



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# Estudio del comportamiento de una estructura reticular en acero solicitada por efectos de altas temperaturas

**Aída Liliana Marín Villota**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá D.C., Colombia  
2022



# Estudio del comportamiento de una estructura reticular en acero solicitada por efectos de altas temperaturas

Aída Liliana Marín Villota

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería - Estructuras**

Director(a):  
Ricardo León Parra Arango

Línea de Investigación:  
Diseño Estructural

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá D.C., Colombia  
2022



## Dedicatoria

A Dios, por cada oportunidad que me brinda y por permitirme avanzar cada día.

A mi padre, Roberto(†), que me acompaña y continúa guiando para tener constancia en mis propósitos.

A mi madre, Aída Marina, por su inmenso amor, dedicación, esfuerzo, apoyo incondicional y espiritual.

A mi hermana, Mayive, que siempre está conmigo sin importar la distancia ni las adversidades, por su amor transparente, su apoyo y motivación; contigo los sueños se van tornando reales.

A mi hermano Carlos Andrés y mi sobrina Isabella, por su cariño, compañía y motivación.

A mi tía Zoila(†), que en vida me dio todo su apoyo y amor.

A mis primas, familia y amigas por su voz de aliento, compañía y confianza.



# Agradecimientos

Agradezco infinitamente a mi director, Ingeniero Ricardo León Parra Arango, que siempre con disposición para colaborar me guió en este largo proceso, comenzando desde la construcción de la propuesta hasta la materialización de la misma; reflejada en este trabajo final de maestría. Todo mi respeto y admiración.

A cada uno de los honorables profesores, del programa de Maestría en Estructuras de la Universidad Nacional de Colombia, que con su pedagogía me transmitieron sus valiosos conocimientos, logrando que esta profesión sea cada vez más maravillosa.

# Declaración

Declaro que he leído el acuerdo 035 de 2003, por el cual el Consejo Académico expide el Reglamento sobre Propiedad Intelectual en la Universidad Nacional de Colombia. De este modo, me permito afirmar que he realizado el presente Trabajo Final de Maestría de manera autónoma y con la única ayuda de los medios permitidos y no diferentes a los mencionados en el propio trabajo.

En el presente trabajo todos los pasajes que se han tomado de manera textual o figurativa de textos publicados y no publicados, los he reconocido, mediante el tipo de letra itálica, el uso de comillas o citando la referencia. Ninguna parte del presente trabajo se ha empleado en ningún otro tipo de tesis.

Por último, este Trabajo Final de Maestría fue sometido a una herramienta de evaluación de la originalidad en la producción y manejo documental, definida por la Universidad.

Bogotá, D.C., agosto de 2022

---

Aída Liliana Marín Villota



# Resumen

## **Estudio del comportamiento de una estructura reticular en acero solicitada por efectos de altas temperaturas**

En el presente documento se muestra cómo se incorpora una sollicitación por altas temperaturas en el análisis matemático de estructuras de acero, mediante el uso de dos software de modelación matemática, OpenSees y SAP2000. Se tomaron tres estructuras reticulares: un piso y un vano; un piso y dos vanos; dos pisos y dos vanos. Así mismo, en el análisis se presenta tres enfoques del efecto del fuego: afectación del módulo de elasticidad; afectación del área expuesta al fuego; e implementación de una curva de calor tiempo-temperatura. Como consecuencia se realizó un cuadro comparativo de los resultados encontrados.

**Palabras clave:** Fuego, altas temperaturas, incendio, estructura reticular en acero, curvas tiempo-temperatura, OpenSees, SAP2000.

# Abstract

## **Study of the behavior of a reticular structure in steel requested by effects of high temperatures**

This document shows how high temperature stress is incorporated into the mathematical analysis of steel structures, through the use of two mathematical modeling software, OpenSees and SAP2000. Three reticular structures were taken: one floor, one bay; one floor, two bays; two floors, two bays. Also, the analysis presents three approaches to the effect of fire: affectation of the modulus of elasticity; affectation of the area exposed to the fire; and implementation of a heat time-temperature curve. As a consequence, a comparative table of the results found was made.

**Keywords:** Fire, high temperatures, steel frames, time-temperature curves, OpenSees, SAP2000.

# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de símbolos</b>	<b>XXII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Antecedentes . . . . .	2
1.2.1. Catedral de Notre Dame . . . . .	4
1.2.2. Museo Nacional de Rio de Janeiro . . . . .	5
1.2.3. Parqueaderos Club el Nogal . . . . .	6
1.2.4. Edificio Avianca . . . . .	6
1.3. Justificación . . . . .	7
1.4. Objetivos . . . . .	8
1.4.1. Objetivo General . . . . .	8
1.4.2. Objetivos Específicos . . . . .	8
1.5. Alcance . . . . .	8
<b>2. Descripción de la problemática</b>	<b>9</b>
2.1. Definiciones . . . . .	9
2.2. Efectos de las altas temperaturas sobre elementos estructurales . . . . .	10
2.3. Estado del conocimiento . . . . .	11
2.3.1. Propagación de las temperaturas ocasionadas por el fuego . . . . .	12
2.3.2. Estructuras sometidas a cargas de fuego . . . . .	13
2.3.3. Modelación matemática de las solicitaciones de fuego . . . . .	16
2.3.4. Aplicación de OpenSees a la modelación del fuego . . . . .	18
2.3.5. Disposiciones, reglamentos y normativa . . . . .	20
2.4. Enfoques de diseño que consideran la influencia de altas temperaturas . . . . .	31
2.4.1. Procedimiento o enfoque prescriptivo . . . . .	33
2.4.2. Procedimiento o enfoque prestacional . . . . .	34
2.4.3. Metodología adoptada en este trabajo . . . . .	35

<b>3. Construcción del modelo matemático y propuesta de los casos de estudio</b>	<b>36</b>
3.1. Comportamiento del material . . . . .	36
3.1.1. Propiedades mecánicas . . . . .	36
3.1.2. Propiedades físicas . . . . .	37
3.1.3. Curva Esfuerzo-Deformación . . . . .	37
3.1.4. Efecto de la temperatura . . . . .	38
3.2. Consideraciones sobre el sistema estructural . . . . .	40
3.2.1. Configuración estructural tipo A: CE-A . . . . .	40
3.2.2. Configuración estructural tipo B: CE-B . . . . .	41
3.2.3. Configuración estructural tipo C: CE-C . . . . .	42
3.3. Consideraciones sobre las conexiones y apoyos . . . . .	42
3.4. Consideraciones sobre solicitaciones convencionales . . . . .	43
3.5. Propuestas de modelos que consideran el efecto fuego como una solicitación . . . . .	45
3.5.1. Efecto del fuego sobre el comportamiento del material: EF-M . . . . .	46
3.5.2. Efecto del fuego sobre el comportamiento de la sección transversal: EF-S . . . . .	46
3.6. Escenarios de exposición al fuego en sistemas apertados . . . . .	47
3.6.1. Escenario de exposición al fuego en todas las celdas reticulares: EEF-C . . . . .	48
3.6.2. Escenario de exposición al fuego en forma de tablero ajedrez: EEF-A . . . . .	48
3.6.3. Efecto del fuego considerando su comportamiento como una curva de tiempo-temperatura: EF-TT . . . . .	48
3.7. Panorama de los casos de estudio propuestos . . . . .	52
3.8. Dimensionamiento de los elementos estructurales en acero . . . . .	54
3.8.1. Dimensionamiento de vigas . . . . .	54
3.8.2. Dimensionamiento de columnas . . . . .	56
<b>4. Descripción de las herramientas computacionales empleadas</b>	<b>58</b>
4.1. Elección de las herramientas computacionales . . . . .	58
4.2. OpenSees . . . . .	59
4.2.1. Alojamiento de la plataforma y descarga del software . . . . .	60
4.2.2. Instalación . . . . .	61
4.2.3. Gestión de archivos . . . . .	62
4.2.4. Primeros pasos . . . . .	62
4.2.5. Comandos y sintaxis . . . . .	63
4.3. Notepad++ . . . . .	72
4.3.1. Descarga e instalación . . . . .	73
4.3.2. Uso . . . . .	74
4.4. SAP2000 . . . . .	74
4.4.1. Descarga e instalación . . . . .	74
4.4.2. Uso . . . . .	74
4.5. Otros programas usados en este trabajo . . . . .	80

<b>5. Implementación de los casos de estudio propuestos</b>	<b>81</b>
5.1. Implementación de la afectación del módulo de elasticidad . . . . .	83
5.1.1. Implementación en OpenSees . . . . .	83
5.1.2. Implementación en SAP2000 . . . . .	85
5.2. Implementación de la afectación de la sección transversal . . . . .	90
5.3. Implementación del efecto del fuego como sollicitación . . . . .	91
5.3.1. Implementación del fuego en OpenSees . . . . .	91
5.3.2. Implementación en SAP2000 . . . . .	93
<b>6. Resultados de los casos de estudio propuestos y validación</b>	<b>95</b>
6.1. Panorama de los casos de los estudiados . . . . .	95
6.1.1. CASO CE-A: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . .	97
6.1.2. CASO CE-A: CA-E/EF-S/EEF-C . . . . .	102
6.1.3. CASO CE-A: CA-E/EF-TT/EEF-C . . . . .	105
6.1.4. CASO CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . .	107
6.1.5. CASO CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A . . . . .	111
6.1.6. CASO CE-B: CA-E/EF-S/EEF-C . . . . .	115
6.1.7. CASO CE-B: CA-E/EF-S/EEF-A . . . . .	117
6.1.8. CASO CE-B: CA-E/EF-TT/EEF-C . . . . .	119
6.1.9. CASO CE-B: CA-E/EF-TT/EEF-A . . . . .	121
6.1.10. CASO CE-C: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . .	123
6.1.11. CASO CE-C: CA-E/EF-M/EEF-A . . . . .	126
6.1.12. CASO CE-C: CA-E/EF-S/EEF-C . . . . .	130
6.1.13. CASO CE-C: CA-E/EF-S/EEF-A . . . . .	133
6.1.14. CASO CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-C . . . . .	136
6.1.15. CASO CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-A . . . . .	138
6.1.16. CASO CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-C . . . . .	140
6.1.17. CASO CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-A . . . . .	142
6.2. Discusión de resultados . . . . .	143
6.3. Caso de validación . . . . .	146
<b>7. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>151</b>
7.1. Conclusiones sobre la modelación del fuego . . . . .	151
7.2. Conclusiones sobre la implementación . . . . .	151
7.3. Conclusiones sobre los resultados . . . . .	152
7.4. Recomendaciones . . . . .	154
<b>A. Anexo: Resultados obtenidos en OpenSees. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A</b>	<b>155</b>
<b>B. Anexo: Resultados obtenidos en SAP2000. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A</b>	<b>156</b>

---

<b>C. Anexo: Resultados de OpenSees. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A</b>	<b>157</b>
<b>D. Anexo: Resultados de SAP2000 en Excel. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A</b>	<b>158</b>
<b>E. Anexo: Resultados de OpenSees y SAP2000 organizados en Excel. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A</b>	<b>159</b>
<b>F. Anexo: Manejo de resultados de OpenSees. Caso CE-A: CA-E/EF-TT/EEF-C</b>	<b>160</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>161</b>

# Lista de Tablas

- 2-1. Conductividad térmica del bambú. Tomado y traducido de [22] . . . . . 15
- 2-2. Propiedades del acero a temperaturas elevadas. Adaptada de *Tabla F.2.18.2-1 NSR-10*[6] . . . . . 28
  
- 3-1. Módulo de Elasticidad del acero a temperaturas elevadas *NSR-10 con referencia en la Tabla F.2.18.2-1* [6] . . . . . 46
- 3-2. Panorama de los casos de estudio propuestos que considera diferentes configuraciones y exposiciones al fuego . . . . . 53
  
- 4-1. Comando para creación del modelo en OpenSees. Adaptado de [16] . . . . . 64
- 4-2. Comando para creación de nodos en OpenSees. Adaptado de [16] . . . . . 65
- 4-3. Comando para restricción de nodos en OpenSees. Adaptado de [16] . . . . . 65
- 4-4. Comando para creación de elementos elásticos en OpenSees. Adaptado de [16] . . . . . 66
- 4-5. Comando serie de tiempo lineal en OpenSees. Adaptado de [16] . . . . . 67
- 4-6. Comando patrones de carga de OpenSees. Adaptado de [16] . . . . . 67
- 4-7. Comando carga nodal en OpenSees. Adaptado de [16] . . . . . 68
- 4-8. Comando carga asignada a elementos OpenSees. Adaptado de [16] . . . . . 68
- 4-9. Comando material afectado por temperatura OpenSees. Adaptado de [16] . . . . . 69
- 4-10. Comando acción térmica en OpenSees. Adaptado de [16] . . . . . 70
- 4-11. Comando carga térmica en OpenSees. Adaptado de [16] . . . . . 70
- 4-12. Comando imprimir en OpenSees. Adaptado de [16] . . . . . 72
  
- 6-1. Panorama de los 17 casos de estudio desarrollados que consideran parámetros de configuración estructural, exposición al fuego y condición de apoyos. . . . . 96
- 6-2. Resumen de los desplazamientos en los nudos bajo temperaturas de 20°C, 316°C, 538°C y 649°C. Caso CE-A: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . . 98
- 6-3. Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo temperatura ambiente. Caso CE-A: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . . 99
- 6-4. Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 316°C. Caso CE-A: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . . 100
- 6-5. Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 538°C. Caso CE-A: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . . 100
- 6-6. Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 649°C. Caso CE-A: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . . 101

<b>6-7.</b> Resumen de los desplazamientos en los nudos sin y con afectación de la sección transversal. Caso CE-A: CA-E/EF-S/EEF-C . . . . .	103
<b>6-8.</b> Resumen de las acciones internas de fuerzas en condición normal. Caso CE-A: CA-E/EF-S/EEF-C . . . . .	103
<b>6-9.</b> Resumen de las acciones internas de fuerzas afectando la sección transversal. Caso CE-A: CA-E/EF-S/EEF-C . . . . .	104
<b>6-10.</b> Resumen de los desplazamientos en los nudos bajo temperaturas de 20°C, 316°C, 538°C y 649°C. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . .	108
<b>6-11.</b> Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo temperatura ambiente. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . .	109
<b>6-12.</b> Resumen de acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 316°C. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . .	109
<b>6-13.</b> Resumen de acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 538°C. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . .	110
<b>6-14.</b> Resumen de acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 649°C. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . .	110
<b>6-15.</b> Resumen de los desplazamientos en los nudos bajo temperaturas de 20°C, 316°C, 538°C y 649°C. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A . . . . .	112
<b>6-16.</b> Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo temperatura ambiente. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A . . . . .	113
<b>6-17.</b> Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 316°C. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A . . . . .	113
<b>6-18.</b> Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 538°C. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A . . . . .	113
<b>6-19.</b> Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 649°C. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A . . . . .	114
<b>6-20.</b> Resumen de los desplazamientos en los nudos sin y con afectación de la sección transversal. Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-C . . . . .	115
<b>6-21.</b> Resumen de acciones internas de fuerzas en condición normal. Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-C . . . . .	116
<b>6-22.</b> Resumen de acciones internas de fuerzas afectando la sección transversal. Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-C . . . . .	116
<b>6-23.</b> Resumen de los desplazamientos en los nudos sin y con afectación de la sección transversal. Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-A . . . . .	117
<b>6-24.</b> Resumen de acciones internas de fuerzas en condición normal. Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-A . . . . .	118
<b>6-25.</b> Resumen de acciones internas de fuerzas afectando la sección transversal. Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-A . . . . .	118
<b>6-26.</b> Resumen de los desplazamientos en los nudos bajo temperaturas de 20°C, 316°C, 538°C y 649°C. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . .	124

---

<b>6-27.</b> Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo temperatura ambiente. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . .	125
<b>6-28.</b> Resumen de los desplazamientos en los nudos bajo temperaturas de 20°C, 316°C, 538°C y 649°C. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-A . . . . .	127
<b>6-29.</b> Resumen de acciones internas de fuerzas bajo temperatura ambiente. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-A . . . . .	128
<b>6-30.</b> Resumen de acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 316°C. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-A . . . . .	128
<b>6-31.</b> Resumen de acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 538°C. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-A . . . . .	129
<b>6-32.</b> Resumen de acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 649°C. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-A . . . . .	129
<b>6-33.</b> Resumen de desplazamientos en los nudos sin y con afectación de la sección transversal. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-C . . . . .	131
<b>6-34.</b> Resumen de acciones internas de fuerzas en condición normal. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-C . . . . .	131
<b>6-35.</b> Resumen de acciones internas de fuerzas afectando la sección transversal. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-C . . . . .	132
<b>6-36.</b> Resumen de desplazamientos en los nudos sin y con afectación de la sección transversal. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-A . . . . .	134
<b>6-37.</b> Resumen de las acciones internas de fuerza en condición normal. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-A . . . . .	134
<b>6-38.</b> Resumen de las acciones internas de fuerzas afectando la sección transversal. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-A . . . . .	135



# Lista de Figuras

<b>1-1.</b>	Incendio de la catedral de Notre Dame. Tomado de [68] . . . . .	4
<b>1-2.</b>	Incendio Museo Nacional de Rio de Janeiro. Tomada de [41]. . . . .	5
<b>1-3.</b>	Incendio Parqueadero Club Nogal. Tomado de [58]. . . . .	6
<b>1-4.</b>	Incendio Edificio Avianca [26]. . . . .	7
<b>2-1.</b>	Triángulo y tetraedro del fuego. Adaptado de la referencia [20] . . . . .	12
<b>2-2.</b>	Curvas resultado de estudio de la referencia. Tomado de [13] . . . . .	13
<b>2-3.</b>	Temperatura interna para muretes de mampostería. Tomado de [57] . . . . .	16
<b>2-4.</b>	Curvas experimentales y teóricas de tiempo - temperatura. Tomada de [51]. . . . .	16
<b>2-5.</b>	Curvas estandarizadas de tiempo - temperatura. Tomado de [57]. . . . .	17
<b>2-6.</b>	Curva temperatura-desplazamiento. Tomado de [35]. . . . .	18
<b>2-7.</b>	Curva temperatura-desplazamiento. Tomado de [40]. . . . .	19
<b>2-8.</b>	implementación de OpenSees. Adaptado de [39]. . . . .	20
<b>2-9.</b>	Curvas de tiempo - temperatura ISO 834 construida por la autora con base en [32]. . . . .	22
<b>2-10.</b>	Curvas de tiempo - temperatura ASTM E119 construida por la autora con base en [11]. . . . .	23
<b>2-11.</b>	Curva de Calor del acero - temperatura. Tomada de [66]. . . . .	25
<b>2-12.</b>	Descripción de análisis. Adaptada de [15] . . . . .	31
<b>2-13.</b>	Matriz de modelos de fuego y respuesta estructural. Adaptado de [15] . . . . .	32
<b>2-14.</b>	Procedimiento de cálculo -Enfoque Prescriptivo. Adaptado de [65] . . . . .	33
<b>2-15.</b>	Descripción de análisis -Enfoque Prestacional. Adaptado de [65] . . . . .	34
<b>3-1.</b>	Curva Esfuerzo Vs. Deformación para varios grados de acero según ASTM. Tomado de [11] . . . . .	37
<b>3-2.</b>	Curva Esfuerzo Vs. Temperatura para acero A36. Tomado de [18] . . . . .	38
<b>3-3.</b>	Geometría, numeración nodos y elementos, CE-A. . . . .	41
<b>3-4.</b>	Geometría, numeración nodos y elementos, CE-B. . . . .	41
<b>3-5.</b>	Geometría, numeración nodos y elementos, CE-C. . . . .	42
<b>3-6.</b>	Disposición y orientación de los elementos viga-columna. Fuente propia. . . . .	43
<b>3-7.</b>	Asignación de cargas CE-A . . . . .	44
<b>3-8.</b>	Asignación de cargas CE-B . . . . .	45
<b>3-9.</b>	Asignación de cargas CE-C . . . . .	45
<b>3-10.</b>	Afectación de la sección transversal bajo influencia de Altas Temperaturas . . . . .	47

