría para la asignación del peso de cada indicador, los impactos en los componentes más caros tienen las más altas consecuencias en el servicio, así como los impactos en la forma de inconvenientes para el usuario. La suma de los pesos de todos los indicadores suma un 100%, al dividir el peso de cada indicador entre la suma de todos los pesos, se obtiene el peso en porcentaje que es el valor utilizado en el cálculo de la resiliencia al utilizarlo en la ecuación 6.

Para determinar el peso de cada indicador se utilizan tres parámetros α , β y Φ , que corresponden al costo de remplazo, consecuencia del evento y costos a los usuarios, respectivamente.

En resumen, el procedimiento para determinar la resiliencia del puente es:

- Se determinan los eventos extremos provocados por el clima que pueden ocurrir en el sitio de ubicación del puente.
- Se identifican los componentes que pueden verse afectados por los eventos extremos.
- Se establecen asociaciones entre los eventos extremos y los componentes afectados.
- Se definen los indicadores de la resiliencia del puente o vulnerabilidades, de acuerdo a cada tipo de evento.
- Se propone una guía de peso o importancia, con tres parámetros de peso: costo inicial, consecuencias y costos a los usuarios, es decir un esquema de parametros que definen el peso o la importancia de cada indicador anteriormente definido.

- Se propone una fórmula matemática para determinar el peso o importancia de cada indicador que captura la relativa importancia del componente afectado por el indicador de resiliencia y se calcula el porcentaje de peso.

$$W(x) = (\alpha\beta\Phi)_i / \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i\beta_i\Phi_i(x)$$

(Ecuación 7. Tomada del trabajo (Ikpong, 2016). Ecuación para determinar el porcentaje de peso o importancia de cada indicador de resiliencia [Ri])

en la cual W es el peso calculado para cada indicador de resiliencia.

x_1 a x_n , son los indicadores de resiliencia.

α = costo del componente directamente afectado por el indicador de resiliencia.

β = consecuencia para el puente, cuando el componente es afectado.

Φ = costo a los usuarios, si el comportamiento del puente está comprometido.

- Se identifican las medidas de capacidad relevantes.
- Se propone una guía para clasificar las medidas de capacidad, las cuales se pueden obtener al incorporar en una nueva sección en la forma de inspección del puente.
- Se clasifica cada puente del inventario de puentes en las medidas de capacidad.
- Se determina cada indicador de la resiliencia del puente como el producto del porcentaje de peso o importancia y la clasificación de la medida de capacidad. Al sumar todos los indicadores de la resiliencia se obtiene el valor total de la resiliencia del puente, como describe la ecuación:

$$BR(W, R) = \sum_{i=1}^{i=n} W(x_i)R(x_i)$$

(Ecuación 8. Tomada de (Ikpong, 2016). Evaluación de la resiliencia mediante indicadores de la resiliencia)

en la cual BR, es la resiliencia del puente, calculada con base en los indicadores de resiliencia.

W, es el porcentaje de peso/importancia, calculado para cada indicador de resiliencia.

R, es la clasificación del puente, en las medidas de capacidad asociadas con los indicadores de resiliencia (Ri).

5.2 Evaluación mediante la probabilidad de falla.

Lounis (2014), comenta que la resiliencia es un prerrequisito de la sustentabilidad, ya que la resiliencia involucra, una vida útil larga y una probabilidad baja de falla o interrupción. De acuerdo con su enfoque, la resiliencia se puede definir como la insensibilidad de los puentes a las fallas locales. Es decir, entre menos riesgo de falla más resiliente el diseño y más tendencia a la sustentabilidad, de acuerdo con la idea de que la resiliencia es un requisito de la sustentabilidad.

Se propone el cálculo de riesgo de falla (que implícitamente es un indicador de la resiliencia) como el producto de la probabilidad de falla, por las consecuencias de falla.

La probabilidad total de falla se calcula con la fórmula propuesta por (Joint Committee on Structural Safety [JCSS], 2008) cómo se describe a continuación:

$$P_f = \sum_{i=1}^{n_H} p(H_i) \sum_j^{n_D} \sum_{k=1}^{n_s} p(D_j|H_i) p(S_k|D_j)$$

(Ecuación 9. Tomada del artículo (Lounis, 2014). Probabilidad de falla)

en donde H_i representa a cada riesgo, n_H es el número de riesgos, n_D el número de niveles daño (D), n_s número de comportamientos estructurales (S) posterior al daño. La ecuación plantea la posibilidad de evaluar la resiliencia ante varios riesgos, por medio de ella.

En cuanto a las consecuencias de la falla se propone dividir las en tres grandes categorías que corresponden a los pilares de la sustentabilidad; consecuencias sociales, consecuencias económicas y consecuencias ambientales.

Así el riesgo de falla se obtiene multiplicando la probabilidad de falla (P_f) determinada con la ecuación 9 por las consecuencias de la falla como se muestra en la ecuación 10.

$$R_f = P_f * C_f$$

(Ecuación 10. Con base en el artículo (Lounis, 2014). Riesgo de falla)

donde R_f es el riesgo de falla, P_f es la probabilidad de falla y C_f las consecuencias de la falla. Para las consecuencias de la falla se recomienda tomar en cuenta las consecuencias sociales, económicas y ambientales y entre menor sea el riesgo de falla la estructura es más resiliente.

5.3 Evaluación mediante la combinación de modelos de vulnerabilidad, pérdida y recuperación.

Banerjee et al. (2014), calculan la resiliencia ante el escenario múltiple de sismo y socavación inducida por inundación, combinando el modelo de vulnerabilidad del puente con modelos apropiados de pérdida y recuperación.

Se considera a la resiliencia matemáticamente como una cantidad adimensional, que representa la rapidez del sistema para recuperarse de una condición de daño a un nivel de funcionalidad anterior al daño. Considera a la pérdida debida a un evento natural y a la recuperación del comportamiento posterior al evento del sistema, como sus dos componentes principales. La expresión matemática utilizada para evaluar la resiliencia es la ecuación de Cimellaro, Reinhorn, & Bruneau (2010):

$$R = \int_{t_{0E}}^{t_{0E}+T_{LC}} \frac{Q(t)}{T_{LC}} dt$$

(Ecuación 11. Tomada de Banerjee et al., (2014). Evaluación de la resiliencia)

en donde t_{0E} representa el tiempo en el que el evento E ocurre, T_{LC} es el tiempo de control en el que se evaluará la resiliencia, $Q(t)$ representa la funcionalidad del sistema, en función del tiempo y es adimensional.

En la ecuación 11, $Q(t)$ es la expresión analítica que constituye una función de pérdida y una función de recuperación del sistema durante el periodo de interrupción del mismo debido al evento extremo:

$$Q(t) = 1 - [L(I, T_{RE}) \times \{H(t - t_{0E}) - H(t - (t_{0E} + T_{RE}))\}] \times f_{rec}(t, t_{0E}, T_{RE})$$

(Ecuación 12. Tomada de Banerjee et al., (2014), funcionalidad del sistema)

en la cual $L(I, T_{RE})$ es la función de pérdida, f_{rec} es la función de recuperación, I es la intensidad sísmica, T_{RE} es el tiempo de recuperación del evento E y t_{0E} es el tiempo en el que ocurre el evento E. En esta expresión se observa el uso de la función escalón de Heaviside $H()$, la cual es una función discontinua que toma valores entre 1 y 0, basada en argumentos positivos o negativos. Esta puede tomar valores de $Q(t) = 1.0$ en caso de no existir pérdida y $0 < Q(t) < 1.0$ cuando se presenta pérdida, debido al daño sísmico. El evento E hace referencia al sismo.

La función de recuperación (f_{rec}) después de un evento sísmico, es en la que se utiliza el modelo de recuperación el cual puede ser lineal, trigonométrico y exponencial negativo. Se propone usar el modelo de recuperación lineal, ya que es el que más se acerca al comportamiento real.

Cimellaro, Reinhorn y Bruneau (2010). En este artículo la evaluación de la resiliencia se hace mediante la combinación de funciones de pérdida y recuperación. Definen gráficamente a la resiliencia, como el área sombreada normalizada, bajo la función de funcionalidad del sistema, definida como $Q(t)$, la cual es un proceso estocástico no estacionario (proceso que usa magnitudes aleatorias que varían con el tiempo) y cada conjunto es una función continua para cada parte o etapa que la conforma, como la ocurrencia del evento que implica pérdida de la funcionalidad, la recuperación de la funcionalidad y la funcionalidad objetivo. La funcionalidad $Q(t)$ es una medida adimensional (%) en función del tiempo para un solo evento. La resiliencia se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R = \int_{t_{0E}}^{t_{0E}+T_{LC}} Q(t)/T_{LC} dt$$

(Ecuación 13. Tomada del artículo (Cimellaro, Reinhorn, & Bruneau, 2010). Resiliencia del puente) en la cual:

$$Q(t) = [1 - L(I, T_{RE})][H(t - t_{0E}) - H(t - (t_{0E} + T_{RE}))] \times f_{rec}(t, t_{0E}, T_{RE})$$

(Ecuación 14. Tomada del artículo (Cimellaro, Reinhorn, & Bruneau, 2010), funcionalidad) donde, $L(I, T_{RE})$ es la función de pérdida, $f_{rec}(t, t_{0E}, T_{RE})$ es la función de recuperación, $H()$ es la función paso de Heaviside, T_{LC} es el tiempo de control del sistema, T_{RE} es el tiempo de recuperación del evento E, t_{0E} es el tiempo de ocurrencia del evento E.

La **función de pérdida** $L(I, T_{RE})$, se integra por cuatro tipos de pérdidas en función de la intensidad del sismo (I) y el tiempo de recuperación (T_{RE}), siendo estas: pérdidas económicas directas (L_{DE}), pérdidas directas por decesos (L_{DE}), pérdidas económicas indirectas, (L_{IE}) pérdidas indirectas por decesos (L_{IC}).

Ya que las pérdidas económicas directas se presentan principalmente en la estructura física se calculan como la suma de la relación de costos de reparación y sustitución de cada componente de la estructura. En la formulación del modelo matemático de esta, se integran las curvas de fragilidad que indican que las pérdidas directas están condicionadas a la ocurrencia de un sismo de intensidad (I). Las pérdidas directas por decesos se calculan como la relación del número de lesionados y el número total de ocupantes de la estructura o construcción. Para las pérdidas económicas indirectas al ser más complejas, debido a que consisten en la interrupción de negocios, gastos por reubicación

y pérdidas de ingresos por alquiler entre otras, solo se comenta que se deben considerar las pérdidas estructurales y no estructurales. En cuanto a las *pérdidas indirectas por decesos* se calculan como la relación de personas heridas o decesos por la interrupción de la funcionalidad del servicio médico y la población total a la que la estructura (puente) permite el servicio de atención médica (hospitalaria).

Los **modelos de la función de recuperación** usados dependen del sistema y de la preparación de respuesta de la sociedad, y son tres lineal, exponencial, trigonométrica. Su forma gráfica se muestra en la figura 5.2.

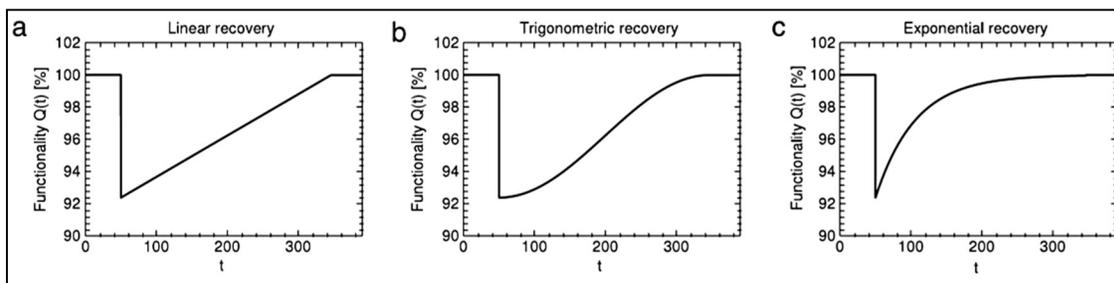


Figura 5.2 Curvas de funcionalidad (a) Comunidad medianamente preparada, (b) Comunidad mal preparada, (c) Comunidad bien preparada. Tomada de (Cimellaro, Reinhorn, & Bruneau, 2010).

