

Pasantía de investigación en el grupo materiales y estructuras de construcción INME, apoyando la línea de investigación: amenaza, vulnerabilidad y riesgo sísmico

Eliud Ariolfo Yenssuir Rico López

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Ricardo Alfredo Cruz Hernández

Ingeniero Civil, Ph D en ciencias técnicas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de ingeniería civil

Bucaramanga

2021

Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo General	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Mapeo Sistemático	13
2.1 Preguntas de búsqueda.....	13
2.2 Búsqueda en base de datos.....	14
2.3 Selección de estudios y evaluación de calidad	16
2.4 Extracción de información.....	17
2.5 Análisis y clasificación	18
3. Metodología de Investigación PEF	20
3.1 Diseño de la estructura.....	21
3.2 Modelado	23
3.2.1 Modelado Numérico	23
3.2.2 Modelado Experimental.....	25
3.2.3 Modelado Numérico Experimental.....	25

3.3 Definición de cargas sísmicas	26
3.4 Evaluación sísmica.....	28
3.4.1 Evaluación sísmica numérica	28
3.4.2 Evaluación sísmica experimental	29
3.5 Selección de cargas de fuego	31
3.6 Análisis Térmico	33
3.6.1 Análisis térmico numérico2	33
3.6.1.1 Escenarios de aplicación del fuego.....	34
3.6.1.2 Definición de propiedades de materiales a altas temperaturas.	34
3.6.2 Análisis térmico experimental	36
3.7 Análisis estructural del fuego.....	37
3.7.1 Análisis estructural del fuego numérico	37
3.7.2 Análisis estructural del fuego experimental	38
4 Temas de Investigación PEF	39
4.1 Acero	39
4.2 Concreto	40
4.3 Acero-concreto	41
4.4 Discusión.....	41
5. Fuego en estructuras: investigaciones realizadas dentro del grupo INME	42
5.1 Proyectos de grado	42

5.2 Artículos publicados	43
5.3 Discusión.....	43
6. Propuesta de tema de investigación sobre estructuras sometidas a fuego y sismo	44
6.1 Aliados estratégicos	47
6.2 Fuentes de financiación.....	48
7. Conclusiones	50
Referencias Bibliográficas	52

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Número de artículos incluidos durante el proceso de selección.....	18
Figura 2. Distribución temporal del número de publicaciones y del tema de investigación	19

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Palabras clave usadas en la búsqueda en las bases de datos	15
Tabla 2. Ecuaciones de búsqueda	17

Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A. Metodología para el estudio de mapeo sistemático

Apéndice B. Códigos de diseño estructural

Apéndice C. Programas computacionales para evaluación numérica del fuego

Apéndice D. Tipo de análisis sísmico utilizado en investigaciones numéricas

Apéndice E. Curvas de fuego

Apéndice F. Aliados estratégicos

Resumen

Título: Pasantía de investigación en el grupo materiales y estructuras de construcción INME, apoyando la línea de investigación: amenaza, vulnerabilidad y riesgo sísmico*

Autor: Eliud Ariolfo Yenssuir Rico López**

Palabras Clave: Fuego, Sismo, Estructura, Resistencia PEF, Mapeo Sistemático

En el presente documento resume el trabajo desarrollado durante la pasantía de investigación en el grupo de Materiales y Estructuras de Construcción INME de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, apoyando actividades de búsqueda de información sobre el comportamiento de estructuras en condición de sismo e incendio para la definición de posibles temas de investigación, aliados estratégicos y fuentes de financiación. Un mapeo sistemático se realizó para seleccionar los artículos científicos relevantes en la investigación de estructuras en situación de incendios causados por terremotos o PEF (Post Earthquake Fire). Durante la revisión bibliográfica se identificó una metodología de evaluación PEF para investigaciones numéricas y experimentales, adicionalmente, se encontró que el 70% de las investigaciones fueron numéricas y el 67% evaluaron el comportamiento global de pórticos de concreto reforzado y acero resistente a momentos. En las investigaciones PEF se evaluó la influencia en la resistencia PEF de los escenarios de fuego, cargas de fuego, nivel de daño sísmico, materiales de reforzamiento del concreto y materiales de recubrimiento del acero estructural. El grupo INME ha realizado investigaciones experimentales sobre el comportamiento mecánico y térmico; ante cargas de fuego, de materiales de recubrimiento del acero estructural, acero estructural y concreto reforzado, sin refuerzo y con aditivos. Para la definición de los posibles temas de investigación PEF dentro del grupo INME se evaluó la afinidad de las investigaciones realizadas en el grupo con las investigaciones PEF, se verificó la existencia de programas computacionales y laboratorios de fuego, y se establecieron posibles aliados estratégicos y fuentes de financiación.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director Ingeniero Civil Ricardo Alfredo Cruz Hernandez, Ph. D en Ciencias Técnicas

Abstract

Title: Research internship in the INME materials and construction structures group, supporting the line of research: threat, vulnerability and seismic risk *

Author: Eliud Ariolfo Yenssuir Rico López**

Keywords: Fire, Earthquake, Structure, PEF Resistance, Systematic Mapping

This document summarizes the work carried out during the research internship in the INME Building Materials and Structures group of the Civil Engineering School at Industrial University of Santander, supporting information-seeking activities on the structure's behavior under earthquake and fire actions for the definition of possible research topics, strategic allies, and funding sources. A systematic mapping was carried out to select relevant scientific articles in the investigation of structures in the event of fires caused by earthquakes or PEF (Post Earthquake Fire). During the bibliographic review, a PEF assessment methodology for numerical and experimental research was identified, in addition, 70% of studies were numerical research and 67% of studies evaluated the global behavior of reinforced concrete and steel moment resistant frames. PEF investigations assessed the influence on PEF resistance of fire scenarios, fire loads, seismic damage level, concrete reinforcement materials and structural steel insulation materials. INME group has conducted experimental research on mechanical and thermal behavior, under fire loads, of structural steel insulation materials, structural steel and reinforced concrete, non-reinforced concrete, and modified concrete with additives. In the definition of possible PEF research topics within the INME group, the affinity of the research carried out in the group with PEF research was assessed, the existence of fire computer programs and fire laboratories was verified, and possible strategic allies and sources of funding were established.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniera Civil. Director Ingeniero Civil Ricardo Alfredo Cruz Hernandez, Ph. D en Ciencias Técnicas

Introducción

Los efectos devastadores generados por un terremoto en las zonas urbanas e industriales pueden incrementarse dramáticamente si un incendio se produce inmediatamente después de un terremoto (Taylor, 2033). Un movimiento telúrico puede ocasionar daños graves a la infraestructura vial y teniendo en cuenta que la prioridad de las brigadas de emergencia de desastres es ayudar a las personas bajo los escombros, el tiempo de reacción para contrarrestar los incendios después de un terremoto aumentará considerablemente dando posibilidad a la generación de incendios a gran escala o conflagraciones (Behnam & Ronagh, 2014). Debido a que existen relativamente pocas investigaciones en el área de los incendios después de un sismo y a que todos los estándares y códigos de diseño de edificaciones ignoran este efecto en las estructuras, es importante continuar investigando y recolectando datos experimentales del comportamiento estructural de las edificaciones bajo el efecto PEF para que la comunidad de ingeniería realice validaciones a través de simulaciones numéricas (Shah, Sharma, & Bhargava, 2017).

El presente artículo describe el desarrollo de una investigación bibliográfica para la definición de un posible tema de investigación para la línea de investigación amenaza vulnerabilidad y riesgo sísmico del grupo de investigación INME, relacionado con la consideración de las situaciones de sismo e incendio. Para la búsqueda de información se realizó un mapeo sistemático, que permitió identificar una tendencia investigativa en la evaluación del efecto del fuego después de un sismo PEF (Post Earthquake Fire) que está directamente relacionada con el objetivo principal de esta pasantía. Adicionalmente se identificó una metodología de investigación PEF descrita en la Sección 3. En la Sección 4 se resumen los principales temas hasta ahora evaluados en las investigaciones PEF a nivel mundial, mientras que

en la Sección 5 se describen las investigaciones realizadas dentro del grupo INME que han incluido la acción del fuego. La discusión realizada por el autor para la definición de los posibles temas de investigación se presenta en la Sección 6.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Apoyar las actividades investigativas del grupo de investigación en materiales y estructuras de construcción (INME) en su línea de investigación: amenaza, vulnerabilidad y riesgo sísmico.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar actividades de apoyo para la definición del tema de investigación de estructuras sometidas a las condiciones de sismo e incendio, en la línea de investigación de vulnerabilidad según la disponibilidad de recursos físicos y de conocimiento.

Realizar actividades de apoyo en la elaboración de la propuesta del proyecto de investigación.

Realizar actividades de apoyo en la búsqueda de posibles fuentes de financiación y de posibles alianzas nacionales e internacionales para el desarrollo del tema de investigación.

2. Mapeo Sistemático

Para encontrar la literatura relacionada con el tema de la investigación, el presente estudio ha realizado un mapeo sistemático siguiendo principalmente la metodología de Petersen. et al. (2015) utilizada principalmente para el campo de la ingeniería de software, sin embargo, su trabajo también ha sido implementado en otros campos de investigación Francesco et al. (2017) y Paliadas & Sylaiou (2016). La metodología citada para el mapeo sistemático se describe en las siguientes secciones:

- Sección 2.1: Preguntas de búsqueda
- Sección 2.2: Búsqueda en base de datos
- Sección 2.3: Selección de estudios y evaluación de calidad
- Sección 2.4: Extracción de Información
- Sección 2.5: Análisis y clasificación

2.1 Preguntas de búsqueda

De manera previa al mapeo sistemático se realizó una búsqueda de términos relacionados con las palabras ‘sismo e incendio’ en el buscador Google Scholar lo que permitió identificar las siguientes formas de referirse a la acción de cargas sísmicas y de fuego: Post Earthquake Fire-PEF y Fire Following Earthquake-FFE. A partir de la identificación de estos términos en una inspección literaria que sólo consideró la lectura de los títulos de artículos arrojados como resultados de la búsqueda, se plantearon las siguientes preguntas de búsqueda:

- ¿Cuál ha sido la frecuencia de publicación de estudios del efecto fuego después del sismo?

- ¿Qué áreas de investigación han sido estudiadas ante el efecto PEF o FFE en estructuras y cuántos estudios corresponden a cada área?
- ¿Cuáles han sido los métodos de estudio utilizados en el análisis del fuego después de un sismo en edificaciones?
- ¿Cuáles problemas y soluciones han sido identificados en los estudios hasta ahora realizados y cuáles son los retos para futuros estudios del efecto PEF o FFE en las edificaciones?

