

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE COLAPSO PROGRESIVO EN PUENTES DE
ARMADURA DE ACERO

APPLICATION OF PROGRESSIVE COLLAPSE ANALYSIS IN STEEL TRUSS
BRIDGES

Est. Anandira Yepes Sánchez¹, Universidad de Matanzas,

anandira.yepes@gmail.com

Ing. Reynaldo Giráldez Toledo². (0000-0003-1429-6239)

Resumen

Las estructuras sensibles al colapso progresivo son propensas a sufrir grandes daños a partir del fallo de uno o varios de sus elementos estructurales, llegando al punto de colapsar gran parte o la totalidad de esta. Este tipo de investigaciones se encuentran difundidas principalmente al análisis de este fenómeno en edificaciones, contando con normativas para el estudio de las mismas, no siendo así en el estudio de otras estructuras como es el caso de los puentes, en los cuales a lo largo de la historia se ha demostrado que es posible la ocurrencia de un colapso progresivo. El trabajo trae como objetivo demostrar la posibilidad de aplicación del análisis del colapso progresivo en los puentes de armadura de acero a través de modelos computacionales, explicando que es posible la interpretación del comportamiento de dichas estructuras a través del software Bridge o SAP 2000, aplicando un método de análisis progresivo y empleando el método de ruta alternativa propuesto en las normativas vigentes.

Palabras claves: *colapso progresivo; puentes; armadura de acero; modelo computacional*

Abstract

Structures sensitive to progressive collapse are prone to great damage from the failure of one or more of their structural elements, reaching the point of collapsing much or all of it. This type of research is mainly disseminated to the analysis of this phenomenon in buildings, with regulations for the study of them, not being the case in the study of other structures such as bridges, in which along history has shown that the occurrence of a progressive collapse is possible. The objective of this work is to demonstrate the possibility of applying the analysis of progressive collapse in steel truss bridges through computational models, explaining that it is possible to interpret the behavior of these

structures through the Bridge software or SAP 2000, applying a progressive analysis method and using the alternative path method proposed in current regulations.

Keywords: *progressive collapse; bridges; steel truss; computational model*

El término colapso progresivo ha sido definido por varias normas de construcción, ingenieros e investigadores de la siguiente manera:

El colapso progresivo implica una serie de fallas que conducen al colapso parcial de una estructura que provoca la redistribución de la fuerza a los elementos estructurales restantes y puede conducir al colapso total en una estructura (Lin, 2019).

La Administración de Servicios Generales (GSA, 2003) define al colapso progresivo como una situación en la que la falla local de un componente estructural primario conduce al colapso de miembros adyacentes que, a su vez, lleva a un colapso adicional.

El colapso progresivo del edificio ocurre cuando la falla de un componente estructural conduce a la falla y colapso de los miembros circundantes, posiblemente promoviendo un colapso adicional (El-Tawil & Li, 2013).

Por tanto, se puede deducir que el colapso progresivo ocurre cuando un elemento estructural falla, provocando el fallo de los elementos adyacentes, dando como resultado el colapso parcial o total de la estructura.

Principales sucesos referentes al colapso progresivo:

A lo largo de la historia se han evidenciado diversos sucesos sobre el colapso progresivo de edificios y puentes que han provocado importantes pérdidas económicas y humanas llamando la atención de los ingenieros a revisar las consecuencias de este tema en las construcciones y la sociedad.

El colapso del edificio Alfred P. Murrah en 1995 en la ciudad de Oklahoma, Estados Unidos el cual presentaba una arquitectura de planta abierta combinada con una fachada acristalada, características que cobraron vital importancia cuando se detonó un VBIED en el lado de la acera. El edificio comprendía columnas ligeramente reforzadas comunes en regiones no sísmicas del mundo. Dichas columnas son vulnerables a fallas de corte debido a la presión lateral por la carga de la explosión y se cree que la columna más cercana a la explosión se hizo añicos y las dos columnas a cada lado fallaron en el corte. Al carecer de fuertes tabiques internos o revestimientos, el edificio no

tenía medios de emergencia para redistribuir cargas y se inició un colapso progresivo que consumió casi la mitad del edificio, cobrando la vida a 168 personas (Corley *et al.*, 1998).