Se utiliza la función de recuperación lineal cuando no hay información disponible sobre la preparación, los recursos disponibles y la respuesta de la sociedad. La función de recuperación exponencial se usa cuando la respuesta social es impulsada por un flujo inicial de recursos, pero la rapidez de recuperación decrece cuando el proceso se acerca al final. La función de recuperación trigonométrica se usa cuando la respuesta social y la recuperación son conducidas por la falta o limitada organización y/o recursos al inicio y al final la recuperación del sistema comienza y la rapidez de recuperación se incrementa. Sin embargo, los modelos propuestos solo son válidos para sistemas de salud. Para modelos generales y más precisos se recomiendan usar los propuestos por B. Miles & E. Chang (2006).

Para evaluar la resiliencia, se calculan las curvas de fragilidad y así poder calcular la función de pérdida, para la que se necesita el cálculo de las pérdidas directas (L_D) e indirectas (L_I). Se selecciona la función de recuperación de acuerdo con la cantidad de información disponible, y se sustituyen los valores en la ecuación 14 con lo que se obtiene la funcionalidad en porcentaje, posteriormente se sustituye la funcionalidad en la ecuación 13, y mediante la integral se obtiene la resiliencia ante sismo.

5.4 Evaluación mediante la funcionalidad o calidad.

Bruneau y Reinhorn (2006), proponen cuantificar la resiliencia ante sismo, midiendo la calidad $Q(t)$ de la infraestructura de una comunidad que varía con el tiempo, ya que esta contiene los objetivos de la resiliencia. Varía en un rango de 0% a 100%, donde 100% representa la no degradación de la calidad y el 0% la pérdida total de la misma. La resiliencia se logra al reducir la probabilidad de falla durante un sismo y también sus consecuencias.

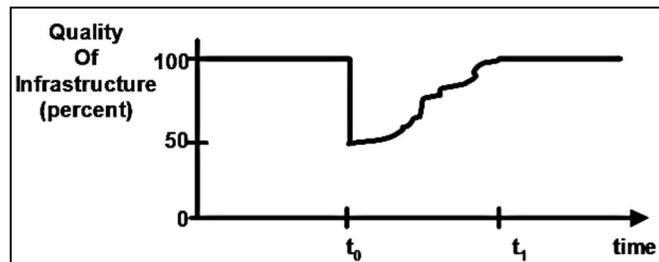


Figura 5.3 Representación esquemática del concepto de resiliencia. Tomada de (Bruneau & Reinhorn, 2006).

En la figura 5.3, se observa una reducción abrupta de la calidad en el instante t_0 en el que se presenta un evento sísmico, seguido de la gradual recuperación de la calidad hasta el instante t_1 . Las acciones de rehabilitación de la comunidad, sistema o puente, son las que permiten la recuperación de la calidad.

La pérdida de la resiliencia (R) ante sismo de la comunidad o puente con respecto a un sismo específico, puede ser medida por el tamaño esperado de la degradación en la calidad (con base en la probabilidad de falla) en el tiempo (que incluye el tiempo de recuperación) y matemáticamente se define como:

$$R = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt$$

(Ecuación 15. Tomada del artículo (Bruneau & Reinhorn, 2006). Evaluación de la resiliencia)

Es difícil definir y cuantificar $Q(t)$ (eje vertical en la figura 5.3), ya que no es una medida simple, sino que está integrada por las diferentes características de la resiliencia, sin mencionar la dificultad de su cuantificación. Cada una de las características (robustez, redundancia, inventiva y rapidez) de la resiliencia se pueden ver reflejadas en el comportamiento de la calidad través del tiempo. Por ejemplo, con la cantidad de recursos asignados para la rehabilitación del sistema se reduce el tiempo

de recuperación o se extiende según sea el caso, esto se refleja en la gráfica de calidad a través del tiempo mediante un tercer eje, el cual es el de los recursos.

En la figura 5.4 se puede observar este tercer eje, su relación y variación. Al disminuir los recursos en la curva de recuperación, aumenta el intervalo de tiempo en el cual se alcanza el nivel de calidad al 100% y su posición se atrasa sobre el eje de recursos. Al aumentar los recursos, se refleja en un aumento en la posición de la gráfica sobre el eje de recursos en la dirección del eje, y se reduce el tiempo de recuperación.

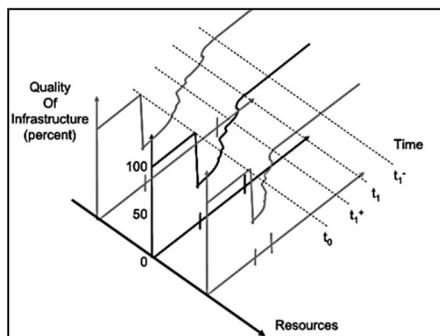


Figura 5.4 Representación del concepto de resiliencia en 3D. Tomada de (Bruneau & Reinhorn, 2006).

Los autores proponen la cuantificación de la resiliencia ante sismo, por medio de un concepto que incluye el deslizamiento de una curva de campana multidimensional superpuesta de respuesta de la estructura para la evaluación de la resiliencia ante sismo (**SOMBRERO**, por sus siglas en inglés), usando un entorno de espacio límite ortogonal (**OLE**, por sus siglas en inglés). La curva de campana de respuesta, es una superficie de distribución de probabilidad que vista desde arriba se puede presentar como contornos de isoprobabilidad, los que por facilidad tienen una forma esférica (circular vistos desde planta). Al espacio límite ortogonal se le asignan ejes que corresponden a las pseudo aceleraciones de piso (PSA floor) y los desplazamientos de entre piso (S_d floor) con límites específicos estructurales y no estructurales, *las aceleraciones de piso y desplazamientos de entrepiso son parámetros de probabilidad de la respuesta estructural*. Para el estado límite estructural, se usa el estado límite de servicio (en el que aparecen grietas en elementos estructurales de concreto) y el estado límite de colapso. La probabilidad, de que la respuesta exceda un límite específico puede ser calculada directamente por el volumen bajo la superficie de la distribución que excede dicho límite. Las diferentes medidas de rehabilitación pueden desplazar la curva de isoprobabilidad, su tamaño, al igual que los límites dotados dentro del espacio OLE, como se observa en la figura 5.5, por ello se usan los límites estructurales y no estructurales.

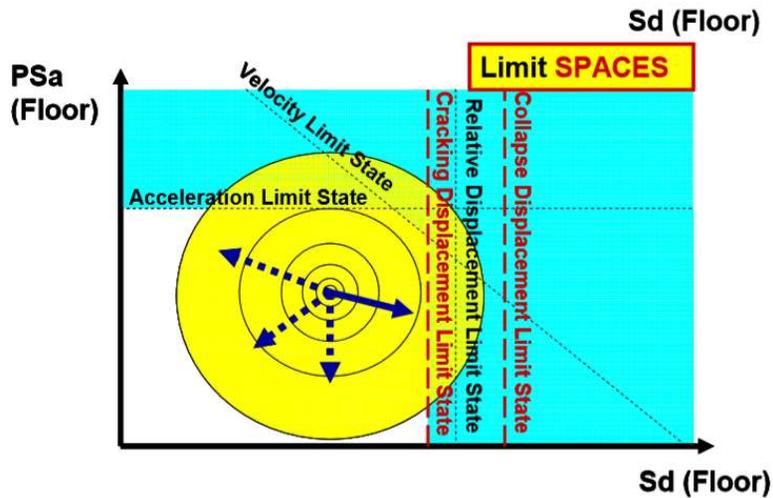


Figura 5.5 Probabilidad que la respuesta exceda el espacio límite, diferente secuencia de estados límite. Tomada de (Bruneau & Reinhorn, 2006).

Para el caso de la respuesta estructural inelástica no lineal, se usa la misma teoría. Para evaluar la resiliencia se calcula la **curva de la resiliencia ante sismo** por medio de la intersección cuantificable entre la superficie probabilística de respuesta del sistema y los estados límite estructurales dentro del OLE, la intersección cuantificable es la **probabilidad de exceder el espacio límite (P_{LS})**, y generalmente se incrementa en función del periodo de retorno del sismo. Con el cálculo de P_{LS} se propone obtener la curva de resiliencia ante sismo en el tiempo en términos de la pérdida de la inversión estructural (N_{INV}), como se muestra en la figura 5.6, con línea punteada.

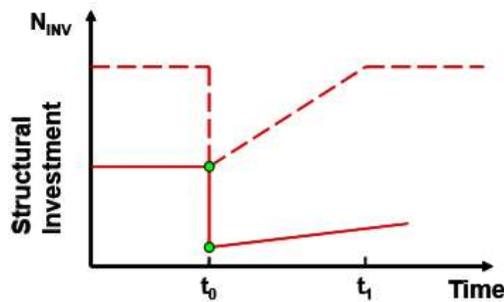


Figura 5.6 Curva de resiliencia estructural ante sismo, si la estructura se deja sin reparar. Tomada de (Bruneau & Reinhorn, 2006).

En la figura 5.6 se observa que la calidad (funcionalidad), se mide como la pérdida de la inversión estructural, en la que la inversión estructural representa al puente o estructura. Antes del instante t_0 se tiene el valor de la inversión inicial, cuando ocurre el viento ocurre la pérdida de la inversión estructural (daño de la estructura), y a través de las acciones de rehabilitación se puede recuperar

la inversión perdida, e incluso aumentarla, lo que quiere decir que se mejora la resiliencia y su preparación ante eventos extremos, hasta el instante t_1 . La línea continua representa el escenario en el que el puente o estructura se deja sin reparar después del evento de sismo y ocurre otro evento de sismo similar que puede resultar en una nueva pérdida de la inversión, que llegue a estar muy cerca del cero, lo que indicaría la pérdida total de la inversión, es decir, el colapso del puente o estructura. En el modelo propuesto, se integran en un solo enfoque de funciones de probabilidad, fragilidad y resiliencia, para en estudios posteriores desarrollar y sustentar el modelo matemático.

Bocchini y Frangopol (2012), consideran a la resiliencia como la habilidad de recuperar la funcionalidad de puentes a lo largo de un segmento de autopista. Se propone el cálculo de la resiliencia, con el modelo matemático que la define como la integral de la funcionalidad con respecto al tiempo.

$$R = \int_{t_0}^{t_h} Q(t) dt$$

(Ecuación 16. Tomada del artículo (Bocchini & Frangopol, 2012). Modelo de evaluación de la resiliencia)

donde t_0 es el tiempo en el que el evento extremo ocurre, t_h es el tiempo horizonte de investigación y $Q(t)$ la funcionalidad del sistema de puentes. Se considera a la resiliencia (R) como el área, bajo la curva de funcionalidad (teoría gráfica), es decir la resiliencia se calcula como la integral de la funcionalidad con respecto al tiempo, como aparece en la figura 5.7.

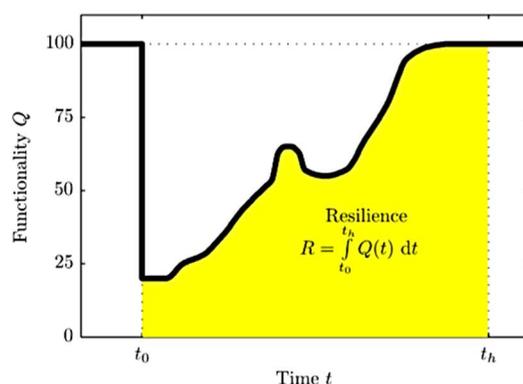


Figura 5.7 Definición de resiliencia. Tomada de (Bocchini & Frangopol, 2012).

Es importante resaltar que la resiliencia tiene unidades de tiempo (en años) y que el valor de R depende en gran medida de la elección del t_h , es decir, del horizonte de investigación, ya que este

influye en la resiliencia. Por ejemplo, para una calidad constante de funcionalidad se puede tener una $R=100$ años, con un $t_h=2$ años, pero con un $t_h=1$ años tener una $R=50$ años, con la misma calidad. Por ello en la comparación entre diferentes valores de resiliencia, es importante tener un t_h constante.

