

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Evaluación del nivel de vulnerabilidad de un edificio de acero ante
eventos extraordinarios

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar por el título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR:

Eduardo Gómez Fuentes

Ricardo Rivas Di Geronimo

TUTOR:

Ing. José Gerardo Castillo Gutiérrez

FECHA:

Caracas, junio de 2016

“No se piensa en general en que las Estructuras son Sistemas más o menos complejos, que, aunque respondan linealmente ante ciertas acciones externas, son fuertemente no lineales en cuanto a lo que podríamos llamar “Perfiles de Comportamiento”, entendiéndolo por esto las formas que adoptan las solicitudes internas o a las respuestas internas del sistema ante acciones externas”.

Mario Paparoni

AGRADECIMIENTOS

A mis queridos padres, Ricardo y Maribel, especialmente a mi padre por su ayuda, su DEDICACIÓN, paciencia y comprensión durante la realización de este trabajo, desde el primer día hasta el último. Y tener la oportunidad de compartir este momento tan importante de mi vida con él. Te quiero mucho.

A mi novia Andrea Isabel, a mis hermanas María Victoria y Cristina Isabel por ayudarme cuando lo necesitaba, en levantar la mirada cuando me frustraba, y todo el apoyo que recibí de ellas.

A nuestro tutor, el Ing. José Gerardo Castillo, por ayudarnos con la definición del tema, las metodologías empleadas, y, sobre todo, por el interés y entusiasmo mostrado en realizar este Trabajo Especial de Grado, así como el tiempo dedicado a asesorarnos durante el desarrollo del mismo.

Ricardo Rivas

A Isabela, a Ana y a los Ramones, por toda la paciencia, el cariño y el apoyo que me brindan siempre.

A todos los profesores e ingenieros que contribuyeron con mi formación académica como ingeniero civil durante la carrera. Al Ing. Ricardo Rivas por todos los aportes y recomendaciones a la investigación; y en especial al Ing. José Gerardo Castillo por la orientación, la motivación y los conocimientos que hicieron posible la elaboración del presente Trabajo Especial de Grado.

Gracias.

Eduardo Gómez

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Evaluación del nivel de vulnerabilidad de un edificio de acero ante eventos extraordinarios

Autores: Eduardo Gómez Fuentes. / Ricardo Rivas Di Geronimo

Tutor: Ing. José G. Castillo Gutiérrez

RESUMEN

A través del presente Trabajo Especial de Grado se realizó un análisis sobre los riesgos asociados a eventos extraordinarios en un edificio de uso habitacional de interés social construido en la ciudad de Caracas, ya que la estructura presenta características que sugieren que la misma pudiera experimentar un comportamiento no adecuado ante cargas de este tipo.

Se consideraron para el estudio, de forma paralela, dos tipos de eventos extraordinarios: explosiones e incendios. Para simular el comportamiento de la estructura ante estos eventos se empleó una metodología que permitió aproximar de manera simple las consecuencias de las mismas.

Mediante el uso del software de análisis estructural ETABS 2015 y tomando en cuenta los Valores de Demanda/Capacidad se pudo caracterizar las rutas de redistribución de las cargas cuando se simulaban las fallas ocasionadas por las cargas extraordinarias. Esto con el fin de determinar si dichas fallas inducían al Colapso Progresivo, total o parcial, del edificio.

A la luz de los resultados obtenidos se observó que el comportamiento del edificio ante estos eventos sería crítico, ya que, en la mayoría de los casos considerados, las fallas por explosiones o incendios se propagaban hacia toda la estructura causando el colapso progresivo. Solo los eventos simulados en los niveles superiores demostraron no generar fallas adicionales y se determinaron como fallas locales.

Es de gran importancia adecuar las estructuras ante estos tipos de eventos debido a que representan un alto riesgo y por lo general no son considerados en el diseño. Las normativas a nivel mundial atienden estas consideraciones de maneras distintas, pero la mayoría coincide en que para tratar con el colapso progresivo es necesario disponer a las estructuras con redundancia en las rutas alternativas de cargas, continuidad e interconexión en el sistema, y en general hacer edificios robustos.

Palabras Clave: *eventos extraordinarios, colapso progresivo, vulnerabilidad, Estructura Residual, redundancia, rutas alternativas, resiliencia, robustez, continuidad.*

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	ix
ÍNDICE DE CONTENIDO	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE TABLAS	xix
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Antecedentes	3
1.3 Alcances y Limitaciones	3
1.5 Objetivo General	5
1.6 Objetivos Específicos.....	5
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	7
2.1 Consideraciones generales de los eventos extraordinarios	7
2.2 El incendio en una estructura. Consideraciones específicas, caracterización del evento e impacto sobre las estructuras.	8
2.3 La explosión en una estructura. Consideraciones específicas, caracterización del evento e impacto sobre las estructuras.	11
2.4 El colapso progresivo: Una progresión de vulnerabilidades incrementales	12
2.5 Colapso Progresivo y las Normas	14
2.5.1 Reino Unido	15
2.5.2 Europa	15
2.5.3 Estados Unidos.....	16
2.6 Métodos de Prevención de Colapso Progresivo.....	17
2.6.1 Control de Eventos.....	18
2.6.2 La Resistencia local	18

2.6.3 Redundancia de rutas de carga o rutas alternativas	18
2.7 La casuística en colapsos progresivos.....	19
2.8 Vulnerabilidades derivadas de la ocurrencia de eventos extraordinarios	25
2.9 La respuesta estructural según la Teoría de los Estados Límites (LRFD).....	28
2.10 Capacidad residual ante la ocurrencia de eventos extraordinarios. (Valor D/C).....	29
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO	31
3.1 Caracterización Arquitectónica de la Edificio Objeto de Estudio	32
3.2 Caracterización Estructural del Edificio	33
3.2.1 Estructura en concreto armado.....	33
3.2.2 Estructura en acero.....	34
3.3 Casos de carga para el diseño estructural	38
3.3.1 Cargas Permanentes	38
3.3.2 Cargas Variables	39
3.3.3 Configuración de cargas en sistemas de piso.....	39
3.3.4 Combinaciones de carga	40
3.4 Simulación de casos de estudio.....	40
3.4.1 Simulación de la Explosión	40
3.4.2 Simulación del Incendio	43
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
4.1 Explosión	48
4.1.1 Presentación de los Casos	48
4.1.2 Niveles de Impacto	50
4.1.2.1 Columna C5	50
4.1.2.2 Columna F7.....	53
4.1.3 Propagación Vertical de Falla.....	56
4.1.3.1 Columna C5	56
4.1.3.2 Columna F7.....	64

4.1.4 Propagación Global de la Falla	70
4.1.4.1 Columna C5	70
4.1.5.2 Columna F7.....	72
4.2 Incendio.....	74
4.2.1 Presentación de los casos	74
4.2.2 Niveles de Impacto	76
4.2.2.1 Zona 1	76
4.2.2.2 Zona 2	84
4.2.3 Propagación Vertical de Falla.....	92
4.2.3.1 Zona 1	92
4.2.3.2 Zona 2	100
4.2.4 Propagación Global de la Falla.....	107
4.2.4.1 Zona 1	107
4.2.4.2 Zona 2	109
CAPÍTULO V CONCLUSIONES.....	111
CAPÍTULO VI RECOMENDACIONES	115
BIBLIOGRAFÍA.....	117
ANEXOS.....	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II-1: Dirección de Propagación del Incendio.....	9
Figura II-2: E/E (21°) vs. Temperatura y fy/fy (21°) vs. Temperatura.	10
Figura II-3: Gráfico Presión vs, Tiempo para onda de choque.....	11
Figura II-4: Secuencia de eventos de Colapso Progresivo.....	13
Figura II-5: Análisis de normas sobre eventos históricos.....	19
Figura II-6: Cronología de eventos de Colapsos Progresivos.....	19
Figura II-7: Imagen del edificio Ronan Point después de la explosión.....	20
Figura II-8: Vistas de la parte este y oeste del edificio después del colapso.	21
Figura II-9: Edificio L' Ambience Plaza en Bridgeport, Conneticut luego del colapso.....	21
Figura II-10: Edificio Murrah Federal Building luego de la explosión.....	22
Figura II-11: Impacto de la explosión en la Torre Sur de las Torres Gemelas (izquierda) y perfiles de acero después del incendio causado por la explosión (derecha).....	23
Figura II-12: El Pentágono luego del atentado terrorista.....	24
Figura II-13: El antes y después de los balcones de Patio Sevilla en Maastricht, Holanda.....	25
Figura II-14: Mapa conceptual de análisis de un riesgo identificado.....	27
Figura III-1: Planta Arquitectónica/ Vista fachada lateral.....	32
Figura III-2: Fotografía de fachada frontal.....	32
Figura III-3: Configuración de los materiales.....	33
Figura III-4: Distribución de las columnas en planta.....	35
Figura III-5: Distribución de las columnas en elevación.....	35
Figura III-6: Distribución de vigas.....	36
Figura III-7: Vigas diagonales y Arriostramientos.....	37
Figura III-8: Dimensiones de sección en losa de lámina acanalada.....	38
Figura III-9 : Vista en planta de las columnas en estudio.....	41
Figura III-10: Procedimiento para la simulación de la explosión.....	42
Figura III-11: Vista en planta de las zonas de estudio.....	44
Figura III-12: Procedimiento para la simulación del incendio.....	45
Figura IV-1: Caso E-C5-P3.....	48
Figura IV-2: Caso E-C5-P5.....	48
Figura IV-3: Caso E-C5-P3.....	49
Figura IV-4: Caso E-F7-P3.....	49
Figura IV-5: Caso E-F7-P5.....	49

Figura IV-6: Caso E-F7-P7.....	49
Figura IV-7: Incremento de Valor D/C Caso E-C5-P3.....	50
Figura IV-8: Incremento de Valor D/C Caso E-C5-P5.....	52
Figura IV-9: Incremento de Valor D/C Caso E-F7-P3	53
Figura IV-10: Incremento de Valor D/C Caso E-F7-P5	55
Figura IV-11: Propagación Vertical Caso E-C5-P3.....	56
Figura IV-12: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso E-C5-P3	58
Figura IV-13: Propagación Vertical Caso E-C5-P5.....	59
Figura IV-14: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso E-C5-P5	61
Figura IV-15: Propagación Vertical Caso E-C5-P7.....	62
Figura IV-16: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso E-C5-P7	63
Figura IV-17: Propagación Vertical Caso E-F7-P3	64
Figura IV-18: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso E-F7-P3	66
Figura IV-19: Propagación Vertical Caso E-F7-P5	67
Figura IV-20: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso E-F7-P5	69
Figura IV-21: Propagación Global. Caso E-C5	70
Figura IV-22: Propagación Global. Caso E-F7.....	72
Figura IV-23: Caso I-Z1-P3.....	74
Figura IV-24: Caso I-Z1-P5.....	74
Figura IV-25: Caso I-Z1-P7.....	75
Figura IV-26: Caso I-Z2-P3.....	75
Figura IV-27: Caso I-Z2-P5.....	75
Figura IV-28: Caso I-Z2-P7.....	75
Figura IV-29: Incremento de Valor D/C Caso I-Z1-P3	76
Figura IV-30: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z1-P3	77
Figura IV-31: Incremento de Valor D/C Caso I-Z1-P5	79
Figura IV-32: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z1-P5	80
Figura IV-33: Incremento de Valor D/C Caso I-Z1-P7	81
Figura IV-34: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z1-P7	83
Figura IV-35: Incremento de Valor D/C Caso I-Z2-P3	84
Figura IV-36: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z2-P3	85
Figura IV-37: Incremento de Valor D/C Caso I-Z2-P5	87
Figura IV-38: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z2-P5	88
Figura IV-39: Incremento de Valor D/C Caso I-Z2-P7	89

Figura IV-40: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z2-P7	91
Figura IV-41: Propagación Vertical Caso I-Z1-P3	92
Figura IV-42: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso I-Z1-P3	94
Figura IV-43: Propagación Vertical Caso I-Z1-P5	95
Figura IV-44: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso I-Z1-P5	97
Figura IV-45: Propagación Vertical Caso I-Z1-P7	98
Figura IV-46: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso I-Z1-P7	99
Figura IV-47: Propagación Vertical Caso I-Z2-P3	100
Figura IV-48: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso I-Z2-P3	102
Figura IV-49: Propagación Vertical Caso I-Z2-P5	103
Figura IV-50: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso I-Z2-P5	105
Figura IV-51: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso I-Z2-P7	106
Figura IV-52: Propagación Global. Caso I-Z1	107
Figura IV-53: Propagación Global. Caso I-Z2	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla III-1: Cargas Permanentes	39
Tabla III-2: Cargas Variables.....	39
Tabla III-3: Configuración de cargas en sistema de piso.....	39
Tabla III-4: Columnas en estudio	41
Tabla III-5: Propiedades Mecánicas del Acero a distintas temperaturas	43
Tabla IV-1: Incremento de Valor D/C Caso E-C5-P3	50
Tabla IV-2: Incremento de Valor D/C Caso E-C5-P5	51
Tabla IV-3: Incremento de Valor D/C Caso E-F7-P3	53
Tabla IV-4: Incremento de Valor D/C Caso E-F7-P5	54
Tabla IV-5: Propagación Vertical Caso E-C5-P3	56
Tabla IV-6: Propagación Vertical Caso E-C5-P5	59
Tabla IV-7: Propagación Vertical Caso E-C5-P7	62
Tabla IV-8: Propagación Vertical Caso E-F7-P3	64
Tabla IV-9: Propagación Vertical Caso E-F7-P5	67
Tabla IV-10: Propagación Global. Caso E-C5	70
Tabla IV-11: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso E-C5-P3.....	71
Tabla IV-12: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso E-C5-P5.....	71
Tabla IV-13: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso E-C5-P7.....	71
Tabla IV-14: Propagación Global. Caso E-F7	72
Tabla IV-15: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso E-F7-P3	73
Tabla IV-16: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso E-F7-P5	73
Tabla IV-17: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso E-F7-P7	73
Tabla IV-18: Incremento de Valor D/C Caso I-Z1-P3	76
Tabla IV-19: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z1-P3	77
Tabla IV-20: Incremento de Valor D/C Caso I-Z1-P5	78
Tabla IV-21: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z1-P5	80
Tabla IV-22: Incremento de Valor D/C Caso I-Z1-P7	81
Tabla IV-23: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z1-P7	82
Tabla IV-24: Incremento de Valor D/C Caso I-Z2-P3	84
Tabla IV-25: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z2-P3	85
Tabla IV-26: Incremento de Valor D/C Caso I-Z2-P5	86
Tabla IV-27: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z2-P5	88

Tabla IV-28: Incremento de Valor D/C Caso I-Z2-P7	89
Tabla IV-29: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z2-P7	90
Tabla IV-30: Propagación Vertical Caso I-Z1-P3	92
Tabla IV-31: Propagación Vertical Caso I-Z1-P5	95
Tabla IV-32: Propagación Vertical Caso I-Z1-P7	98
Tabla IV-33: Propagación Vertical Caso I-Z2-P3	100
Tabla IV-34: Propagación Vertical Caso I-Z2-P5	103
Tabla IV-35: Propagación Global. Caso I-Z1	107
Tabla IV-36: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso I-Z1-P3	108
Tabla IV-37: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso I-Z1-P5	108
Tabla IV-38: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso I-Z1-P7	108
Tabla IV-39: Propagación Global. Caso I-Z2	109
Tabla IV-40: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso I-Z2-P3	110
Tabla IV-41: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso I-Z2-P5	110
Tabla IV-42: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso I-Z2-P7	110

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La presente investigación en el campo de ingeniería estructural se desarrolla en el estudio de los mecanismos de **colapso progresivo**, el cual la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, por sus siglas en inglés) define como “(...) la propagación de una falla local inicial de elemento a elemento resultando en el colapso de la estructura completa o de parte desproporcionadamente grande de ésta” (ASCE, 2010).

Específicamente, se evalúa el comportamiento de una estructura de acero aporticada con diseño no convencional, cuando ésta ha perdido parte de su soporte estructural como consecuencia de **eventos extraordinarios** que comprometen la integridad de sus miembros; esto, con el fin de evaluar el nivel de riesgo al que están expuestos ante eventos de este tipo, la redistribución de esfuerzos y determinar si esta situación induce o no al colapso progresivo de la estructura. En pocas palabras, evaluar la vulnerabilidad de dicha estructura ante este tipo de eventos.

La Norma Venezolana CONVENIN-MINDUR 2002 - Criterios y Acciones Mínimas Para El Proyecto de Edificaciones, 1988, define como cargas o acciones extraordinarias todas aquellas “(...) *que normalmente no se consideran entre las que actúan en la vida útil de una edificación y que, sin embargo, pueden presentarse en casos excepcionales y causar catástrofes, como las acciones debidas a explosiones, incendios, etc.*” (Norma Venezolana COVENIN-2002).

El análisis se realizó sobre una estructura ya existente, la cual se trata de un edificio de uso habitacional de interés social construido en la ciudad de Caracas, ya que la estructura presenta características que sugieren que la misma pudiera experimentar un comportamiento no adecuado ante cargas de este tipo, como por ejemplo: una explosión o un incendio. Entre las características que resaltan como las más críticas a efectos de este análisis, se encuentran la colocación poco convencional de arriostramientos, la discontinuidad en algunas columnas y el diseño de planta baja libre, entre otras.

Partiendo del Trabajo Especial de Grado realizado por Jorge Manzoni, y Daniela Rincón, (2013), bajo la tutoría del Ing. Nicolás Labropoulos, titulado: “Tipificación de anomalías configuracionales aparentes en estructura metálica aporticada de uso habitacional”, donde analizan los riesgos a los que está expuesta esta misma edificación ante un evento sísmico y en el cual los autores concluyen que, en efecto, la estructura tendría un comportamiento sismorresistente desfavorable; el presente Trabajo Especial de Grado se presenta como una extensión de dicha investigación, donde se analiza la respuesta de la misma estructura, esta vez ante escenarios , que por lo general, no son considerados al momento del análisis y diseño de la estructura como lo son las “cargas extraordinarias”.

El diseño convencional estructural no contempla la evaluación de este tipo de eventos usualmente, excepto en los casos de edificios muy particulares, bien sean por sus características geométricas (forma, altura, etc.) o por la naturaleza de su uso final. Grandes rascacielos, edificios icónicos en algunas ciudades del mundo o instalaciones que por su naturaleza son consideradas como esenciales o de máxima seguridad, por lo general incluyen alguna consideración ante este tipo de eventos. El edificio objeto de estudio es un caso muy particular que lo hace interesante para un estudio de esta naturaleza, ya que se ha convertido en una edificación de referencia entre la comunidad profesional en Venezuela, debido a sus particulares características, tanto arquitectónicas como de la solución estructural que fue implementada.

A partir de un estudio de colapso progresivo, es posible estimar el grado vulnerabilidad global de una estructura como consecuencia de una falla localizada. Es de gran importancia entender qué ocurre en la estructura cuando falla alguno de sus miembros; cuáles son los elementos más afectados y, principalmente, determinar si una falla de este tipo pone a la estructura en riesgo de colapsar completamente. Conocer el comportamiento de la estructura ante un acontecimiento de este tipo facilita el proceso de la toma de decisiones para mitigar o evitar, en lo posible, el colapso progresivo. En este orden de ideas, el Complejo Siderúrgico Nacional hace referencia al tema en su revista *Acero al Día Integridad Estructural*: “*Es necesario adecuar el detallado de las estructuras para lograr que los daños producidos por acciones extraordinarias localizadas no comprometan la seguridad global de la edificación*” (SIDETUR, 2015).

1.2 Antecedentes

En el Trabajo Especial de Grado titulado, “Búsqueda de patrones geométricos y mecánicos en edificios que han perdido parte de su soporte” (2011), los autores Frank Herrera y Aaron Pollner, bajo la tutoría del Profesor Mario Paparoni, tratan igualmente el tema de colapso progresivo, donde evalúan el grado de vulnerabilidad en una serie de edificios de plantas regulares y con distintas alturas, pero sólo cuando la falla ocurre en la planta baja. Asimismo, Ainara Dolmen y Juan Tamargo complementan esta investigación en su Trabajo Especial de Grado “Búsqueda de patrones mecánicos en edificios de planta irregular al presentarse una falla local en una de sus columnas” (2015), bajo la guía del Profesor José Gerardo Castillo, continuando con la metodología de autores Frank Herrera y Aaron Pollner, pero esta vez en edificios de plantas irregulares comunes.

De igual forma, se tiene como referencia el T.E.G realizado por Jorge Manzoni y Daniela Rincón “Tipificación de anomalías configuracionales aparentes en estructura metálica aporticada de uso habitacional” (2013), evaluando el comportamiento de la estructura objeto de este estudio, pero ante solicitaciones sísmicas.

1.3 Alcances y Limitaciones

Los alcances y limitaciones de este trabajo especial de grado, están vinculados directamente con la caracterización del edificio sobre el cual se realizará la modelación de consecuencias, así como lo relacionado con la ocurrencia y capacidad de propagación de los eventos extraordinarios; y que para el caso particular de este estudio se identifican, exclusivamente, con una explosión y con un incendio.

Alcances

- La estructura objeto del análisis es una estructura aporticada de acero con sistema de lámina acanalada, de acuerdo con la información disponible de la estructura objeto del análisis.
- Altura entre pisos 2,70 m.
- Luces promedio entre columnas: 3 m.
- Área de las plantas: 320 m².
- Especificaciones de los materiales:

Concreto

- Resistencia a la compresión (f^c): 250 kg/cm².
- Peso por unidad de volumen: 2.500 kg/m³.
- Módulo de elasticidad (E): 238.750 kgf/cm².

Acero Estructural en Perfiles Laminados

- Calidad ASTM A36
- Peso por unidad de volumen: 7.850 kgf/m³.
- Módulo de elasticidad: 2.100.000 kg/cm².
- Esfuerzo de Fluencia (f_y): 2.515 kg/cm².
- Esfuerzo Último (F_u): 4.078 kg/cm².

Perfiles Tubulares

- Calidad A500.
- Peso por unidad de volumen: 7.850 kgf/m³.
- Módulo de elasticidad (E): 2.100.000 kg/cm².
- Esfuerzo de Fluencia (f_y): 3.575 kg/cm.

Limitaciones

- No se analiza la planta baja donde hay conexiones entre concreto-acero.
- En el caso del incendio, no se contempla el control del fuego ni métodos de prevención en el diseño de la estructura.
- Se evalúa los escenarios correspondientes a eventos localizados que ocurran en los niveles 3, 5 y 7 del edificio.
- Se analizan dos casos: (i) un primer caso donde se simule de falla instantánea de la columna, y se elimina el elemento del sistema estructural y (ii) un segundo caso donde el material se degrade conforme se desarrolle el incendio, y se disminuyan gradualmente las propiedades como el límite de cedencia (f_y) y el módulo de elasticidad (E), de acuerdo con la temperatura.
- Se consideran únicamente los casos de carga gravitacionales¹.
- El estudio se realiza en base a los Valores de Demanda/Capacidad, junto con los desplazamientos verticales generados para cada caso.

¹ Las cargas horizontales, si bien son de extrema importancia en edificaciones ubicadas en zonas sísmicas, se considera que no ocurren de forma simultánea con estos eventos extraordinarios.

- Se toma el valor de 1.10 del Valor de Demanda/Capacidad para considerar que el elemento ha fallado².

1.5 Objetivo General

Evaluar el nivel de vulnerabilidad de un edificio de acero ante cargas extraordinarias.

1.6 Objetivos Específicos

- Plantear un modelo matemático que represente, de la forma más real posible, las condiciones actuales de la estructura analizada.
- Simular, de forma aproximada, dos eventos extraordinarios por separado: explosión e incendio.
- Utilizar valores de demanda/capacidad para identificar el comportamiento de la estructura luego del evento extraordinario.
- Analizar la distribución de esfuerzos para cada escenario.
- Identificar niveles de impacto y ruina consecuente sobre la estructura, según la característica de la carga extraordinaria.
- Determinar si la falla es local, o si induce al colapso progresivo.
- Evaluar el nivel global de vulnerabilidad de la estructura ante los distintos escenarios evaluados.

² Este 10% adicional en la capacidad de los miembros, se justifica desde el punto de vista de la capacidad adicional de los materiales, que las normas asumen como “factores de seguridad”, implícitos dado el nivel de incertidumbre propia de la estimación de cargas y capacidades. Sin embargo, dado que éstos son eventos con probabilidad relativamente baja de ocurrencia, se puede asumir como válido para efectos de la investigación.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Consideraciones generales de los eventos extraordinarios

Se entiende como **eventos** o **cargas** extraordinarias todas aquellas “(...) que normalmente no se consideran entre las que actúan en la vida útil de una edificación y que, sin embargo, pueden presentarse en casos excepcionales y causar catástrofes, como las acciones debidas a explosiones, incendios, etc.” (COVENIN-MINDUR, 2002).

Por su parte, el Complejo Siderúrgico Nacional hace referencia a este tema en una edición de su revista Acero al Día Integridad Estructural y agrega que “es necesario adecuar el detallado de las estructuras para lograr que los daños producidos por **acciones extraordinarias** localizadas no comprometan la seguridad global de la edificación” (SIDETUR, 2015).

Estos eventos tienen una baja probabilidad de ocurrencia y generalmente no se consideran en el diseño estructural por razones económicas, o bien se atienden indirectamente a través de medidas de protección pasivas en lugar de cálculos estructurales. Otras razones por lo cual no se suelen considerar en el diseño estructural son: la falta general de datos significativos de carga; dificultad en la precisión de los posibles escenarios de riesgo; falta de garantía de que el diseño para cargas específicas sea eficaz en la reducción de la incidencia de **colapso progresivo**, etc. (Ellingwood, Smilowitz, Dusenberry, Duthing & Carino, 2007).

En este orden de ideas, los **eventos extraordinarios** pueden ser agrupados dependiendo de su origen ; i) en cargas de presión (**explosiones**, detonaciones, presiones de viento); ii) cargas puntuales (la colisión de vehículos, aeronaves o el impacto de misiles, escombros, objetos balanceándose durante la construcción o demolición); iii) cargas relacionadas con deformaciones (ablandamiento del acero en **incendios**, asentamientos en las fundaciones), o simplemente, iv) como errores durante las etapas de diseño o construcción.

Asimismo, en comparación con las solicitaciones normativas, las solicitaciones asociadas a estos tipos de eventos suelen actuar durante un período relativamente corto de tiempo. Dichas solicitaciones son generalmente variables en el tiempo, pero pueden ser estáticas o dinámicas en su acción estructural.

2.2 El incendio en una estructura. Consideraciones específicas, caracterización del evento e impacto sobre las estructuras.

El riesgo que representan los incendios en las estructuras podría no ser considerado, hoy en día, como una **carga extraordinaria** propiamente. Tradicionalmente, los ingenieros estructurales pocas veces consideran la protección estructural contra incendios y, dicha protección, es proporcionada por medios no estructurales, tales como los aislamientos térmicos, protección con materiales como concreto, productos epóxicos, pinturas intumescentes, etc. Sin embargo, esta ideología ha ido cambiando con el tiempo, a partir del reconocimiento de que el diseño estructural para las condiciones del fuego, a menudo puede añadir valor al proceso de construcción. Con los avances en la ciencia del fuego y el análisis estructural avanzado como herramienta de diseño, hoy en día es posible considerar escenarios de incendios más realistas y los efectos del fuego sobre el sistema en su conjunto, como parte del proceso de diseño estructural, e incluso puede llegar a ser un aspecto importante del diseño para la resistencia al **colapso progresivo** de los sistemas estructurales (Ellingwood, Smilowitz, Dusenberry, Duthing & Carino, 2007).

Para evaluar la respuesta de una estructura durante un incendio, se debe considerar tanto la transferencia de calor del fuego de los elementos estructurales, como la respuesta estructural de éstos bajo el riesgo definido. A efectos del método a utilizar en el análisis de la estructura, se debe identificar el tipo de incendio de acuerdo con los dos riesgos potenciales de incendio: **incendios totalmente desarrollados e incendios de llamas locales**. (Society of Fire Protection Engineers, 2004).

En los incendios totalmente desarrollados, se asumen las condiciones (temperatura de los gases, velocidades y niveles de humo) para ser uniformes en toda un área, y generalmente se considera que todos los contenidos de combustible contribuyen al tamaño del fuego y a la duración. En este tipo de incendios se pueden identificar tres fases: crecimiento, desarrollo total y decrecimiento. La primera fase es el crecimiento del fuego, cuando el incendio aumenta en tamaño y en liberación de calor a partir de un fuego pequeño incipiente. Si no se toman medidas para eliminar el fuego, con el tiempo crece hasta un tamaño máximo (“desarrollo total”), que es función de la cantidad de combustible presente o la cantidad de aire disponible a través de aberturas de ventilación. Finalmente, a medida que todo el combustible se consume, el fuego disminuirá en tamaño (“decrecimiento”). El tamaño y la magnitud de estas tres fases dependen de la **forma y del tamaño del área de estudio**; de la cantidad, distribución, forma y tipo de

combustible presente; de la cantidad, distribución, forma y tipo de **ventilación** del lugar; y de la forma y tipo de **materiales** que conforman el techo, las paredes y el piso del área de estudio. (Society of Fire Protection Engineers, 2004).

Los **incendios de llamas locales** podrían limitarse a un solo foco de combustible en contacto con un miembro estructural. La exposición térmica de los incendios locales es espacialmente variable y depende de la geometría de la estructura. Aunque estos incendios pueden no afectar un área tan grande como los incendios totalmente desarrollados, los flujos de calor de los incendios locales, pueden ser considerables y no deben ser descuidados en los análisis. En ciertos escenarios, la exposición de una llama local puede producir una exposición más extrema que la capa de gas caliente que se genera en el área de estudio. Algunos ejemplos son garajes abiertos de estacionamiento, grandes almacenes, puentes y pasarelas. Para analizar estos escenarios, es necesario conocer los niveles de flujo de calor incidente producidos por el incendio de llama local (Society of Fire Protection Engineers, 2004).

De acuerdo con el comportamiento del incendio, existe el riesgo de que tienda a propagarse hacia otros sectores de la estructura hasta que todo el combustible se consuma o se extinga. Durante la propagación del incendio, y dependiendo de las características del área afectada, éste puede propagarse de forma vertical, en cuyo caso se afectan los miembros horizontales como vigas y losas; o propagarse de forma horizontal afectando a miembros verticales como columnas (Ver Figura II-1), muros y mamposterías. (Wang, Burgess, Wald & Gille, 2013).

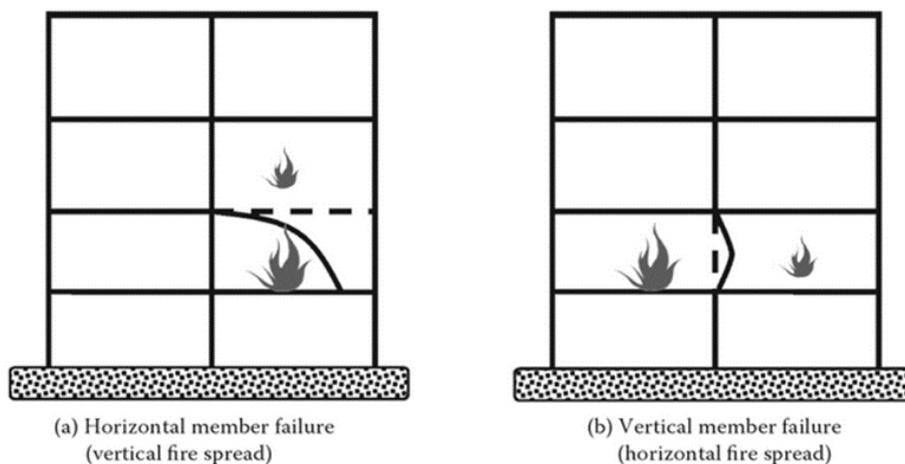


Figura II-1: Dirección de Propagación del Incendio

Tomado de: Wang, Burgess, Wald & Gille, (2013).

El calentamiento del acero, tal como ocurre durante un incendio, genera cambios metalúrgicos que son predominantemente temporales, aunque algunos pueden llegar a ser permanentes. Las pruebas indican que a medida que el acero estructural se calienta a 650° Celsius, las propiedades estructurales comunes f_y , F_u y E disminuyen. (Tide, 1998). (Ver Figura II-2).

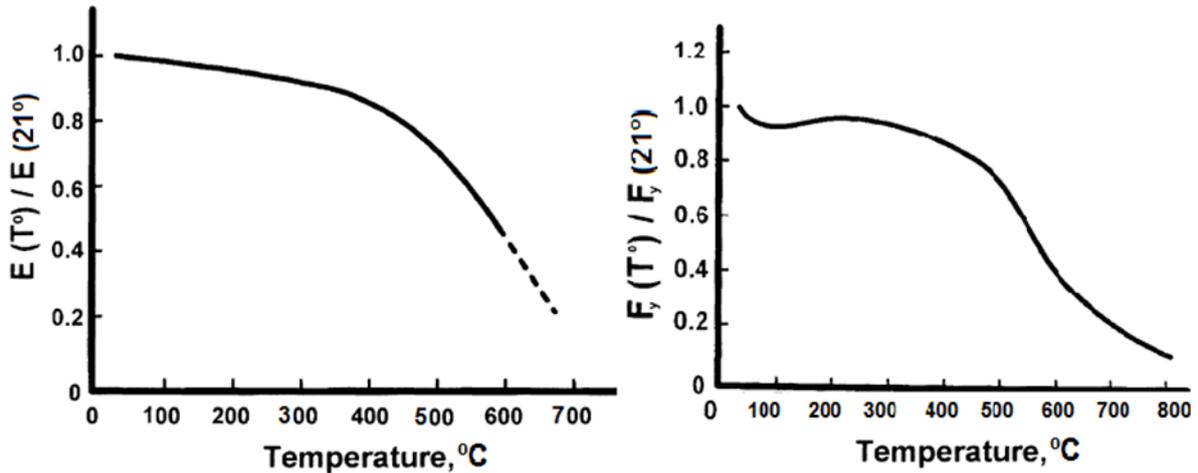


Figura II-2: $E/E(21^\circ)$ vs. Temperatura y $f_y/f_y(21^\circ)$ vs. Temperatura.

Tomado de: Tide, (1998).

Estas curvas están elaboradas para acero estructural de calidad ASTM A36, pero pueden representar en general a todos los aceros estructurales comunes.

Las fuerzas que se desarrollan en un elemento de acero, conforme aumenta su temperatura, dependen principalmente de las condiciones de apoyo en los extremos y, en un menor grado, de los arriostramientos intermedios y soportes.

La expansión del acero depende de la temperatura y cuando la temperatura del acero aumenta, un miembro sin restricciones se alargará de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\Delta L = \alpha * L * \Delta T$$

[Ec. N°1] Tomado de: (Tide, 1998).

Donde:

ΔL : Incremento de longitud.

α : Coeficiente de dilatación térmica.

L: Longitud original del miembro.

ΔT : Incremento de temperatura.

2.3 La explosión en una estructura. Consideraciones específicas, caracterización del evento e impacto sobre las estructuras.

Una **explosión** es una liberación inmediata de energía potencial almacenada, caracterizada por una radiación térmica brillante y una explosión sonora. Parte de esta energía es liberada como radiación térmica (flash) y la otra parte se mezcla con el aire (golpe de aire) y hacia el suelo (choque con la tierra), transmitiéndose ambas mediante ondas de choque que se expanden de manera progresiva. (Marchand & Alfawakhiri, 2004).

Las **ondas de choque** se caracterizan en función de sus amplitudes, duración y forma de la presión en el tiempo. Generalmente, las ondas de choque poseen curvas de ascensos instantáneos y caídas exponenciales. Pueden ser medidas o caracterizadas en términos de la **escala de enfrentamiento “Z”** desde la fuente hasta la estructura sometida a este tipo de carga. La escala de enfrentamiento “Z” se expresa de la siguiente manera:

$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \quad [Ec. N^{\circ}2] \quad \text{Tomado de : (Gilsanz, Hamburguer, Barker, L.Smith, \& Rahimian, 2015)}$$

Donde:

R= Distancia de enfrentamiento.

W= Peso de la carga del explosivo.

La onda de choque posee una parte positiva y otra negativa (Ver Figura II-3), en donde la parte negativa resulta de la “recuperación” de la atmósfera cerca de la fuente de la explosión. (Gilsanz, Hamburguer, Barker, L. Smith & Rahimian, 2015).

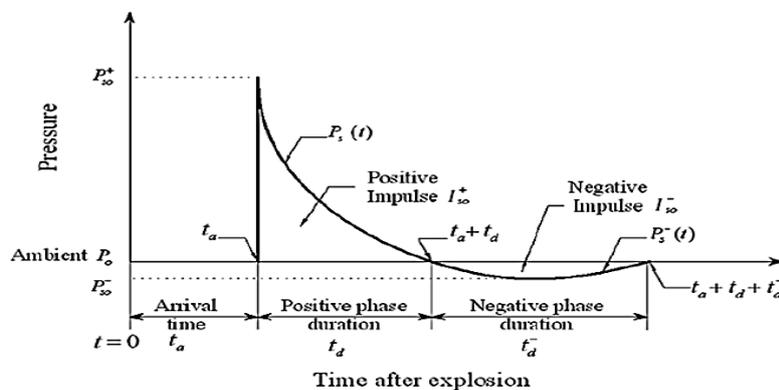


Figura II-3: Gráfico Presión vs. Tiempo para onda de choque

Fuente: Gilsanz, Hamburguer, Barker, L. Smith & Rahimian, (2015)

El daño estructural de una explosión varía significativamente dependiendo de la distancia del explosivo, rigidez de la estructura y características del material. La presión de la explosión se reduce notablemente con el aumento de la distancia a la estructura, por lo tanto, la respuesta de dicha estructura se reduce correspondientemente.

Es importante conocer cómo responde la estructura al momento de la explosión, ya que ésta genera dos efectos en la misma. El primero se conoce como “potencia explosiva” y es el efecto que produce el colapso o falla total de los miembros que se encuentran cerca del origen de la explosión, y ocurre cuando la energía de la explosión está suficientemente concentrada. Este efecto depende de la magnitud y tipo del explosivo, así como la distancia al objetivo, calidad de la construcción y su material utilizado en la construcción de la estructura.

El segundo efecto es la respuesta que ofrecen las estructuras a las ondas de choque en el momento de la explosión. La tipología en la respuesta está condicionada a la distancia entre la estructura y la explosión; a partir de distancias intermedias, no existe el efecto “potencia explosiva”. Similares a las fuerzas de viento, estas ondas de presión producen fuerzas normales a toda la superficie expuesta de la estructura.

A menudo, al diseñar una estructura contra explosiones, dicho diseño se debe considerar en función de la seguridad de la vida y no en términos de rendimiento o capacidades de servicio. A estructuras diseñadas para resistir los efectos de explosiones se les permite contribuir con todo el rango de su resistencia, es decir, trabajar en rangos elásticos e inelásticos, para poder absorber la falla a nivel local, con el fin de no poner en peligro la integridad de toda la estructura. (Marchand & Alfawakhiri, 2004).

2.4 El colapso progresivo: Una progresión de vulnerabilidades incrementales

El colapso progresivo de una estructura, de acuerdo con la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), se genera a partir de la propagación de una falla local inicial, que se transporta de elemento a elemento resultando en el colapso total de la estructura o de una parte desproporcionadamente grande de ésta. (ASCE,2010). Ver Figura. II-4.

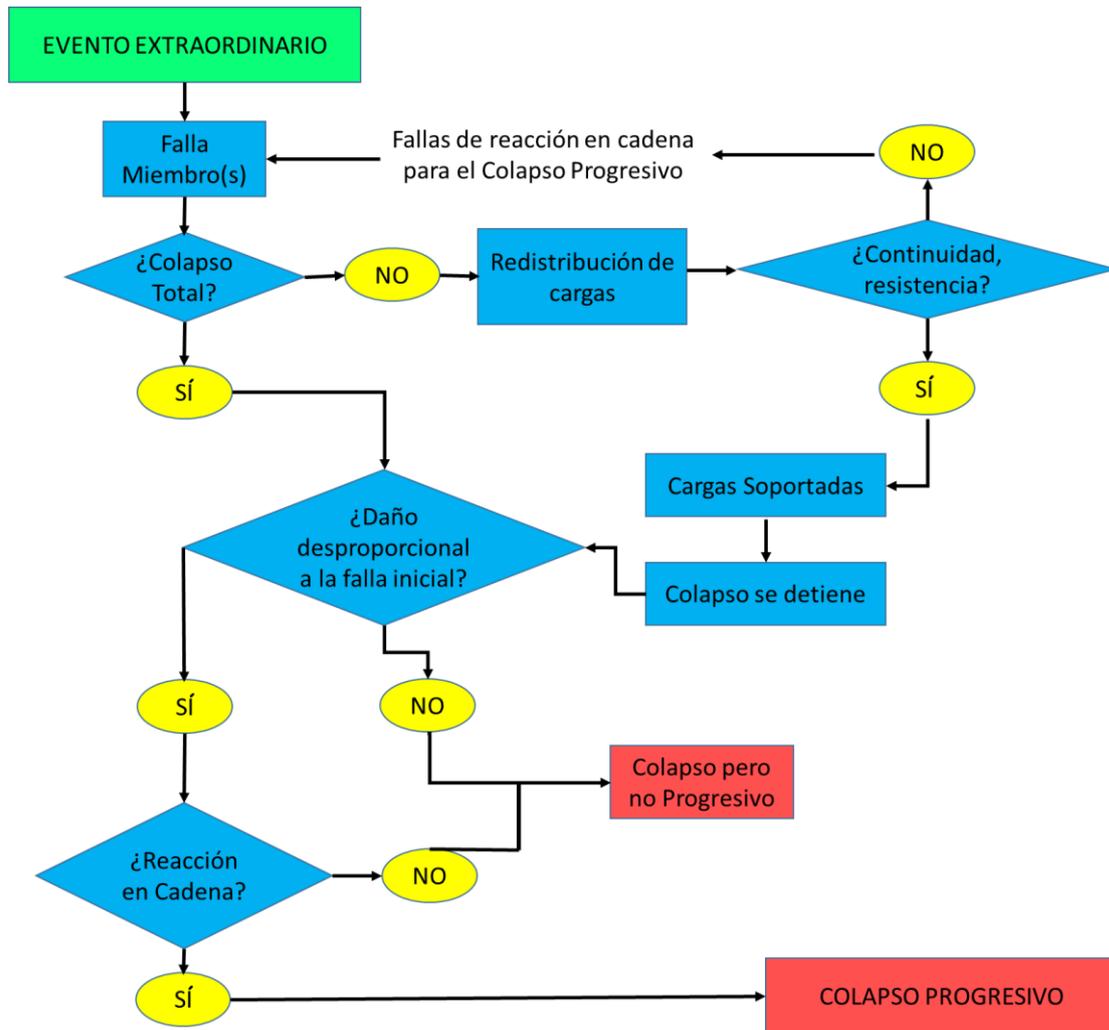


Figura II-4: Secuencia de eventos de Colapso Progresivo

Adaptado de: Smith (2007)

La falla inicial puede afectar a un sólo elemento -generalmente columnas- o a una pequeña porción de la estructura. Esto genera una nueva configuración en la geometría del edificio y, por consiguiente, una nueva distribución de los esfuerzos en la **Estructura Residual**³. Los elementos cercanos a la falla inicial absorben una carga adicional, y en el caso de superar su capacidad, estos elementos a su vez fallarán. Este proceso continúa hasta que las cargas adicionales se compensan, lo que generalmente resulta en el colapso parcial o total del edificio. (Ellingwood, Smilowitz, Dusenberry, Duthing & Carino, 2007).