Figura 1. Colapso del edificio Alfred P. Murrah en 1995 en la ciudad de Oklahoma, E.E. U U

Fuente: Lin, 2019

Otro ejemplo se presenta en los sucesos de 11 de septiembre donde en una investigación se explica que cada una de las torres gemelas del *World Trade Center 1* y *2* colapsó siguiendo esta secuencia de eventos: un avión Boeing 767 se estrelló contra la torre a gran velocidad; el choque causó daños estructurales en y cerca del punto de impacto y también provocó un incendio intenso dentro del edificio; la estructura cerca de la zona de impacto perdió su capacidad de soportar la carga sobre ella como resultado de alguna combinación de daño por impacto y daño por fuego; la estructura de arriba se derrumbó, habiendo perdido su soporte; el peso y el impacto del colapso de la parte superior de la torre causaron una progresión de fallas que se extendieron hacia abajo hasta el suelo (Nair, 2004).

Los puentes no están exentos de la ocurrencia de este fenómeno como fue el caso del puente de armadura de acero I-35W sobre el río Mississippi en Minneapolis, Minnesota, Estados Unidos, el cual se desplomó repentinamente el 1 de agosto de 2007. El informe sobre el colapso aclara que la carga muerta aumentó varias veces debido a la reparación y el refuerzo de la losa, y el grosor de la placa de refuerzo fue la mitad del valor de diseño. Además, el día del colapso de la I-35W, había materiales de construcción y maquinaria pesada en el puente de armadura para el mantenimiento. Estos factores son las posibles causas del colapso del I-35W (Miyachi *et al.*, 2012). Un estudio detallado realizado para evaluar la vulnerabilidad de la celosía determinó que el 25% (52) de los miembros de la celosía del puente se identificaron como fractura crítica. (Zoli & Steinhouse, 2007)



Figura 2. Colapso del puente del río Mississippi I-35W en Minneapolis

Fuente: Lin, 2019

Con el colapso de estas estructuras, la investigación sobre este tema fue en ascenso. Según (El-Tawil & Li, 2013), la tasa anual de artículos publicados ha aumentado en un orden de magnitud solo en la década posterior al 11 de septiembre. Si bien solo se publicaron 17 artículos sobre colapso progresivo entre 2001 y 2005, después de eso se observó un aumento significativo en el número de artículos publicados. Por ejemplo, durante el período de 2008 a 2011, el número de documentos es de entre 20 y 30 por año.

Colapso progresivo en puentes de armadura de acero:

El colapso del puente I-35W mencionado anteriormente no es un ejemplo aislado del fallo de puentes de armadura de acero. Otro importante ejemplo ocurrido a principios del otoño de 2004, donde los tramos fluviales del puente de armadura de Cape Girardeau debían ser demolidos después de completar un puente atirantado adyacente. La demolición explosiva se planeó para dejar caer un tramo a la vez para garantizar que la navegación por el río Mississippi no se vería afectada. El 9 de septiembre, la demolición del tramo lateral resultó en una falla casi instantánea y el colapso posterior del tramo principal, así como el otro tramo lateral y las armaduras adyacentes del tramo de aproximación. Este accidente resultó en la interrupción de la navegación, además de complicar sustancialmente la finalización de la demolición, que no se completó hasta más de 1 mes después (Zoli & Steinhouse, 2007).

A pesar de estos y otros sucesos, no se han desarrollado normas y reglamentos para analizar el colapso progresivo en los puentes como las existentes para edificios.

Muchos puentes de tramo largo, si no la mayoría, están diseñados como sistemas estructurales no redundantes, con vulnerabilidades de punto único. Esta falta inherente de redundancia cubre la gama completa de formas de puentes de tramo largo, incluida los puentes de armadura (Zoli & Steinhouse, 2007). Los puentes de ruta de carga única colapsan catastróficamente cuando falla un solo componente primario o conexión (Liu *et al.*, 2013).

Aunque los puentes de armadura son elementos poco redundantes y un fallo en algún componente primario aparentemente conlleva al colapso de la estructura esto no siempre se cumple.

The East Brough's el puente en Londres, Ontario, Canadá, un puente de celosía de Pratt, fue golpeado por un autobús en 2000, cortando efectivamente una de sus montantes. La armadura dañada se debilitó severamente; sin embargo, el puente no se derrumbó. El puente de Lewes (río Yukón), una armadura Warren de dos tramos se dañó en 1982 cuando un impacto de sobrecarga del vehículo causó la fractura de muchos miembros, incluido un cordón inferior cerca del centro del puente. El puente exhibió una flecha significativa y desplazamiento horizontal en el apoyo, sin embargo, no colapsó (Liu *et al.*, 2013).