2.2 Búsqueda en base de datos

A partir de las preguntas de búsqueda se identificaron las palabras clave y se establecieron las cadenas de búsqueda aplicando la metodología PICO (Population, Intervention, Comparison y Outcomes) sugerida por Kitchenham et al. (2007). Las palabras clave obtenidas con la estrategia PICO fueron: artículo, estructura, sismo y fuego. Las palabras clave obtenidas fueron complementadas con sinónimos y posteriormente se realizó una primera búsqueda en el buscador web Google Scholar para identificar otros términos relacionados. Haciendo uso de la estructura de trabajo de Labonnote et al. (2016) para la definición de las cadenas de búsqueda, en la Tabla 1 se tabularon las palabras clave obtenidas de la estrategia PICO y de la identificación de sinónimos y términos relacionados en función del efecto (Qué), la descripción (Cómo) y el objeto que fue limitado a términos dentro del campo estructural (Dónde).

Habiendo establecido las palabras clave se realizó la búsqueda mediante la combinación de palabras clave; sin hacer uso de ecuaciones de búsqueda, en las bases de datos científicas cuyo acceso a su contenido fuese posible a través de los servidores de la Universidad Industrial de Santander. En total se obtuvieron 2684 publicaciones consultadas en las bases de datos de Science

Direct, Emerald Insight, Taylor and Francys, Springer, Wiley, Scopus, Web of Science, ASCE y Engineering Village. Al final de la pasantía de investigación se aplicó el concepto de ecuaciones de búsqueda para realizar la consulta en las mismas bases de datos; haciendo uso de las palabras clave de la Tabla 1, obteniendo como resultado 1284 publicaciones. Las ecuaciones de búsqueda se describen en la Tabla 2 y los resultados por base de datos se muestran en el Apéndice 1. Comparando los procedimientos de búsqueda en las bases de datos; descritos anteriormente, se puede inferir que una definición de las ecuaciones de búsqueda permite obtener una base de datos con menor número de publicaciones pero más relacionados con el tema de consulta, sin embargo, el desarrollo del presente artículo describe el trabajo realizado con los estudios encontrados en las bases de datos sin uso de las ecuaciones de búsqueda.

Tabla 1.

Palabras clave usadas en la búsqueda en las bases de datos

¿QUÉ?	¿CÓMO?	¿DÓNDE?
Fire following earthquake	Simulation	Building
Post-earthquake fire	Modeling	Structure
Fire after earthquake	Performance	Steel frame
FFE	Behavior	R.C. frame
PEF	Resistance	Steel
	Outcomes	Reinforced concrete
	Testing	
	Analysis	

2.3 Selección de estudios y evaluación de calidad

El proceso de selección de los artículos se desarrolló aplicando los criterios de exclusión:

- Artículos con títulos o resúmenes sin relación con el tema de búsqueda
- Artículos presentados como resúmenes de conferencias, congresos o simposios, estudios con material sin revisión, estudios no presentados en inglés o español, artículos sin acceso completo y libros

y los criterios de inclusión:

- Artículos publicados en cualquier periodo de tiempo anterior al año 2018 (durante el cual se realizó el estudio del mapeo sistemático)
- El artículo expone procedimiento y resultados de la evaluación estructural ante el efecto del fuego después de un sismo

La lectura completa de los artículos excluyó artículos cuyo alcance no se relacionaba con los criterios de inclusión, adicionalmente permitió incluir estudios encontrados a través del proceso de Backward snowball sampling descrito por Petersen et al. (2015).

Finalmente, la evaluación de calidad se realizó en función de las preguntas:

- ¿Es posible evidenciar un análisis estructural del fuego después de un sismo en una edificación o en un elemento estructural?
- ¿La investigación ha sido presentada de manera clara? (descripción del caso tipo, ejecución de pruebas, análisis de resultados)

La Figura 1 resume numéricamente el proceso de selección y evaluación de todas las publicaciones encontradas en las bases de datos.

Tabla 2.

Ecuaciones de búsqueda

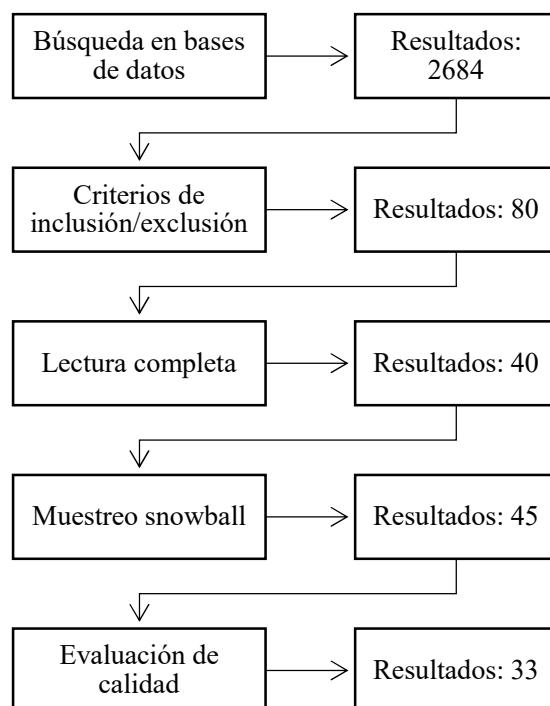
Base de datos	Ecuación de búsqueda
<i>Science Direct</i>	("fire following earthquake" OR "post earthquake fire" OR "fire after earthquake") AND (performance OR behavior OR resistance OR analysis) AND (building OR structure)
<i>Emerald Insight, Taylor and Francys, Springer, Wiley, Scopus, Web of Science, ASCE</i>	("fire following earthquake" OR "post earthquake fire" OR "fire after earthquake") AND (simulation OR modeling OR performance OR behavior OR resistance OR outcomes OR testing OR analysis) AND (building OR structure OR "steel frame" OR "r.c. frame" OR steel OR "reinforced concrete")

2.4 Extracción de información

La Tabla 3 muestra la plantilla propuesta por el autor para la extracción de la información de los artículos. Toda la información se tabuló en un archivo de Excel y se resume en el Apéndice 1.

Figura 1.

Número de artículos incluidos durante el proceso de selección



2.5 Análisis y clasificación

Frecuencia de publicación, editorial y revista de publicación, tema, subtema y tipo de investigación fueron las clasificaciones que se aplicaron a la información extraída en la Sección 2.4 y el contenido completo se encuentra en el Apéndice 1.

Con respecto a la frecuencia de publicación la primera investigación data del año 2003 y por alguna razón que no fue posible justificar por el autor, la publicación de nuevas investigaciones se dio nuevamente a partir del año 2009 hasta el año 2017. Entre los años 2013 y 2015 se publicaron el 63% de las investigaciones PEF encontradas durante la revisión, como se ve en la Figura 2.

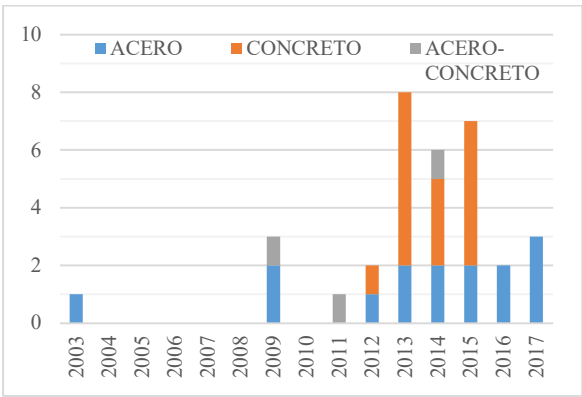
Tabla 3.

Plantilla de extracción de información

Dato	Valor
<i>General</i>	
Título del artículo	Nombre del artículo
Nombre del autor	Conjunto de nombre de los autores
Año de publicación	Año calendario
Editorial	Nombre de la editorial
Revista	Nombre de la revista
<i>Proceso</i>	
Tema	Qué tema de investigación fue estudiada
Subtema	Qué subtema de investigación fue estudiada
Tipo	Numérica, experimental o Numérica-Experimental

Figura 2.

Distribución temporal del número de publicaciones y del tema de investigación



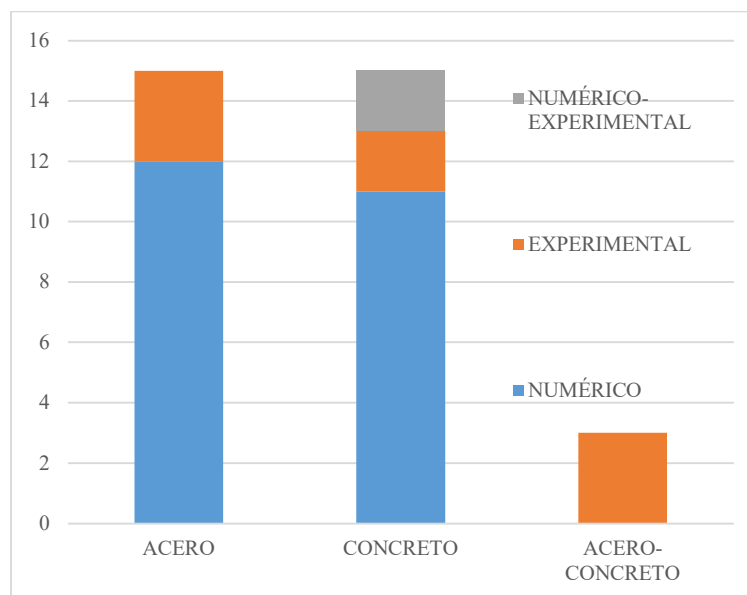
Los temas de investigación fueron definidos por el autor en función del tipo de estructura como acero, concreto y acero-concreto mientras que el tipo de investigación se compone de numéricas, experimentales y numérico-experimentales. De la Figura 3 se puede decir que las

investigaciones relacionadas con estructuras de acero y de concreto, representaron por separado el 45% del total de los estudios PEF, por otro lado, las investigaciones numéricas y experimentales significaron el 70% y el 24% de los artículos, respectivamente.

Los subtemas de investigación que planteó el autor clasificaron los artículos en base a la evaluación de columnas, uniones, materiales y estructura.

Figura 3.