³ Estructura Residual: para los efectos de este estudio, corresponde a la estructura que resulta del post-evento. Se asume una Estructura Residual para cada una de las configuraciones consecuentes de la redistribución de los esfuerzos debido a la falla. Este término se adopta en la investigación para analizar el progreso de la falla de la estructura.

Meint Smith, autor de la tesis “*Progressive Collapse Assessment*” de la Universidad Tecnológica de Delft (Holanda):

“La probabilidad de colapso progresivo se puede reducir mediante el diseño de un edificio robusto, donde la robustez se define como una medida del comportamiento de un edificio en estado dañado. Sin embargo, la robustez es igualmente difícil de medir, ya que es difícil de expresar cuantitativamente el colapso progresivo. La probabilidad de colapso progresivo se puede reducir a través de más medios que sólo el aumento de la robustez. También el nivel de protección y la rigidez de un edificio influyen en la resistencia al colapso” (Smith, 2007).

Los edificios se han vuelto más vulnerables al colapso progresivo en las últimas décadas. Dos circunstancias han contribuido con este fenómeno. En primer lugar, el desarrollo y perfeccionamiento de técnicas de análisis mediante el uso de computadoras y las innovaciones en los sistemas estructurales, han permitido a los ingenieros optimizar los diseños en mayor medida; esto ha conducido a diseños con un menor margen de seguridad porque las estructuras reflejan una tendencia a ser más ligeras y flexibles haciéndolas más vulnerables a las cargas no contempladas en el diseño. Adicionalmente, los diseños en las últimas décadas se han centrado más en la facilidad de construcción, lo que podría conducir a diseños con menos continuidad integral, esto los hace más vulnerables a los eventos extraordinarios. (Smith, 2007).

2.5 Colapso Progresivo y las Normas

El colapso de un edificio de apartamentos en Ronan Point, Londres, Reino Unido en 1968, trajo el fenómeno del colapso progresivo a la atención de la comunidad de ingeniería estructural. A partir de este incidente, países como el Reino Unido y Canadá adoptaron normas reglamentarias para abordar la prevención del colapso progresivo. Hoy en día son varios los países que contemplan este fenómeno en sus normas de construcción, y mientras que algunas normativas se basan en disposiciones más generales relacionadas con la integridad estructural y robustez; todas ellas hacen hincapié en la necesidad de un buen diseño estructural, la redundancia, la ductilidad y la continuidad.

2.5.1 Reino Unido

En 1968, el Ministerio Británico de la Vivienda y Gobernación Local (U.K. Ministry of Housing and Local Government) dictó una Norma llamada “Norma para Prevenir el Colapso Progresivo en la Construcción de Paneles Largos” (Standards to Avoid Progressive Collapse-Large Panel Construction). Esta norma establece dos métodos: proporcionar rutas alternativas de soporte para resistir las cargas, asumiendo la eliminación de una sección crítica del soporte de las cargas de las paredes; y proporcionar una forma de construcción de tal rigidez y continuidad que garantice la estabilidad del edificio contra las fuerzas que puedan dañar la carga de los elementos de soporte.

La Norma británica también especifica una presión estática accidental de 34 kPa (explosión de gas de intensidad promedio) y derivar las fuerzas mínimas de unión. Esta Norma se convirtió en parte de la Quinta Enmienda que el Parlamento Británico aprobó en abril de 1970, como parte de las disposiciones obligatorias y reglas de construcción para edificios más altos de cinco pisos.

La eliminación de un elemento estructural esencial debería solamente causar colapso local (70 m^2 ó 15% de la planta del piso) y los edificios deben ser diseñados para una presión accidental de 34 kPa o 5 psi actuando simultáneamente con cargas muertas e impuestas. (Wang, Burgess, Wald & Gille, 2013).

Estas disposiciones, con ciertas modificaciones que hacen menos énfasis en las explosiones y más en el comportamiento dúctil, aún se encuentran en vigencia en el Reino Unido. (Wang, Burgess, Wald & Gille, 2013).

2.5.2 Europa

En 1991, Europa incluyó en su norma Eurocode **EN 1991-1-7** el colapso progresivo y define la **robustez** como: *“La habilidad que tiene la estructura para resistir eventos como incendios, impactos o consecuencias hechas por errores del ser humano sin ser afectada en una medida desproporcionada en relación con la causa original.”* (EN, 1991).

2.5.3 Estados Unidos

a) ASCE 7-10

La Norma ASCE 7 en el capítulo de Cargas de Diseño Mínimas para Edificios y Otras Estructuras tiene una sección sobre la integridad estructural que hace referencia al colapso progresivo en el siguiente párrafo:

“Los edificios y otras estructuras serán diseñados para sostener el daño local con el completo sistema estructural quedándose estable y no siendo dañada en una medida desproporcionada en relación al daño local original. Esto se debe cumplir a través de una disposición de elementos estructurales que proporcionen estabilidad a todo el sistema estructural mediante el transporte de cargas, desde cualquier región dañada localmente a las regiones adyacentes capaces de resistir las cargas sin colapso. Esto se debe cumplir mediante la continuidad, suficiente redundancia, la capacidad de disipación de energía (ductilidad), o una combinación de los mismos, en los miembros de la estructura.” (ASCE, 2010).

b) GSA PBS Facilities Standards

La Administración de Servicios Generales para los Servicios de Edificaciones Públicas en la sección de “Colapso Progresivo” referente a “Consideraciones Estructurales” menciona en su versión del año 2000:

“La estructura debe poder resistir el daño local sin tener que desestabilizar toda la estructura. La falla de una viga, placa o columna no deberá resultar en una falla del sistema estructural inferior o superior o sistemas estructurales adyacentes. En el caso de la falla de una columna, las vigas que sufren daño por encima de la columna deben estar limitadas a grandes deflexiones. No está permitido el colapso de placas o de techos.” (GSA, 2000).

Posteriormente, en el 2003, se modificó el párrafo arriba citado sobre el colapso progresivo y lo sustituyó de la siguiente forma: “Refiérase al Capítulo 8: Diseño de Seguridad”

“Las disposiciones estructurales referidas al Capítulo 8, solamente aplican a edificios considerados de alto riesgo de un ataque de explosión. Para estos edificios, dicho Capítulo proporciona lineamientos generales y referencias a manuales técnicos para el estudio de los efectos de una explosión.” (GSA, 2003).

c) GSA Progressive Collapse Guidelines 2003

La Administración de Servicios Generales de Análisis de Colapso Progresivo y Lineamientos para el diseño de los nuevos edificios de oficinas federales y grandes proyectos de modernización (The GSA Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects) estableció un proceso para determinar si un edificio es excluido o no de tener riesgo del colapso progresivo. La exclusión es basada en el tipo y el tamaño de la estructura (por ejemplo, cualquier edificio que tiene más de 10 pisos, no está excluido) y no está relacionado con el nivel de amenaza. Los estudios realizados por la GSA, han demostrado que generalmente un edificio de acero o de concreto que se encuentra en riesgo de colapso progresivo (no excluido) es capaz de soportar la eliminación de una columna o 30 pies de longitud de un muro estructural sin que haya colapso.

2.6 Métodos de Prevención de Colapso Progresivo

Existe la noción que las estrategias para manejar el riesgo de colapso progresivo, desde el punto de vista de ingeniería estructural, debe centrarse en métodos que permitan a un sistema dañado mantener su integridad general después de algún evento extraordinario (Breen y Siess, 1979). Sin embargo, es necesario entender las características de estos eventos de carga en términos de incidencia e intensidad, para poder juzgar su importancia global en la construcción de edificios y así predecir la magnitud de los daños que tendrían que ser tolerados por el sistema estructural, en cada uno de los diferentes escenarios de eventos extraordinarios a los que esté sujeto el edificio. (Ellingwood, Smilowitz, Dusenberry, Duthing, & Carino, 2007).

Los tres elementos del colapso progresivo: **evento inicial, el daño local y el colapso estructural**, son la clave para el diseño de una estructura resistente al colapso progresivo. Existen tres enfoques de diseño correspondientes: **control de eventos, la resistencia local y la redundancia de rutas de carga o rutas alternativas**.

2.6.1 Control de Eventos

Este enfoque está dirigido a eliminar o reducir la probabilidad de que suceda algún evento extraordinario. Sin embargo, el control de eventos puede llevarse a cabo a través de métodos no estructurales. Por lo general, los métodos no estructurales están relacionados con el arreglo propio del edificio y la accesibilidad; por ejemplo, el uso de parques de estacionamientos en lugar de que éstos se ubiquen debajo del edificio, así como procurar que el edificio no sea construido muy cerca de las calles principales para evitar posibles impactos de vehículos. (Smith, 2007).

2.6.2 La Resistencia local

Desde un punto de vista del concepto de la resistencia local, los elementos estructurales críticos, que tienen mayor probabilidad de experimentar alguna carga extraordinaria y que son susceptibles al colapso progresivo, están provistos de una resistencia adicional. Esto requiere algún conocimiento de la naturaleza de los eventos y es difícil de sistematizar de una manera sencilla y objetiva. (Nair, 2004)

2.6.3 Redundancia de rutas de carga o rutas alternativas

En este enfoque, la estructura está diseñada de tal manera que, si falla alguno de los elementos, rutas alternativas para la carga están disponibles en dicho elemento, evitando que se genere el colapso progresivo. La redundancia de rutas de carga o rutas alternativas tiene la ventaja de la simplicidad y la inmediatez. En su aplicación más común, el diseño para la redundancia requiere que una estructura sea capaz de tolerar la pérdida de cualquiera de las columnas sin que se genere un colapso. Éste es uno de los requisitos de funcionamiento de más fácil comprensión. (Nair, 2004)

La figura que se presenta a continuación (Ver Figura No. II-5) muestra en las primeras cuatro columnas los métodos para mitigar el colapso progresivo (Redundancia, Resistencia Local, Interconexión y Análisis de las amenazas) y se colocan puntos en donde la Norma toma en cuenta dicho método. Las siguientes tres columnas responden la siguiente pregunta: “¿de haber empleado estas normas en su diseño, hubiese mejorado el comportamiento de estos edificios (Ronan Point, Murrah Building y Torres Gemelas)? Se coloca “Y” para decir “SÍ”, “N” para decir “NO” y “?” para decir “TAL VEZ”.

Would use of these codes and standards in their design have improved the performance of Ronan Point, Murrah and WTC?

	Redundancy	Local Resistance	Interconnection	Threat-dependent analysis	Ronan Point	Murrah Building	WTC 1 & 2
ASCE 7-02	●				?	N	N
ACI 318-02			●		Y	?	N
GSA...PBS, 2000	●				?	N	N
GSA...PBS, 2003				●	N	Y	N
GSA PC Guidelines	●				N	N	N

Y=yes; N=no; ?=maybe

Figura II-5: Análisis de normas sobre eventos históricos

Tomado de: Nair, (2004).

2.7 La casuística en colapsos progresivos

Son varios los casos documentados en donde se demuestra que fallas locales en la estructura han generado el colapso de la misma. La Figura No. II-6 muestra como referencia algunos casos alrededor del mundo donde se han producido colapsos progresivos en estructuras en los últimos cincuenta años.

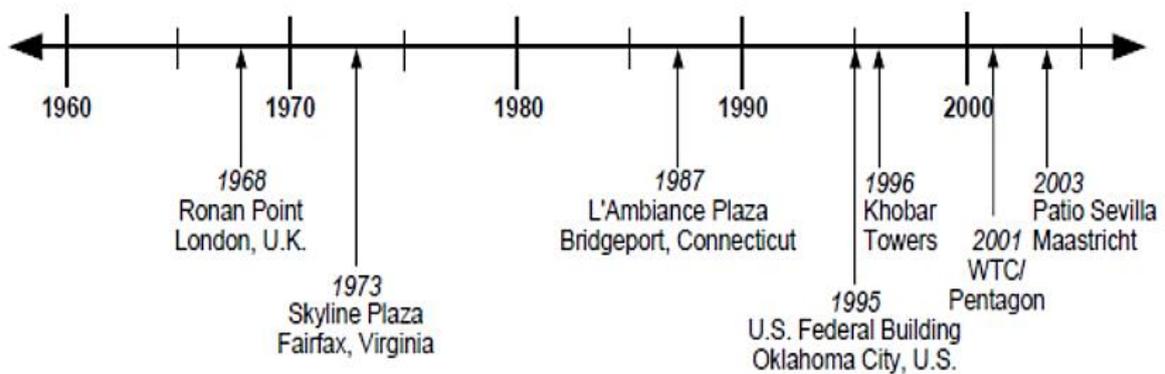


Figura II-6: Cronología de eventos de Colapsos Progresivos

Tomado de Smith, (2007)

Edificio de Apartamentos en Ronan Point, Londres, Reino Unido, 1968 (Figura II-7)

Una explosión de gas en la cocina del piso 18 causó la falla en unos paneles de concreto, ocasionando el colapso progresivo de toda una esquina del edificio de 22 pisos. (Barbosa, 2013).

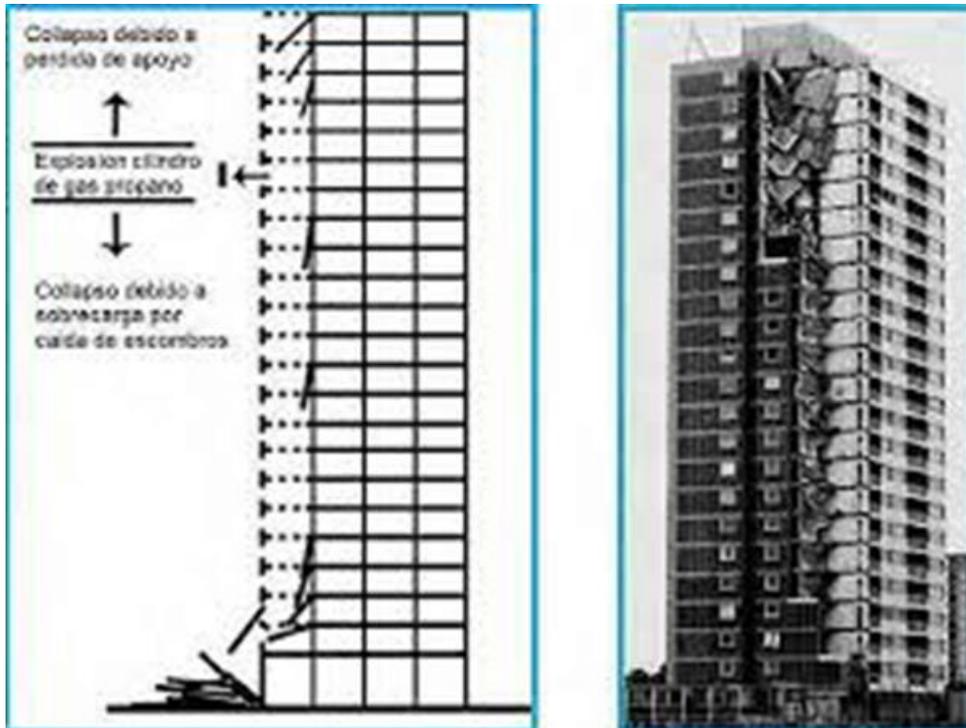


Figura II-7: Imagen del edificio Ronan Point después de la explosión

Tomado de: Barbosa, (2013)

Edificio Skyline Plaza, Virginia, Estados Unidos, 1973

Parte del edificio colapsó mientras se removían los puntales del encofrado que se había recién utilizado para el vaciado de concreto de la losa del piso 23, y simultáneamente se vació la losa del piso 24 (Ver Figura II-8). La causa principal del colapso fue la remoción de los puntales que soportaban al piso recién vaciado, antes del tiempo necesario que necesitaba la losa para alcanzar un nivel de fraguado conveniente. (Register, 1973).



Figura II-8: Vistas de la parte este y oeste del edificio después del colapso.

Fuente: Leyendecker & George, (1977)

Edificio L' Ambience Plaza en Bridgeport, Connecticut, Estados Unidos, 1987

El edificio se encontraba en construcción cuando colapsó. Según el reporte del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de ese mismo año, se concluyó que la causa más probable del colapso fue la pérdida de soporte en una máquina de elevación en la torre oeste durante la colocación del nivel superior de tres placas de piso. (Ver Figura No. II-9)



Figura II-9: Edificio L' Ambience Plaza en Bridgeport, Connecticut luego del colapso

Tomado de: <http://www.courant.com/business/hc-lambience-plaza-anniversary-photos-20120404-photogallery.html>
el 15 de enero de 2016.

Edificio Murrah Federal Building, Oklahoma, Estados Unidos, 1995

Este edificio colapsó debido a una bomba que explotó en un camión que se encontraba en la base del edificio y causó la falla de tres columnas que perdieron todo su soporte e indujeron al colapso progresivo. (Nair, 2004).



Figura II-10: Edificio Murrah Federal Building luego de la explosión

Tomado de: <http://www.911research.wtc7.net/non911/oklahoma/index.html> el 17 de febrero de 2016

Las Torres Gemelas “World Trade Center”, Nueva York, Estados Unidos, 2001

Es considerado el ataque terrorista más importante de la historia de los Estados Unidos y quizás en la historia. Según el reporte final del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de septiembre del año 2005, el colapso de las Torres Gemelas se debió a las siguientes razones, en orden cronológico:

- Daño estructural instantáneo al momento del impacto. Ver figura No. II-11.
- El fuego provocado por el choque de los aviones alcanzó una temperatura superior a los 800° centígrados, degradando las vigas y columnas de acero que perdieron toda su resistencia. (MUNDO, 2001) Ver figura No. II-11.
- La zona de impacto perdió la capacidad de soportar la carga sobre ella.
- El peso de la parte superior cayendo causó el colapso progresivo que se extendió de piso a piso hasta llegar al suelo.



Figura II-11: Impacto de la explosión en la Torre Sur de las Torres Gemelas (izquierda) y perfiles de acero después del incendio causado por la explosión (derecha)

Tomado de: (MUNDO, 2001)

Sin embargo, es de hacer notar que, a pesar del colosal impacto sufrido por las Torres Gemelas, éstas tuvieron la capacidad de redistribuir las cargas hacia los elementos remanentes, de fuerza que la estructura pudo resistir por más de una hora y media antes de colapsar de forma progresiva y controlada por completo.

El Pentágono, Washington D.C, Estados Unidos, 2001

Como parte del mismo ataque terrorista que sufrieron las Torres Gemelas, un avión comercial que viajaba a gran velocidad chocó contra el Pentágono. El avión golpeó la losa del segundo piso. Las columnas del primer y segundo piso fueron las más afectadas. Los restos del avión se deslizaron bajo el segundo piso, 94,5 m (310 pies) en el edificio, lo que produjo un daño significativo a los tres anillos exteriores de la zona oeste del Pentágono. Muchas columnas fueron retiradas o significativamente dañadas por los restos del avión a medida que avanzaban a través del edificio. Como resultado, una porción del anillo exterior se derrumbó aproximadamente 20 minutos después del accidente. Ver Figura II-12. (Mlakar, et al., 2003).

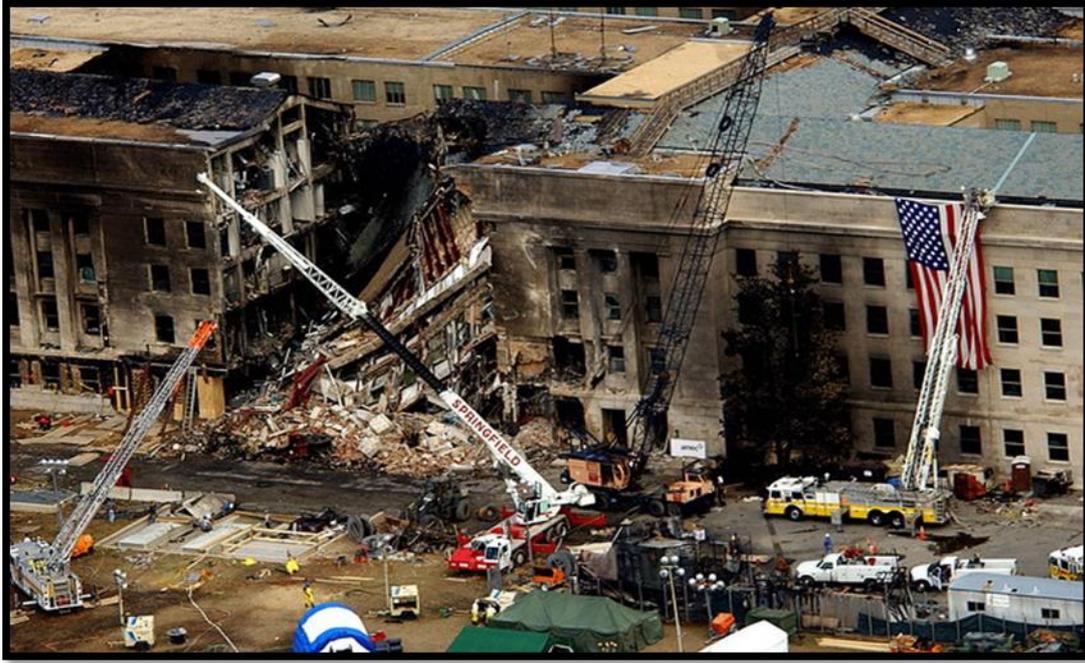


Figura II-12: El Pentágono luego del atentado terrorista.

Tomado de: <http://marylandreporter.com/2011/09/14/maryland-businesses-received-16m-in-sba-loans-following-911-attack>, el 22 de marzo de 2016

La ASCE y el Instituto de Ingeniería Estructural (SEI, por sus siglas en inglés), escribieron el siguiente reporte en el año 2003 sobre lo sucedido en el Pentágono:

“El equipo de estudio del comportamiento de la estructura, llegó a la conclusión de que el impacto del avión tuvo como consecuencia el daño global de aproximadamente 50 columnas estructurales. El fuego a raíz del impacto, debilitó una pequeña cantidad de otros elementos estructurales. Sin embargo, sólo un segmento relativamente pequeño de la estructura afectada colapsó aproximadamente 20 minutos después del impacto. El colapso, las muertes y daños fueron mitigados por el sistema estructural resiliente⁴ del Pentágono” (Mlakar, et al., 2003).

⁴ Una estructura resiliente es aquella capaz de aportar una resistencia adicional, propia de la integridad de la misma, y más allá que de la suma de la capacidad de sus elementos.

Edificio “Patio Sevilla”, Maastricht, Holanda, 2003

Patio Sevilla era llamado el proyecto de residencias, cuando 4 balcones colapsaron. La causa principal del colapso fue un error en la construcción en la base del soporte del balcón inferior. Ver Figura II-13. (Smith, 2007).



Figura II-13: El antes y después de los balcones de Patio Sevilla en Maastricht, Holanda

Tomado de: <http://www.architectenwerk.nl/box/archief.2003.04.html> el 27 de marzo de 2016

2.8 Vulnerabilidades derivadas de la ocurrencia de eventos extraordinarios

La mayoría los edificios pueden considerarse vulnerables, en diferentes grados, a que se genere un colapso progresivo a partir de una falla local. Se ha estimado que aproximadamente entre el 15 y el 20 por ciento de los edificios que han colapsado, el colapso ha sucedido de manera progresiva (Leyendecker y Burnett, 1976). Si bien todos los edificios registran algún tipo de riesgo, ciertos atributos pueden hacer que un edificio sea particularmente vulnerable a un colapso progresivo. Algunos de estos atributos son inherentes al sistema estructural del edificio. Otros están determinados por la naturaleza del uso del edificio o factores sociopolíticos propios del lugar, como es el caso de edificios de entes gubernamentales, clínicas, edificaciones corporativas o financieras que son más vulnerables a sufrir un ataque terrorista o cualquier otro evento extraordinario, que sufrir una falla debido a su construcción. (Ellingwood, Smilowitz, Dusenberry, Duthing & Carino, 2007).

Quizás el factor más importante que contribuye a la vulnerabilidad estructural es la falta de continuidad en el sistema y la falta de ductilidad de los materiales de construcción, miembros y conexiones. Tales sistemas carecen de "robustez" y están mal adaptados para absorber o disipar la energía que resulte de una falla local. Adicionalmente, la redundancia en tales sistemas puede compensar, en cierta medida, la falta de ductilidad.

Entre algunos de los sistemas más propensos a ser vulnerables se encuentran: muros de carga, grandes paneles, losas de concreto prefabricadas o placas de acero apoyadas sobre paredes de mampostería debido a las dificultades en el suministro de continuidad y ductilidad; estructuras de losas planas y de placas planas que pueden ser vulnerables en articulaciones de losa/columna débiles; paredes de mampostería no reforzadas que soportan cargas, ya que resisten poco a las fuerzas que no son de compresión; estructuras de techos de grandes luces apoyadas en muros que requieren consideraciones especiales, entre otros.

Según el Trabajo Especial de Grado de Ainara Dolmen y Juna Tamargo, se tiene que: *“la vulnerabilidad estructural se refiere a qué tan expuesta está una estructura a sufrir un evento que ponga en riesgo su estabilidad e integridad estructural. Una estructura es vulnerable cuando es propensa a sufrir daños y/o colapsar.”* (2015).

A pesar de los avances en la ingeniería estructural que han revolucionado el diseño de edificios y la construcción durante las últimas dos décadas, existen numerosas fuentes de incertidumbre en el proceso de diseño de un edificio. Algunas de estas incertidumbres son inherentes, tales como cargas ambientales, resistencia estructural, mientras que otras se basan en el conocimiento, tales como aproximaciones en modelos de elementos finitos y limitaciones en el apoyo de las bases de datos. La consecuencia natural de la incertidumbre es el riesgo. Sólo en el caso de que exista certeza es que se puede decir que no hay riesgo alguno; sin embargo, es claro que el **riesgo** no puede ser eliminado, pero sí debe ser controlado. (Ellingwood, Smilowitz, Dusenberry, Duthing & Carino, 2007).

La **Evaluación de Riesgos** es un término utilizado en una gran variedad de situaciones, como en el caso de los **eventos extraordinarios**, con la intención general de indicar que un análisis donde se consideren los aspectos más importantes de las incertidumbres, probabilidades y consecuencias se puede llevar a cabo, de alguna manera u otra. En cierta forma, el riesgo puede ser cuantificado como la probabilidad de ocurrencia de un evento

multiplicada por las consecuencias esperadas del evento en caso de producirse (Dalsgaard Sorensen, 2007).

La Evaluación de Riesgos puede ser representada en un esquema general, como el indicado en la Figura II-14, que es casi independiente del área de aplicación. Tal vez el paso más importante en el proceso de un análisis de riesgos es identificar el contexto del problema de decisión, es decir, la relación entre el ingeniero y el ente que hará el análisis:

- ¿Quiénes son las partes involucradas en el proyecto? (el cliente, el estado u organizaciones)
- ¿Qué importancia podría tener una influencia negativa sobre el impacto del análisis de riesgos y sus resultados?
- ¿Qué podría influir en la manera en que se realiza el análisis de riesgos? (política, jurídica, social, económica y cultural)

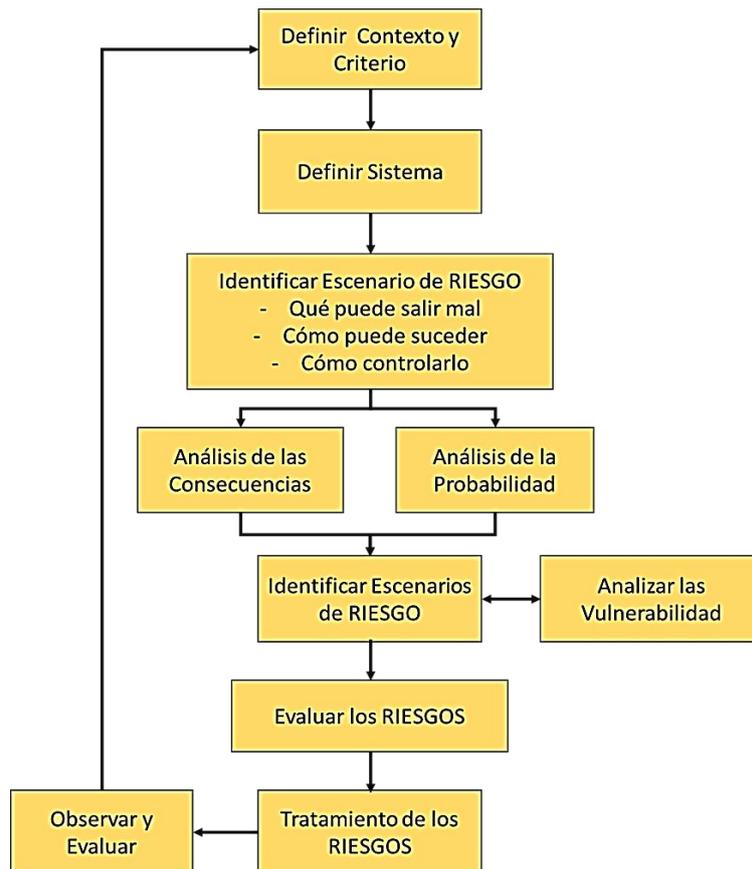


Figura II-14: Mapa conceptual de análisis de un riesgo identificado

Adaptado de Faber & Stewart, (2003)

2.9 La respuesta estructural según la Teoría de los Estados Límites (LRFD)

Se define como "**estado límite**" la situación más allá de la cual una estructura, miembro o componente estructural queda inútil para su uso previsto, sea por su falla resistente, deformaciones y vibraciones excesivas, inestabilidad, deterioro, colapso o cualquier otra causa. (COVENIN-MINDUR, 2002).

En este sentido, se deben considerar dos criterios básicos: Estado Límite de Estabilidad y Agotamiento Resistente, que depende de la resistencia de los elementos, y Estado Límite de Servicio, asociado a la rigidez de los elementos.

El procedimiento de diseño que más se aproxima al comportamiento real de la estructura es el diseño a través de las **Ecuaciones de Interacción**, ya que toman en cuenta las situaciones de inestabilidad que se encuentran normalmente y tienen la gran ventaja que permiten trabajar un sin número de casos. Las ecuaciones del AISC-LRFD (Load and Resistance Factor Design) para miembros del tipo viga-columna corresponden a las Ecuaciones de Interacción (Bendito, 2010).

En las especificaciones del LRFD se plantea que la capacidad de diseño de un miembro o de una estructura debe ser igual o mayor a la demanda. Estas especificaciones están basadas casi en su totalidad en consideraciones de estados límite de resistencia.

Las ecuaciones de interacción según las especificaciones LRFD:

$$\frac{Nu}{2\phi_c * Nt} + \left[\frac{Mux}{\phi_b * Mtx} + \frac{Muy}{\phi_b * Mty} \right] \leq 1,00 \quad \text{para} \quad \frac{Nu}{\phi_c * Nt} < 0,20 \quad [Ec. N^{\circ}3]$$

$$\frac{Nu}{\phi_c * Nt} + \frac{8}{9} \left[\frac{Mux}{\phi_b * Mtx} + \frac{Muy}{\phi_b * Mty} \right] \leq 1,00 \quad \text{para} \quad \frac{Nu}{\phi_c * Nt} \geq 0,20 \quad [Ec. N^{\circ}4]$$

Donde:

Nu = Solicitación de compresión mayorada.

$\phi_c * Nt$ = Capacidad a compresión.

Mux = Solicitación de flexión en el eje "x".

Muy = Solicitación de flexión en el eje "y".

$\phi_b * M_{tx}$ = Capacidad a flexión en el eje “x”.

$\phi_b * M_{ty}$ = Capacidad a flexión en el eje “y”.

Siendo

ϕ_c = Factor de minoración de resistencia a compresión igual a 0,85.

ϕ_b = Factor de minoración de resistencia en flexión igual a 0,90.

2.10 Capacidad residual ante la ocurrencia de eventos extraordinarios. (Valor D/C)

El valor de **Demanda/Capacidad**, también conocido como *ratio* o “porcentaje (%) de trabajo del elemento”, corresponde al valor obtenido a partir de las ecuaciones de interacción aplicadas a perfiles de acero estructural. En la práctica, la mayoría de los miembros de una estructura están sometidos a distintas combinaciones de momentos y fuerzas axiales, y este valor muestra a qué porcentaje de su capacidad se encuentra trabajando cada elemento, por lo que sirve como indicador básico del rendimiento del sistema estructural. (Herrera & Pollner, 2011).

CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO

“Pero Newton no escribe la historia de la materia; él da cuenta, en el lenguaje riguroso de la matemática, de fenómenos que pueden ser observados por todos; la gravedad, las mareas, el movimiento de los planetas... y todo esto sin recurrir al menor postulado del orden metafísico.”

<< Hypotheses non fingo >> proclama Newton: << No tengo necesidad de fingir hipótesis >>.

Isaac Newton (1642-1727)

La metodología de investigación se aborda a través de un enfoque experimental-computacional, de tipo cuantitativo, el cual consiste principalmente en la obtención de diversos resultados a partir de premisas ya establecidas y su posterior análisis, con el fin de definir una serie de fundamentos teóricos sustentados empíricamente.

En este trabajo de investigación se hace uso del software de análisis estructural ETABS 2015. Esta herramienta permite hacer simulaciones de los escenarios a evaluar, así como obtener los valores necesarios para el análisis del comportamiento de la estructura, tales como la distribución de esfuerzos, las deformaciones; y los valores de demanda/capacidad, entre otros.

Se hace el análisis en un edificio de uso habitacional de interés social construido en la ciudad de Caracas. La estructura presenta a simple vista varias características que sugieren que la misma pudiera tener un comportamiento no adecuado ante eventos extraordinarios, tales como incendios y explosiones. Entre las características que resaltan como las más críticas a efectos de este análisis, se encuentran: la colocación, poco convencional de arriostramientos; discontinuidad en algunas columnas y el diseño de planta baja libre, entre otras características.

Se tiene como principal referencia el Trabajo Especial de Grado realizado por Jorge Manzoni y Daniela Rincón: “Tipificación de anomalías configuracionales aparentes en estructura metálica aporricada de uso habitacional” (2013), en donde analizan para la misma estructura en estudio, los riesgos a los cuales está expuesta la misma ante un evento sísmico, en el cual los autores concluyen que tendría un comportamiento sismorresistente desfavorable.

Todas las características del edificio, tales como la configuración estructural, los tipos de perfiles y de conexiones, las especificaciones de los materiales y demás detalles necesarios para el estudio, se establecen a partir del Trabajo Especial de Grado mencionado anteriormente.

3.1 Caracterización Arquitectónica de la Edificio Objeto de Estudio

El edificio en estudio forma parte de un conjunto de 10 edificios residenciales de interés social construidos en el municipio Libertador de la ciudad de Caracas. Cada edificio consta de ocho niveles, los dos primeros construidos en concreto armado, de 3,00 metros de altura que califican como planta baja libre, destinados a áreas comunes; y los seis restantes construidos con perfiles de acero con alturas de entrepiso de 2,70 metros, donde hay cuatro apartamentos por nivel.

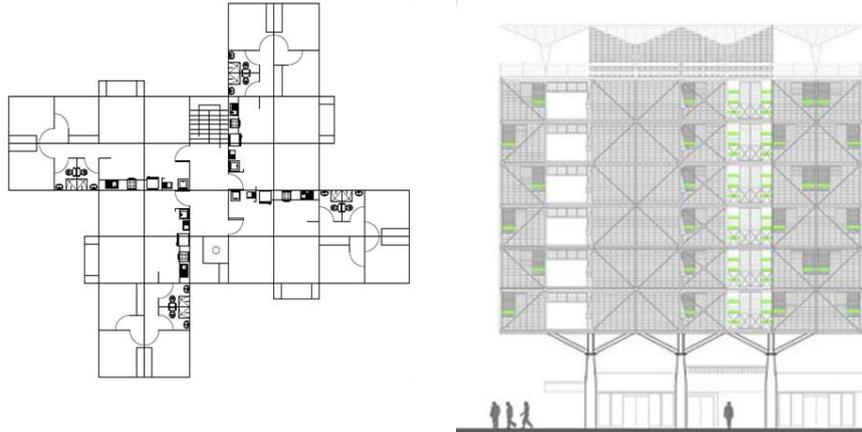


Figura III-1: Planta Arquitectónica/ Vista fachada lateral

Adaptado de Fundacaracas.



Figura III-2: Fotografía de fachada frontal

Fuente Fundacaracas

3.2 Caracterización Estructural del Edificio

3.2.1 Estructura en concreto armado

La planta baja del edificio está construida completamente en concreto armado; a 2,00 metros de altura del primer nivel ocurre un cambio de sección en las columnas, de concreto a acero (Ver ANEXO A). La columna de concreto de 2,00 metros de altura se une a una columna de acero de perfil HEA 360 de 1,00 metro, a través de una conexión que se asume como flexible (Ver ANEXO B). Ver Figura III-3.

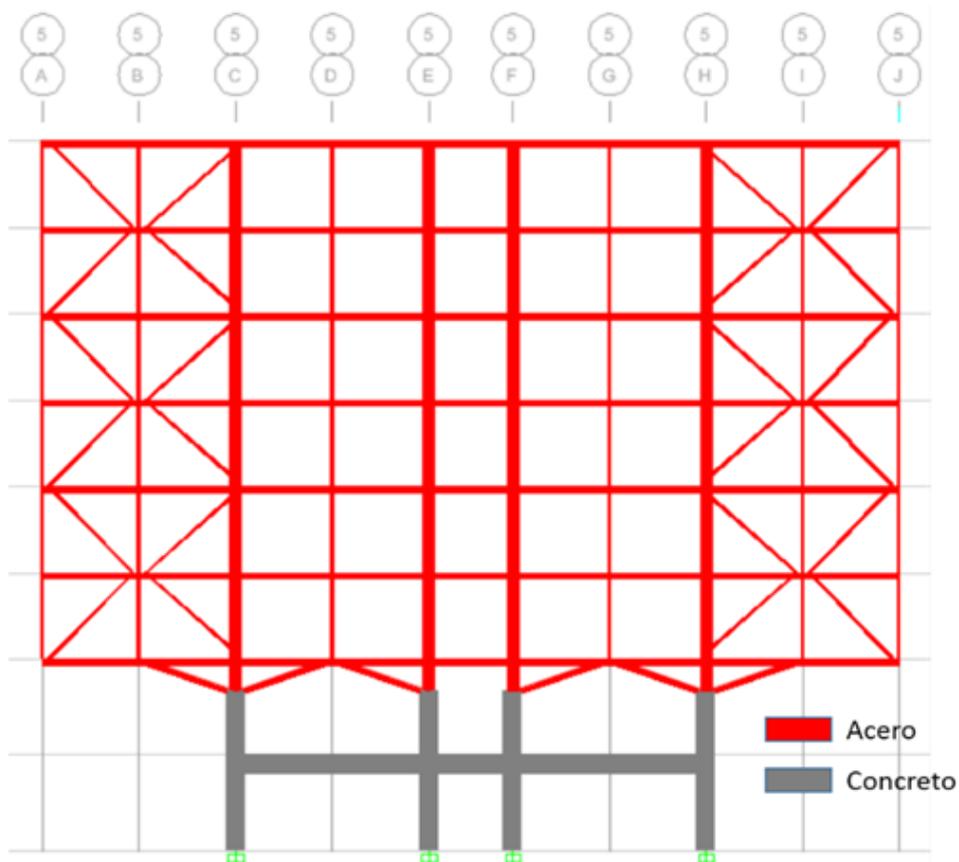


Figura III-3: Configuración de los materiales

Fuente Elaboración propia

Columnas

- Sección: Concreto armado de 60x60cm.
- Longitud: 3,00 metros en planta baja/ 2,00 en primer nivel.
- Conexión: Rígida.

Vigas

No se tienen datos específicos de las vigas de concreto. Se asume una sección genérica en este caso.

- Sección: Concreto armado de 40x60cm
- Longitud: 6,00 metros y 2,60 metros en vigas auxiliares.
- Conexión: Rígida.

Losa Reticular

No se tienen datos específicos de la losa reticular. A partir de las fotografías se observa que se encuentra sólo en el primer nivel y que es de concreto armado en dos direcciones. Se asume una sección genérica en este caso.

- Espesor de loseta: 150mm.
- Altura del nervio: 300mm.
- Ancho del nervio: 150mm (constante).
- Distancia entre nervios: 750mm (en ambas direcciones).

3.2.2 Estructura en acero

A partir del segundo nivel, todos los niveles se diseñan en acero estructural.

Columnas continuas

Numeradas en la Figura III-4 del 1 al 12

- Sección: Perfil HEA 360. (Ver ANEXO C)
- Longitud: 2,70 metros.
- Conexión: Rígida a columnas superiores.

Columnas discontinuas

Numeradas en la Figura III-4 del 13 al 46

- Sección: Perfil tubular 120x120mm (espesor 4mm). (Ver ANEXO D)
- Longitud: 2,70 metros.
- Conexión: Flexibles entre vigas principales.