A pesar ser estructuras poco redundantes es evidente que existen características estructurales en los puentes de armaduras de acero que facilitan caminos de carga alternativos que mejoran su resistencia (Liu *et al.*, 2013).

Estudios recientes y uso de modelos computacionales:

En sus inicios, las investigaciones fueron complicadas debido a la falta de precisión de los cálculos manuales. El necesario desarrollo de herramientas computacionales permitió realizar simulaciones que apoyaran los estudios.

Autores como Bagheripourasil and Mohammadi, en su artículo *Comparison between Alternative Load Path Method and a Direct Applying Blast Loading Method in Assessment of the Progressive Collapse*, publicado en 2015 en la revista *Rehabilitation in Civil Engineering*, utilizan software como SAP 2000 y ABAQUS para estudiar el comportamiento real de un edificio de 7 pisos bajo la carga explosiva, comparando el método de ruta de carga alternativa con un método de aplicación directa de carga explosiva (Bagheripourasil & Mohammadi, 2015).

Con la utilización del software ABAQUS la investigación Progressive Collapse Analysis of Concrete-filled Steel Tubular Column to Steel Beam Connections Using Multi-scale Model (Wang *et al.*, 2016) publicada en la revista Structures busca analizar el comportamiento de uniones entre vigas y columnas de sección tubular y rectangular, ante el colapso progresivo de edificios.

Con el uso del software ABAQUS, Lin 2019, en su trabajo *Deterioration Effects on Progressive Collapse of Bridges*, hace un análisis del comportamiento de dos puentes de armadura buscando la existencia de rutas de carga alternativa.

El artículo *Consequence-based robustness assessment of a steel truss bridge* de (Olmati *et al.*, 2013), aplica el modelo de elementos finitos para analizar el colapso del puente I-35 West Bridge, haciendo uso del software SAP 2000.

Aunque numerosos estudios están en curso para estudiar el comportamiento del colapso progresivo, varias áreas parecen estar poco estudiadas, quizás la mayor necesidad en este momento son los datos de prueba de alta calidad a nivel de componente y estructuras (El-Tawil & Li, 2013).

Es evidente que el uso de las herramientas informáticas ha permitido el desarrollo de dichos estudios, con el empleo de software como el SAP 2000 y ABAQUS, sin excluir a otros como Bridge especializado precisamente en puentes.

Normativas y reglamentos referentes al colapso progresivo:

Las pautas de diseño de colapso progresivo existentes incluyen la Administración de Servicios Generales (GSA) "Análisis de colapso progresivo y pautas de diseño" 2003 y Criterios de instalaciones unificadas del Departamento de Defensa (UFC) "Diseño de edificios para resistir el colapso progresivo" 2004. Estándares más familiares para el ingeniero estructural como ASCE 7, ASCE 2002 y ACI-318 ACI 2002 hacen referencias a la integridad estructural y otros requisitos de rendimiento valioso pero cualitativo para mitigar el colapso, pero no tienen un conjunto de criterios prescriptivos para resistir el colapso progresivo (Ruth *et al.*, 2006)

Algunos informes producidos por la Agencia Federal de Manejo de Emergencias (FEMA) también son útiles para realizar análisis de colapso progresivo. FEMA-273 1997; FEMA-274 1997. Aunque los informes de FEMA no abordan directamente este tipo de análisis, contienen métodos que son aplicables al colapso progresivo (Marjanishvili, 2004).

El Código Modelo 1990 CEB-FIP (CEB 1991) requiere que las estructuras resistan circunstancias accidentales sin daños desproporcionados a los eventos originales. El Eurocódigo 0, enfatiza que la falla de un elemento no conducirá a la falla de toda la estructura (Starossek, 2006). El Eurocódigo 8 (2004) publicado por el Comité Europeo de Normalización destaca la importancia de diseñar edificios para evitar y prevenir la propagación de posibles daños locales (Lin, 2019).

Estas pautas existentes se han desarrollado para edificios y pueden no ser adecuadas para puentes debido a las diferencias en las topologías y configuraciones de los dos tipos de sistemas estructurales y en la naturaleza e intensidad de sus cargas permanentes y transitorias (Miao & Ghosn, 2016).