La **funcionalidad** se mide con base en el flujo de tráfico de vehículos por el segmento de autopista. El modelo de tráfico usado considera la distancia y el tiempo de viaje para el conjunto de puentes que son parte del segmento de autopista en análisis. También toma en cuenta el impacto de los puentes en el tráfico en función de la condición del daño de estos. Así mismo considera la configuración de estos (si lleva el tráfico del segmento de pista o lo cruza), ya que, si el puente se encuentra llevando el tráfico del segmento de autopista, tiene mayor impacto que si lo cruza, debido a que si se llevan a cabo actividades de restauración en el puente que cruza, incluso si estas, aún no se terminan para un estado de daño ligero, el tráfico de la autopista se restaura totalmente. El modelo de tráfico se basa en el algoritmo Frank-Wolfe (Bocchini & Frangopol, 2011), el cual es un sofisticado algoritmo para el problema de distribución y asignación de tráfico integrado en redes complejas, en el cual el costo de cada segmento de carretera es el tiempo para recorrer ese segmento. A este algoritmo se le incluyen las distancias y tiempos, debido a las rutas de desvío. Para completar el modelo de tráfico, que expresa la funcionalidad del sistema, usado para la evaluación de la resiliencia, cabe mencionar que se considera que todos los puentes tienen una ruta de desvío.

Para completar el método de evaluación de la resiliencia, los autores proponen el **modelo de recuperación** que se implementa en conjunto con la funcionalidad. El modelo de restauración del puente “b” se ilustra en la figura 5.8.

El proceso de restauración inicia en t_0 cuando ocurre el evento extremo, provocando el **nivel de daño** l_b^0 (el nivel de daño se mide de 0-4), este **se obtiene de inspecciones posteriores al evento**. Los parámetros que caracterizan la intervención, son el tiempo de inactividad o retraso (δ_b) que da la forma plana superior, y (θ_b) que determina el ritmo de la restauración y a su vez el momento en el que se completa la restauración, siendo igual a la pendiente del modelo. En especial el valor de (θ_b) se restringe a (θ_{min}) y (θ_{max}) debido a que intervenciones muy lentas son poco convenientes e intervenciones muy rápidas no son realistas. θ_{max} se evalúa con la formula $arctan$ (daño fijo/mínimo tiempo requerido) de forma similar para θ_{min} . Cuando el tiempo se mide en meses, se consideran valores realistas de $\theta_{min} = 30^\circ$ y $\theta_{max} = 80^\circ$. Cabe mencionar que la velocidad de reparación

difiere del concepto de rapidez usado en otros enfoques, además que se asume que el **modelo de recuperación es de forma lineal**.

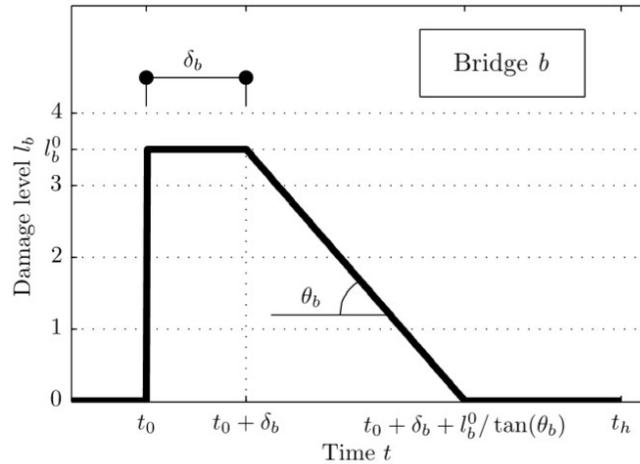


Figura 5.8 Modelo de restauración. Tomada de (Bocchini & Frangopol, 2012).

En la figura 5.8 se representa el modelo de restauración; las variables de diseño son el tiempo de retraso entre la ocurrencia del evento extremo y el comienzo de la restauración (δ_b) y la velocidad de restauración (θ_b), se supone que la relación entre el tiempo transcurrido desde el inicio de la restauración y el nivel del daño es lineal (modelo lineal).

Con la funcionalidad (con base en el tiempo total de viaje) y el modelo de recuperación que es lineal se puede hacer uso de la ecuación 16 para evaluar la resiliencia con unidades de tiempo en años. Adicionalmente los autores proponen un modelo de costo, el cual se utiliza en conjunto con un algoritmo de optimización multiobjetivo que permite seleccionar los valores con mayor resiliencia y menor costo en función de la velocidad de reparación (θ_b) y el tiempo de retraso (δ_b).

Biondini, Capacci y Titi (2017), evalúan la resiliencia para una red de puentes, los cuales son parte de una red carretera. La resiliencia de estos se evalúa ante el escenario de corrosión y sismo. Definen a la resiliencia como la habilidad de un sistema para soportar los efectos de un evento disruptivo, y recuperar rápida y efectivamente la funcionalidad anterior al evento. Para poder considerar el efecto del deterioro por el tiempo (es decir la vejez de la estructura) se evalúa la resiliencia en diferentes etapas de la vida útil de la estructura.

Se evalúa para varios estados límite mediante la variación en el tiempo de la fragilidad sísmica de los puentes deteriorados, y se relacionan las limitaciones por el daño hasta el colapso. Los niveles de daño sísmico dependen del tiempo de ocurrencia del sismo, debido al envejecimiento y se relacionan con las restricciones y limitaciones aplicadas. Se realiza un análisis de tráfico en toda la red para calcular la variación en el tiempo de la funcionalidad y la resiliencia ante sismo.

Se propone evaluar la capacidad sísmica mediante un análisis dinámico incremental.

Se utilizan 4 **estados de daño**: daño ligero, moderado, extensivo y colapso completo, a los que se le asocian restricciones de tráfico para los usuarios siendo estas: restricciones de peso, solo una línea abierta, solo accesos a servicios de emergencia y la clausura total de la estructura, respectivamente.

Para evaluar el deterioro con el tiempo se considera el **escenario de corrosión inducida** por cloruros para puentes de concreto, en el cual el ingreso de los cloruros es modelado con las leyes de difusión de Fick, que describen la difusión de fluidos en la materia, en función de la concentración de estos y se describe usando la teoría celular automática que sirve para simular el proceso de difusión (Biondini, Bontempi, Frangopol, & Malerba, 2004). El principal efecto de la corrosión es la reducción del área de la sección transversal del acero de refuerzo (reducción del diámetro) lo que se traduce en la reducción de la ductilidad del acero. Los efectos de la corrosión se modelan como la reducción del esfuerzo de fluencia último del acero (ε_{su}), y la reducción del esfuerzo a compresión del concreto (f_c), en función del índice de daño (δ_s), y este se integra al modelo, con las reducciones mencionadas para realizar el análisis de fragilidad que depende la intensidad del sismo, quedando así integrado el escenario múltiple. Y ya que la corrosión está en función del tiempo, lo que indica la variación en el tiempo del ingreso de los cloruros que provocan la corrosión, esta se evalúa para diferentes etapas de la vida útil de la estructura que expresa el deterioro con el tiempo de la estructura.

La **funcionalidad** se basa en el flujo de tránsito de vehículos por el sistema de puentes que forma parte de la red carretera, para lo que se realiza un análisis de tráfico del sistema, expresado este como el tiempo total de viaje gastado por los usuarios para recorrer el tramo carretero (TTT, por sus siglas en inglés) en el cual se consideran las rutas de desvío y el cual está en función del TTT antes y después del daño y se calcula para cada estado de daño. A nivel de red este se describe mediante

un conjunto de valores discretos (valores de funcionalidad de cada puente) en función del daño de los puentes.

Para completar el modelo de la funcionalidad se propone un **modelo de recuperación** a nivel de componente de puente, es decir de cada puente de la red de puentes, este es adimensional con valores en el intervalo $[0,1]$ y depende del estado de daño del puente. A nivel red se logra un modelo de recuperación por etapas, ya que está en función del nivel de recuperación de cada puente que integra la red.

Finalmente, la **resiliencia de la red** carretera se calcula como la integral de la función de recuperación de funcionalidad de la red, paso a paso (siendo estos constantes), la cual ya consideró la pérdida de funcionalidad debida al evento de sismo en función del estado de daño y su recuperación (se tiene el modelo de funcionalidad completo del puente), para un horizonte temporal definido (vida útil). Se considera paso a paso, ya que el intervalo de integración abarca desde el inicio de las actividades de restauración hasta el final de estas, y por facilidad se divide en intervalos definidos entre dos actividades de restauración. Estos intervalos son iguales y constantes (paso a paso), hasta la funcionalidad objetivo.

La resiliencia se calcula para cada estado de daño potencial, y se obtiene un solo valor de resiliencia al hacer un promedio de la resiliencia considerando cada estado de daño, y usando la probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño (obtenida de las curvas de fragilidad) como coeficientes de peso, lo que indica que entre más probable el estado de daño mayor es su peso en el promedio de la resiliencia.

Capítulo 6 EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para el ejemplo de aplicación se opta por utilizar el método desarrollado por Ehsan Minaie y Franklin Moon (2017), presentado en el artículo “Practical and Simplified Approach for Quantifying Bridge Resilience”, presentado anteriormente. Esto debido a que permite cuantificar la resiliencia con datos existentes en el inventario o diseño del puente. Además, es práctico y permite una evaluación preliminar de la resiliencia de estructuras nuevas y existentes, para poder llevar a cabo posteriormente un análisis más detallado si fuera necesario.

El ejemplo de aplicación se realiza con un puente, ubicado sobre el Río Lerma, Estado de México. El puente, también conocido como cuerpo “C”, forma parte del proyecto de ampliación de la autopista Toluca-Atlaconulco (incluye el libramiento de Atlaconulco).

6.1 Características del puente en estudio.

El puente está identificado como “**PUENTE RÍO LERMA KM 7+649.07**” (Impulsora del Desarrollo y el Empleo en América Latina [IDEAL], 2015). Se encuentra sobre el Río Lerma, que es la principal corriente de agua de la cuenca de este río, el cual nace en la laguna Almoloya del Río y mide casi 175 km de longitud, hasta salir por Temascalcingo hacia Querétaro; por su poca pendiente provoca bajo índice de oxigenación y estancamiento de agua (EDOMEX, 2019).

La ubicación se muestra en la figura 6.1. Las coordenadas de su ubicación son: 19.475343, -99.733656 ó 19°28'31.2"N 99°44'01.2"W, latitud y longitud, respectivamente (Google Maps, 2020), y corresponden a la intersección de la autopista Toluca - Atlaconulco (55D) y el Río Lerma. Dentro de las obras significativas cercanas, se encuentra la Presa José Antonio Alzate, la cual se ubica al sur del municipio de Temoaya y al norte de Toluca, construida en 1962 para aprovechar las aguas de Río Lerma para riego y como depósito para control de inundaciones (Garíudo Hoyos & García Aragón, 1997). La presa tiene una avenida de diseño de 800 m³/s, descargando hasta 254 m³/s, al río sobre el que se encuentra el puente en estudio. (IDEAL [2], 2015).

El gasto de diseño (Q_{D1}) calculado para el puente es de 257.0 m³/s, con un nivel de aguas de diseño (N.A.D.I.) de 2,535.06 m y calculando la elevación de lecho inferior de la superestructura en 2,538.0

m, y con un **claro vertical** (Bordo libre) de **2.94 m**. En proyecto se consideró un claro vertical de **2.502 m** para el claro central y 2.805 m en los extremos (IDEAL [2]).

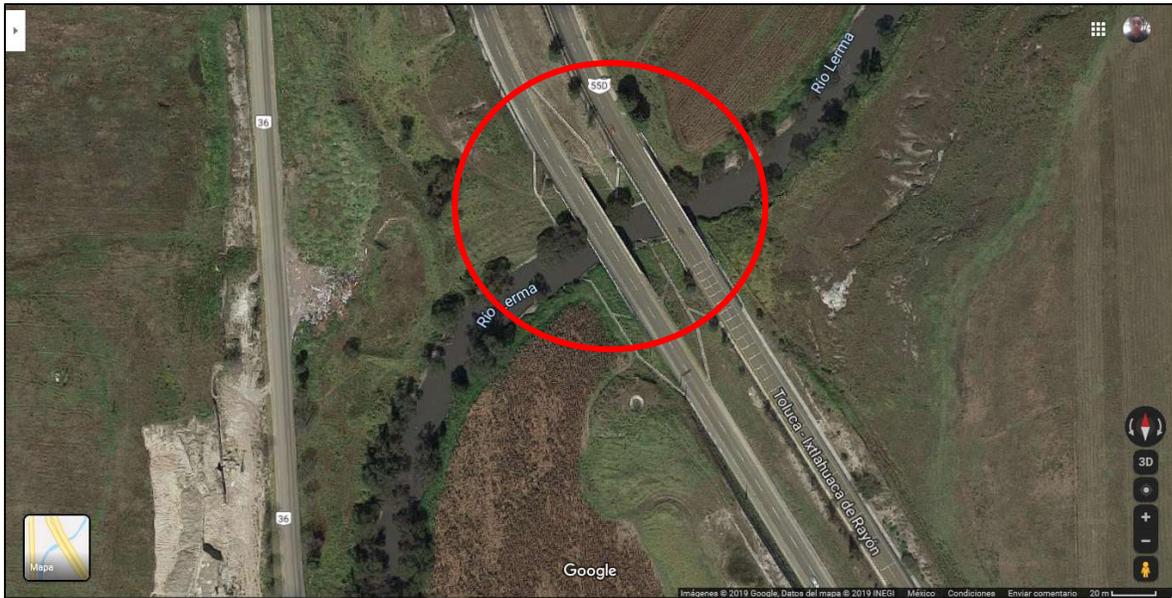


Figura 6.1 Ubicación del Puente Cuerpo C. Tomada de (Google Maps, 2020). Consultada diciembre 2019.