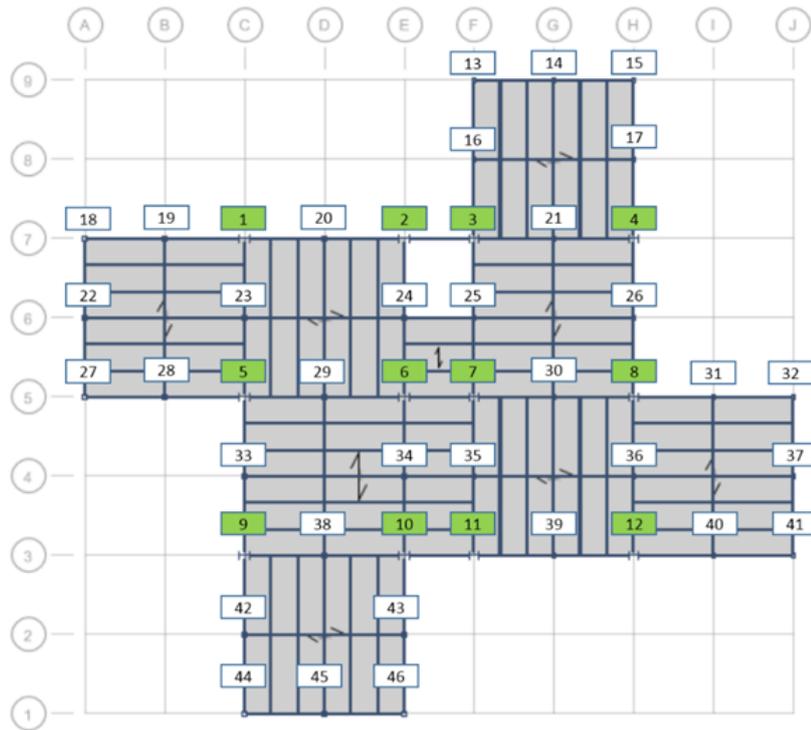


Figura III-4: Distribución de las columnas en planta

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta una vista en elevación donde se observa las columnas continuas y discontinuas. Ver Figura III-5.

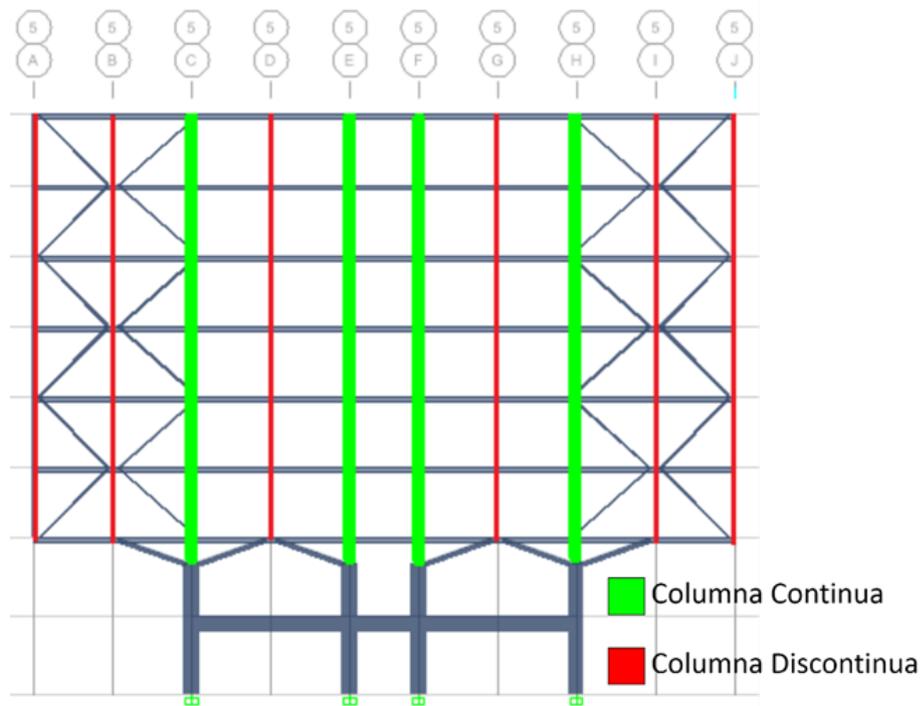


Figura III-5: Distribución de las columnas en elevación

Fuente: Elaboración propia

Vigas principales

- Sección: Perfil IPE 180. (Ver ANEXO E)
- Longitud: 6,00 metros.
- Conexión: Rígidas entre columnas continuas, flexibles entre vigas principales (voladizos).

Vigas secundarias

- Sección: Perfil IPE 200. (Ver ANEXO F)
- Longitud: 6,00 metros.
- Conexión: Flexible entre vigas principales.

Vigas de reparto (Correas)

- Sección: Perfil IPE 140. (Ver ANEXO G)
- Longitud: 3,00 metros.
- Conexión: Flexible entre vigas principales y vigas secundarias.

A continuación, se presenta una vista en planta donde se observan los distintos tipos de vigas. Ver Figura III-6.

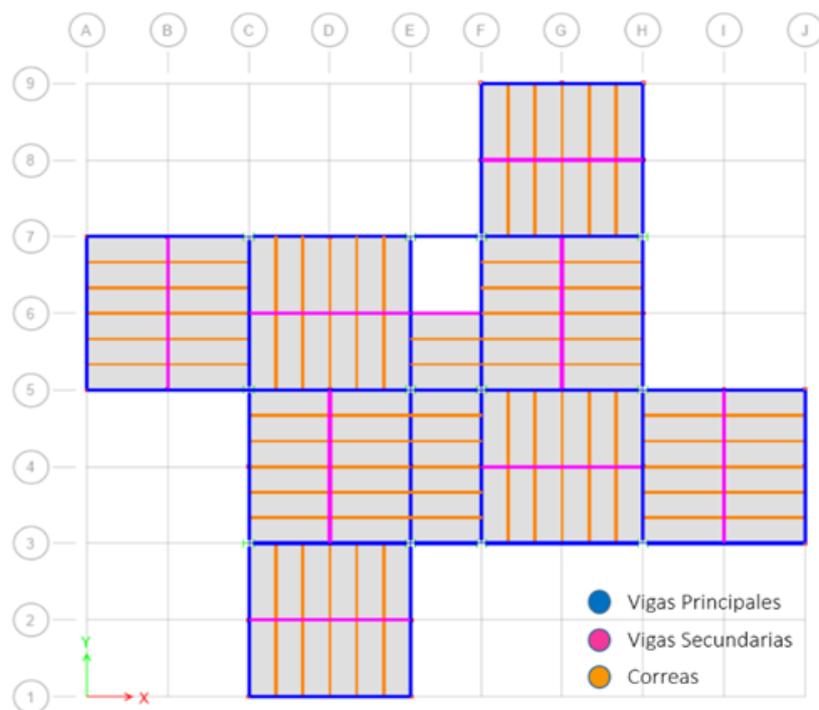


Figura III-6: Distribución de vigas

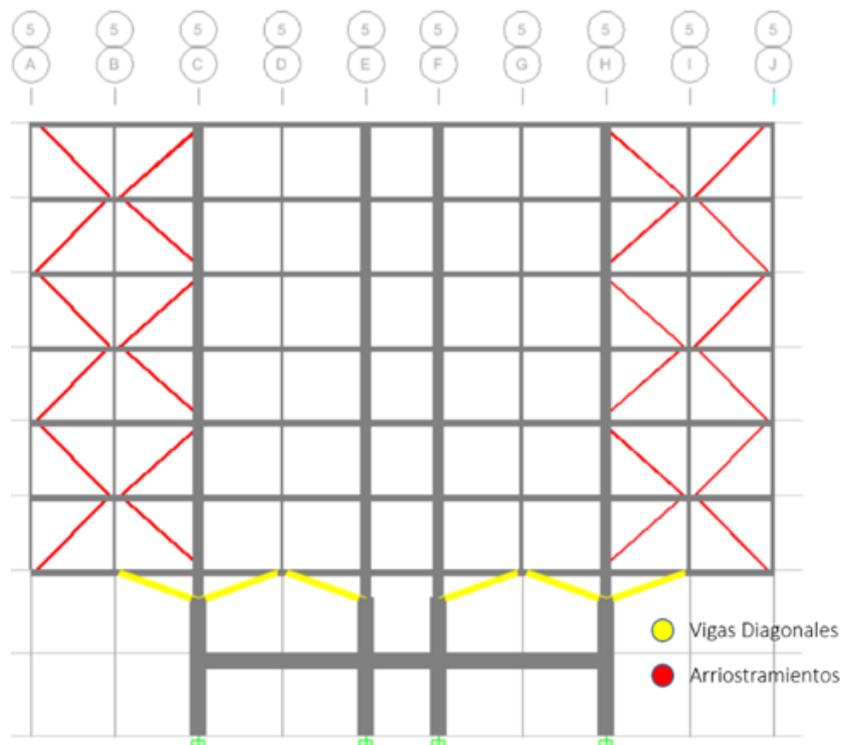
Fuente: Elaboración propia.

Vigas diagonales

- Sección: Perfil tubular 200x200mm (espesor 4mm).
- Longitud: 3,00 metros.
- Conexión: rígida en columna continua (de acero), flexible en viga principal. Con una separación de 20 cm del nodo entre la columna discontinua y la viga principal. Ver Figura III-7.

Arriostramientos (excéntricos)

- Sección: Perfil tubular 120x120mm (espesor 4mm). (Ver ANEXO H)
- Longitud: 3,75 metros.
- Conexión: En la parte frontal de los voladizos, los arriostramientos se conectan de viga principal a viga principal. Ver Figura III-7. En los laterales hay una diferencia en la trayectoria de los arriostramientos, en la parte externa del voladizo van de viga principal a viga principal y en la parte interna van de columna continua a viga principal. Ver Figura No. III-7. Flexibles en todo caso y con una separación de 20 cm del nodo, tanto en su inicio como en su final.



Losa de lámina acanalada o losa mixta

Figura III-7: Vigas diagonales y Arriostramientos

Fuente: Elaboración propia.

En los pisos restantes construidos en acero, se colocan losas de lámina acanalada (LOSACERO) de calibre 22, con espesor de concreto de 6 cm.

- Espesor de concreto: 60mm.
- Altura de nervadura: 38mm.
- Ancho tope de nervadura: 63mm.
- Ancho base de nervadura: 44mm.
- Distancia entre nervaduras: 191mm.

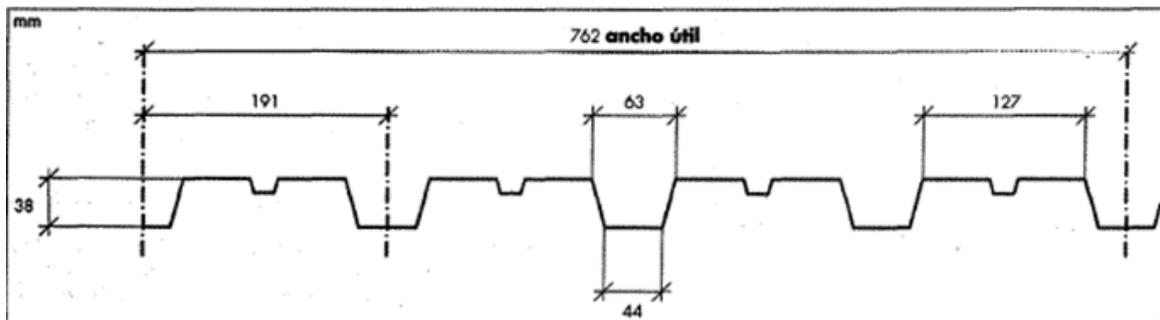


Figura III-8: Dimensiones de sección en losa de lámina acanalada

Fuente: Hierrobeco C.A. Catálogo de productos siderúrgicos. (2000).

Escaleras

No se tienen datos específicos de la escalera, sólo se sabe su ubicación, por ello no se usa en el estudio del edificio. La ubicación de la escalera es representada por un espacio vacío en la losa. En el alcance de este estudio no se toma en cuenta el efecto de la escalera en el comportamiento estructural.

3.3 Casos de carga para el diseño estructural

3.3.1 Cargas Permanentes

Todas las cargas permanentes aportadas por el peso propio de los elementos, como los sistemas de piso, se calculan y se incluyen directamente en el programa ETABS 2015. Las demás cargas permanentes se toman a partir de las sugeridas en el Capítulo 4 de la Norma Venezolana COVENIN 2002-88 “Criterios y Acciones Mínimas para el proyecto De Edificaciones “. Se tienen como referencia las cargas descritas en la Tabla III-1.

	CP (kg/m ²)
Paredes de Mampostería con bloques de arcilla de 10 cm de espesor, frisada por ambas caras	150
Baldosas de gres o cerámica sobre mortero de 3 cm de espesor	50

Tabla III-1: Cargas Permanentes

Tomado de COVENIN 2002-88 “Criterios y Acciones Mínimas para el Proyecto de Edificaciones”

3.3.2 Cargas Variables

La Norma Venezolana COVENIN 2002-88 “Criterios y Acciones Mínimas para el Proyecto de Edificaciones”, en el Capítulo 5 (ver Tabla III-2), recomienda una serie de valores de cargas variables mínimas en función del uso de la edificación y los ambientes. Para edificaciones destinadas a viviendas multifamiliares se toman como referencia las siguientes cargas:

AMBIENTES	CV (kg/m ²)
Áreas públicas; pasillos, comedores, etc.	300
Habitaciones; pasillos internos, vestuarios, etc.	175

Tabla III-2: Cargas Variables.

Tomado de COVENIN 2002-88 “Criterios y Acciones Mínimas para el Proyecto de Edificaciones”

3.3.3 Configuración de cargas en sistemas de piso

Tomando en cuenta los valores de cargas permanentes y variables mencionados anteriormente, se consideran las siguientes cargas sobre cada tipo de losa. Ver Tabla III-3.

	Tipo de losa	CP (kg/m ²)	CV (kg/m ²)
Nivel 1	Concreto	300	300
Niveles 2 - 8	Mixta	200	175

Tabla III-3: Configuración de cargas en sistema de piso

Fuente: Elaboración Propia

3.3.4 Combinaciones de carga

Se trabaja con la combinación de cargas $1.2 CP + 1.6 CV$, ya que el análisis en la estructura es sobre la evaluación del valor D/C.

3.4 Simulación de casos de estudio

La simulación de las condiciones de carga consecuentes de los eventos extraordinarios en estudio, se lleva a cabo mediante **aproximaciones simples** de los efectos de cada tipo de carga, sea explosión o incendio, esto con el fin de obtener un orden de magnitud del posible comportamiento de la estructura en los diferentes escenarios en cuestión.

Si bien existen métodos y programas que permiten evaluar estos eventos de forma más precisa, se considera suficiente esta aproximación simple para los efectos de esta investigación.

3.4.1 Simulación de la Explosión

El efecto de la **explosión** se aproxima a través de la remoción instantánea del elemento que se considere como afectado. En este caso, se selecciona la columna más cercana al punto de la posible fuente de explosión, que corresponde al área de la cocina. Para los tres niveles en estudio, y las cuatro posibles columnas afectadas en una planta, se obtienen doce (12) casos de análisis, cada uno por separado; para observar la influencia de la ubicación del evento extraordinario en la respuesta del edificio. Las columnas que pertenecen a la intersección de los pórticos que contienen a la **columna objetivo** se denominan de la siguiente manera. (Ver Figura III-9 y Tabla III-4).

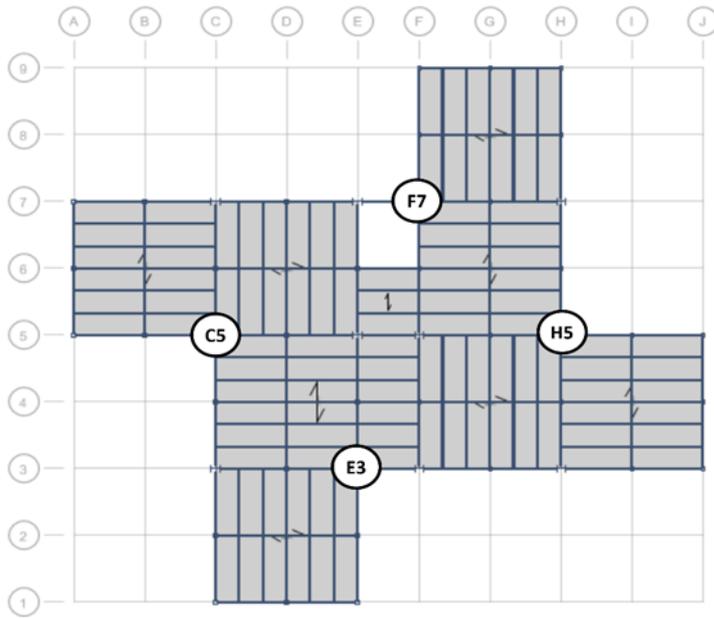


Figura III-9 : Vista en planta de las columnas en estudio

Fuente: Elaboración propia

PÓRTICOS	
Eje X	Eje Y
C	5
F	7
H	5
E	3

Tabla III-4: Columnas en estudio

Para cada uno de los casos mencionados y haciendo uso del programa ETABS 2015, se sigue el procedimiento a continuación:

1. Se remueve la columna objetivo. Se obtiene la *Estructura Residual 1*
2. Se determinan los elementos que fallan en la *Estructura Residual 1* ($E.R_1$) y se registra la siguiente información: tipo de miembro (viga, columna, etc.), sección, nivel y cantidad; así como valores de demanda/capacidad y deformaciones.
3. Se remueven los elementos que fallan en la *Estructura Residual 1* y se obtiene la *Estructura Residual 2*, y nuevamente se determinan los elementos que fallan según la ruta alternativa de carga en dicha $E.R_2$, del mismo modo descrito en el segundo paso.
4. Se repite el tercer paso hasta una $E.R_n$ donde se vea definida una tendencia del colapso total o parcial.

La siguiente figura muestra de forma esquemática el procedimiento descrito anteriormente. (Figura III-10)

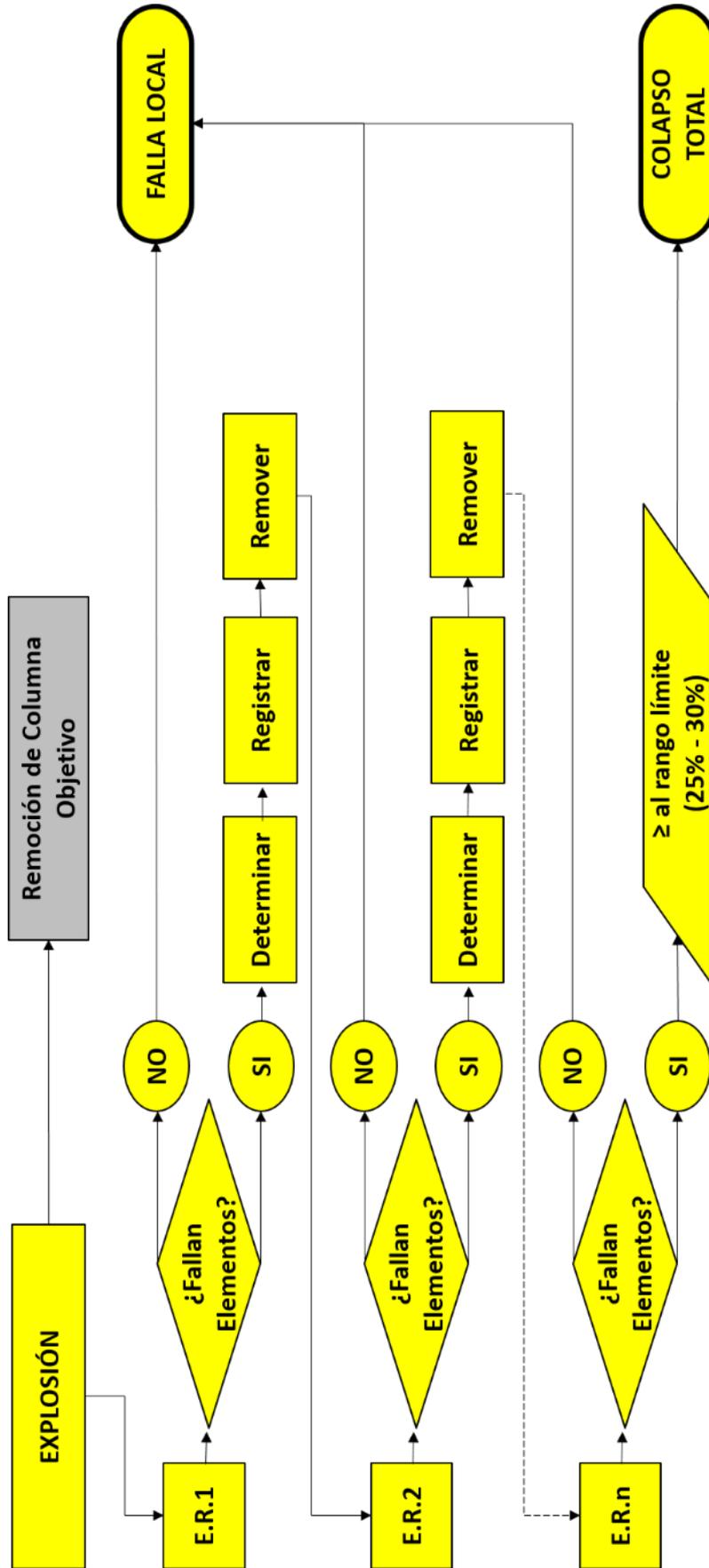


Figura III-10: Procedimiento para la simulación de la explosión

Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Simulación del Incendio

La simulación del incendio se realiza mediante la degradación de las propiedades mecánicas de los materiales en los elementos que se encuentren en la zona considerada como afectada por el fuego. Los valores de las propiedades mecánicas del acero para las distintas temperaturas a evaluar se encuentran en la Tabla III-5:

A36			A500		
Módulo de Elasticidad (E)			Módulo de Elasticidad (E)		
T (°C)	Factor (E)	E (kg/cm ²)	T (°C)	Factor E	E (kg/cm ²)
21	1.00	2,100,000	21	1.00	2,100,000
300	0.90	1,890,000	300	0.90	1,890,000
500	0.70	1,470,000	500	0.70	1,470,000
700	0.15	315,000	700	0.15	315,000
Esfuerzo de Fluencia (fy)			Esfuerzo de Fluencia (fy)		
T (°C)	Factor (fy)	fy (kg/cm ²)	T (°C)	Factor (fy)	fy (kg/cm ²)
21	1.00	2,515	21	1.00	3,575
300	0.94	2,364	300	0.94	3,361
500	0.72	1,811	500	0.72	2,574
700	0.20	503	700	0.20	715
Esfuerzo Último (Fu)			Esfuerzo Último (Fu)		
T (°C)	Factor (Fu)	Fu (kg/cm ²)	T (°C)	Factor (Fu)	Fu (kg/cm ²)
21	1.00	4,078	21	1.00	4,078
300	1.10	4,486	300	1.10	4,486
500	0.56	2,284	500	0.56	2,284
700	0.18	734	700	0.18	734

Tabla III-5: Propiedades Mecánicas del Acero a distintas temperaturas

Adaptado de: Tide, (1998).

Para los casos de **incendio**, se degradan las propiedades mecánicas de los elementos más propensos a este tipo de eventos, que corresponden a los de la zona de la cocina. Se consideran tres temperaturas en este análisis: 300°C, 500°C y 700°C, adicionales a la temperatura ambiente (21°C). Para los tres niveles en estudio, y las cuatro posibles zonas afectadas en una planta, se tienen doce casos de análisis, cada uno por separado; para observar la influencia de la ubicación del evento extraordinario en la respuesta del edificio. Las cuatro zonas en estudio se denominan de la siguiente forma. Figura III-11

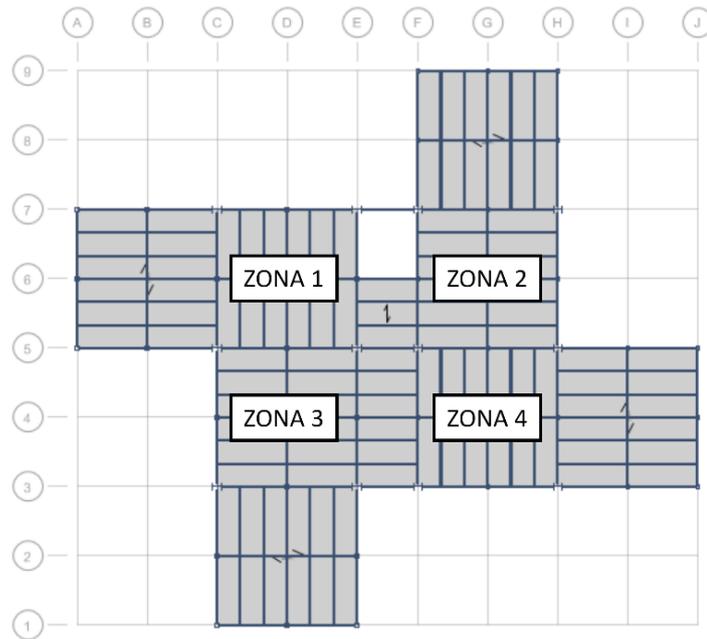


Figura III-11: Vista en planta de las zonas de estudio

Fuente: Elaboración propia

Para cada uno de los casos mencionados y haciendo uso del programa ETABS 2015, se sigue el procedimiento a continuación:

1. Se modifican las propiedades de los elementos de la zona objetivo, de acuerdo con la primera temperatura definida de 300°C.
2. Para cada uno de los elementos modificados se anotan valores de demanda/capacidad y deformaciones.
3. Repetir primer y segundo paso para las temperaturas de 500°C y 700°C.
4. Si durante esta ejecución falla algún elemento, se aplica el mismo procedimiento definido para los casos de **explosión** a partir del segundo paso.

La siguiente figura muestra de forma esquemática el procedimiento descrito anteriormente. (Figura III-12)

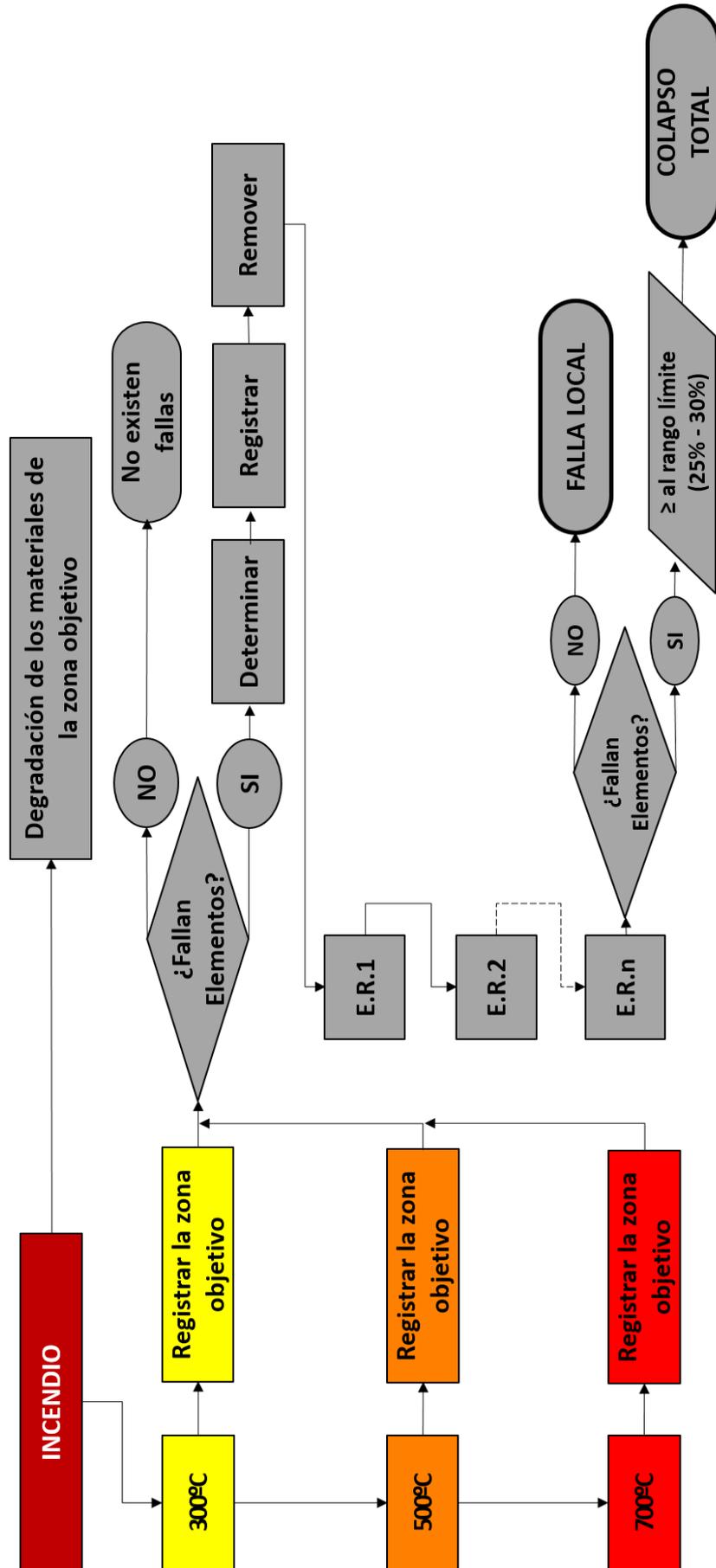


Figura III-12: Procedimiento para la simulación del incendio

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo recopila todos los resultados obtenidos a través de la aplicación de la metodología descrita anteriormente.

El análisis de los resultados se fundamenta en la interpretación de una serie de tablas y gráficas resultantes de las simulaciones de los eventos extraordinarios en estudio.

Con el fin de caracterizar la respuesta de la estructura en los diferentes casos propuestos, se aborda el análisis de los resultados a través de dos enfoques principales: Niveles de Impacto y Propagación de la Falla.

En el enfoque de **Niveles de Impacto** se comparan únicamente 2 casos: la condición original de operación del edificio (caso 0) y la condición de la primera Estructura Residual (E.R) post-evento extraordinario (caso 1). Se examinan los **Valores de Demanda/Capacidad** (D/C) de los elementos que fallan en los casos de Explosión e Incendio; y se analizan los valores de **Desplazamientos Verticales** para cada una de las temperaturas propuestas, solo en los elementos que fallan en los casos de Incendio.

En el enfoque de **Propagación de la Falla** se analizan todas las Estructuras Residuales (E.R.) que se derivan de cada simulación hasta lograr observar una tendencia definida de Colapso Progresivo⁵. A través de este enfoque se expone de manera secuencial la progresividad de la falla conforme se propaga en los distintos niveles y se complementa con un estudio específico del estado final de la simulación, es decir, de la última Estructura Residual.

⁵ La incertidumbre inherente en la respuesta del edificio ante eventos de este tipo, dificulta la definición de una unidad de medida que permita estudiar la misma; por lo que, con base a la investigación realizada, se adopta como herramienta de estudio que, cuando la estructura registra un orden de 25% a 30% de sus elementos que fallan se presume que ya el colapso total es inminente.

4.1 Explosión

4.1.1 Presentación de los Casos

Una serie de estudios preliminares en las simulaciones de la Explosión en los distintos casos propuestos demostraron que el comportamiento del edificio era similar tanto en los ejes C5 y H5, como entre los ejes E3 y F7. Se estima que sea debido a la simetría que se presenta entre ambos en cuanto a su ubicación en planta (Ver ANEXO I). Esta observación conllevó a la reducción de los casos propuestos para las simulaciones de la Explosión, de 12 a 6 casos en total, solo los que corresponden a los ejes C5 y F7. A partir de esta consideración, se asume que cualquier análisis que se realice para un eje, es válido para su eje equivalente en caso de ser necesario. Finalmente, los casos estudiados en las simulaciones de explosión son:

EXPLOSIÓN (E) – Columna – Piso

E – C5 – P3

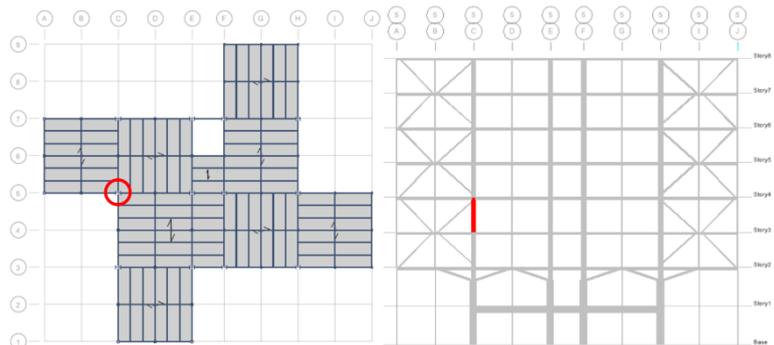
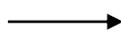


Figura IV-1: Caso E-C5-P3

Fuente: Elaboración propia

E – C5 – P5

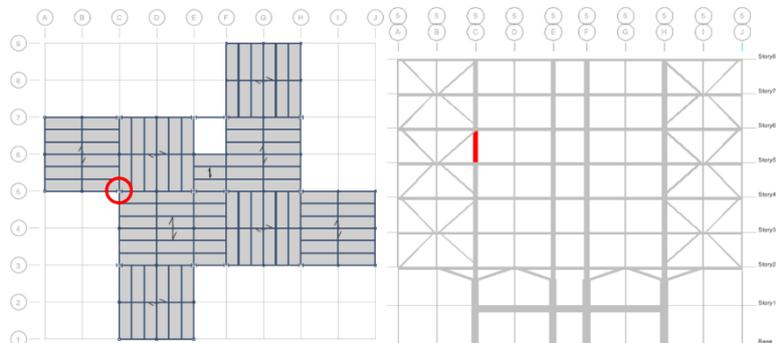


Figura IV-2: Caso E-C5-P5

Fuente: Elaboración propia

E – C5 – P7

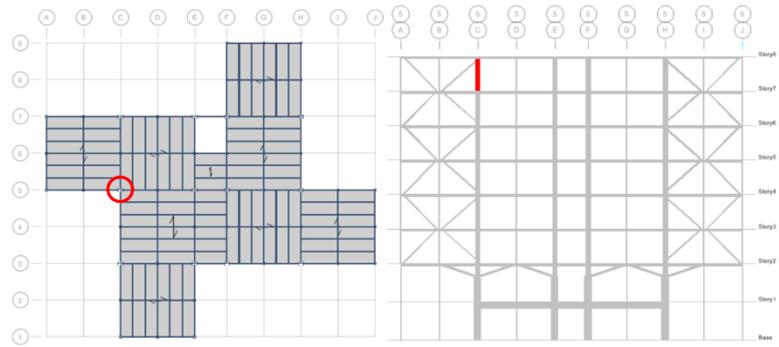


Figura IV-4: Caso E-C5-P7

Fuente: Elaboración propia

E – F7 – P3

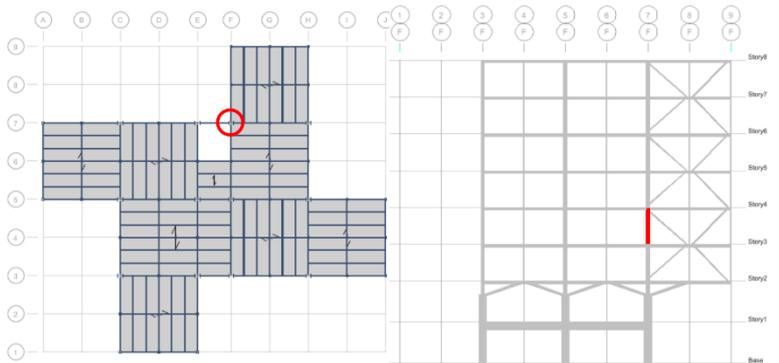


Figura IV-3: Caso E-F7-P3

Fuente: Elaboración propia

E – F7 – P5

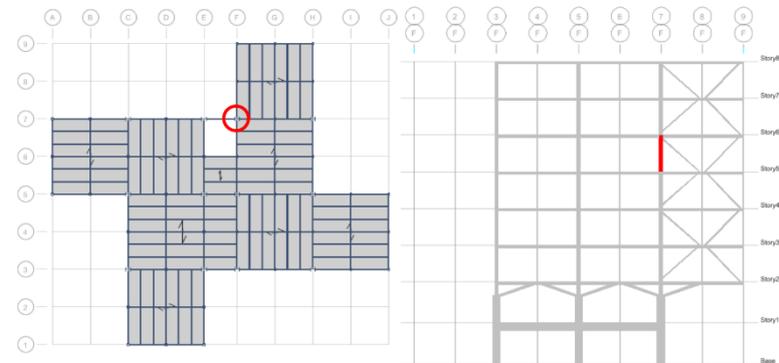


Figura IV-5: Caso E-F7-P5

Fuente: Elaboración propia

E – F7 – P7

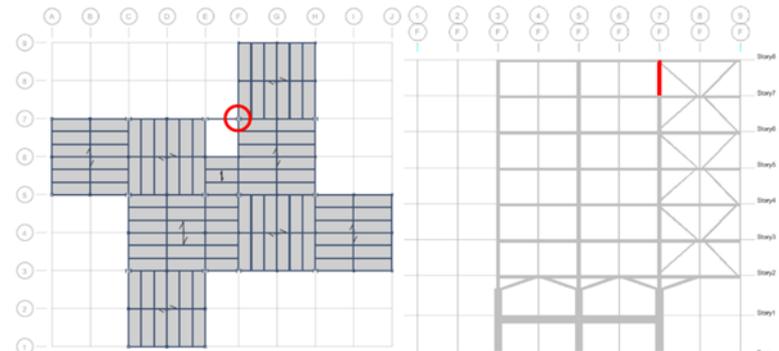


Figura IV-6: Caso E-F7-P7

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Niveles de Impacto

4.1.2.1 Columna C5

– Caso E-C5-P3

La Tabla IV-1 muestra los Valores de D/C de elementos que fallaron a raíz de la Explosión en el caso mencionado, así como su ubicación y tipo de miembro. (Ver ANEXO J)

#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	Caso 0	Caso 1	Incremento (%)
1	C	2	6	Columna Discontinua	0.967	1.139	17.20
2	5	2	B	Columna Discontinua	1.008	1.370	36.20
3	5	2	D	Columna Discontinua	1.020	1.161	14.10
4	5	3	B	Columna Discontinua	0.748	1.393	64.50
5	C	2	5-7	Viga Principal	0.934	1.190	25.60
6	5	2	A-C	Viga Principal	0.580	1.265	68.50
7	5	2	C-E	Viga Principal	0.928	1.252	32.40
8	5	3	A-C	Viga Principal	0.954	2.153	119.90
9	5	2	B-C	Arriostramiento	0.327	1.152	82.50

Tabla IV-1: Incremento de Valor D/C Caso E-C5-P3

De estos primeros resultados, resalta a primera vista el incremento en la relación D/C en las columnas discontinuas (65%); vigas principales (120%) y arriostramientos (83%).

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica (Figura IV-7)

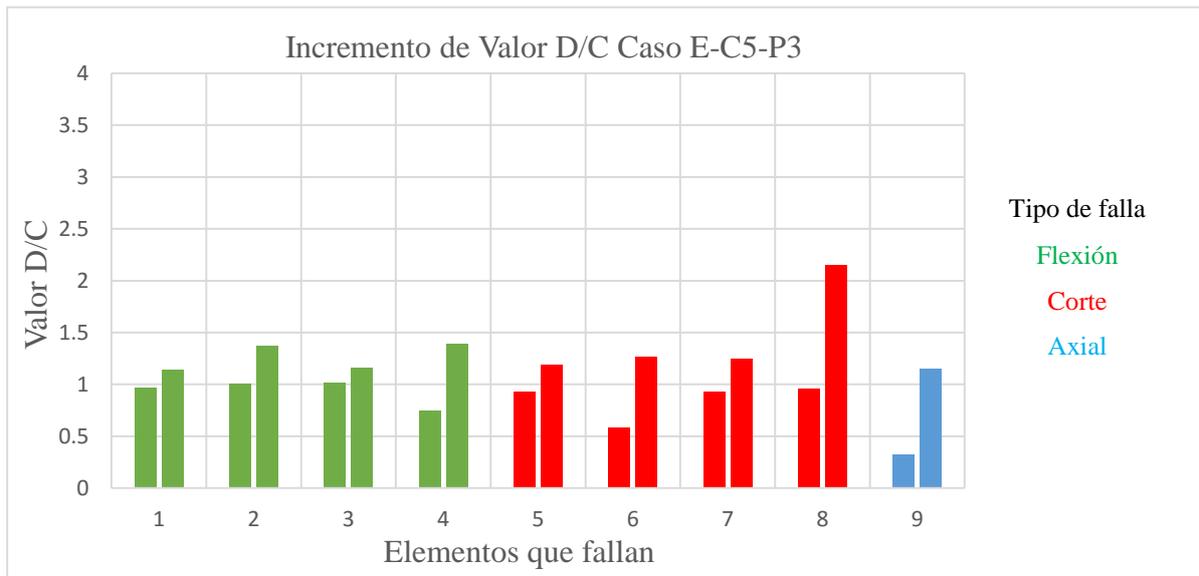


Figura IV-7: Incremento de Valor D/C Caso E-C5-P3

Fuente: Elaboración propia

Luego de la remoción de la columna en el nivel 3 en el eje 5C, se obtuvieron los siguientes resultados:

- N° de elementos que fallaron: 9
- Tipo de elementos que fallaron:
 - Cuatro (4) columnas discontinuas
 - Cuatro (4) vigas principales
 - Un (1) arriostramiento
- Porcentaje (%) de tipo de falla
 - Flexión: 44 % (4 Columnas discontinuas)
 - Corte: 44 % (4 Vigas principales)
 - Axial: 11 % (1 arriostramiento)
- Promedio de incremento en porcentaje (%) de valor D/C según tipo de falla
 - Flexión: 33 %
 - Corte: 62 %
 - Axial: 83 %

– **Caso E-C5-P5**

La Tabla IV-2 muestra los Valores de D/C de elementos que fallaron a raíz de la Explosión en el caso mencionado, así como su ubicación y tipo de miembro. (Ver ANEXO K)

#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	Caso 0	Caso 1	Incremento (%)
1	5	2	B	Columna Discontinua	1.021	1.137	11.60
2	5	5	B	Columna Discontinua	0.721	1.112	39.10
3	5	3	A-C	Viga Principal	0.872	1.620	74.80
4	5	5	A-C	Viga Principal	0.954	1.310	35.60

Tabla IV-2: Incremento de Valor D/C Caso E-C5-P5

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-8)

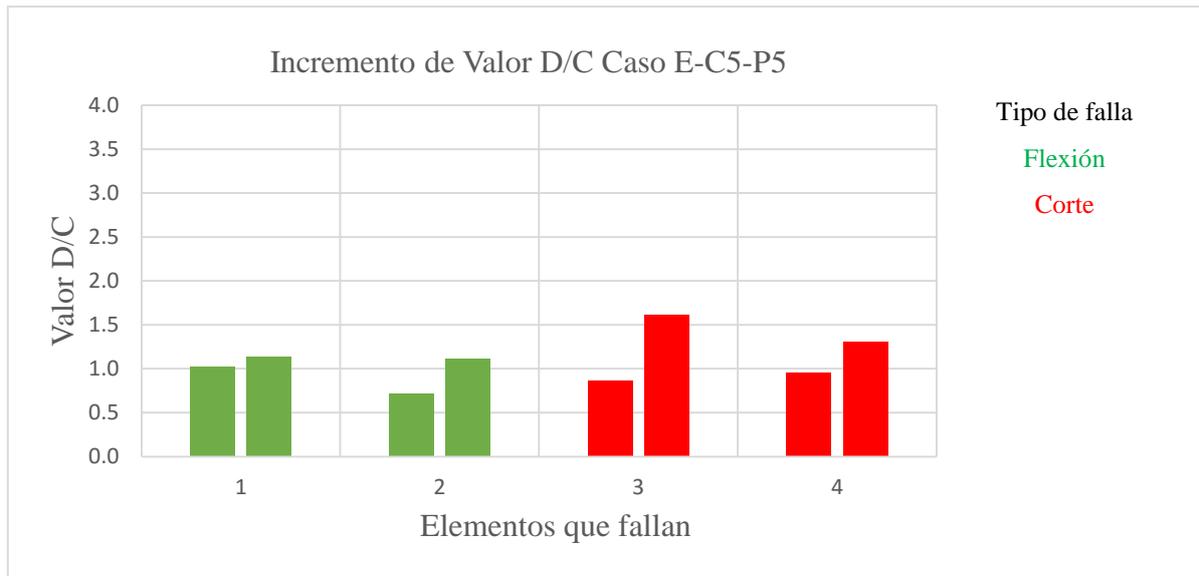


Figura IV-8: Incremento de Valor D/C Caso E-C5-P5

Fuente: Elaboración propia

Luego de la remoción de la columna en el nivel 5 en el eje C5, se obtuvieron los siguientes resultados:

- N° de elementos que fallaron: 4
- Tipo de elementos que fallaron:
 - Dos (2) columnas discontinuas
 - Dos (2) vigas principales
- Porcentaje (%) de tipo de falla:
 - Flexión: 50 % (2 Columnas discontinuas)
 - Corte: 50 % (2 Vigas principales)
- Promedio de incremento en porcentaje (%) de valor D/C según tipo de falla:
 - Flexión: 25 %
 - Corte: 55 %

– **Caso E-C5-P7**

Al remover la columna en el piso 7 no se obtuvieron fallas en ninguna parte del edificio.