<b>3-11.</b> Curva de calor Iso 834 utilizada para el análisis. Adaptada de [32] . . . . .	49
<b>3-12.</b> Afectación del área trasversal de la viga bajo influencia de Altas Temperaturas -CE:A . . . . .	50
<b>3-13.</b> Afectación del área trasversal de la viga bajo influencia de Altas Temperaturas -CE:B . . . . .	50
<b>3-14.</b> Afectación del área trasversal de la viga bajo influencia de Altas Temperaturas en un vano -CE:B . . . . .	51
<b>3-15.</b> Afectación del área trasversal de la viga bajo influencia de Altas Temperaturas -CE:C . . . . .	51
<b>3-16.</b> Afectación del área trasversal de la viga bajo influencia de Altas Temperaturas en dos vanos -CE:C . . . . .	52
<b>3-17.</b> Diagrama de cortante y momento de la viga . . . . .	54
<b>3-18.</b> Propiedades perfil IPE300 . . . . .	55
<b>3-19.</b> Propiedades perfil HEA400 . . . . .	57
<b>4-1.</b> Ingreso a la página OpenSees. Tomada de [16]. . . . .	60
<b>4-2.</b> Links de descarga OpenSees. Tomada de [16]. . . . .	61
<b>4-3.</b> Visualización de la ventana de Opensees. . . . .	61
<b>4-4.</b> Visualización de ejecución de Opensees. . . . .	63
<b>4-5.</b> Enfoque conceptual de funcionamiento de OpenSees. Tomado de [16]. . . . .	63
<b>4-6.</b> Dominio de OpenSees. Tomado de [16]. . . . .	64
<b>4-7.</b> Links de descarga Notepad++. Tomado de [31]. . . . .	73
<b>4-8.</b> Archivos de descarga Notepad++. Tomado de [31]. . . . .	73
<b>4-9.</b> Visualización de la ventana Notepad++ [31]. . . . .	74
<b>4-10.</b> Creación modelo nuevo SAP2000 [21]. . . . .	75
<b>4-11.</b> Creación materiales SAP2000 [21]. . . . .	76
<b>4-12.</b> Creación secciones SAP2000 [21]. . . . .	76
<b>4-13.</b> Creación patrones de carga SAP2000 [21]. . . . .	77
<b>4-14.</b> Definición casos de carga SAP2000 [21]. . . . .	77
<b>4-15.</b> Definición casos de carga SAP2000 [21]. . . . .	78
<b>4-16.</b> Asignación carga distribuida SAP2000 [21]. . . . .	78
<b>4-17.</b> Asignación carga puntual SAP2000 [21]. . . . .	79
<b>4-18.</b> Definición casos de carga SAP2000 [21]. . . . .	79
<b>5-1.</b> Diagrama de flujo que indica la metodología propuesta. . . . .	82
<b>5-2.</b> Creación modelo, creación de nodos -CE:A en OpenSees . . . . .	83
<b>5-3.</b> Creación elementos -CE:A en OpenSees . . . . .	84
<b>5-4.</b> Asignación de cargas, creación elementos -CE:A en OpenSees . . . . .	85
<b>5-5.</b> Material bajo temperatura 316°C -CE:A en SAP2000 . . . . .	86
<b>5-6.</b> Material bajo temperatura 538°C -CE:A en SAP2000 . . . . .	86
<b>5-7.</b> Material bajo temperatura 649°C -CE:A en SAP2000 . . . . .	87

<b>5-8.</b> Material bajo temperatura 316°C -CE:B en SAP2000 . . . . .	87
<b>5-9.</b> Material bajo temperatura 538°C -Ce:B en SAP2000 . . . . .	88
<b>5-10.</b> Material bajo temperatura 649°C -CE:B en SAP2000 . . . . .	88
<b>5-11.</b> Material bajo temperatura 316°C -CE:C en SAP2000 . . . . .	89
<b>5-12.</b> Material bajo temperatura 538°C -CE:C en SAP2000 . . . . .	89
<b>5-13.</b> Material bajo temperatura 649°C -CE:C en SAP2000 . . . . .	90
<b>5-14.</b> Área transversal de perfil siendo afectado por altas temperaturas . . . . .	91
<b>5-15.</b> Discretización viga -Pórtico A en OpenSees . . . . .	91
<b>5-16.</b> Discretización viga -CE:A en OpenSees . . . . .	92
<b>5-17.</b> Discretización viga por nodos CE:A en OpenSees . . . . .	92
<b>5-18.</b> Discretización viga por elementos -CE:A en OpenSees . . . . .	93
<b>5-19.</b> Discretización viga longitudinalmente -CE:A en OpenSees . . . . .	93
<b>5-20.</b> Discretización viga -CE:A en OpenSees . . . . .	93
<b>6-1.</b> Pórtico de una nave y un piso afectando el módulo de elasticidad. Caso CE-A: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . .	97
<b>6-2.</b> Pórtico de una nave y un piso afectando la sección transversal. Caso CE-A: CA-E/EF-S/EEF-C . . . . .	102
<b>6-3.</b> Pórtico de una nave y un piso bajo consideraciones directas de fuego. CASO CE-A: CA-E/EF-TT/EEF-C . . . . .	105
<b>6-4.</b> Curvas desplazamiento-Temperatura de los elementos 1, 2 y 3. Caso CE-A: CA-E/EF-TT/EEF-C . . . . .	106
<b>6-5.</b> Pórtico de dos naves y un piso afectando el módulo de elasticidad. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . .	107
<b>6-6.</b> Pórtico de dos naves y un piso afectando el módulo de elasticidad alternada- mente. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A . . . . .	111
<b>6-7.</b> Pórtico de dos naves y un piso afectando la sección transversal. Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-C . . . . .	115
<b>6-8.</b> Pórtico de dos naves y un piso afectando la sección transversal alternadamen- te. Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-A . . . . .	117
<b>6-9.</b> Pórtico de dos naves y un piso bajo consideraciones directas de fuego. Caso CE-B: CA-E/EF-TT/EEF-C . . . . .	119
<b>6-10.</b> Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 1 a 5. Caso CE-B: CA- E/EF-TT/EEF-C . . . . .	119
<b>6-11.</b> Pórtico de dos naves y un piso bajo consideraciones directas de fuego alter- nadamente. Caso CE-B: CA-E/EF-TT/EEF-A . . . . .	121
<b>6-12.</b> Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 1 a 5. Caso CE-B: CA- E/EF-TT/EEF-A . . . . .	121
<b>6-13.</b> Pórtico de dos naves y dos pisos afectando el módulo de elasticidad. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-C . . . . .	123

<b>6-14.</b> Pórtico de dos naves y dos pisos afectando el módulo de elasticidad alternadamente. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-A . . . . .	126
<b>6-15.</b> Pórtico de dos naves y dos pisos afectando la sección transversal. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-C . . . . .	130
<b>6-16.</b> Pórtico de dos naves y dos pisos afectando la sección transversal alternadamente. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-A . . . . .	133
<b>6-17.</b> Pórtico de dos naves y dos pisos bajo consideraciones directas de fuego. Caso CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-C . . . . .	136
<b>6-18.</b> Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 1 a 5 del primer piso. Caso CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-C . . . . .	136
<b>6-19.</b> Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 6 a 10 del segundo piso. Caso CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-C . . . . .	137
<b>6-20.</b> Pórtico de dos naves y dos pisos bajo consideraciones directas de fuego alternadamente. Caso CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-A . . . . .	138
<b>6-21.</b> Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 1 a 5 del primer piso. Caso CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-A . . . . .	138
<b>6-22.</b> Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 6 a 10 del segundo piso. Caso CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-A . . . . .	139
<b>6-23.</b> Pórtico de dos naves y dos pisos bajo consideraciones directas de fuego. Caso CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-C . . . . .	140
<b>6-24.</b> Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 1 a 5 del primer piso. Caso CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-C . . . . .	140
<b>6-25.</b> Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 6 a 10 del segundo piso. Caso CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-C . . . . .	141
<b>6-26.</b> Pórtico de dos naves y dos pisos bajo consideraciones directas de fuego alternadamente. Caso CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-A . . . . .	142
<b>6-27.</b> Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 1 a 5 del primer piso. Caso CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-A . . . . .	142
<b>6-28.</b> Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 6 a 10 del segundo piso. Caso CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-A . . . . .	143
<b>6-29.</b> Comparación de desplazamientos y fuerzas para el Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C y el Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A . . . . .	144
<b>6-30.</b> Comparación de desplazamientos y fuerzas para el Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-C y el Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-A . . . . .	144
<b>6-31.</b> Comparación de desplazamientos para todas las condiciones de exposición de la configuración estructural C . . . . .	145
<b>6-32.</b> Esquema de prueba de un pórtico de acero según Jiang y Usmani. Tomado de [35] . . . . .	147
<b>6-33.</b> Afectación del Módulo de Elasticidad bajo influencia de Altas Temperaturas . . . . .	148

---

<b>6-34.</b> Desplazamiento de un miembro estructural tipo viga bajo influencias de altas temperaturas . . . . .	149
<b>6-35.</b> Desplazamientos horizontales en los nodos 2 y 3 . . . . .	150

# Lista de símbolos

## Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
$A$	Área	$m^2$
$A_g$	Área Bruta	$mm^2$
$E$	Módulo de elasticidad del acero	$MPa$
$C_w$	Módulo de alabeo	$cm^6$
$E_d$	Valor del efecto de las acciones a temperatura normal de acuerdo con las situaciones persistentes o transitorias	
$E_{d,fi}$	Constante de diseño de efecto de las acciones en situación de incendio en el tiempo	
$E_{(T)}$	Módulo de elasticidad del acero a temperaturas elevadas	$MPa$
$F_{p(T)}$	Límite de proporcionalidad a temperaturas elevadas	$MPa$
$F_u$	Resistencia a tensión mínima especificada	$MPa$
$F_{u(T)}$	Resistencia a tensión mínima especificada del acero a temperaturas elevadas	$MPa$
$F_y$	Esfuerzo de fluencia mínimo especificado	$MPa$
$F_{y(T)}$	Esfuerzo de fluencia mínimo especificado para el acero a altas temperaturas	$MPa$
$G$	Módulo de elasticidad a cortante del acero	$MPa$
$G_{(T)}$	Módulo de elasticidad a cortante del acero a temperaturas elevadas	$MPa$
$I$	Momento de inercia referido al eje de flexión correspondiente	$cm^4$
$J$	Módulo de torsión	$cm^4$
$K$	Factor de longitud efectiva	

Símbolo	Término	Unidad SI
$K_x$	Factor de longitud para pandeo por flexión alrededor del eje x	
$K_y$	Factor de longitud para pandeo por flexión alrededor del eje y	
$L$	Longitud	$m$
$L_x$	Longitud no arriostrada de un miembro en el plano x en que se considera el pandeo	$mm$
$L_y$	Longitud no arriostrada de un miembro en el plano y en que se considera el pandeo	$mm$
$M_n$	Resistencia nominal a flexión	$N.mm$
$M_p$	Momento plástico nominal a flexión	$N.mm$
$M_r$	Resistencia a flexión esperada	$N.mm$
$M_u$	Resistencia requerida a flexión	$N.mm$
$N_i$	Carga ficticia lateral aplicada en el nivel i	$N$
$R_{d,fi,t}$	Resistencia en situación de incendio en el tiempo	
$S$	Módulo resistente elástico referido al eje de flexión correspondiente	$cm^3$
$T$	Temperatura	$^{\circ}C$
$Y_i$	Carga gravitacional aplicada en el el nivel i	$N$
$Z_x$	Módulo de sección plástica con respecto al eje x	$mm^3$
$b_f$	Ancho aleta	$mm$
$f_c$	Resistencia a la compresión del concreto	$MPa$
$f_{c,\theta}$	Resistencia a la compresión del concreto bajo influencia de temperatura	$MPa$
$f_{c,k}$	Resistencia a la compresión del concreto a temperatura ambiente ( $20^{\circ}C$ )	$MPa$
$m$	Masa	$kg$
$k_{c,k}$	Factor de reducción de resistencia del concreto en la temperatura $\theta$	
$r$	Radio de giro referido al eje de flexión correspondiente	$cm$
$r_0$	Radio de giro referido al centro de corte	$cm$

Símbolo	Término	Unidad SI
$t$	Tiempo	$s$
$w$	Carga distribuida	$kN/m$

## Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término
$\varepsilon$	Deformación
$\delta$	Desplazamiento
$\eta_{fi}$	Factor de reducción o nivel de carga en situación de incendio
$\phi$	Factor de resistencia
$\nu$	Relación de poisson
$\eta_{fi}$	Factor de reducción o nivel de carga en situación de incendio

## Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>AIS</i>	Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica
<i>AISI</i>	American Iron and Steel Institute
<i>ANRACI</i>	Asociación nacional de rociadores contra incendio
<i>ASTM</i>	American society for testing and materials
<i>CEN</i>	Comité Européen de Normalization
<i>DL</i>	Carga muerta
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization
<i>JSON</i>	JavaScript Object Notation



---

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
<i>LL</i>	Carga Viva
<i>DLE</i>	Diccionario de la lengua española
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>NFPA</i>	National Fire Protection Association
<i>NTC</i>	Norma técnica colombiana
<i>NSR – 10</i>	Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)
<i>Ref.</i>	Referencia
<i>PRM</i>	Pórtico Resistente a Momento

# 1. Introducción

El comportamiento de estructuras reticulares de acero bajo influencia de altas temperaturas es un estudio, que si bien no es desconocido, está en proceso de implementación en las normativas de construcción de la mayoría de los países. Con el paso de los años se han presenciado incendios que han deteriorado las estructuras y en algunos casos las han llevado al colapso. Se puede encontrar que en muchas de las estructuras afectadas no se ha tenido en cuenta la protección al fuego así como tampoco se ha contemplado la posibilidad de diseñar estructuras resistente a este factor.

En Colombia, la caracterización de la acción del fuego como un patrón de carga está en proceso de implementación con el propósito de integrarlo en el análisis estructural. Si bien, en el reglamento que rige las construcciones en el país, existen algunos apartes del referido que resaltan la protección de la estructura posterior al diseño y a la construcción, prescindiendo de la resistencia de la misma en condiciones bajo efectos de altas temperaturas.

Este estudio pretende incorporar el fuego como una sollicitación dentro del análisis estructural de una estructura convencional de acero, contemplando los factores que de esto se disponga, como la reducción del módulo de elasticidad o el área efectiva de los elementos estructurales, o la incorporación misma del factor directo del fuego mediante curvas de calor, para obtener la respuesta de la estructura en desplazamientos bajo los efectos de altas temperaturas. Para llevar a cabo esta investigación se hace uso de dos software de diseño estructural.

Pese a que en el mercado existen maneras de protección de estructuras de acero mediante productos aplicables posterior al diseño, lo que se denomina protección activa, cabe la necesidad de tener las consideraciones mínimas durante el diseño para obtener estructuras más resistentes, y así mismo conservar tanto la vida como la edificación.

## 1.1. Motivación

En Colombia las estructuras, ya sea de acero, concreto, mampostería o madera, se diseñan, fundamentalmente, para que sean resistentes ante un sismo. La normativa colombiana NSR-10 [6] considera el efecto del fuego como una serie de prescripciones que tienen por función garantizar, durante algún tiempo, la estabilidad de una estructura bajo fuego y salvaguardar la vida. No existe un protocolo o metodología explícita en la normativa, orientada hacia el

diseño de edificaciones para soportar diferentes intensidades de fuego. Dentro del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resiste NSR-10 se encuentra: Título J -Requisitos de protección contra incendios en edificaciones; Título K -Requisitos complementarios, que tiene algunos apartes en referencia a la protección del fuego; además, para estructuras en acero, material principal de este estudio, la norma contiene el capítulo F.2.18 -Diseño para condiciones de incendio.

A nivel internacional existen diferentes metodologías que contemplan cómo considerar el incremento de temperaturas en las edificaciones, como el análisis mediante elementos finitos [67]. Por tratarse de un origen no mecánico se denominan estas solicitaciones como *solicitaciones de carácter excepcional*, siendo la normativa internacional la que incluye dichas solicitaciones, tales como [19], [65] y [66].

En referencia a la modelación de la solicitación del fuego y su incorporación dentro del análisis para una estructura íntegramente resistente, así como su comportamiento y respuesta, surge la siguiente pregunta: ¿cómo se puede modelar en forma aproximada un evento de incendio y cuál es el comportamiento de la estructura sometida a dichas solicitaciones?

Por lo expuesto anteriormente, aprovechando los recursos tecnológicos y la variedad de programas que se encuentran en el mercado, así como su uso para optimizar el diseño estructural, surge la necesidad que el modelo considere las solicitaciones a las que en realidad se ve expuesta una estructura, de modo que los resultados sean eficientes en pro del óptimo funcionamiento estructural y en aras siempre de que la prestación del servicio ampare a sus usuarios.

## 1.2. Antecedentes

Los incendios en edificaciones han acompañado permanentemente su evolución y desarrollo, independientemente del material empleado [28]. En el campo ingenieril ha habido estudios [42] [13] [59], más que para analizar el comportamiento de la estructura, para definir los materiales resistentes al fuego hasta la evacuación completa del personal.

Generalmente, se busca que las estructuras resistan un incendio hasta que se haya evacuado la totalidad de los ocupantes. En consecuencia, se diseña la protección al fuego posterior al diseño de la estructura, es cuando surgen las empresas dedicadas a la protección activa bajo efecto de altas temperaturas provocadas por un incendio. En el mercado se puede encontrar muchos productos que después de muchas pruebas garantizan un tiempo de evacuación. Entre muchos de estos mecanismos que tienen el propósito de detectar y extinguir el fuego, se encuentran:

- Detección y alarmas de incendio: sistemas que una vez que se genere el humo de un incendio alerta al personal
- Sistema de espuma de baja, mediana y alta expansión
- Sistema de dióxido de carbono
- Rociadores
- Sistema de extinción químico seco y húmedo
- Sistema de niebla de agua
- Sistema de extinción de agente limpio
- Extintores portátiles

Por otro lado, el comercio presenta tecnologías aplicadas a la protección pasiva, algunos productos como:

- Recubrimientos: anticorrosivos, acabados básicos o decorativos
- Morteros Ignífugos
- Pinturas intumescentes
- Placas y paneles

Los sistemas hidráulicos deben cumplir con prueba, inspección y mantenimiento de acuerdo con lo establecido en las normas NFPA [48].

Algunas debilidades, ya sea la protección pasiva o activa, es que no se considere especificaciones, falta de definición de espesores, especificaciones sin determinación de la temperatura crítica, tiempo de protección no definidos o mal calculados, especificación de materiales sin tener en cuenta las características del lugar, condiciones climáticas, proceso de instalación, entre otras.