Métodos para el análisis de colapso progresivo

Las normas de construcción establecen pautas y métodos para analizar el colapso progresivo en las estructuras. En ellas se establecen dos tipos de métodos: indirectos y directos.

Los métodos indirectos tienen como objetivo:

Proporcionar redundancia, continuidad, ductilidad: ante la ocurrencia de una falla local, la estructura debe ser capaz de soportar grandes deformaciones sin perder su resistencia y ser estable al redistribuir de forma balanceada las cargas provocadas.

Fuerza de amarre: es utilizada para mejorar la continuidad, ductilidad y resistencia estructural mediante la fuerza de tracción mínima que dispone el acero de refuerzo usado en la estructura, uniéndola de tal manera, que permita la transferencia de carga desde a parte que abarca la falla local hasta otro sector de la estructura (Dolores & Minervini, 2016)

Actualmente, solo UFC 4-023-03 permite el uso de métodos indirectos (McKay *et al.*, 2012).

Los métodos directos tienen dos enfoques: el método específico de resistencia local y el método de ruta de carga alternativa.

Métodos específicos de resistencia local:

Este método se basa en el diseño o mejoramiento de elementos estructurales componentes del sistema llamados clave, para que resista una amenaza en específico. Tomando como referencia la explosión de gas natural de *Ronan Point*, algunos códigos de construcción especifican que se debe diseñar el elemento clave para una carga anormal de 34 kN/m^2 , aplicado desde cualquier dirección.

Se debe tener en cuenta que 34 kN/m^2 no habría proporcionado protección a las columnas (elemento clave) que soportan la viga de transferencia en el edificio Murrah, que fueron sometidas a presiones máximas reflejadas del orden de $10\,000 \text{ kN/m}^2$ tras la detonación de 1800 kg de explosivos caseros a corta distancia (Paramasivam, 2008).

Por lo tanto, el método de resistencia local específico es un método de diseño específico para amenazas y normalmente se usaría para diseñar estructuras endurecidas, como áreas vulnerables de embajadas, salas de correos e instalaciones de almacenamiento de explosivos. El problema principal de este método es que la naturaleza imprevista del evento anormal puede conducir al diseño de elementos clave con una fuerza inadecuada para resistir una amenaza que ocurra en el futuro (Byfield *et al.*, 2014).

Método de la ruta alternativa (APM):

En la actualidad, el método más empleado por investigadores e ingenieros para evaluar la resistencia al colapso progresivo es el método de ruta alternativa (APM). El mismo, se emplea en las pautas GSA y DoD y es el enfoque más directo para el colapso progresivo utilizado en los Estados Unidos (McKay *et al.*, 2012).

Es un método independiente de la amenaza, en el que no se especifica la amenaza o la causa del estado dañado (El-Tawil & Li, 2013).

Normas como ASCE, GSA y DoD, plantean un procedimiento para el análisis de la estructura, basado en la eliminación de un elemento principal de carga a la vez.

Se emplean tres procedimientos de análisis: estático lineal, estático no lineal y dinámico no lineal (GSA, 2003).

Tipos de análisis:

Análisis estático lineal: el análisis estructural incorpora solo materiales elásticos lineales y teoría de deformación baja, los fenómenos de pandeo no están incluidos en el modelo, pero se evalúan a través de la examinación por inspección. Las fuerzas de inercia no se consideran. El análisis consiste en un solo paso, en el que las deformaciones y esfuerzos internos se resuelven basados en las cargas aplicadas, la geometría y materiales (GSA, 2003).

Los pasos necesarios para realizar el análisis son (Marjanishvili, 2004):

- Construir modelo de computadora.

- Realizar análisis estático.
- Realizar análisis de estabilidad.
- Verificar, validar y evaluar los resultados.

Para garantizar un comportamiento elástico, es necesario aplicar dos veces la carga de gravedad, para permitir el "impacto" (Powell, 2005).

La (UFC, 2016) establece la combinación de carga usada para este tipo de análisis:

$$G_{LF} = DIF * (1.2 * DL + 0.5LL) \quad (1.1)$$

Donde:

GLF Incremento de carga por fuerza

DIF Factor de incremento dinámico

DL Carga muerta

LL Carga viva

Podría usarse para el análisis de colapso progresivo, un factor de incremento que sea menor que 2.0. Por ejemplo, la estructura podría estar diseñada para 1.25 veces la carga de gravedad, en lugar de 2.0, con la expectativa de que esto garantice un nivel aceptable de comportamiento inelástico (Powell, 2005).