Número de artículos por tema y tipo de investigación



3. Metodología de Investigación PEF

Durante el mapeo sistemático se identificaron en los artículos las diferentes metodologías empleadas para realizar la evaluación del efecto PEF, dichas metodologías fueron extraídas por el autor para encontrar un procedimiento general que fuese común en todos los artículos y poder

definir una metodología general de investigación para estudios de tipo numérico y experimental, que en un futuro pretendan evaluar el comportamiento de edificaciones bajo el efecto PEF.

Las siguientes secciones de este artículo son el resultado de la revisión literaria de cada uno de los pasos de la metodología de investigación PEF propuesta por el autor.

- Sección 3.1: Diseño de la estructura
- Sección 3.2: Modelado
- Sección 3.3: Definición de cargas sísmicas
- Sección 3.4: Evaluación sísmica
- Sección 3.5: Selección de cargas de fuego
- Sección 3.6: Análisis térmico
- Sección 3.7: Análisis estructural del fuego

3.1 Diseño de la estructura

El primer paso de la metodología para la evaluación de estructuras ante el efecto PEF consiste en obtener la información del diseño original en estructuras existentes que no hayan sido sísmicamente afectadas, evaluar la capacidad estructural de estructuras sísmicamente afectadas y realizar un diseño estructural si se desea evaluar una nueva estructura. En investigaciones donde se desea evaluar una estructura existente se debe recopilar la información de diseño original siempre y cuando esta no haya sido sísmicamente afectada, en cuyo caso este efecto debe ser tenido en cuenta debido a que la estructura va a ser más vulnerable ante cargas de fuego aún si no se presentan de manera inmediata (Zaharia & Pintea, 2009).

Para el dimensionamiento sísmico de los elementos estructurales de acero, concreto y mixtos se emplearon parámetros sísmicos de las normativas ASCE 2006, AISC 2010, FEMA 350, IBC 2003, Eurocódigo 3, Eurocódigo 4, Eurocódigo 8, ACI 318, IS 13920, UBC 94 y P100-1 (Apéndice 2). En general no se encontraron investigaciones que adoptaran parámetros de diseño estructural ante cargas de fuego y solo se adoptaron medidas relacionadas a la protección contra el fuego de los elementos estructurales. Estas medidas no afectan el dimensionamiento estructural porque se aplican luego de haber realizado el diseño sísmico, como ocurre al considerar materiales de recubrimiento en estructuras de acero y sistemas pasivos y activos contra incendios. Aunque en las investigaciones realizadas por Arablouei & Kodur (2016), Keller & Pessiki (2012) y Behnam & Ronagh (2015) se aplicaron materiales y elementos de aislamiento contraincendios, dichos materiales se desprecian al considerar el daño sísmico más crítico como lo describe Memari et al. (2014).

De acuerdo con Chicchi & Varma (2018) en Estados Unidos los encargados del diseño contra el fuego no suelen ser los ingenieros estructurales, sino los arquitectos quienes se encargan de “especificar los requisitos de calificación de la resistencia al fuego y de determinar los sistemas de protección contra el fuego para alcanzar dicha calificación”. La calificación de la resistencia al fuego es definida por el International Building Code (IBC) para los componentes estructurales basados en su uso, tamaño y combustibilidad de los materiales de construcción. Dicha calificación se define como el tiempo que un elemento o estructura puede estar sometido a una carga de fuego estándar antes de llegar a fallar. Mousavi et al. (2008) mencionan en su investigación que los requisitos de calificación de la resistencia al fuego propuestos por los códigos de construcción CEN 1994; Department of Building and Housing 2005; IBC 2006 y NRCC 2005, han sido

desarrollados para exposiciones al fuego en condiciones normales sin tener en cuenta afectaciones sísmicas.

3.2 Modelado

Aunque el modelado se podría entender como un paso dentro de un análisis de tipo numérico, en la metodología propuesta hace referencia a la construcción de los prototipos y al montaje de los equipos de laboratorio en las investigaciones experimentales. En investigaciones numéricas el modelado está en función de los programas computacionales de análisis con que se dispongan, mientras que en las investigaciones experimentales hace referencia a la definición de los materiales de construcción y a la dotación física de equipos de aplicación y medición de cargas sísmicas y de fuego.

3.2.1 Modelado Numérico

De acuerdo con el mapeo sistemático los programas computacionales para el modelado y análisis de las estructuras ante el efecto PEF en las diferentes investigaciones numéricas fueron los siguientes: OpenSees, SAFIR, ABAQUS, ANSYS y FIRE (Apéndice 3). Algunas investigaciones realizaron adicionalmente un modelado en el programa SAP2000 para el análisis sísmico debido a que el programa SAFIR sólo permite realizar análisis de cargas de fuego. En las demás investigaciones se realizó el modelado en un único entorno computacional porque OpenSees, ABAQUS y FIRE pueden ejecutar análisis sísmicos y de fuego en su entorno computacional aunque no de manera acoplada, es decir, primero se realiza el análisis sísmico y los resultados de deformaciones y esfuerzos son introducidos en el modelo sobre el cual se va a realizar el análisis

de fuego (Mousavi, Bagchi, & Kodur, 2008). En posteriores investigaciones Khorasani et al. (2016) y Lazarov et al. (2013) en los programas OpenSees y FIRE, respectivamente, realizaron una configuración especial en la programación que les permitiera pasar del análisis sísmico al análisis térmico de manera acoplada asumiendo el modelado del material en función de la tensión en vez del esfuerzo.

Memari et al. (2017) emplearon una formulación no lineal de elementos finitos de segundo orden para el modelado de las columnas de acero y su posterior análisis de estabilidad ante el efecto PEF. Dicha formulación incluye la distribución de esfuerzos residuales en las secciones de acero, falta de aplome y rectitud de la columna, propiedades de materiales dependientes de la temperatura, derivas residuales de entrepiso, pandeo lateral lineal y no lineal, efecto P-Delta, distribuciones no uniformes de temperatura y las siguientes condiciones de contorno: anclaje en ambos extremos, empotramiento en ambos extremos y anclaje y empotramiento. Lien et al. (2010) adoptaron el método de forma intrínseca de elementos finitos (VFIFE) para el modelado y evaluación del comportamiento de estructuras de acero ante el evento PEF. Este método adopta un procedimiento de solución explícita para evitar las dificultades que son causadas por las iteraciones de la no linealidad del material y por una teoría incremental. Dado que las cargas externas son aplicadas incrementalmente, todas las propiedades del material, distribuciones de esfuerzos, velocidad de las partículas y geometría son definidos en cada paso basados en los resultados de los cálculos del paso anterior. En el caso de la carga de fuego se determinan todas las fuerzas internas de los elementos estructurales para cada variación de temperatura.

3.2.2 Modelado Experimental

En este paso de la metodología las investigaciones experimentales construyen las estructuras o elementos estructurales previamente diseñados para su posterior análisis. El presente estudio encontró que dentro de las pocas investigaciones que realizaron un modelado experimental no todas construyeron sus prototipos a una escala real y algunas lo hicieron sometiendo sus diseños estructurales a escalas reducidas tanto en las dimensiones de los elementos como en las propiedades de los materiales.

Hubo investigaciones experimentales que de manera previa sometieron sus materiales de construcción al efecto PEF para recopilar información relacionada con la variación del módulo elástico, esfuerzo de fluencia, esfuerzo último, deformación última, módulo tangente y plasticidad de los respectivos materiales. Kumar et al. (2013) investigaron el comportamiento de las propiedades mecánicas ante el efecto PEF de las barras de refuerzo que se usaron en la construcción de la estructura evaluada por Kamath et al. (2015). Sinaie et al. (2013) realizaron un análisis PEF del acero laminado en caliente empleado en la construcción de los perfiles estructurales que se evaluaron en las investigaciones llevada a cabo por Song et al. (2016) y Song et al. (2017).

3.2.3 Modelado Numérico Experimental

Debido a que en el análisis PEF, en este tipo de investigaciones, la inducción del daño sísmico se realiza de forma experimental y las cargas de fuego se hacen en forma numérica, es necesario realizar un modelado experimental y uno numérico. La construcción de los prototipos y

la aplicación de cargas sísmicas de manera experimental se realiza para identificar los posibles daños estructurales sísmicos que permitirán realizar un modelado numérico más real del daño sísmico para el posterior análisis PEF en un entorno computacional. Por ejemplo, en la investigación llevada a cabo por Wen et al. (2015) se aplicaron cargas sísmicas que causaron descascaramiento en el concreto de las columnas y posteriormente se cuantificó la longitud, el ancho y la profundidad de dicho descascaramiento para modelar las columnas afectadas.

Behnam et al. (2015) y Wen et al. (2015) construyeron sus prototipos a escala reducida aplicando el teorema de Buckingham y la relación de similitud, respectivamente, debido a las restricciones de los equipos de prueba. Además de las restricciones de los equipos para realizar análisis a escala real, las investigaciones también están limitadas por los elevados costos por lo que aplicar métodos de escala de prototipos diseñados a escala real es una alternativa para poder llevar a cabo este tipo de investigaciones experimentales. Los métodos de similitud para la ingeniería estructural descritos en la revisión literaria realizada por Casaburo et al. (2019) son análisis dimensional, teoría de similitud aplicada a ecuaciones gobernantes, método de energía basado en la conservación de la energía, análisis modal asintótico escalado, modelos asintóticos y de similitud para aplicaciones en investigaciones de acústica estructural, métodos de semejanza empírica y análisis de sensibilidad.

3.3 Definición de cargas sísmicas

Según Mousavi et al. (2008) “para evaluar el daño sísmico en una estructura, primero, el nivel de amenaza sísmica es determinada del espectro de amenaza sísmica para el sitio dado, seguido de la selección del registro de movimiento de suelo apropiado y del análisis estructural”.

La carga sísmica; en las investigaciones PEF del presente estudio, se definió como el espectro de demanda sísmica del sismo de diseño, un acelerograma ficticio o de registros sísmicos históricos, una carga sísmica expresada en función de la deriva residual máxima permitida o una carga cíclica.

