

Revisión De Las Investigaciones Del Colapso Progresivo

Review Of Progressive Collapse Research

Autores:

Gerardo Pérez Martínez¹, Alejandro Hernández Hernández², Patricia Martín Rodríguez³, Vivian Elena Parnás⁴

¹ Ingeniero Civil, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Calle 114, #11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba, E-mail: fcgperez@umcc.cu

² Ingeniero Civil, Máster en Ciencias, Universidad de Matanzas, Carretera Matanzas-Varadero, km 3 ½, Matanzas, Cuba, E-mail: alejandro.hdez@umcc.cu

³ Ingeniera Civil, Doctora en Ciencias, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Calle 114, #11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba, E-mail: patriciamr@civil.cujae.edu.cu

⁴ Ingeniera Civil, Doctora en Ciencias, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Calle 114, #11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba, E-mail: vivian@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

Los estudios de colapso progresivo son de gran importancia para la revisión y el diseño estructural ya que permiten identificar los elementos críticos en el mecanismo de fallo de una estructura bajo una determinada carga externa. Tales tipos de fallas comienzan con un daño local cuya extensión aumenta, hasta el colapso de la estructura completa. Las torres de transmisión de celosía y los sistemas de líneas de transmisión asociados son una infraestructura importante en la sociedad moderna. En el período de 1996 al 2017 se reportaron fallas de 523 torres de transmisión eléctrica por eventos meteorológicos en Cuba, de ahí la importancia del estudio del mecanismo de colapso de estas tipologías estructurales frente a la acción del viento. En este trabajo se describen los métodos más reconocidos en la literatura para los estudios de fallo de colapso progresivo de estructuras, con especial énfasis en los estudios sobre las torres metálicas de celosía. Se identifica el método de la Ruta de Carga Alternativa (APL por sus siglas en inglés) como el más adecuado y el más empleado en estructuras de torres de celosía.

Palabras claves: colapso progresivo, estado del arte, mecanismo de fallo, torres metálicas de celosía.

ABSTRACT

Progressive collapse studies are of great importance for structural design and review as they allow the identification of critical elements in the failure mechanism of a structure under a given external load. Such types of failure start with a local damage which extension increases, up to the collapse of the whole structure. Lattice transmission towers and associated transmission line systems are an important infrastructure in modern society. In the period from 1996 to 2017, 523 electrical transmission towers failed by these meteorological events in Cuba, hence the importance of studying the collapse mechanism of these structural typologies against the action of the wind. In this paper, the most recognized methods in the literature for the studies of progressive collapse failure of structures are described, and special emphasis is placed on metal lattice towers. The Alternative Path Load (APL) method is identified as the most appropriate and used in lattice tower structures.

Keywords: collapse mechanism, progressive collapse, review, state of the art, towers.

Nota editorial: Recibido noviembre 2021; Aceptado diciembre 2021

1. Introducción

El colapso progresivo o mecanismo progresivo de falla, se refiere al fallo de un elemento aislado que luego produce el fallo de otros elementos componentes de la estructura, llevando así al fallo total de la misma. En cambio, un colapso puede no ser progresivo, si el primer elemento en fallar origina por sí mismo, el fallo parcial o total de la estructura (por ejemplo, el fallo de las columnas del primer nivel de una edificación). El colapso de las estructuras usualmente lleva consigo elevadas pérdidas económicas y sociales, incluidas en ocasiones pérdida de la vida de las personas [1-3], por lo que la mejor comprensión del comportamiento del mismo, permitirá prevenir el fenómeno y reducir su impacto en la vida de la sociedad.

Los estudios sobre el colapso progresivo de estructuras comenzaron a principios de la década de 1940 cuando Lord Baker analizó el comportamiento de los edificios dañados por bombas en Londres durante la Segunda Guerra Mundial [4]. Pero fue realmente, el colapso parcial en 1968 de la torre Ronan Point en Londres (Ver Figura 1), Inglaterra, causado por una explosión de gas, el que atrajo por primera vez a los científicos al fenómeno del colapso progresivo, por lo que puede considerarse como un problema nuevo desde el punto de vista de la ingeniería civil.



Figura 1: Colapso del edificio de apartamentos Point. (Tomado de [5])

El colapso progresivo de la torre Ronan Point en Londres fue iniciado por una explosión debido a una fuga de gas en el piso 18 que derribó las paredes de la esquina del apartamento, estos muros eran el único soporte para los muros superiores, por lo que se creó una reacción en cadena en la que el piso 19 colapsó, luego el piso 20 y así sucesivamente, propagándose hacia arriba. Los cuatro pisos superiores cayeron al nivel 18, lo que inició una segunda fase del colapso progresivo, haciendo que cedieran los pisos inferiores por la sobrecarga a la que ahora eran sometidos, progresando el colapso hasta el suelo [5, 6].

La investigación en esta área fue motivada aún más por una serie de varios colapsos de estructuras a nivel internacional, así como, por las mejoras en las herramientas de simulación computacional y en los ensayos a escala de estructuras reales [1].

En 1995, una explosión de bomba causó el colapso progresivo del Edificio Federal Alfred P. Murrah en la ciudad de Oklahoma. El atentado ocurrió el 19 de abril, llevándolo a un colapso parcial, de más de la mitad de la edificación. El colapso progresivo tuvo lugar producto del fallo de una columna por la explosión del camión bomba y el fallo de otras 3 columnas debido a la pérdida del soporte lateral provisto por las vigas y la losa de entrepiso, las que habían fallado al ser el mecanismo principal para redistribuir las cargas de las columnas debido a la ausencia de rutas de carga alternativas. Uno de los principales problemas del colapso progresivo fue el carácter discontinuo del refuerzo en las uniones de la columna y la viga de transferencia [7, 8].

Ese mismo año tuvo lugar uno de los eventos más desastrosos, el colapso de los grandes almacenes Sampoong en Corea del Sur, debido a la falla por punzonamiento de las placas, donde fallecieron alrededor de 500 personas. Un año después, un camión bomba dañó varios edificios de apartamentos de gran altura en la ciudad de Khobar, Arabia Saudita, matando a 20 personas e hiriendo a cientos más [9].

El 11 de septiembre de 2001 en los bajos de Manhattan ocurrió el colapso progresivo de las de las torres gemelas del World Trade Center (WTC), tras un ataque terrorista donde perdieron la vida casi 3.000 personas [1]. Las torres eran principalmente de acero, conformadas hasta cerca de un 95% de su constitución y su diseño estructural era denominado como tubo dentro de tubo. Existen tres teorías que explican el porqué del colapso progresivo de las torres gemelas del WTC en un período de tiempo tan corto y en la manera en que lo hicieron. Estas reúnen una serie de requisitos y parámetros que las hacen autónomas e independientes entre sí. Las teorías establecidas son: (1) colapso por incendio, (2) teoría de la conspiración y (3) explosiones de aluminio fundido. La teoría del colapso progresivo producto del incendio es la más aceptada y desarrollada hasta el momento, por lo cual se reconoce como la Teoría Oficial. Esta concluye que el motivo principal del desplome de ambas torres del WTC no fue el impacto de los aviones Boeing 767, sino el incendio consiguiente [10, 11].