En cuanto se refiere a protección pasiva, relacionado en el enfoque prescriptivo, la norma colombiana NSR-10 [6] en su Título J presenta condiciones de acuerdo al uso, en ese orden de ideas, se muestra parámetros arquitectónicos del manejo de áreas para el debido proceso de evacuación en caso de incendio, es decir se dispone de una serie de pasos que se debe cumplir, como dimensionamiento mínimo de accesos (escaleras, puertas, corredores), señalización, localización de alarmas y de los diferentes sistemas de extinción contemplados dentro de la protección activa.

Las estructuras bajo condiciones de altas temperaturas se han venido estudiando desde el siglo XIX con el primer manual contra incendios, que surgió en los Estados Unidos, teniendo

como principal objetivo promover el trabajo de las aseguradoras [50]. Sin embargo, quizá por los materiales combustibles o por malas prácticas del manejo controlado del fuego, generados ocasionalmente por imprudencias, los incendios se siguen presentando. Algunos casos muy particulares se citan a continuación, donde estructuras de gran valor social y cultural han sido afectadas por incendios incontrolables:

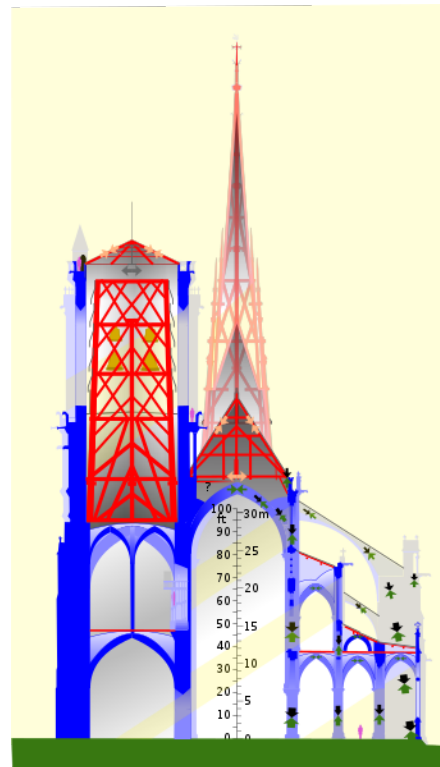
### 1.2.1. Catedral de Notre Dame

Un incendio que llamó la atención mundial, se presentó el 15 de abril del año 2019 en una edificación que es de gran importancia para la historia y la cultura. Se trata del incendio de la Catedral de Notre Dame en París.

La causa del incendio de tan majestuosa estructura es atribuida a un accidente en las reparaciones de la aguja de la catedral durante trabajos de mantenimiento. Luego del colapso de una parte de la edificación, se encontraron daños localizados en las vigas de la cubierta y en algunas bóvedas. En la figura 1.1(a) se muestra el aspecto de la Catedral en llamas y en la figura 1.1(b) se indica un esquema de los elementos afectados.



(a) Incendio del tejado de Notre Dame



(b) Esquema de daño: vigas (rojo) y bóvedas (azul)

**Figura 1-1.:** Incendio de la catedral de Notre Dame. Tomado de [68]

A tres años del siniestro, el avance de la restauración es positivo y se estima que hacia el año 2024 esté completamente ejecutada. La reconstrucción de Notre Dame ha tenido excelentes noticias para la historia y la conservación, a inicios de 2022, se descubrió un sarcófago antropomorfo de plomo del siglo XIV y los restos de “elementos esculpidos policromos” que se cree pertenecieron al antiguo coro alto de la catedral, construido hacia 1230 y destruido a comienzos del siglo XVIII [52].

Existe una gran cantidad de proyectos con inclinación a una intervención contemporánea y se ha podido sintetizar por el artículo citado en [45] en siete categorías, vinculadas a las principales corrientes de pensamiento sobre la historia de la arquitectura contemporánea. Las siete categorías se pueden considerar así: catedral del futuro, perspectiva que une el pasado gótico con capacidad tecnológica; arquitecturas de otros lugares, producción arquitectónica en la era de la globalización; desarrollo sustentable, categoría en la cual participa el arquitecto colombiano Leonardo Nepa con su propuesta de paneles solares y el aprovechamiento de aguas lluvias; el simbolismo del agua y el universo psicológico, conceptualización del agua con base en significados bíblicos; París Ciudad luz, retoma a la ciudad como un centro de modernidad; eternidad de la catástrofe, estrategia turística de rescatar lugares donde han sucedido desastres; y finalmente las inclusión de las tecnologías de comunicación.

### 1.2.2. Museo Nacional de Rio de Janeiro

El 2 de septiembre de 2018 ocurrió en Rio de Janeiro un incendio que dejó una pérdida incalculable para la cultura y la historia de Brasil; ese día las llamas consumieron el Museo Nacional que lleva el mismo nombre de la ciudad. Los daños ocurrieron en los tres pisos de la edificación y hubo desplome total de la cubierta, así como se muestra en la figura 1-2.

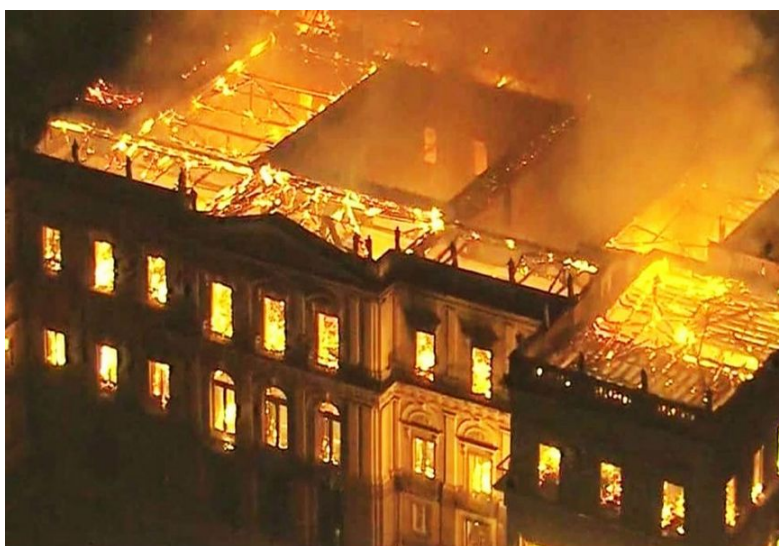


Figura 1-2.: Incendio Museo Nacional de Rio de Janeiro. Tomada de [41].

El proyecto de restauración del Museo Nacional de Rio de Janeiro fue elaborado por *Atelier de Arquitectura e Desecho Urbano* y por *H+F Arquitectos*. Este grupo de profesionales optó por dejar algunas paredes que fueron afectadas por el fuego como forma de preservación de la eventualidad. En consecuencia, se espera que en el 2022 sea inaugurado un bloque, tal como se indica en el sitio oficial del Consejo de Arquitectura y Urbanismo de Rio de Janeiro [33].

### 1.2.3. Parquaderos Club el Nogal

El 7 de febrero de 2003 un carro bomba explotó en las instalaciones del club Nogal en Bogotá [58], la detonación fue causada por 200 kg de explosivos a manos de grupos terroristas e inmediatamente después comenzó un incendio. Como resultado, la explosión dejó 200 personas heridas y 36 muertos. En cuanto a los daños de la edificación se evidenció daño en las placas y elementos no estructurales.



**Figura 1-3.:** Incendio Parquadero Club Nogal. Tomado de [58].

Desafortunadamente la inseguridad y los grupos armados en Colombia no contribuyen con la conservación de las estructuras del país. En la figura **1-3** se puede observar el cuerpo de bomberos tratando de extinguir el fuego del segundo piso de la edificación. El uso de este edificio era de garaje o parquaderos, condición con alta posibilidad de que ocurra una explosión debido al combustible de los vehículos.

### 1.2.4. Edificio Avianca

El 23 de julio de 1973, hacia las 7 de la mañana inició el incendio en el piso 14 del edificio de Avianca, localizado en la ciudad de Bogotá, en el piso almacenaban muchos objetos entre

los cuales había alfombras, tapetes y gasolina. Las llamas se extendieron hasta el piso 37. El siniestro dejó 4 muertos, 63 heridos y 24 pisos en ruinas, de acuerdo con [54]. En cuanto a la estructura no sufrió daños considerables.



**Figura 1-4.:** Incendio Edificio Avianca [26].

En la figura 1-4 se muestra que el incendio se generó en los pisos de la parte media en la altura del edificio, no se evidencia en la figura colapso ni desplome de este.

### **1.3. Justificación**

La ocurrencia de incendios dentro de edificaciones depende más que todo de su propagación, lo cual se puede controlar y extinguir mediante la protección activa. Sin embargo, el abordaje del comportamiento de estructuras bajo condiciones de incendio atiende más que todo a requerimientos mínimos, definidos en las normativas constructivas de cada país. De este modo, surge la necesidad de investigar acerca de la implementación del fuego, partiendo de los requerimientos mínimos por normativa y haciendo uso de herramientas computacionales. La implementación del efecto del fuego pretende obtener un análisis matemático, con el cual se determine el comportamiento de las estructuras bajo las sollicitaciones de altas temperaturas.



## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Determinar el comportamiento de una estructura reticular y convencional construida en acero, bajo el efecto de las altas temperaturas desarrolladas por un evento tipo incendio.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Modelar el comportamiento de la acción del fuego mediante el uso y la adaptación de curvas de intensidad (fuego) aplicables al caso de edificaciones convencionales de acero.
- Implementar la sollicitación del fuego, en términos del tiempo y exposición sobre un software de análisis estructural, aplicada a estructuras reticulares en acero.
- Realizar un estudio paramétrico de la correlación entre curvas de fuego y el modelo implementado, verificar y validar los resultados obtenidos mediante casos reportados en la literatura o mediante software académico de libre distribución.

## **1.5. Alcance**

Esta investigación tiene un enfoque principalmente en el comportamiento de estructuras de acero reticulares en el plano con incidencia de altas temperaturas generadas por un incendio. Cada una de estas estructuras se estudian desde tres aspectos: afectación del material de la estructura, afectación de la sección transversal y por último implementación de curvas tiempo-temperatura.

Cada uno de estos modelos de estudio se aborda haciendo uso de herramientas computacionales con las cuales se modela las diferentes estructuras suministrando la sollicitación del caso. Esta modelación se logra con el uso del programa OpenSees [16], de cuyos resultados se compara con los resultados arrojados por el software comercial SAP2000 [21].

## 2. Descripción de la problemática

En este capítulo se definen los conceptos básicos sobre el comportamiento de estructuras expuestas a altas temperaturas con el objeto de facilitar la comprensión del tema. Además, se describe la problemática y algunos conceptos de carácter práctico que sirven de referencia al presente trabajo. Finalmente, el capítulo concluye con la presentación del estado del conocimiento sobre el tema de estudio, donde se consignan algunos avances investigativos y de implementación relacionados con este trabajo. Como por ejemplo, el *enfoque de diseño prescriptivo* y el *enfoque de diseño prestacional*.

### 2.1. Definiciones

Para desarrollar el presente trabajo se consideraron las siguientes definiciones básicas, tomadas textualmente del capítulo F de la NSR-10 [6] y usadas con frecuencia en la literatura especializada [65] [66]:

- *Fuego: reacción química bajo el efecto de tres componentes, una fuente de activación que es el calor, sobre elementos que generan combustión, propagados en áreas que como comburentes contienen oxígeno. Sin uno de los tres componentes no se genera fuego.*
- *Incendio: fuego destructivo que se manifiesta por alguna de las siguientes características: luz, llama, calor o humo.*
- *Protección activa: materiales y sistema de construcción que se activan con el fuego para mitigar los efectos adversos o dar aviso a las personas de manera que tomen alguna acción que mitigue dichos efectos.*
- *Protección pasiva: materiales y sistemas de construcción que tienen la propiedad de resistir los efectos del fuego sin requerir mecanismos externos de activación.*
- *Clasificación de resistencia al fuego: período de tiempo durante el cual un elemento, componente o sistema de la edificación sostiene su capacidad de mantener un incendio o continúa cumpliendo con su función estructural, determinado por medio de ensayos o métodos basados en ensayos.*
- *Carga ficticia: bajo el método de análisis directo, carga virtual que se aplica en el análisis estructural para tener en cuenta efectos desestabilizadores que no se están considerando en otra parte del diseño.*

- *Diseño prescriptivo: método de diseño basado en la demostración del cumplimiento de los criterios generales establecidos por una norma.*
- *Diseño prestacional: diseño basado en la resistencia que debe presentar una estructura bajo condiciones de alta temperatura.*
- *Resistencia al fuego: propiedad de los sistemas que les permite prevenir o retardar el paso excesivo de calor, gases calientes o llamas bajo condiciones de uso y seguir cumpliendo la función requerida.*
- *Temperaturas elevadas o altas temperaturas: condiciones de calentamiento que experimenta la estructura o los elementos de una edificación como resultado de un incendio, las cuales son mayores que las condiciones ambientales normales.*
- *Transferencia de calor por convención: corresponde a la transferencia de energía térmica desde un punto de mayor temperatura a un punto de menor temperatura a través del movimiento de un medio.*
- *Masividad<sup>1</sup>: en un elemento de acero es la relación entre el perímetro expuesto al fuego y el área de la sección transversal o volumen del elemento.*

## 2.2. Efectos de las altas temperaturas sobre elementos estructurales

Las afectaciones de estructuras debido a los incendios han dejado muchas incertidumbres en el modo de diseño de las mismas, generalmente porque en el diseño no está previsto considerar el efecto de altas temperaturas, como por ejemplo, la exposición al fuego generado por un incendio. Existen numerosos reportes [13] [48] [51] formulando medidas acerca de como mejorar los materiales utilizados para resistir un incendio. Especialmente aquellos materiales usados como acabados, aunque también se formulan requerimientos para los materiales estructurales. No obstante, los incendios seguirán siendo siempre una fuente de información que permite realizar el seguimiento a algunos materiales así como, mejorar las metodologías de diseño estructural ante el fenómeno del fuego.

Este trabajo de investigación y aplicación tiene un enfoque particular que consiste en considerar la acción de las altas temperaturas como efectos de cargas. Los efectos de carga se deducen a partir de las denominadas curvas de fuego, Eurocodigo [65], NFPA [48], ASTM [11], ISO [32], entre otras, que pueden ser elaboradas a partir de ensayos físicos o de disposiciones normativas. Este trabajo pretende contribuir con elementos novedosos a la solución de la problemática generada por la presencia de altas temperaturas, ocasionadas por incendios,

---

<sup>1</sup>Término incluido en la NSR-10 y no reconocido aún en el DLE

en la modelación de las estructuras. El enfoque descrito corresponde al denominado como *enfoque prestacional*. Aunque el enfoque prestacional no se encuentra regulado en la NSR-10 [6], la información utilizada en este trabajo de investigación corresponde a la consignada en el Eurocódigo [65].

En este trabajo se considera, también, el segundo enfoque en relevancia, el cual corresponde al *enfoque prescriptivo*. Para entender este enfoque, consignado en la NSR-10, se parte de la comparación entre las disposiciones para el diseño de estructuras de concreto, acero, mampostería y madera, con las disposiciones para la protección de edificaciones contra incendios. Mientras que las disposiciones de diseño estructural son claramente una metodología o procedimiento que garantiza su comportamiento, las disposiciones para la protección de fuego son de carácter empírico, basado en ensayos reales. Por ejemplo, algunas disposiciones de carácter prescriptivo corresponden a la ubicación de las escaleras de evacuación, la distribución del sistema de rociadores, las puertas o barreras contra fuego, aplicación de pinturas de recubrimiento o intumescentes, entre otras. El cumplimiento de estas disposiciones se lleva a cabo después del diseño estructural e incluso después de la construcción. Algunas disposiciones de carácter prestacional consignadas en el mismo código pueden ser las dimensiones de los elementos estructurales para garantizar el control de derivas o control de deflexiones o vibraciones. Estas últimas disposiciones obedecen a la construcción de un modelo matemático que debe cumplir los requerimientos indicados.

A partir de los argumentos expuestos anteriormente, se puede decir que la norma colombiana NSR-10 [6] tiene principalmente un enfoque prescriptivo; aunque se está trabajando en la formulación de un enfoque prestacional [56]. Se puede apreciar, que aunque los dos enfoques aportan a un mismo fin, que consiste en proteger la vida, resistir un tiempo determinado sin que haya colisión hasta no evacuar completamente la totalidad de las personas, su metodología de aplicación es diferente.

## 2.3. Estado del conocimiento

Con el propósito de estudiar el efecto de las altas temperaturas ocasionadas por incendios sobre las edificaciones, en esta sección se presenta, en síntesis, la información relevante que fue utilizada para el desarrollo de esta investigación. Inicialmente, se introduce al comportamiento del fuego, seguidamente, se expone la incidencia del fuego en las estructuras, luego, se presenta un enfoque sobre los estudios basados en la herramienta OpenSees. También se relaciona, en este estado del conocimiento, algunos aspectos normativos así como los enfoques de diseño prestacional y prescriptivo.

### 2.3.1. Propagación de las temperaturas ocasionadas por el fuego

El fuego es un elemento básico, que con uso controlado sirve para satisfacer las necesidades del ser humano en la medida que genera calor, proporciona luz, permiten la cocción de los alimentos, entre otras. Sin embargo, la propagación de fuego en manera desmedida y descontrolada genera un incendio que perjudica desde bienes materiales hasta vidas humanas.

El fuego ha sido importante desde la evolución del hombre hasta el desarrollo de la civilización, por lo cual se debe considerar su comportamiento. Este comportamiento se muestra en la figura 2-1 denominada el *triángulo y tetraedro del fuego*. El triángulo del fuego hace referencia a la generación del fuego teniendo en cuenta tres factores indispensables: combustible, calor y oxígeno. En forma general, el fuego se presenta cada vez que una sustancia (combustible) es capaz de arder a través de una reacción con un comburente (oxígeno) en presencia de una energía de activación (calor) [63]. Su propagación en el tiempo y espacio, se define como la reacción en cadena, que unido con el concepto del triángulo del fuego conllevan al concepto denominado Tetraedro del fuego.

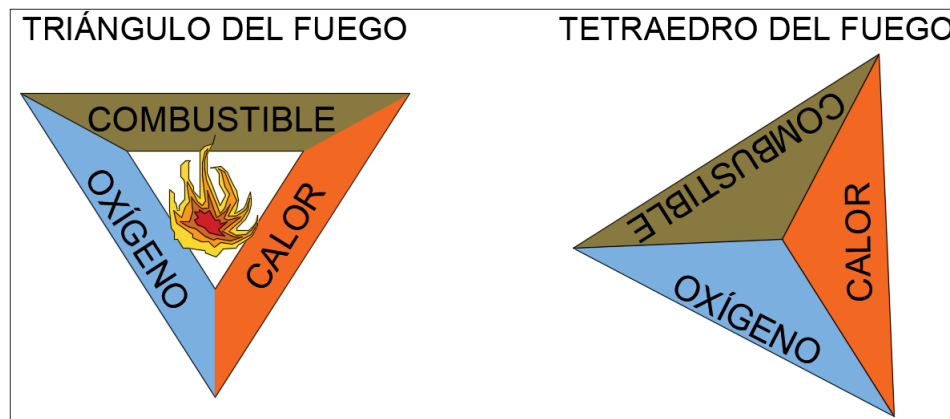


Figura 2-1.: Triángulo y tetraedro del fuego. Adaptado de la referencia [20]

En la literatura [20] [63] se encuentra algunas características relevantes de los componentes del fuego, como que el oxígeno se encuentra en un 21 % aproximadamente del volumen de aire y que para la producción de fuego se necesita de 16 %. Por otro lado, la mayoría de los elementos combustibles son de tipo orgánico con presencia de hidrógeno y oxígeno. Algunos elementos combustibles son madera, material textil, carbón, papel, cuero, azúcar, aluminio, magnesio, fósforo azufre, gasolina, alcohol, pintura, barniz, aceite, gas natural, propano, hidrógeno acetileno, entre otros. En cuanto a la fuente de calor, se considera de llama abierta al sol, por otro lado está la fricción como acción química, la energía eléctrica y la compresión de los gases.