El **sitio del puente** se ubica en la **región sísmica B** y con **suelo tipo II**, de acuerdo con el Manual de Diseño de Obras Civiles (Diseño por Sismo) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Las Zonas B y C son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente (Servicio Geológico Mexicano [SGM], 2020).

La **superestructura** es de concreto y está formada por **tres claros apoyados sobre traveses AASHTO** tipo III, para los claros extremos de 10.63 m y traveses AASHTO tipo IV de 30.65 m para el claro central. Con una **longitud total de 51.91 m** y con un **ancho total de 11.3 m**.

Los **apoyos** de la superestructura son del tipo **integrales de neopreno** fijos y móviles. Estos apoyos corresponden a los apoyos especiales tipo cazoleta (SCT, 2019) . Se prevén **topes sísmicos** en los cabezales de concreto reforzado, para restringir el movimiento horizontal.

Los **estribos son en forma de “u”**, con su respectivo diafragma y aleros de concreto reforzado. La **cimentación** de estos, al igual que para toda la subestructura es por medio de **pilas** de sección constante trabajando por apoyo de su **punta** desplantadas a 15 m de profundidad. Los estratos que corresponden a esta profundidad son: **limo arcilloso**, color café, con contenido de agua variable entre 30 y 43 %, índice de resistencia a la penetración estándar (IRPE) entre 20 y más de 50 golpes,

de consistencia entre firme y muy firme, del grupo ML-CL de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), para la margen del río sentido Atlacomulco (sondeo 1), y **Arenas limosas con gravas**, con contenido de agua variable entre 17 y 25 %, IRPE de más de 50 golpes, de consistencia dura, del grupo SC-GC según el SUCS, para la margen del río sentido Toluca (sondeo 2), (Impulsora del Desarrollo y el Empleo en América Latina [IDEAL], 2015). Es decir, suelos tipo II, terreno intermedio o de transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que están constituidos predominantemente por estratos arenosos y limos arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros (Infraestructura Educativa [INIFED], 2015).

En cuanto a la **socavación local en las pilas**, al estar los apoyos fuera del cauce del cuerpo de agua es muy poco probable que esta se presente de acuerdo con el nivel de aguas de diseño. La **socavación del cauce**, está resuelta por medio de enrocamiento junteado con mortero de cemento sobre los taludes de las márgenes del río, también conocido como recubrimiento o muro marginal (APARICIO, s.f.), por lo que se puede considerar que **está protegido contra socavación**.

Con respecto a la **historia de eventos**, se sabe por entrevistas a los pobladores cercanos que los niveles de agua en la temporada de lluvias no han rebasado la corona de los puentes existentes.

Las figuras 6.2 y 6.3 muestran esquemáticamente la sección longitudinal y transversal del puente en estudio. Se muestra que el nivel de aguas de diseño (N.A.D.I.) no alcanza la ubicación de las pilas de la subestructura. Las características más importantes del puente se observan en las figuras, como lo son número de pilas y claros, la profundidad de desplante, tipo de apoyos y la altura de bordo libre o claro vertical, todas estas características permitirán la evaluación de la resiliencia por medio del método considerado.

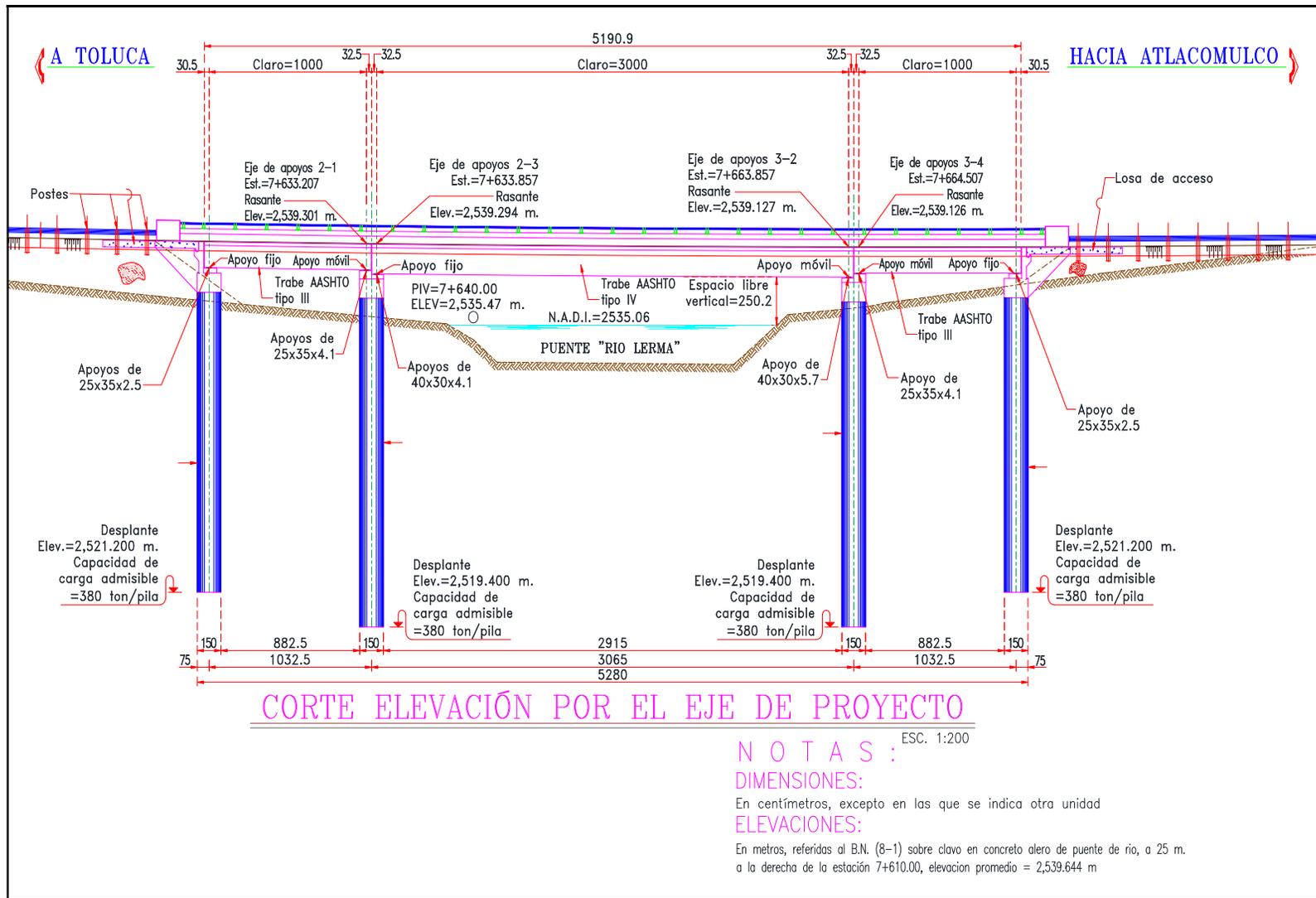


Figura 6.2 Figura esquemática (corte y elevación) del proyecto PUENTE RÍO LERMA KM 7+650, CUERPO C.

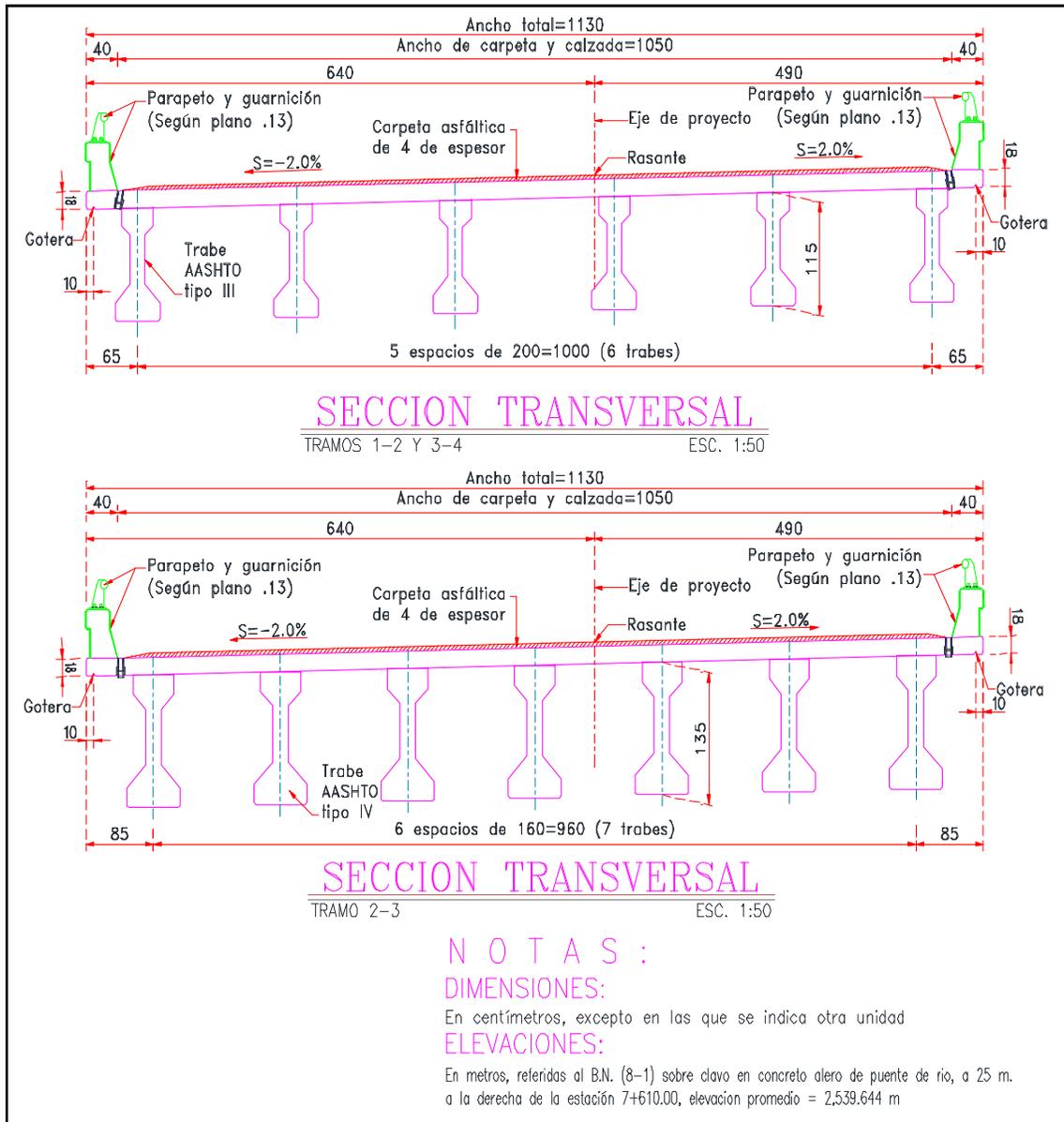


Figura 6.3 Figura esquemática (sección transversal) del proyecto PUENTE RÍO LERMA KM 7+650 CUERPO C.

6.2 Aplicación del método.

En conjunto con todas las características del puente presentadas y su ubicación, es necesario determinar la categoría de diseño sísmico. Haciendo uso de la norma de la SCT N*PRY*CAR*6*01*005/01 (SCT, 2019), se determina:

Su clasificación según su importancia (inciso B.1.1. de la norma referida): Tipo B

Que son puentes ubicados en carretas de dos carriles tipo A2 según la clasificación establecida en el Reglamento sobre el Peso, Dimensiones y Capacidad de los Vehículos de Autotransporte que Transitan en los Caminos y Puentes de la jurisdicción Federal, y en caminos rurales.