Esta teoría es descrita mejor por medio de una serie de seis etapas que van desde el impacto de los aviones hasta el propio desplome de las torres. La primera etapa contempla el impacto de los aviones sobre las torres, que provocó daños sobre los elementos estructurales de la fachada, generándose una primera redistribución de las cargas que tiene lugar en la segunda etapa. Debido a las cargas de combustión que traían los aviones se produjo el incendio que afectó a los elementos estructurales tanto de acero como de hormigón en la tercera etapa. La cuarta etapa trajo consigo la pérdida de la capacidad resistente de varios elementos estructurales como columnas y losas de entrepiso durante el incendio producto de las altas temperaturas, comenzando un comportamiento de pandeo visco elástico en dichos elementos. Su posterior enfriamiento, al comenzar a ceder el incendio, supuso una retracción de cada uno de ellos, tratando de recuperar su estado inicial, con lo que las conexiones entre los entrepisos y las columnas comenzaron a fallar, como los elementos más débiles, detonando así el colapso de la estructura en la quinta etapa, al ceder los entrepisos. En la última etapa tiene lugar el colapso progresivo, debido a la caída repentina de las losas de entrepisos y las columnas que las sostenían, lo que no solo generó una fuerte expulsión de material y fuego, sino que sobrecargó a otros niveles que no habían sido inicialmente afectados arrastrando el peso de toda la carga superior tras ellos, produciéndose el colapso encadena de las dos torres en un tiempo de 11 segundos [10, 11].

El edificio Plasco, construido en 1962 en Irán, se derrumbó después de un estallido de fuego que duró tres horas y media que comenzó en el décimo piso, cabe destacar que en su diseño no se adoptaron medidas de seguridad contra incendios en el edificio. El colapso del edificio comenzó en la esquina sureste de la cubierta #11, como resultado de las altas temperatura y el posterior fallo de una de las vigas principales y la pérdida de la capacidad resistente de la armadura

principal, lo que generó el fallo de las conexiones y vigas localizadas en el sur y este del edificio, seguido por el fallo por pandeo de varias columnas. Con un cambio de geometría de la estructura, empezaron a fallar los elementos desde los lados oeste y norte hacia el centro, hasta el colapso total del edificio. Las investigaciones muestran las deficiencias estructurales, principalmente en el comportamiento de una parte de la cubierta y su interacción con los elementos adyacentes. El sistema de colapso progresivo del Plasco Building tiene una considerable similitud con el de las torres del WTC [12, 13].

Recientemente tuvo lugar el derrumbe parcial del complejo de condominios Champlain Towers South el 24 de junio de 2021, un edificio de más de 130 apartamentos ubicado en la localidad de Surfside en Florida, Estados Unidos, que dejó un saldo de 98 personas fallecidas, las causas detonantes de este evento aún están en estudio (Ver Figura 2). El colapso progresivo tuvo lugar en 3 etapas, iniciándose el derrumbe tras el fallo por punzonamiento en una zona de la losa de la planta baja que cayó sobre el estacionamiento, lo que generó que perdieran los soportes laterales las columnas del nivel del estacionamiento y la planta baja provocando su colapso, este proceso se propagó hacia los pisos superiores. El fallo de esta área arrastró consigo a la parte posterior del edificio que perdió soporte lateral y estuvo sometida a esfuerzos de flexocompresión al caer la primera parte del edificio. Por último, un bloque de apartamentos quedó desvinculado por completo de la estructura tras el derrumbe de la parte central del edificio, este, sin soportes laterales, y sometido a esfuerzos de flexocompresión y torsión, colapsó inmediatamente después del fallo de la parte central, quedando solo en pie un ala del complejo de condominios [14, 15].

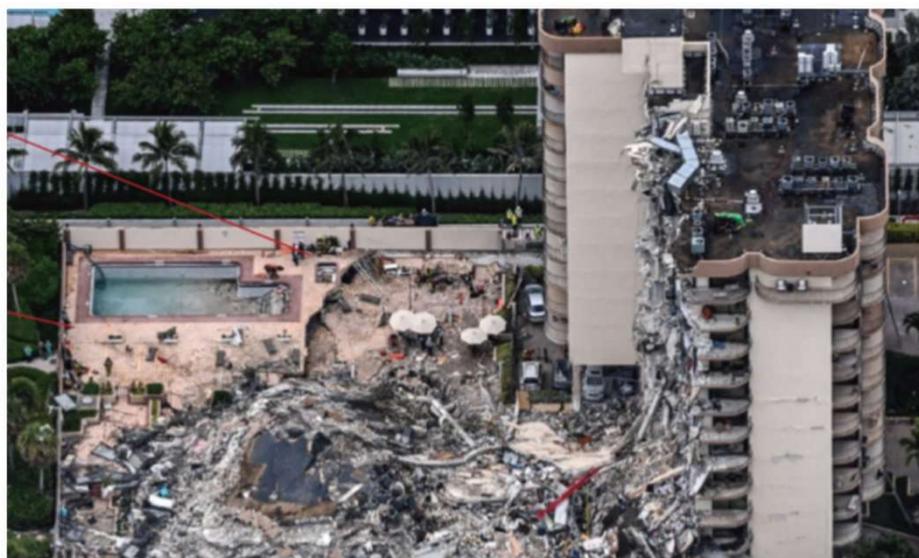


Figura 2: Colapso del edificio de apartamentos Champlain Towers South. (Tomado de [14])

En la Tabla 1 se resumen los principales desastres por colapso progresivo desde los años sesenta, estos datos fueron obtenidos de los artículos que se resumen en el epígrafe 4.

Tabla 1: Lista de las principales fallas estructurales por colapso progresivo desde 1968.
(Fuente: elaboración propia)

Incidente	Año	Lugar	Sistema estructural	No. de pisos	Evento desencadenante	Daño
Ronan Point	1968	Londres, Inglaterra	Paneles grandes. Prefabricado	22	Explosión de gas	Parcial
Skyline Plaza Towers	1973	Farfax, Estados Unidos.	Pórtico de hormigón armado	26	Desmontaje prematuro de apuntalamiento	Parcial
Hotel New World	1986	Little India, Singapur	Pórtico de hormigón armado	6	Fatiga estática	Total
L' Ambiance Plaza	1987	Bridgeport, Estados Unidos	Estructura de acero/Lift-slab	16	Fallo del sistema de elevación	Total
Alfred P. Murrah Federal Bldg	1995	Oklahoma City, Estados Unidos	Pórtico de hormigón armado con muro de cortante	9	Camión bomba	Total
Sampoong Dept Store	1995	Seúl, Corea del Sur	Pórtico de hormigón armado	5	Sobrecarga	Parcial
Khobar Towers	1996	Al Khobar, Arabia Saudita	Edificio de hormigón prefabricado	8	Explosión de bomba	Parcial
WTC Bldg 1	2001	New York, Estados Unidos	Estructura de acero	110	Impacto e incendio de aeronaves	Total
WTC Bldg 2	2001	New York, Estados Unidos	Estructura de acero	110	Impacto e incendio de aeronaves	Total
WTC Bldg 7	2001	New York, Estados Unidos	Estructura de acero	47	Impacto de escombros e incendio	Total
Windsor Tower	2005	Madrid, España	Estructura de acero con tímpano central de hormigón armado	32	Incendio	Parcial
Pyne Gould Corporation Bldg	2011	Christchurch, Nueva Zelanda	Pórtico de hormigón armado	5	Terremoto	Total
Rana Plaza	2013	Savar, Bangladesh	Pórtico de hormigón armado	8	Mal uso, sobrecarga	Parcial
Plasco Bldg	2017	Teherán, Iran	Estructura de acero	17	Incendio	Total
Champlain Towers South	2021	Florida, Estados Unidos	Pórtico de hormigón armado	12	En estudio	Parcial

El elevado interés en este campo, durante los últimos cuarenta años, para diferentes tipos de estructuras y de cargas, ha resultado en la presentación de varios enfoques para evaluar la ocurrencia del colapso progresivo en una estructura que han derivado en códigos y normativas de construcción. Muchas de estas son abordadas en el epígrafe 3.