El efecto de la remoción de columnas se puede tener en cuenta mediante la aplicación de los factores DIF, aplicados a las cargas de los elementos vecinos al elemento removido, en este caso los elementos que se conectan directamente a un mismo nodo [Sandoval, 2016].

Según (Marjanishvili, 2004) las ventajas del análisis estático lineal incluyen:

- Simplicidad relativa
- Cálculos realizados rápidamente
- Fácil de realizar
- Fácil de evaluar y validar los resultados.

Las desventajas del análisis lineal-elástico incluyen:

- No considera los efectos dinámicos, como los factores de amplificación, la amortiguación y las fuerzas de inercia
- No considera el comportamiento material no lineal.

Las limitaciones son:

- El análisis de estructuras complejas y grandes no puede evaluarse con confianza
- Limitado a estructuras simples con comportamiento predecible.

Análisis estático no lineal: el modelo estructural incorpora geometría y materiales no lineales. Los efectos de la inercia no están incluidos. Un enfoque incremental o iterativo se utiliza normalmente para resolver la respuesta estructural como una función de la carga aplicada (GSA, 2003).

Pasos necesarios para realizar el análisis (Marjanishvili, 2004):

- Construir un modelo de computadora;
- Realizar análisis de estabilidad;
- Estimar las capacidades de los elementos y la relación fuerza-desplazamiento;
- Realizar análisis estático no lineal; y
- Verificar, validar y evaluar los resultados.

En este análisis también se emplea la ecuación 1.1 a los elementos circundantes al elemento removido.

Las medidas de capacidad de demanda para componentes dúctiles deben basarse en la deformación, para verificar las demandas de ductilidad. Para componentes frágiles, el rendimiento puede ser seguido por una rápida pérdida de resistencia y un probable colapso. Por lo tanto, las medidas de capacidad de demanda deberían basarse en la fortaleza, para garantizar que no se produzca rendimiento. Para permitir efectos de impacto, la carga de gravedad debe multiplicarse por un factor de impacto. Un valor conservador para este factor es 2.0, pero un valor menor podría estar justificado (Powell, 2005).

Según (Marjanishvili, 2004) la ventaja de este método: incluye el comportamiento no lineal del material.

Las desventajas de este método son:

- No considera efectos dinámicos como factores de amplificación, inercia y fuerzas de amortiguación.
- Complejidad relativa.
- Podría llevar mucho tiempo.

- Conduce a resultados excesivamente conservadores.

Las limitaciones son:

- Limitado a estructuras relativamente simples con comportamiento predecible.
- No se puede utilizar de manera efectiva para el análisis de colapso progresivo.

Análisis dinámico no lineal: se incluyen los efectos de inercia, materiales y geométricos no lineales.

Un procedimiento de integración de tiempo se utiliza para determinar la respuesta estructural como una función de tiempo (GSA, 2003) por lo que se considera el método más completo de análisis de colapso progresivo.

Los pasos necesarios para realizar el análisis son (Marjanishvili, 2004):

- Construir modelo de computadora.
- Determinar la distribución de fuerza "en reposo".
- Realizar análisis de estabilidad.
- Estimar el paso del tiempo de carga.
- Estimar las capacidades de los elementos y la relación fuerza-desplazamiento.
- Realizar análisis de historial de tiempo no lineal.
- Realizar validación y varios estudios de sensibilidad para verificar y validar los resultados.
- Evaluar los resultados.

En este caso de análisis no es necesario emplear factores de incremento dinámico por lo que la combinación de cargas se expresa en la (UFC, 2016) de la siguiente manera:

$$G_{ND} = 1.2 * DL + 0.5 * LL \quad (1.2)$$

Donde:

GND Cargas gravitatorias para análisis dinámico no lineal

DL Carga muerta

LL Carga viva

Según (Marjanishvili, 2004) las ventajas de este método incluyen:

- Proporciona resultados más realistas.
- Incluye comportamiento dinámico.
- Incluye material de comportamiento no lineal.