4.1.2.2 Columna F7

– Caso E-F7-P3

La Tabla IV-3 muestra los Valores de D/C de elementos que fallaron a raíz de la Explosión en el caso mencionado, así como su ubicación y tipo de miembro. (Ver ANEXO L)

#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	Caso 0	Caso 1	Incremento (%)
1	F	2	8	Columna Discontinua	0.965	1.190	22.50
2	F	3	8	Columna Discontinua	0.754	1.132	37.80
3	5	2	G	Columna Discontinua	1.041	1.153	11.20
4	F	2	7-9	Viga Principal	0.975	1.668	69.30

Tabla IV-3: Incremento de Valor D/C Caso E-F7-P3

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-9)

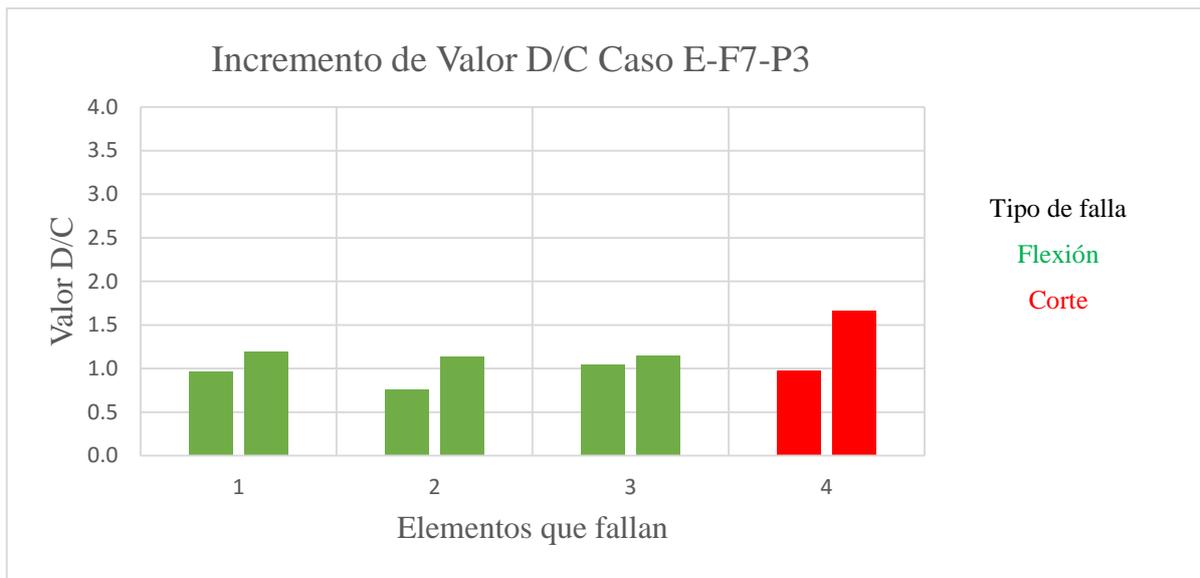


Figura IV-9: Incremento de Valor D/C Caso E-F7-P3

Fuente: Elaboración propia

Luego de la remoción de la columna en el nivel 3 en el eje F7, se obtuvieron los siguientes resultados:

- N° de elementos que fallaron: 4
- Tipo de elementos que fallaron:
 - Tres (3) columnas discontinuas
 - Una (1) viga principal
- Porcentaje (%) de tipo de falla:
 - Flexión: 75 % (3 Columnas discontinuas)
 - Corte: 25 % (1 Viga principal)
- Promedio de incremento en porcentaje (%) de valor D/C según tipo de falla:
 - Flexión: 24 %
 - Corte: 69 %

– **Caso E-F7-P5**

La Tabla IV-4 muestra los Valores de D/C de elementos que fallaron a raíz de la Explosión en el caso mencionado, así como su ubicación y tipo de miembro. (Ver ANEXO M)

#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	Caso 0	Caso 1	Incremento (%)
1	F	3	5-7	Viga Principal	0.975	1.461	48.60

Tabla IV-4: Incremento de Valor D/C Caso E-F7-P5

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-10)

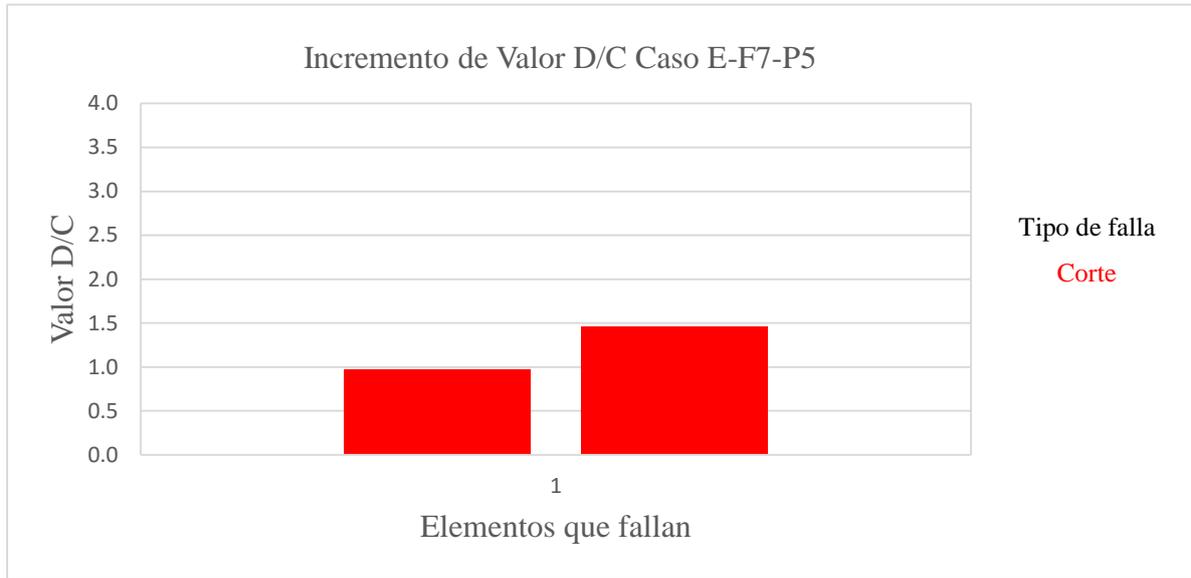


Figura IV-10: Incremento de Valor D/C Caso E-F7-P5

Fuente: Elaboración propia

Luego de la remoción de la columna en el nivel 5 en el eje F7, se obtuvieron los siguientes resultados:

- N° de elementos que fallaron: 1
- Tipo de elementos que fallaron:
 - Una (1) viga principal
- Porcentaje (%) de tipo de falla:
 - Corte: 100 % (1 Viga principal)
- Promedio de incremento en porcentaje (%) de valor D/C según tipo de falla:
 - Corte: 49 %

– **Caso E-F7-P7**

Al remover la columna en el piso 7 eje F7 no se obtuvieron fallas en ninguna parte del edificio.

4.1.3 Propagación Vertical de Falla

4.1.3.1 Columna C5

– **Caso E-C5-P3**

La Tabla IV-5 muestra los porcentajes de elementos que fallaron a raíz de la explosión en el caso mencionado.

Nivel	Porcentaje de elementos que fallan			
	Estructura Residual (E.R.)			
	1	2	3	4
1	0	0	0	16.67
2	0	6.48	16.67	36.11
3	0.93	2.78	12.04	35.19
4	0	0	7.41	30.56
5	0	0	6.48	26.85
6	0	0	2.78	25.00
7	0	0	5.56	27.78
8	0	0	2.78	12.04

Tabla IV-5: Propagación Vertical Caso E-C5-P3

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-11)

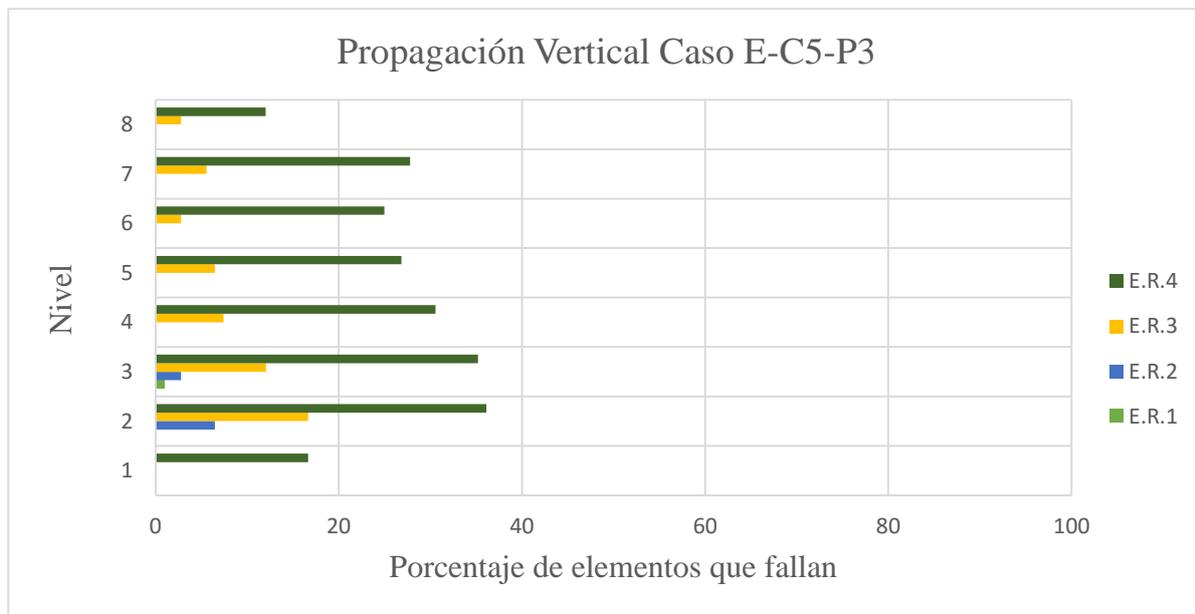


Figura IV-11: Propagación Vertical Caso E-C5-P3

Fuente: Elaboración propia

Luego de la remoción de la columna en el nivel 3 en el eje C5, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Primera Estructura Residual: Se observa que el único nivel con elementos que fallan es el tercer nivel.
- Segunda Estructura Residual: Se empieza a propagar la falla al segundo nivel, incluyendo el tercer nivel de manera local.
- Tercera Estructura Residual: La falla se propaga en todos los niveles superiores, es decir, niveles 4, 5, 6, 7,8 (incluyendo los niveles 2 y 3).
- Cuarta Estructura Residual: La falla se propaga en todos los niveles, siendo los niveles más afectados el 2 y 3, con un porcentaje (%) de elementos que fallan de 36% y 35 % respectivamente.
- Comentarios:
 - El segundo nivel es el que contiene mayor porcentaje de elementos que fallan.
 - Se puede decir que, desde la segunda a la tercera estructura residual, la falla pasa de local a global.
 - El promedio de elementos que fallan a la cuarta estructura residual es de 26 %.

Las imágenes a continuación muestran la secuencia de la progresividad de la falla cuando la explosión ocurre en el caso descrito anteriormente. (Ver Figura IV-12)

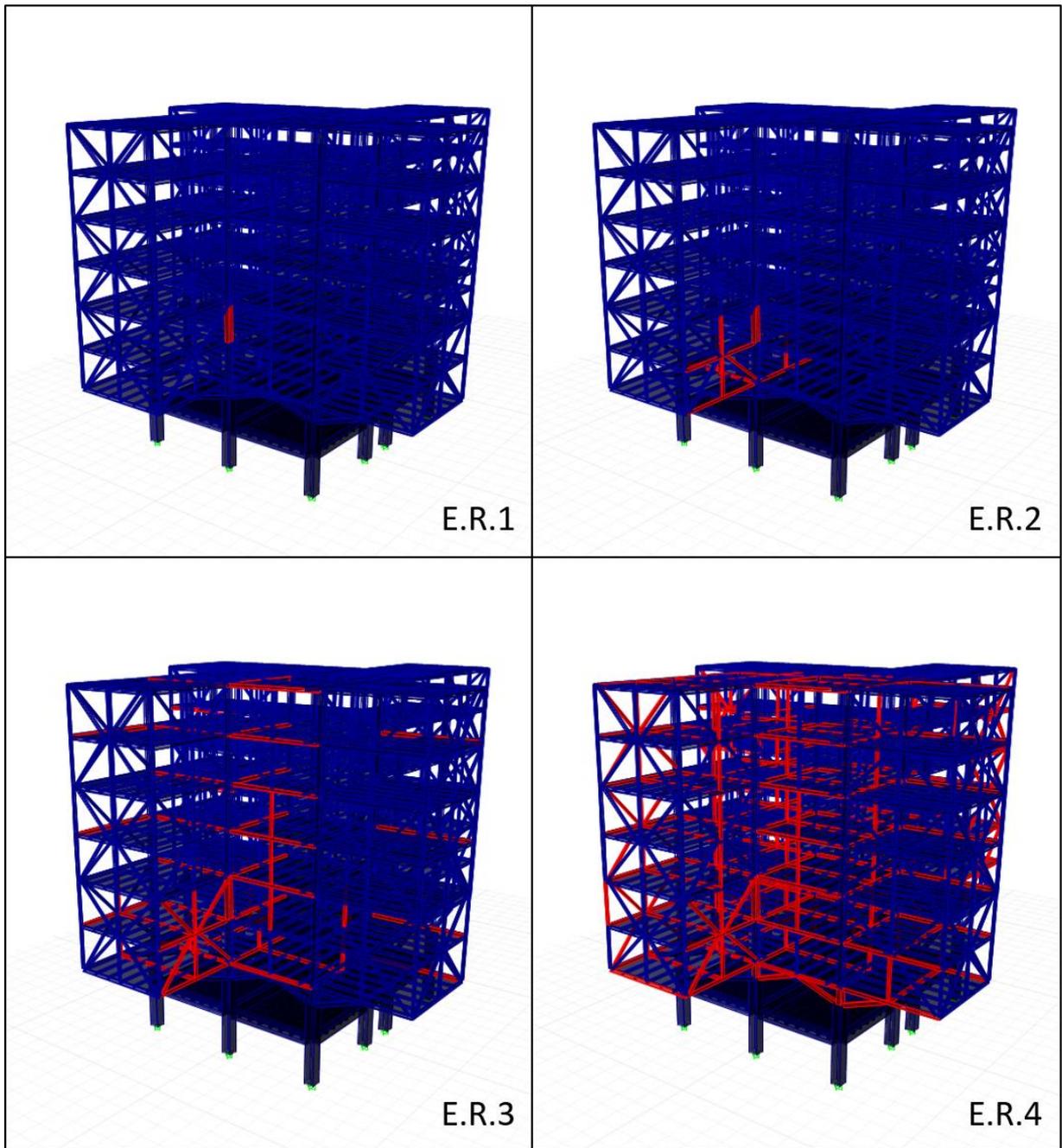


Figura IV-12: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso E-C5-P3

Fuente: Elaboración propia

– Caso E-C5-P5

La Tabla IV-6 muestra los porcentajes de elementos que fallaron a raíz de la explosión en el caso mencionado.

Nivel	Porcentaje de elementos que fallan				
	Estructura Residual (E.R.)				
	1	2	3	4	5
1	0	0	0	2.08	12.50
2	0	0.93	10.19	26.85	55.56
3	0	0.93	7.41	18.52	49.07
4	0	0	4.63	15.74	37.96
5	0.93	2.78	8.33	19.44	37.04
6	0	0	2.78	12.04	34.26
7	0	0	3.70	15.74	37.96
8	0	0	0	0.93	11.11

Tabla IV-6: Propagación Vertical Caso E-C5-P5

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica (Figura IV-13)

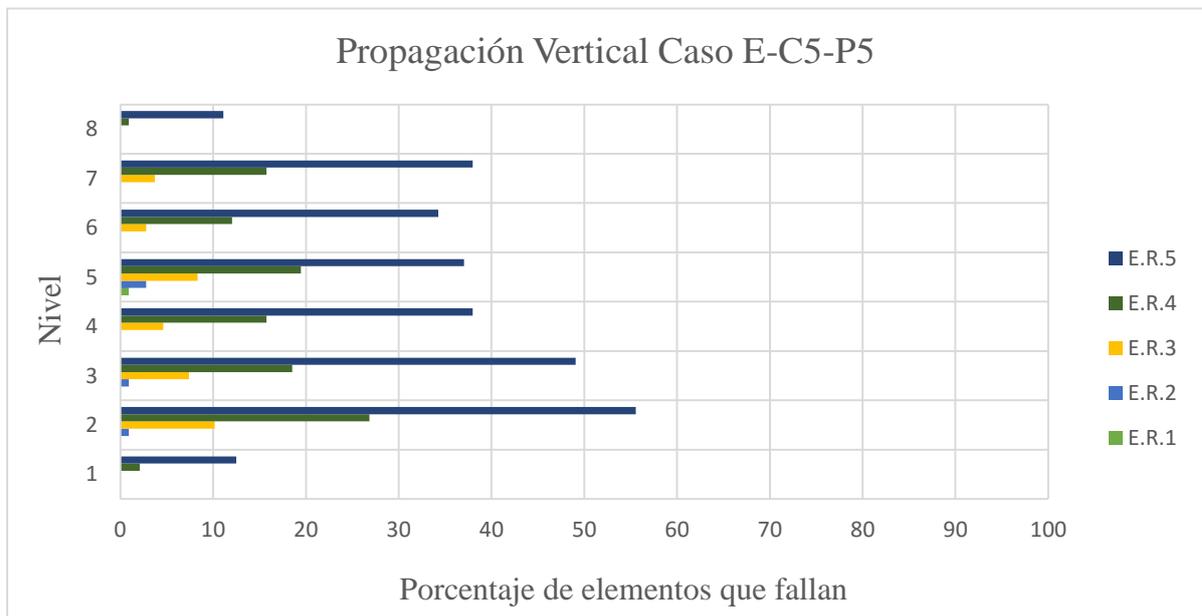


Figura IV-13: Propagación Vertical Caso E-C5-P5

Fuente: Elaboración propia

Luego de la remoción de la columna en el piso 5 en el eje C5, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Primera Estructura Residual: Se observa que el único nivel con elementos que fallan es el quinto nivel.
- Segunda Estructura Residual: Se empieza a propagar la falla hacia los niveles inferiores, es decir, 3 y 2.
- Tercera Estructura Residual: La falla se propaga hacia los niveles superiores e inferiores del nivel 5, es decir, los niveles 2, 3, 4, 6,7.
- Cuarta Estructura Residual: Se observa que todos los niveles contienen un porcentaje de elementos que fallan, a un promedio de 14 % de elementos que fallan.
- Quinta Estructura Residual: Fallan más del 10 % de los elementos de sus respectivos niveles, con un promedio de 34 %. Siendo el nivel 2 con mayor porcentaje de elementos que fallan (56 %).
- Comentarios:
 - El ultimo nivel, el octavo nivel, con 11 % de sus elementos a la quinta estructura residual.
 - Se puede decir que, desde la segunda a la tercera estructura residual, la falla pasa de local a global.
 - El nivel 2 desde la tercera corrida ha sido el más vulnerable, es decir, el nivel con más porcentaje de elementos que fallan.

Las imágenes a continuación muestran la progresividad de la falla cuando la explosión ocurre en el caso descrito anteriormente. (Ver Figura IV-14)

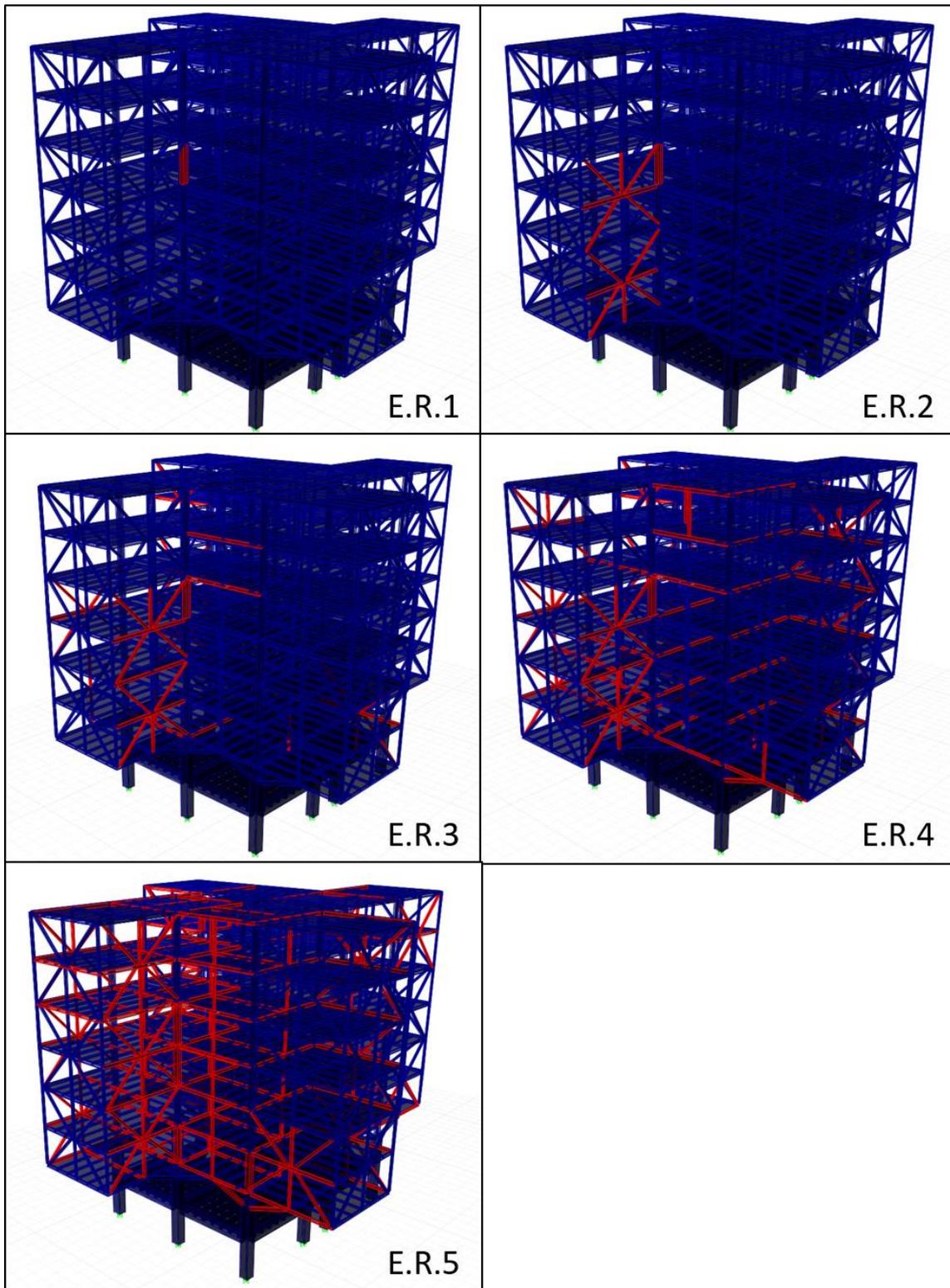


Figura IV-14: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso E-C5-P5

Fuente: Elaboración propia

– **Caso E-C5-P7**

La Tabla IV-7 muestra los porcentajes de elementos que fallaron a raíz de la explosión en el caso mencionado.

Nivel	Porcentaje de elementos que fallan	
	Estructura Residual (E.R.)	
	1	2
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0.93	0.93
8	0	0

Tabla IV-7: Propagación Vertical Caso E-C5-P7

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-15)

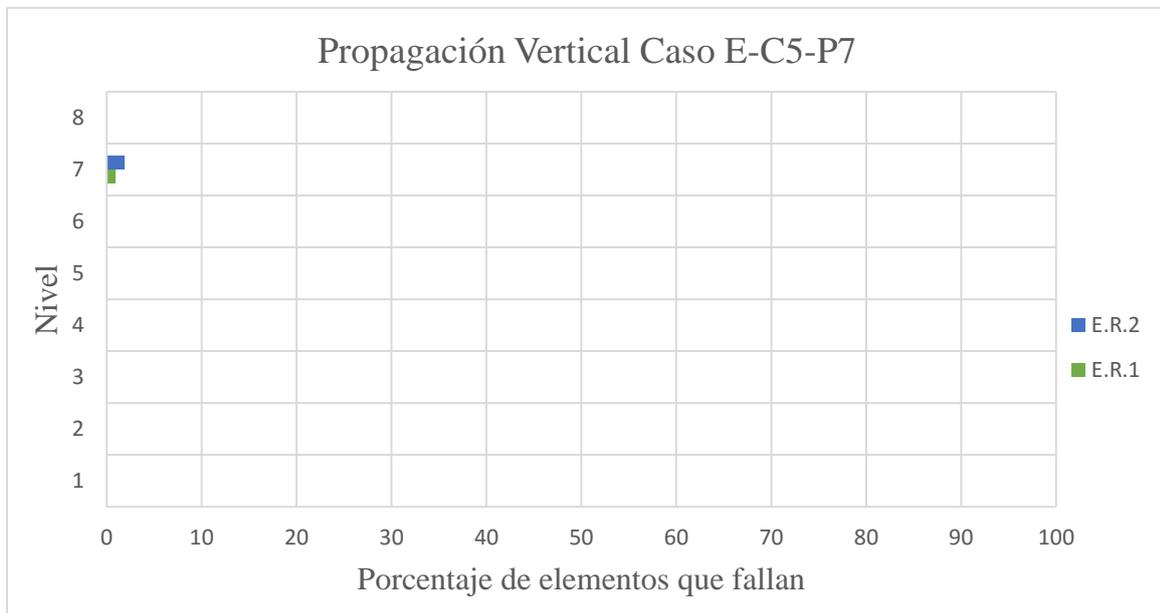


Figura IV-15: Propagación Vertical Caso E-C5-P7

Fuente: Elaboración propia

Luego de la remoción de la columna en el nivel 7 en el eje C5, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Primera Estructura Residual: Se observa que el único nivel con elementos que fallan es el séptimo nivel.
- Segunda Estructura Residual: No se observa propagación de la falla en ningún nivel.

Las imágenes a continuación muestran la progresividad de la falla cuando la explosión ocurre en el caso descrito anteriormente. (Ver Figura IV-16)

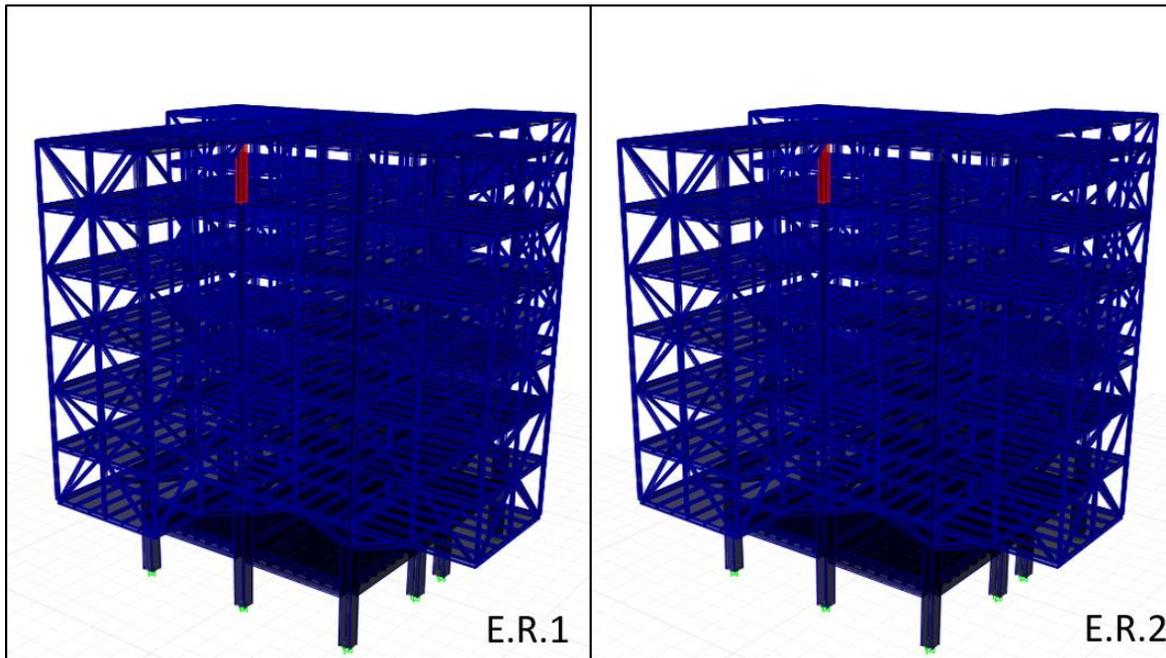


Figura IV-16: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso E-C5-P7

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.2 Columna F7

– Caso E-F7-P3

La Tabla IV-8 muestra los porcentajes de elementos que fallaron a raíz de la explosión en el caso mencionado.

Nivel	Porcentaje de elementos que fallan				
	Estructura Residual (E.R.)				
	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	2.08
2	0	1.85	12.96	19.44	50
3	0.93	2.78	14.81	22.22	59.26
4	0	0	2.78	12.04	49.07
5	0	0	4.63	17.59	44.44
6	0	0	1.85	17.59	36.11
7	0	0	1.85	17.59	30.56
8	0	0	0.93	5.56	13.89

Tabla IV-8: Propagación Vertical Caso E-F7-P3

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-17)

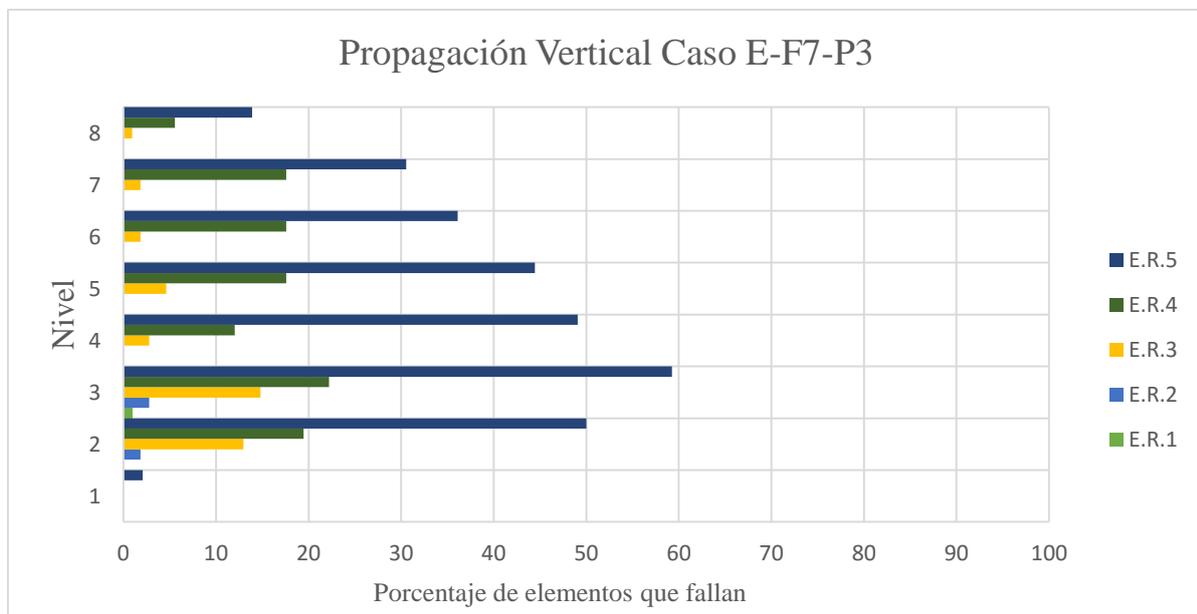


Figura IV-17: Propagación Vertical Caso E-F7-P3

Fuente: Elaboración Propia

Luego de la remoción de la columna en el nivel 3 en el eje F7, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Primera Estructura Residual: Se observa que el único nivel con elementos que fallan es el tercer nivel.
- Segunda Estructura Residual: Se empieza a propagar la falla al nivel inferior, es decir, nivel 2.
- Tercera Estructura Residual: La falla se propaga hacia todos los niveles excepto el nivel 1. Desde el nivel 4 al 8, contienen un porcentaje de elementos que fallan menor al 10 %.
- Cuarta Estructura Residual: Se incrementa el porcentaje de elementos que fallan de los niveles excepto en el primer nivel que todavía no falla. Las fallas se contienen entre el 10 y 20 %.
- Quinta Estructura Residual: Todos los niveles fallan en un promedio de 36 %. La falla se considera global ya que se esparció en todos los niveles. El nivel 3 es el más afectado con un porcentaje de 59 % de sus elementos que fallan.
- Comentarios:
 - El primer nivel a la quinta estructura residual solamente contiene 2 % de sus elementos que falla.
 - Se puede decir que, desde la segunda a la tercera estructura residual, la falla pasa de local a global.
 - El nivel 3 siempre fue el nivel con mayor porcentaje de elementos que fallan.

Las imágenes a continuación muestran la progresividad de la falla cuando la explosión ocurre en el caso descrito anteriormente. (Ver Figura IV-18)

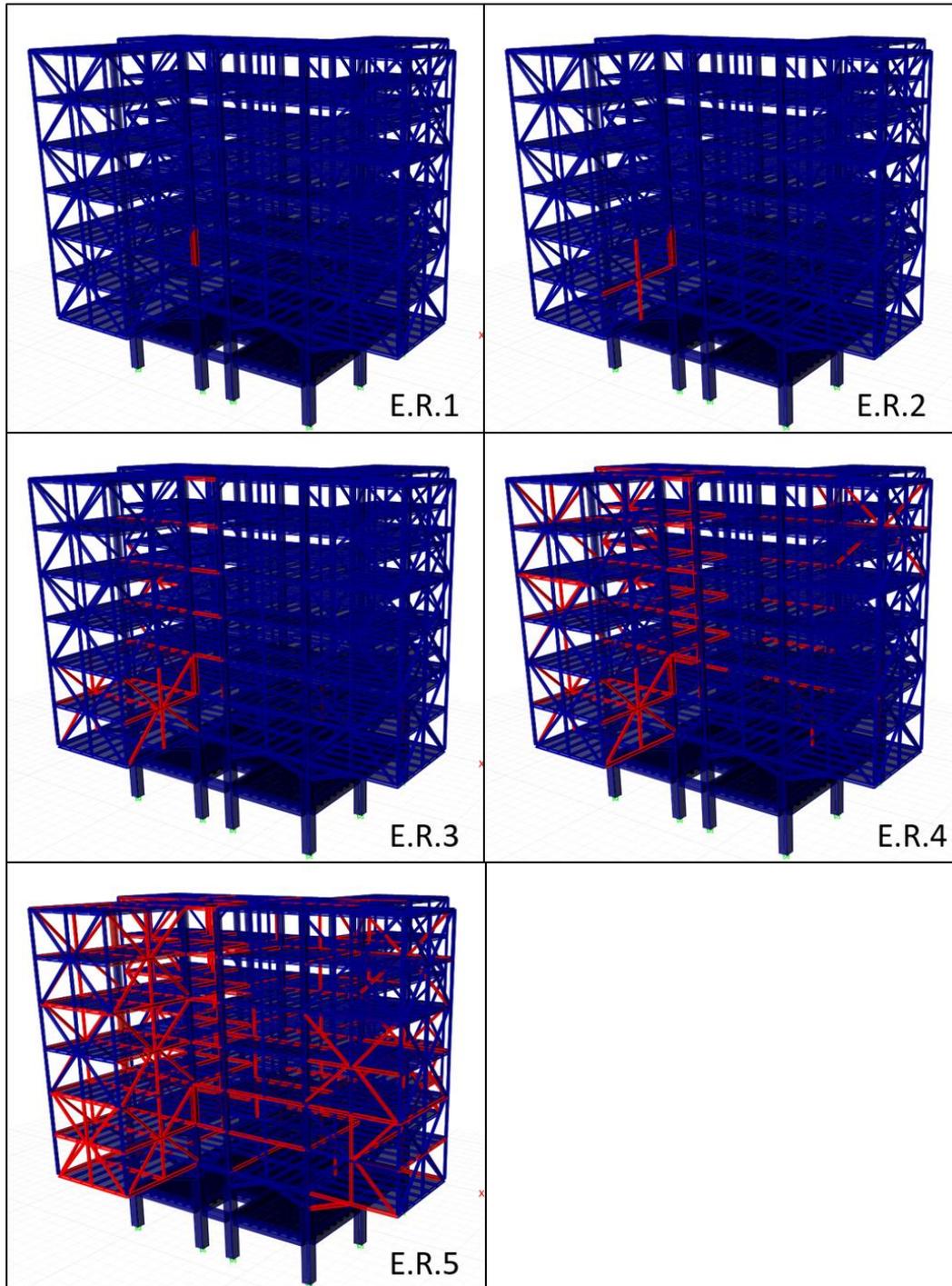


Figura IV-18: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso E-F7-P3

Fuente: Elaboración propia

– **Caso E-F7-P5**

La Tabla IV-9 muestra los porcentajes de elementos que fallaron a raíz de la explosión en el caso mencionado.

Porcentaje de elementos que fallan						
Estructuras Residuales E.R.						
Nivel	0	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0	8.33
2	0	0	0	4.63	12.96	38.89
3	0	0.93	0.93	0.93	12.04	32.41
4	0	0	1.85	1.85	9.26	26.85
5	0.93	0.93	3.70	3.70	12.96	27.78
6	0	0	0	0.93	4.63	25.93
7	0	0	0	0	6.48	27.78
8	0	0	0	0	0.93	5.56

Tabla IV-9: Propagación Vertical Caso E-F7-P5

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-19)

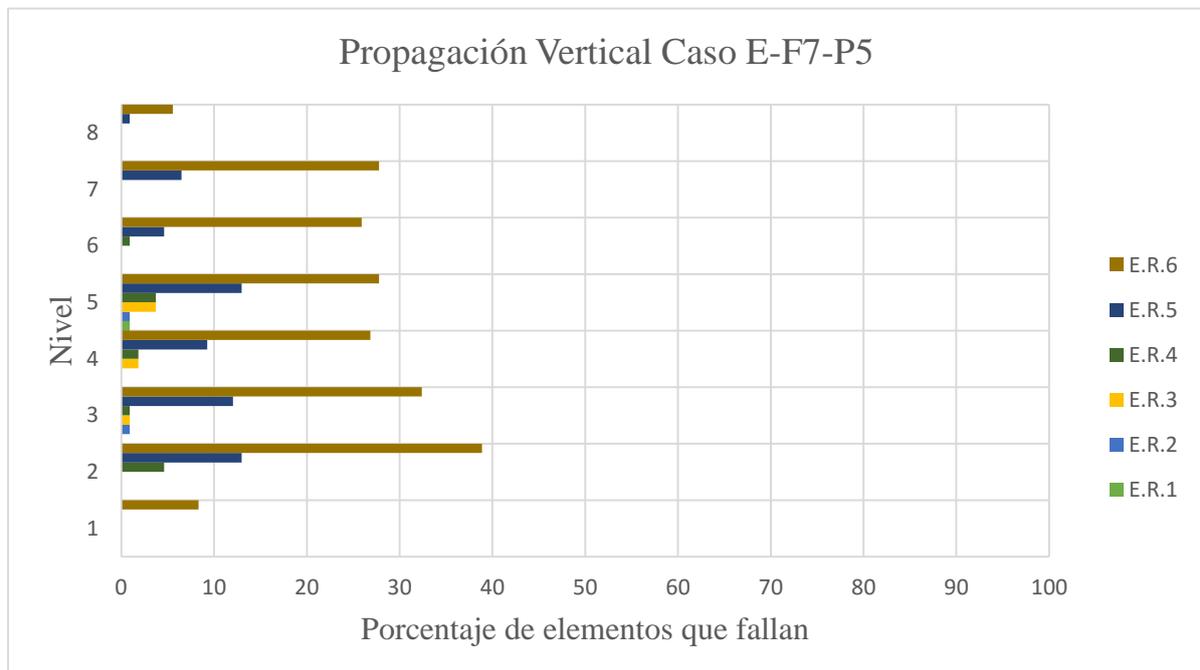


Figura IV-19: Propagación Vertical Caso E-F7-P5

Fuente: Elaboración propia

Luego de la remoción de la columna en el nivel 5 en el eje F7, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Primera Estructura Residual: Se observa que el único nivel con elementos que fallan es el quinto nivel.
- Segunda Estructura Residual: Se empieza a propagar la falla al nivel 3 solamente.
- Tercera Estructura Residual: La falla se propaga hacia el nivel 4.
- Cuarta Estructura Residual: Se observa que empieza a fallar el segundo nivel, aparte del tercer, cuarto y quinto nivel. Todos menores al 10 % de sus elementos que fallan.
- Quinta Estructura Residual: La falla se propaga en todos los niveles excepto en el primer nivel. Solo los niveles 2, 3,4 y 5 pasan el 10 % de sus elementos que fallan.
- Sexta Estructura Residual: Fallan todos sus niveles, con un promedio de 24 %. Siendo el segundo nivel con más % de elementos que fallan (39 %).
- Comentarios:
 - El ultimo nivel, el octavo nivel, con 11 % de sus elementos a la quinta estructura residual.
 - Se puede decir que, desde la cuarta a la quinta estructura residual, la falla pasa de local a global.
 - El quinto nivel fue el más vulnerable hasta la sexta estructura residual.