Usualmente los análisis de colapso progresivo resultan complejos debido a que se deben realizar análisis dinámicos, análisis no lineales, incluidos en estos el comportamiento inelástico de los materiales [1, 2, 16]. La atención de la comunidad científica se centra en el estudio del colapso de las estructuras modernas más que en los colapsos históricos, debido a los limitados datos sobre el colapso de estructuras antes del siglo XX y al desarrollo vertiginoso de los materiales de construcción y sus

métodos de empleo, así como, a constantes cambios en los diseños estructurales de las edificaciones [17].

En Cuba se han realizado pocos estudios relacionados con el análisis del mecanismo de colapso progresivo. Por eso, en este artículo se presenta una revisión bibliográfica con el objetivo de reconocer los métodos aprobados y más empleados en este campo. En este trabajo se realiza especial énfasis en las investigaciones sobre torres de celosía metálicas debido a que la cifra de estas estructuras derribadas por la acción de ciclones en el país durante el período de 1996 al 2017 asciende a 523. Dado que nuestra isla es continuamente afectada por estos fenómenos meteorológicos, reviste gran importancia el estudio del colapso progresivo en este tipo de estructuras y su correcto diseño.

2. Definiciones generales sobre colapso progresivo

Se han desarrollado varias investigaciones que abordan la evaluación y mitigación de los efectos de cargas extremas sobre las estructuras, sin embargo, cuesta apreciar un consenso general sobre la terminología y procedimientos en las definiciones de este fenómeno entre artículos de investigación, libros, códigos de construcción y pautas de diseño.

El colapso progresivo ocurre cuando la falla de un componente estructural conduce a la falla y colapso de los miembros circundantes, pudiendo conducir al colapso de la estructura. Es un proceso dinámico complejo, no lineal, caracterizado por un comportamiento inelástico, grandes tensiones y deformaciones. El colapso global del sistema ocurrirá si el sistema dañado no puede alcanzar una nueva configuración de equilibrio estático [1, 18]. Por lo que está asociado con la propagación de la falla dentro de la estructura, pudiéndose identificar y describir cualitativamente. Adam [4] recoge algunas de las principales definiciones de colapso progresivo, de las que se puede concluir que: es un fenómeno en el que el colapso local, por la pérdida de capacidad de carga de un componente o una porción relativamente pequeña de la estructura debido a una carga anormal, es seguido por el colapso de los miembros contiguos, que a su vez es seguido por un colapso adicional y así sucesivamente, desencadenando una cascada de fallas que afectan a una parte importante de la estructura que no se había visto directamente afectados por la acción original; de modo que el colapso generalizado ocurre como resultado de un fallo local, produciéndose un daño total desproporcionado con respecto a la causa original.

La reducción del riesgo a través de la robustez estructural es la forma más empleada de prevenir estos colapsos. Según el campo de actuación, se pueden encontrar varias definiciones de robustez, Adam [4] definen que “la robustez estructural depende en gran medida de la redundancia, que es la capacidad de la estructura para distribuir las cargas después del daño en una sola pieza o en unos pocos miembros” y resalta que la robustez estructural no es un indicador de sobrediseño, sin embargo, le aporta a la estructura la capacidad de activar mecanismos de resistencia para soportar cargas normales.

En principio, cualquier carga pudiera detonar un fallo por colapso progresivo en una estructura, pero son un conjunto de cargas generadas por eventos extremos las que con mayor frecuencia lo generan. Estas cargas suelen estar relacionadas con eventos de “baja probabilidad/alta consecuencia” (LPHC por sus siglas en inglés), las que, como dice su nombre, tienen una probabilidad de ocurrencia significativamente menor que la de los eventos normales, pero provocan enormes pérdidas económicas y en ocasiones humanas [4]. Adam clasifica estos eventos LPHC en:

- (i) eventos naturales extremos (ciclones y huracanes, tormentas de viento, sismos, inundaciones repentinas, grandes deslizamientos de tierra);
- (ii) eventos extremos accidentales (explosiones, impactos e incendios);
- (iii) acciones maliciosas;
- (iv) errores humanos en el diseño, construcción, uso o mantenimiento de la estructura;
- (v) fenómenos de deterioro (corrosión del acero y de laminación del hormigón).

Los colapsos progresivos según Starossek [19] se pueden clasificar en seis tipos: colapso tipo panqueque, colapso tipo cremallera, colapso tipo dominó, colapso tipo sección, colapso tipo inestabilidad y colapso de tipo mixto. Basados en los mecanismos y características distintivas de cada uno de estos tipos de colapsos progresivos, se permite hacer un esquema de una clasificación jerárquica, combinándolos en clases. Tanto los colapsos de tipo cremallera como los de sección, se caracterizan por la redistribución de fuerzas previamente transmitidas por fallas en los elementos, regiones o partes transversales que soportan la carga en la estructura o sección transversal restante, estos dos tipos se incluyen en la clase de colapso de redistribución. El colapso tipo panqueque y el colapso tipo dominó, en comparación, tienen menos características en común, sin embargo, a pesar de todas sus diferencias, comparten una característica importante: una cantidad sustancial de energía potencial gravitacional se transforma en energía cinética durante la caída o el vuelco de los componentes y posteriormente se reintroduce de manera más o menos abrupta en la estructura, estos dos tipos de colapso se combinan en la clase de colapso de impacto. El colapso de tipo inestabilidad forma una clase propia, se caracteriza por la desestabilización de los elementos que soportan la carga en la compresión causada por la interrupción de los elementos estabilizadores, la transformación de la energía potencial gravitacional también juega un papel importante, pero de una manera diferente que para los tipos de colapso en la clase de impacto. Finalmente, el colapso de tipo mixto también constituye una clase separada, para la cual, sin embargo, es difícil identificar características comunes además del hecho de que las características de varios tipos de colapso interactúan y posiblemente se refuerzan entre sí para promover el colapso.

Según el tipo de estructura pueden variar las características y procesos que se originan en el colapso progresivo, entre ellas están: la acción dinámica y la concentración de fuerzas, el comportamiento frágil del material, la falta de capacidad de reserva, el comportamiento dúctil del material y la sobrecarga, la continuidad o discontinuidad de los elementos, la transferencia de carga en serie o en paralelo, la orientación espacial y la esbeltez, el tamaño y el espaciado, la irregularidad, y la estructuración.