Behnam et al. (2013) y Kamath et al. (2015) definieron las cargas sísmicas del análisis pushover basados en las derivas de entrepiso máximas permitidas por FEMA 356 (2000) para los diferentes niveles de desempeño estructural. Khorasani et al. (2016) y Memari et al. (2014) definieron la carga sísmica mediante la selección de varios acelerogramas reales que escalaron para alcanzar el espectro del máximo terremoto considerado (MCE-Maximum Considered Earthquake). Della Corte et al. (2003) eligieron un grupo de acelerogramas escalados para incrementar su aceleración de suelo pico (PGA-Peak Ground Acceleration) mediante un análisis dinámico incremental (IDA-Incremental Dynamic Analysis). Jelinek et al. (2017) seleccionaron seis acelerogramas históricos y adicionalmente crearon un acelerograma artificial para simular sus cargas sísmicas, los acelerogramas tuvieron una corrección de la línea base y un filtro tipo Butterworth para frecuencias entre 0.1 y 25 Hz, y posteriormente se escalaron para un valor PGA superior al 5% del valor PGA de diseño con el objetivo de desarrollar deformaciones plásticas. Lien et al. (2010) eligieron la carga sísmica correspondiente al terremoto de El Centro de 1940 para ser aplicada como sismo principal a los 32 segundos y como réplica 340 segundos más tarde. Song et al. (2016) aplicaron el protocolo de carga cíclica recomendado por AISC 341 (2005) para la simulación sísmica en las uniones de acero, mientras que Imani et al. (2014) aplicaron el protocolo de carga cíclica recomendada por ATC 24 (1992) en su ensayo de desplazamiento controlado.

3.4 Evaluación sísmica

3.4.1 Evaluación sísmica numérica

Chicchi et al. (2018) explican que de acuerdo con ASCE 41 existen cuatro procedimientos principales para analizar edificaciones sujetas a cargas sísmicas que son: estático lineal, estático no lineal, dinámico lineal y dinámico no lineal. Los métodos estáticos no consideran efectos dinámicos por lo que solo pueden ser usados con estructuras regulares y cuando se desprecian los efectos de los modos más altos. El método estático lineal aplica pseudo fuerzas sísmicas a cada nivel mediante el procedimiento de fuerza horizontal equivalente, cuya respuesta no lineal se tiene en cuenta usando el coeficiente de modificación de respuesta (R) y el factor de amplificación de deflexión (C_d). El método estático no lineal incorpora dicha no linealidad, como es el caso del análisis pushover que se da incrementalmente aplicando una fuerza estática a la estructura y graficando la fuerza contra el desplazamiento. El procedimiento dinámico lineal asume propiedades elásticas del material y aplica las cargas dinámicamente teniendo en cuenta los modos más altos, por ejemplo, el análisis de respuesta espectral que usa ecuaciones de movimiento para desarrollar formas de modos y aceleraciones espectrales. El procedimiento dinámico no lineal incorpora tanto la no linealidad del material como los efectos dinámicos de la respuesta de la estructura a través de un registro historia tiempo. A pesar de que este último requiere de mayor esfuerzo computacional puede ser usado en cualquier tipo de estructura y se asemeja más al comportamiento real de dicha edificación.

Behnam et al. (2013) realizaron un análisis pushover y basados en la definición de plasticidad agrupada, identificaron las zonas de alta plasticidad para modelarlas como rótulas

plásticas en el programa SAP 2000. El comportamiento momento-rotación de cada rótula plástica se basó en las definiciones de FEMA 356 (2000), mientras que la longitud de la rótula plástica se calculó usando la fórmula de Park y Pauley. La cuantificación del daño sísmico de los elementos estructurales se obtuvo de los niveles de desempeño estructural definidos en FEMA 356 (2000). Memari et al. (2014) emplearon un análisis dinámico historia tiempo no lineal para evaluar los daños de la estructura ante cargas sísmicas. En el análisis dinámico se usó un amortiguamiento viscoso Rayleigh del 5% para el primer y tercer modo. El daño de la estructura se representó por la deformación residual y el periodo de elongación, basados en la evaluación del desempeño estructural definido en ASCE 41-06. En el Apéndice 4 se resumen los tipos de análisis sísmicos empleados por cada investigación.

Lien et al. (2010) adoptaron el método VFIFE (Vector Form Intrinsic Finite Element) para estudiar el comportamiento no lineal de una estructura de acero sometida a cargas de sismo y fuego, considerando la fractura de un elemento estructural. Keller & Pessiki (2012) usaron el método de Newmark con aceleración promedio para las simulaciones sísmicas no lineales. Para la evaluación de las demandas de fuerza y deformación durante una carga sísmica en la estructura, se realizaron análisis de respuesta dinámica de múltiples grados de libertad no lineal.

3.4.2 Evaluación sísmica experimental

La inducción de las cargas sísmicas en las investigaciones experimentales se llevó a cabo con equipos convencionales como máquinas de pruebas universal, máquinas de prueba, actuadores hidráulicos y mesas sísmicas. Para la medición y control de cargas y deformaciones fueron

encontrados equipos como transductores, extensómetros láser, celdas de carga, potenciómetros de cuerda, sistemas de medición dinámicos, medidores de esfuerzos y transductores diferenciales de variación lineal.

Kumar et al. (2013) obtuvieron el estado de daño para sus barras de refuerzo a partir de la relación esfuerzo deformación por tensión axial, luego el estado de daño se materializaba deformando las barras con una tensión axial en una máquina de pruebas universal. Sinaie et al. (2013) aplicaron la carga bajo el concepto de desplazamiento controlado, ajustando el desplazamiento a una tasa de deformación en fluencia especificado en ASTM E21-92. Las fuerzas axiales se registraron con un transductor y las deformaciones se midieron con un extensómetro laser MTS. Song et al. (2016) y Song et al. (2017) simularon las cargas sísmicas mediante el protocolo de carga cíclica recomendado por AISC 341 y usando el método de desplazamiento controlado. La aplicación de las cargas cíclicas se realizó por un actuador hidráulico y un muro de reacción, además se consideró la carga axial en la columna por un actuador hidráulico axial. Imani et al. (2014) realizaron la prueba de carga sísmica en un modo de desplazamiento controlado mediante el procedimiento de carga cíclica recomendado por ATC-24. Durante la prueba cíclica se registraron los desplazamientos con potenciómetros de cuerda y sistemas de medición dinámicos Krypton, se utilizaron medidores de esfuerzos y se monitorearon las cargas laterales y axiales con células de carga. Wen et al. (2015) simularon una carga sísmica a la estructura de concreto reforzado introduciendo acelerogramas en la mesa sísmica de prueba. Para la medición de los desplazamientos y de las aceleraciones se instaló un conjunto de sensores en las vigas y columnas de la estructura.

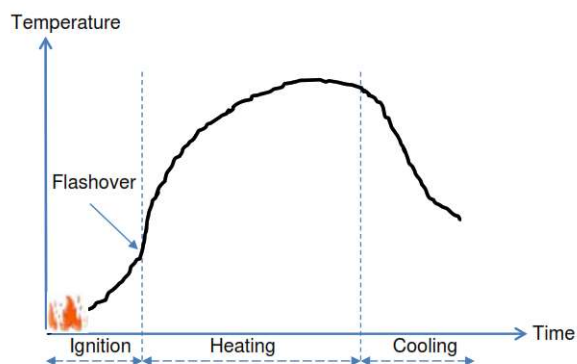
3.5 Selección de cargas de fuego

Para la determinación de la carga de fuego se puede desarrollar un modelo computacional de fluidos dinámicos, usar una curva tiempo temperatura estándar o realizar una prueba de fuego. Desarrollar un modelo computacional de fluidos dinámicos, el cual consiste en dividir un compartimiento en muchas zonas y determinar las temperaturas en todo el espacio, es un proceso que debido a su complejidad numérica es muy difícil de aplicar en un modelo estructural de transferencia de calor y como una alternativa se usan las curvas tiempo temperatura, de acuerdo con Chicchi & Varma (2018). En resumen el presente estudio encontró que las curvas ISO 834 y ASTM E119, las curvas paramétricas iBMB y la definida por el Eurocódigo 1, temperaturas obtenidas en el programa Cardington y en el Apéndice 4 de AISC 2016, y los modelos de fuego SDHI y Two Zone, fueron aplicados en las investigaciones PEF (Apéndice 5).

En la ingeniería del fuego estructural existen curvas estándar y curvas naturales de fuego que indican las temperaturas en las fases de ignición, calentamiento y enfriamiento de un fuego, tal como se puede apreciar en la Figura 4.

Figura 4.

Fases de desarrollo del fuego, (Behnam & Ronagh, 2014a)



Las curvas estándar se obtienen de las observaciones experimentales de la fase posterior a la ignición de un fuego y consideran solamente el peor escenario que está relacionado con el rápido incremento de la temperatura en un compartimiento, es decir, no consideran la fase de decaimiento o enfriamiento con lo cual se producen diferencias entre las curvas de fuego y un escenario real de fuego. Las curvas naturales o curvas paramétricas son más realistas porque consideran propiedades térmicas y geométricas de los elementos presentes en un compartimiento como muros y ventanas, densidades de carga y sistemas de protección activos (aspersores contraincendios) y pasivos (cuerpo de bomberos) contra el fuego. En las curvas naturales a diferencia de las curvas estándar se tiene en cuenta la fase de enfriamiento o decaimiento donde ocurren contracciones térmicas causantes de grandes fuerzas de tensión y de deformaciones (Behnam & Ronagh, 2014a).

Los modelos de fuego ISO 834 y ASTM E119; desarrollados bajo la consideración del peor escenario en el cual la temperatura incrementa rápidamente en un cuarto, son aplicables en edificaciones residenciales o comerciales, sin embargo presentan limitaciones en cuanto al tamaño del compartimiento y el rango de propiedades térmicas, además de no presentar una fase de decaimiento (Behnam & Ronagh, 2013). El estándar ASTM E119 (2020) especifica que se debe “usar para medir y describir la respuesta de materiales, productos o ensamblajes al calor y las llamas bajo condiciones controladas, pero no incorpora por sí mismo todos los factores requeridos para la evaluación de amenazas de incendio o riesgo de incendio de los materiales productos ensamblajes ante condiciones reales de fuego”. Como alternativa a las limitaciones en la adición de parámetros de los modelos de fuego ISO 834 y ASTM E119 un modelo de fuego natural fue propuesto por el Eurocódigo 1 (CEN, 2002) cuya densidad de carga de fuego incluye el tipo de ocupación, los sistemas activos contra incendios, riesgo de activación del fuego y propiedades

térmicas, sin embargo, su aplicación está limitada a áreas menores de 500 metros cuadrados y cubiertas sin aberturas con una altura inferior a 4 metros. Aunque la curva de fuego del Eurocódigo 1 considera la fase de calentamiento y de enfriamiento, en algunos casos no produce una curva de fuego realista debido a que por ejemplo la máxima temperatura del compartimiento controlado por el combustible está sujeto a un tiempo fijo y a que la fase de ignición; que es evidente en pruebas experimentales, tampoco es considerada (Behnam & Ronagh, 2014a). El modelo de fuego iBMB fue desarrollado por Zehfuss et al. (2007) para obtener resultados más realistas incluyendo parámetros relacionados con la tasa de liberación de calor; como función de la tasa de combustión relacionada con las dimensiones y ubicaciones de aberturas, la fase de ignición y la fase de decaimiento en la curva de fuego (Behnam & Ronagh, 2013). Una característica importante del modelo iBMB es que permite el modelado de incendios sucesivos de eventos que presentan propagación entre habitaciones e incluso entre diferentes pisos; aplicable para la mayoría de las edificaciones residenciales y comerciales cuyas habitaciones suelen estar divididas por muros sin alguna propiedad resistente al fuego (Behnam & Ronagh, 2014c).