Es importante tener en cuenta que para que se presente un incendio existen cuatro fases:

inicio, debe activarse el triangulo del fuego; desarrollo, el oxígeno permite que el fuego se desenvuelva; propagación, el aumento de la temperatura hace que otros elementos participen, esta es la fase de más cuidado porque el oxígeno tiende a disminuir y los gases a aumentar; y extinción, el agotamiento del combustible hace que el incendio se termine, no obstante, la extinción hace referencia cuando el fuego es finalizado por el hombre [63].

### 2.3.2. Estructuras sometidas a cargas de fuego

Hacia la década de 1970 se formuló el Método de Margaret Law [42], en el cual sus desarrolladores observaron que los proyectos tradicionales de seguridad contra incendios en los edificios no eran suficientemente flexibles, ni eran adecuados para considerar los requerimientos arquitectónicos modernos en las construcciones de edificaciones. En esa época se diseñaban los elementos estructurales externos de la misma forma que los elementos estructurales internos. Siendo estos últimos los más expuestos en condición de un incendio, de manera que, surge la necesidad de diseñar estos elementos con mayores exigencias desde el punto de vista de las solicitaciones de altas temperaturas. El método de Margaret Law fue estudiado por [59], del cual se determina que el aumento de la temperatura de un elemento de acero sometido a solicitaciones de altas temperaturas es proporcional a su factor de masividad y cuanto mayor sea el factor de masividad menos robusto es el elemento con mayor rapidez se va a calentar. Por otro lado y en complemento con el estudio, otros investigadores [13] establecen que la temperatura del acero no es función del factor de masividad de los elementos, es decir es independiente a la sección de los materiales.

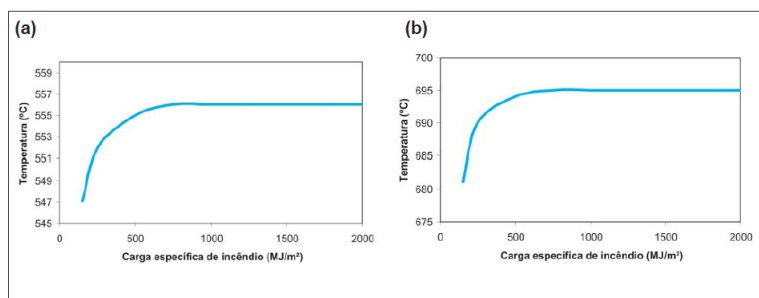


Figura 4 - Variação da temperatura com a carga específica do incêndio. (a) Pilar (b) Viga.

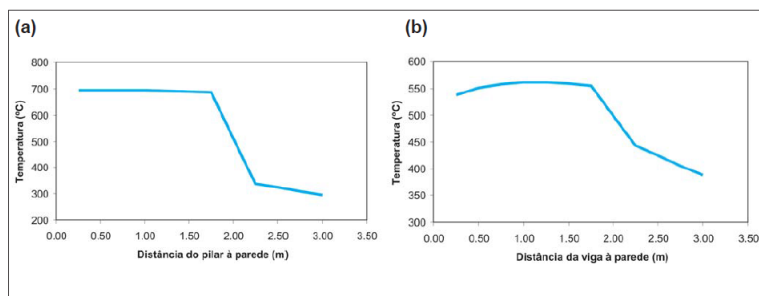


Figura 2-2.: Curvas resultado de estudio de la referencia. Tomado de [13]

Los investigadores [13] muestran las curvas resultados de sus análisis, tal como se indica en la figura 2-2, donde en la parte superior, se muestra los resultados de vigas y columnas que a medida que aumenta la temperatura la carga específica crece hasta alcanzar una temperatura constante de aproximadamente 556°C para columnas y 695°C para vigas; por otra parte, también muestra que el fuego estando a una distancia de 0.50m, las columnas experimentan una temperatura de hasta 700°C mientras que a esa misma distancia las vigas alcanzan una temperatura de 550°C.

La resistencia al fuego se logra, con frecuencia, aplicando protección contra incendios a los miembros estructurales, condición que aumenta el costo del edificio. En el Reino Unido se presentan grandes avances en la inclusión del fuego [60]. Inclusión, que corresponde con un incremento porcentual de carga muerta en los elementos que están protegidos. De esta forma, se implementa un *análisis progresivo* que tiene por función controlar los diferentes niveles de seguridad que debe presentar una edificación. El análisis progresivo consiste en considerar las condiciones de contorno que permitan controlar la presencia de algún tipo de colapso. Para ello, no todos los elementos se deben reforzar y proteger de la misma forma, sino dependiendo de las exigencias a las que será solicitado, mejorando de esta manera la relación costo-beneficio de la estructura.

Si bien, los enfoques de diseño tradicionales [27] [35], que consideran la incidencia de altas temperaturas en las edificaciones, son adecuados para modelar la mayoría de las edificaciones, a pesar de ser costosos, es posible que no presenten confiabilidad para una pequeña cantidad de casos inusuales. La respuesta a este problema es, por supuesto, desarrollar nuevos enfoques de diseño basados en una mayor comprensión cuantitativa de la respuesta de las estructuras sujetas al fuego. El presente trabajo pretende aportar elementos para mejorar la comprensión del fenómeno de las altas temperaturas en las edificaciones.

Los estudios relacionados con las estructuras en madera [14] [55] soportan que pese a ser un material combustible, la madera presenta un buen comportamiento de resistencia frente al fuego, principalmente si se tiene una adecuada protección. Por lo cual, las edificaciones en madera deben estar bajo planificación de combatir y extinguir el fuego. Planificación, que consiste en el aislamiento y protección de la madera expuesta a altas temperaturas de acuerdo a su exposición. Específicamente con material como el bambú [22] con un incremento de temperatura de 10°C/min hasta alcanzar 783°C, la combustión de la parte interna y externa del bambú se comporta de forma diferente; en la parte interna hay una descomposición de los cuerpos mientras que en la parte externa hay división de los bordes.

	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Conductividad térmica (W/mK)	Difusividad (m <sup>2</sup> )/s	Capacidad calorífica (J/kg*K)
Parte externa	0.76	0.28	1.91*10 <sup>7</sup>	1519.63
Parte interna	0.76	0.22	1.79*10 <sup>7</sup>	1747.32

**Tabla 2-1.:** Conductividad térmica del bambú. Tomado y traducido de [22]

En relación a las estructuras de concreto se destaca el estudio desarrollado por la NFPA [48] y el ACI [5]. Se trata de un estudio amplio y detallado, en el cual se indica que los principales efectos de las altas temperaturas sobre las edificaciones en concreto corresponde al cambio de coloración del concreto que se manifiesta en la afectación de su composición química, disminución de la resistencia a la compresión, perdida de sección y afectación del acero de refuerzo. Otros autores, como [53], indican que las construcciones de concreto pueden servir como una barrera resistente al fuego, aunque en otras investigaciones [8] se considere que el comportamiento de las estructuras bajo fuego aún tienen mucho que estudiarse. Para ello, se requiere de un análisis del alcance de la barrera contra el fuego obtenida a partir de la resistencia y las características de la construcción, así como el conjunto de cargas que actúan sobre la misma. También, la investigación [50] indica que la resistencia a la compresión del concreto disminuye en cuanto la temperatura aumenta y se puede obtener por medio de la ecuación 2-1 [3], así mismo disminuye su módulo de elasticidad. Esta última investigación indica que algunos materiales de protección del concreto son: paredes corta fuego, tintas intumescentes, argamasa proyectada contra fuego y láminas de silicato de calcio.

$$f_{c,\theta} = k_{c,\theta} \cdot f_{ck} \quad (2-1)$$

En cuanto al diseño de construcciones de mampostería bajo condiciones de altas temperaturas, estas construcciones se pueden evaluar considerando la presencia de elementos tanto estructurales como no estructurales [5]. El efecto de las altas temperaturas sobre estos tipos de elementos puede comprometer la estabilidad de la edificación. El efecto de las altas temperaturas sobre la mampostería genera un incremento diferencial en la dilatación de los materiales que componen el mampuesto: la pieza de arcilla y el mortero de pega y pañete. En ensayos realizados por [57] a muretes de mampostería se encontró que estos experimentan una reducción en la resistencia a compresión entre 9 % a 83 % para los rangos de 400 C a 800 C. Las fallas reportadas en este estudio evidenciaron un comportamiento de daño o agrietamiento diagonal. De dicha investigación se obtuvo la figura **2-3** que se muestra el resultado térmico del ensayo de 3 muretes de mampostería para diferentes rangos de temperatura, por ejemplo los muretes analizados hasta 200 C duran hasta 450 minutos, mientras los que alcanza una temperatura de 800 C duran hasta aproximadamente 350 minutos.



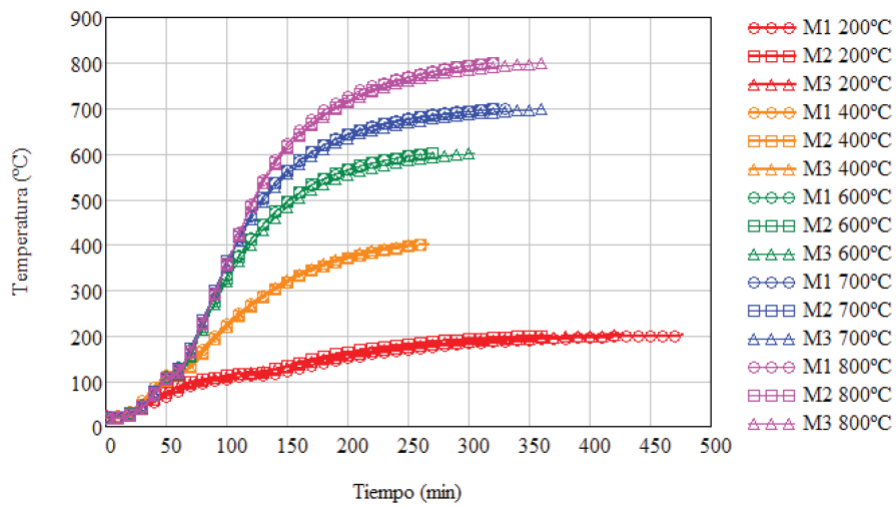


Figura 2-3.: Temperatura interna para muretes de mampostería. Tomado de [57]

### 2.3.3. Modelación matemática de las solicitaciones de fuego

Un medio para representar el efecto del tiempo de duración de los incendios en las estructuras lo constituyen las curvas denominadas como *Curvas de tiempo-temperatura*. Las curvas de tiempo-temperatura son expresiones gráficas que representan el cambio de temperatura en un ensayo experimental en función del tiempo. Su fin es evaluar y comparar el comportamiento de los materiales, de los que están construidas las edificaciones.

La figura 2-4 muestra un conjunto de curvas típicas tiempo-temperatura obtenidas experimental y teóricamente de ensayos realizados en Suecia [51].

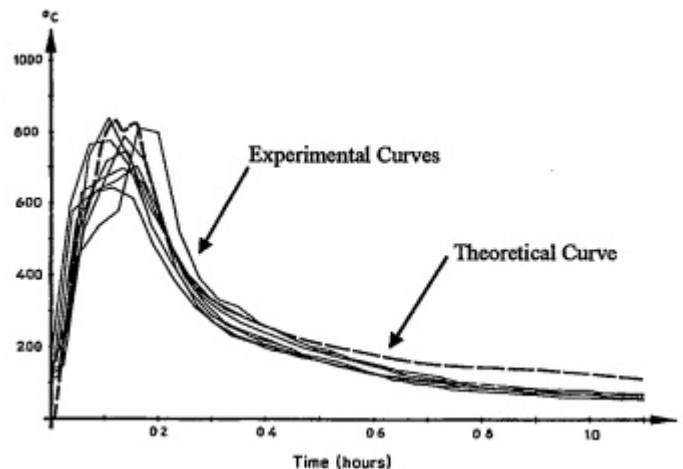


Figura 2-4.: Curvas experimentales y teóricas de tiempo - temperatura. Tomada de [51].

Como se puede apreciar, el incremento de temperatura que se puede desarrollar durante un incendio es significativo. Este incremento puede alterar el comportamiento físico-mecánico del material de construcción si se exceden el tiempo de exposición a altas temperaturas. En segunda instancia, se pueda apreciar, también, que las temperaturas más altas se generan durante los primeros minutos de duración de un incendio debido a la presencia de mayor material combustible y oxígeno. Finalmente, se puede estimar, específicamente, de la figura anterior, que el tiempo de ocurrencia de las máximas temperaturas se extendió por un período comprendido entre los 20 a 30 minutos de duración.

Las siguientes organizaciones ISO (por sus siglas en inglés International Organization for Standardization), ASTM (por sus siglas en inglés American Society for Testing and Materials ) y ONNCCE (por sus siglas en español Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación) tienen a disposición una serie de curvas tiempo-temperatura normalizadas que sirven como referencia para establecer los criterios de diseño y como medio de verificación y validación de investigaciones relacionadas con el impacto de altas temperaturas. La normalización de estas curvas consiste en la definición de unos protocolos sobre el material, temperaturas y duración del fuego a partir de un ensayo controlado. Es decir, las curvas pueden ser reproducidas con un alto grado de confiabilidad siempre y cuando se sigan los protocolos establecidos.

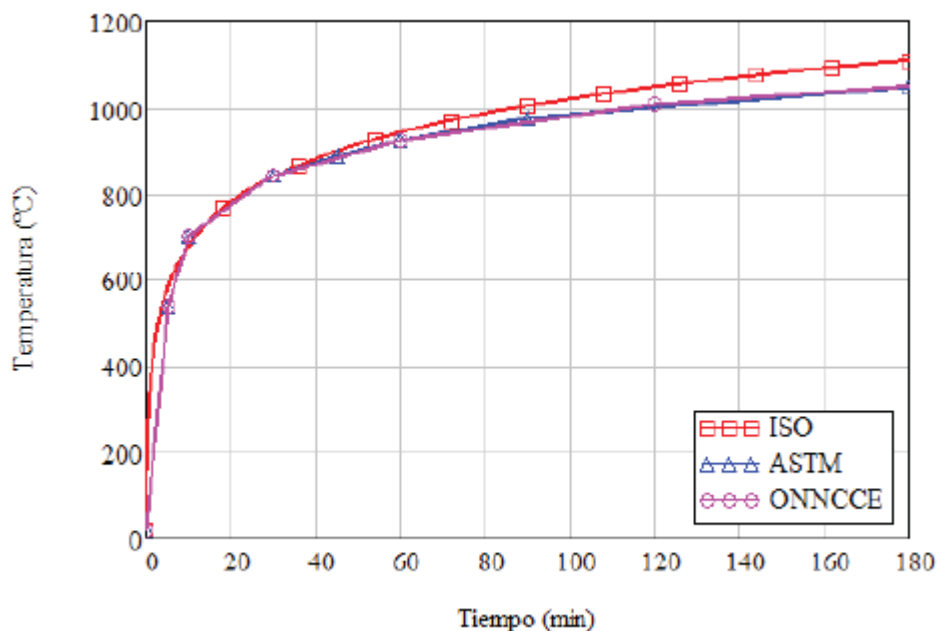


Figura 2-5.: Curvas estandarizadas de tiempo - temperatura. Tomado de [57].

Las curvas de tiempo-temperatura muestran el entorno de las superficies de los elementos que están expuestos al fuego en función del tiempo. En la figura 2-5 se puede diferenciar

tres curvas estandarizadas que hasta 180 minutos de propagación del fuego pueden alcanzar temperaturas de hasta 1000°C.

### 2.3.4. Aplicación de OpenSees a la modelación del fuego

La implementación del fuego en estructuras puede estudiarse a partir de los resultados de un elemento. Por ejemplo, en el estudio de una viga de acero empotrada y expuesta al fuego, desarrollada en OpenSees [35], da como respuesta la degradación del material, lo que significa la reducción de la capacidad de resistencia del material debido al incremento de la temperatura. La reducción se debe a la degradación del módulo de elasticidad y el límite elástico del material a temperatura elevada, es de considerar en este estudio que el desequilibrio entre la carga externa y la resistencia disminuida conduce a una mayor deformación. De esta investigación se puede apreciar en la figura 2-6 como de 0°C a 500°C el desplazamiento aumenta y a partir de 500°C el desplazamiento comienza a disminuir.

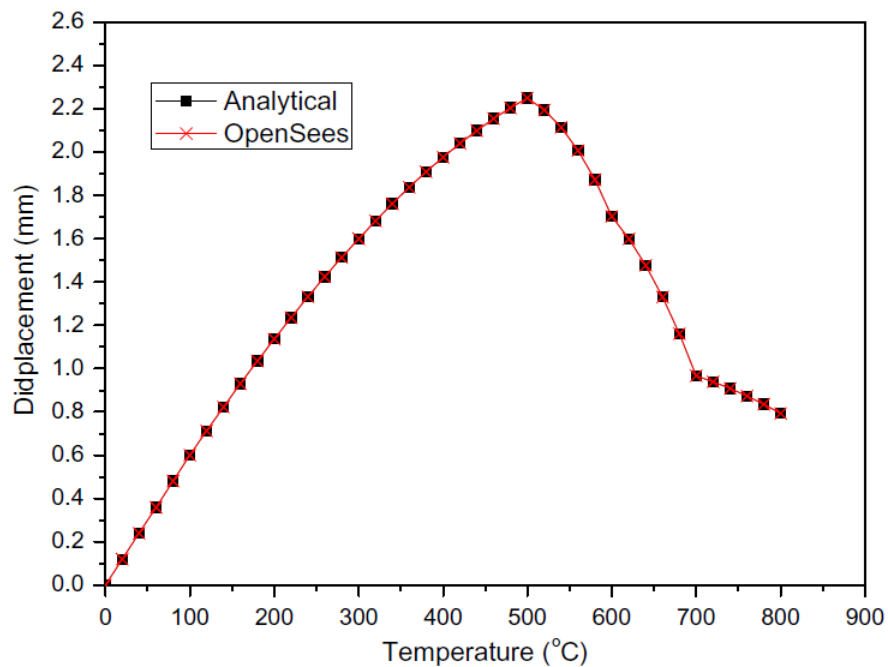
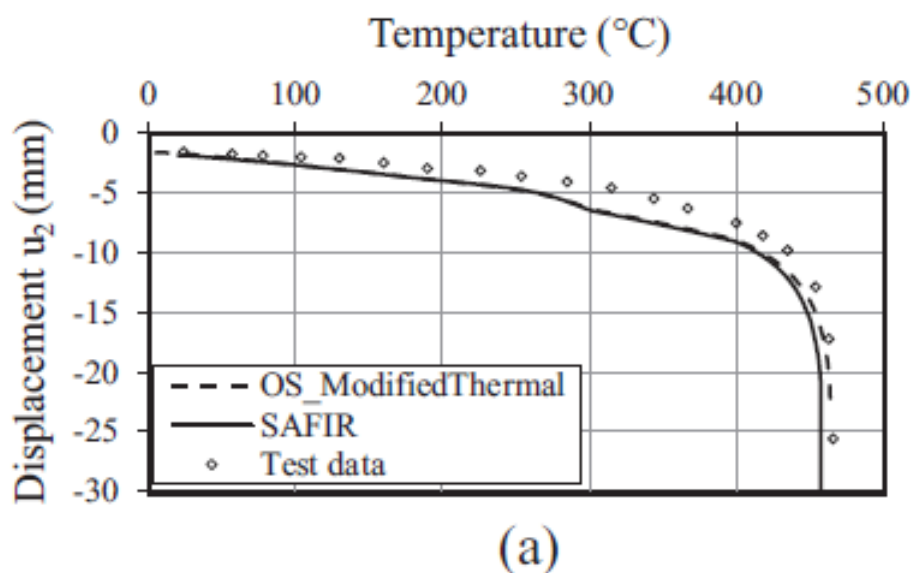


Figura 2-6.: Curva temperatura-desplazamiento. Tomado de [35].