Starossek [19] vincula estas funciones que promueven el colapso con los tipos 6 de colapsos identificados por él. Aborda cómo la acción dinámica y la concentración de fuerza es más perjudicial si el comportamiento del material del elemento que es propenso a fallar tras el fallo de un primer elemento es frágil, ya que la ductilidad del mismo permitiría absorber la energía cinética haciendo posible la redistribución de fuerzas y por consiguiente una reducción de la concentración de estas. Resalta que la acción dinámica solo es indispensable para la explicación de un colapso tipo panqueque; mientras que la concentración de fuerza en el elemento que va a fallar a continuación, inducida por la falla del elemento anterior, ocurre en todos los tipos de colapsos progresivos, excepto posiblemente en el tipo de colapso de inestabilidad.

Sin embargo, existen ocasiones en las que la sobrerresistencia y el comportamiento dúctil del material pudieran ser perjudiciales, como por ejemplo en un colapso de tipo dominó donde la acción de propagación se transmite mediante elementos mediadores en tensión (como en una Línea de Transmisión Eléctrica: LTE). En estos casos, estos elementos y sus conexiones deberían ser no dúctiles, para minimizar el tiempo de acción y el impulso de fuerza transmitido, así como se debe de evitar que sean sobrerresistentes, para que no transmitan fuerzas mayores que las que ocurren normalmente. Estos criterios también se aplican a un colapso mixto con predominio de características de tipo dominó.

Por último, relaciona la estructuración con los 2 tipos de colapso que se incluyen en la clase de impacto. Mientras que, para el colapso tipo cremallera, tipo sección y tipo inestabilidad, no parece ser una condición necesaria. La estructuración se define como el grado en que un sistema posee un patrón definido de organización de sus partes interdependientes [20].

3. Regulaciones y métodos de diseño frente a los fallos por colapso progresivo

Dada la dificultad de predecir la ocurrencia y magnitud de los eventos extremos, generalmente detonantes de un colapso progresivo en estructuras, no es práctico ni posible diseñar una estructura contra ellos a través de los métodos tradicionales para cargas convencionales. Es por ello que los estándares de diseño actuales han tenido que modificarse en nuevas pautas y recomendaciones para el análisis y diseño de las estructuras.

Según Byfield [21] y Adam [4] algunos códigos de diseño como los Eurocódigos, el ASCE (2002) [22], el GSA (2003 y 2013) [23, 24] y el DoD (2005 y 2009) [25, 26] en los Estados Unidos, el NBCC (1995) en Canadá [27] y los Reglamentos de Construcción del Reino Unido (BSI, 1997, 2000) [28, 29], han ido incorporando los resultados de las investigaciones realizadas en orden de tener en cuenta el mecanismo de colapso de las estructuras en su diseño, pero no es una práctica generalizada a nivel mundial [17, 21, 30]. Para el caso de la actualización y competencia, de los reglamentos establecidos en los Eurocódigos, se fundó en el 2015 Comité Técnico CENT/TC 250 “Eurocódigos Estructurales”.

La introducción de disposiciones en los códigos para la robustez estructural, proporcionando niveles mínimos que permiten a los edificios de varios pisos redistribuir y soportar cargas de gravedad después de la pérdida de la capacidad resistente de uno o más miembros, fue pionera en el Reino Unido después del colapso de la torre Ronan Point con la implementación de la Quinta Enmienda de las Regulaciones de Construcción [31]. El concepto de la eliminación de miembros en fallo, eliminando su aporte a la rigidez de la estructura, evolucionó con el tiempo en diferentes métodos que se encuentran en los códigos internacionales, siendo la anterior Quinta Enmienda el eje base de los mismos [4].

Las consideraciones explícitas sobre la solidez estructural no fueron introducidas en los códigos de diseño en otras partes del mundo hasta principios del XXI [4]. Por ejemplo, en China el primer código de diseño de prevención de colapso progresivo que muestra los métodos de diseño empleados internacionalmente es el Código para el diseño anticolidión de estructuras de edificios [32], publicado y aprobado en el 2014; en Australia, no fue hasta 2016 que el código actual [33], introdujo requisitos generales y breves basados en la eliminación de miembros teóricos y el diseño de elementos clave para todas las clases de edificios; mientras que en Italia, los conceptos de robustez estructural para evitar estos colapsos progresivos, se incluyeron en el CNR DT 218 [34] en 2018.

Existen varios métodos para evaluar la ocurrencia del colapso progresivo en una estructura, clasificados en métodos indirectos y métodos directos. Entre los códigos y pautas de diseños se reconocen tres métodos principales: Atado de Miembros (fuerzas de vinculación) (método indirecto), Ruta de Carga Alternativa (Alternative Path Load – término en inglés) (APL) (método directo) y método de diseño de Elementos Claves (resistencia local) (método directo). Según Adam [4], algunos autores [35, 36] reconocen un cuarto grupo recientemente, el de los métodos basados en el riesgo.



El método del Atado de Miembros es un método de diseño indirecto, y es el más fácil de implementar ya que no requiere de un análisis adicional de la estructura [21]. Es recomendado para estructuras con bajo riesgo de colapso progresivo [4]. Este método está dirigido a proporcionar niveles mínimos de amarre, continuidad y ductilidad, por medio de amarres horizontales y verticales, garantizando que la estructura del edificio pueda actuar en conjunto para evitar un colapso progresivo en un evento anormal. Algunas recomendaciones para conseguir efectividad en dichos amarres son: un correcto diseño en planta, sistemas integrados de traviesas, cambio de direcciones de luz de losas de piso, particiones interiores de carga, provisión de tirantes horizontales, atar continuamente desde los cimientos hasta el nivel del techo las columnas y muros de carga, acción de catenaria de la losa de piso, viga acción de los muros, detalle dúctil y edición de refuerzos para voladura y reversión de carga [21]. La mayoría de los códigos y directrices internacionales, lo toman en cuenta entre los métodos de diseño que consideran para prevenir el colapso progresivo (con excepción de la GSA 2013 (Estados Unidos) [24] y el NCC 2016 (Australia) [33]).

En el método de diseño Ruta de Carga Alternativa (APL) se define la pérdida de un componente estructural primario y se evalúa la capacidad de la estructura circundante para permanecer intacta, comprobando si las cargas reales que inician el colapso de un miembro estructural primario (clave) provocan el colapso progresivo de la estructura [2]. La evaluación alternativa de la ruta de carga se realiza mediante la eliminación de uno o varios elementos de la estructura, es decir, la introducción de un daño inicial y el análisis de la estructura restante para determinar si este se propaga. Una ventaja de este método es que es independiente de la carga inicial, por lo que la solución es válida para cualquier tipo de peligro que origine la pérdida de un miembro, sin embargo, se ignora el daño de los elementos adyacentes de las columnas removidas bajo condiciones de explosión y este problema puede conducir a una predicción incorrecta del colapso progresivo [37]. De acuerdo con la importancia de la estructura, se adoptan análisis estáticos lineales, análisis estático no lineal, análisis dinámicos lineales y análisis dinámicos no lineales para realizar la evaluación del potencial de colapso progresivo. El análisis

dinámico no lineal es el método más práctico, mientras que el análisis estático lineal es el más fácil de implementar [16]. Detalles sobre estos análisis se pueden encontrar en las referencias [2], [21] y [35]. Los procedimientos dinámicos no lineales conducen a resultados más precisos que los procedimientos estáticos, pero los procedimientos dinámicos no lineales son muy complicados y la evaluación o validación de los resultados puede llevar mucho tiempo. Por ello, algunas investigaciones internacionales han ido encaminadas a la determinación de procedimientos de análisis simplificado para el análisis de colapso progresivo de estructuras, así como la magnitud y variación de los factores de aumento de carga dinámicos y no lineales [38, 39]. El método APL es considerado en todos los códigos y directrices internacionales.