Clasificación según su comportamiento sísmico (inciso B.2.1. de la norma referida): 1s.

Para estructuras regulares en la que la superestructura se forma por tramos continuos de losas sobre trabes y que tiene menos de 6 claros continuos con un eje longitudinal con una curvatura reducida, y con esviajamiento (curvatura horizontal o vista de plata) menor a 15°, sin cambios bruscos de la masa de los elementos de la superestructura y subestructura, exceptuando a los estribos, y con un claro menor a 40 m y ancho de calzada menor a 30 m.

Zona sísmica (inciso D.1. de la norma referida): Zona B.

De acuerdo con el mapa de regionalización sísmica de la República Mexicana, proporcionado por la norma.

Tipo de Suelo (inciso D.2. de la norma referida): Suelo tipo II.

Suelos con estrato superior formado por arcillas semirígidas, con lentes de arena o por otros suelos friccionantes con espesor igual o mayor a 9 m, sobreyaciendo a un estrato constituido por suelos rígidos estables y con espesor no menor de 60 m.

Las clasificaciones, zona sísmica y tipo de suelo determinados con base en la norma anterior, se usan para obtener los **coeficientes sísmicos**, para el desarrollo del espectro sísmico correspondiente a la zona sísmica de ubicación del puente y al tipo del suelo en que se desplantara, de acuerdo con el inciso j de la norma usada, el cual se desarrollara más adelante. Los coeficientes son tomados de la tabla de valores característicos del espectro sísmico para estructuras tipo B de la norma consultada, los cuales se muestran en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Coeficientes sísmicos para el sitio de ubicación del puente en estudio.

Zona	Suelo	a_0	c	Ta	Tb	r
				(S)	(S)	
B	II	0.08	0.3	0.3	1.5	0.66666667

Nota. Coeficientes en función de la normativa (SCT, 2019).

En la tabla 5.5 del presente trabajo para la aplicación del método, el puente se clasifica de acuerdo con las categorías de diseño sísmico AASHTO, con base en el coeficiente de aceleración espectral de diseño (S_{D1}) para un periodo de $T_m=1$ s que es el valor ajustado del coeficiente de aceleración espectral de respuesta, al tipo de sitio de ubicación del puente en el primer segundo con propósitos de diseño sísmico.

Se puede observar en la figura 6.4, la gráfica del espectro de diseño el cual estrictamente ya no es un espectro de respuesta de aceleración, ya que se ha modificado para fines de diseño, por esto el AASHTO y la FHWA se refieren a este tipo de espectro, como espectro de coeficiente sísmico.

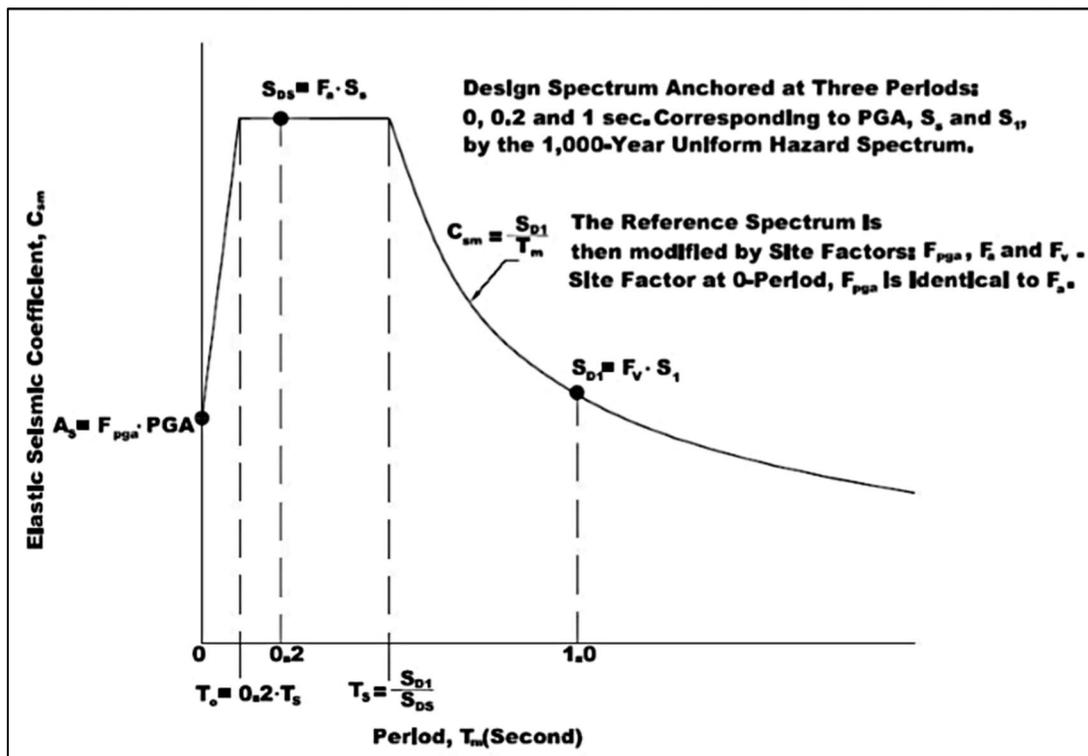


Figura 6.4 Coeficiente de Aceleración Espectral (S_{D1}). Tomada de (FHWA, 2004).

De esta grafica se observa que valor del coeficiente S_{D1} , usado en la clasificación del método presentado es de $S_{D1} = F_V \cdot S_1$, en donde, S_1 es una aceleración espectral tomada de los mapas de riesgo AASHTO y el servicio geológico de estados unidos (USGS, por sus siglas en inglés), para un periodo de retorno de 1000 años, para un sitio de roca, con un periodo de $T= 1$ s. El valor de F_V , es un factor de sitio el cual permite adecuar el espectro a las condiciones del lugar de ubicación para el periodo de $T= 1$ s, su valor se determina en función de las características del sitio y está presentado en tablas (FHWA, 2004). El objetivo del coeficiente S_{D1} es que al compararlo con la tabla 5.5 del presente trabajo, se pueda establecer una categoría de diseño sísmico, que refleja el riesgo de sismo de la zona de ubicación del puente.

Para poder establecer la categoría de diseño ante sismo para los puentes en México, con base en los datos recabados anteriormente y en función de la normativa SCT usada hasta ahora (inciso J), se puede construir el espectro sísmico característico que corresponde a la zona sísmica donde se ubica el puente y al tipo de suelo, este muestra la variación de la ordenada (a) que es la relación de la aceleración del sismo entre la gravedad para sus diferentes periodos de vibración (T). El espectro se construye con base en los valores característicos a_0, c, T_a, T_b, r , que se presentaron en la tabla 6.1, en conjunto con estos se necesita conocer el periodo de vibración de la estructura (T) que corresponde al periodo natural del primer modo de vibración de la dirección horizontal en análisis. Para estructuras tipo 1s y 2s puede calcularse de forma aproximada con la fórmula:

$$T = 0.2 \sqrt{\frac{W}{K}}$$

(Ecuación 11. Norma SCT, N*PRY*CAR*6*01*005/01. Periodo de vibración)

en donde T es el periodo de vibración de la estructura, medido en (s); W es el peso de la estructura con unidades en (kN); K es la rigidez de la estructura con unidades en (kN/cm) y está dada por la fórmula:

$$K = \frac{F}{\Delta}$$

(Ecuación 12. Norma SCT, N*PRY*CAR*6*01*005/01. Rigidez de la estructura)

en donde F es la fuerza estática horizontal de valor arbitrario, aplicada al centro de gravedad de la estructura en la dirección de análisis con unidades en (kN); Δ es el desplazamiento de la estructura

en la dirección de análisis, ocasionada por la fuerza F que se determina considerando el inciso L de la norma referida, con unidades en (cm).

Para el uso del espectro, es necesario determinar el periodo de vibración (T) de la estructura en función de la rigidez K , la que está en función de los desplazamientos Δ debidos a una fuerza horizontal arbitraria F . Con fundamento en que lo que se necesita, es un valor representativo asociado al peligro de sismo en la zona de ubicación del puente, al que se asocia a una categoría de diseño. Se propone determinar el periodo de vibración T del puente, como se describe a continuación.

Con base en una publicación del estudio del periodo de vibración de puentes de concreto en Panamá, para puentes de concreto con vigas tipo AASHTO, se establece la relación del periodo de vibración y la longitud del puente, como $T = \text{longitud} / 100$ (M. Rodríguez, M. Gallardo, & A. Araúz, 2017). Se propondrá un valor de $T = \text{longitud} / 100 = 51 / 100 = 0.51$ s.

Con el periodo $T = 0.51$ s y con base en la norma N*PRY*CAR*6*01*005/01 (SCT, 2019), para cuando $T_a < T \leq T_b$ es decir, $0.3 < 0.51 \leq 1.5$ toda ordenada $a = c = 0.3$, en el espectro. Observando la gráfica de la figura 6.4 el valor de aceleración del coeficiente S_{D1} corresponde a $T = 1$ s, para el espectro del puente en análisis el valor de la relación de aceleración del sismo entre la gravedad es de 0.3, por lo que se propone considerar $S_{D1} = 0.3$. Al comparar este coeficiente con la tabla 5.5 del presente trabajo, se obtiene una **categoría de diseño C** (severa).

Con respecto a huracanes y ciclones tropicales, el sitio de ubicación del puente se encuentra en una zona de poco riesgo por ciclones tropicales, de acuerdo con el mapa de riesgos por ciclones tropicales del Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED] (2012). Existe también un mapa interactivo de indicadores municipales de peligro, exposición y vulnerabilidad. De este mapa se obtienen los indicadores en una escala de colores que define 6 estados desde; “sin datos” hasta el “valor más alto”. Al introducir las coordenadas de ubicación, se obtienen los datos presentados en la tabla 6.2 (Atlas Nacional de Riesgos, 2020).

Al observar los valores determinados por medio de las tablas y compararlos con los obtenidos mediante la aplicación del Atlas Nacional de Riesgos (tabla 6.2) se observa que son similares, por lo que tienen coherencia los valores obtenidos.

Tabla 6.2 Indicadores de peligro para el sitio de ubicación del puente en estudio.

Indicador	Clasificación
Peligro por Inundación	Valor Alto
Ciclones tropicales	Valor más bajo
Sísmico	Valor Alto

Nota. Datos tomados del Atlas Nacional de Riesgos (Atlas Nacional de Riesgos, 2020).

Para continuar el cálculo, es necesario determinar de las combinaciones de *riesgo(H)*-*vulnerabilidad (V)*, el tiempo de recuperación (t_{rec}) y sus respectivos factores, así como el cálculo de la *importancia (I)*. Se usan las tablas 5.5 (Categorías sísmicas de diseño), 2.4 (Escala de vientos de Huracán Saffir-Simpson), 5.1 (Valores de riesgo (H)), 5.2 (valores de vulnerabilidad (V)), 5.3 (Factor de incertidumbre), 5.4 (Factor de importancia), 5.6 (Tiempo de restauración), 5.7 (Factor de ajuste, con respecto a las prácticas de agencia) y 5.8 (Factor de ajuste con base en historia de eventos extremos) y 5.9 (Factor de ajuste con base en el tipo de puente), para la evaluación de la resiliencia.

Máxima combinación de riesgos (H) y vulnerabilidad (V).

Con los datos presentados anteriormente se puede deducir la combinación de valores máximos de (H) y (V).

Clasificación de riesgos (H). El puente se localiza en una **planicie de inundación (H=3)** con bajo riesgo a huracanes (H=1), no se encuentra sobre rutas navegables (H=1), está localizado aproximadamente a 280 km de la costa (H=2), la sismicidad de la región de acuerdo con la categoría de diseño sísmico es C (H=2) y con un Transito Diario Promedio Anual (TDPA)= 5000 veh/día (H=2).

Con respecto a las vulnerabilidades (V), el puente está desplantado en estratos de limo arcilloso, arenas limosas con gravas y con cimentación profunda (pilotes de punta) (V=1). No hay evidencia de licuefacción (V=1), sin socavación (V=1). La superestructura está localizada sobre el nivel de inundación a los 100 años con 2.5 m sobre el agua (**claro vertical (V=3)**). Se tiene un sistema de protección contra socavación de los márgenes del cauce (V=2). La estructura cuenta con **mínima capacidad de distribución transversal (cuenta con topes sísmicos) (V=3)** y tiene apoyos de neopreno (V=1).