Las imágenes a continuación muestran la progresividad de la falla cuando la explosión ocurre en el caso descrito anteriormente. (Ver Figura IV-20)

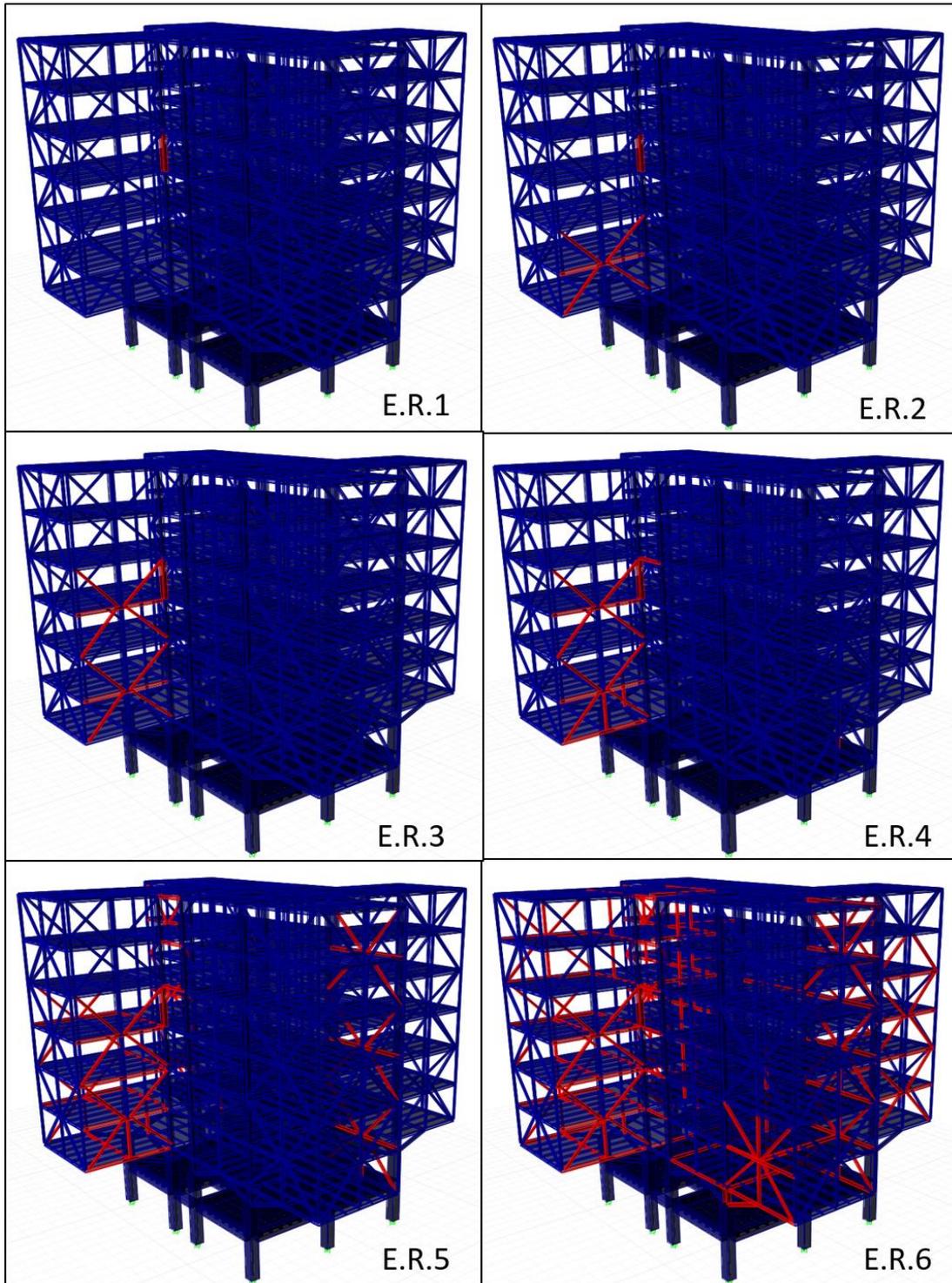


Figura IV-20: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso E-F7-P5

Fuente: Elaboración propia

– **Caso E-F7-P7**

Dicho caso responde de manera similar que en el eje C5, ya demostrado anteriormente.

4.1.4 Propagación Global de la Falla

4.1.4.1 Columna C5

La Tabla IV-23 los porcentajes de elementos que fallaron a raíz de la explosión en los diferentes niveles para el eje mencionado.

Porcentaje de elementos que fallan					
Estructura Residual (E.R.)					
Nivel	1	2	3	4	5
3	0.14	1.36	7.9	29.36	-
5	0.14	0.68	5.45	16.21	39.51
7	0.14	0.14	-	-	-

Tabla IV-10: Propagación Global. Caso E-C5

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica (Figura IV-21)

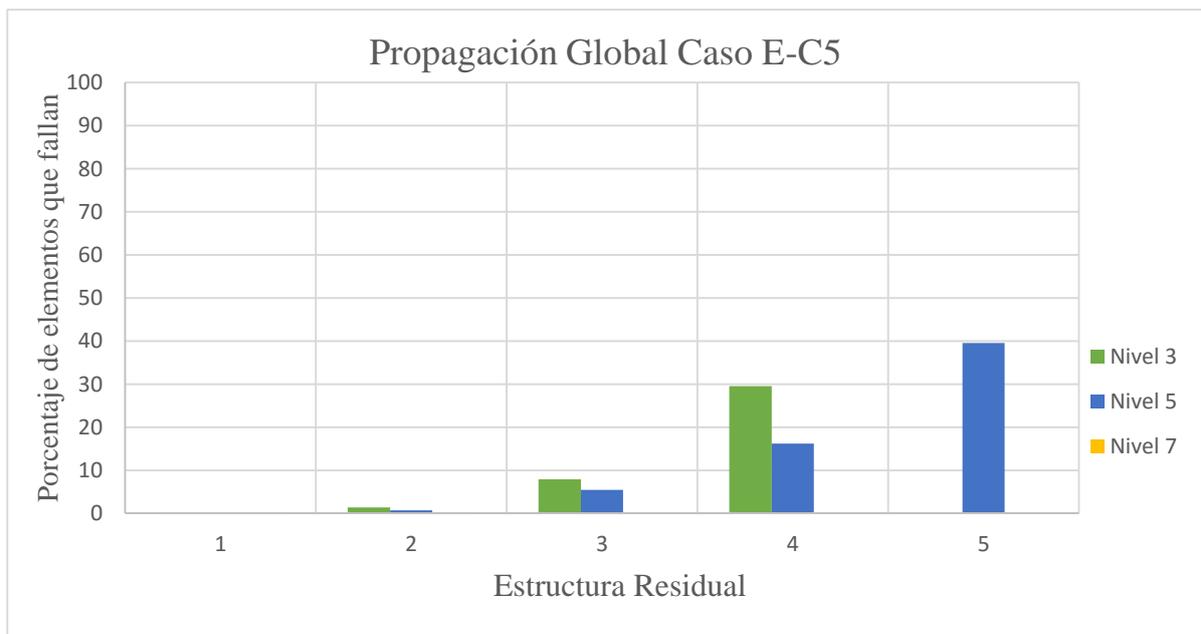


Figura IV-21: Propagación Global. Caso E-C5

Fuente: Elaboración propia

Se observó que las fallas en los niveles 3 y 5 inducían al colapso progresivo, ya que para la última estructura residual del nivel 3 y nivel 5, presentaban un 29 % y 40 % de sus elementos que fallaban. En cambio, en el nivel 7, la falla no se propagó, por lo tanto, se determinó que la falla fue local.

– **Análisis sobre los tipos de elementos**

Las Tablas IV-11, -12 y -13 muestran la cantidad de elementos que fallaron hasta la última Estructura Residual y los distingue según su tipo; así como el porcentaje que representan en relación al número total de elementos que fallaron para dicho caso.

Nivel 3			
Tipo de elemento	Total de elementos	Elementos que fallan	%
Columna Continua	84	8	10
Columna Discontinua	204	62	30
Viga Principal	203	93	46
Viga Secundaria	63	28	44
Arriostramientos	144	20	14
Viga Diagonal	36	5	14
TOTAL	734	216	29

Tabla IV-11: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso E-C5-P3

Nivel 5			
Tipo de elemento	Total de elementos	Elementos que fallan	%
Columna Continua	84	10	12
Columna Discontinua	204	76	37
Viga Principal	203	116	57
Viga Secundaria	63	25	40
Arriostramientos	144	59	41
Viga Diagonal	36	3	8
TOTAL	734	289	39

Tabla IV-12: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso E-C5-P5

Nivel 7			
Tipo de elemento	Total de elementos	Elementos que fallan	%
Columna Continua	84	1	1
Columna Discontinua	204	0	0
Viga Principal	203	0	0
Viga Secundaria	63	0	0
Arriostramientos	144	0	0
Viga Diagonal	36	0	0
TOTAL	734	1	0

Tabla IV-13: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso E-C5-P7

4.1.5.2 Columna F7

La Tabla IV-27 los porcentajes de elementos que fallaron a raíz de la explosión en los diferentes niveles para el eje mencionado.

		Porcentaje de elementos que fallan					
		Estructura Residual (E.R.)					
Nivel		1	2	3	4	5	6
3		0.14	0.68	5.86	16.49	41.83	-
5		0.14	0.27	0.95	1.77	8.72	27.79
7		0.14	0.27	-	-	-	-

Tabla IV-14: Propagación Global. Caso E-F7

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-22)

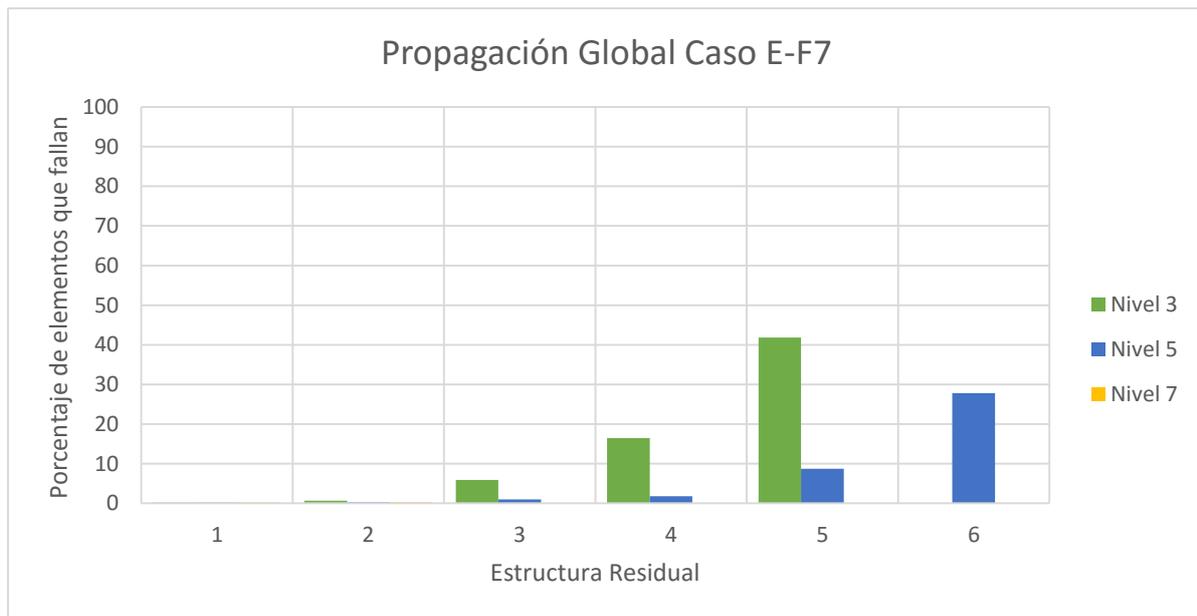


Figura IV-22: Propagación Global. Caso E-F7

Fuente: Elaboración propia

Se observó que las fallas en los niveles 3 y 5 inducían al colapso progresivo, ya que para la última estructura residual del nivel 3 y nivel 5, presentaban un 42 % y 28 % de sus elementos que fallaban. En cambio, en el nivel 7, la falla no se propagó, por lo tanto, se determinó que la falla fue local.

– **Análisis sobre los tipos de elementos**

Las Tablas IV-15, -16 y -17 muestran la cantidad de elementos que fallaron hasta la última Estructura Residual y los distingue según su tipo; así como el porcentaje que representan en relación al número total de tipo de elemento de toda la estructura.

Nivel 3			
Tipo de elemento	Total de elementos	Elementos que fallan	%
Columna Continua	84	0	0
Columna Discontinua	204	80	39
Viga Principal	203	103	51
Viga Secundaria	63	30	48
Arriostramientos	144	92	64
Viga Diagonal	36	1	3
TOTAL	734	306	42

Tabla IV-15: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso E-F7-P3

Nivel 5			
Tipo de elemento	Total de elementos	Elementos que fallan	%
Columna Continua	84	2	2
Columna Discontinua	204	37	18
Viga Principal	203	70	34
Viga Secundaria	63	3	5
Arriostramientos	144	89	62
Viga Diagonal	36	2	6
TOTAL	734	203	28

Tabla IV-16: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso E-F7-P5

Nivel 7			
Tipo de elemento	Total de elementos	Elementos que fallan	%
Columna Continua	84	1	1
Columna Discontinua	204	0	0
Viga Principal	203	0	0
Viga Secundaria	63	0	0
Arriostramientos	144	0	0
Viga Diagonal	36	0	0
TOTAL	734	1	0

Tabla IV-17: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso E-F7-P7

4.2 Incendio

4.2.1 Presentación de los casos

De igual forma que en los casos de Explosión, una serie de estudios preliminares en las simulaciones del Incendio en los distintos casos propuestos demostraron que el comportamiento del edificio era similar tanto en las zonas Z1 y Z3, como entre las zonas Z2 y Z4 (Ver Anexos). Se estima que sea debido a la simetría que se presenta entre ambas en cuanto a su ubicación en planta. Esta observación conllevó a la reducción de los casos propuestos para las simulaciones del Incendio, de 12 a 6 casos en total, solo los que corresponden a las zonas Z1 y Z2. A partir de esta consideración se asume que cualquier análisis que se realice para una zona, es válido para su zona equivalente en caso de ser necesario. Finalmente, los casos estudiados en las simulaciones de Incendio son:

INCENDIO (I) – Zona – Piso

I – Z1 – P3

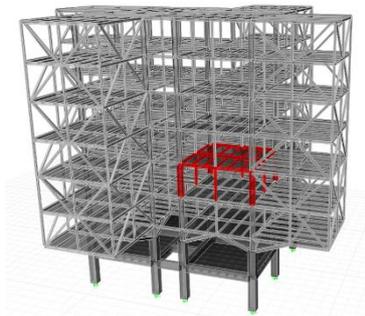
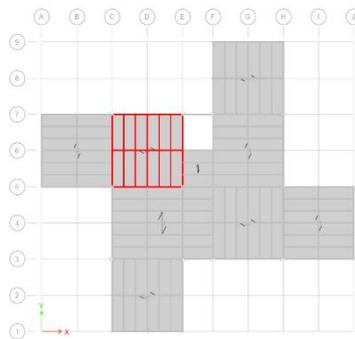


Figura IV-23: Caso I-Z1-P3

Fuente: Elaboración Propia

I – Z1 – P3

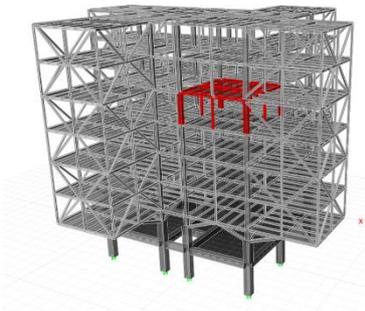
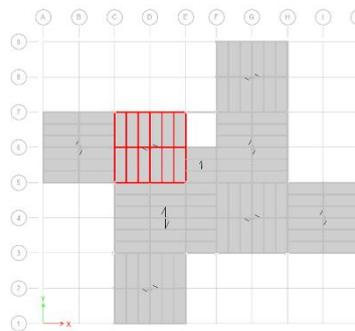
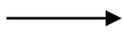


Figura IV-24: Caso I-Z1-P5

Fuente: Elaboración Propia

I – Z1 – P7

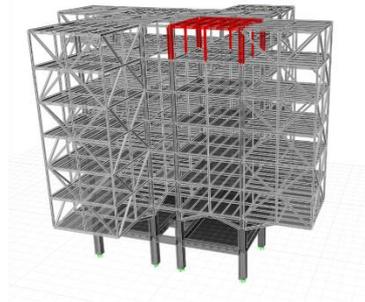
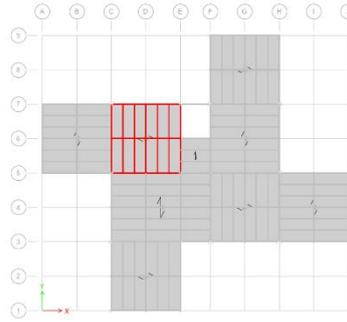
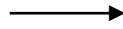


Figura IV-25: Caso I-Z1-P7

Fuente: Elaboración Propia

I – Z2 – P3

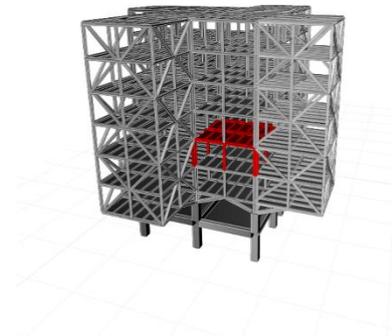
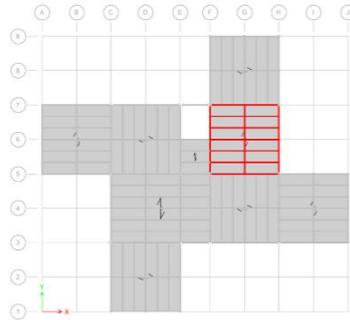


Figura IV-26: Caso I-Z2-P3

Fuente: Elaboración Propia

I – Z2 – P5

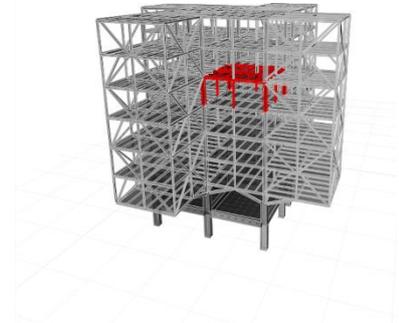
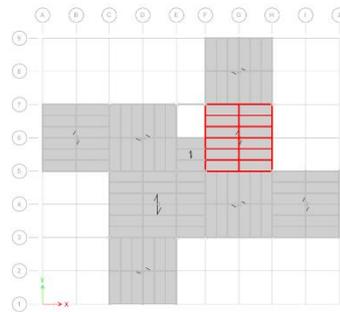


Figura IV-27: Caso I-Z2-P5

Fuente: Elaboración Propia

I – Z2 – P7

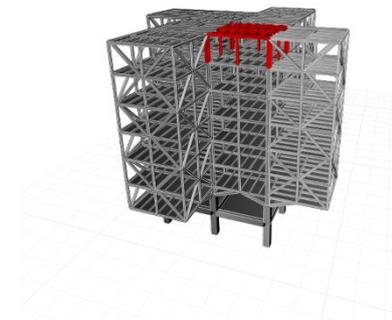
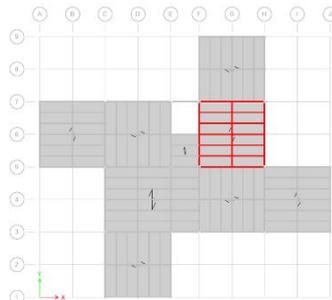


Figura IV-28: Caso I-Z2-P7

Fuente: Elaboración Propia

4.2.2 Niveles de Impacto

4.2.2.1 Zona 1

– Caso I-Z1-P3

Valor D/C

La Tabla IV-18 muestra los Valores de D/C de los elementos que fallaron a raíz del incendio a las distintas temperaturas del caso mencionado, así como su ubicación, tipo de miembro y, por último, el porcentaje (%) de incremento desde 21°C a 700°C.

Valor D/C									
#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	21°C	300°C	500°C	700°C	Incremento (%)
1	C	3	6	Columna Discontinua	0.684	0.715	0.865	2.152	146.80
2	D	3	5	Columna Discontinua	0.710	0.737	0.879	2.018	130.80
3	E	3	6	Columna Discontinua	0.589	0.611	0.727	1.636	104.70
4	6	4	C-E	Viga Secundaria	0.634	0.617	0.587	3.289	265.50

Tabla IV-18: Incremento de Valor D/C Caso I-Z1-P3

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-29).

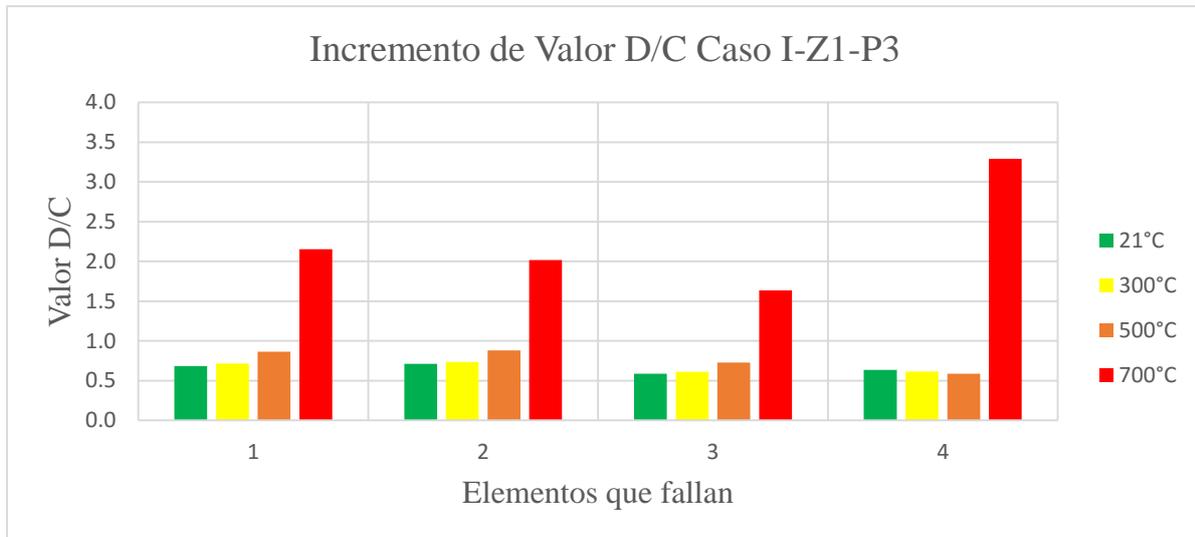


Figura IV-29: Incremento de Valor D/C Caso I-Z1-P3

Fuente: Elaboración propia

A partir del incendio en la zona 1, en el piso 3, se realizan las siguientes observaciones:

- N° de elementos que fallaron: 4
- Tipo de elementos que fallaron:
 - Tres (3) columnas discontinuas

- Una (1) viga secundaria
- Todas las fallas suceden por flexión.
- Promedio de incremento de Valor D/C (de 21°C a 700°C) según tipo de elemento:
 - Columnas Discontinuas: 128 %
 - Viga Secundaria: 266 %
- Comentarios:
 - La viga secundaria experimenta un decrecimiento en su Valor D/C a lo largo de las temperaturas de 300°C y 500°C.

Desplazamiento Vertical

La Tabla IV-19 muestra los desplazamientos verticales de los elementos que fallaron a raíz del incendio a las distintas temperaturas del caso mencionado, así como su ubicación, tipo de miembro y, por último, el porcentaje (%) de incremento desde 21°C a 700°C.

Desplazamientos Verticales (cm)									
#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	21°C	300°C	500°C	700°C	Incremento (%)
1	C	3	6	Columna Discontinua	1.128	1.131	1.137	1.082	-4.08
2	D	3	5	Columna Discontinua	1.019	1.021	1.022	0.940	-7.75
3	E	3	6	Columna Discontinua	0.965	0.969	0.974	0.898	-6.94
4	6	4	C-E	Viga Secundaria	3.427	3.650	4.258	12.427	262.62

Tabla IV-19: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z1-P3

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-30).

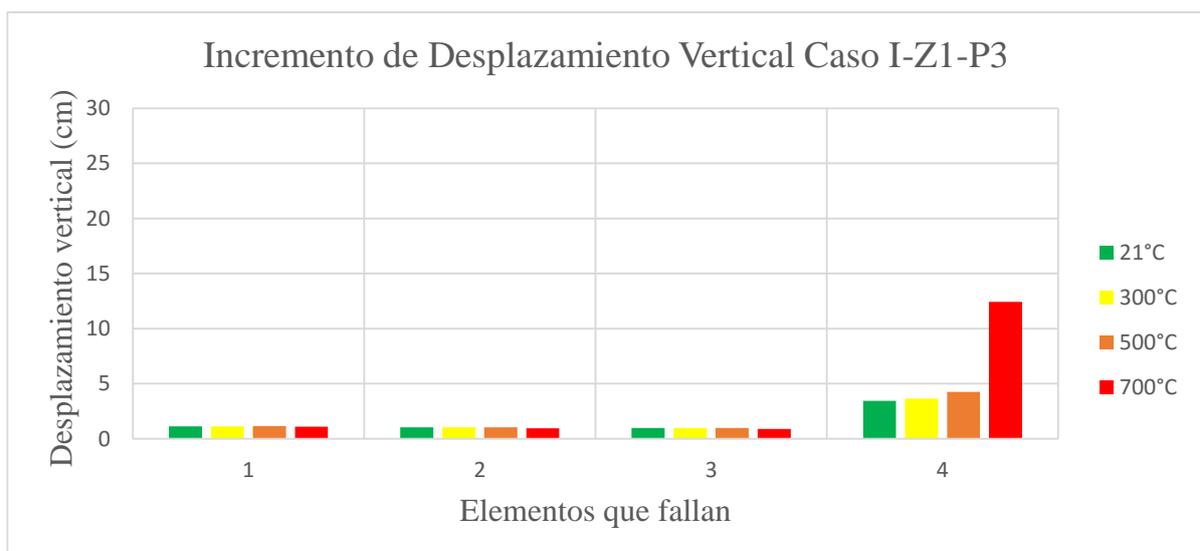


Figura IV-30: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z1-P3

Fuente: Elaboración propia

- Promedio de variación de Desplazamientos Verticales (de 21°C a 700°C) según tipo de elemento:
 - Columnas Discontinuas: 6 %
 - Viga Secundaria: 263%
- Comentarios:
 - Las columnas discontinuas no experimentan desplazamientos verticales considerables a lo largo de las temperaturas.
 - El aumento de la temperatura afecta principalmente a la viga secundaria, causando un desplazamiento de 12 cm a 700°C (Ver ANEXO N)

– **Caso I-Z1-P5**

Valor D/C

La Tabla IV-20 muestra los Valores de D/C de los elementos que fallaron a raíz del incendio a las distintas temperaturas del caso mencionado, así como su ubicación, tipo de miembro, y, por último, el porcentaje (%) de incremento desde 21°C a 700°C.

Valor D/C									
#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	21°C	300°C	500°C	700°C	Incremento (%)
1	C	5	6	Columna Discontinua	0.544	0.560	0.719	1.653	110.90
2	D	5	5	Columna Discontinua	0.574	0.632	0.738	1.519	94.50
3	E	5	6	Columna Discontinua	0.541	0.464	0.597	1.263	72.20
4	6	6	C-E	Viga Secundaria	0.634	0.613	0.584	3.287	265.30

Tabla IV-20: Incremento de Valor D/C Caso I-Z1-P5

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-31).

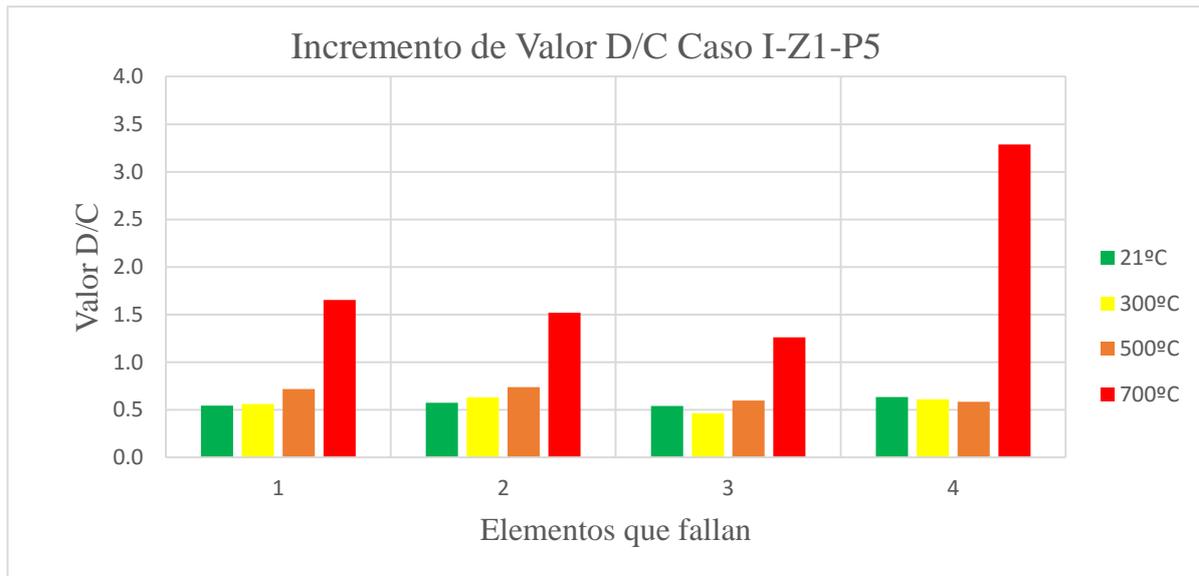


Figura IV-31: Incremento de Valor D/C Caso I-Z1-P5

Fuente: Elaboración propia

A partir del incendio en la zona 1, en el piso 5, se realizan las siguientes observaciones:

- N° de elementos que fallaron: 4
- Tipo de elementos que fallaron:
 - Tres (3) columnas discontinuas
 - Una (1) viga secundaria
- Todas las fallas suceden por flexión.
- Promedio de incremento de Valor D/C (de 21°C a 700°C) según tipo de elemento:
 - Columnas Discontinuas: 93 %
 - Viga Secundaria: 265 %
- Comentarios:
 - La viga secundaria experimenta un decrecimiento en su Valor D/C a lo largo de las temperaturas de 300°C y 500°C. Una de las Columnas Discontinuas (#3) experimenta un decrecimiento en su Valor D/C a 500°C de temperatura.

Desplazamiento Vertical

La Tabla IV-21 muestra los desplazamientos verticales de los elementos que fallaron a raíz del incendio a las distintas temperaturas del caso mencionado, así como su ubicación, tipo de miembro, y, por último, el porcentaje (%) de incremento desde 21°C a 700°C.

Desplazamientos Verticales									
#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	21°C	300°C	500°C	700°C	Incremento (%)
1	C	5	6	Columna Discontinua	1.353	1.361	1.375	1.384	2.29
2	D	5	5	Columna Discontinua	1.260	1.266	1.275	1.261	0.08
3	E	5	6	Columna Discontinua	1.170	1.178	1.193	1.192	1.88
4	6	6	C-E	Viga Secundaria	3.604	3.827	4.434	12.504	246.95

Tabla IV-21: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z1-P5

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-32).

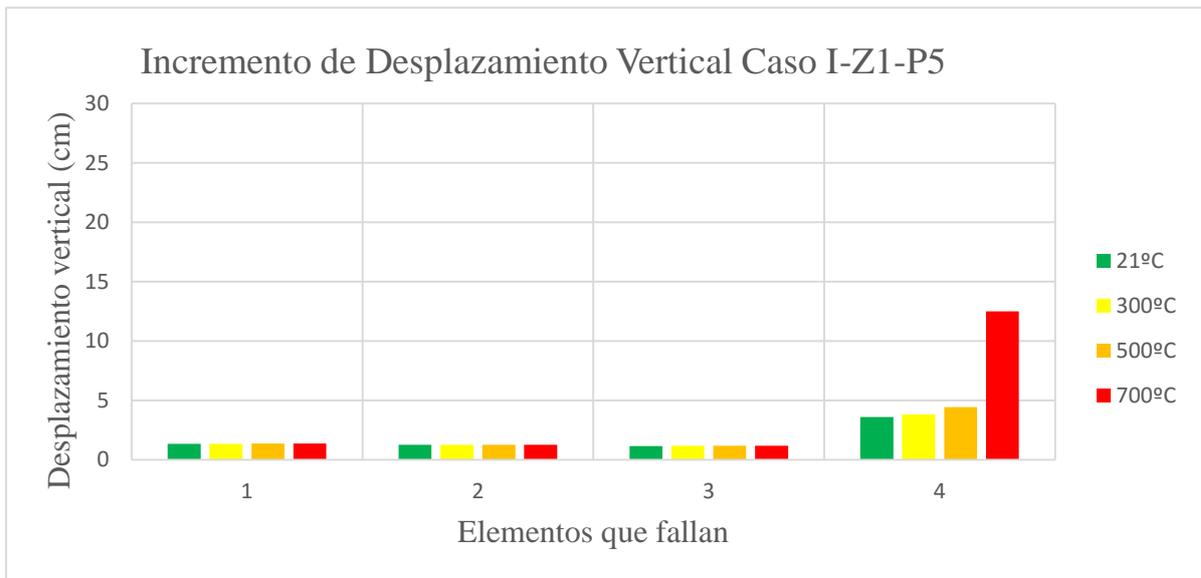


Figura IV-32: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z1-P5

Fuente: Elaboración propia

- Promedio de variación de Desplazamientos Verticales (de 21°C a 700°C) según tipo de elemento:
 - Columna Discontinuas: 1 %
 - Viga Secundaria: 247%
- Comentarios:
 - Las columnas discontinuas no experimentan desplazamientos verticales considerables a lo largo de las temperaturas.

- El aumento de la temperatura afecta principalmente a la viga secundaria, causando un desplazamiento de 12 cm a 700°C. (Ver ANEXO O)

– **Caso I-Z1-P7**

Valor D/C

La Tabla IV-22 muestra los Valores de D/C de los elementos que fallaron a raíz del incendio a las distintas temperaturas del caso mencionado, así como su ubicación, tipo de miembro, y, por último, el porcentaje (%) de incremento desde 21°C a 700°C.

Valor D/C									
#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	21°C	300°C	500°C	700°C	Incremento (%)
1	C	7	6	Columna Discontinua	0.571	0.606	0.761	2.509	193.80
2	D	7	5	Columna Discontinua	0.640	0.651	0.732	1.169	52.90
3	E	7	6	Columna Discontinua	0.441	0.449	0.509	1.156	71.50
4	6	8	C-E	Viga Secundaria	0.672	0.712	0.611	3.933	326.10

Tabla IV-22: Incremento de Valor D/C Caso I-Z1-P7

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-33).

A partir del incendio en la zona 1, en el piso 7, se realizan las siguientes observaciones:

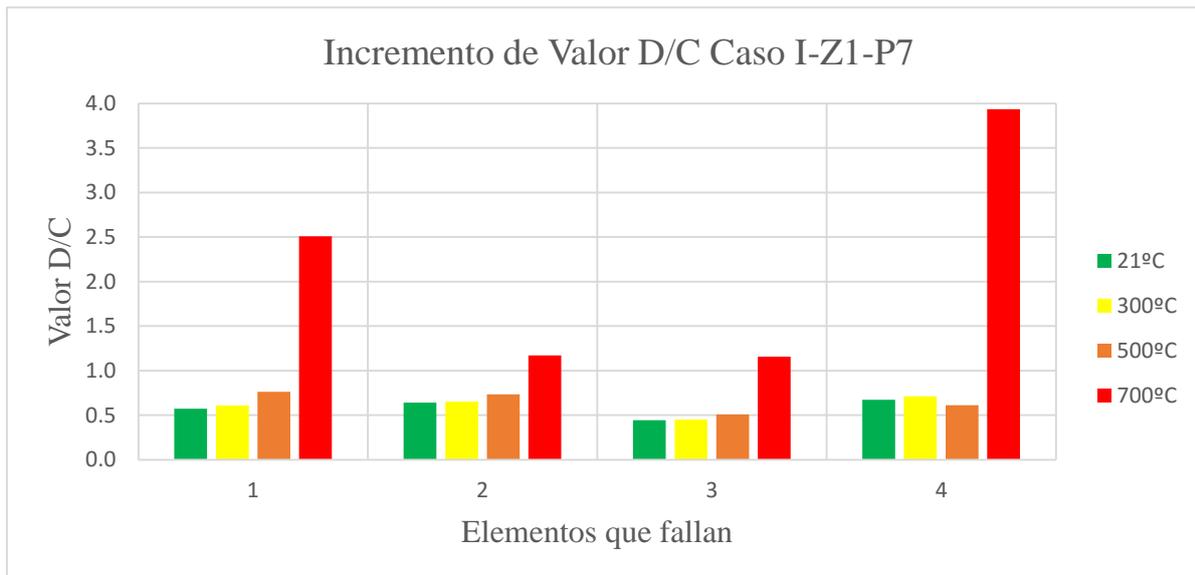


Figura IV-33: Incremento de Valor D/C Caso I-Z1-P7

Fuente: Elaboración propia

- N° de elementos que fallaron: 4

- Tipo de elementos que fallaron:
 - Tres (3) columnas discontinuas
 - Una (1) viga secundaria
- Todas las fallas suceden por flexión.
- Promedio de incremento de Valor D/C (de 21°C a 700°C) según tipo de elemento:
 - Columna Discontinuas: 111%
 - Viga Secundaria: 326 %
- Comentarios
 - La viga secundaria experimenta un decrecimiento en su Valor D/C a 500°C de temperatura.

Desplazamiento Vertical

La Tabla IV-23 muestra los Valores de D/C de los elementos que fallaron a raíz del incendio a las distintas temperaturas del caso mencionado, así como su ubicación, tipo de miembro, y, por último, el porcentaje (%) de incremento desde 21°C a 700°C.

Desplazamientos Verticales									
#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	21°C	300°C	500°C	700°C	Incremento (%)
1	C	7	6	Columna Discontinua	1.476	1.486	1.506	1.565	6.03
2	D	7	5	Columna Discontinua	1.372	1.399	1.416	1.459	6.34
3	E	7	6	Columna Discontinua	1.284	1.297	1.325	1.425	10.98
4	6	8	C-E	Viga Secundaria	4.149	4.436	5.227	16.859	306.34

Tabla IV-23: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z1-P7

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica (Figura IV-34).

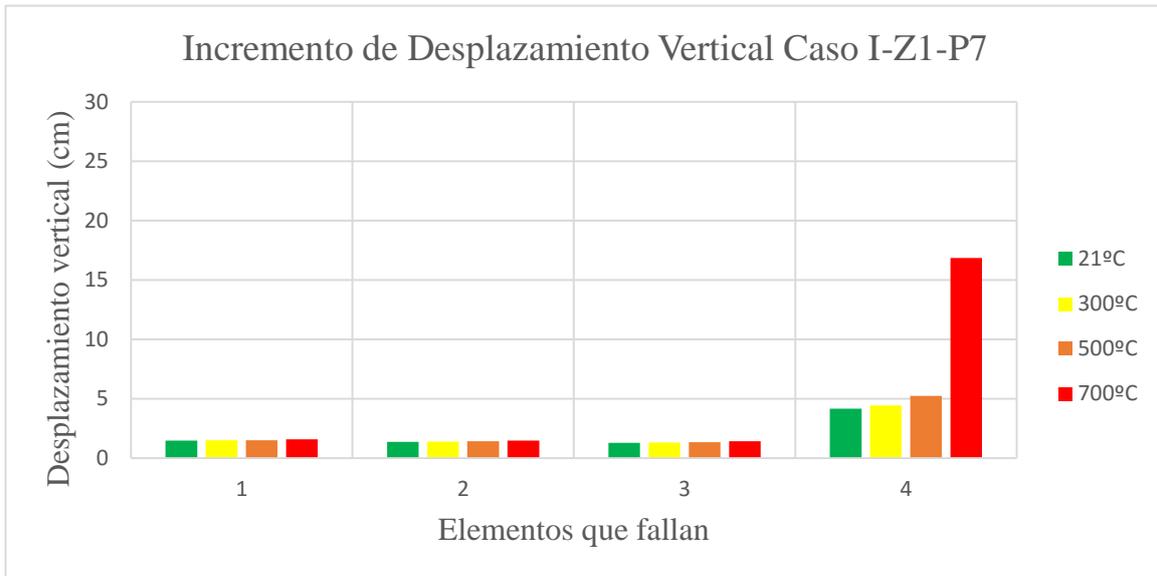


Figura IV-34: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z1-P7

Fuente: Elaboración propia

- Promedio de variación de Desplazamientos Verticales (de 21°C a 700°C) según tipo de elemento:
 - Columna Discontinuas: 8 %
 - Viga Secundaria: 306%
- Comentarios:
 - Las columnas discontinuas no experimentan desplazamientos verticales considerables a lo largo de las temperaturas.
 - El aumento de la temperatura afecta principalmente a la viga secundaria, causando un desplazamiento de 17 cm a 700°C. (Ver ANEXO P)

4.2.2.2 Zona 2

– Caso I-Z2-P3

Valor D/C

La Tabla IV-24 muestra los Valores de D/C de los elementos que fallaron a raíz del incendio a las distintas temperaturas del caso mencionado, así como su ubicación, tipo de miembro, y, por último, el porcentaje (%) de incremento desde 21°C a 700°C.