Las desventajas son:

- Puede llevar mucho tiempo.
- Requiere una amplia verificación y validación de resultados.
- Difícil de evaluar los resultados. En la mayoría de los casos, los resultados del análisis dinámico no lineal deben verificarse y validarse de forma independiente. El análisis independiente de revisión por pares, el modelado alternativo y los estudios de sensibilidad podrían validar la precisión de los análisis.
- Alta complejidad.
- Suposiciones incorrectas o modelos incorrectos pueden conducir a resultados erróneos.

La limitación es: el análisis del historial de tiempo no lineal puede llevar mucho tiempo, lo que puede limitar el número de no linealidades para reducir el modelo y, posteriormente, el tiempo de cálculo.

Método de análisis progresivo:

Como se evidencia, cada caso de análisis tiene sus características distintivas, pero se pueden señalar similitudes entre ellos, lo que permite la existencia de un método que incluye estos procedimientos llamado método de análisis progresivo.

El proceso comienza con un análisis estático lineal-elástico básico. Si el edificio pasa este paso, cuyos requisitos de evaluación son los más conservadores, entonces el análisis está completo; Si el edificio falla, procedemos a su vez a análisis lineales y no lineales cada vez más complejos. En cada paso, probamos el rendimiento del edificio con criterios cada vez menos conservadores. El proceso de evaluación estructural se detiene después de que el edificio cumpla con los criterios de evaluación establecidos para ese procedimiento de análisis en particular, siempre que estos métodos de análisis más simples sean aplicables a la complejidad de la estructura (Marjanishvili, 2004)

Modelación computacional

(El-Tawil & Li, 2013) explica que los mecanismos del colapso progresivo son difíciles de investigar con precisión utilizando cálculos manuales. Por lo tanto, el desarrollo de modelos computacionales adecuados ha sido el objetivo principal de muchos estudios de investigación en esta área. El modelado del colapso estructural implica dos pasos clave:

- Desarrollo de un modelo matemático de la estructura en cuestión.

- Determinación de la respuesta del modelo a las condiciones de carga y límite que representan más apropiadamente el proceso de colapso.

Las mejoras sustanciales en las pruebas estructurales y las técnicas de detección / medición y en las herramientas de simulación computacional y el *hardware* han creado una oportunidad sin precedentes para realizar una investigación progresiva sobre el colapso.

Actualmente, la comunidad de ingenieros estructurales utiliza varios *software* para sus investigaciones. Entre ellos se destaca SAP 2000, programa líder en cálculo a través de elementos finitos creado por la empresa *Computer & Structures, Inc. (CSI)*.

Las principales características de este programa son:

- Excelente capacidad de cálculo y modelado
- Una plataforma para entender y enseñar los detalles del modelado estructural y los problemas complejos de ingeniería.
- Varias normativas estructurales y herramientas de fácil aplicación para el dimensionamiento y comprobación de estructuras de hormigón armado, metálicas, de aluminio y conformados en frío.
- Análisis estáticos, dinámicos y no lineales
- Interoperabilidad con otros programas como Excel, Word, AutoCAD, entre otros

De igual forma y creado por la empresa *Computer & Structures, Inc. (CSI)* el *software CSIBridge* nace a partir del SAP 2000, especializándose en el desarrollo de modelos numéricos computacionales de las estructuras de los puentes. Entre sus características principales además de compartir las que se aprecian el SAP 2000 este *software* es capaz de:

- Realizar análisis de secuencia constructiva, incluyendo efectos diferidos de fluencia, retracción y envejecimiento del hormigón y relajación del acero.
- Calcular de forma automática las deformaciones axiales en cables para obtención de esfuerzos objetivos, contra flechas y buscador de formas.
- Tener en cuenta la no linealidad de los materiales. (superestructura, aparatos de apoyo, subestructura y apoyos para simular el suelo).