Ocasionalmente, después de un sismo cabe la posibilidad de que dentro de una edificación se genere un incendio. En la literatura se encontró un estudio relacionado al fuego en una estructura de acero ocasionado después de un sismo, modelado en OpenSees [40]. Este estudio indica que el análisis térmico debe iniciarse desde un estado de deformación en cero y que es posible que durante el enfriamiento no se considere la deformación. En cuanto dura el incendio existe la probabilidad de que se exceda el límite elástico y se generen deformaciones plásticas

resultado de la reducción de rigidez y resistencia del acero expuesto a altas temperaturas. Para el análisis del sismo se restringe los nodos en cada piso para garantizar el movimiento horizontal en conjunto. El análisis del fuego se realizó con la implementación de curvas de temperatura-tiempo utilizando OpenSees. Así, en la figura 2-7 se puede ver una de las curvas resultado de dicha investigación en la que se muestra los desplazamientos bajo influencias de altas temperaturas la cual fue comprobado además con SAFIR.



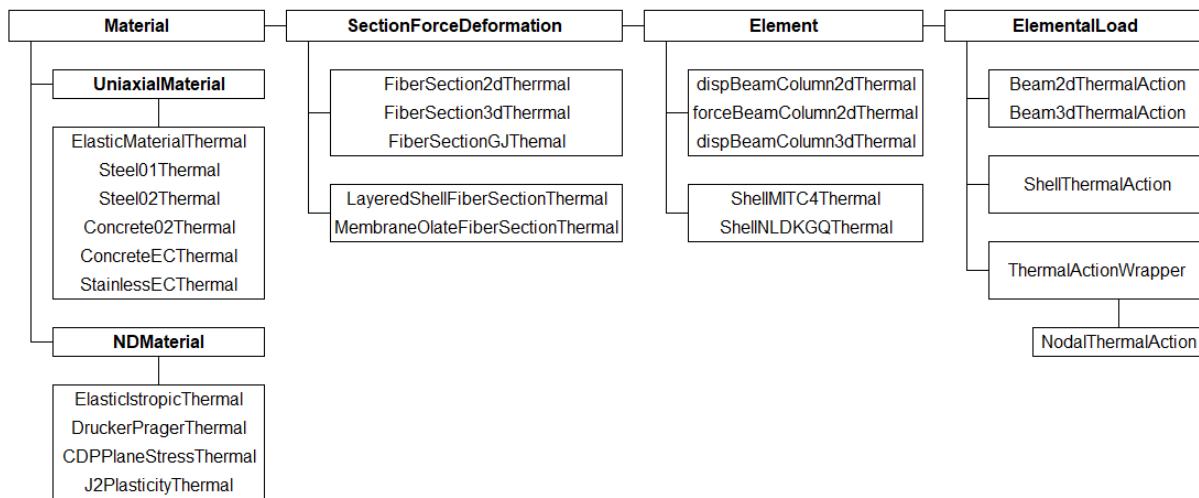
**Figura 2-7.:** Curva temperatura-desplazamiento. Tomado de [40].

Así mismo, la investigación utilizando OpenSees de [34] analiza dos tipos de pórticos, con diferente geometría y tipos de apoyo, se encuentra que la no linealidad geométrica es evidente en la deflexión en la mitad de la luz, pero insignificante en los resultados de rotación y desplazamiento horizontal. A medida que aumenta la temperatura se encuentran las deflexiones dentro del concepto de *efecto de curvatura térmica*, curvatura que se proyecta hacia abajo por la degradación del material a alta temperatura. Si bien, el trabajo de investigación [34] está muy relacionado con el presente trabajo, cabe resaltar que las secciones utilizadas, cargas, condiciones de apoyo, condiciones de implementación y demás consideraciones son diferentes.

En el análisis desarrollado en OpenSees por [36] se presentan un modelo de pórticos en el espacio solicitado a altas temperaturas. De este estudio se deducen dos contribuciones relevantes con el tema de esta investigación: deflexión significativa en elementos de entrepiso se localiza en el centro de la losa y, en cuanto a las columnas, estas conservan su resistencia hasta temperaturas menores a 400°C. El trabajo investigativo concluye con que la implementación del fuego somete a la estructura a condiciones de cargas de piso o solicitaciones mayores debido a su expansión térmica, comportamiento que puede inducir a un colapso

progresivo.

Khan y su grupo de investigadores publicaron en [39] la simulación del fuego actuando sobre una estructura híbrida, específicamente un entrepiso compuesto por vigas de acero soportando placas de concreto. Estos autores encontraron, a partir de la simulación en OpenSees, que la deflexión en una viga simplemente apoyada, bajo temperaturas cercana a los 800 °C, es aproximadamente 2.5 veces mayor que la de la viga equivalente empotrada en sus extremos, después de haber experimentado el fuego durante 130 minutos. Efecto que se debe a que no existe restricción rotacional en las vigas simplemente apoyadas. Los autores concluyen que las condiciones de extremos de los elementos estructurales juegan un papel importante en su comportamiento bajo solicitaciones de fuego. En la siguiente figura 2-8 se presenta un imagen del modelo estructural estructurado para OpenSees.



**Figura 2-8.:** implementación de OpenSees. Adaptado de [39].

Es importante resaltar las investigaciones que se están desarrollando tanto en la plataforma OpenSees como en su uso. OpenSees dispone de un entorno experimental denominado *OpenSees For Fire*, del cual se tomaron algunos comandos en este trabajo. Por otra parte Khan [38] indica que el marco en OpenFIRE está destinado a analizar el comportamiento de grandes estructuras expuestas al fuego, como edificios altos, sin embargo, el comportamiento depende del tipo de elementos expuestos a altas temperaturas.

### 2.3.5. Disposiciones, reglamentos y normativa

Cada país dispone de una serie de normas, reglamentos y especificaciones que le permite garantizar el comportamiento de las estructuras ante diferentes tipos de solicitaciones. En algunos casos por la especificidad de los comportamientos, algunos países prefieren adoptar la normativa generada por países más desarrollados. La aplicación de esta normativa es tan

variada, que en algunos países puede entenderse como especificaciones no vinculantes, mientras que en otros tienen el carácter de ley como el caso colombiano. Para el diseño estructural, con requerimientos adicionales bajo efectos de altas temperaturas, existen diferentes normativas dentro de las que se destaca un gran avance en Europa [65] [66]. En cuanto a Colombia se encuentra en trámite el proceso de actualización de la norma referente al tratamiento de las altas temperaturas en edificaciones. La normativa que regula en Colombia los criterios de aplicación de los efectos térmicos de altas temperaturas en edificaciones corresponde al capítulo J la NSR-10 [6]. Mientras que el capítulo J contiene disposiciones de protección de estructuras en general, la NSR-10 especifica metodologías más detalladas de aplicación para estructuras en acero, en el capítulo F.18.

A continuación, se describen las normas y especificaciones más relevantes para la modelación de estructuras sometidas a altas temperaturas.

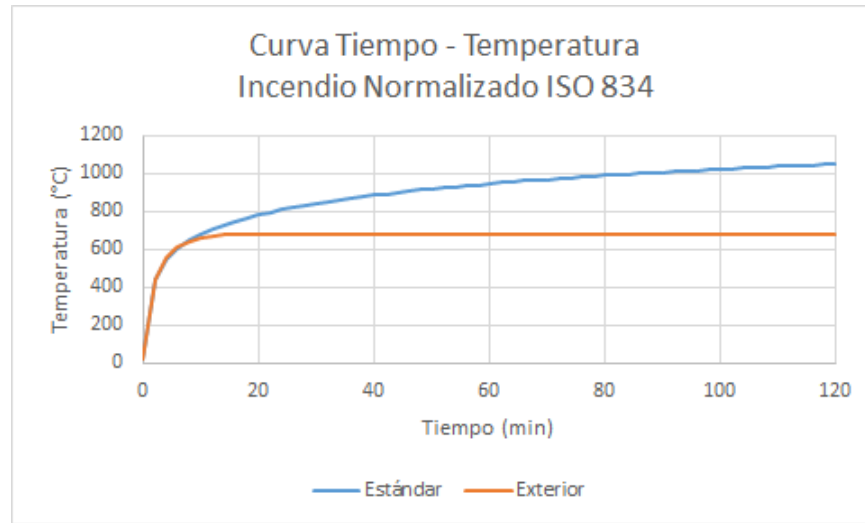
### ISO 834 [32]

LA ISO por sus siglas en inglés International Organization for Standardization, es una organización que desarrolla y publica estándares internacionales. La historia de la ISO comenzó en las oficinas del Instituto de Ingeniero Civiles, en Londres Inglaterra, hacia el año 1946 con 64 representantes delegados de 25 países, tal como se indica en su página oficial [2]. No obstante, es hasta 1947 que la ISO cataloga oficialmente su existencia con 67 comités técnicos. En 1951 publica la primera norma ISO: R1:1951 Temperatura de referencia estándar para mediciones de longitud industrial.

La ISO cuenta con la norma ISO 834 que presenta los procedimientos para determinar la resistencia al fuego cuando se prueban a sí mismos, lo que quiere decir es que la columna se prueba por las cuatro caras aunque en la práctica debe reproducirse las condiciones de exposición adecuadas [32]. La última actualización es la ISO 834-7:2000. De esta norma se extrae la curva tiempo - temperatura definida por las ecuaciones 2-2 y 2-3, y se puede apreciar en la figura 2-9. La organización permite el uso de la norma para aplicación en construcciones siempre que cumpla con el campo de aplicación extendida y se realice por profesionales expertos en construcciones resistentes al fuego.

$$T_{\text{estándar}} = 20 + 345 * \log_{10}(8 * t + 1) \quad (2-2)$$

$$T_{\text{exterior}} = 20 + 660 * (1 - 0,687 * e^{-0,32*t} - 0,313 * e^{-3,8*t}) \quad (2-3)$$



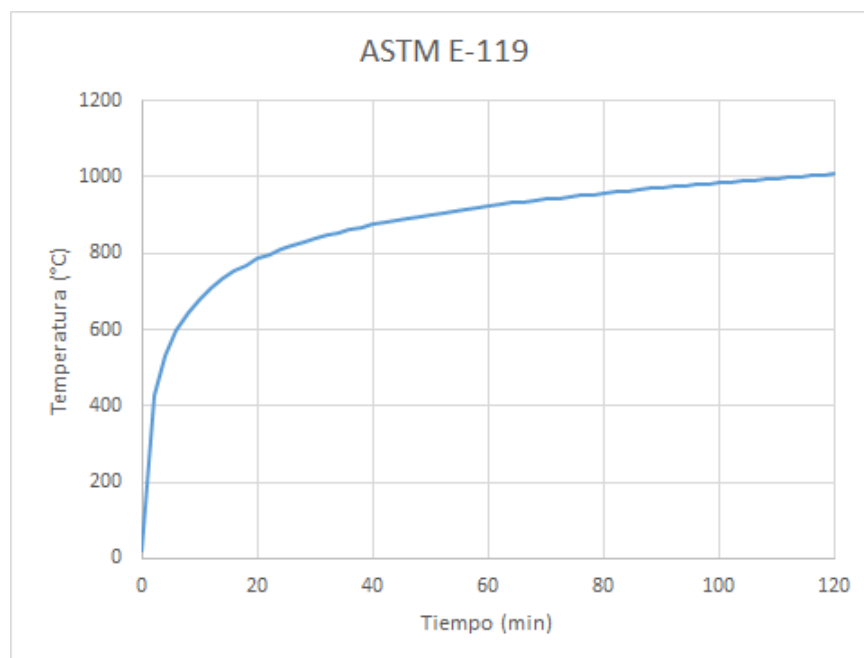
**Figura 2-9.:** Curvas de tiempo - temperatura ISO 834 construida por la autora con base en [32].

### ASTM E119 [11]

La ASTM por sus siglas en inglés American Society for Testing and Materials, es una sociedad fundada en 1898 por Charles Benjamin Dudley, en Estados Unidos. La ASTM desarrolla y publica estándares de consenso voluntario, tienen alrededor de 12.000 normas publicadas, como lo indica en su página oficial [24], su finalidad es mejorar la calidad de los productos y de los sistemas de salud, seguridad, mercadeo, entre otras. Con tecnología de información avanzada, se crean métodos de pruebas, especificaciones, clasificaciones, guías y practicas que apoyan a las industrias y a los gobiernos alrededor del mundo. Los miembros de la ASTM son de todos los rincones del mundo, aproximadamente de 160 países, con más de 36.000 expertos técnicos que trabajan en procesos abiertos y transparentes. Los 24 miembros de la junta directiva hacen parte de industrias, gobierno, academia, organismos nacionales de normalización y consumidores. Todo lo que realiza la ASTM se registra y aprueba en comités técnicos asesorados.

La ASTM cuenta con las pruebas contenidas en E119, los cuales son métodos de pruebas para fuego de construcciones y materiales de edificios, establecen la duración para contener un incendio, volviéndose indispensable para la seguridad contra incendios. Con la ecuación 2-4 se construye la curva tiempo temperatura, figura 2-10 que es implementada por varias normativas, incluyendo la NSR-10 [6].

$$T = 20 + 750 * (1 - e^{-3,79553*t^{1/2}} + 1741 * t^{1/2}) \quad (2-4)$$



**Figura 2-10.:** Curvas de tiempo - temperatura ASTM E119 construida por la autora con base en [11].

### **The Building Regulations 2000 [19]**

El código de construcciones 2000 es la normativa de construcciones para Inglaterra y Gales, entró en rigor el 1 de enero de 2001. Las regulaciones de este reglamento las confiere el Secretario de Estado, en ejercicio de los poderes que le confieren la Ley de Construcción de 1984 y todos los demás poderes que le permiten actuar bajo ese nombre, sin embargo, previamente debe ser consultado con el Comité Asesor de Reglamentos de Construcción y otros órganos representativos.

Este reglamento incluye la sección *Parte B. Seguridad contra incendios*, sin embargo, cabe resaltar que son especificaciones cualitativas y encaminadas a las disposiciones de áreas. Algunas de las cuales son: *B3.—(1) El edificio deberá diseñarse y construirse de modo que, en caso de incendio, se mantenga su estabilidad durante un período razonable; B4-(1) Las paredes externas del edificio deberán resistir adecuadamente la propagación del fuego sobre los muros y de un edificio a otro, teniendo en cuenta la altura, el uso y la posición del edificio; B5.—(1) El edificio debe estar diseñado y construido de modo que brinde instalaciones razonables para ayudar a los bomberos en la protección de la vida [19].*

### **Eurocódigo [65] [66]**

Los Eurocódigos contienen una serie de normas para la ingeniería civil comprendidas en el campo estructural y geotécnico, que son reguladas por el Comité Europeo de Normalización,



CEN, por sus siglas en francés Comité Européen de Normalization. El CEN está conformado por los organismos nacionales de normalización de Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza.

La numeración de los códigos comienza en 1990 y termina en 1999, y su nomenclatura en general está dada de la siguiente manera *EN 199X Eurocódigo X: Título*, donde x es un número entre 0 y 9 correspondiente a la asignación de la numeración. Algunos Eurocódigos presentan carácter experimental en algunos países como España, mientras que en el Reino Unido la totalidad de los Eurocódigos ya están normalizados. Los Eurocódigos en vigencia son:

- EN 1990 Eurocódigo 0: Bases para el cálculo de estructuras
- EN 1991 Eurocódigo 1: Acciones en estructuras
- EN 1992 Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón
- EN 1993 Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero
- EN 1994 Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas
- EN 1995 Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera
- EN 1996 Eurocódigo 6: Proyecto de estructuras de fábrica
- EN 1997 Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico
- EN 1998 Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes
- EN 1999 Eurocódigo 9: Proyecto de estructuras de aluminio

Por la implementación del fuego, los Eurocódigos de interés para este trabajo son EN 1991 Eurocódigo 1 y EN 1993 Eurocódigo 3.

### **EN 1991 Eurocódigo 1: Acciones en estructuras [65]**

Dentro de sus secciones se encuentra *EN 1991-1-2:2002. Acciones en estructuras expuestas al fuego*. Su última versión data noviembre de 2002. Este código describe acciones térmicas y mecánicas para el diseño estructural de edificios expuestos al fuego bajo requerimientos de seguridad. Su objetivo se encamina hacia la protección pasiva contra fuego, lo cual quiere decir que se centra en el diseño estructural para encontrar una adecuada resistencia a la carga para limitar la propagación del fuego.

El calor específico del acero al carbón en función de la temperatura se observa en la figura 2-11, en la cual se puede apreciar que a partir de 700°C la masa de acero comienza a tener un incremento hasta llegar a 5000J/Kg y partir de ahí pierde calor específico.

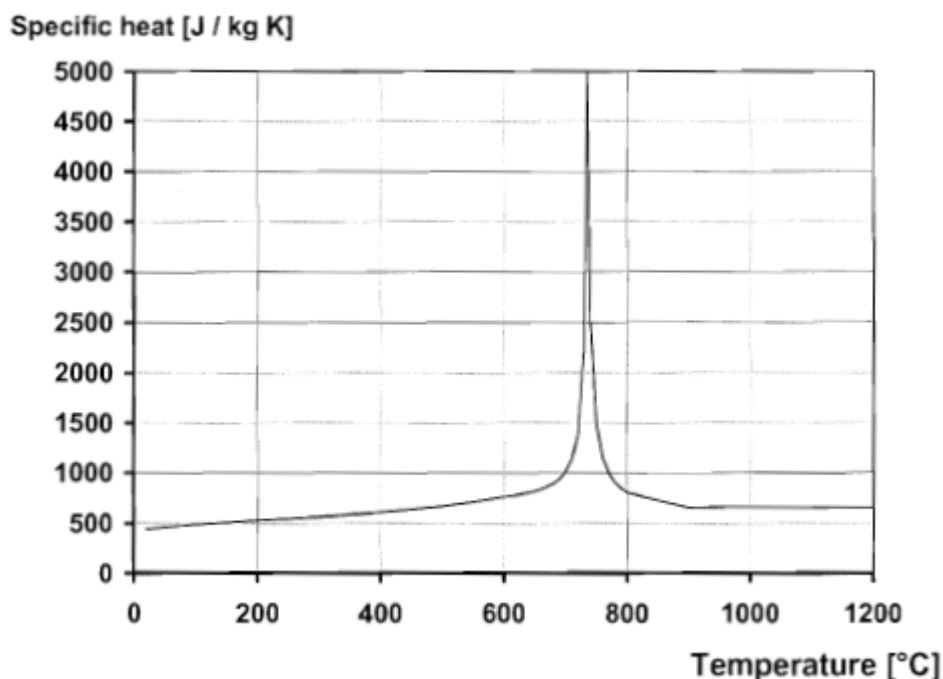


Figura 2-11.: Curva de Calor del acero - temperatura. Tomada de [66].