3.6 Análisis Térmico

3.6.1 Análisis térmico numérico

Un análisis térmico realizado en cualquiera de los programas mencionados en la Sección 3.2.1 depende de la definición del escenario de aplicación del fuego y de las propiedades de los materiales a altas temperaturas.

3.6.1.1 Escenarios de aplicación del fuego.

En el análisis PEF de una estructura el escenario de fuego hace referencia a si existe uno o más compartimientos en condición de incendio y si su ubicación corresponde a uno o más pisos simultáneamente. La selección del compartimiento o conjunto de pisos para la aplicación de la carga de fuego se realiza arbitrariamente, considerando compartimientos donde podría ocurrir un incendio o eligiendo compartimientos que presenten mayor daño durante la aplicación de la carga sísmica como lo sugiere Jelinek et al. (2017) . Una vez definido el origen del fuego se define si existe o no propagación entre compartimientos o entre pisos y se establecen los tiempos de propagación que pueden ser extraídos de incendios reales según Behnam et al. (2013b).

Cuando se realizan análisis PEF de elementos estructurales como columnas y uniones, la definición del escenario de fuego consiste en definir las caras que estarán en contacto con la carga de fuego y a qué profundidad se aplicará dicha carga para los elementos con daño sísmico, como se aprecia en la Figura 5. Debido a su ubicación, las caras exteriores de las columnas de borde no suelen entrar en contacto con el fuego así como la cara superior de las vigas que está protegida por la losa. Para elementos de acero en este paso de la metodología se define la consideración o no de los materiales de recubrimiento para la protección contra incendios.

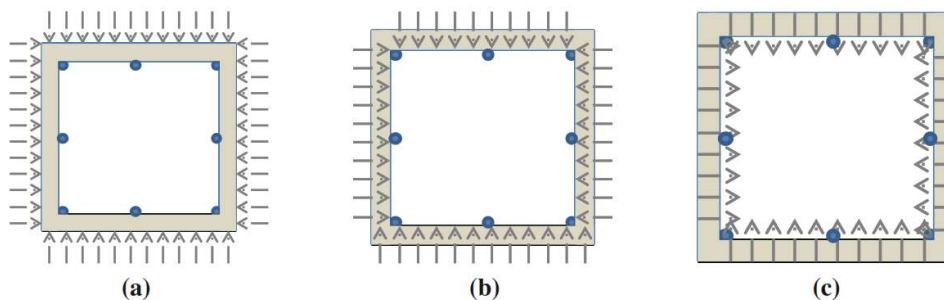
3.6.1.2 Definición de propiedades de materiales a altas temperaturas.

En todas las investigaciones numéricas se adoptaron las propiedades mecánicas dependientes de la temperatura descritas por el Eurocódigo 2, 3 y 4, para las estructuras de concreto

reforzado, de acero y estructuras mixtas, respectivamente. Memari et al. (2017) consideraron cuatro enfoques diferentes en el modelado de las propiedades mecánicas del acero estructural dependientes de la temperatura en el análisis de inestabilidad de una columna, la Figura 6 muestra los diferentes enfoques. El primero de ellos es el modelado sugerido por el Eurocódigo 3 que cuenta los efectos de fluencia térmicos de manera directa. En el segundo enfoque una curva esfuerzo deformación del acero a altas temperaturas es idealizado por una relación bilineal, en donde el módulo de elasticidad equivalente y el esfuerzo de fluencia se obtienen cuando las dos áreas sombreadas son iguales (Agarwal y Varma, 2011). El tercer enfoque es una curva esfuerzo deformación elástica perfectamente plástica dependiente de la temperatura. La cuarta opción de modelado es una curva trilineal equivalente que adopta el módulo de elasticidad del Eurocódigo 3 y cuyo esfuerzo de fluencia efectivo se define cuando las dos áreas sombreadas son iguales. Khorasani et al. (2016) desarrollaron un modelo probabilístico para generar de manera aleatoria el límite elástico normalizado y el módulo de elasticidad dependientes de la temperatura para el acero estructural. Wen et al. (2015) emplearon la formulación de (Guo,1999) para obtener el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión a altas temperaturas en su investigación.

Figura 5.

Fronteras de fuego para los niveles de desempeño (Ronagh & Behnam, 2012). a) IO, b) LS, c) CP

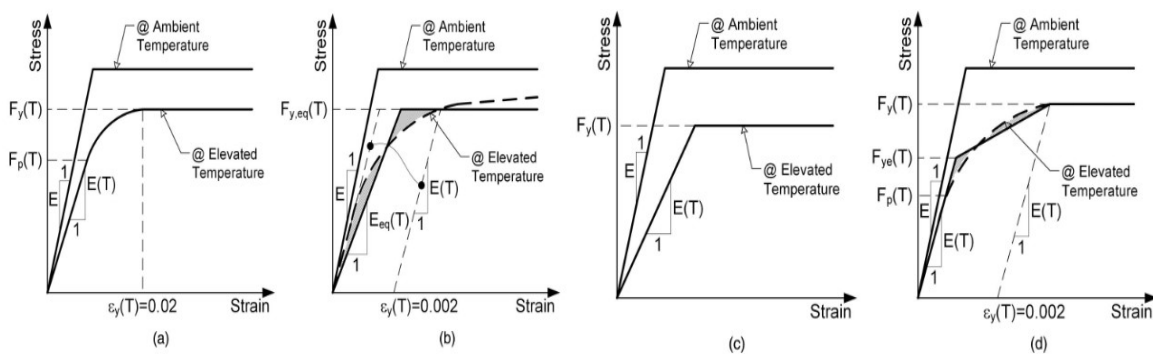


3.6.2 Análisis térmico experimental

En las investigaciones experimentales el análisis térmico corresponde al registro de las temperaturas de los elementos estructurales durante un análisis PEF y su posterior análisis con la información obtenida del registro de los valores de carga y deformación. La simulación experimental de las cargas de fuego en investigaciones realizadas por Kumar et al. (2013) e Imani et al. (2014) se realizaron con hornos eléctricos programables, mientras que el análisis PEF realizado a escala real por parte de Kamath et al. (2015) aplicó una carga de fuego real empleando queroseno como combustible en el interior de un compartimento. Para el registro de las temperaturas en los compartimientos y en la superficie e interior de los elementos estructurales, se utilizaron termocuplas.

Figura 6.

Enfoques de modelado (Memari, Mahmoud, & Ellingwood, 2014): a) Eurocódigo 3, b) Agarwal y Varma c) elástico perfectamente plástico, d) modelo equivalente trilineal



3.7 Análisis estructural del fuego

3.7.1 Análisis estructural del fuego numérico

Para Behnam et al. (2014a) el análisis estructural es la segunda parte de una evaluación PEF y es en esta fase donde se determina la resistencia PEF estructural, dicha resistencia se define por el tiempo en el cual el desplazamiento global o local de la estructura supera el umbral máximo identificado como el instante en el que la curva de desplazamiento contra el paso del tiempo presenta una asíntota vertical con un error del 1%. Memari et al. (2017) definieron el pandeo inelástico y elástico como indicador del límite de estabilidad de la columna durante la evaluación PEF sin incluir necesariamente la unidad de tiempo en su análisis. Khorasani et al. (2016) consideraron cuatro parámetros de diseño estructural de las vigas como los estados límites de toda la estructura: la formación de tres rótulas plásticas, pseudo velocidad (tasa de desplazamiento de la viga) igual a 0,254 milímetros por segundo, fuerza de tensión en la viga equivalente al 20% de la carga última de la columna y una deflexión de valor $L/20$. Memari et al. (2014) evaluaron la respuesta global de la estructura ante el efecto PEF en términos del nivel de desempeño estructural registrando los cambios en la relación de deriva entre pisos (IDR: inter-story drift ratio), mientras que la evaluación del comportamiento local de las vigas y columnas se realizó a través de interacciones fuerza axial y momento flector. Della Corte et al. (2003) consideraron la resistencia al fuego de la estructura con daño geométrico como el tiempo que tarda en alcanzar el máximo ángulo de deriva de entrepiso residual ante el efecto PEF. Cuando las estructuras presentan un daño mecánico la resistencia al fuego se evaluó como el tiempo en el que la rotación de la rótula plástica alcanza el valor de 0,03 radianes. Zaharia & Pintea (2009) definieron la resistencia al

fuego de la estructura basados en el principio de la reducción de rigidez y resistencia debido a las altas temperaturas. Cuando la temperatura en la sección transversal de un elemento produce una reducción en la resistencia del elemento por debajo del nivel del efecto de las acciones de la situación del fuego de diseño, se considera que el elemento pierde su función de resistir carga bajo acción del fuego. Wen et al. (2015) definieron la resistencia al fuego para las columnas de concreto reforzado en función de la deformación axial afectada por el tipo de descascaramiento, la tasa de compresión axial y la longitud del descascaramiento.

3.7.2 Análisis estructural del fuego experimental

La resistencia PEF se determina numéricamente al combinar los registros de temperatura de los elementos estructurales con los registros de carga y deformaciones para evaluar el comportamiento de las propiedades mecánicas hasta el punto de falla. Kumar et al. (2013) obtuvieron los diagramas esfuerzo deformación residual en las barras de refuerzo investigadas después de haber recibido la carga de fuego. La obtención de las propiedades mecánicas residuales se obtuvo llevando las barras a la deformación unitaria última. Kamath et al. (2015) determinaron la capacidad residual y cuantificaron la degradación de la resistencia y la rigidez de la estructura durante las fases de carga sísmica y carga de fuego. En el análisis experimental se registró la capacidad residual mediante un diagrama fuerza desplazamiento horizontal. Sinaie et al. (2013) evaluaron a partir de los datos recolectados de esfuerzos y de deformaciones las siguientes propiedades mecánicas: módulo elástico, esfuerzo de fluencia, esfuerzo último, deformación última y módulo tangencial. Imani et al. (2014) finalizaron el análisis PEF cuando la columna sometida a una carga de fuego no fue capaz de resistir la carga axial. El criterio de falla se evidenció

por la detección de incremento en la velocidad en el desplazamiento vertical de la viga que soportaba la columna.