Con estos datos se determina que la máxima combinación que se puede presentar es de **H=3** para **planicie de inundación** y **V=3** para **claro vertical**.

Factor de incertidumbre (UF).

Se está usando solo información, la cual podría obtenerse de una inspección visual, por lo que $UF=1.2$.

Factor de importancia (I).

El factor que más se ajusta a las características del puente es **I=1**, de acuerdo con la clasificación propuesta en el trabajo de Franklin Moon (2017). Debido al tráfico proyectado entre 10,000 – 50,000 de acuerdo al tipo de carretera que es tipo A2 (SCT y IMT, 1995), y a que permite la conexión del centro del país con el Pacífico y al Golfo de México y la conexión con los estados de Jalisco, Nayarit, Sinaloa, Sonora y Baja California.

Funcionalidad residual (P_R).

Se calcula la funcionalidad residual con la ecuación 2:

$$P_R = [100\% - \max(9.259 \times H \times V \times UF) \times I] = [100 - (9.259 \times 3 \times 3 \times 1.2) \times 1] = 0\%$$

Tiempo de recuperación (t_{rec}).

Para el tiempo de recuperación, el valor de (t_{res}) al considerar un riesgo severo y regional para el evento de inundación toma un valor de 12 meses. Se asume que la agencia responsable no cuenta con prácticas de administración en eventos extremos ($\alpha_1=1$), sin historia de eventos extremos el año anterior a la evaluación o diseño ($\alpha_2=1$) y el puente es de múltiples claros, siendo estos menores a 15 m ($\alpha_b=1$). Por lo tanto, el tiempo de recuperación puede ser calculado con la ecuación 3 resultando:

$$t_{rec} = t_{res} \times \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_b = 365 \times 1 \times 1 \times 1 = 365 \text{ [días]}$$

Cálculo de la resiliencia.

Para el factor de importancia **I=1**, se obtiene una $P_R=0\%$.

Se considera la recuperación en un solo paso, y que este tiene una forma lineal, el modelo usado propone evaluar la resiliencia para un tiempo de control de 365 días. Sabiendo que el evento extremo golpea la estructura en el tiempo $t_0=0$, y que su funcionalidad residual después del evento es de $P_R = 0$, se determinó que el tiempo de recuperación es $t_{rec}= 365$ días, y que la funcionalidad

objetivo será al 100 % (funcionalidad anterior al evento extremo). Con esta información se puede construir el modelo de recuperación, como se muestra a continuación.

Con los 2 puntos que corresponden a la funcionalidad residual y objetivo respectivamente y la forma de recuperación se puede definir la ecuación de la recta (modelo lineal) que se usará en el cálculo de la resiliencia, la cual se integrará para el intervalo entre la ocurrencia del evento y el tiempo de control definido anteriormente como se muestra a continuación:

$$p_1(0,0) \text{ y } p_2(365,100); \text{ la pendiente } m = \frac{(p_2-p_1)}{(t_2-t_1)} = \frac{100-0}{365-0} = \frac{100}{365}; \text{ Asi } p(t) = \frac{100t}{365}$$

Cabe mencionar que para este ejemplo el tiempo de recuperación t_{rec} es el mismo que el tiempo de control (365 días) y que el tiempo de recuperación se usa al definir la recta del modelo de recuperación, mientras que el tiempo de control corresponde al intervalo de integración.

Para la funcionalidad al 100%, se considera es constante en el tiempo de control, siendo esta:

$$p(100\%) = 100$$

Al plantear y desarrollar las integrales que se usan en el cálculo de la resiliencia, se obtiene:

$$\int_{t_0}^{t_0+365} p(t)dt = \int_0^{365} \frac{100t}{365} dt = \frac{100t^2}{2 \times 365} \Big|_0^{365} = \frac{100 \times 365^2}{2 \times 365} = \frac{100 \times 365}{2}$$

$$\int_{t_0}^{t_0+365} 100dt = 100t \Big|_0^{365} = 100 \times 365$$

Al sustituir los valores de las integrales definidas en la ecuación 1 para el cálculo de la resiliencia, se obtiene la siguiente resiliencia para el puente en estudio:

$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_0+365 \text{ days}} P(t)dt}{\int_{t_0}^{t_0+365 \text{ days}} P(100\%)dt} = \frac{\frac{100 \times 365}{2}}{365 \times 100} = 0.5 = 50\%$$

Una forma de comprobar este resultado, es utilizar la forma simplificada de la ecuación 1 que se puede usar incluso cuando el tiempo de recuperación excede 1 año. Así se obtiene la resiliencia:

$$R = 2.74 \times 10^{-5} \times \int_{t_0}^{t_0+365 \text{ days}} p(t)dt = 2.74 \times 10^{-5} \times \frac{100 \times 365}{2} = 0.500005 = \mathbf{50\%}$$

6.3 Comentarios a los resultados del método de evaluación de la resiliencia aplicado a un puente.

De acuerdo con el método de evaluación de la resiliencia usado, el escenario de un evento extremo es dominado por el evento de inundación al cual corresponde un valor de $H=3$ y se estima el puente tenga una funcionalidad posterior a este igual al 0 % de la original (para la clasificación de importancia de acuerdo con el método propuesto en el artículo), ésta puede verse reflejada en un cierre total del puente. Para casos en que los puentes tienen funcionalidad residual, se refleja en cierres parciales, limitaciones en la velocidad o pesos de los vehículos transitan sobre el puente.

Retomando datos del Atlas Nacional de Riesgos (2020), el número de declaratorias de contingencias climatológicas, han sido relacionadas con fenómenos hidrometeorológicos siendo estos 2. En comparación con los sismos, ya que, en la zona cercana a la ubicación del puente, el municipio de Santa Cruz Tecámac, se ha registrado un solo sismo en el intervalo de tiempo de 1912-1996, menor a 4 grados (GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO, 2018). Lo cual concuerda con el evento predominante de riesgo de inundación determinado.

En la clasificación propuesta por el método se toma en cuenta el costo de restauración, si el puente permite el suministro de servicios como luz, agua, teléfono, gas, entre otros, el tráfico promedio y rutas de desvío y con base en esto, se le asigna el nivel de importancia al puente, para el ejemplo se tomaron en cuenta estas características y la normativa disponible proporcionada por la SCT.

El tiempo de recuperación es de 365 días para el evento dominante de inundación, se debe a que el evento de inundación tiene repercusiones regionales, pudiendo causar daños no solo en un puente, sino que varios puentes de la región. Este tiempo recuperación indica que para la funcionalidad residual del puente y que a través de actividades de reparación se alcanza su funcionalidad al 100% un año después del evento extremo y es reabierto.

El valor de resiliencia de 50% en la escala de 0 -100% se considera bajo y refleja la importancia del puente ya que, para puentes de mayor importancia se espera, exista un mayor flujo de recursos, para su rehabilitación, también refleja la funcionalidad residual posterior al evento extremo predominante de inundación que es muy baja, en este caso de cero. También permite identificar la forma de incrementar la resiliencia del puente, considerando el evento predominante es el de

inundación, y que está asociado a un claro vertical pequeño (bordo libre), al aumentar el claro vertical en conjunto con restricciones al movimiento vertical y horizontal de los tableros del puente (capacidades de distribución transversal), incrementarían la resiliencia del puente, ya que en un evento de inundación de tablero es importante restringir el movimiento vertical y evitar el tablero salga de sus apoyos.

El método tiene un buen desempeño, pues es práctico y refleja a grandes rasgos el concepto de resiliencia, también ilustra los beneficios y dificultades de aplicar este concepto a los puentes de México con las herramientas y modelos de evaluación propuestos actualmente. Es práctico ya que se puede aplicar a proyectos de puentes nuevos al igual que a ya existentes.

Dentro de las dificultades de aplicar este método se encuentra el adaptar los modelos de evaluación a las condiciones, riesgos, prácticas de diseño y construcción en México. Este método puede ser mejorado al incorporar un análisis de sensibilidad, de los parámetros de entrada, detallar el proceso de recuperación, al considerar la preparación, actividades de mantenimiento y pérdidas.

Capítulo 7 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se presentó una introducción al contexto general y a los conceptos que intervienen en la aplicación y evaluación de la resiliencia en las estructuras de puentes que abarcan desde la preparación, así mismo los riesgos y mecanismos de falla en las estructuras de puente, hasta los impactos y consecuencias de la falla de estas.

Se presentan las definiciones más utilizadas en el campo de la ingeniería, del concepto de resiliencia.

Se describen algunos de los métodos de evaluación de la resiliencia propuestos actualmente, en los cuales el marco matemático predominante es el probabilístico, teniendo como alternativas la teoría gráfica y los sistemas borrosos. Entre los enfoques más nuevos se ha propuesto desarrollar un marco con base en la teoría de la entropía ya que puede ser aplicada a una gran variedad de campos que es compatible con las medidas de la resiliencia que abarcan una gran variedad de campos. La entropía describe el nivel de desorden en un sistema, debido a una causa externa o interna, así como la resiliencia describe la capacidad del sistema del puente, de confrontar los efectos de un evento disruptivo y recuperar un nivel de comportamiento o servicio, la entropía se puede evaluar como la suma de la entropía de los módulos de un sistema que es compatible con la búsqueda de un valor integrado de la resiliencia que abarca varios campos, sin embargo, esta teoría de la entropía aún no se desarrolla, solo se plantea como una posibilidad (Tamvakis & Xenidis, 2013).

Las dimensiones o medidas de la resiliencia son muy amplias y abarcan desde las técnicas, operativas/ de organización, social y económicas, ya que la definición de resiliencia es concisa pero el contexto amplio y varía entre los campos de investigación, existe el reto de integrar todas estas medidas en un solo valor. Los métodos de evaluación de la resiliencia se encuentran incompletos y tienen pocos campos de aplicación. Estos intentan cuantificar la resiliencia midiendo la variación del comportamiento/funcionalidad en el tiempo del sistema (puente) o seleccionando algunas propiedades del sistema que se considera son indicadores de la resiliencia, sin embargo, ningún método la cuantifica directamente.

La resiliencia es una poderosa herramienta que permite identificar el potencial del sistema de puentes, para recuperarse a una condición deseada. Esta se puede aplicar desde la administración de los inventarios de puentes, priorizando las estrategias de rehabilitación a las estructuras que

incrementaran sustancialmente la resiliencia del sistema de puentes, hasta en proyectos de puentes en la etapa de diseño, desarrollando el enfoque de diseño resiliente. En el diseño de puentes se consideran los eventos se pueden presentar como los sismos, inundaciones, entre otros y la resiliencia permite incorporar la sustentabilidad, escenarios de riesgo debidos a eventos extremos y su combinación, al igual que las variaciones en estos, como lo son las provocadas por el cambio climático que da como resultado el aumento en el nivel del mar, la velocidad de viento y las temperaturas extremas, ya que los métodos de diseño tradicionales contemplan la probabilidad de ocurrencia de sismos o eventos hidrometeorológicos con base en datos máximos históricos y su probabilidad de recurrencia descuidando su posible variación, debido al cambio climático.

Contemplar en el análisis de la resiliencia, las pérdidas económicas y sociales puede ser de gran utilidad para instituciones privadas y estatales en el desarrollo de los proyectos de infraestructura carretera maximizando la inversión realizada.

El ejemplo de aplicación permite tener un primer acercamiento a la evaluación de la resiliencia de los puentes en México. Deja de manifiesto los inconvenientes en la adaptación de los métodos desarrollados a las estructuras de puentes del país que puede presentarse en los riesgos y las vulnerabilidades que contemplan, su compatibilidad con la normativa existente y aplicable en el país y las necesidades de la infraestructura del país. Sin duda también presenta los beneficios y bondades de su aplicación y que al encontrarse en investigación y desarrollo la gran mayoría de los métodos identifican sus alcances y limitaciones, y constituyen una base para continuar con su estudio y adaptación a los puentes en cualquier parte del mundo.

En resumen, se desarrolla la introducción al contexto, al concepto y métodos de evaluación de la resiliencia y promueve la posterior investigación, desarrollo y adaptación de la evaluación de la resiliencia, aplicada a los puentes de la red carretera nacional, aprovechando su máximo beneficio que permitirá reducir las probabilidades de falla e interrupción del servicio y administrar las actividades de rehabilitación y mantenimiento con mayor eficiencia y al reducir las consecuencias económicas y sociales, fomentar un ambiente de competitividad y desarrollo de las comunidades y del país.

Literatura citada.