### EN 1993 Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero [66]

El código está designado al diseño de estructuras en acero y dentro de sus secciones se encuentra *EN 1993-1-2:2005 + AC:2009. Resistencia al fuego*. En esta sección se utiliza el método en el cual la resistencia es protegida durante 240 minutos (4 horas) y la resistencia debe cumplir las ecuaciones 2-5 y 2-6.

$$\frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi,t}} \leq 1 \quad (2-5)$$

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} * E_d \quad (2-6)$$

### ABNT NBR 14323:2013 [4]

La Norma brasileira (Norma brasileira), es regulada por el comité ABNT/CB-002 Construção Civil, por sus siglas en portugués Associação Brasileira de Normas Técnicas (Asociación Brasileira de Normas Técnicas) tiene en vigor la versión *ABNT NBR 14323:2013 Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de*

*incêndio*. Es una norma que utiliza el método de los estados limites para establecer los requisitos mínimos para una estructura de acero y estructuras mixtas (acero y concreto) en situación de incendio.

### **Reglamento colombiano de construcciones sismo resistentes NSR-10 [6]**

A raíz del sismo del 31 de marzo de 1983 que afectó a la ciudad de Popayán, bajo la ley 11 del 23 de junio de 1983 nace la primera normativa colombiana de construcciones sismo resistente que fue expedida por el Gobierno nacional mediante Decreto 1400 del 7 de junio de 1984. Posteriormente, la Ley 400 del 19 de agosto 1997 por la cual el Congreso de la República adopta normas sobre construcciones sismo resistente, se otorga la primera actualización denominada NSR-98, que se expidió mediante decreto 33 del 9 de enero de 1998. Más adelante, se realiza la segunda actualización denominada NSR-10, que fue expedida mediante decreto 926 del 19 de marzo de 2010, sin embargo, se han introducido modificaciones con la expedición de los decretos 2525 del 13 de julio de 2010, 92 del 17 de enero de 2011, 340 del 13 de febrero de 2012 y 945 del 5 de junio de 2017.

Los aspectos técnicos de la NSR-10 son dirigidos por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica y son regulados por la comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

*Las normas sismo resistente presenta requisitos mínimos de diseño para garantizar y salvaguardar las vidas humanas ante la ocurrencia de un sismo fuerte tal como se especifica en [6].*

### **Título J de la NSR-10 [6]**

La Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente NSR-10 contiene el *Título J - Requisitos de protección contra incendios en edificaciones* donde se estipulan requerimientos mínimos con el fin de reducir en las edificaciones el riesgo de incendio, evitar la propagación del fuego tanto dentro de la misma edificación como a edificaciones contiguas, facilitar evacuación y la extinción de un incendio, y minimizar el riesgo de colapso durante la evacuación y extinción del incendio.

Este título presenta una clasificación de las edificaciones por uso y grupo de ocupación. Este capítulo estipula requisitos para la ubicación de redes eléctricas, de gas y otras, así como accesos a la edificación. Por otro lado, da indicaciones preventivas de propagación hacia el exterior e interior de la edificación con la disposición de sistemas de protección. También relaciona las especificaciones de los materiales para acabados que sean resistentes al fuego

Es importante indicar que el cumplimiento de este título es responsabilidad del construc-

tor del proyecto, lo que quiere decir que es una aplicación de la protección activa contra incendios.

### **Título K de la NSR-10 [6]**

La Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente NSR-10 contiene el *Título K - Requisitos complementarios* donde se especifican los grupos de uso y ocupación. También se indica los requisitos mínimos para accesos, medios de señalización, sistemas de evacuación y su debida protección.

En el numeral J.3.5.4 de la NSR-10 [6] se indica que los elementos de acero estructural sin ninguna protección no poseen resistencia contra fuego de más de 15 minutos y solo son apropiadas para uso de especificaciones y recintos que no requieren de protección contra fuego. Por lo que en el título J establecen las condiciones de protección.

Así como el título J, el Título K también atañe la responsabilidad al Constructor de su cumplimiento.

### **Título F.2.18 de la NSR-10 [6]**

La Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente NSR-10 contiene el *Título F - Estructuras metálicas* dentro del cual se encuentra el *Capítulo F.2 - Estructuras de acero con perfiles laminados* referido a los requisitos mínimos de diseño, con los cuales se dimensiona y chequea los miembros estructurales de acero. Este capítulo contiene a su vez, la *Sección F.2.18 - Diseño para condiciones de incendio*, donde se parametrizan los criterios para el diseño y la evaluación de componentes de un sistema de acero estructural en condiciones de incendio, así mismo, prescribe que la estructura deberá ser capaz de tener la resistencia y la capacidad de deformarse de acuerdo a los límites de deformación bajo efectos de altas temperaturas. Otro aspecto relevante que considera esta sección se refiere a la identificación de la trayectoria de carga desde el lugar afectado hasta el punto final de resistencia. También se señala en esta sección que la cimentación se debe diseñar para resistir estas cargas y las deflexiones que por éstas se generen.

De las provisiones generales se debe cumplir con garantizar la resistencia requerida de una estructura y sus elementos, haciendo uso de la combinación de carga dada en F.2.18-1 de la NSR-10 [6], tal como se muestra en la ecuación 2-7.

$$[0,9 \text{ ó } 1,2]D + T + 0,5L + 0,2G \quad (2-7)$$

La carga por granizo se puede despreciar en lugares donde las características locales lo puedan así destinar. Por otro lado, se hace necesario considerar las cargas ficticias aplicadas

a la estructura en la ecuación 2-8.

$$N_i = 0,002Y_i \quad (2-8)$$

El numeral F.2.18.2.1 de la NSR-10 [6] hace referencia a la determinación del incendio de diseño mediante la norma ASTM E119 [11]. Referencia que se establece en función de los materiales de combustión, las características del entorno y el sistema de protección activa. En el título J y título K de la NSR-10 se encuentran consignadas las disposiciones y sus especificaciones relacionadas a la protección activa.

En el numeral F.2.18.2.2 de la NSR-10 indica que las temperaturas que toma el incendio de diseño está determinada por el análisis de transferencia de calor, como se indica en la tabla **2-2**. Quedan exentos a la aplicación de este numeral los aceros con resistencia a la fluencia superiores a 448 MPa.

Temp. °C	$k_E = E_T/E = G_T/G$	$k_p = F_p(T)/F_y$	$k_y = F_y(T)/F_y$	$k_u = F_u(T)/F_y$
20	1.00	1.00	1.00	1.00
93	1.00	1.00	1.00	1.00
204	0.90	0.80	1.00	1.00
316	0.78	0.58	1.00	1.00
399	0.70	0.42	1.00	1.00
427	0.67	0.40	0.94	0.94
538	0.49	0.29	0.66	0.66
649	0.22	0.13	0.35	0.35
760	0.11	0.06	0.16	0.16
871	0.07	0.04	0.07	0.07
982	0.05	0.03	0.04	0.04
1093	0.02	0.01	0.02	0.02
1204	0.00	0.00	0.00	0.00

**Tabla 2-2.:** Propiedades del acero a temperaturas elevadas. Adaptada de *Tabla F.2.18.2-1 NSR-10*[6]

Para este trabajo, la tabla **2-2** es considerada para efectos de calcular el módulo de elasticidad dependiendo las temperaturas límites en las que el acero comienza a experimentar disminución en el módulo, estas temperaturas son tomadas como control en la revisión de los resultados.

El numeral F.2.18.2.4.3 de la NSR-10 [6] establece tres métodos de diseño:

- **Análisis avanzados:** se obtiene una respuesta térmica y una respuesta mecánica bajo influencia del incendio de diseño. La primera produce un capo de temperatura de cada uno de los elementos, la segunda tiene como resultado fuerzas y deflexiones.
- **Análisis simplificados:** Se hace por evaluación de desempeño, constantes las restricciones y condiciones de apoyo ante la exposición de incendio. A temperaturas menores a 204°C el acero no presenta degradación en el cálculo de resistencia de los miembros, sin embargo, si se debe tener en cuenta las fuerzas y deformaciones.
- **Análisis por ensayo de calificación:** el diseño de los miembros se debe calificar de acuerdo a la ASTM E119.

### **NTC 1480 [49]**

Las normas colombiana técnicas -NTC son guías estándar reguladas por el Instituto colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones -INCONTEC.

La NTC 1480 Elementos de construcción, Ensayo de resistencia al fuego fue ratificada por el Consejo Directivo de 1979-06-27.

La NTC 1480 indica la resistencia requerida al fuego, y cómo el tiempo equivalente de cualquier elemento se puede determinar experimental o analíticamente para un fuego normalizado por esta norma, que corresponde con la curva ISO 834 [32].

### **Otras disposiciones y organizaciones**

La Dirección Nacional de Bomberos se crea como Unidad Administrativa Especial del orden nacional, con personería jurídica, adscrita al Ministerio del Interior, con autonomía administrativa, financiera y patrimonio propio, cuya sede es la ciudad de Bogotá, D.C.

Todas las instituciones bomberiles del país, oficiales, aeronáuticos y voluntarios, así como sus miembros estarán bajo coordinación operativa de la Dirección Nacional de Bomberos de Colombia.

La dirección nacional de bomberos [1] emiten certificado de seguridad como constancia de la protección integral contra incendio. Así mismo, el cuerpo oficial de bomberos puede emitir un concepto técnico que certifica las condiciones de seguridad humana ante riesgos de incendio que tiene vigencia de un año, y se soportan con el cumplimiento de las siguientes normativas:

Acuerdo 20 de 1995, Norma colombiana sismo resistente dependiendo su versión de construcción, así como las Normas técnicas Colombianas. En cuanto al concepto que se emite teniendo en cuenta la NSR, depende de la época de su construcción y de esto depende la norma que apliquen, la NSR-98 aplica hasta el 2010 y a partir de este año se aplica la NSR-10.

Por otro lado, Anraci [10] por sus siglas en español significa Asociación nacional de rociadores contra incendio, es un gremio relacionado con la seguridad contra incendios en Colombia que reúne personas naturales y jurídicas que hagan parte de la industria de rociadores contra incendios y otros sistemas . El último informe es del año 2021 en el cual se proporciona información, novedades, avances y normativas de protección contra incendio. Además, Anraci en el 2021 realizó el lanzamiento de la Guía de buena prácticas para el desarrollo de proyectos de protección contra incendios [9] donde se puede encontrar las etapas de ejecución de un proyecto de protección contra incendios.

De acuerdo con la guía [9] en un proyecto de ingeniería de protección contra incendios intervienen los usuarios, propietarios, desarrolladores, dueño del proyecto, financiadores, aseguradora, consultores, interventores, diseñadores e instaladores, proveedores de sistemas o equipos de protección contra incendios, cuerpo local de bomberos, entre otros. Este grupo de personas deben garantizar y viabilizar el proyecto. Una vez definidos los responsables, las etapas de ejecución de un proyecto de protección contra incendios son:

- Etapa 1 Ingeniería conceptual: definición de criterios de acuerdo a la normativa vigente, selección de alternativas, cálculo varios, materiales y equipos.
- Etapa 2 Ingeniería Básica: diseño de la alternativa seleccionada, memorias de cálculo, especificaciones, planos preliminares y presupuesto.
- Etapa 3 Ingeniería de detalle: Elaboración de planos con detalles y cruces con otras especialidades, especificaciones de instalación y soportes técnicos.
- Etapa de construcción: los planos de montaje son de suministro para el contratista instalador.
- Etapa final y recepción: pruebas de aceptabilidad, dentro de los cuales está prueba de lavado interno a presión o flusing, pruebas hidrostáticas y pruebas operacionales del sistema. Además, se deben proporcionar las instrucciones de operación y mantenimiento, instalación de la placa informativa del diseño hidráulico. Finalmente, se debe realizar el arranque de los equipos y/o el sistema, dejando registro de lo ejecutado en un informe general, planos AS-Built, actas y certificación.

## 2.4. Enfoques de diseño que consideran la influencia de altas temperaturas

Básicamente, el proceso de análisis de estructuras sometidas a altas temperaturas por un evento de incendio se simplifica en la figura 2-12. Lo que se propone [15] es que una vez determinada la geometría, el tipo de construcción, el uso, las diferentes cargas a las cuales será sometida y el número de máximo probable de ocupantes y su ubicación, se procederá a adoptar las características mínimas para la protección contra incendio y requerimiento de implementación. En consecuencia, se realiza el análisis y validación del mismo.

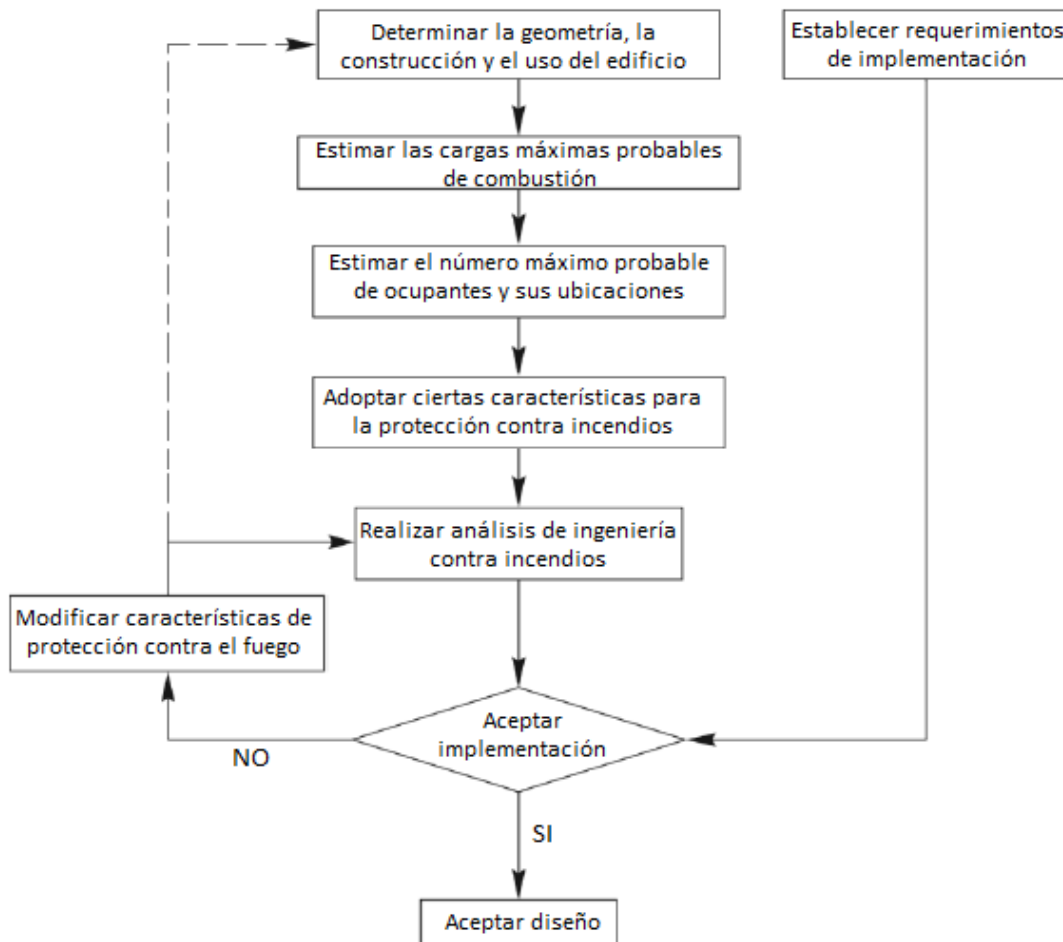


Figura 2-12.: Descripción de análisis. Adaptada de [15]

Para el análisis estructural de estructuras bajo solicitaciones de altas temperaturas se consideran modelos basados en pruebas experimentales, así como modelos más elaborados que implican un cálculo más completo y complejo, tal como lo indica Buchanan [15] en la matriz de modelos de fuego y su respuesta estructural.



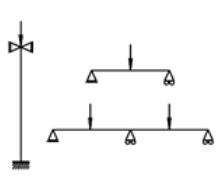
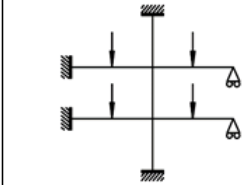
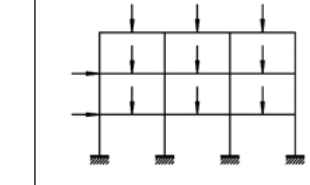
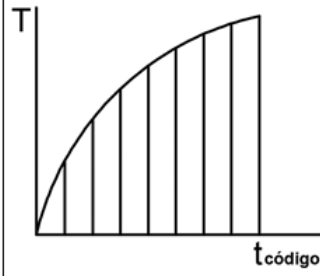
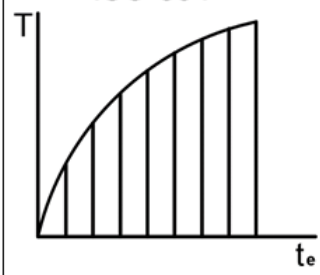
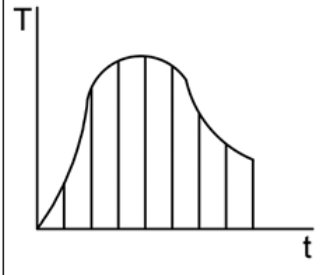
Modelo de respuesta estructural		S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
		Elementos	Parte de la estructura	Estructuras
Modelo de exposición al fuego				
H <sub>1</sub>	<p>ISO-834</p> 	<p>Ensayo o cálculo</p>	<p>Cálculo Ensayo ocasional</p>	<p>La diferencia en la esquematización se vuelve demasiado grande</p>
H <sub>2</sub>	<p>ISO-834</p> 	<p>Ensayo o cálculo</p>	<p>Cálculo Ensayo ocasional</p>	<p>Cálculo no práctico</p>
H <sub>3</sub>		<p>Ensayo ocasional</p>	<p>Cálculo</p>	<p>Cálculo ocasional y para la investigación</p>

Figura 2-13.: Matriz de modelos de fuego y respuesta estructural. Adaptado de [15]

En la figura 2-13 se muestra el uso de tres modelos de exposición al fuego dentro de las cuales dos son de la ISO-834 [32] una de forma experimental y otra basada en el código, y una tercera que es de carácter experimental. Cabe resaltar que lo indicado por [15] muestra que el modelo de una estructura utilizando una curva experimental requiere de cálculos y generalmente son para investigación, por tal razón en las normativas no se incluye el uso de estos requerimientos de diseño.