El fenómeno del colapso progresivo en las estructuras es un tema de interés y en los últimos años ha aumentado el número de investigaciones, aun así, resulta insuficiente el estudio sobre el tema y

las normativas vigentes solo se ven especificadas a edificaciones. Son numerosos los sucesos que demuestran que el colapso progresivo afecta de manera crítica a los puentes de armaduras de acero siendo estas estructuras no redundantes las cuales no poseen, en la mayoría de los casos, una ruta alternativa a la cual redistribuir la cargas una vez que falla un elemento o nudo crítico; sin embargo, se demuestra que no siempre la falla de alguno de los elementos principales de la armadura causa el colapso total de la misma. Es por esto que es necesario continuar investigando sobre el colapso progresivo en puentes de armadura de acero, empleando de manera eficiente las nuevas tecnologías como el *software* SAP 2000 o el *SCIBridge* que nos permiten la creación de un modelo numérico computacional el cual simula las características de la estructura real. Basado en las normativas vigentes se pudo emplear el método de ruta alternativa para analizar el proceso de colapso progresivo en puentes, dicho método es de tipología directa y no especifica la naturaleza de la falla, lo cual lo hace ser uno de los más empleados por los investigadores. En el tipo de análisis a realizar existen diferentes ventajas y desventajas entre ellos es por esto que es recomendable la realización de un análisis progresivo comenzando con el método más sencillo y conservados, análisis estático lineal, y de ser necesario llegar al más complejo y real posible, análisis dinámico no lineal.

Referencias bibliográficas

- Bagheripourasil, M., & Mohammadi, Y. (2015). 069 Comparison between Alternative Load Path Method and a Direct Applying Blast Loading Method in Assessment of the Progressive Collapse. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineerieng*.
- Byfield, M., Mudalige, W., Morison, C., & Stoddart, E. (2014). 024 A review of progressive collapse research and regulations. *Structures and Buildings*, 167(SB8).
- Corley, W. G., Sozen, M. A., Thornton, C. H., & Sr, P. F. M. (1998). The Oklahoma City bombing: structure and mechanisms of the Murrah Building. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 12(3), 120-136.
- Dolores, S. C. D., & Minervini, G. M. (2016). *Análisis de colapso progresivo en estructuras de concreto por ocurrencia de eventos extraordinarios* Universidad Católica Andrés Bello].
- El-Tawil, S., & Li, H. (2013). 023 Progressive Collapse Research Current State and Future Needs. *Advanced Materials Research*, 639-640, 10.

[Record #107 is using a reference type undefined in this output style.]

- Lin, C.-S. (2019). 073 *Deterioration Effects on Progressive Collapse of Bridges*. Columbia University.
- Liu, S., Bartlett, F. M., & Zhou, W. J. J. o. B. E. (2013). 090 Alternative load paths in steel through-truss bridges: Case study. *18*(9), 920-928.
- Marjanishvili, S. (2004). 028 Progressive analysis procedure for progressive collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *79*.
- McKay, A., Marchand, K., & Diaz, M. (2012). 063 Alternate Path Method in Progressive Collapse Analysis.. Variation of Dynamic and Nonlinear Load Increase Factors. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, *17*.
- Miao, F., & Ghosn, M. J. S. s. (2016). 087 Reliability-based progressive collapse analysis of highway bridges. *63*, 33-46.
- Miyachi, K., Nakamura, S., & Manda, A. J. J. o. C. S. R. (2012). 077 Progressive collapse analysis of steel truss bridges and evaluation of ductility. *78*, 192-200.
- Nair, R. S. J. M. s. c. (2004). 080 Progressive collapse basics. *44*(3), 37-44.
- OImati, P., Gkoumas, K., Brando, F., & Cao, L. (2013). 072 Consequence-based robustness assessment of a steel truss bridge. *Steel Composite Structures*, *14*(4), 379-395.
- Paramasivam, S. (2008). *Protective design against disproportionate collapse of RC and steel framed structures* Ph. D. thesis, Univ. of Southampton, Southampton, U K].
- Powell, G. (2005). 038 *Progressive Collapse Case Studies Using Nonlinear Analysis citado en 004* (6) Structures Congress.
- Ruth, P., Marchand, K., & Williamson, E. (2006). 039 Static Equivalency in Progressive Collapse Alternate Path Analysis citado en 004 (7). *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *20*(4).
- Starossek, U. (2006). 082 Progressive collapse of bridges— aspects of analysis and design. *International Symposium on Sea-Crossing Long-Span Bridges*,
- Wang, W., Li, H., & Wang, J. (2016). 033 Progressive collapse analysis of concrete filled steel tubular column to steel beam connections using multiscaled model. *Structures*, *11*.
- Zoli, T. P., & Steinhouse, J. J. H., New York, NY, USA. (2007). 088 Some considerations in the design of long span bridges against progressive collapse.