4 Temas de Investigación PEF

4.1 Acero

La información extraída durante el mapeo sistemático indica que dentro de las investigaciones PEF relacionadas con el tema del acero el 67% estuvieron relacionadas con la evaluación estructural global de marcos planos resistentes a momentos, mientras que la evaluación de uniones, columnas y materiales representaron el 20%, 6,5% y 6,5%, respectivamente. Dentro de este mismo grupo de investigaciones el 80% fueron de tipo numérico y sólo el 20% de tipo experimental.

Della Corte et al. (2003) evaluaron la influencia de las estrategias de diseño sísmico: estado límite último y estado límite de servicio. Lien et al. (2010) adoptaron el método VFIFE (Vector Form Intrinsic Finite Element) para la evaluación de la resistencia PEF en estructuras considerando simultáneamente la fractura de un elemento estructural. Keller & Pessiki (2012) investigaron el comportamiento de una conexión de acero con aplicación de un recubrimiento contra incendios consistente en una mezcla cementosa reforzada con fibras. Behnam & Ronagh (2013b) analizaron el comportamiento estructural de una edificación considerando un retraso en la propagación del fuego entre los diferentes pisos. Behnam (2015) evaluó el efecto de la irregularidad estructural en la resistencia PEF de una edificación. Khorasani et al. (2016) realizaron una programación numérica en el programa OpenSees capaz de ejecutar el análisis sísmico, térmico y estructural de manera acoplada durante una evaluación PEF. Arablouei & Kodur (2016) investigaron el efecto

de la delaminación del material de aislamiento contra incendios en las zonas de alta plasticidad en la resistencia PEF.

4.2 Concreto

El autor identificó que un 80% de las investigaciones relacionadas con el tema del concreto se enfocaron en la evaluación del desempeño estructural general de los pórticos resistentes a momentos, mientras que el 20% restantes trataron los subtemas de columna, unión y material. La clasificación de las investigaciones PEF del presente estudio según el tipo de investigación muestra que el 73% fueron numéricas y el 27% correspondió a estudios de tipo experimental y numérico experimental.

Ronagh & Behnam (2012) determinaron las resistencias PEF de diferentes pórticos diseñados para los niveles de desempeño ocupación inmediata (IO), seguridad de vida (LS) y prevención de colapso (CP). Behnam & Ronagh (2013a) propusieron un coeficiente PEF para mejorar la resistencia de la estructura ante la situación de incendio causado por un terremoto. Behnam & Ronagh (2014a) investigaron el efecto de la propagación del fuego entre pisos utilizando tres diferentes modelos de fuego: ISO 834, Eurocódigo 1 e iBMB. Behnam et al. (2015) investigaron el comportamiento PEF de una unión encamisada con un polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP). Wen et al. (2015) evaluaron el efecto del descascaramiento de columnas de concreto reforzado en la resistencia PEF. Kamath et al. (2015) obtuvieron una base de datos de resultados experimentales sobre el comportamiento PEF de una estructura de concreto reforzado realizada a escala real.

4.3 Acero-concreto

Imani et al. (2014) investigaron experimentalmente el comportamiento PEF de un tipo de columnas tubulares de acero de doble capa rellenas por concreto ante diferentes niveles de daño sísmico. Pucinotti et al. (2011) llevaron a cabo una evaluación del comportamiento PEF de una unión compuesta de acero concreto diseñada con una metodología multiobjetivo para acciones sísmicas y de incendio.

4.4 Discusión

La revisión literaria sobre la evaluación PEF está principalmente dominada por los análisis globales del comportamiento estructural de marcos planos; de acero y concreto, resistentes a momentos (ver Sección 2.5). Aunque los temas, subtemas y tipos de investigación de las publicaciones fueron diferentes, el autor identificó una metodología de investigación similar para la evaluación del comportamiento PEF (ver Sección 3). A pesar de que las estructuras se someten a análisis de cargas de fuego, el diseño estructural no considera ningún parámetro contra incendios durante el dimensionamiento estructural lo que podría suponer una deficiencia en el diseño contra incendios de las edificaciones. Todas las investigaciones numéricas sobre el comportamiento estructural de las edificaciones se realizaron sobre pórticos planos debido a la ausencia de un entorno computacional capaz de realizar análisis PEF tridimensionales, sin embargo, se encontró una estructura de trabajo que permite ejecutar los análisis PEF de manera acoplada en un mismo programa computacional. Para las estructuras de acero se suelen definir materiales de recubrimiento contra incendios, sin embargo en la mayoría de las investigaciones PEF se despreciaba su acción en los análisis térmicos al asumir un daño total por la acción de cargas

sísmicas. La consideración del material de recubrimiento permite o no la falla estructural ante la situación de incendio, por lo tanto se debería investigar el comportamiento de este tipo de recubrimientos durante eventos sísmicos especialmente en las zonas de alta plasticidad. En las estructuras de concreto reforzado se propusieron metodologías para incrementar las dimensiones de los elementos estructurales y aumentar su resistencia ante incendios, sin embargo este tipo de soluciones podrían incrementar los costos de construcción al obtener estructuras sobredimensionadas por lo que se deberían realizar investigaciones con los materiales de reforzamiento estructural y evaluar si su comportamiento contribuye a la resistencia PEF de las estructuras de concreto reforzado.

5. Fuego en estructuras: investigaciones realizadas dentro del grupo INME

5.1 Proyectos de grado

Cornejo et al. (2014) evaluaron la capacidad aislante del concreto ligero aireado curado en autoclave y su resistencia mecánica para diferentes dosificaciones de mezcla puzolánica de cal hidratada y ceniza volante para disminuir la densidad del concreto. Ortiz Díaz (2013) investigó el comportamiento ignífugo de morteros a base de escoria de alto horno y perlita como material de recubrimiento en estructuras metálicas. Torres et al. (2013) llevaron a cabo una evaluación de las propiedades mecánicas del acero A572 G50 sometido a la acción directa del fuego y de fuerzas de tracción simultáneamente. López de la Hoz y Peñaloza (2012) evaluaron el comportamiento del concreto reforzado sometido a cargas de fuego mediante ensayos de compresión y de velocidad de pulso ultrasónico, adicionalmente se evaluó el desempeño de un concreto reforzado con fibras de

polipropileno. Cuesta y Luque (2010) evaluaron el estado del concreto sin refuerzo sometido a cargas de fuego mediante ensayos de compresión y de velocidad de pulso ultrasónico. Bayona y Castro (2016) realizaron una evaluación experimental sobre la resistencia a compresión del concreto elaborado con jugo de fique y sometido a cargas de fuego. Duarte y Chaparro (2013) analizaron experimentalmente la capacidad aislante contra el fuego de unos paneles de concreto ligero reforzados con bagazo de caña de azúcar y estropajo.

García y Bacardi (2014) llevaron a cabo una revisión bibliográfica sobre los parámetros adoptados por diferentes normas de diseño estructural; para edificaciones de concreto, acero y mixtas, para garantizar la integridad estructural durante la ocurrencia de un incendio.

5.2 Artículos publicados

Ortiz et al. (2010) modificaron el sistema electrónico de un horno convencional de microondas para realizar mediciones de temperatura en línea sobre muestras de pavimento y evaluar el efecto de las microondas sobre el material. Cruz et al. (2015) evaluaron experimentalmente la influencia de las cargas térmicas en las siguientes propiedades físicas y mecánicas del concreto sin refuerzo: pérdida de masa, microscopía óptica, velocidad de pulso ultrasónico, resistencia de compresión residual, difracción de rayos X y porosidad.

5.3 Discusión

Todas las investigaciones realizadas por el grupo de investigación INME y que han considerado la situación de incendio fueron de tipo experimental y enfocadas en la evaluación del

comportamiento de materiales debido a la ausencia de dotación para la ejecución de evaluaciones experimentales a escala real de elementos estructurales de concreto reforzado o acero ante cargas de fuego. Debido a la naturalidad de las investigaciones hechas por el grupo de investigación es posible plantear la evaluación PEF numérica y experimentalmente de las propuestas de nuevos materiales de reforzamiento y aislamiento térmico, así como de las diferentes configuraciones estructurales propuestas para mejorar el desempeño sísmico en edificaciones de acero y de concreto. Las revisiones realizadas a la norma NSR-10 sobre las especificaciones estructurales para contrarrestar la acción de las cargas térmicas provocadas por incendios en estructuras de acero y de concreto, han permitido detectar la poca disposición de sistemas pasivos en estructuras de acero y estructuras mixtas.

6. Propuesta de tema de investigación sobre estructuras sometidas a fuego y sismo

Para el planteamiento de un posible tema de investigación sobre la consideración de cargas sísmicas y de fuego en edificaciones, se identificaron las tendencias en investigación basado en los temas y tipos de investigación PEF (Sección 2, 3 y 4) y se evaluó su posible estudio dentro del grupo de investigación INME basados en los temas afines y en la dotación de equipos de laboratorio y de recursos computacionales que este posee (Sección 5).

El presente estudio identificó que el 70% de las investigaciones PEF han sido realizadas de manera numérica (Sección 2.5) en programas computacionales por la falta de instrumentación física para su realización experimental, por otro lado dichas simulaciones numéricas tienen la ventaja de no requerir mayores inversiones económicas para la construcción de prototipos principalmente. Según el mapeo sistemático los temas de investigación más abordados han sido

aquellos relacionados con la evaluación estructural global de pórticos resistentes a momentos de acero y concreto reforzado; 67% de las investigaciones, ante la acción del fuego causado por un sismo o PEF por sus siglas en inglés (Sección 2.5). En el análisis estructural global de pórticos se ha evaluado la influencia; en la resistencia PEF, de los escenarios de fuego, cargas de fuego, metodología de diseño, irregularidad estructural y nivel de daño sísmico (Sección 4). Mediante una revisión del inventario de programas de análisis con que dispone el grupo de investigación INME, el autor encontró los programas SAP2000, SAFIR y FIRE; programas utilizados por las investigaciones PEF (Sección 3.2.1), por lo que es factible la realización de investigaciones numéricas PEF en pórticos de concreto y de acero en la evaluación de los temas descritos en la Sección 4, sin embargo, podría requerirse capacitación sobre el manejo adecuado de los programas y sobre la interpretación de análisis y resultados.