Valor D/C									
#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	21°C	300°C	500°C	700°C	Incremento (%)
1	G	3	5	Columna Discontinua	0.709	0.743	0.906	2.259	155.00
2	G	3	7	Columna Discontinua	0.712	0.690	0.906	2.206	149.40
3	G	4	5-7	Viga Secundaria	0.650	0.467	0.627	2.923	227.30

Tabla IV-24: Incremento de Valor D/C Caso I-Z2-P3

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica (Figura IV-35)

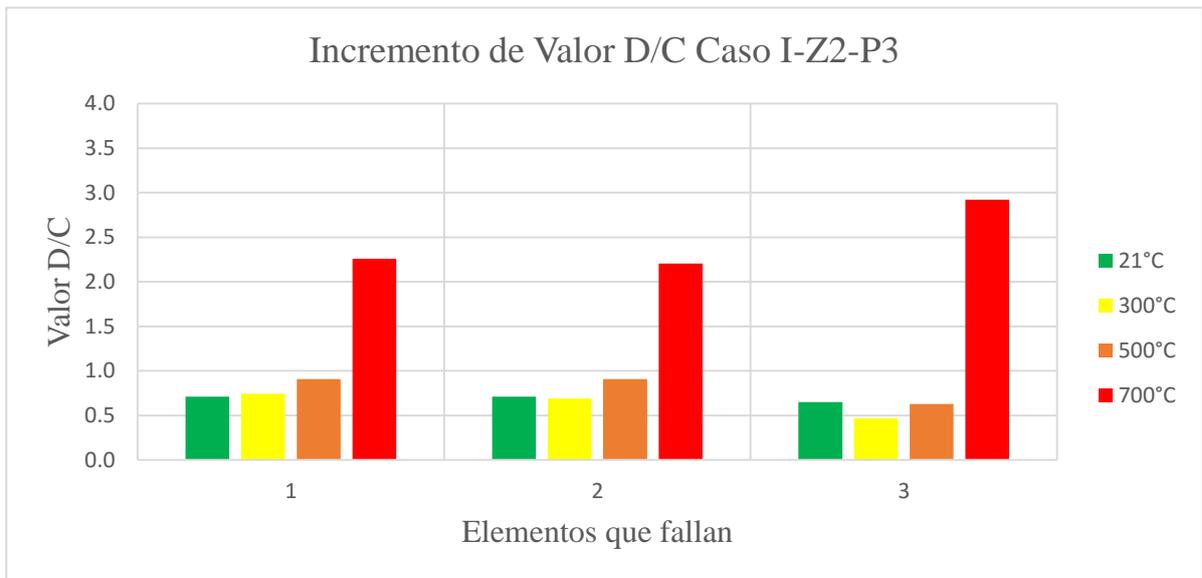


Figura IV-35: Incremento de Valor D/C Caso I-Z2-P3

Fuente: Elaboración propia

A partir del incendio en la zona 2, en el piso 3, se realizan las siguientes observaciones:

- N° de elementos que fallaron: 3
 - Tipo de elementos que fallaron:
 - Tres (2) columnas discontinuas
 - Una (1) viga secundaria

- Todas las fallas suceden por flexión.
- Promedio de incremento de Valor D/C (de 21°C a 700°C) según tipo de elemento:
 - Columna Discontinuas: 152 %
 - Viga Secundaria: 227 %
- Comentarios
 - La viga secundaria experimenta un decrecimiento en su Valor D/C a lo largo de las temperaturas de 300°C y 500°C.

Desplazamiento Vertical

La Tabla IV-25 muestra los Valores de D/C de los elementos que fallaron a raíz del incendio a las distintas temperaturas del caso mencionado, así como su ubicación, tipo de miembro, y, por último, el porcentaje (%) de incremento desde 21°C a 700°C.

Desplazamientos Verticales									
#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	21°C	300°C	500°C	700°C	Incremento (%)
1	G	3	5	Columna Discontinua	1.019	1.022	1.025	0.950	-6.77
2	G	3	7	Columna Discontinua	1.082	1.086	1.091	1.035	-4.34
3	G	4	5-7	Viga Secundaria	3.662	3.923	4.631	13.50	268.73

Tabla IV-25: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z2-P3

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-36)

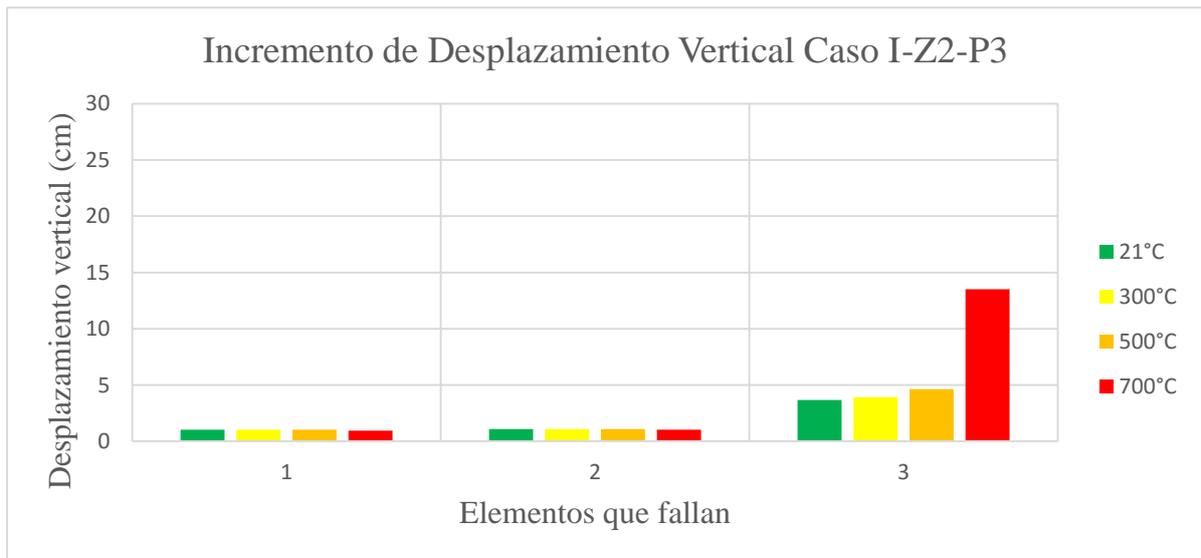


Figura IV-36: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z2-P3

Fuente: Elaboración propia

- Promedio de variación de Desplazamientos Verticales (de 21°C a 700°C) según tipo de elemento:
 - Columna Discontinuas: 6 %
 - Viga Secundaria: 269%
- Comentarios:
 - Las Columnas Discontinuas experimentan menores variaciones en sus desplazamientos verticales que la viga Secundaria, a lo largo de todas las temperaturas.
 - El aumento de la temperatura afecta principalmente a la viga secundaria, causando un desplazamiento de 14 cm a 700°C.

– **Caso I-Z2-P5**

Valor D/C

La Tabla IV-26 muestra los Valores de D/C de los elementos que fallaron a raíz del incendio a las distintas temperaturas del caso mencionado, así como su ubicación, tipo de miembro, y, por último, el porcentaje (%) de incremento desde 21°C a 700°C.

Valor D/C									
#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	21°C	300°C	500°C	700°C	Incremento (%)
1	G	5	5	Columna Discontinua	0.568	0.634	0.763	1.744	117.60
2	G	5	7	Columna Discontinua	0.581	0.600	0.768	1.718	113.70
3	G	6	5-7	Viga Secundaria	0.650	0.690	0.627	2.914	226.40

Tabla IV-26: Incremento de Valor D/C Caso I-Z2-P5

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-37)

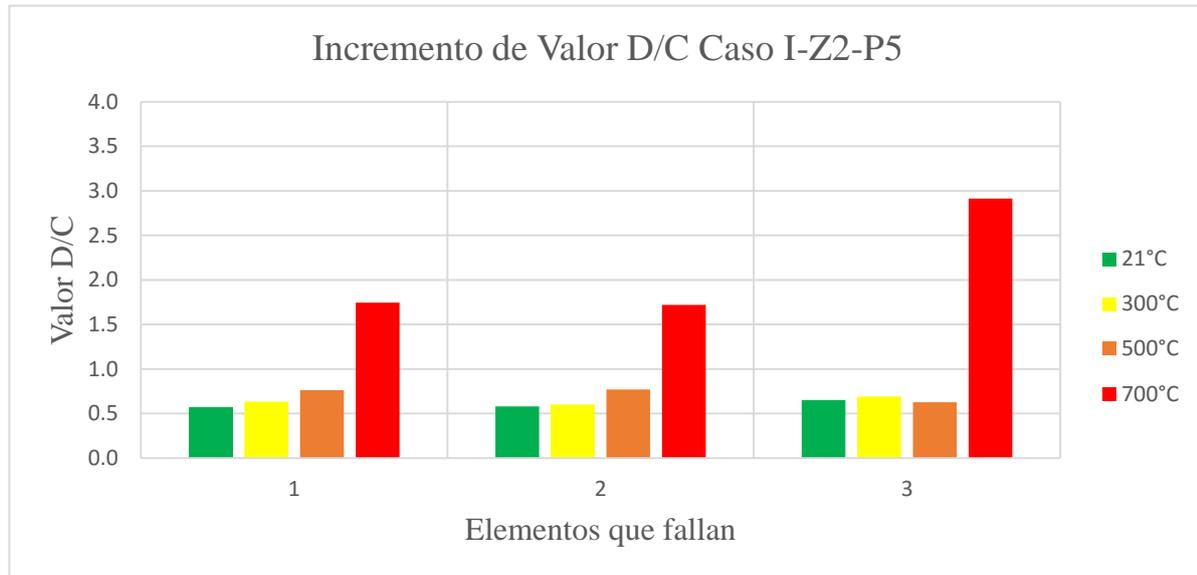


Figura IV-37: Incremento de Valor D/C Caso I-Z2-P5

Fuente: Elaboración propia

A partir del incendio en la zona 2, en el nivel 5, se realizan las siguientes observaciones:

- N° de elementos que fallaron: 3
- Tipo de elementos que fallaron:
 - Tres (2) columnas discontinuas
 - Una (1) viga secundaria
- Todas las fallas suceden por flexión.
- Promedio de incremento de Valor D/C (de 21°C a 700°C) según tipo de elemento:
 - Columna Discontinuas: 152 %
 - Viga Secundaria: 227 %
- Comentarios:
 - La viga secundaria experimenta un decrecimiento en su Valor D/C a lo largo de las temperaturas de 300°C y 500°C.

Desplazamiento Vertical

La Tabla IV-27 muestra los Valores de D/C de los elementos que fallaron a raíz del incendio a las distintas temperaturas del caso mencionado, así como su ubicación, tipo de miembro, y, por último, el porcentaje (%) de incremento desde 21°C a 700°C.

Desplazamientos Verticales									
#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	21°C	300°C	500°C	700°C	Incremento (%)
1	G	5	5	Columna Discontinua	1.260	1.266	1.278	1.274	1.11
2	G	5	7	Columna Discontinua	1.312	1.320	1.334	1.337	1.91
3	G	6	5-7	Viga Secundaria	3.843	4.104	4.811	13.590	253.63

Tabla IV-27: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z2-P5

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-38)

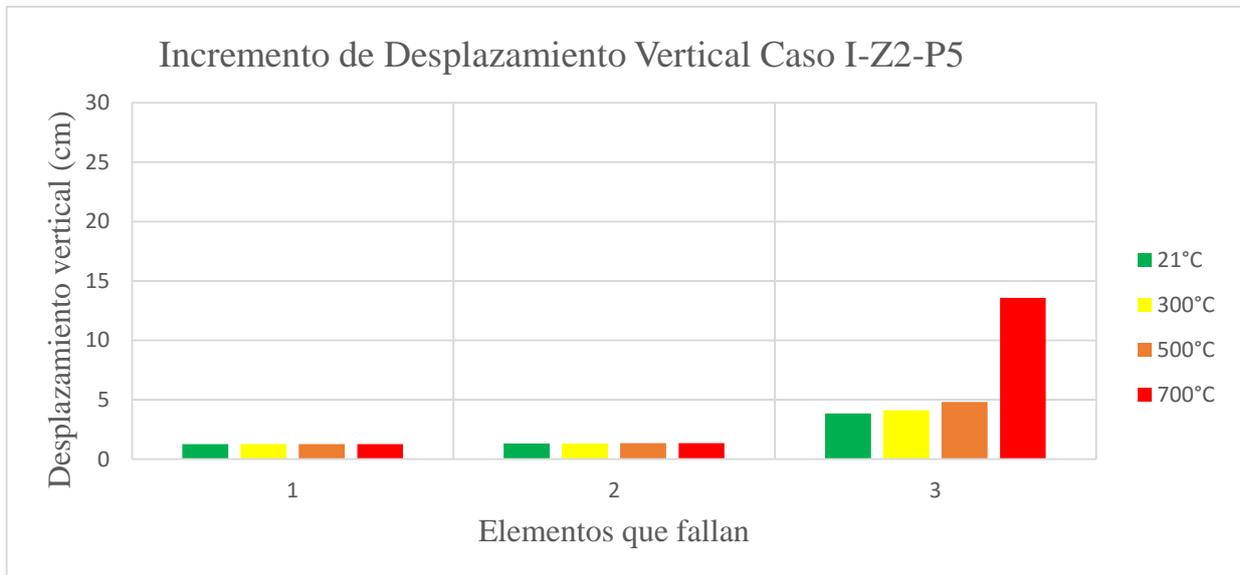


Figura IV-38: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z2-P5

Fuente: Elaboración propia

- Promedio de variación de Desplazamientos Verticales (de 21°C a 700°C) según tipo de elemento:
 - Columnas discontinuas: 2 %
 - Viga secundaria: 254%
- Comentarios:

- Las columnas discontinuas experimentan menores variaciones en sus desplazamientos verticales que la viga secundaria, a lo largo de todas las temperaturas.
- El aumento de la temperatura afecta principalmente a la viga secundaria, causando un desplazamiento de 14 cm a 700°C.

– **Caso I-Z2-P7**

Valor D/C

La Tabla IV-28 muestra los Valores de D/C de los elementos que fallaron a raíz del incendio a las distintas temperaturas del caso mencionado, así como su ubicación, tipo de miembro, y, por último, el porcentaje (%) de incremento desde 21°C a 700°C.

Valor D/C									
#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	21°C	300°C	500°C	700°C	Incremento (%)
1	G	7	5	Columna Discontinua	0.641	0.688	0.889	3.301	266.00
2	G	7	7	Columna Discontinua	0.656	0.704	0.904	3.309	265.30
3	G	8	5-7	Viga Secundaria	0.722	0.769	0.709	3.674	295.20

Tabla IV-28: Incremento de Valor D/C Caso I-Z2-P7

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-39).

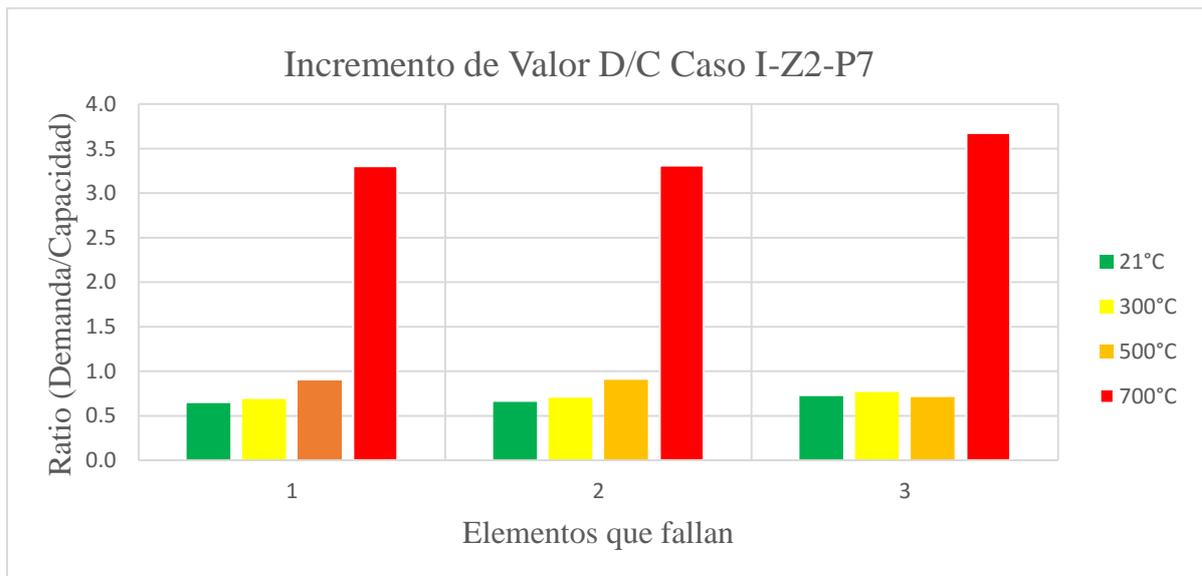


Figura IV-39: Incremento de Valor D/C Caso I-Z2-P7

Fuente: Elaboración propia

A partir del incendio en la zona 2, en el nivel 7, se realizan las siguientes observaciones:

- N° de elementos que fallaron: 3
- Tipo de elementos que fallaron:
 - Tres (2) columnas discontinuas
 - Una (1) viga secundaria
- Todas las fallas suceden por flexión.
- Promedio de incremento de Valor D/C (de 21°C a 700°C) según tipo de elemento:
 - Columna Discontinuas: 266 %
 - Viga Secundaria: 295 %
- Comentarios:
 - La viga secundaria experimenta un decrecimiento en su Valor D/C a 500°C de temperatura.

Desplazamiento Vertical

La Tabla IV-29 muestra los Valores de D/C de los elementos que fallaron a raíz del incendio a las distintas temperaturas del caso mencionado, así como su ubicación, tipo de miembro, y, por último, el porcentaje (%) de incremento desde 21°C a 700°C.

Desplazamientos Verticales									
#	Pórtico	Nivel	Ejes	Miembro	21°C	300°C	500°C	700°C	Incremento (%)
1	G	7	5	Columna Discontinua	1.390	1.400	1.421	1.483	6.69
2	G	7	7	Columna Discontinua	1.439	1.450	1.472	1.539	6.95
3	G	8	5-7	Viga Secundaria	4.809	5.218	6.384	25.576	431.84

Tabla IV-29: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z2-P7

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-40).

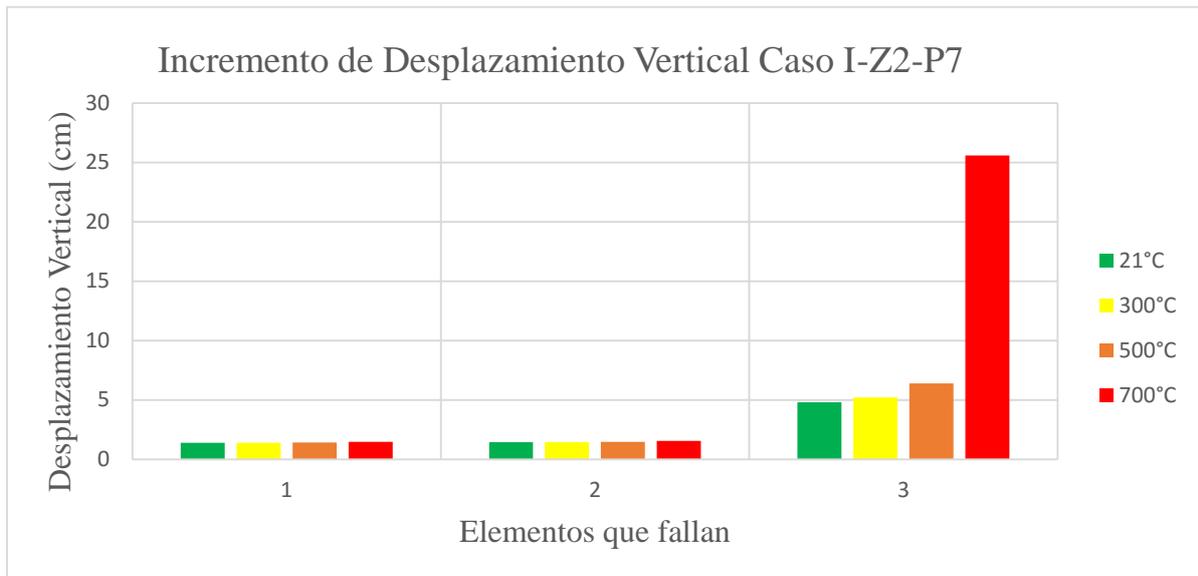


Figura IV-40: Incremento de Desplazamiento Vertical Caso I-Z2-P7

Fuente: Elaboración propia

- Promedio de variación de Desplazamientos Verticales (de 21°C a 700°C) según tipo de elemento:
 - Columna Discontinuas: 7 %
 - Viga Secundaria: 432%
- Comentarios:
 - Las Columnas Discontinuas experimentan menores variaciones en sus desplazamientos verticales que la viga Secundaria, a lo largo de todas las temperaturas.
 - El aumento de la temperatura afecta principalmente a la viga secundaria, causando un desplazamiento de 26 cm a 700°C.

4.2.3 Propagación Vertical de Falla

4.2.3.1 Zona 1

– Caso I-Z1-P3

La Tabla IV-30 muestra el porcentaje de los elementos que fallaron a raíz del incendio en el caso mencionado.

Nivel	Porcentaje de elementos que fallan						
	Estructura Residual (E.R.)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	6.25	20.83
2	0	1.85	3.70	7.41	8.33	31.48	68.52
3	3.70	6.48	8.33	12.96	13.89	28.70	61.11
4	0	1.85	5.56	11.11	12.96	19.44	48.15
5	0	0	4.63	12.04	15.74	23.15	52.78
6	0	0	5.56	9.26	13.89	21.30	50.93
7	0	0	5.56	9.26	9.26	14.81	43.52
8	0	0.93	1.85	4.63	4.63	5.56	15.74
Promedio	0.46	1.39	4.40	8.33	9.84	18.84	45.20

Tabla IV-30: Propagación Vertical Caso I-Z1-P3

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-41).

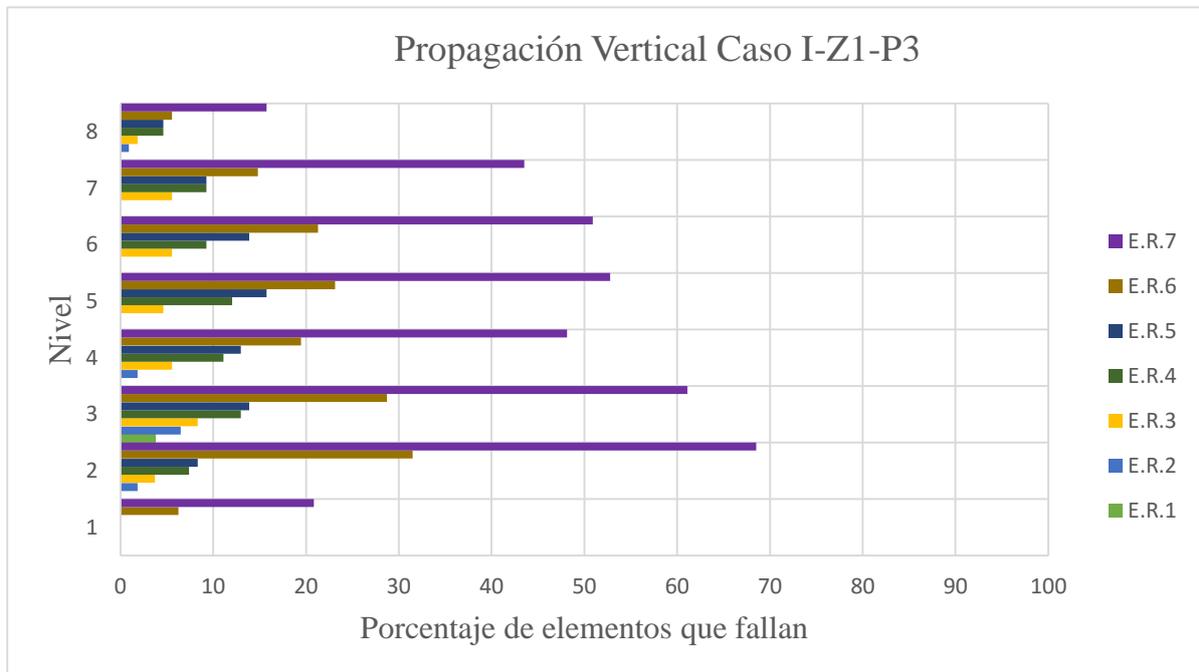


Figura IV-41: Propagación Vertical Caso I-Z1-P3

Fuente: Elaboración propia

Luego del incendio en la Zona 1 Nivel 3, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Primera Estructura Residual: Se observa que el único nivel con elementos que fallan es el tercer nivel.
- Segunda Estructura Residual: Se empieza a propagar la falla al segundo, cuarto y octavo nivel.
- Tercera Estructura Residual: La falla se propaga en todos los niveles excepto en el primer nivel. El tercer nivel sigue siendo el más afectado con mayor porcentaje (8%) de elementos que fallan.
- Cuarta Estructura Residual: Se incrementa el % de elementos que fallan al caso anterior. El incremento fue de un 4% de promedio en los niveles de 2 al 8.
- Quinta Estructura Residual: Se sigue incrementando el porcentaje de elementos que fallan con respecto al caso anterior, dicho incremento fue de 2 % en promedio de los niveles del 2 al 8.
- Sexta Estructura Residual: Se comienzan a ver elementos que fallan en el primer nivel, con un 6 % de sus elementos que fallan. Se incrementa a un 10 % de elementos que fallan con respecto al caso anterior.
- Séptima Estructura Residual: Se incrementa un 26 % de elementos que fallan con respecto al caso anterior. El segundo nivel es el más afectado con 68 % de sus elementos que fallan.
- Octava Estructura Residual: Se incrementa un 20 % al caso anterior. Los niveles del 2 al 7 sobrepasan el 60 % de los elementos que fallan. El primer y octavo nivel se encuentran entre un 20 y 30 % de elementos que fallan. El promedio de los elementos que fallan todos los niveles es de 66 %.
- Comentarios:
 - El segundo nivel es el que contiene mayor porcentaje de elementos que fallan, prácticamente todos sus elementos fallan. (97 %).

Las imágenes a continuación muestran la secuencia de la progresividad de la falla cuando el incendio ocurre en el caso descrito anteriormente. (Ver Figura IV-42)

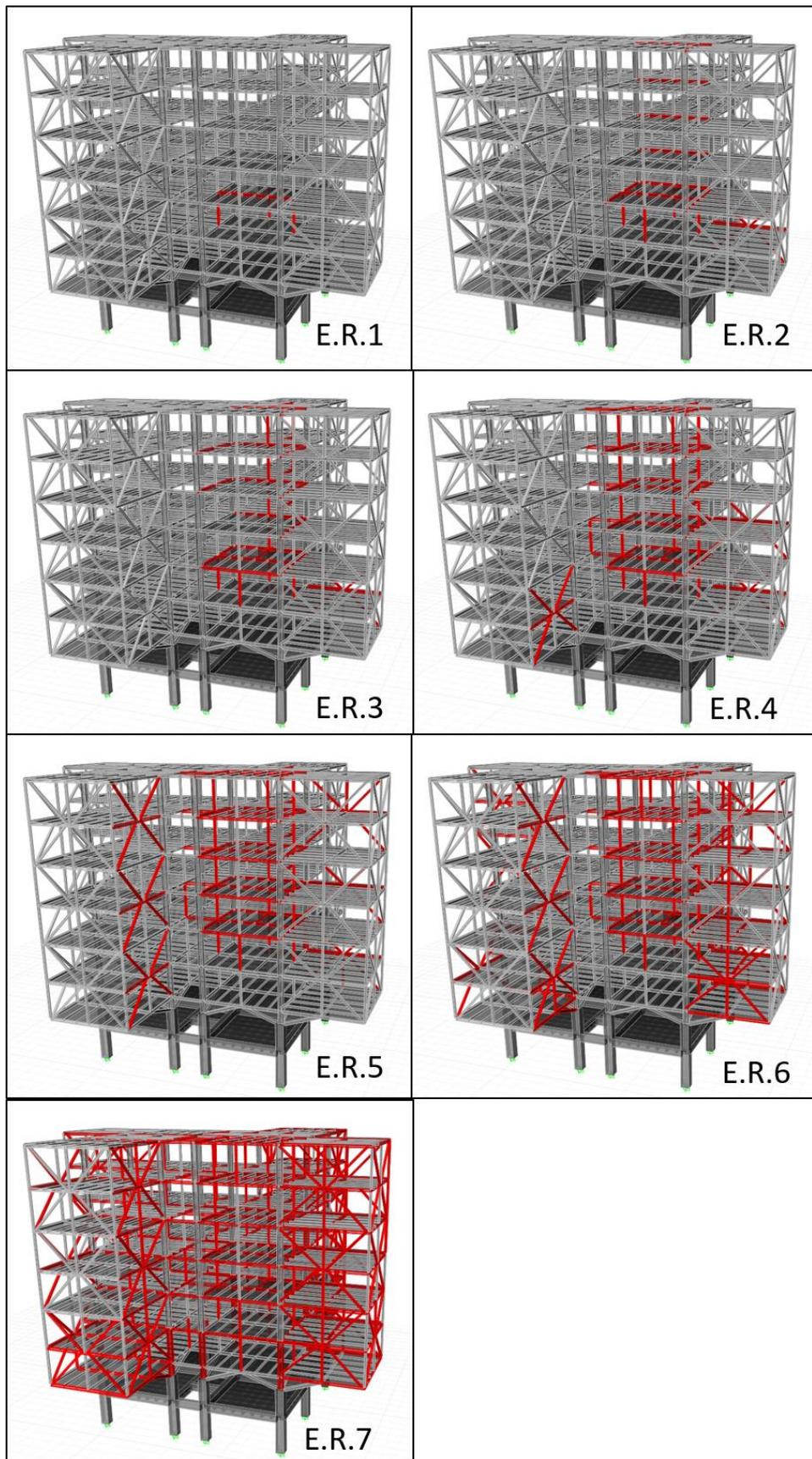


Figura IV-42: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso I-Z1-P3

Fuente: Elaboración propia

– **Caso I-Z1-P5**

La Tabla IV-31 muestra el porcentaje de los elementos que fallaron a raíz del incendio en el caso mencionado.

		Porcentaje de elementos que fallan					
		Estructura Residual (E.R.)					
Nivel		1	2	3	4	5	6
1		0	0	3.70	3.70	5.79	12.04
2		0	1.85	4.63	7.41	22.22	38.89
3		0	2.78	4.63	5.56	15.74	35.19
4		0	0	3.70	5.56	10.19	37.96
5		2.78	3.70	11.11	13.89	18.52	47.22
6		0.93	3.70	10.19	13.89	15.74	44.44
7		0	2.78	6.48	13.89	13.89	39.81
8		0	1.85	1.85	2.78	2.78	13.89
Promedio		0.46	2.08	5.79	8.33	13.11	33.68

Tabla IV-31: Propagación Vertical Caso I-Z1-P5

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica (Figura IV-43).

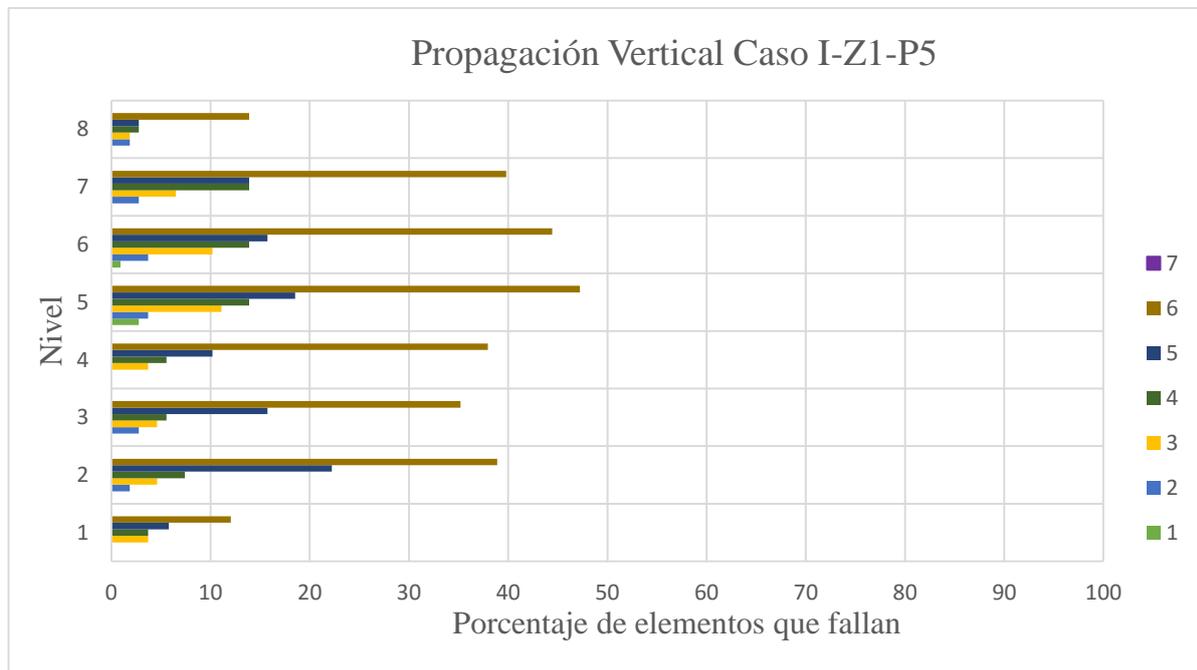


Figura IV-43: Propagación Vertical Caso I-Z1-P5

Fuente: Elaboración propia

Luego del incendio en la Zona 1 Nivel 5, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Primera Estructura Residual: Se observa que el único nivel con elementos que fallan es el quinto nivel.
- Segunda Estructura Residual: Se empieza a propagar la falla al segundo, cuarto, sexto y séptimo nivel.
- Tercera Estructura Residual: La falla se propaga en todos los niveles. Sigue siendo el quinto nivel el más afectado con % de elementos que fallan.
- Cuarta Estructura Residual: Los niveles 5,6 y 7 tienen el mismo porcentaje (14 %) de elementos que fallan.
- Quinta Estructura Residual: Se sigue incrementando el porcentaje de elementos que fallan con respecto al caso anterior, dicho incremento fue de 2 % en promedio de todos los niveles.
- Sexta Estructura Residual: Los niveles del 2 al 7 superan el 30 % de elementos que fallan para cada nivel. Se incrementa un 21 % del caso anterior en promedio de todos los niveles.
- Séptima Estructura Residual: Se incrementa un 26 % de elementos que fallan con respecto al caso anterior. El quinto nivel es el más afectado con 77 % de sus elementos que fallan. El promedio de porcentaje de elementos de dicha estructura residual es de 60 %

Las imágenes a continuación muestran la secuencia de la progresividad de la falla cuando el incendio ocurre en el caso descrito anteriormente. (Ver Figura IV-44)

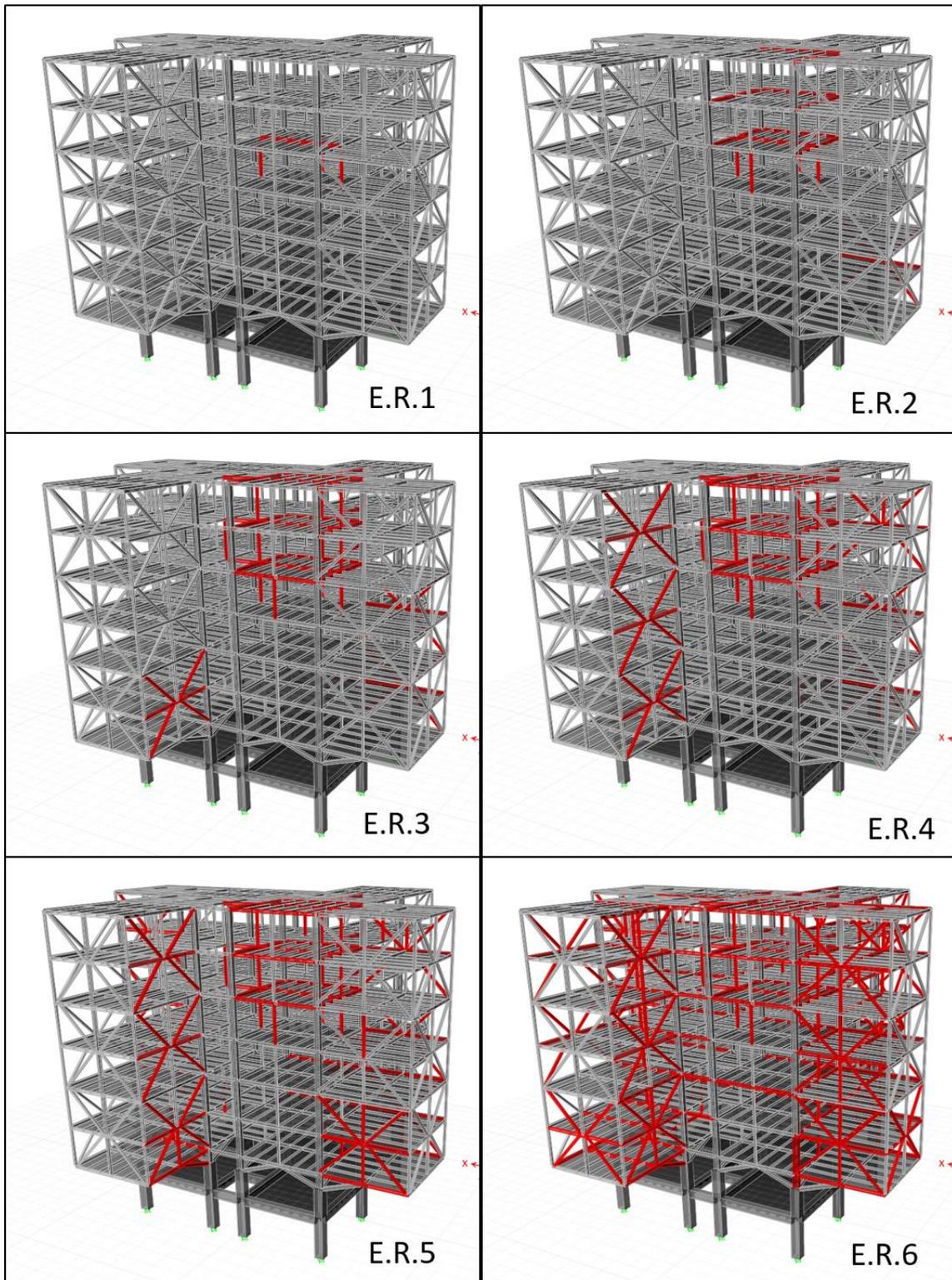


Figura IV-44: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso I-Z1-P5

Fuente: Elaboración propia

– **Caso I-Z1-P7**

La Tabla IV-32 muestra el porcentaje de los elementos que fallaron a raíz del incendio en el caso mencionado.

Nivel	Porcentaje de elementos que fallan	
	Estructura Residual (E.R.)	
	1	2
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	3.70	3.70
8	0	0
Promedio	0.46	0.46

Tabla IV-32: Propagación Vertical Caso I-Z1-P7

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-45).

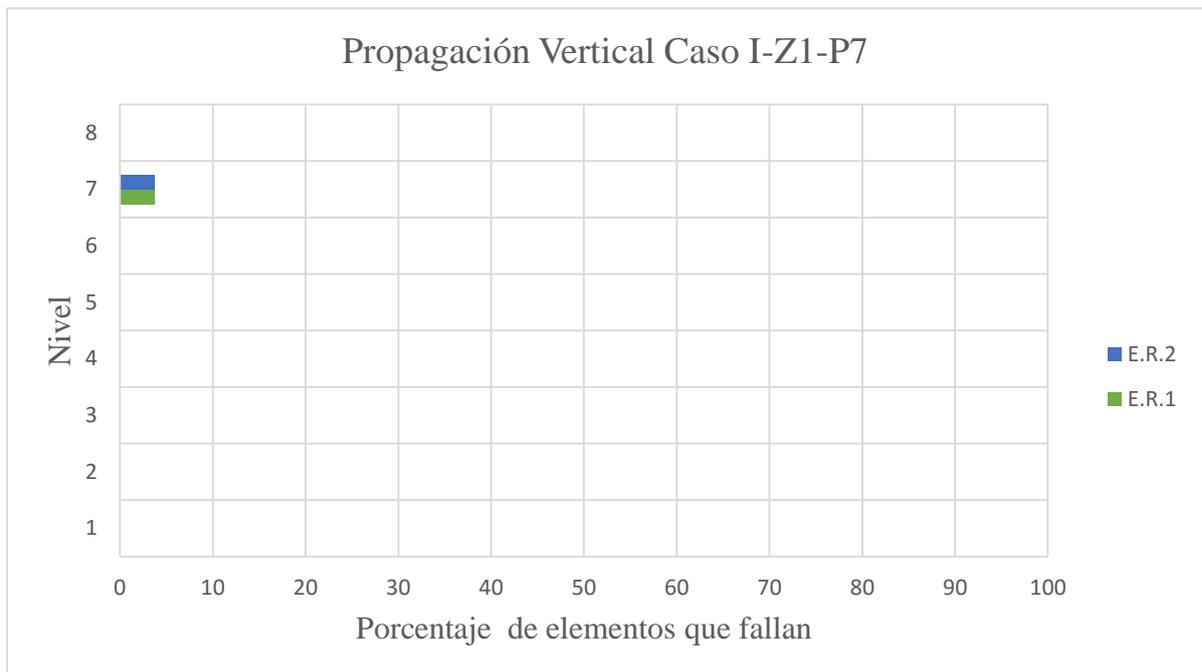


Figura IV-45: Propagación Vertical Caso I-Z1-P7

Fuente: Elaboración propia

Luego del incendio en la Zona 1 Nivel 7, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Primera Estructura Residual: Se observa que el único nivel con elementos que fallan es el séptimo nivel.
- Segunda Estructura Residual: No se observa propagación de la falla en ningún otro nivel.
- Comentarios:
 - Nivel 7 posee 1 % de sus elementos que fallan
 - Se determina que es una falla local.