- Brush Wellman Inc. (2010). *Elastic Resilience* . Technical TIDBITS No. 22, Brush Wellman Inc. Recuperado el 30 de septiembre de 2020 de <https://materion.com/-/media/files/alloy/newsletters/technical-tidbits/issue-no-22--elastic-resilience.pdf>
- sistema de inventario de efectos de desastres (DesInventar). (2020). *Sistema de inventario de efectos de desastres (DesInventar)*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.desinventar.org/>
- [DGCC]. (12 de abril de 2019). *Dirección General de Conservación de Carreteras*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de Puentes de la Red Federal de Carreteras/Dirección General de Conservación de Carreteras/Infraestructura: <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-conservacion-de-carreteras/puentes-de-la-red-federal-de-carreteras/>
- [DGCC]. (2019). *SCT / Infraestructura / Dirección General de Conservación de Carreteras / Programa de Trabajo 2020*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, DIRECCIÓN GENERAL DE CONSERVACIÓN DE CARRETERAS, PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVACIÓN DE CARRETERAS 2020: <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-conservacion-de-carreteras/programa-de-trabajo-2020/>
- [FHWA]. (2015). *Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Highway Bridge Superstructures*. Publication No. FHWA-NHI-15-047 , U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/pubs/nhi15047.pdf>
- [NIST] Vol. II. (2016). *Community resilience planning guide for buildings and infrastructure systems Volume II*. Special Publication 1190, Gaithersburg, MD. Volume II., U.S. Department of Commerce, Gaithersburg. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1190v2.pdf>
- [RNC]. (2019). *Representación cartográfica en formato digital y georreferenciada de la red nacional de caminos*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de Datos en formato CSV de click aquí: <https://www.gob.mx/imt/acciones-y-programas/red-nacional-de-caminos>

- [RNC]. (2019). *Visualizador de la Red Nacional de Caminos*. (R. N. caminos, Editor) Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de Visualizador de la Red Nacional de Caminos, Representación cartográfica, en formato digital y georreferenciada. Descargar datos de visualizador gráfico. Estadísticas de elementos registrados hasta 2018; 3. Inventario de la Red Nacional de Caminos 2018; 3. de <http://189.254.204.50:83/>
- [SCT]. (2011). *El desarrollo de la infraestructura carretera: Presente y futuro*. Presentación. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de http://www.amivtac.org/spanelWeb/file-manager/Biblioteca_Amivtac/Reuniones-Nacionales/XIX/XIX-002-El-desarrollo-de-la-Infraestructura-Carretera-Presente-y-Futuro.pdf
- [SCT]. (2014). *Avanza SCT en el plan nuevo guerrero con obras de ingeniería de alto nivel para reconstruir y modernizar la infraestructura*. Comunicación Social, Prensa Transparencia Dudas SCT. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <http://www.sct.gob.mx/despliega-noticias/article/avanza-sct-en-el-plan-nuevo-guerrero-con-obras-de-ingenieria-de-alto-nivel-para-reconstruir-y-moder/>
- [SCT]. (2014). *Fotos Reconstrucción Guerrero/Fichas Técnicas del Puente Coyuca/FOTOS PUENTE COYUCA 1*. Instituto Mexicano de Cemento y el Concreto (imcyc). Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <http://imcyc.com/images/SCT/Fotos%20Reconstrucción%20Guerrero/Fichas%20Tecnicas%20del%20Puente%20Coyuca/FOTOS%20PUENTE%20COYUCA%201/>
- [SCT]. (2017). *Al 100 por ciento la conectividad en las vías federales*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Prensa, México. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.gob.mx/sct/prensa/al-100-por-ciento-la-conectividad-en-las-vias-federales>
- [SCT]. (2019). *Normativa para la Infraestructura del transporte; M-PRY-CAR-6-01-008/04*. México. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#008>
- [SCT] y [IMT]. (1994). *Sistema de Administración de Puentes (SIAP)*. Publicación Técnica No. 49, Querétaro, Qro. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt49.pdf>

[SCT] y [IMT]. (2010). *Plan nacional de evaluación de puentes federales, libres de peaje dañados por corrosión (2000-2005). Una cuantificación de Resultados Proyectos y Colaboraciones*. Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT), Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Publicación Técnica No. 327, Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt327.pdf>

[SCT] y [IMT]. (2017). *El clima y las carreteras en México*. Publicación Técnica No. 428. , Sanfandila, Qro. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt498.pdf>

AASHTO. (2007). *Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design*. Washington, DC.: Subcommittee for Seismic Effects on Bridges T-3. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <http://www.ce.memphis.edu/7119/PDFs/AASHTO/2007-03-09GuideSpec.pdf>

American Psychological Association. (2020). *Camino a la resiliencia*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de ¿Qué entendemos por resiliencia?: <https://www.apa.org/centrodeapoyo/resiliencia-camino>

Andrić, J. M., & Lu, D.-G. (22 de Enero de 2017). Fuzzy methods for prediction of seismic resilience of bridges. *International Journal of Disaster Risk Reduction*(22), 458-468. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/312666268_Fuzzy_methods_for_prediction_of_seismic_resilience_of_bridges

APARICIO, J. (s.f.). *PROTECCIÓN Y CONTROL DE CAUCES*. Curso, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Queretaro. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de https://www.imta.gob.mx/potamologia/images/potamologia/CV-profesores-curso/DR.%20FCO.%20JAVIER%20APARICIO%20Curso%20Querétaro_3.pdf

Atlas Nacional de Riesgos. (2020). *Inicio / Aplicaciones / Indicadores / Municipales*. (G. d. México, Editor) Recuperado el 30 de agosto de 2020, de *Indicadores Municipales de Peligro, Exposición y Vulnerabilidad*: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/indicadores-municipales.html>

- B. Miles, S., & E. Chang, S. (Mayo de 2006). Modeling Community Recovery from Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 439-458. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/249873185_Modeling_Community_Recovery_from_Earthquakes
- Banerjee, S., Chandrasekaran, S., & Venkittaraman, A. (2014). *Optimal Bridge Retrofit Strategy to Enhance Disaster Resilience of Highway Transportation Systems*. Report No. PSU-2012-01, The Pennsylvania State University Larson Transportation Institute, US Department of Transportation Research & Innovative Technology Admin, MID-ATLANTIC UNIVERSITIES TRANSPORTATION CENTER Region III (MAUTC). Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <http://www.mautc.psu.edu/docs/PSU-2012-01.pdf>
- Biondini, F., Bontempi, F., Frangopol, D., & Malerba, P. (2004). Cellular automata approach to durability analysis of concrete structures in aggressive environments. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 130(11), 1724-1737. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/228759132_Cellular_Automata_Approach_to_Durability_Analysis_of_Concrete_Structures_in_Aggressive_Environments
- Biondini, F., Capacci, L., & Titi, A. (2017). LIFE-CYCLE RESILIENCE OF DETERIORATING BRIDGE NETWORKS UNDER EARTHQUAKE SCENARIOS. *16th World Conference on Earthquake, 16WCEE 2017, Paper N° 939*, págs. 1-12. Santiago Chile, January 9th to 13th. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <http://www.wcee.nicee.org/wcee/article/16WCEE/WCEE2017-939.pdf>
- Bocchini, P., & Frangopol, D. (Abril de 2011). A stochastic computational framework for the joint transportation network fragility analysis and traffic flow distribution under extreme events. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 26(2), 182-193. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266892010001001>
- Bocchini, P., & Frangopol, D. (Enero de 2012). Optimal Resilience- and Cost-Based Postdisaster Intervention Prioritization for Bridges along a Highway Segment. *Journal of Bridge Engineering*, 17(1), 117-129. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0000201>

Bruneau, M., & Reinhorn, A. (Abril de 2006). Overview of the Resilience Concept. *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, (pág. Paper No. 2040). San Francisco, California, USA, April 18-22,. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.eng.buffalo.edu/~bruneau/8NCEE-Bruneau%20Reinhorn%20Resilience.pdf>

CAPUFE. (2019). *RED OPERADA POR CAPUFE*. Infraestructura operada por CAPUFE / Datos abiertos. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de http://pot.capufe.mx/gobmx/DatosAbiertos/INFRAESTRUCTURA_OPERADA.pdf

Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED]. (2012). *MAPAS DE ÍNDICES DE RIESGO A ESCALA MUNICIPAL POR FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS*. SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN (SEGOB), SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL, Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos . Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/descargas/Methodologias/Hidrometeorologico.pdf>

Cimellaro, G., Reinhorn, A., & Bruneau, M. (2010). Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures*, 32(11), 3639-3649. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014102961000297X>

D. Woods, D., & Hollnagel, E. (2006). *Resilience engineering: concepts and precepts*. England: Ashgate Publishing Limited. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.crcpress.com/Resilience-Engineering-Concepts-and-Precepts/Woods-Hollnagel/p/book/9780754649045>

Dirección General de Servicios Técnicos [DGST]. (2014). *Guía de Procedimientos y Técnicas para la conservación de carreteras en México 2014*. Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Guias/guia-carreteras.pdf>

Eiclopedia cubana [EcuRED]. (2019). *Compuerta OR*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de Enciclopedia cubana. Definición de compuerta "OR": https://www.ecured.cu/Compuerta_OR

EDOMEX. (2019). *GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO / Secretaría de Obra Pública*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de Comisión de la Cuenca del Río Lerma: <http://cuencalerma.edomex.gob.mx/diagnostico>

Ellen Padgett, J., Desroches, R., Nielson, B., & Yashinsky, M. (enero de 2008). Bridge Damage and Repair Costs from Hurricane Katrina. *Journal of Bridge Engineering*, 6-14. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/237431739_Bridge_Damage_and_Repair_Costs_from_Hurricane_Katrina

Estrada, F., J. Tol, R. S., & Gay-García, C. (2011). *A critique of The Economics of Climate Change in Mexico*. The Economic and Social Research Institute (ESRI), Dublin. Working Paper No. 408., Dublin. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/100187/1/669218731.pdf>

Federal Highway Administration [FHWA]. (2014). *Transportation System Preparedness and Resilience to Climate Change and Extreme Weather Events*. Publication, Order 5520, U.S. Department of Transportation. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.fhwa.dot.gov/legregs/directives/orders/5520.pdf>

Federal Highway Administration [FHWA]. (2011). *Framework for Improving Resilience of Bridge Design*. Publicación No. FHWA-IF-11-016., U.S. Department of Transportation. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/pubs/hif11016/hif11016.pdf>

Federal Highway Administration [FHWA]. (2016). *Synthesis of National and International Methodologies Used for Bridge Health Indices*. U.S. Department of Transportation, Research, Development, and Technology. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/15081/15081.pdf>

Federal Highway Administration [FHWA]. (2016). *Highways in the River Environment- Floodplains, Extreme Events, Risk, and Resilience*. Publication No. FHWA-HIF-16-018, Hydraulic Engineering Circular No. 17, 2nd Edition , U.S. Department of Transportation . Recuperado

el 30 de septiembre de 2020, de
<https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif16018.pdf>

Fehrenbacher, J. (2013). *Inhabitat*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de Resilient Desing: Is Resilience the New Sustainability?: <https://inhabitat.com/resilient-design-is-resilience-the-new-sustainability/>

FHWA. (2004). *LRFD Seismic Analysis and Design of Bridges Reference Manual*. Publication. NHI Course No. 130093 and 130093A. No. FHWA-NHI-15-004, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/seismic/nhi130093.pdf>

Foto galeria Excelsior. (18 de septiembre de 2013). Foto galería: Colapsa puente en Coyuca de Benítez, Guerrero. *Periodico elctronico Excelsior*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.excelsior.com.mx/nacional/2013/09/18/919307#imagen-1>

Freckleton, D., Heaslip, K., Louisell, W., & Collura, J. (2012). *Evaluation of transportation network resiliency with consideration for disaster magnitude*. Proc., 91st Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, DC. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/80393/HeaslipResiliencyofTransportation2012.pdf?sequence=1>

Freyssi news. (s.f.). RECONSTRUCCIÓN DEL PUENTE TUZANTLA EN MICHOACÁN. *Boletín informativo de Freyssinet de México*, 3. México, México, México: reyssinet de México, S.A. de C.V. Gauss 9 - 102 Col. Anzures Delegación Miguel Hidalgo C.P. 11590 México, D.F. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de [http://www.freyssinet.com.pa/freyssinet/wfreyssinet_mx.nsf/0/91A1A9516273183A04257CD20001028A/\\$file/FreyssiNews%20Boletin_05.pdf](http://www.freyssinet.com.pa/freyssinet/wfreyssinet_mx.nsf/0/91A1A9516273183A04257CD20001028A/$file/FreyssiNews%20Boletin_05.pdf)