El método de diseño de los Elementos Claves se centra en evitar fallas locales de los elementos que pueden detonar el colapso progresivo de la estructura, es considerado otro de los métodos de diseño directo. Se requiere en primer lugar, de un análisis de la estructura para determinar los elementos claves, este es un paso de gran importancia para luego encaminar la atención hacia dichos elementos. Algunas de las normativas y pautas de diseño lo consideran un método de último recurso en caso que los métodos APL demuestren que la estructura es incapaz de redistribuir las cargas, mientras que en otros el diseño de elementos clave es parte del enfoque APL. Por su parte, el NCC 2016 [33] australiano centra la atención de este método en los componentes estructurales que sostienen más del 25% de la estructura total [4]. La GSA 2013 (Estados Unidos) [24] es el único de los códigos y directrices internacionales que no recoge este método para el análisis del colapso progresivo.

En resumen, los métodos de Amarre de Miembros y APL consideran la falla local y trabajan en la redistribución de esfuerzos, mientras que el método de los Elementos Claves se enfoca en prevenir dicha falla local atendiendo la robustez de los elementos críticos que pueden detonar el colapso de la estructura.

4. Estudios Internacionales sobre colapso progresivo

4.1 Estudios generales

Adam desarrolló un estudio bibliográfico del estado de las investigaciones sobre colapso progresivo en estructuras en la base de datos Scopus hasta el año 2017 [4]. Su estudio demostró que hasta el año 2002, la mayor parte de las investigaciones se realizaron en el Reino Unido y los Estados Unidos, motivados por los eventos de Ronan Point y del Edificio Federal Alfred Murrah. Sin embargo, después de los ataques al World Trade Center en 2001, la investigación en los Estados Unidos se intensificó, convirtiéndolo en el país con más publicaciones sobre el tema. En los años entre 2009 y 2017 la mayor parte de la iniciativa es tomada por Asia, siendo China el líder en estas investigaciones y el país que más recursos invierte en las mismas, mientras que también ha aumentado el interés de países como Corea del Sur, Singapur e Irán, no obstante Estados Unidos y el Reino Unido siguen entre los países más activos en este campo.

En el trabajo publicado por Adam y colegas [4] se analizan las publicaciones en relación con los materiales de construcción empleados; como resultado se obtuvo que las estructuras de hormigón fundidas in situ y las estructuras de acero son las más estudiadas y con similares registros, en tanto se encontraron muy pocos estudios sobre hormigón prefabricado y fue casi nulo el interés por las estructuras de madera o mampostería. Más recientemente se han encontrado nuevos estudios sobre colapso progresivo en estructuras prefabricadas, un ejemplo es la investigación de Feng and Gang Wu [40].

Entre los principales trabajos desarrollados sobre colapso progresivo se destacan los realizados basados en estudios de casos de colapsos progresivos ocurridos en edificaciones [12, 13, 40-51] y los basados en colapsos progresivos de torres reticuladas [40]. Las herramientas utilizadas para la evaluación de los estudios de colapso han sido tanto experimentales como numéricas.

Guo [41] describe un estudio experimental y análisis numérico realizado a una estructura de pórticos de hormigón armado a escala 1/3 empleando el método APL con análisis dinámico no lineal. El experimento mostró que el mecanismo de colapso progresivo del pórtico compuesto consta de 6 etapas: etapa elástica, etapa elasto-plástica, etapa de arco, etapa plástica, etapa transitoria y etapa catenaria escenario, donde la acción de la catenaria aumentó significativamente la resistencia al colapso progresivo de la estructura. Song [42] estudió un edificio con estructura de acero quitando físicamente cuatro columnas del primer piso de uno de los perímetros (APL) para simular la pérdida repentina de columnas y evaluar el mecanismo de falla de la estructura, en su estudio se desarrollaron y analizaron modelos bidimensionales y tridimensionales del edificio para simular la respuesta de colapso progresivo en SAP2000 con un enfoque estático lineal. Los resultados mostraron que la estructura porticada forma un mecanismo de resistencia y una nueva trayectoria alterna de cargas desequilibradas que le permiten prevenir la ocurrencia de colapso progresivo después de la falla de la columna conectada a las juntas. El Kamari [43] explica el colapso de la estructura de una parte de la Terminal 2E del Aeropuerto Roissy Charles de Gaulle en Francia en el 2004 mediante un modelo de grano fino utilizando el software Ansys y el método APL con análisis estático lineal. Wang [44] estudia el colapso progresivo de columnas tubulares de acero rellenas de hormigón a conexiones de vigas de acero empleando modelos de elementos finitos en el software ABAQUS y el método APL con análisis estático no lineal y análisis dinámico no lineal. Al-Salloum [45] analiza el colapso progresivo contra explosiones de un edificio de 28m de altura conformado por pórticos de hormigón armado en Riad, Arabia Saudita. Para su estudio utilizó el software LSDYNA empleando el método de resistencia local con un análisis dinámico no lineal.

Yarlagadda [12] modela en SAP2000 el colapso progresivo de la torre de acero Plasco en Irán del 2017 (Ver Figura 3) empleando el método APL con análisis estático lineal, el cual se derrumbó después de un intenso estallido de fuego. Este análisis en particular no es concluyente, por lo que recomiendan más estudios significativos, pero fue de los primeros en analizar el incidente. Shakib [13] presenta una evaluación estructural integral del colapso progresivo de esta misma estructura, el escenario de colapsos es simulado mediante el modelado de elementos finitos y el análisis numérico en el software SAP2000, empleando el método APL con enfoque dinámico no lineal. La vulnerabilidad del edificio se debió principalmente a la falta de continuidad, ductilidad y redundancia adecuadas para resistir la propagación del daño, con presencia de fallas en torres consecutivas, pandeo de las columnas y cambio significativo en la forma geométrica de la estructura, mientras que el eslabón más débil resultó ser las conexiones de la viga a la columna.