Las imágenes a continuación muestran la secuencia de la progresividad de la falla cuando la explosión ocurre en el caso descrito anteriormente. (Ver Figura IV-46)

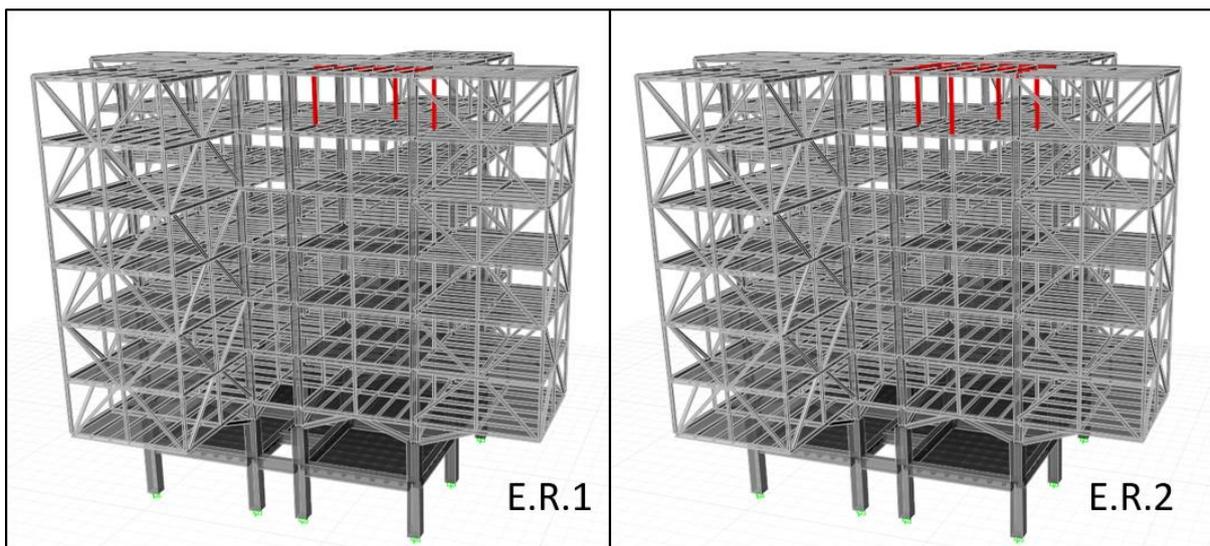


Figura IV-46: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso I-Z1-P7

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.2 Zona 2

– Caso I-Z2-P3

La Tabla IV-33 muestra el porcentaje de los elementos que fallaron a raíz del incendio en el caso mencionado.

Porcentaje (%) de elementos que fallan					
Estructura Residual (E.R.)					
Nivel	1	2	3	4	5
1	0	0	0	4.17	33.33
2	0	2.78	5.56	13.89	64.81
3	1.85	6.48	11.11	16.67	58.33
4	0.93	3.70	5.56	14.81	54.63
5	0	1.85	5.56	20.37	58.33
6	0	1.85	3.70	14.81	59.26
7	0	1.85	6.48	19.44	62.96
8	0	1.85	3.70	4.63	19.44
Promedio	0.35	2.55	5.21	13.60	51.39

Tabla IV-33: Propagación Vertical Caso I-Z2-P3

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-47).

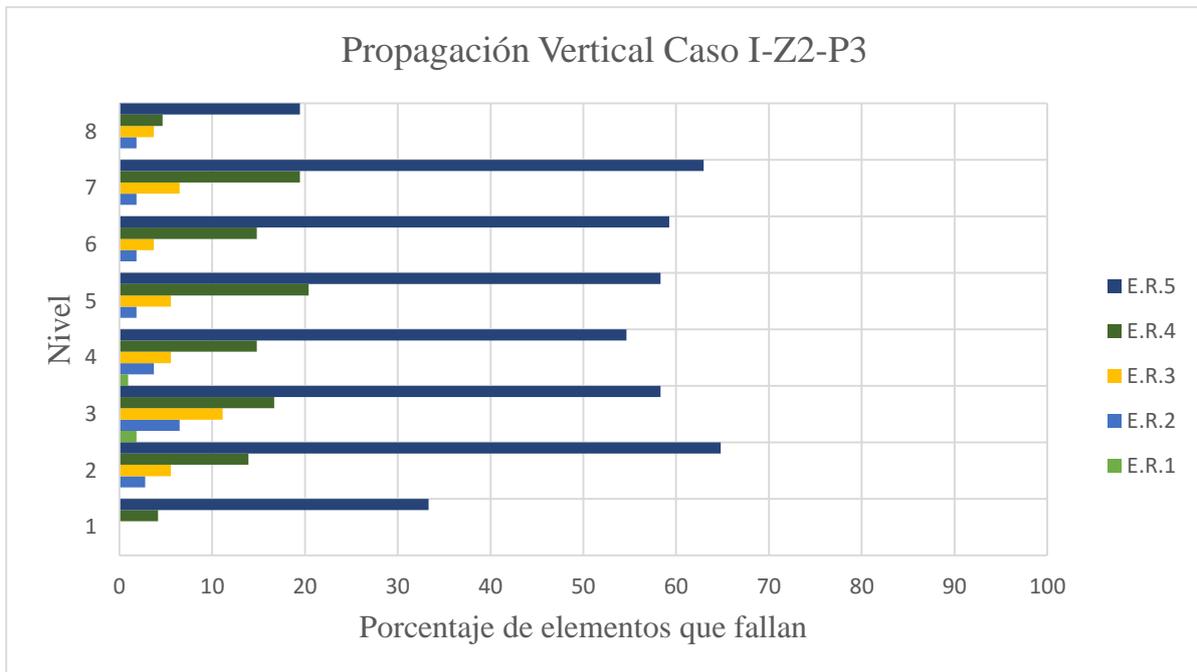


Figura IV-47: Propagación Vertical Caso I-Z2-P3

Fuente: Elaboración propia

Luego del incendio en la Zona 2 Nivel 3, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Primera Estructura Residual: Se observa que los niveles 3 y 4 tienen fallas menores del 5% de sus elementos.
- Segunda Estructura Residual: Se propaga la falla a todos los niveles excepto al primer nivel. Todos los porcentajes menores al 10% de falla de sus elementos. Se puede decir que la falla pasa de ser a una falla loca, a una falla global.
- Tercera Estructura Residual: Se incrementa la falla en los mismos niveles que en el caso anterior, solamente el tercer nivel supera el 10% de sus elementos que fallan.
- Cuarta Estructura Residual: Empieza a fallar el primer nivel, con 5% de sus elementos que fallan, este mismo porcentaje sucede al primer nivel. Los demás niveles superan el 13 % de sus elementos que fallan.
- Quinta Estructura Residual: Se sigue incrementando el porcentaje de elementos que fallan con respecto al caso anterior, dicho incremento es del 30 % en promedio de todos los niveles.
- Comentarios:
 - El segundo nivel es el que contiene mayor porcentaje de elementos que fallan, prácticamente todos sus elementos fallan. (65 %).
 - El octavo nivel a la quinta estructura residual es el que contiene menor porcentaje de elementos que fallan. (19 %)

Las imágenes a continuación muestran la secuencia de la progresividad de la falla cuando el incendio ocurre en el caso descrito anteriormente. (Ver Figura IV-48)



Figura IV-48: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso I-Z2-P3

Fuente: Elaboración propia

– Caso I-Z2-P5

La Tabla 1 1 muestra el porcentaje de los elementos que fallaron a raíz del incendio en el caso mencionado.

		Porcentaje de elementos que fallan						
		Estructura Residual (E.R.)						
Nivel		1	2	2	3	4	5	6
1		0	0	0	0	0	6.25	50
2		0	1.85	1.85	4.63	9.26	25.93	66.67
3		0	2.78	2.78	5.56	8.33	21.30	54.63
4		0	0	1.85	1.85	6.48	18.52	40.74
5		1.85	2.78	5.56	5.56	11.11	24.07	47.22
6		0.93	3.70	5.56	7.41	12.04	23.15	45.37
7		0	1.85	7.41	10.19	15.74	30.56	47.22
8		0	1.85	3.70	3.70	4.63	5.56	18.52
Promedio		0.35	1.85	3.59	4.86	8.45	19.42	46.30

Tabla IV-34: Propagación Vertical Caso I-Z2-P5

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-49).

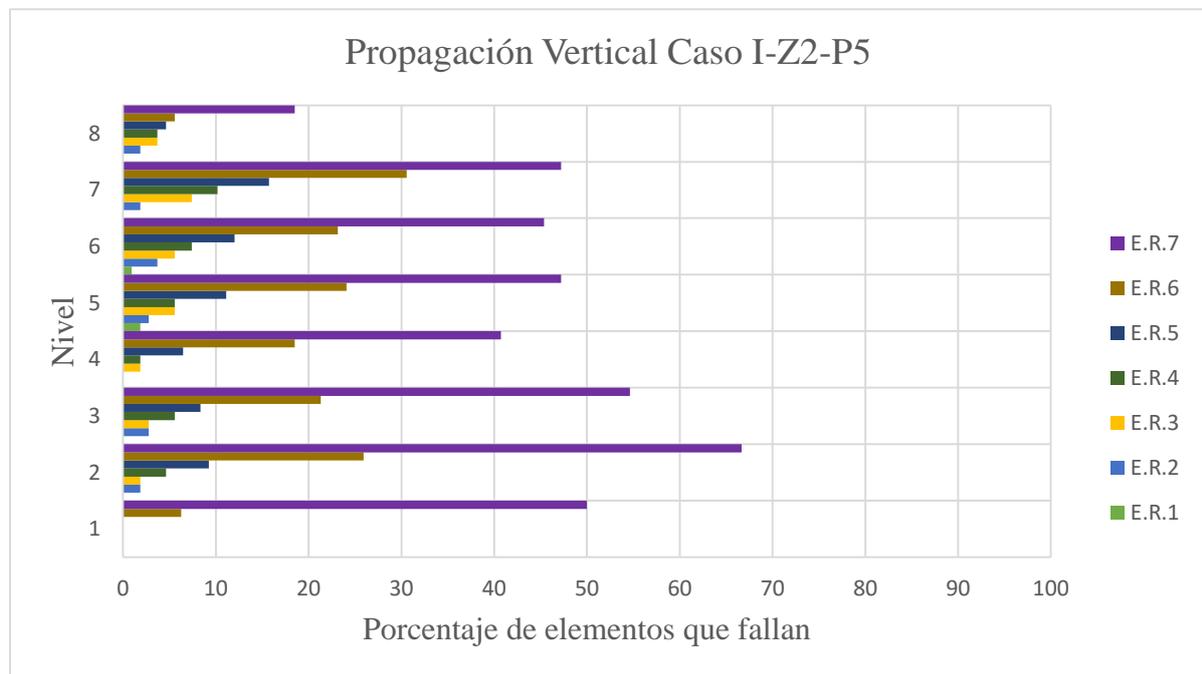


Figura IV-49: Propagación Vertical Caso I-Z2-P5

Fuente: Elaboración propia

Luego del incendio en la Zona 2 Nivel 5, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Primera Estructura Residual: Se observa que el quinto y sexto nivel contienen menos del 5% de sus elementos que fallan.
- Segunda Estructura Residual: Se empieza a propagar la falla al segundo, tercero, sexto, séptimo y octavo nivel.
- Tercera Estructura Residual: El cuarto nivel comienza a fallar con menos de sus 5% de sus elementos. Aunque en los niveles 5,6 y 7 se acercan al 10 % de sus elementos que fallan.
- Cuarta Estructura Residual: Los niveles 5,6 y 7 tienen el mismo porcentaje (14 %) de elementos que fallan.
- Quinta Estructura Residual: Los niveles 5,6 y 7 pasan el 10 % de sus elementos que fallan, en cambio los demás niveles (2, 3,4 y 8) sus porcentajes de elementos que fallan son menores al 10%.
- Sexta Estructura Residual: Los niveles del 2 al 7 superan el 18 % de elementos que fallan para cada nivel. Se incrementa un 11 % del caso anterior en promedio de todos los niveles. El nivel con más % de elementos que fallan es el séptimo nivel (31%).
- Séptima Estructura Residual: Se incrementa un 27 % de elementos que fallan con respecto al caso anterior. El segundo nivel es el más afectado con 67 % de sus elementos que fallan. El promedio de porcentaje de elementos de dicha estructura residual es de 46 %.

Las imágenes a continuación muestran la secuencia de la progresividad de la falla cuando el incendio ocurre en el caso descrito anteriormente. (Ver Figura IV-50)

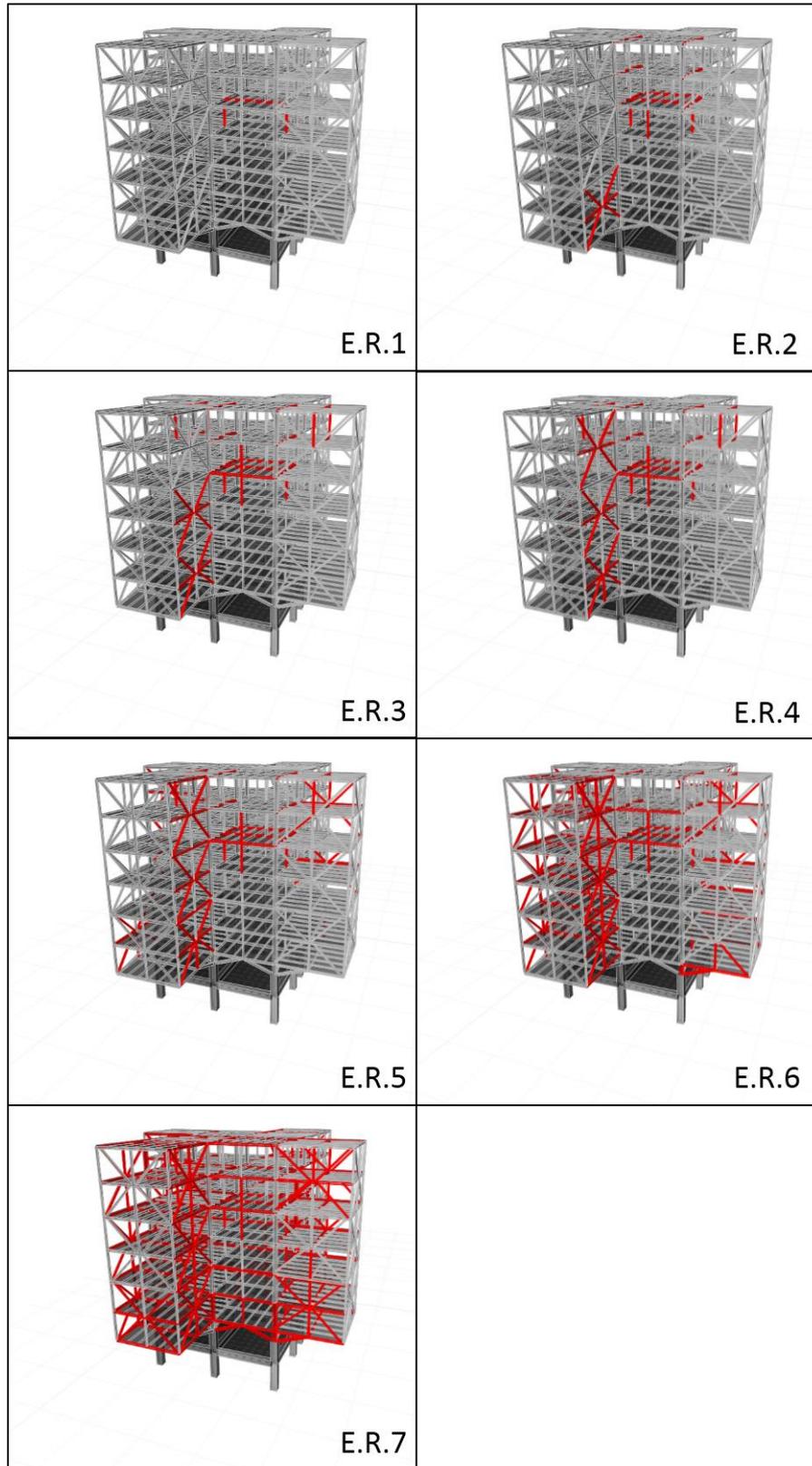


Figura IV-50: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso I-Z2-P5

Fuente: Elaboración propia

– **Caso I-Z2-P7**

Dicho caso responde de manera similar que en la zona 1, ya demostrado anteriormente.
(Figura IV- 51)

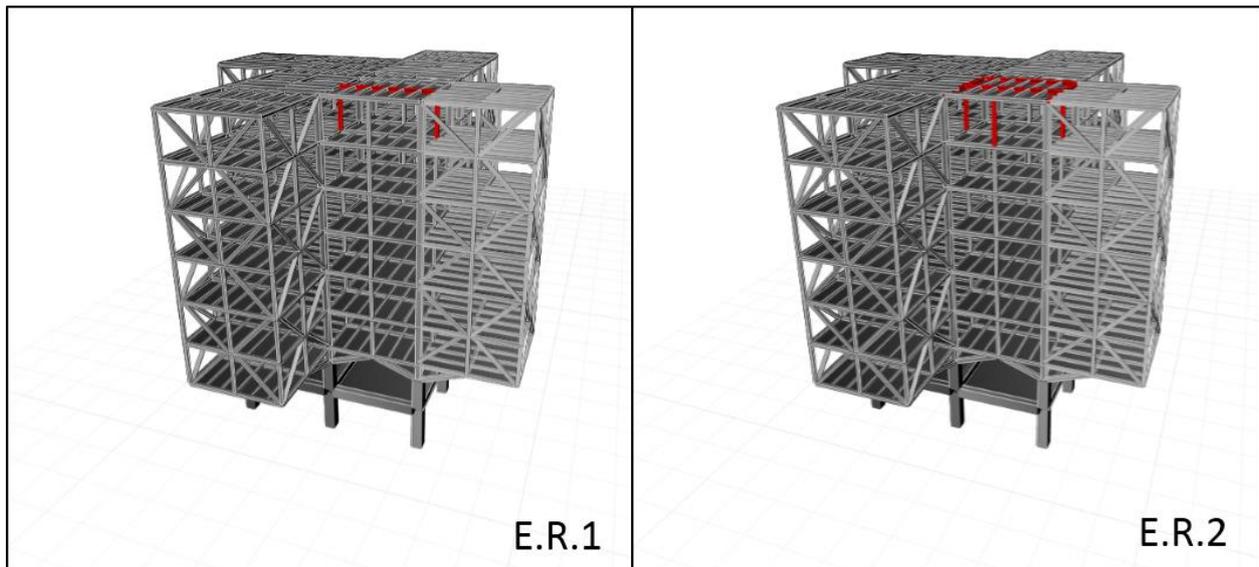


Figura IV-51: Vista en 3D de propagación de la falla. Caso I-Z2-P7

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Propagación Global de la Falla

4.2.4.1 Zona 1

La Tabla IV-35 muestra el porcentaje de los elementos que fallaron a raíz del incendio en los distintos niveles del caso mencionado.

Porcentaje de elementos que fallan							
Estructura Residual (E.R)							
Nivel	1	2	3	4	5	6	7
3	0.54	1.63	5.18	9.81	12.67	22.75	52.59
5	0.54	2.45	6.81	9.81	15.94	35.69	-
7	0.54	1.23	-	-	-	-	-

Tabla IV-35: Propagación Global. Caso I-ZI

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-52)

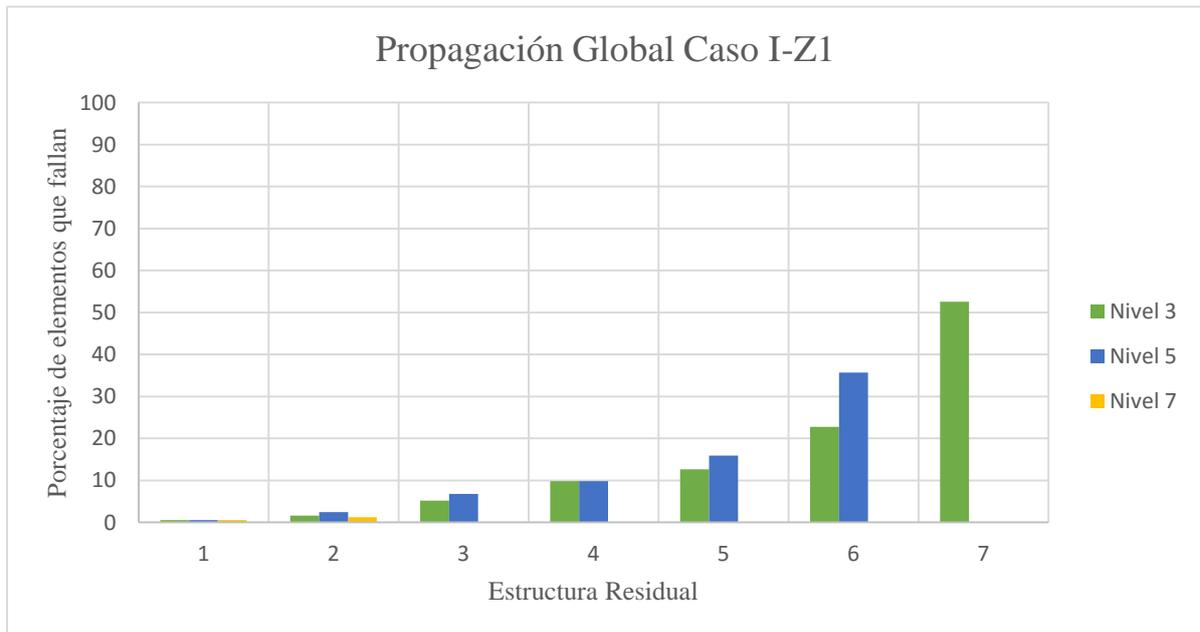


Figura IV-52: Propagación Global. Caso I-ZI

Fuente: Elaboración propia

Se observó que las fallas en los niveles 3 y 5 inducían al colapso progresivo, ya que para la última estructura residual del nivel 3 y nivel 5, presentaban un 53 % y 36 % de sus elementos que fallaban. En cambio, en el nivel 7, la falla no se propagó, por lo tanto, se determinó que la falla fue local.

– **Análisis sobre los tipos de elementos**

Las Tablas IV-36, -37 y -38 muestran la cantidad de elementos que fallaron hasta la última Estructura Residual y los distingue según su tipo; así como el porcentaje que representan en relación al número total de elementos que fallaron para dicho caso.

Nivel 3			
Tipo de elemento	Total, de elementos	Elementos que fallan	%
Columna Continua	84	20	24
Columna Discontinua	204	108	53
Viga Principal	203	120	59
Viga Secundaria	63	27	43
Arriostramientos	144	106	74
Viga Diagonal	36	5	14
TOTAL	734	386	53

Tabla IV-36: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso I-Z1-P3

Nivel 5			
Tipo de elemento	Total, de elementos	Elementos que fallan	%
Columna Continua	84	2	2
Columna Discontinua	204	60	29
Viga Principal	203	101	50
Viga Secundaria	63	21	33
Arriostramientos	144	104	72
Viga Diagonal	36	3	8
TOTAL	734	291	40

Tabla IV-37: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso I-Z1-P5

Nivel 7			
Tipo de elemento	Total, de elementos	Elementos que fallan	%
Columna Continua	84	0	0
Columna Discontinua	204	5	2
Viga Principal	203	3	1
Viga Secundaria	63	1	2
Arriostramientos	144	0	0
Viga Diagonal	36	0	0
TOTAL	734	9	1

Tabla IV-38: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso I-Z1-P7

Fuente: Elaboración propia

4.2.4.2 Zona 2

La Tabla IV-39 muestra el porcentaje de los elementos que fallaron a raíz del incendio en los distintos niveles del caso mencionado. Asimismo se identifica el número de estructuras residuales para su posterior representación gráfica. (Figura IV-53).

Nivel	Porcentaje de elementos que fallan					
	Estructura Residual					
	1	2	3	4	5	6
3	0.41	3.00	6.13	15.67	57.77	-
5	0.41	2.18	4.22	5.72	9.95	27.57
7	0.41	0.95	-	-	-	-

Tabla IV-39: Propagación Global. Caso I-Z2

A partir de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica. (Figura IV-53)

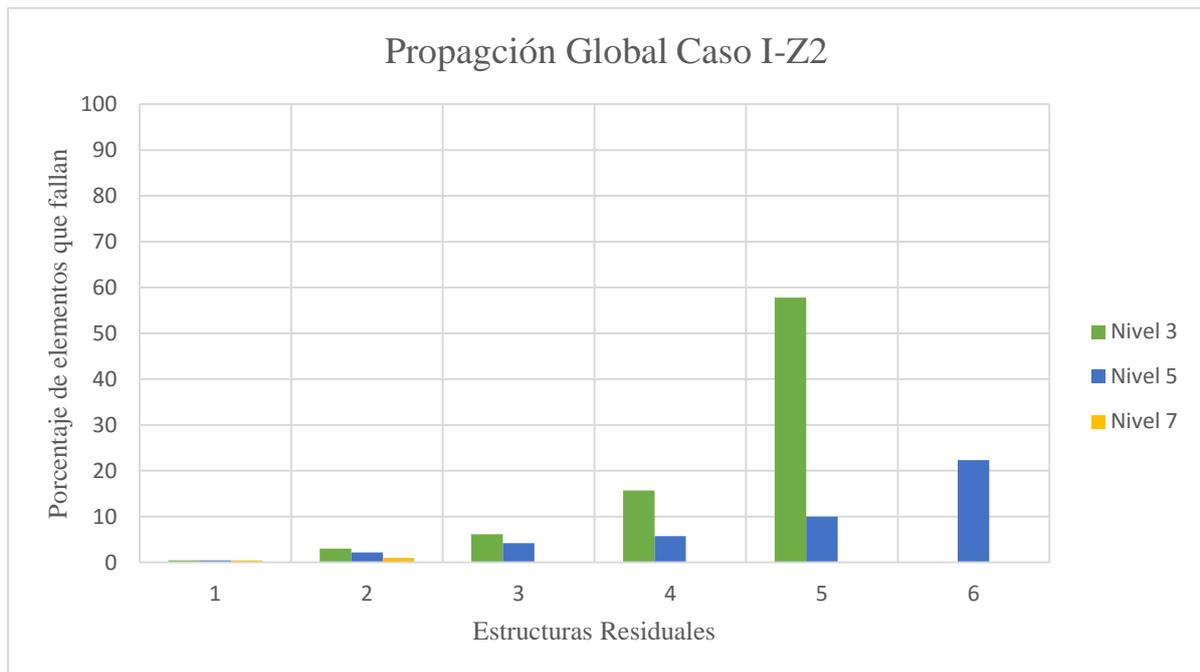


Figura IV-53: Propagación Global. Caso I-Z2

Fuente: Elaboración propia

Se observó que las fallas en los niveles 3 y 5 inducían al colapso progresivo, ya que para la última estructura residual del nivel 3 y nivel 5, presentaban un 58 % y 28 % de sus elementos que fallaban. En cambio, en el nivel 7, la falla no se propagó, por lo tanto, se determinó que la falla fue local.

– **Análisis sobre los tipos de elementos**

Las Tablas IV-40, -41 y -42 muestran la cantidad de elementos que fallaron hasta la última Estructura Residual y los distingue según su tipo; así como el porcentaje que representan en relación al número total de elementos que fallaron para dicho caso.

Nivel 3			
Tipo de elemento	Total, de elementos	Elementos que fallan	%
Columna Continua	84	22	26
Columna Discontinua	204	87	43
Viga Principal	203	156	77
Viga Secundaria	63	25	40
Arriostramientos	144	127	88
Viga Diagonal	36	7	19
TOTAL	734	424	58

Tabla IV-40: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso I-Z2-P3

Nivel 5			
Tipo de elemento	Total, de elementos	Elementos que fallan	%
Columna Continua	84	26	29
Columna Discontinua	204	79	22
Viga Principal	203	130	44
Viga Secundaria	63	28	27
Arriostramientos	144	94	15
Viga Diagonal	36	13	31
TOTAL	734	370	28

Tabla IV-41: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso I-Z2-P5

Nivel 7			
Tipo de elemento	Total, de elementos	Elementos que fallan	%
Columna Continua	84	0	0
Columna Discontinua	204	3	1
Viga Principal	203	3	1
Viga Secundaria	63	1	2
Arriostramientos	144	0	0
Viga Diagonal	36	0	0
TOTAL	734	7	1

Tabla IV-42: Total de tipos de elementos que fallan en la última E.R Caso I-Z2-P7

CAPÍTULO V CONCLUSIONES

Con el objeto de orientar los aspectos conclusivos de este Trabajo Especial de Grado, las conclusiones respectivas se presentan agrupadas según los siguientes criterios:

- **En cuanto a la simulación de los eventos de explosión y de incendio:**

Los resultados advierten que un evento del carácter de una explosión en el nivel tres (3) del edificio induciría al colapso progresivo (colapso total). De tal manera, se pudo analizar que los daños en este nivel, a partir de la falla de una columna continua, se propagan de forma inmediata y afectan a todos los niveles superiores. En el nivel cinco (5) se podrían esperar comportamientos similares, que, aunque presentaron menores incrementos con respecto a los elementos que fallan en sus *Estructuras Residuales*, también se pudo observar que induciría, de manera súbita al colapso progresivo (colapso total). Por el contrario, la ocurrencia de dichos eventos en el nivel siete (7) no generaba fallas adicionales y se determinaron estas como “fallas locales”. Asimismo, el estudio sobre las dos columnas demostró que el comportamiento mantenía la misma tendencia en ambos casos.

Tomando en cuenta que para los casos de incendio se consideraba como afectada toda una habitación o zona de la unidad habitacional, los resultados obtenidos sugieren que en la medida que el incendio se controle a tiempo, este quizá no representa un riesgo tan importante, ya que hasta temperaturas de 500°C no se observó ninguna falla en los elementos en ninguno de los casos, y aunque las deformaciones eran considerables en algunos, la estructura respondía en un campo elástico aceptable, permitiendo procedimientos terapéuticos adecuados. Por otra parte, ante una elevación de temperaturas hasta 700°C, se comprobó la falla de algunos elementos (columnas discontinuas y vigas secundarias) y, a partir de este punto, en los niveles tres (3) y cinco (5) se empezaban a generar *Estructuras Residuales* que, aunque con menores incrementos en su secuencia de vulnerabilidad que en los casos de explosión, también inducían al colapso total del edificio. De igual forma, se evidenció que la falla de los elementos en el nivel siete (7) no generó fallas adicionales considerables o ninguna, y las escasas consecuencias fueron caracterizadas como fallas locales. Finalmente, del mismo modo que para las simulaciones de explosión, el estudio sobre dos zonas demostró que el comportamiento mantenía la misma tendencia en ambos casos.

- **En cuanto a los perfiles de respuesta de la estructura objeto de estudio:**

Independiente de la causa, la estructura demostró, en primera instancia, un comportamiento deficiente cuando uno de sus elementos fallaba. De modo general, se puede afirmar que el edificio en estudio es altamente vulnerable ante estos tipos de eventos.

Esta incompetencia estructural del sistema o colapso temprano de la estructura, pudiese estar vinculada con las características propias del diseño original, tales como: i) la carencia de convenientes rutas alternativas para la redistribución de cargas; ii) el sub-dimensionamiento de los perfiles que restringen o limitan al edificio de su propia robustez estructural; iii) la interrupción en la continuidad de las columnas, entre otras.

Específicamente, las vigas principales quedaron registradas como los elementos de más falla frecuente y temprana en todos los casos simulados. Esto se corresponde con la fuerza cortante que le aportan, tanto los arriostramientos como las columnas discontinuas en los respectivos casos, sin embargo, el origen de la falla no fue un objeto de consideración especial de este estudio.

- **En cuanto a la metodología:**
 - Auditoría de la metodología propuesta

A la luz de la amplitud de resultados obtenidos, se pudo comprobar que se logró modelar de manera sencilla cada uno de los eventos extraordinarios. De tal forma, la metodología postulada y los resultados obtenidos de ella, se pueden considerar como una aproximación válida para los efectos de esta investigación, ya que a través de las simulaciones se logró observar un comportamiento acorde al esperado tanto en la explosión como en el incendio, al comprobarlo con las metodologías y el software de análisis estructural ETABS 2015.

- El concepto de *Estructura Residual* como descriptor y herramienta principal de análisis

Se otorga gran valor conceptual para estudios vinculados a esta temática, al concepto de *Estructura Residual* como descriptor del nivel de vulnerabilidad epistémica de carácter progresivo, mediante el cual se logró caracterizar la propagación de la falla y sus efectos en la estructura en estudio. Como criterio de evaluación cuantitativa, la investigación adoptó un rango límite de porcentaje de elementos que fallan, para el cual se presumía que ya el colapso

total era inminente; este rango límite corresponde a un orden de 25% a 30% de elementos que fallan en la estructura. Cada *Estructura Residual* identificaba un nivel de daño, y cada *Estructura Residual* consecuente implicaba un incremento de daños, por lo cual, se puede concluir metodológicamente, que mientras menos *Estructuras Residuales* precedían el rango límite, mayores eran los incrementos en la vulnerabilidad del edificio.

- **En cuanto al marco normativo:**

A través de la investigación se conoció cuál es la consideración mundial acerca del fenómeno de cargas extraordinarias que inducen colapso progresivo. Si bien varios países atienden estos conceptos de maneras distintas en sus normativas de construcción, la mayoría reconocen su importancia en el diseño estructural actual; y coinciden con que los métodos más efectivos para la consideración del colapso progresivo son aquellos en los cuales, la redundancia del sistema estructural; las rutas alternativas de carga en la estructura residual de pre-colapso; la continuidad y, finalmente, la robustez en el sistema estructural, son parte de las consideraciones de diseño.

CAPÍTULO VI RECOMENDACIONES

En su Ensayo sobre el entendimiento humano, Locke se propone “mostrar por qué medio nuestro entendimiento se forma las ideas que tiene de las cosas, marca las fronteras de la certeza, define los límites que separan la opinión del conocimiento”

John Locke (1632-1704)

Con el objeto de orientar los aspectos de continuidad de este Trabajo Especial de Grado, las recomendaciones respectivas se presentan agrupadas según los siguientes criterios:

- **Vinculadas al modelo estructural del objeto de estudio:**
 - Verificar la presencia de un sistema automatizado de rociadores de agua o de cualquier otro sistema orientado para la mitigación del fuego, ya que este reduciría de forma considerable el riesgo consecuente.
 - Corregir las deficiencias estructurales, como por ejemplo las columnas discontinuas, las cuales deben llegar hasta el nivel base del edificio, así como los arriostramientos que deben vincularse directamente al nodo, con el fin de tener una mejor continuidad de rutas de carga. Posteriormente evaluar el comportamiento estructural ante estos eventos extraordinarios y, a raíz de esos resultados tomar decisiones sobre dónde colocar los posibles refuerzos para la estructura, y así reducir, en definitiva, la vulnerabilidad y el riesgo asociado a la ocurrencia de este tipo de eventos.
 - Incorporar el efecto de la conexión acero/concreto existente entre el primer nivel del edificio y el resto de la superestructura, a fin de evaluar cómo afecta el comportamiento estructural ante este tipo de eventos.
 - Ya que en este trabajo se evaluaron de forma independiente los eventos de explosión e incendio, se recomienda evaluar el efecto debido a la progresividad de eventos, es decir, las posibles consecuencias en el comportamiento estructural del edificio de un incendio que se desarrolle luego de ocurrida una explosión.
 - Realizar el mismo estudio contemplado en este Trabajo Especial de Grado, pero considerando que el origen de la falla no fuese el área de la cocina, sino en

cualquier otro punto en la distribución típica en planta del edificio, como, por ejemplo, los voladizos de la estructura.

- **Relacionado con la continuidad investigativa:**
 - Aplicar la metodología propuesta en este Trabajo Especial de Grado, a fin de evaluar otras estructuras de acero y/o concreto de interés, ya sea con mayor o menor altura para observar su comportamiento.
 - Evaluar los perfiles de respuesta de la estructura analizada, pero con la consideración que el incendio fuese controlado por un sistema automatizado de rociadores o por cualquier otro sistema para disminuir su temperatura.
- **La norma venezolana COVENIN-MINDUR. (2002). *Criterios y Acciones Mínimas para el Proyecto de Edificaciones* y el colapso progresivo debido a eventos extraordinarios:**
 - Con respecto a dicha Norma técnica, no se encontró evidencia de consideraciones particulares para el análisis del colapso progresivo. Sólo se ubicó un artículo, muy breve, acerca las acciones extraordinarias, aunque esto último no puede concluir que no exista mayor bibliografía sobre el tema y que no sea del conocimiento de los autores. Sin embargo, ya que las normativas internacionales que sirvieron como referencia a esta investigación se han definido basadas en la casuística de estos eventos, luce conveniente incorporar conceptos en la Norma Venezolana relativos a la “consideración de incendios y explosiones para el diseño estructural”.

BIBLIOGRAFÍA

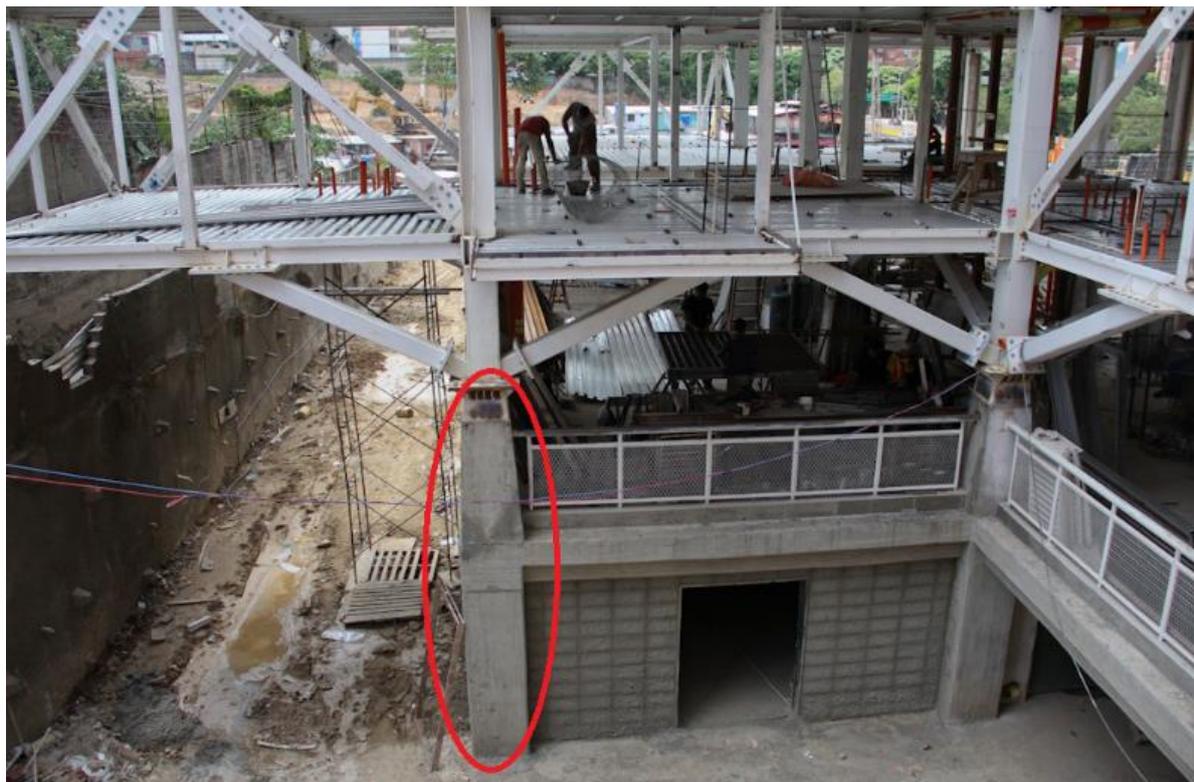
- (AISC), A. I. (2016). *Engineering FAQs*.
- Agency, F. E. (2002). *FEMA 403, World Trade Center Building Performance Study*.
- Barbosa, R. E. (5 de Noviembre de 2013). *Colapso Progresivo de Edificios de Concreto*. Obtenido de Universidad La Gran Colombia: <http://www.scg.org.co/wp-content/uploads/UGC-Barbosa0-opt.pdf>
- Bendito, A. (2010). *Introducción al Comportamiento y al Diseño de Estructuras de Acero*. Merida: Universidad de los Andes.
- COVENIN-MINDUR. (2002). *Criterios y Acciones Mínimas para el Proyecto de Edificaciones*. Caracas, Venezuela.
- Crawford, J. E. (s.f.). *Retrofit Methods to Mitigate Progressive Collapse*. Glendale.
- Dalsgaard Sorensen, J. (2007). *Notes in Structural Reliability Theory and Risk Analysis*. Aalborg.
- Dolmen, A., & Tamargo, J. (2015). *Busqueda de patrones mecanicos en edificios de planta irregular al presentarse una falla local en una de sus columnas*. Caracas.
- Ellingwood, B., Smilowitz, R., Dusenberry, D., Duthing, D., & Carino, N. (2007). *Best Practices for Reducing Progressive Collapse on Buildings*.
- Ettouney, M. (s.f.). *Assessing and Minimizing Threats to Buildings*. New York.
- Faber, M., & Stewart, M. (2003). *Risk Assessment For Civil Engineering Facilities: Critical Overview and Discussion*. Newcastle.
- Gilsanz, R., Hamburguer, R., Barker, D., L. Smith, J., & Rahimian, A. (2015). *Steel Design 26. Design of Blast Resistant Structures*. American Institute of Steel Construction.