Basado en los datos expuestos en la Sección 2 las investigaciones PEF que abarcaron los subtemas de investigación columna, unión y material, representaron el 33% y según la Sección 4 se investigó sobre la influencia; en el comportamiento PEF, de materiales de recubrimiento, escenarios de aplicación del fuego, cargas de fuego, materiales de reforzamiento estructural, daño sísmico y diseño multi objetivo fuego y sismo. En el grupo de investigación INME se han realizado investigaciones; ante la acción directa del fuego, sobre el comportamiento mecánico y térmico de morteros de recubrimiento del acero estructural, concretos ligeros curados en autoclave, acero estructural y concreto reforzado, sin refuerzo y con aditivos (Sección 5). De acuerdo con el Apéndice 1 el 64% de las investigaciones PEF correspondientes a los subtemas columna, unión y material, se realizaron de manera experimental y según la Sección 5 el 100% de las investigaciones sobre el fuego en el grupo INME se desarrollaron experimentalmente. El anterior análisis podría sugerir el estudio experimental en el grupo INME sobre los efectos PEF en elementos estructurales

de acero y concreto reforzado como columnas, vigas y uniones, así como la evaluación mecánica y térmica del acero estructural, concreto reforzado, materiales de reforzamiento estructural y aislamiento térmico. Sin embargo, dada la ausencia de un laboratorio con instrumentación física para realizar simulaciones experimentales de cargas de fuego a pequeña, mediana y gran escala en la Universidad Industrial de Santander, se deberían establecer convenios con instituciones que tengan dicho tipo de laboratorios para la ejecución de las investigaciones. Dado que las investigaciones experimentales demandan recursos económicos para su ejecución, es fundamental la búsqueda de fuentes de financiación que garanticen los recursos suficientes para el desarrollo de los proyectos de investigación en su totalidad.

Considerando la revisión bibliográfica realizada en el grupo de investigación INME sobre los parámetros adoptados por diferentes normas de diseño estructural para garantizar la integridad estructural durante la ocurrencia de incendios Garcia y Bacardi (2014) y las sugerencias realizadas por Behnam y Ronagh (2013b) para incluir el efecto PEF como un escenario de carga en las provisiones de diseño estructural, podría plantearse una evaluación de las disposiciones sísmicas y de protección contra incendios; para el dimensionamiento de elementos estructurales, establecidas en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 ante el efecto PEF mediante el uso de metodología numéricas y/o experimentales. Adicionalmente, un planteamiento de diseño estructural que pretenda involucrar acciones sísmicas y de fuego en la fase de dimensionamiento estructural puede apoyarse en la metodología de diseño multi objetivo descrita por Pucinotti et al. (2011), donde se consideran las acciones sísmicas y PEF para el diseño estructural.

En resumen se plantean posibles temas de investigación para una futura propuesta de investigación en la línea de investigación: amenaza, vulnerabilidad y riesgo sísmico (resiliencia estructural) del grupo INME de la Universidad Industrial de Santander.

- Evaluación numérica de la resistencia PEF en estructuras de concreto reforzado y de acero considerando la influencia de escenarios de fuego, cargas de fuego, metodología de diseño, irregularidad estructural y nivel de daño sísmico.
- Evaluación experimental del comportamiento PEF de columnas, vigas y uniones de acero y concreto reforzado
- Evaluación experimental de las propiedades mecánicas y térmicas del acero estructural, concreto reforzado, materiales de reforzamiento estructural y materiales de aislamiento resistentes al fuego
- Evaluación numérica y/o experimental de parámetros de diseño sísmico y de incendio del reglamento NSR-10 ante la condición de carga PEF

6.1 Aliados estratégicos

La búsqueda de aliados estratégicos para el desarrollo del proyecto de investigación que pueda surgir de alguno de los temas de investigación planteados por el autor en la Sección 6 se fundamenta en la ausencia de un laboratorio para realizar simulaciones experimentales de cargas de fuego a pequeña, mediana y gran escala en la Universidad Industrial de Santander. El Apéndice 6 describe el procedimiento de búsqueda de laboratorios que disponen de dotación física para la simulación experimental de cargas de fuego, un total de 37 instituciones públicas y privadas pertenecientes a los países de China, Estados Unidos, Irak, Alemania, España, Taiwán, Finlandia,

Australia, Reino Unido, Canadá, Eslovenia, Suecia, Francia, Bélgica, India, Portugal y Brasil fueron seleccionadas. El autor estableció principalmente dos aliados estratégicos: la Universidad de Coimbra y el Instituto de Investigación Tecnológica, sin embargo, las demás instituciones también representan una alternativa para el desarrollo de proyectos de investigación PEF a pequeña, mediana y gran escala.

La Universidad de Coimbra en Portugal dispone del laboratorio de fuego FireLab que cuenta con equipamiento para estudiar las áreas de reacción al fuego y resistencia al fuego, donde se destacan hornos a gas y eléctricos verticales, horizontales y tubulares, máquinas de ensayos mecánicos y térmicos. Adicionalmente, existe una conexión académica en el estudio del fuego entre investigadores del grupo de investigación INME y de la Universidad de Coimbra.

El Instituto de Investigación Tecnológica IPT de Brasil es la sede del Laboratorio de Seguridad contra Incendios y Explosiones LSFEx, el cual permite realizar investigaciones experimentales de resistencia al fuego de materiales, resistencia al fuego de elementos estructurales, causas y evolución de incendios, evaluación de sistemas de protección contra incendios, entre otros. Aunque con esta institución no se tienen conexiones académicas, se consideró como posible aliado estratégico por la cercanía territorial que existe entre Colombia y Brasil, significando para el desarrollo de un proyecto de investigación en conjunto en la reducción de costos, tiempo y trámites legales para la movilidad de los investigadores, de requerirse.

6.2 Fuentes de financiación

Como resultado de la búsqueda de posibles fuentes de financiación se encontraron las siguientes fuentes: la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de

Santander, las convocatorias del ministerio de ciencias y la organización European Research Council.

De acuerdo con el Portafolio de Programas 2020 de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la UIS, para la financiación de proyectos de investigación articulados con el entorno de Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS existen cuatro modalidades de proyecto: investigación básica, investigación aplicada, desarrollo experimental e investigación aplicada interdisciplinar.

En las convocatorias del programa de oferta institucional del Ministerio de Ciencias (Minciencias) es posible aplicar a convocatorias para proyectos que puedan generar nuevo conocimiento o innovación; similares a la convocatoria 890 para Instituciones de Educación Superior (IES), además existe otro tipo de convocatorias para la movilidad académica europea en el desarrollo de proyectos de investigación conjunta o movilidades en el marco de propuestas de anteproyecto o proyectos.

El European Research Council-ERC es una organización de la Unión Europea para el financiamiento de proyectos de investigación realizados por personas de cualquier nacionalidad, sin embargo, el proyecto debe desarrollarse en una institución anfitriona perteneciente a un estado miembro de la Unión Europea o a un país asociado. La financiación del European Research Council es asignada al investigador foráneo y no a la institución anfitriona, es decir, que si el investigador necesita cambiar de institución anfitriona durante el desarrollo del proyecto lo puede hacer y llevarse los recursos académicos a la nueva institución.

7. Conclusiones

- La evaluación de edificaciones ante la situación de sismo e incendio está siendo investigada bajo la consideración de una amenaza de incendio causada por un terremoto o PEF (Post Earthquake Fire) por sus siglas en inglés
- La definición de ecuaciones de búsqueda en las bases de datos permite obtener de manera simplificada resultados más relacionados con el tema de búsqueda, además de conservar el enfoque investigativo y servir como referencia para futuras investigaciones
- De la base de datos obtenida en el mapeo sistemático se obtuvo que: 70% de las investigaciones PEF fueron numéricas, el 67% evaluaron el comportamiento global de la estructura, el 63% fueron publicadas entre los años 2013 y 2015
- Durante la revisión literaria de las investigaciones PEF se identificó una metodología de investigación PEF para investigaciones numéricas y experimentales que consta de los siguientes pasos: diseño estructural, modelado, definición de cargas sísmicas, evaluación sísmica, selección de cargas de fuego, análisis térmico y análisis estructural del fuego
- En el análisis estructural global de pórticos resistentes a momentos de acero y concreto se evaluó la influencia; en la resistencia PEF, de los escenarios de fuego, cargas de fuego, metodología de diseño, irregularidad estructural y nivel de daño sísmico
- Las investigaciones PEF que abarcaron los subtemas de investigación columna, unión y material evaluaron la influencia; en el comportamiento PEF, de materiales de recubrimiento, escenarios de aplicación del fuego, cargas de fuego, materiales de reforzamiento estructural, daño sísmico y diseño multi objetivo fuego y sismo

- Las investigaciones realizadas por el grupo INME han evaluado el comportamiento mecánico y térmico; ante cargas de fuego, de morteros de recubrimiento del acero estructural, concretos ligeros curados en autoclave, acero estructural y concreto reforzado, sin refuerzo y con aditivos

Posibles temas de investigación PEF dentro del grupo INME:

- Evaluación numérica de la resistencia PEF en estructuras de concreto reforzado y de acero considerando la influencia de escenarios de fuego, cargas de fuego, metodología de diseño, irregularidad estructural y nivel de daño sísmico.
- Evaluación experimental del comportamiento PEF de columnas, vigas y uniones de acero y concreto reforzado
- Evaluación experimental de las propiedades mecánicas y térmicas del acero estructural, concreto reforzado, materiales de reforzamiento estructural y materiales de aislamiento resistentes al fuego
- Evaluación numérica y/o experimental de parámetros de diseño sísmico y de incendio del reglamento NSR-10 ante la condición de carga PEF