Figura 3: Colapso del edificio de apartamentos Plasco en Irán. (Tomado de [13])

Rahnavard [46] investiga el comportamiento de ocho tipos de edificios de estructura compuesta de acero de gran altura expuestos a dos sistemas de resistencia lateral, dos escenarios de remoción de columnas y dos tipos de planos, aplicando el método APL en un modelado de elementos finitos 3-D en el software estructural Etabs con análisis dinámico no lineal. Jiang y Li [47] investigan la resistencia al colapso de los marcos de acero arriostrados expuestos al fuego, empleando como estructura prototipo un edificio de estructura de acero de 8 pisos modelado en el software de elementos finitos LS-DYNA y empleando el método APL con análisis dinámico no lineal. En el artículo se estudia la influencia del tipo, número y ubicación de los sistemas de arriostramiento en el colapso global. Feng [40] realiza el estudio del comportamiento de colapso progresivo de estructuras prefabricadas de hormigón armado simulando las estructuras en el software OpenSEES aplicando el método APL, para el análisis emplean dos soluciones no lineales mejoradas, el algoritmo cuasi-Newton consistente y el algoritmo $KR-\alpha$ explícito, respectivamente para el análisis estático y dinámico. Farahmand-Tabar [48] investiga el colapso progresivo de un puente colgante bajo la carga explosiva. Se estudiaron las fuerzas y momentos de la superestructura, las respuestas y la estabilidad de la estructura bajo las cargas aplicadas. En esta investigación se desarrolla un análisis dinámico no lineal aplicando el método APL con modelación en el software CSIBridge. Elsanadedy [49] evalúa el potencial de colapso progresivo de pórticos de hormigón armado resistentes a momentos especiales en escenarios de pérdida de columnas (APL) a través de un análisis estático no lineal, para el estudio se utilizó el software de elementos finitos LSDYNA. Weng [50] estudia la capacidad de redistribución de carga de estructuras de losas planas de hormigón armado sometidas a un escenario de pérdida de columna central, por el método APL con análisis estático lineal, construyendo modelos de elementos finitos de alta fidelidad en el software comercial LSDYNA. Los modelos numéricos fueron validados por resultados experimentales. Zhang [51] también estudia analíticamente el fenómeno de la pérdida de una columna central y la resistencia al colapso, pero en este caso lo hacen para pórticos de acero desnudos y arriostrados mediante la implementación del método APL con un análisis estático no lineal. Toman como parámetro las relaciones resistencia-desplazamiento y verifican, con análisis numéricos, la precisión del método analítico empleado.

4.2. Estudios en torres metálicas de celosía

En años recientes ha sido marcado el interés en el estudio de torres reticuladas metálicas, que componen líneas de transmisión eléctrica o soportan antenas de telecomunicaciones. Debido a la complejidad y el alto costo de realizar estos análisis de forma experimental, es común la modelación numérica de estos problemas. Lo más frecuente es el empleo de algún software profesional [16, 52-62], como el ABAQUS o el SAP2000; aunque en algunos casos los autores prefieren utilizar sus propios códigos [63-65]. En todos estos estudios, es similar el uso del método de elementos finitos en los análisis realizados.



Figura 4: Colapso de una torre de transmisión eléctrica de 220 kV en China. (Tomado de [60])

Uno de los eventos más estudiados contra colapso progresivo en este tipo de estructuras son los distintos escenarios de cargas de viento. El Damatty [66] presenta un resumen detallado de la revisión de la literatura y el conocimiento más avanzado sobre la respuesta de los sistemas líneas de transmisión bajo eventos de viento extremo (HIW, por sus siglas en inglés).

A continuación, se muestran algunos ejemplos de investigaciones dedicadas a conocer el comportamiento de las torres metálicas frente a eventos HIW. Hangan [64] identifica los miembros críticos y mecanismos de falla de líneas de transmisión por medio de la formulación de un modelo de dinámica de fluidos computacional de campos de viento descendente (downburst) y tornado validado por experimentos de laboratorio a pequeña escala y un modelo teórico/analítico, y con la derivación de un modelo de carga para vientos descendentes y aplicación de este modelo a modelos de elementos finitos completamente no lineales de un sistema de línea/torre arriostrada MH Tipo A. En Zhang [58] establecieron los modelos de elementos finitos para una sola torre y un sistema de línea de torre de transmisión para simular el colapso progresivo inducido por el viento mediante la técnica del APL con análisis dinámico no lineal y empleando como criterio de falla la relación demanda capacidad y la deformación máxima. Mahmoud [59] estudia la respuesta estructural de dos tipologías de torres de transmisión eléctrica por medio de modelos numéricos en SAP2000 y empleando el método APL con un análisis dinámico no lineal. Asgarian y colegas [62] evalúan la vulnerabilidad al colapso progresivo de una torre de celosía en una línea de transmisión de energía de 400 kV empleando el método APL con análisis dinámico no lineal. Gao y Wang [16] emplean el método APL con un análisis dinámico no lineal para determinar el mecanismo de falla a partir de curvas de fragilidad de torres de telecomunicación, que soportan antenas, representadas por un modelo numérico en ABAQUS (FEM). Dadi [53] realiza el análisis del colapso progresivo empleando modelos numéricos computacionales para evaluar la eficiencia de las tipologías K, X y K-X de la composición de torres eléctricas empleando el método APL con un análisis estático lineal. Fu [55] utiliza modelos numéricos en ANSYS (FEM) para estudiar el mecanismo de falla de torres de transmisión eléctrica por medio del método APL con análisis estático no lineal. Wang [60] analiza, con el método APL, las fallas de múltiples escalas de torres de transmisión bajo carga de ráfaga descendente (downburst) empleando modelos numéricos basados en el método de los elementos finitos con análisis dinámico no lineal. Tian [65] simula el colapso de una torre de comunicación contra diferentes ángulos de incidencia del viento con base en el método dinámico explícito de análisis dinámico incremental (IDA) y utilizando el modelo de material Tian-Ma-Qu que toma en cuenta las propiedades no lineales del mismo, obteniendo la posición de los elementos críticos y el mecanismo de colapso de la torre empleando el método APL.

Otro evento que llama la atención a los investigadores son los sismos. Tian [56], Wang [57] y Tian [67] analizan el mecanismo de colapso progresivo de torres de transmisión eléctrica sometidas a estas cargas. En las tres investigaciones se analizan el mecanismo de fallo por el método APL con análisis dinámico no lineal, en las direcciones longitudinal y transversal de la línea, utilizando modelos numéricos en ABAQUS. Zheng y Fan [61] desarrollan un modelo no lineal de fuerza-desplazamiento para un elemento de barra basado en un modelo de teoría física utilizando el software de análisis de elementos finitos ANSYS, con el fin de analizar el colapso progresivo de estructuras de celosías espaciales contra cargas sísmicas empleando el método APL con análisis dinámico no lineal.

Un caso diferente es el de Fu [54], quien realiza un estudio donde se compara el mecanismo de falla de una tipología de torre que fue dañada por una descarga eléctrica y la misma torre sin este estado de daño inicial, pero incluyendo diferentes escenarios de carga al tomar en cuenta diferentes ángulos de incidencia del viento. Los modelos numéricos elaborados son analizados usando el método APL con un análisis dinámico no lineal. Como se puede apreciar, el método más empleado para determinar el mecanismo de falla en los estudios de torres de transmisión eléctrica es el método APL [52, 53, 55, 56, 58]. Este es aplicado en diferentes variantes, siempre con la idea general de eliminar el aporte a la rigidez general de la estructura del elemento en falla. Para ello se destacan tres vías principales: eliminar físicamente el elemento; eliminar físicamente el elemento y colocar en los nudos que lo unían con otros elementos las fuerzas interiores a las que estaba sometido; o modificar las propiedades inerciales del elemento igualándolas a cero.

En los estudios que analizan torres reticuladas metálicas de transmisión eléctrica se muestran en su mayoría estructuras autosoportadas [16, 53, 59, 62, 65], y en algunos casos torres atirantadas [63]. Estos estudios se dividen en dos grupos: los que analizan las torres de manera aislada [53-55, 59, 65], aunque siempre considerando los efectos de los cables sobre la estructura [63] ya que las propiedades dinámicas de los cables influyen significativamente en las frecuencias naturales y las relaciones de amortiguación de las torres [68], y los que analizan un tramo completo de una línea de transmisión [58, 67]. Lo más frecuente en las investigaciones consultadas es el análisis de la torre de manera aislada a la línea de la que forma parte.