- Herrera, F., & Pollner, A. (2011). *BÚSQUEDA DE PATRONES GEOMÉTRICOS Y MECÁNICOS EN EDIFICIOS QUE HAN PERDIDO PARTE DE SU SOPORTE*. Caracas.
- Kirkpatrick, D. (26 de Agosto de 2015). *Saudi Arabia Said to Arrest Suspect in 1996 Khobar Towers Bombing*. Obtenido de The New York Times:
<http://www.nytimes.com/2015/08/27/world/middleeast/saudia-arabia-arrests-suspect-khobar-towers-bombing.html>
- Leyendecker, E. V., & George, F. S. (1977). *Investigation of the Skyline Plaza Collapse in Fairfax County, Virginia*. Washington: U.S Government Printing Office.
- Lim, J. (2004). *Progressive Collapse Analysis Of Steel Framed Moment Resisting Structures*. Pennsylvania.
- Marchand, K. A., & Alfawakhiri, F. (2004). *Facts for Steel Buildings. Blast and Progressive Collapse*. American Institute of Steel Construction.
- Mlakar, P., Dusenberry, D., Harris, J., Haynes, G., Phan, L., & Sozen, M. (2003). *Structural Damage Induced by a Terrorist Attack on the Pentagon*. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- MUNDO, B. (12 de Septiembre de 2001). *BBC*. Obtenido de BBC:
http://news.bbc.co.uk/hi/spanish/science/newsid_1540000/1540888.stm
- Nair, S. (2004). Progressive Collapse Basics. *The Steel Conference*.
- Register, T. D. (17 de Abril de 1973). Criminal Charges Possible in Collapse of High-Rise Apts in Fairfax Co. *The Danville Register*, pág. 9.
- SIDETUR. (12 de 03 de 2015). *Importancia de la integridad estructural en edificaciones de concreto armado*. Obtenido de Scribd:
<https://www.scribd.com/doc/258492863/AceroAlDia-Integridad-estructural#scribd>

- Smith, M. (2007). *Progressive Collapse Assessment. Non-linear Behaviour of Concrete Structures in Damaged State*. Delft.
- Society of Fire Protection Engineers. (2004). *Fire Exposures to Structural Elements*. Maryland.
- Tide, R. H. (1998). *Integrity of Structural Steel After Exposure to Fire*. Northbrook: Engineering Journal.
- Wang, Y., Burgess, I., Wald, F., & Gille, M. (2013). *Performance- Based Fire Engineering Of Structures*. Boca Raton: CRC Press.

ANEXOS

Anexo A



Columna de concreto armado

Fuente: Fundacaracas

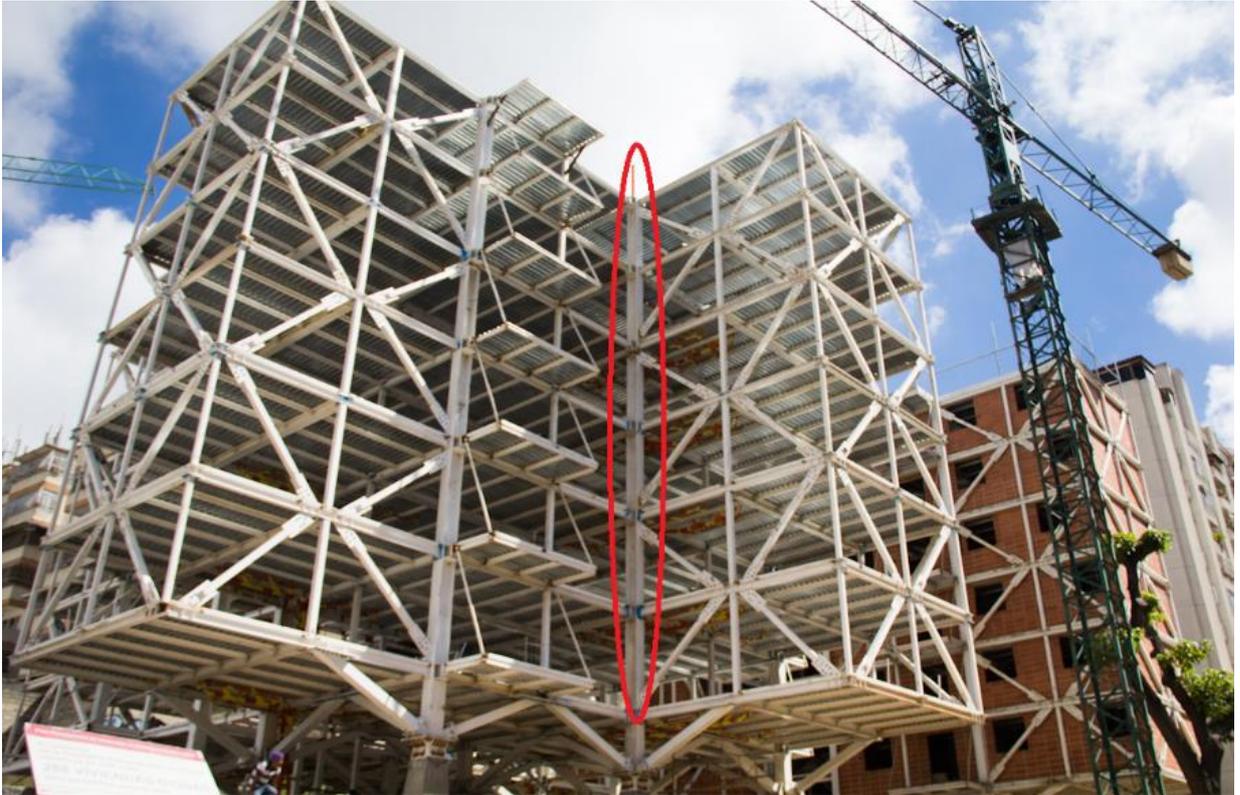
Anexo B



Conexión concreto- acero

Fuente: Fundacaracas

Anexo C



Columna Continua. Perfil HEA 360

Fuente: Fundacaracas

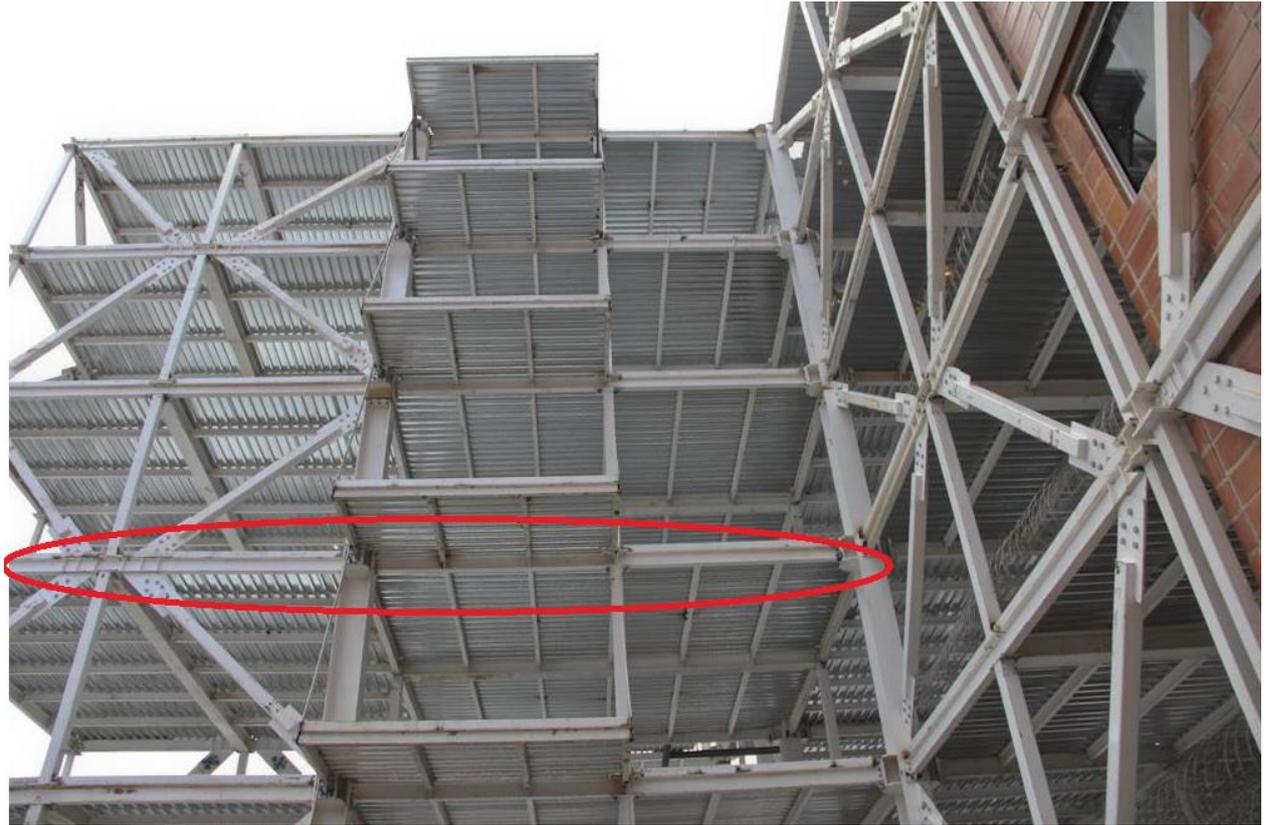
Anexo D



Columna Discontinua. Perfil Tubular 120 x 120 mm

Fuente: Fundacaracas

Anexo E



Viga Principal. IPE 180

Fuente: Fundacaracas

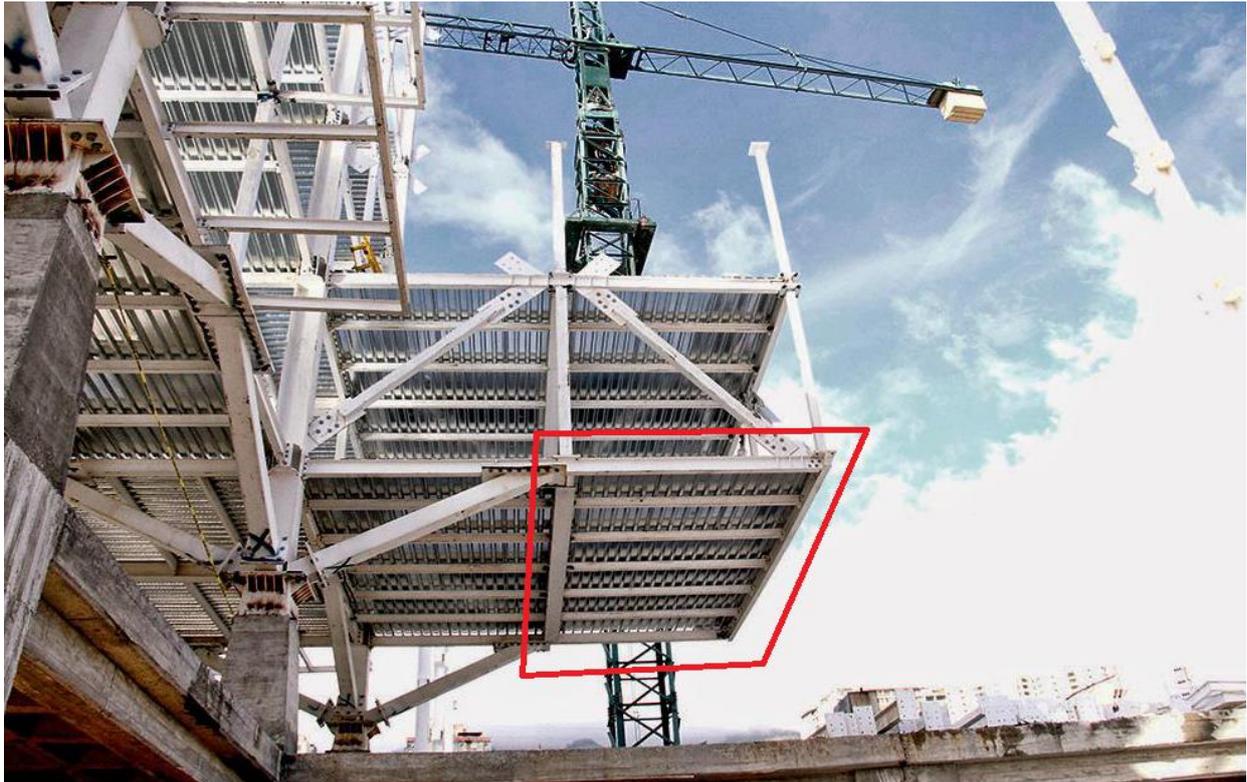
Anexo F



Viga Secundaria. IPE 200

Fuente: (Rincón, 2011)

Anexo G



Viga de Reparto. IPE 140

Fuente: Fundacaracas

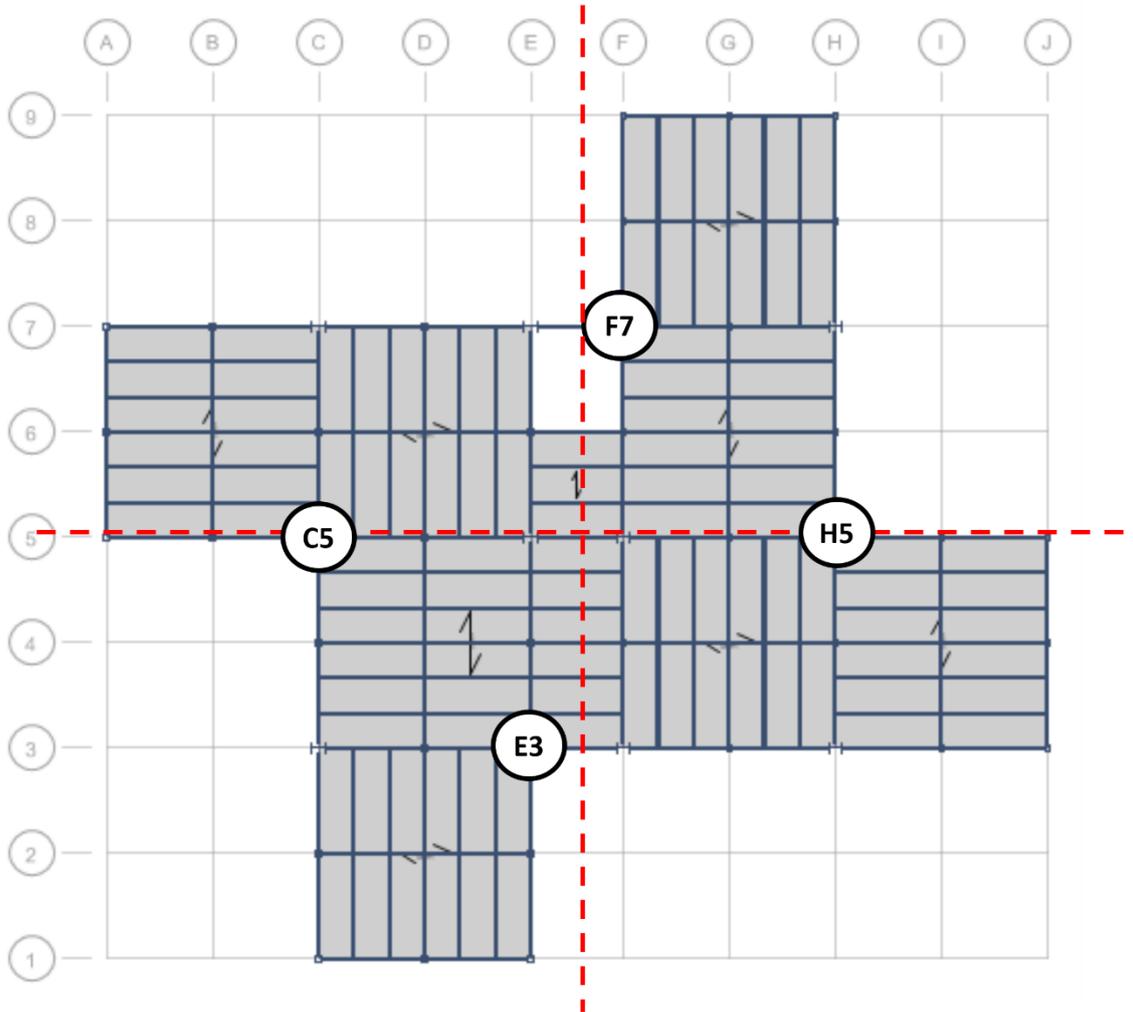
Anexo H



Arriostamientos. Perfil tubular 200 mm

Fuente: Fundacaracas

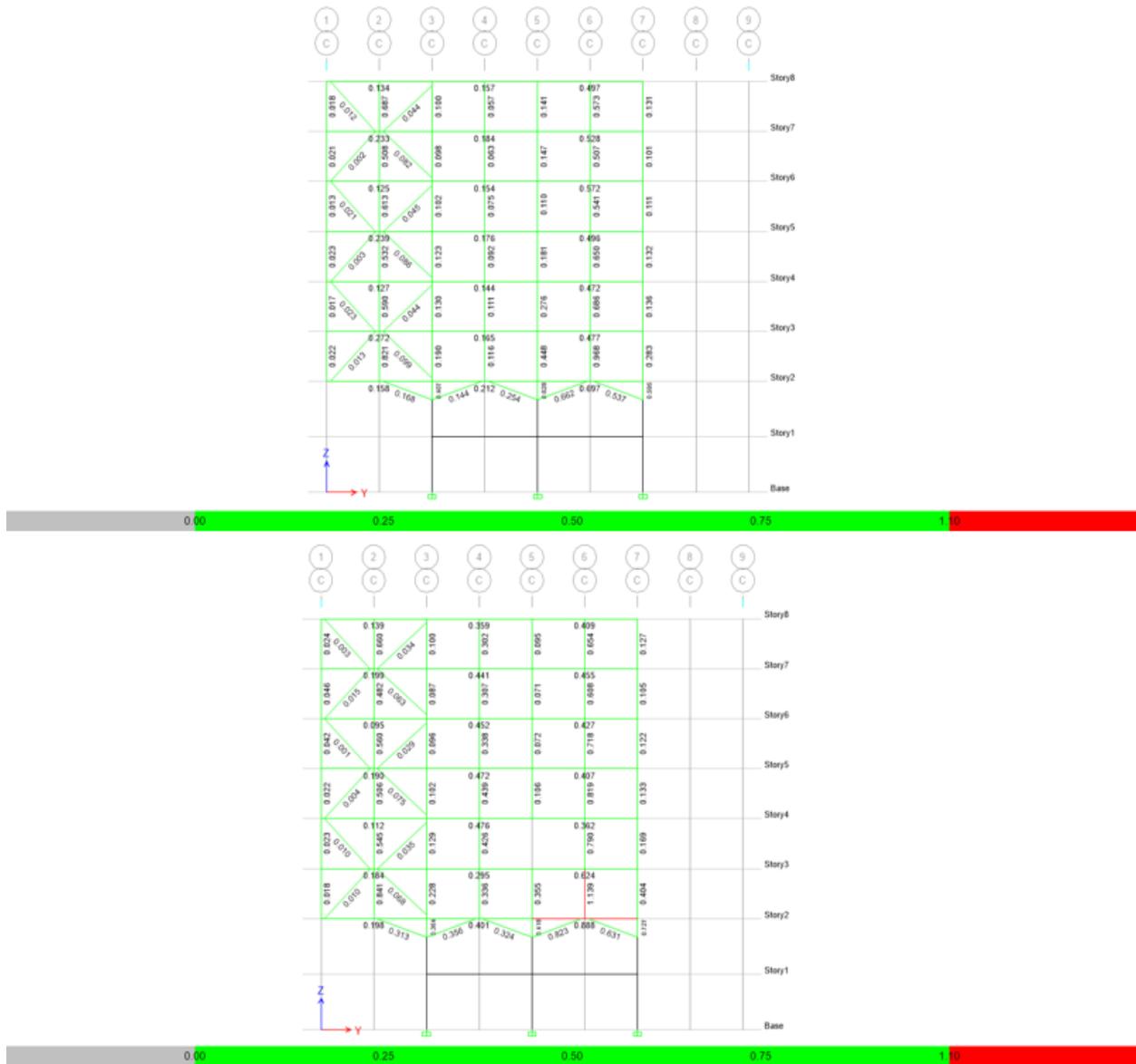
Anexo I



Vista en planta de ejes de simetría

Fuente: Elaboración Propia

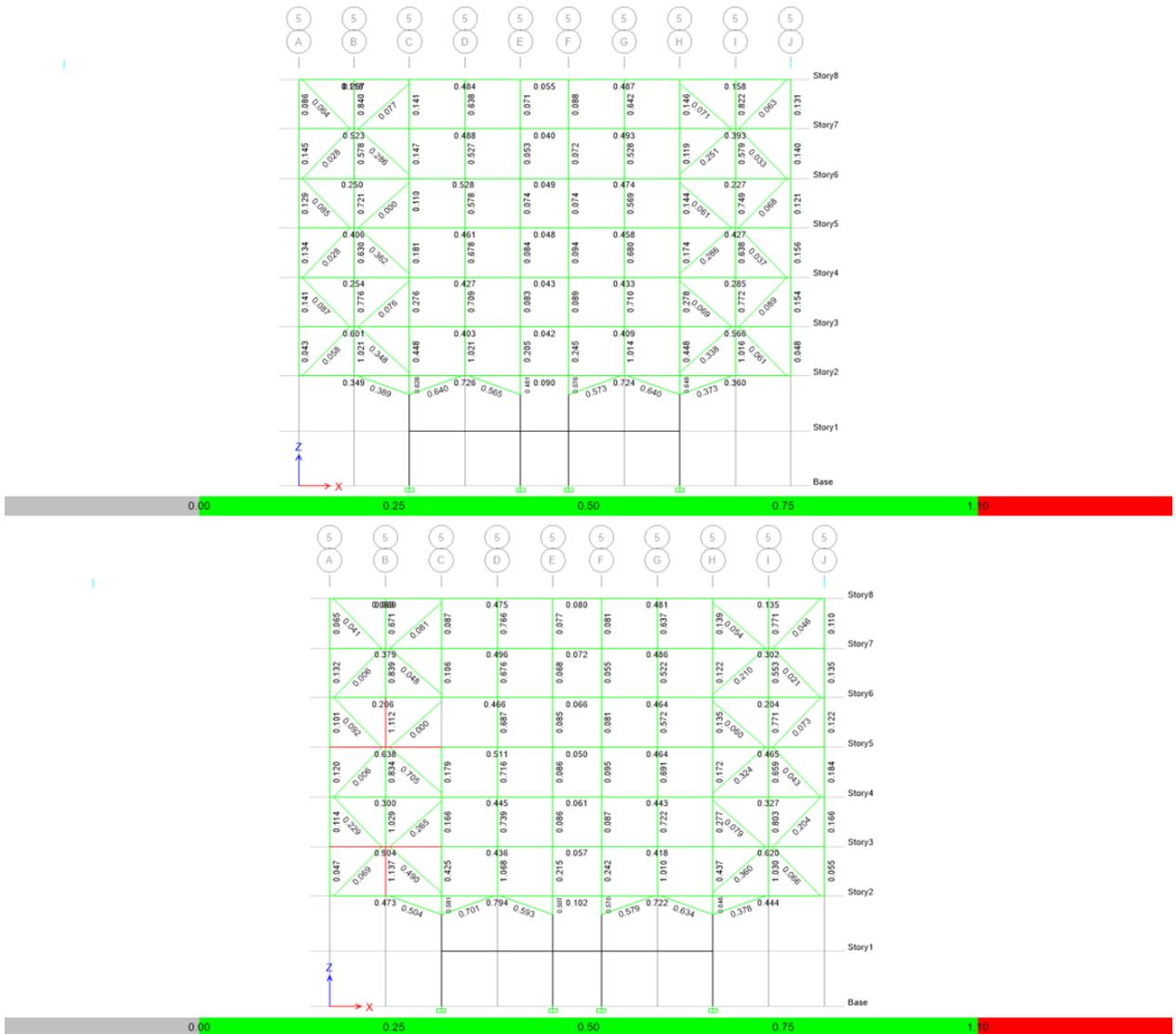
Anejo J



Caso 0 y Caso 1. Pórtico C. Caso E-C5-P3

Fuente: Elaboración propia

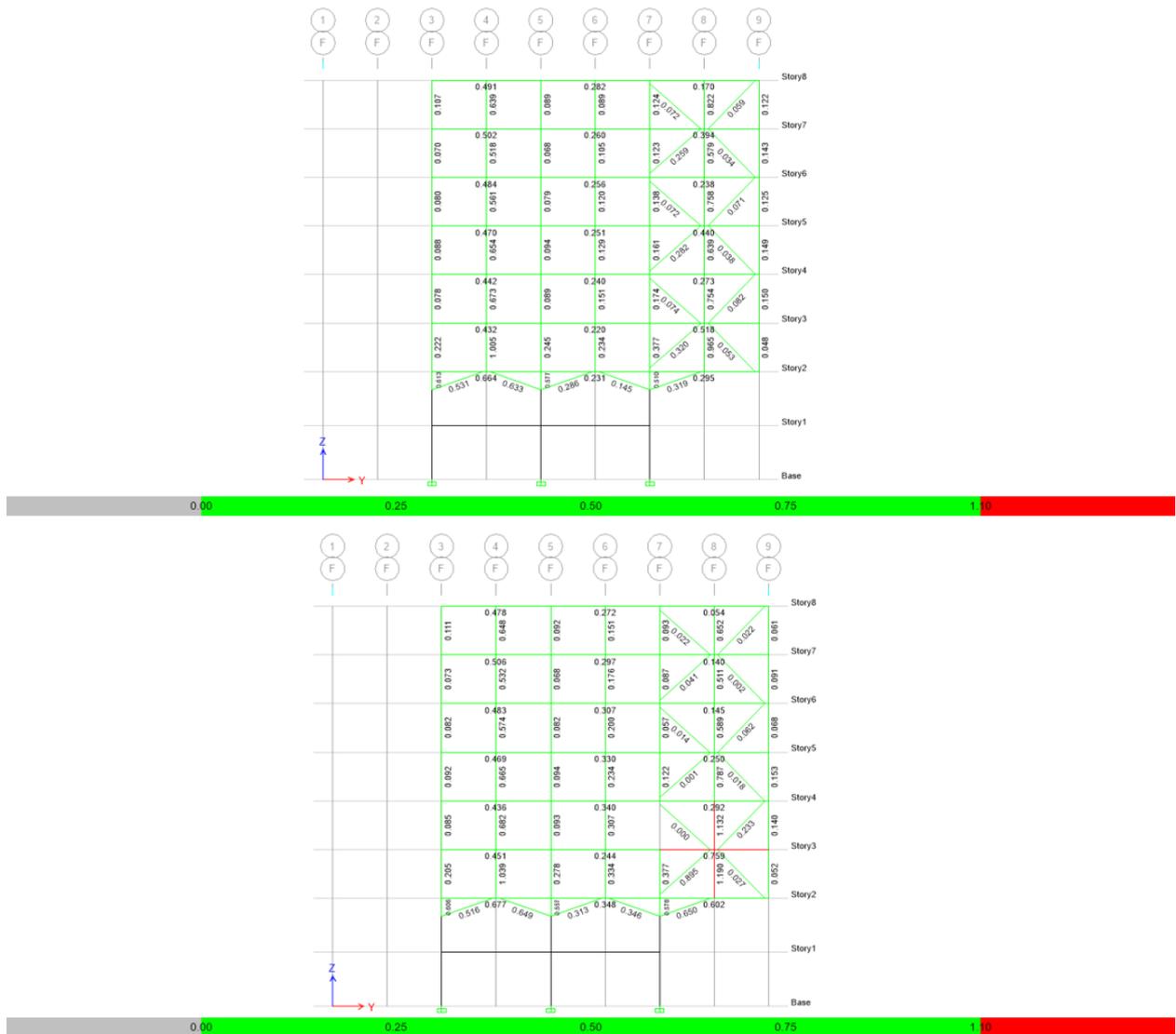
Anexo K



Caso 0 y Caso 1. Pórtico C. Caso E-C5-P5

Fuente: Elaboración propia

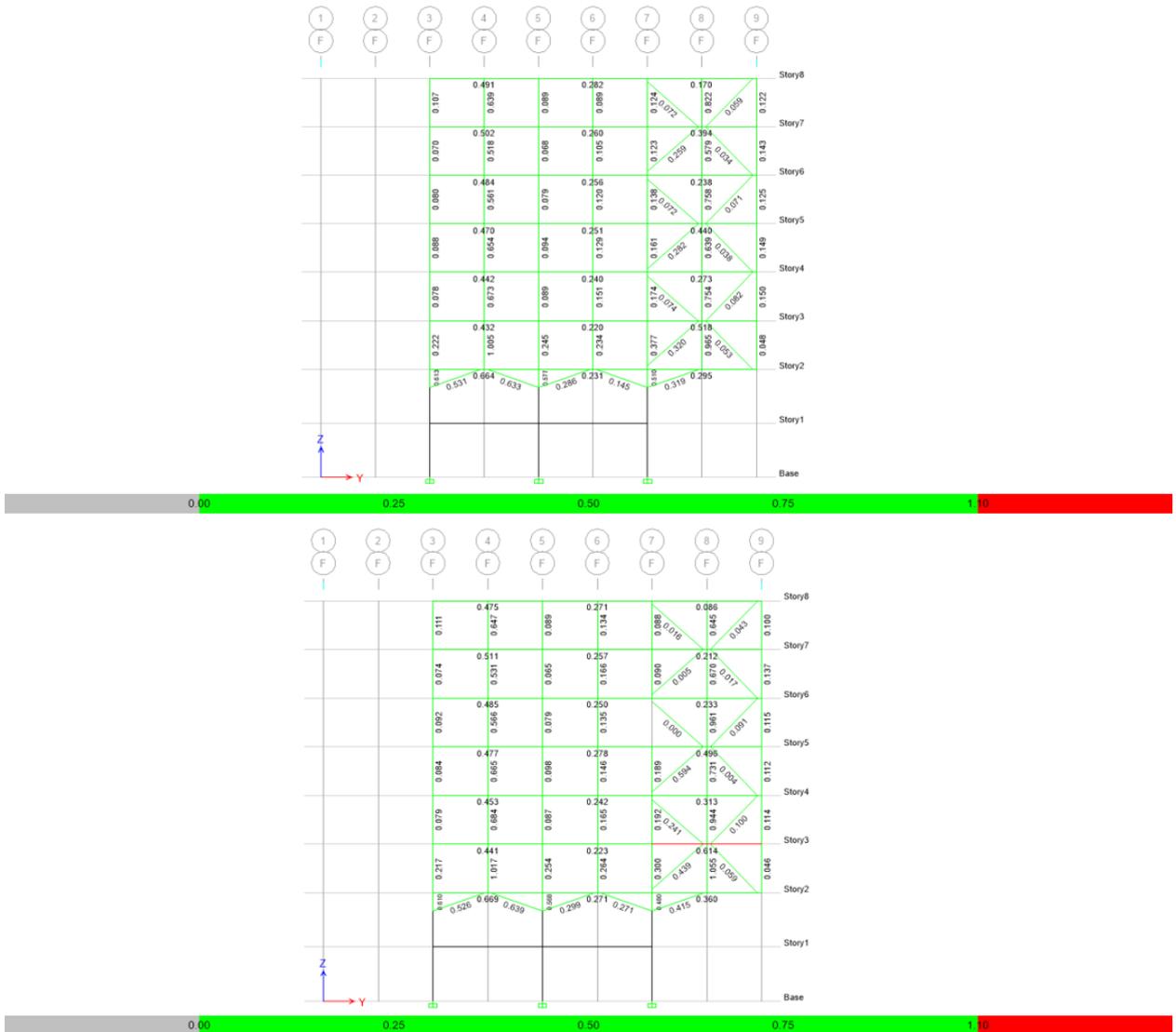
Anexo L



Caso 0 y Caso 1. Pórtico C. Caso E-F7-P3

Fuente: Elaboración propia

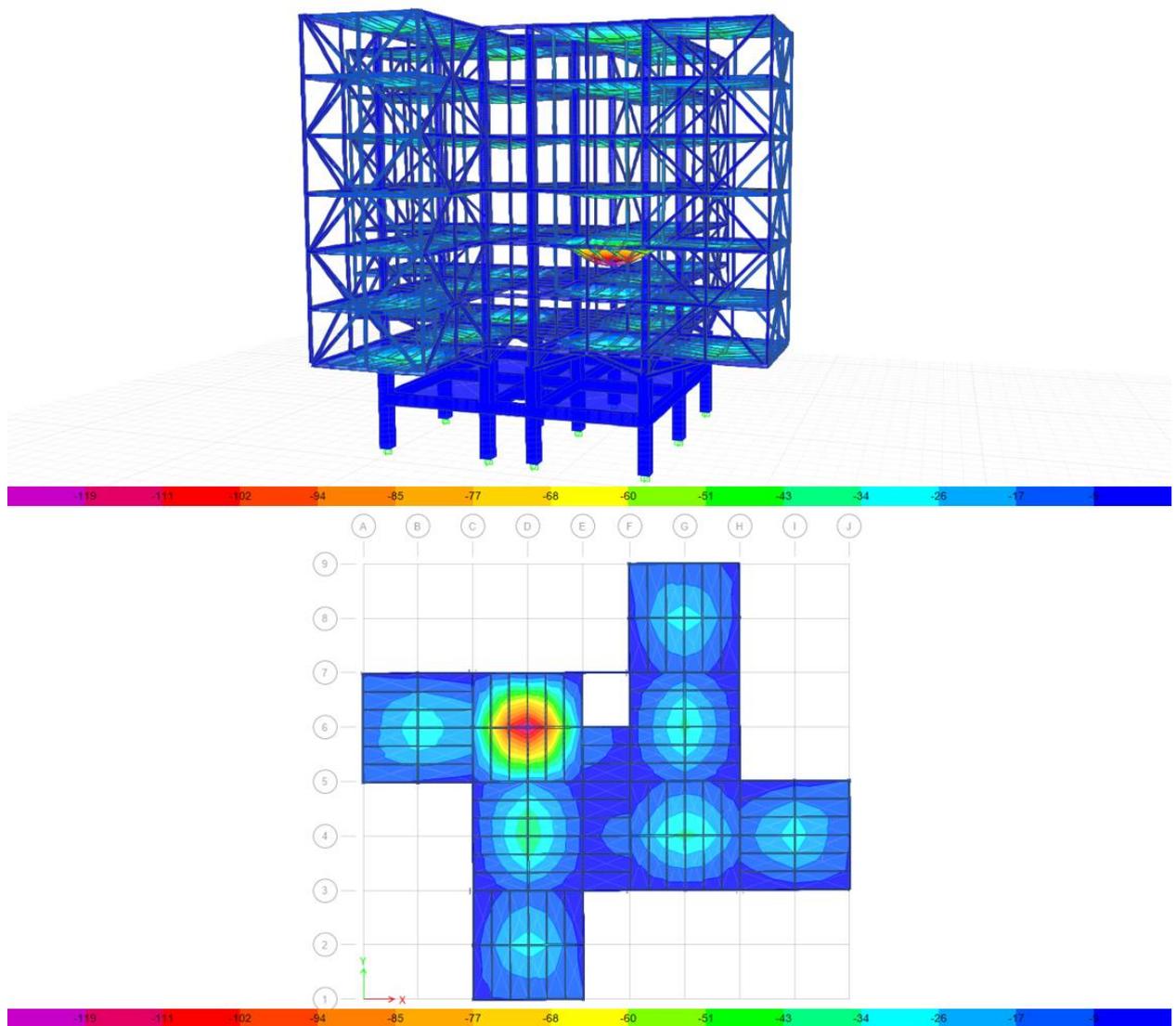
Anexo M



Caso 0 y Caso 1. Pórtico C. Caso E-C5-P5

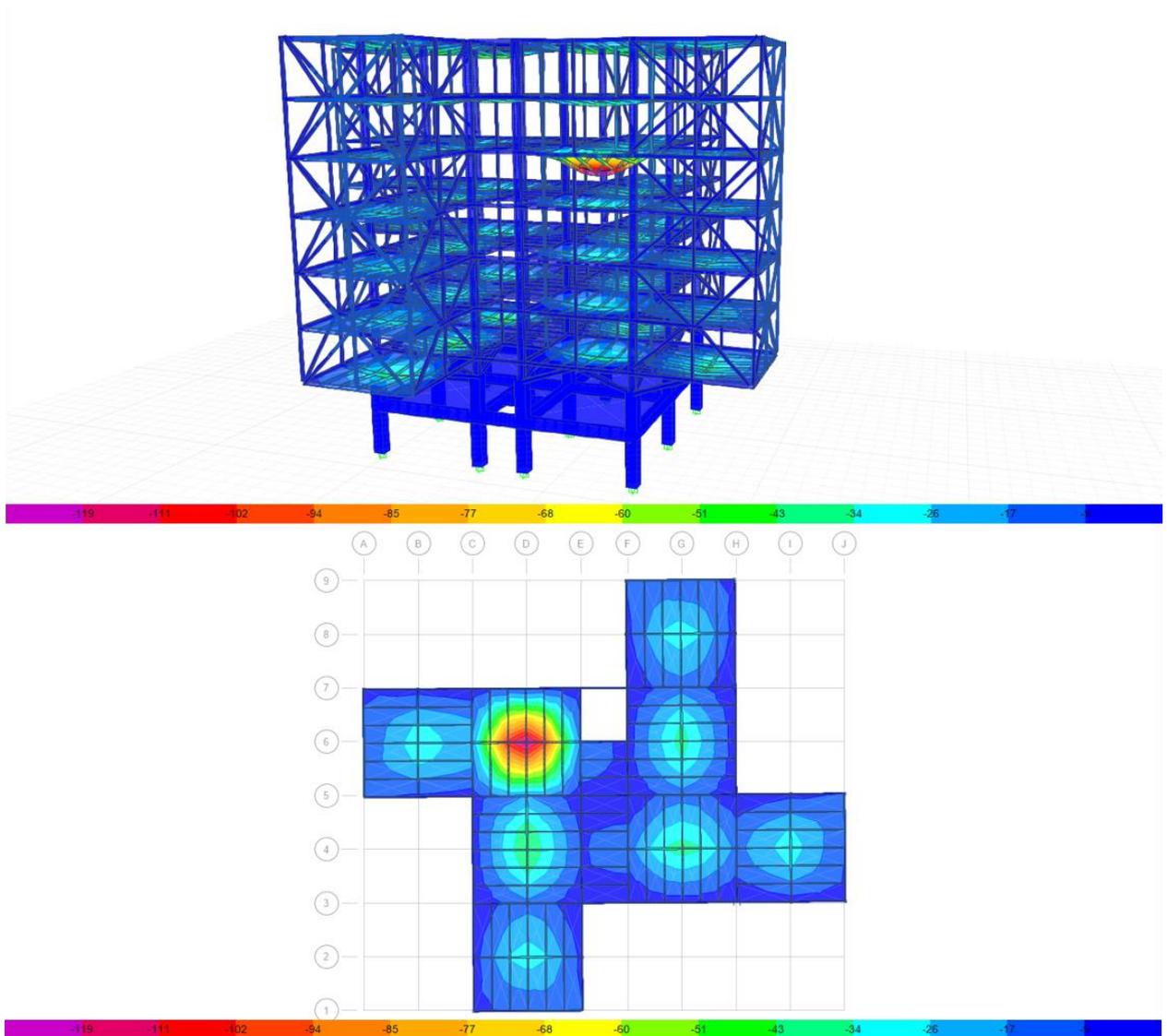
Fuente: Elaboración propia

Anexo N



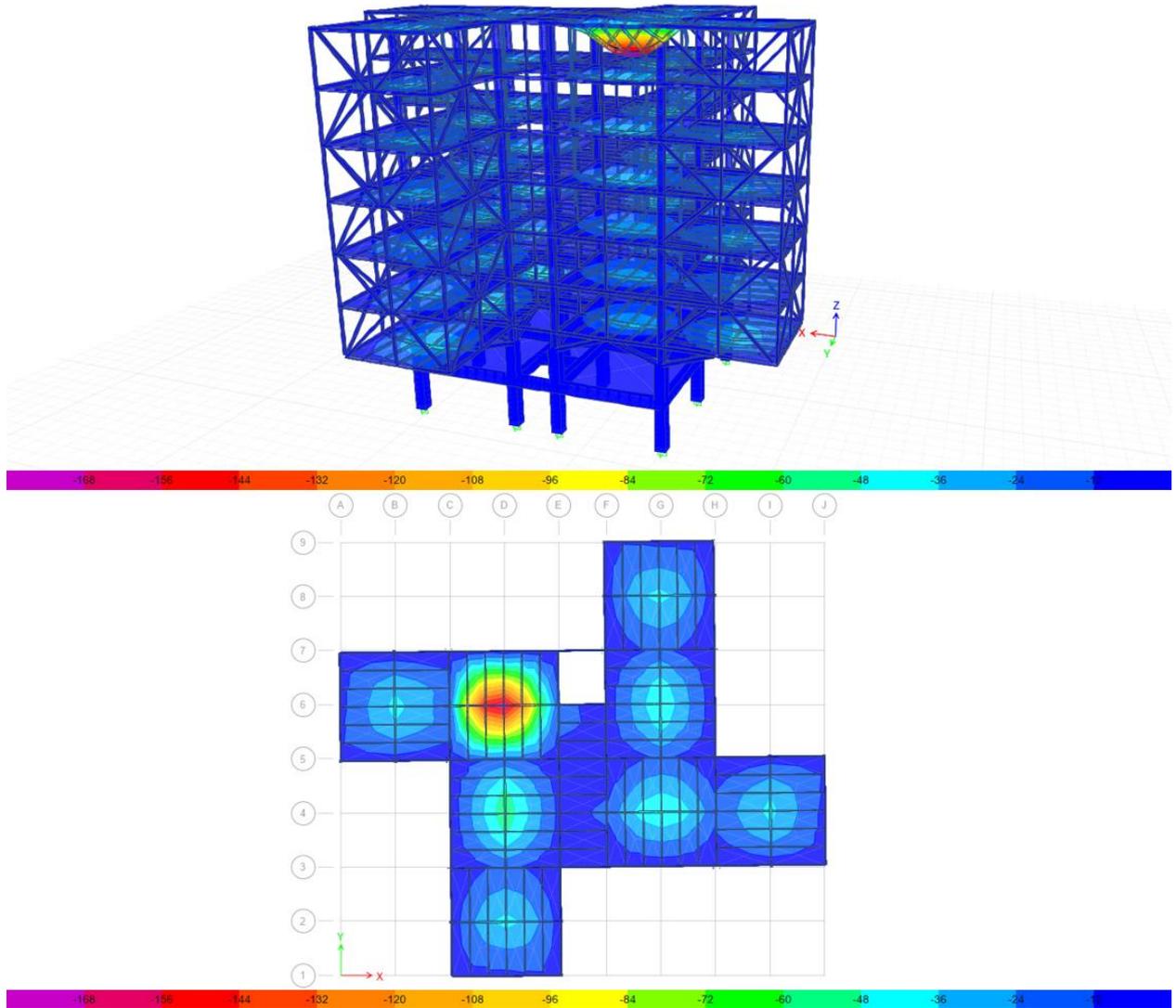
Fuente: Elaboración propia

Anexo O



Desplazamiento vertical (cm) a 700 °C. Caso I-Z1-P5

Fuente: Elaboración propia



Desplazamiento vertical (cm) a 700 °C. Caso I-Z1-P7

Fuente: Elaboración propia