Garíudo Hoyos, S., & García Aragón, J. A. (1997). Alternativas ecohidráulicas para la presa José Antonio Alzate con base en el comportamiento de sus parámetros de contaminación. (C. e.-s.-f. 1998), Ed.) *Ciencia ergo sum Revista Ciencias Exactas y aplicadas*, 4(3), 305-310 (6 del pdf). Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/7134>

GETTY IMAGENES . (21 de octubre de 2018). *BBC News Mundo*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de Caravana de migrantes: el puente Rodolfo Robles, un "campo de refugiados" entre México y Guatemala: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-45930297>

GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO. (2018). *ATLAS DE RIESGOS ESTADO DE MÉXICO, Coordinación General de Protección Civil*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFAtlasEstatales/ESTADO_MEXICO_2018.pdf

Google Maps. (2020). Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de 19.475343, -99.733656 o 19°28'31.2"N 99°44'01.2"W: <https://www.google.com.mx/maps/place/Toluca+-+Ixtlahuaca+de+Rayón,+Estado+de+México/@19.4749516,-99.7340161,270m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x85d270cec2d47467:0x7b9a7d4ae9f20ff4!8m2!3d19.4121902!4d-99.717598>

Hauge Simonsen, S., (Oonsie) Biggs, R., Schlüter, M., Schoon, M., Bohensky, E., Cundill, G., . . . Moberg, F. (2016). *Poniendo en práctica el pensamiento resiliente Siete principios para desarrollar la resiliencia en los sistemas socio-ecológicos*. University Stockholm, Stockholm Resilience Centre sustainability Science for Biosphere Stewardship. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de https://whatisresilience.org/wp-content/uploads/2016/04/Applying_resilience_thinking_SP_aktiv.pdf

IDEAL [2]. (2015). *ESTUDIO TOPOHIDRÁULICO DEL RIO LERMA CON EL CRUCE DE ESTUDIO TOPOHIDRÁULICO DEL RIO LERMA CON EL CRUCE DE LA AUTOPISTA TOLUCA-ATLACOMULCO EN LA EST. 7+649.07*. Consultoría y Proyectos S.A. de C.V (SACBE).

Ikpong, A. A. (2016). *Managing Highway Bridges against Climate-Triggered Extreme Events in Cold Regions*. *Managing Highway Bridges against Climate-Triggered Extreme Events in Cold Regions*. Montréal, Québec, Canada: Spectrum Research Repository. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://spectrum.library.concordia.ca/981849/>

Impulsora del Desarrollo y el Empleo en América Latina [IDEAL]. (2015). *AUTOPISTA TOLUCA - ATLACOMULCO, PUENTE "RIO LERMA" KM 7+649.07, ESTUDIO GEOTECNICO*. Consultoría y Proyectos S.A. de C.V.

Infraestructura Educativa [INIFED]. (2015). *Normas Y especificaciones para Estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones. Volumen 2. Estudios Preliminares, Tomo II. Estudios. Secretaria*

de Educación Pública (SEP). Normativa, Infraestructura Educativa, Normativa e Investigación. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/normateca/INIFED/03_Normatividad_Técnica/02_Normas_y_Especificaciones_para_Estudios/02_Volumen_2_Estudios_Preliminares/Volumen_2_Tomo_II.pdf

ISO. (2009). *Online Browsing Platform (OBP)*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de ISO/Guide 73:2009(en): <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:guide:73:ed-1:v1:en:term:3.5.1.3>

Joint Committee on Structural Safety [JCSS]. (2008). *Risk Assessment in Engineering Principles, System Representation & Risk Criteria*. Joint Committee on Structural Safety (JCSS). Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de https://www.jcss-lc.org/publications/raie/01_jcss_riskassessment.pdf

Khalilza, M. (. (2016). A review on Permafrost Geotechnics, Foundation Design and New Trends. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*, 4(10), 59-71. Recuperado el 30 septiembre de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/309680646_A_Review_on_Permafrost_Geotechnics_Foundation_Design_And_New_Trends

La Razón Online. (19 de septiembre de 2017). Tras sismo de 7.1, colapsa puente vehicular en la México-Acapulco. *La Razón Online*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.razon.com.mx/mexico/tras-sismo-7-1-colapsa-puente-vehicular-en-la-mexico-acapulco/>

Leu, G., Abbass, H., & Curtis, N. (29 – 1 de September - October de 2010). Resilience of ground transportation networks: a case study on Melbourne. *Institute of Transport Studies (Monash)*. Paper delivered at the 33rd Australasian Transport Research Forum Conference held in Canberra, on 29 September - 1 October, 1-13. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://pdfs.semanticscholar.org/aa85/a50d9b63b1183737816eb350887959fbda95.pdf>

Lounis, Z. (septiembre de 2014). Reliability-based life cycle design of resilient highway bridges. *National Research Council Canada*, 142(9). Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=c8c34abf-c83c-4ffd-9b0e-93d51485b26b>

M. Rodríguez, S., M. Gallardo, J., & A. Araúz, O. (2017). Estudio del periodo de vibración de puentes de concreto en Panamá. (U. T. Panamá, Ed.) *Revistas Académicas UTP Salud Estructural de Puentes*, 13(1). Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/1441>

Minaie, E., & Moon, F. (2017). Practical and Simplified Approach for Quantifying Bridge Resilience. *Journal of Infrastructure Systems*, 23(4), 04017016-1 - 04017016-11. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29IS.1943-555X.0000374>

Mueller, K., Marjanishvili, S., & Quiel, S. (2016). Resilient Bridge Design Framework to Extreme Fire Loading. *Conference: Structures in Fire (Proceedings of the Ninth International Conference)*. Princeton University, Princeton, NJ. Junio. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/303939004_Resilient_Bridge_Design_Framework_to_Extreme_Fire>Loading

N. POLLALIS. (2006). *OKLAHOMA CITY FEDERAL BUILDING*. Publication of Harvard University. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <http://www.gsd.harvard.edu/wp-content/uploads/2016/06/pollalis-case-Oklahoma-Sept2006-public.pdf>

National Academies of Sciences. (2019). *Engineering, and Medicine 2019 Building and Measuring Community Resilience: Actions for Communities and the Gulf Research Program*. . Washington, DC: The National Academies Press. . Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.nap.edu/catalog/25383/building-and-measuring-community-resilience-actions-for-communities-and-the>

National Infrastructure Advisory Council. (2009). *CRITICAL INFRASTRUCTURE RESILIENCE FINAL REPORT AND RECOMMENDATIONS*. Departamento de Seguridad Nacional de Estados Unidos. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.cisa.gov/publication/niac-critical-infrastructure-resilience-final-report>

National Institute of Standards and Technology [NIST] Vol. I. (2016). *Community resilience planning guide for buildings and infrastructure systems Volume I*. Special Publication 1190,

Gaithersburg, MD. Volume I, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1190v1.pdf>

National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]. (2019). *NATIONAL HURRICANE CENTER and*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale: <https://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php>

National Transportation Safety Board. (2008). *Highway Accident Report, Collapse of I-35W Highway Bridge Minneapolis, Minnesota August 1, 2007*. Accident Report. NTSB/HAR-08/03. PB2008-916203. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/HAR0803.pdf>

Nemeth, C., & Hollnagel, E. (2008). *Resilience Engineering Perspectives, Volume 1: Remaining Sensitive to the Possibility of Failure* (Vol. 1). England: Ashgate Publishing Limited.

Office of Climate Change. (2010). *Increasing Queensland's resilience to inland flooding in a changing climate: Final report on the inland Flooding study*. Department of Infrastructure and Planning Local Government Association of Queensland, Department of Environment and Resource Management, Queensland. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <http://pandora.nla.gov.au/pan/131389/20120105-1802/www.climatechange.qld.gov.au/pdf/inlandfloodstudy.pdf>

Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2019). *La ONU ante el cambio climático*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de Desastres, resiliencia y gestión de tierras: <http://www.un.org/es/climatechange/disasters-resilience-land-management.shtml>

Proyectos México Oportunidad de Inversión. (2019). *Proyecto, Sector: Transporte*. (Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (BANOBRAS)) Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de Operación, mantenimiento, conservación y explotación del puente internacional Dr. Rodolfo Robles, en el estado de Chiapas: https://www.proyectosmexico.gob.mx/proyecto_inversion/519-puente-internacional-dr-rodolfo-robles/

RAE. (2020). *Real Academia Española*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de Diccionario de la lengua española: <https://dle.rae.es/?id=WA5onlw>

- Red Nacional de Caminos [RNC]. (2019). *Red Nacional de Caminos (RNC)*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de Representación cartográfica en formato digital y georreferenciada de la red nacional de caminos: <https://www.gob.mx/imt/acciones-y-programas/red-nacional-de-caminos>
- Reed, D., Kapur, K., & Christie, R. (Junio de 2009). Methodology for Assessing the Resilience of Networked Infrastructure. *IEEE SYSTEMS JOURNAL*, 3(3), 174-180. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/4912342>
- Reza Choudhury, J., & Hasnat, A. (2015). Bridge collapses around the world: Causes and mechanisms. *Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III, August 21-22* (págs. 26-34). Dhaka, Bangladesh. : IABSE-JSCE. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <http://www.iabse-bd.org/session/k2.pdf>
- Rollin J., F., L. Wears, R., D. Woods, D., Hollnagel, E., Plsek, P., & I. Cook, R. (Agosto de 2014). Resilience and Resilience Engineering in Health Care. *Joint Commission journal on quality and patient safety / Joint Commission Resources*, 205-222. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/264089773_Resilience_and_Resilience_Engineering_in_Health_Care
- SCT. (2019). *Normativa para la Infraestructura del transporte: N-CMT-2-09-07*. Normativa, Normativa para la Infraestructura del transporte. Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#09>
- SCT. (2019). *Normativa para la Infraestructura del transporte: N-PRY-CAR-6-01-005/01*. Normativa para la Infraestructura del transporte. Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://normas.imt.mx/normativa/N-PRY-CAR-6-01-005-01.pdf>
- SCT y IMT. (1995). *Evaluación Económica de la Pendiente Gobernadora en Carreteras*. Publicación técnica No. 54, Queretaro, Qro. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt54.pdf>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (2019). Normativa para la Infraestructura del transporte N-PRY-CAR-6-01-001/01. México. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#001>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (2019). *Subsecretaría de Infraestructura Dirección General de Desarrollo Carretero Información de las Vías*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de http://app.sct.gob.mx/sibuac_internet/ControllerUI?action=cmdDatosOperRepDet&idVia=96

Secretaría de Marina y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2012). *ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO: VISIÓN, ELEMENTOS Y CRITERIOS PARA LA TOMA DE DECISIONES*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/CD001364.pdf>

Seffen, K. (Febrero de 2008). Progressive Collapse of the World Trade Center: Simple Analysis. *Journal of Engineering Mechanics*, 134(2), 125-132. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/273800247_Progressive_Collapse_of_the_World_Trade_Center_Simple_Analysis

Servicio Geológico Mexicano [SGM]. (2020). *Museo virtual / Riesgos geológicos*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>

Sheshpari, M., & Khalilzad, S. (October de 2016). Review on Permafrost Geotechnics, Foundation Design And New Trends. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*, 4(10), 59-71. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/309680646_A_Review_on_Permafrost_Geotechnics_Foundation_Design_And_New_Trends

Tamvakis, P., & Xenidis, Y. (29 de Marzo de 2013). Comparative Evaluation of Resilience Quantification Methods for Infrastructure Systems. *ELSEVIER, Procedia - Social and*

Behavioral Sciences, 339-348. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187704281300459X>

Tecnología, A. (2019). *Area Tecnología*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de ¿Qué es la resiliencia?: <https://www.areatecnologia.com/materiales/resiliencia-materiales.html>

Weena , L., & Setunge, S. (2013). Evaluating disaster resilience of bridge infrastructure when exposed to extreme natural events. *3rd International Conference on Building Resilience: Individual, Institutional and Societal Coping Strategies to Address the Challenges Associated with Disaster Risk*. Heritance Ahungalla, Sri Lanka . Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://eprints.usq.edu.au/24202/>

Zhu, B., & M. Frangopol, D. (Marzo de 2013). Risk-Based Approach for Optimum Maintenance of Bridges under Traffic and Earthquake Loads. *Journal of Structural Engineering*, 139(3), 422-434. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0000671>