Referencias Bibliográficas

- AISC 341. (2005). Seismic Provision for Structural Steel Buildings. Chicago: American Institute of Steel Construction.
- Arablouei, A., & Kodur, V. (2016). Effect of fire insulation delamination on structural performance of steel structures during fire following an earthquake or an explosion. *Fire Safety Journal*, 84, 40-49.
- ASTM E119-20. (2020). Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. Philadelphia, PA: American National Standards Institute.
- ATC 24. (1992). Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures. Applied Technology Council.
- Bayona Gómez, I. F., & Castro Pinto, N. (2016). EVALUACION DE LA RESISTENCIA A COMPRESION DE UN CONCRETO MODIFICADO CON JUGO DE FIQUE Y SOMETIDO A CONDICION DE INCENDIO.
- Behnam, B. (2015). Structural response of vertically irregular tall moment-resisting steel frames under pre- and post-earthquake fire. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 25(12), 543-557.
- Behnam, B., & Ronagh, H. (2013). Performance of reinforced concrete structures subjected to fire following earthquake. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17(4), 270-292.
- Behnam, B., & Ronagh, H. (2014). An Engineering Solution to Improve Post-Earthquake Fire Resistance in Important Reinforced Concrete Structures. Brisbane, Australia: The University of Queensland.
- Behnam, B., & Ronagh, H. (2014c). Performance-Based Vulnerability Assessment of Multi-Story Reinforced Concrete Structures Exposed to Pre- and Post-Earthquake Fire. *Journal of Earthquake Engineering*, 18(6), 853-875.
- Behnam, B., & Ronagh, H. R. (2013a). A Post-Earthquake Fire Factor to Improve the Fire Resistance of Damaged Ordinary Reinforced Concrete Structures. *Journal of Structural Fire Engineering*, 4(4), 207-226.
- Behnam, B., & Ronagh, H. R. (2013b). Behavior of moment-resisting tall steel structures exposed to a vertically traveling post-earthquake fire. *THE STRUCTURAL DESIGN OF TALL AND SPECIAL BUILDINGS*, 23, 1083-1096.
- Behnam, B., & Ronagh, H. R. (2014a). A study on the effect of sequential post-earthquake fire on the performance of reinforced concrete structures. *International Journal of Structural Integrity*, 5(2), 141-166.
- Behnam, B., & Ronagh, H. R. (2015). Firewalls and post-earthquake fire resistance of reinforced concrete frames. *Structures and Buildings*, 169(1), 20-33.
- Behnam, B., Ronagh, H. R., & Lim, P. J. (2015). Numerical evaluation of the post-earthquake fire resistance of CFRP-strengthened reinforced concrete joints based on experimental observations. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1(1), 1-19.
- Behnam, Behrouz; Ronagh, Hamid. (2013). Performance of reinforced concrete structures subjected to fire following earthquake. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17(4), 270-292.

- Casaburo, A., Pertrone, G., Franco, F., & De Rosa, S. (2019). A Review of Similitude Methods for Structural Engineering. *Applied Mechanics Reviews*.
- CEN. (2002). Eurocode 1: Actions on Structures, Part 1-2: General Actions-Actions on Structures Exposed to Fire. Brussels: European Committee for Standardization.
- Chicchi, R., & Varma, A. H. (2018). Research review: Post-earthquake fire assessment of steel buildings in the United States. *Advances in Structural Engineering*, 21(1), 138-154.
- Chicchi, R., & Varma, A. H. (2018). Research review: Post-earthquake fire assessment of steel buildings in the United States. *Advances in Structural Engineering*, 21(1), 138-154.
- Cornejo Cáceres, H. N., & Reina Miranda, J. D. (2014). PROPUESTA DE CONCRETO LIGERO AIREADO CURADO EN AUTOCLAVE DE ALTA RESISTENCIA AL FUEGO. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 56.
- Cruz Hernández, R. A., Zapata Orduz, L. E., Quintero Ortiz, L. A., & Herrera Ortiz, J. O. (2015). Physical and mechanical characterization of concrete exposed to elevated temperatures by using ultrasonic pulse velocity. 118-129.
- Cuesta González, H. N., & Luque Pinzon, H. F. (2010). EVALUACION DEL EFECTO SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO Y RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL CONCRETO SIN REFUERZO SOMETIDO A FUEGO.
- Della Corte, G., Landolfo, R., & Mazzolani, F. M. (2003). Post-earthquake fire resistance of moment resisting steel frames. *Fire Safety Journal*, 38, 593-612. doi:10.1016/S0379-7112(03)00047-X
- Duarte Valenzuela, W. F., & Chaparro Tovar, D. M. (2013). PROPUESTA DE REVESTIMIENTO PARA PROTECCION DE ESTRUCTURAS METALICAS EN SITUACION DE INCENDIO.
- FEMA 356. (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings rehabilitation requirements. Washington, DC: American Society of Civil Engineers.
- Francesco, P. D., Malavolta, I., & Lago, P. (2017). Research on Architecting Microservices: Trends, Focus, and Potential for Industrial Adoption. 2017 IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA) (pp. 21-30). Gothenburg: IEEE. doi:10.1109/ICSA.2017.24
- García Quiroga, F. A., & Bacardi Zambrano, L. (2014). PROPUESTA DE ESPECIFICACIONES PARA EL CONTROL PASIVO DE EDIFICACIONES EN SITUACION DE INCENDIO.
- Imani, R., Mosqueda, G., & Bruneau, M. (2014). Experimental Study on Post-Earthquake Fire Resistance of Ductile Concrete-Filled Double-Skin Tube Columns. *Journal of Structural Engineering*, 141(8).
- Jelinek, T., Zania, V., & Giuliani, L. (2017). Post-earthquake fire resistance of steel buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, 138, 774-782.
- Kamath, P., Sharma, U. K., Kumar, V., Bhargava, P., Usmani, A., Singh, B., . . . Pankaj, P. (2015). Full-scale fire test on an earthquake-damaged reinforced concrete frame. *Fire Safety Journal*, 73, 1-19.
- Keller, W. J., & Pessiki, S. (2012). Effect of earthquake-induced damage to spray-applied fire-resistive insulation on the response of steel moment-frame beam-column connections during fire exposure. *Journal of Fire Protection Engineering*, 22(4), 271-299.

- Khorasani, N. E., Garlock, M., & Gardoni, P. (2016). Probabilistic performance-based evaluation of a tall steel moment resisting frame under post-earthquake fires. *Journal of Structural Fire Engineering*, 7(3), 193-216.
- Kitchenham, B., & Stuart, C. (2007). Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. Technical Report: EBSE 2007-001.
- Kumar, V., Sharma, U. K., Singh, B., & Bhargava, P. (2013). Effect of temperature on mechanical properties of pre-damaged steel reinforcing bars. *Construction and Building Materials*, 46, 19-27.
- Labonnote, N., Rønnquist, A., Manum, B., & Rüther, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72, 347-366. doi:10.1016/j.autcon.2016.08.026
- Lazarov, L., Cvetkovska, M., & Todorov, K. (2013). Fire Resistance of RC Frame in Case of Post Earthquake Fire. *Journal of Structural Fire Engineering*, 4(2), 87-94.
- Lien, K., Chiou, Y. J., Wang, R., & Hsiao, P. (2010). Vector Form Intrinsic Finite Element analysis of nonlinear behavior of steel structures exposed to fire. *Engineering Structures*, 32, 80-92.
- López de la Hoz, M., & Saenz Peñaloza, W. J. (2012). RESPUESTA DE UN ACERO ESTRUCTURAL SOMETIDO A UNA CARGA MECANICA Y A FUEGO.
- Memari, M., Mahmoud, H., & Ellingwood, B. (2014). Post-earthquake fire performance of moment resisting frames with reduced beam section connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 103, 215-229.
- Memari, M., Mahmoud, H., & Ellingwood, B. (2017). Stability of Steel Columns Subjected to Earthquake and Fire Loads. *Journal of Structural Engineering*, 144(1).
- Mousavi, S., Bagchi, A., & Kodur, V. K. (2008). Review of post-earthquake fire hazard to building structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(7), 689-698.
- Ortiz Díaz, T. A. (2013). EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS METÁLICAS CON DIFERENTES PROTECCIONES DE SUPERFICIE FRENTE AL FUEGO.
- Ortiz, F., Cruz, R., & Correa, R. (2010). Medición en línea de la temperatura de una muestra en cavidad de microondas. *Revista Facultad de Ingenierías Universidad de Antioquia*, Número 52, 123-133.
- Paliokas, L., & Sylaiou, S. (2016). The Use of Serious Games in Museum Visits and Exhibitions: A Systematic Mapping Study. 2016 8th International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications (VS-GAMES). Barcelona: IEEE. doi:10.1109/VS-GAMES.2016.7590371
- Petersen, k., Vakkalanka, S., & Kuzniarz, L. (2015). Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update. *Information and Software Technology*, 64, 1-18.
- Pucinotti, R., Bursi, O. S., & Demonceau, J.-F. (2011). Post-earthquake fire and seismic performance of welded steel-concrete composite beam-to-column joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 67, 1358-1375.
- Ronagh, H. R., & Behnam, B. (2012). Investigating the Effect of Prior Damage on the Post-earthquake Fire Resistance of Reinforced Concrete Portal Frames. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(4), 209-220.
- Shah, A. H., Sharma, U., & Bhargava, P. (2017). Outcomes of a major research on full scale testing of RC frames in post earthquake fire. *ELSEVIER: Construction and Building Materials*.

- Sinaie, S., Heidarpour, A., & Zhao, X. (2013). Mechanical properties of cyclically-damaged structural mild steel at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 52, 465-472.
- Song, Q.-Y., Heidarpour, A., Zhao, X.-L., & Han, L.-H. (2016). Post-earthquake fire behavior of welded steel-beam to hollow column connections: An experimental investigation. *Thin-Walled Structures*, 98, 143-153.
- Song, Q.-Y., Heidarpour, A., Zhao, X.-L., & Han, L.-H. (2017). Post-earthquake fire performance of flange-welded/web-bolted steel I-beam to hollow column tubular connections. *Thin-Walled Structures*, 116, 113-123.
- Taylor, J. (2033). *Post Earthquake Fire in Tall Buildings and the New Zealand Building Code*. Christchurch.
- Torres Roncancio, D. A., & Saavedra Suarez, J. (2013). RESPUESTA DE UN ACERO ESTRUCTURAL SOMETIDO A UNA CARGA MECANICA Y A FUEGO.
- Wen, B., Wu, B., & Niu, D. (2015). Post-earthquake fire performance of reinforced concrete columns. *Structure and Infrastructure Engineering*.
- Zaharia, R., & Pintea, D. (2009). Fire after Earthquake Analysis of Steel Moment Resisting Frames. *International Journal of Steel Structures*, 9(4), 275-284.
- Zehfuss, J., & Hosser, D. (2007). A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-story buildings. *Elsevier*, 115-126.