En los estudios consultados es más frecuente considerar el comportamiento no lineal del material [16, 52-54, 56, 57, 59, 65], son menos los autores que utilizan el comportamiento lineal [55, 67] debido a que los resultados son más conservadores. Las cargas son tenidas en cuenta en estos estudios tanto por su componente estática [52, 53, 59] como por su componente dinámica [16, 54, 60, 67].

4. Conclusiones

El colapso progresivo es un fenómeno de estudio reciente, con marcado auge en los últimos años tras los ataques del 11 de septiembre de 2001 al World Trade Center. Los resultados de las investigaciones se han incorporado a las regulaciones y códigos de diseño internacional en orden de tener en cuenta el mecanismo de fallo de las estructuras en su diseño, pero sin alcanzar aún un consenso en los criterios ni una práctica generalizada a nivel mundial.

Los estudios del mecanismo de colapso progresivo de estructuras se ha vuelto una excelente herramienta para realizar mejoras en los diseños. El uso de modelos numéricos para el estudio de estructuras es la herramienta más empleada debido a su alta fiabilidad y el obstáculo que muchas veces presenta realizar estudios a escala real o en laboratorios.

Entre los principales enfoques se identifican en la bibliografía el método indirecto de atado de miembros y los métodos directos, como el método Alternative Path Load (APL) y el método de diseño de elementos claves. El método más empleado en estudios de torres reticuladas es el APL.

En las bibliografías estudiadas, lo más común es el análisis de torres metálicas de transmisión eléctrica de manera aislada a la línea de la que forman parte considerando el comportamiento no lineal del material, mientras que las cargas son consideradas tanto de forma estática como dinámica.

Se recomienda ampliar este estudio e incluir los análisis y métodos de diseños contra colapso progresivo en las investigaciones y prácticas de construcción de estructuras en Cuba.



- [1] S. El-Tawil and H. Li, "Progressive collapse research current state and future needs," *Advanced Materials Research*, vol. 639-640, p. 10, 2013.
- [2] S. Marjanishvili, "Progressive analysis procedure for progressive collapse," *Journal of Performance of constructed facilities*, vol. 79, 2004.
- [3] R. G. Kumawat and G. P. Deshmukh, "Review on progressive collapse analysis of a regular structure," (in English), *International Journal of Progressive Research in Science and Engineering*, vol. 2, p. 4, June, 2021 2021.
- [4] F. P. Jose M. Adam, Juan Sagaseta, Xinzheng Lu, "Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century.," (in English), *Engineering Structures*, vol. 173, p. 28, 2018.
- [5] N. D. Cynthia Pearson, "Lessons from the progressive collapse of the Ronan Point Apartment Tower," *Forensic Engineering* 2003.
- [6] N. D. Cynthia Pearson, "Ronan Point Apartment Tower collapse and its effect on Building Codes," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2005.
- [7] W. G. C. Mete A. Sozen; Charles H. Thornton, Paul F. Mlakar Sr., "The Oklahoma City bombing: structure and mechanisms of the Murrah Building," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 1998.
- [8] J.-W. Jung and J.-W. Hong, "Blast Response Simulation of the Alfred Murrah Building Reinforced by Use of HPFRCC," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 15, no. 1, p. 4, 2021/02/02 2021.
- [9] G. a. Y. S. Silpa, I., "A review on progressive collapse of reinforced concrete flat slab structures," (in English), *Civil Engineering Infrastructures Journal* p. 14, 2021.
- [10] "NIST (National Institute of Standards and Technology). "Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers". S.Shyam Sunder, Informe de investigación. U. S. Government printing office. Washington, septiembre 2005. 298 páginas."
- [11] "Quintiere, J.G.; Marzo, M.Di; Becker, R. "A Suggested cause of the fire-induced collapse of the World Trade Towers". *Fire Safety Journal*. 3 junio 2002. Volumen 37, publicación 6 , páginas 707-716."
- [12] H. H. Tejeswar Yarlagadda, Liming Jiang, Mark Green, and Asif Usmani, "Preliminary modelling of Plasco Tower collapse," *International Journal of High-Rise Buildings*, 2018.
- [13] M. Z. Hamzeh Shakib, Vahid Jahangiri, Reza Zamanian, "Evaluation of Plasco Building fire-induced progressive collapse," *Structures*, 2020.
- [14] H. G. Xinzheng LU, Hailin SUN, Yi LI, Zhe ZHENG, Yifan FEI, et al., "A preliminary analysis and discussion of the condominium building collapse in surfside, Florida, US, June 24, 2021," *Front. Struct. Civ. Eng.*, 2021.
- [15] X. Kong, "Investigation of the condominium building collapse in Surfside, Florida: A video feature tracking approach," 2021.
- [16] S. Gao and S. Wang, "Progressive collapse analysis of latticed telecommunication towers under wind loads," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, p. 13, 2018.
- [17] V. D. B. Foad Kiakojouria, Bernardino Chiaiab, Mohammad Reza Sheidaii, "Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects," (in English), *Engineering Structures*, vol. 206, p. 21, 2020.
- [18] P. K. a. T. R. Samrat Lavendra, "Progressive Collapse Behaviour Assessment of Steel Frame Structures – A Review," presented at the International Conference on Contemporary and Sustainable Infrastructure, 2021.
- [19] U. Starossek, "Typology of progressive collapse," *Engineering Structures*, vol. 29, p. 8, 2007.
- [20] B. J. Boehm BW, Kaspar H, Lipow M, Macleod GJ, Merritt MJ, "Characteristics of software quality," *New York, NY: North-Holland Publishing Company*, 1978.
- [21] M. Byfield, W. Mudalige, C. Morison, and E. Stoddart, "A review of progressive collapse research and regulations," *Structures and Buildings*, vol. 167, no. SB8, 2014.
- [22] ASCE, "ASCE (American Society of Civil Engineers) (2002) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. ASCE, Reston, VA, USA. ," 2002.
- [23] W. GSA (General Service Administration) (2003) Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects. GSA, DC, USA. .
- [24] W. GSA (General Service Administration) (2013) Alternate Path Analysis & Design Guidelines For Progressive Collapse Resistance. GSA, DC, USA. .
- [25] US DoD (2005) UFC 4-023-03: Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. A Review and Update on Department of Defense Progressive Collapse Guidance. US Department of Defense.
- [26] W. US DoD (2009) UFC 4-023-03: Design of buildings to resist progressive collapse. US Department of Defense, DC, USA. .
- [27] O. NBCC (1995) National Building Code of Canada. NBCC, Ontario, Canada. .
- [28] L. BSI (1997) BS 8110: Part 1: Structural use of concrete. BSI, UK. .
- [29] L. BSI (2000) BS 5950: Part 1: Structural use of steelwork in building. BSI, UK. .
- [30] B. Abdelwahed, "A review on building progressive collapse, survey and discussion,"