A continuación, se presentan dos procedimientos mediante los cuales se pueden realizar el análisis de estructuras bajo la influencia de altas temperaturas provocadas por un incendio [65]: procedimiento prescriptivo y procedimiento prestacional.

### 2.4.1. Procedimiento o enfoque prescriptivo

El enfoque prescriptivo consiste en seguir una serie de parámetros mínimos teniendo en cuenta los efectos de altas temperaturas emitidas por un incendio. Este enfoque utiliza fuegos nominales para generar acciones térmicas. En la figura 2-14 se muestra el proceso a seguir que utiliza el Eurocódigo [65] partiendo de un elemento aislado hasta la estructura en conjunto.

En este enfoque se utilizan curvas de fuego que se han logrado a través de ensayos y se han estandarizado, principalmente algunas de las más utilizadas son la ISO 834 [32] y la ASTM E119[11], que además son curvas muy aproximadas como se puede ver en las figuras 2-9 y 2-10.

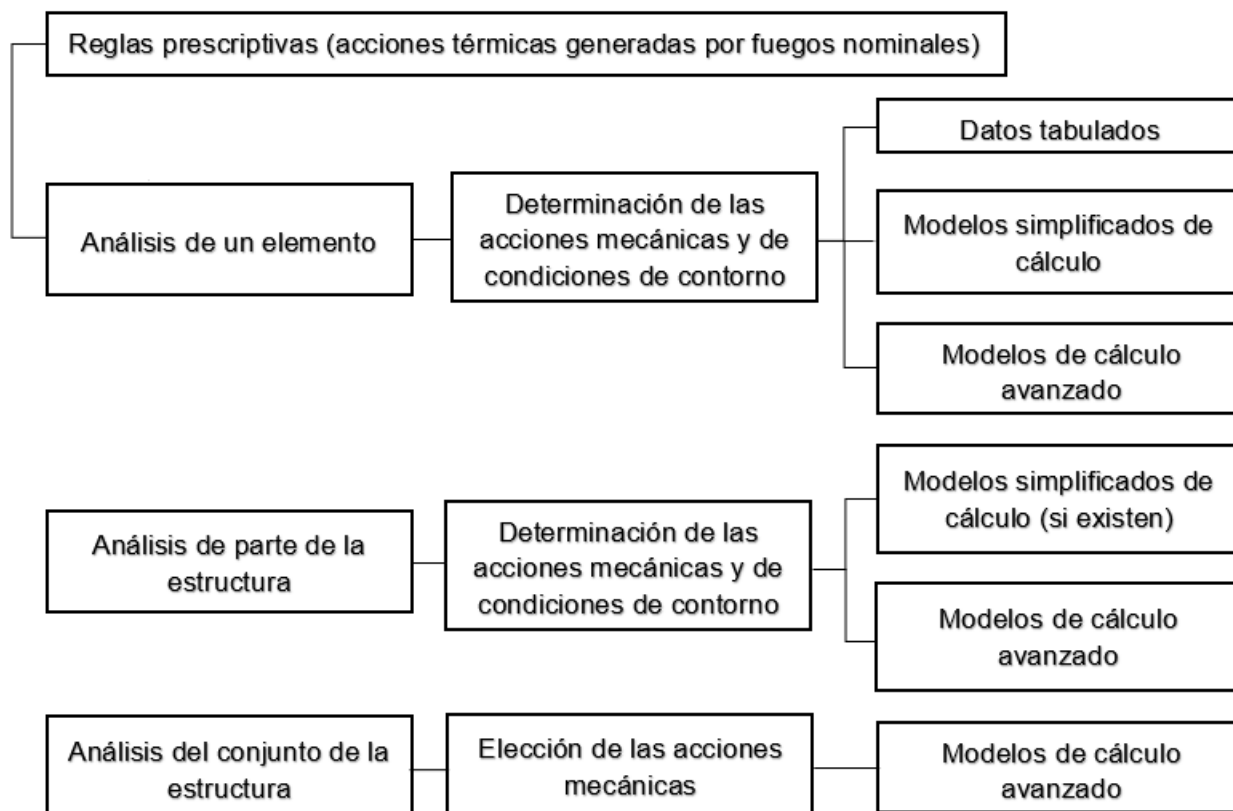


Figura 2-14.: Procedimiento de cálculo -Enfoque Prescriptivo. Adaptado de [65]

En cuanto a la normativa colombiana cómo ya se ha señalado anteriormente se encuentra el título J de la NSR-10[6], que prescribe una serie lineamientos o parámetros para determinar la resistencia al fuego de estructuras, materiales y las condiciones de distribución de área para una rápida evacuación.

### 2.4.2. Procedimiento o enfoque prestacional

El procedimiento prestacional se enfoca en el análisis estructural considerando las solicitudes del fuego para determinar realmente el comportamiento de la estructura, donde su principal foco es el rendimiento de la misma. Utiliza ingeniería de seguridad contra incendios, referida a acciones térmicas basadas en condiciones físicas tal como se dispone en el Eurocódigo [65] [66]. En la figura 2-15 se muestra el proceso a seguir que utiliza el Eurocódigo [65] partiendo de un elemento aislado hasta la estructura en conjunto.

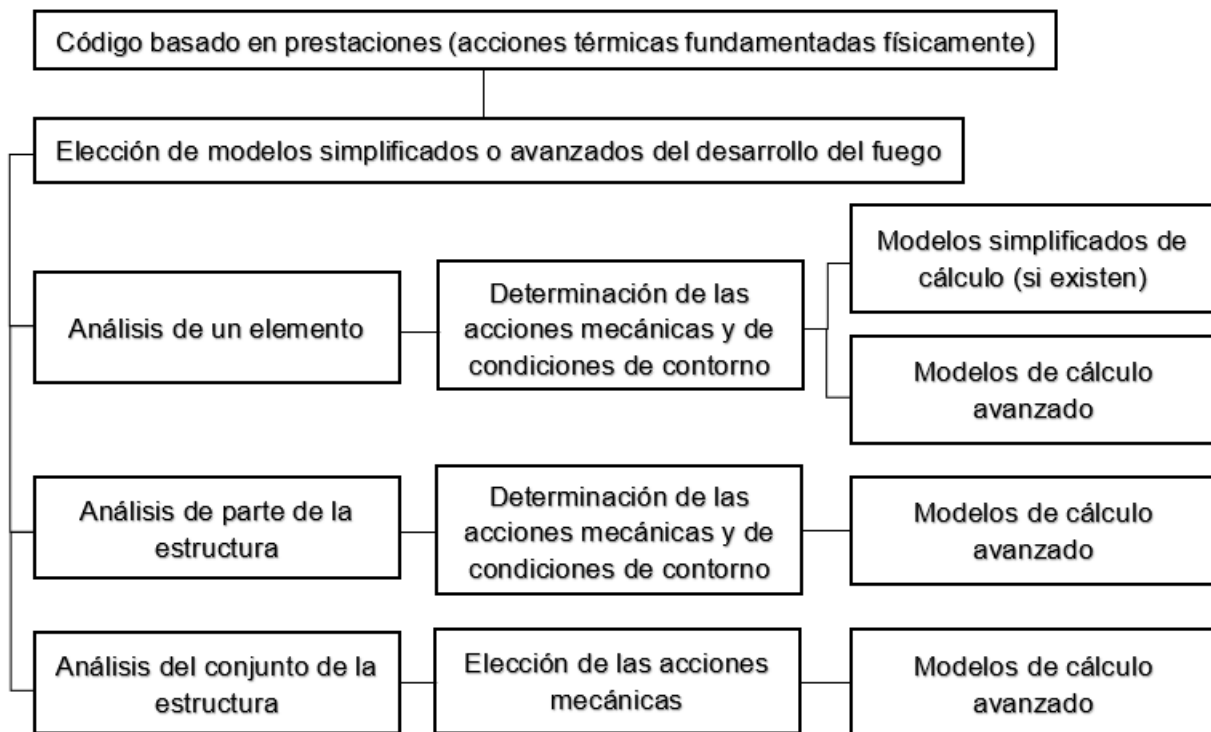


Figura 2-15.: Descripción de análisis -Enfoque Prestacional. Adaptado de [65]

En la normativa colombiana para este análisis, además del título J, se incluye el capítulo F.2.18 de la NSR-10 [6], con un enfoque más analítico y en el que se proporcionan criterios para el diseño y evaluación de estructuras de acero bajo condiciones de incendio, para determinar temperatura de diseño, expansión térmica y la degradación de propiedades mecánicas, que a su vez causan disminución de resistencia.

### 2.4.3. Metodología adoptada en este trabajo

Como se mencionó anteriormente, el presente trabajo corresponde a un aporte en la modelación de pórticos planos construidos en estructura de acero y modelados considerando solicitaciones de carácter térmico, debidas a fuego, bajo un enfoque prestacional. La curva que se usa en esta investigación es la ISO 834 [32], curva que se muestra en las figuras **2-9** y **3-11**, se tomó esta curva porque así como la utilizan en varias normativas también es incluida en la NSR-10 [6]. De igual manera en investigaciones [23] [38] [40] relacionan el uso de esta curva, que aunque es un modelo de incendio simple, aún se utiliza ampliamente para investigación y diseño de la ingeniería de seguridad contra incendios.

Los modelos utilizados para llevar a cabo esta metodología son modelos de cálculo avanzados que se construyen con la ayuda de herramientas computacionales, como es el caso de OpenSees y SAP2000. Esta información se encuentra más detallada en los siguientes capítulos.

## 3. Construcción del modelo matemático y propuesta de los casos de estudio

En esta sección se tratan aspectos generales sobre las propiedades del material elegido, acero, así como, los criterios generales de dimensionamiento de los elementos que componen los sistemas estructurales aperticados. A partir de esta información se definen los sistemas estructurales a estudiar denominados como prototipos. También se propone un método que considera el comportamiento de este tipo de estructuras ante solicitaciones de cargas convencionales y las debidas a las ocasionadas por el fuego. El capítulo concluye con la construcción del modelo matemático que considera el comportamiento del material, el tipo de estructura, las condiciones de apoyo, las exigencias a las conexiones, el efecto de las cargas convencionales, el efecto de las solicitaciones debidas por altas temperaturas, así como dos escenarios de la exposición al fuego en este tipo de estructuras.

### 3.1. Comportamiento del material

El material que se utiliza en los pórticos de estudio es el acero. Los aceros estructurales se agrupan de acuerdo con la ASTM [11] así:

- A36: aceros de características generales
- A529: aceros estructurales de carbono
- A572: aceros estructurales de alta resistencia y baja aleación
- A242 y A588: aceros estructurales de alta resistencia, baja aleación y resistencia a la corrosión atmosférica
- A514 y A852: placa de acero templada y revenida

Para este estudio, el acero está identificado con las características de A36. De acuerdo con las ASTM, generalmente el acero A36 se lamina en caliente y presenta las siguientes propiedades:

#### 3.1.1. Propiedades mecánicas

Algunas propiedades mecánicas a tener en cuenta para el acero A36 son:

- Resistencia a la tensión: 400 a 550 MPa
- Esfuerzo de fluencia: 250 MPa
- Módulo de elasticidad: 200 GPa

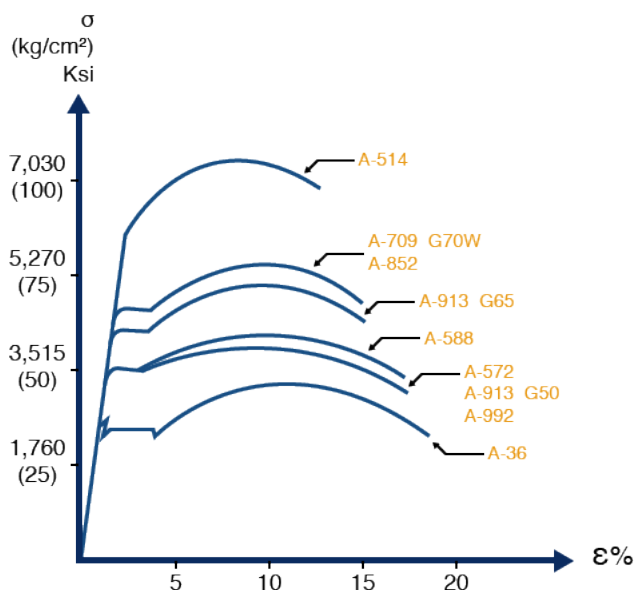
### 3.1.2. Propiedades físicas

Algunas propiedades físicas a tener en cuenta para el acero A36 son:

- Densidad del acero: 7.85 g/cm<sup>3</sup> (0.284 lb/in<sup>3</sup>)
- Punto de fusión: 1.425-1.538 °C (2.600-2.800 °F)
- Relación de Poisson: 0.26

### 3.1.3. Curva Esfuerzo-Deformación

La fluencia del acero permite que un elemento ceda sin incremento de esfuerzos y sin llegar a la falla. Después de la zona plástica el acero experimenta endurecimiento por deformación requiriendo esfuerzos adicionales.



**Figura 3-1.:** Curva Esfuerzo Vs. Deformación para varios grados de acero según ASTM.  
Tomado de [11]

En la normativa colombiana para este análisis además del título J, se incluye el capítulo F.2.18 de la NSR-10 [6], con un enfoque más analítico y en el que se proporcionan criterios

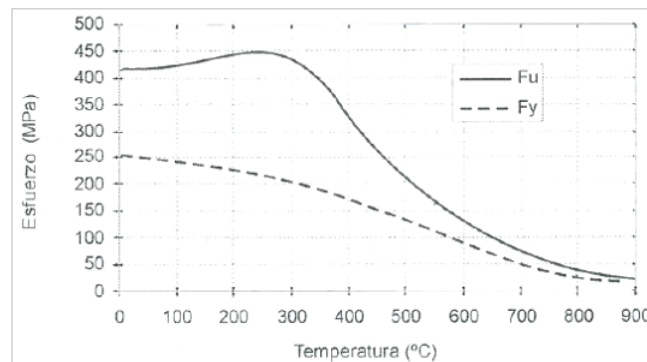
para el diseño y evaluación de estructuras de acero bajo condiciones de incendio, para determinar temperatura de diseño, expansión térmica y la degradación de propiedades mecánicas, que a su vez causan disminución de resistencia.

### 3.1.4. Efecto de la temperatura

Los aceros con alto contenido de carbono pueden resistir más al ser calentados a una temperatura de 700°F (371°C), para temperaturas entre 800°F y 1000°F (427-538°C) reduce drásticamente su resistencia, y a 1200°F (649°C) presenta poca resistencia [47].

Los aceros estructurales cuando se exponen a temperaturas superiores a 400°C pierden resistencia y rigidez. La protección de acero contra el fuego se logra mediante la aplicación de recubrimiento tipo pintura ignífuga, recubrimiento de yeso, prefabricados de concreto, mampostería o cualquier material aislante.

Se presenta en la figura 3-2 la Curva Esfuerzo-Temperatura para un acero de grado A36 [18], en la que se puede apreciar la disminución tanto de la resistencia a la tensión  $F_u$ , así como la resistencia a la fluencia  $F_y$ , cuando el acero de grado A36 se encuentra bajo sollicitaciones de temperatura.



**Figura 3-2.:** Curva Esfuerzo Vs. Temperatura para acero A36. Tomado de [18]

Algunas ventajas del acero como material estructural se considera por su gran resistencia, poco peso, facilidad de fabricación, entre otras propiedades como se relacionan en la literatura [47]:

- *Alta resistencia:* las altas resistencias por unidad de peso, implica bajo peso de la estructura.
- *Uniformidad:* las propiedades no cambian apreciablemente en el tiempo así como el concreto.

- *Elasticidad: el acero tiene una aproximación a su compartimiento hipotético, gracias a la ley de Hooke soporta esfuerzos muy altos. Los valores de inercia de una estructura de acero pueden calcularse exactamente.*
- *Durabilidad: con un adecuado mantenimiento las estructuras de acero duran indefinidamente.*
- *Ductilidad: en prueba de tensión un acero con bajo contenido de carbono, produce una reducción considerable de la sección transversal y un gran alargamiento en el punto de falla, antes de que se presente la fractura. Con cargas normales hay concentración de esfuerzos, la ductilidad permite fluir localmente en esos puntos y evitar fallas prematuras, además, porque las sobrecargas generan grandes deflexiones visiblemente evidentes que se pueden atender a tiempo.*
- *Tenacidad: el acero posee resistencia y ductilidad, lo que implica que al ser cargado hasta presentar grandes deformaciones es capaz de resistir grandes fuerzas, lo que implica que absorbe grandes cantidades de energía.*
- *Ampliaciones de estructuras existentes: es adaptable a adiciones.*
- *Otras: facilidad de unir miembros por medio de diversidad de conexiones como soldaduras, tornillos remache, entre otros; miembros prefabricados; rapidez de montaje; capacidad de laminado en diferentes tamaños y formas; resistencia a la fatiga; reutilizable.*

Así mismo, es necesario citar algunas desventajas del acero estructural como se relacionan en la literatura [47]:

- *Costo de mantenimiento: la corrosión a la que está expuesto el acero implica que la pintura se realice periódicamente, sin embargo, existen aceros intemperizados que elimina cierto costo.*
- *Protección contra el fuego: aunque en el mercado existen miembros estructurales incombustibles, la resistencia se ve afectada considerablemente durante incendios mientras otros elementos de la estructura se queman. El acero es excelente conductor de calor, así que el acero sin protección puede transmitir calor y propagar el incendio a zonas y materiales adyacentes.*
- *Pandeo: cuanto más largos y esbeltos sean los miembros a compresión se acrecienta el pandeo. En elementos tipo columnas se debe rigidizar para evitar pandeo.*
- *Fatiga: puede presentar reducción de resistencia por aumento de ciclos de esfuerzo variable por encima del límite.*
- *Fractura frágil: bajo ciertas condiciones se puede generar la falla frágil en puntos de concentración de esfuerzos.*



## 3.2. Consideraciones sobre el sistema estructural

El sistema estructural elegido para el desarrollo de este trabajo corresponde al sistema de pórticos reticulares con elementos ubicados de forma ortogonal y conectados entre sí mediante uniones rígidas. Este tipo de pórticos se utiliza con frecuencia para edificaciones de hasta seis u ocho pisos. Para el caso específico de estructuras en acero se denomina como pórticos resistentes a momento y su diseño se trata en el numeral F.2 de la NSR-10

Los sistemas estructurales de los modelos que se analizaron bajo efectos de altas temperaturas son pórtico de acero resistente a momentos -PRM.