- [31] *Minister of Housing and Local Government. The Building (Fifth Amendment) Regulations 1970. Statutory Instruments of the UK, S.I. 26 1970, No. 109; 1970.*
- [32] *China Association for Engineering Construction Standardization (CECS). Code for anti-collapse design of building structures, CECS 392: 2014. Beijing (China); 2014. .*
- [33] *Australian Building Codes Board (ABCB). National construction code (NCC). Council of Australian Governments; 2016.*
- [34] *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Fibre Reinforced Inorganic Matrix Systems for Strengthening Existing Structures, 2018.*
- [35] Arup, "Review of international research on structural robustness and disproportionate collapse," *Department for Communities and Local Government, 2011.*
- [36] "European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research (COST). In: Robustness of structures – proceedings of the 1st workshop, COST Action TU0601. Switzerland: ETH Zurich," 2008.
- [37] M. Bagheripourasil and Y. Mohammadi, "Comparison between Alternative Load Path Method and a Direct Applying Blast Loading Method in Assessment of the Progressive Collapse," *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 2015.
- [38] A. McKay, K. Marchand, and M. Diaz, "Alternate Path Method in progressive collapse analysis. Variation of dynamic and nonlinear load increase factors," *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 17, 2012.
- [39] A. Naji and F. Irani, "Progressive collapse analysis of steel frames, Simplified procedure and explicit expression for dynamic increase factor," *International Journal of Steel Structures*, vol. 12, no. 4, p. 13, 2012.
- [40] Z. W. De-Cheng Feng, Gang Wu, "Progressive collapse performance analysis of precast reinforced concrete structures," *Struct Design Tall Spec Build*, 2019.
- [41] L. Guo, S. Gao, F. Fu, and Y. Wang, "Experimental study and numerical analysis of progressive collapse resistance of composite frames," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 89, 2013.
- [42] B. Song, K. Giriunas, and H. Sezen, "Progressive collapse testing and analysis of steel frame building," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 94, 2014.
- [43] Y. El-Kamari, W. Raphael, and A. Chateaufneuf, "Reliability study and simulation of the progressive collapse of Roissy Charles de Gaulle Airport," *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, vol. 3, 2015.
- [44] W. Wang, H. Li, and J. Wang, "Progressive collapse analysis of concrete filled steel tubular column to steel beam connections using multi scaled model," *Structures*, p. 11, 2016.
- [45] H. A. Y.A. Al-Salloum, T.H. Almusallam, T. Ngo, P. Mendis, "Progressive collapse analysis of a typical RC high-rise tower," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 2017.
- [46] F. F. Z. F. Rohola Rahnavard, Ali Hosseini, Mohamed Suleiman, "Nonlinear analysis on progressive collapse of tall steel composite buildings," *Case Studies in Construction Materials*, 2018.
- [47] J. J. a. G.-Q. Li, "Mitigation of fire-induced progressive collapse of steel framed structures using bracing systems," *Advanced Steel Construction*, vol. 15, 2019.
- [48] M. B. Salar Farahmand-Tabar, Majid Vahabzadeh, "Investigation of the progressive collapse in a suspension bridge under the explosive load," *International Journal of Steel Structures*, 2019.
- [49] Y. A. A.-S. Hussein M. Elsanadedy, Tarek H. Almusallam, Tuan Ngo, Husain Abbas, "Assessment of progressive collapse potential of special moment resisting RC frames- Experimental and FE study," *Engineering Failure Analysis*, 2019.
- [50] K. Q. Yun-Hao Weng, Feng Fu, Qin Fang, "Numerical investigation on load redistribution capacity of flat slab substructures to resist progressive collapse," *Journal of Building Engineering*, 2019.
- [51] G.-Q. L. Wen-Jin Zhang, Jing-Zhou Zhang, "Progressive collapse mechanism of steel framed-structures subjected to a middle-column loss," *Advanced Steel Construction*, vol. 17, 2021.
- [52] J.-H. Choi, H.-S. Park, and T.-H. Lee, "Evaluation of progressive collapse of transmission tower," *International Journal of Science, Engineering and Technology*, vol. 10, no. 9, 2016.
- [53] R. Dadi, "Progressive collapse study of 220kv transmission line tower with different bracing patterns " *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 9, no. 10, 2018.
- [54] X. Fu, H.-N. Li, and J. Li, "Wind-resistance and failure analyses of a lightning-damaged transmission tower," *Performance of Constructed Facilities*, vol. 32, no. 1, 2018.
- [55] X. Fu, J. Wang, and H.-N. Li, "Failure analysis of a transmission tower induced by wind loads," presented at the The 2018 Structures Congress, Songdo Convensia, Incheon, Korea, 2018.
- [56] L. Tian, R. Ma, W. Wang, and L. Wang, "Progressive collapse analysis of power transmission tower under earthquake excitation," *The Open Civil Engineering Journal*, vol. 7, p. 5, 2013.

- [57] W. M. Wang, H. N. Li, and L. Tian, "Progressive collapse analysis of transmission tower-line system under earthquake," *Advanced Steel Construction* vol. 9, no. 2, p. 11, 2013.
- [58] Z. Zhang, H. Li, G. Li, W. Wang, and L. Tian, "The Numerical Analysis of transmission Tower-Line System Wind-Induced Collapsed Performance," *Matematical problems in Engineering*, vol. 2013, p. 11, 2013.
- [59] G.H.Mahmoud, B.S.Tork, and S.A.EL-Beshlawy, "Structural capacity and failure mechanisms of transmission towers under high intensity wind loading," *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 13, no. 5, p. 8, 2016.
- [60] F. Wang, Y. Xu, and W. Qu, "Multi-scale failure analysis of transmission towers under downburst loading," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 18, no. 2, p. 26, 2018.
- [61] J. F. Hua-Dong Zheng, "Analysis of the progressive collapse of space truss structures during earthquakes based on a physical theory hysteretic model," *Thin-Walled Structures*, 2018.
- [62] B. Asgarian, S. Dadras, A. Zaghi, and M. Mehr, "Progressive collapse analysis of power transmission towers," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 123, p. 10, 2016.
- [63] A. Hamada and A. E. Damatty, "Failure analysis of guyed transmission lines during F2 tornado event," *Engineering Structures*, vol. 85, p. 14, 2015.
- [64] H. Hangan, E. Savory, A. E. Damatty, J. Galsworthy, and C. Miller, "Modeling and prediction of failure of transmission lines due to high intensity winds " presented at the Structures Congress, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2013.
- [65] L. T. X. Z. X. Fu, "Collapse simulations of communication tower subjected to wind loads using dynamic explicit method," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, p. 12, 2020.
- [66] A. E. Damatty, A. Elawady, A. Hamada, and W. E. Lin, "State-of-the-Art knowledge about behaviour of transmission line structures under downbursts and tornadoes," presented at the The 2014 World Congress on Advances in Civil Engineering, Environmental, and Materials Research, Busan, Korea, 2014.
- [67] L. Tian, P.-s. Ma, H. n. Li, and Y. Wang, "Progressive collapse of power transmission tower line system under extremely strong earthquake excitations," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 16, p. 21, 2016.
- [68] O. Y. Lu C, Xing Ma, Mills JE, "Structural analysis of lattice steel transmission towers: a review," (in English), *Journal of Steel Structures*

& *Construction*, p. 11, 2016.