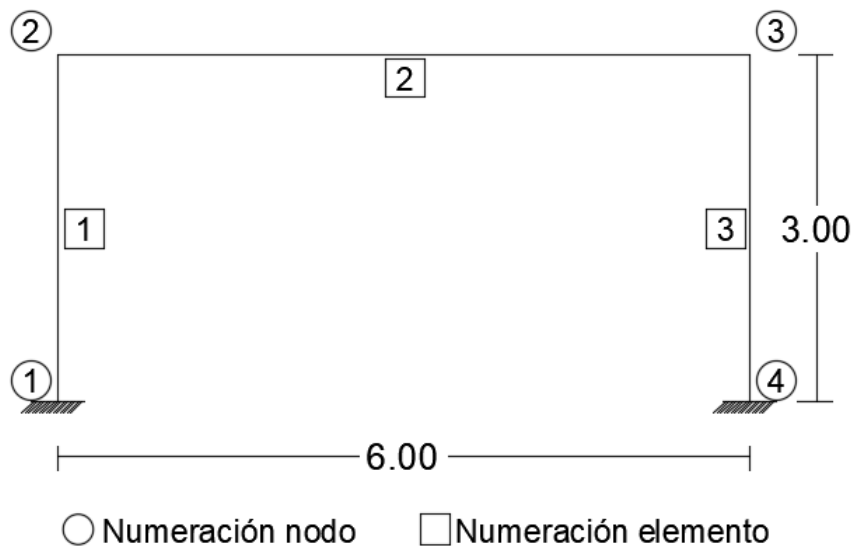
Un pórtico tiene ventajas en la distribución de áreas desde el punto de vista arquitectónico, y es muy fácil de construir, presenta flexibilidad cuando está expuesto a solicitaciones horizontales en cuanto se puede solucionar con un arriostramiento, sin embargo, para este estudio los pórticos son muy convencionales.

De acuerdo con el numeral A.3.2.1.3 de la NSR-10 [6] **PMR** *Un sistema de pórticos está compuesto por un pórtico espacial, resistente a momentos, esencialmente completo, sin diagonales, que resiste todas las cargas verticales y fuerzas horizontales.*

Para abordar la problemática formulada en este trabajo se procedió adoptando un carácter progresivo en el grado de dificultad de los modelos estructurales, la modelación del efecto de las altas temperaturas y la consideración de los diferentes escenarios de altas temperaturas ocasionados por el fuego. A continuación, se describen las configuraciones estructurales a investigar y se explica sus abreviaciones.

### 3.2.1. Configuración estructural tipo A: CE-A

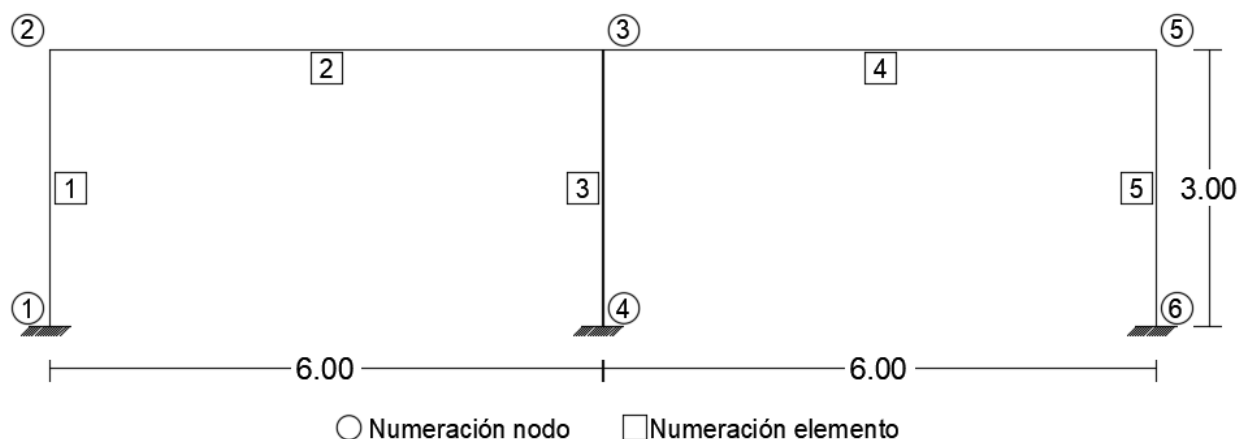
La configuración estructural más sencilla, de la cual se tiene referencia, corresponde al trabajo de [35] y [40]. En estos trabajos se muestra el efecto del fuego sobre una estructura tipo marco con la particularidad de que solamente está conformado por dos elementos en forma de L invertida. El prototipo o configuración estructural adoptado como punto de partida corresponde a un pórtico simple compuesto por dos columnas y una viga dispuestas ortogonalmente. Esta configuración corresponde a una estructura con sistema PRM de acero en el plano bidimensional, que consta de un piso y un vano, con la distribución geométrica que se puede apreciar en la figura 3-3. Las consideraciones sobre el dimensionamiento, el tratamiento de las conexiones y los apoyos se describen más adelante en este capítulo. Por facilidad en la lectura este tipo de configuración se denotará como CE-A. (C de configuración, E de estructural y A del pórtico A).



**Figura 3-3.:** Geometría, numeración nodos y elementos, CE-A.

### 3.2.2. Configuración estructural tipo B: CE-B

Una complementación del caso anterior es el prototipo o configuración estructural B con sistema PRM de acero en el plano bidimensional, que consta de un piso y dos vanos, con la distribución geométrica que se puede apreciar en la figura 3-4. Algunas investigaciones tratan este caso donde se puede apreciar las dos bahías o tramos, ya sea como naves industriales [60] o como un pórtico [34] [30]. Por facilidad en la lectura este tipo de configuración de denotará como CE-B. (C de configuración, E de estructural y B del pórtico B).



**Figura 3-4.:** Geometría, numeración nodos y elementos, CE-B.

### 3.2.3. Configuración estructural tipo C: CE-C

La tercer configuración considerada en este estudio corresponde al prototipo C que es una estructura con sistema PRM de acero en el plano bidimensional, que costa de dos piso y dos vano, con la distribución geométrica que se puede apreciar en la figura 3-5. Un caso de estudio puede estar en referencias un poco más avanzadas de estructuras con más de un piso dispuestas en el espacio [36]. Por facilidad en la lectura este tipo de configuración de denotará como CE-C. (C de configuración, E de estructural y C del pórtico C).

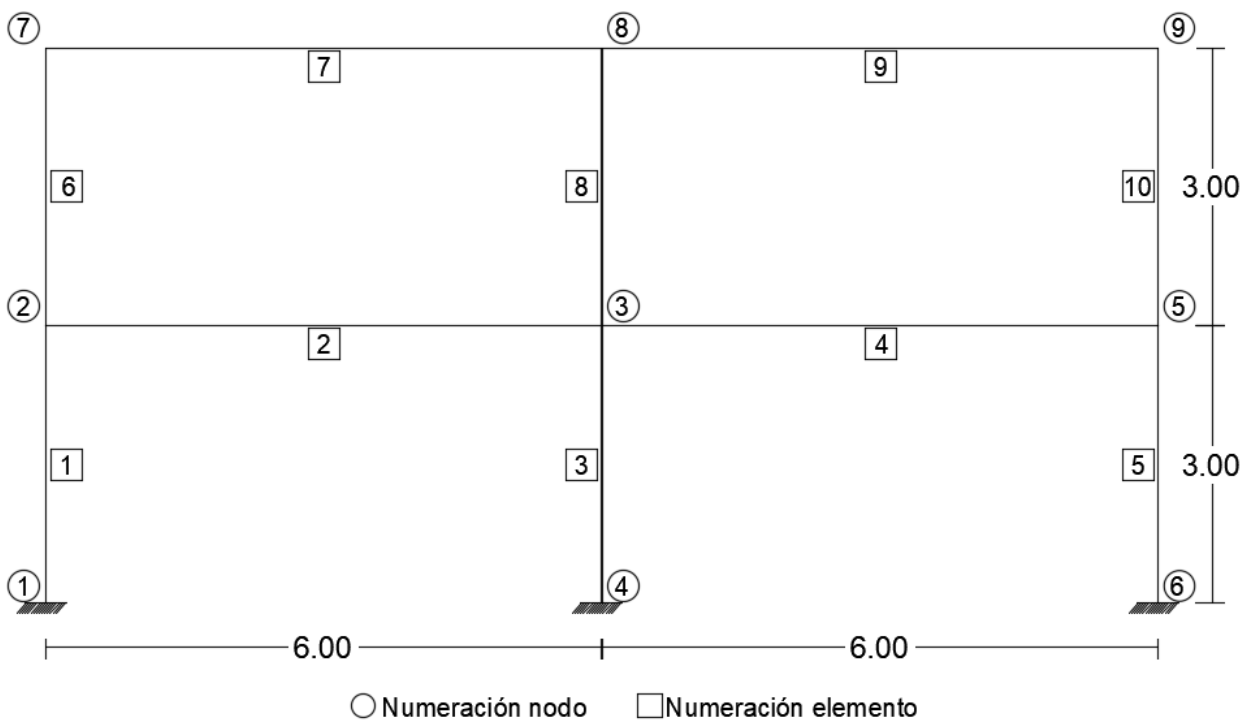
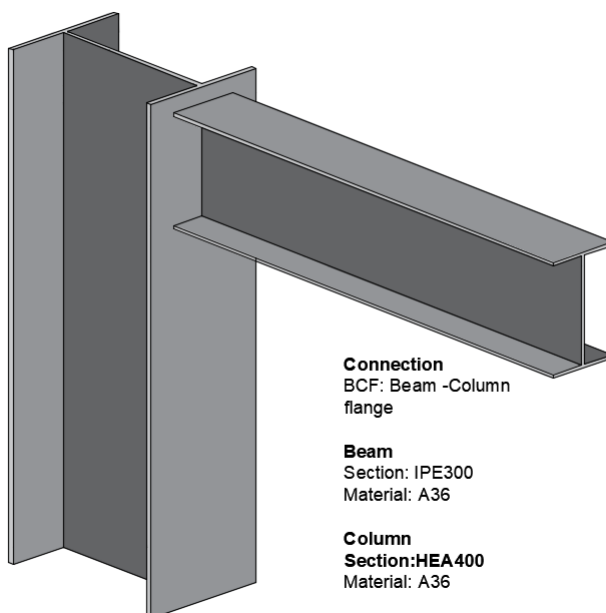


Figura 3-5.: Geometría, numeración nodos y elementos, CE-C.

## 3.3. Consideraciones sobre las conexiones y apoyos

La conexión viga-columna de los pórticos analizados son conexiones a Momentos Totalmente Restringidas **TR**, que de acuerdo con el numeral F.2.2.3.5.2.1 de la NSR-10 [6] se define como “aquella que trasfiere momento con una rotación relativa despreciable entre los miembros conectados... se puede considerar que la rotación es nula. Una conexión TR deberá tener resistencia y rigidez suficientes para mantener el ángulo entre los miembros conectados cuando se alcanza los estados límites de resistencia”.

En la figura 3-6 se observa la unión de la viga IPE y columna HEA.



**Figura 3-6.:** Disposición y orientación de los elementos viga-columna. Fuente propia.

La configuración de la conexión bajo efectos de fuego es un análisis que no hace parte de este trabajo. Sin embargo, las conexiones para estructuras de acero convencionales de tipo TR deben estar conectada por el alma de la viga al patín de la columna, ya sea por soldadura o platinas y pernos, de igual manera los patines tanto superior como inferior al patín de la columna. Ahora bien, el diseño o comportamiento de estas conexiones son objeto de otro estudio.

Por otro lado, el apoyo en la base de los pórticos es empotrado condición que transmite adecuadamente los esfuerzos a la cimentación.

### 3.4. Consideraciones sobre solicitaciones convencionales

Para efectos de este análisis se proporcionaron dos tipos de carga simulando condiciones de ocupación normal y frecuentes en nuestro entorno.

#### Carga muerta

Asumiendo una estructura de uso residencial, de acuerdo con la tabla B.3.4.3-1 de la NSR-10 [6] se tiene:

- Fachadas y particiones livianas:  $2.0 \text{ kN/m}^2$

- Afinado de piso y cubierta livianas:  $1.4 \text{ kN/m}^2$

### Carga viva

El fenómeno del fuego a diferencia del fenómeno del colapso, del impacto o del sismo permite que haya una movilización de la carga viva. Por lo tanto, la carga viva es susceptible de despreciarse. Sin embargo, de acuerdo con la tabla B.4.1-1 de la NSR-10 [6] se tiene para uso residencial las cargas vivas mínimas distribuidas uniformemente:

- Balcones:  $5.0 \text{ kN/m}^2$
- Cuartos privados y sus corredores:  $1.8 \text{ kN/m}^2$
- Escaleras:  $3.0 \text{ kN/m}^2$

### Carga distribuida última

Resultado de un análisis de combinaciones de carga de acuerdo con el título B de la NSR-10 [6] se proporciona una carga última distribuida en cada una de las vigas de  $18 \text{ kN/m}$ .

### Carga horizontal

Así mismo, se proporciona un carga horizontal de  $180 \text{ kN}$  en el nodo superior izquierdo de cada uno de los pórticos.

Para cada uno de las configuraciones estructurales se muestra la aplicación de cargas, en la figura 3-7 para CE-A, en la figura 3-8 para CE-B y en en la figura 3-9 para CE-C.

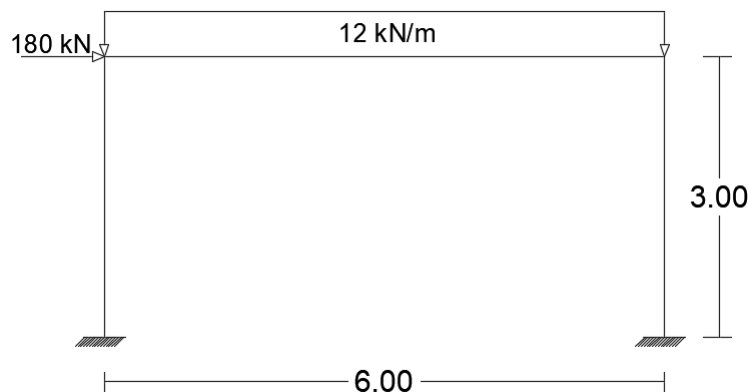


Figura 3-7.: Asignación de cargas CE-A

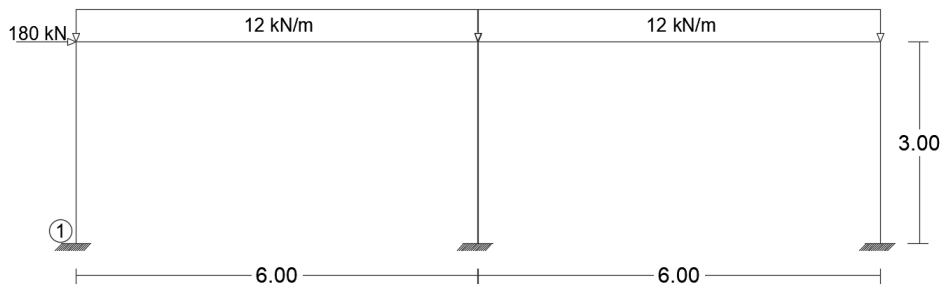


Figura 3-8.: Asignación de cargas CE-B

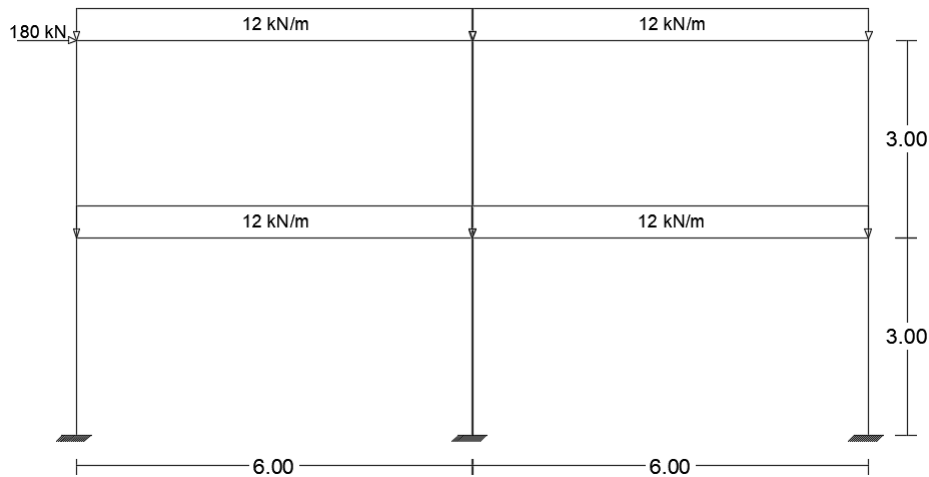


Figura 3-9.: Asignación de cargas CE-C

### 3.5. Propuestas de modelos que consideran el efecto fuego como una sollicitación

Para comprender mejor el comportamiento de las estructuras seleccionadas bajo los efectos de altas temperaturas provenientes de las curvas de calor se procedió en forma gradual. La gradualidad inicia desde la modificación de las propiedades mecánicas del material, el cambio de las propiedades geométricas de la sección transversal de los elementos estructurales hasta llegar a la formulación o selección de un espectro de calor. Los modelos propuestos por la autora de este trabajo que consideran el efecto de las altas temperaturas corresponden a: efecto del fuego sobre el comportamiento del material de los elementos estructurales (EF-M), efecto del fuego sobre el comportamiento de la sección transversal de los elementos estructurales (EF-S) y efecto del fuego considerando su comportamiento como curva de tiempo-temperatura (EF-TT). A continuación, se describe el alcance de cada uno de estos modelos o efectos y se explican sus abreviaciones.

### 3.5.1. Efecto del fuego sobre el comportamiento del material: EF-M

Como primera aproximación para considerar el efecto, en forma de sollicitación, que tienen las altas temperaturas sobre el material se consideró la construcción e implementación de una función que modele el comportamiento del módulo de elasticidad del acero en términos de la temperatura y el tiempo transcurrido. Este tipo de efecto se denominará, por facilidad en la lectura, como EF-M. (E de efecto, F de fuego y M de material)

De acuerdo con lo establecido en la NSR-10 [6], ver tabla **2-2**, se puede determinar la disminución del módulo de elasticidad cuando está bajo influencia de altas temperaturas, así como se muestra en la figura **6-33**, el módulo de elasticidad reduce en la medida que se aumenta la temperatura.

En específico, de acuerdo con lo consignado en la sección anterior para indicar *El efecto de la temperatura*, el acero mantiene su resistencia hasta los 316°C, comienza a reducir la resistencia entre los 427°C y 538°C, y presenta una muy baja resistencia a los 649°C. De esa manera, tomando los valores de  $k_E$  para dichas temperaturas se calcula el  $E_T$ , tal cual se relacionan en la tabla **3-1**.

Temperatura del acero °C	$k_E = E_T/E = G_T/G$	$E_T$
316	0.78	1.5559E+08
538	0.49	9.795E+07
649	0.22	4.397E+07

**Tabla 3-1.:** Módulo de Elasticidad del acero a temperaturas elevadas *NSR-10 con referencia en la Tabla F.2.18.2-1*[6]

De la tabla F.2.18.2-1 de la NSR-10 [6] se substraen las columnas de temperatura y del coeficiente entre módulos de elasticidad, con el fin de obtener el módulo de elasticidad bajo condiciones de temperatura, como se indica en la columna 3 de la tabla **3-1**.

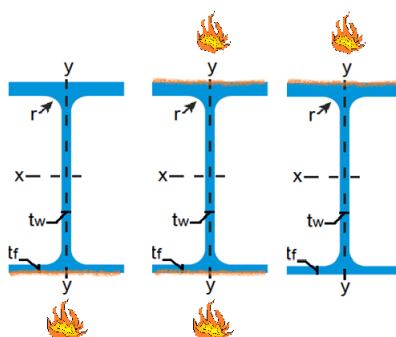
### 3.5.2. Efecto del fuego sobre el comportamiento de la sección transversal: EF-S

Como consecuencia en el cambio de las propiedades mecánicas del material de un elemento estructural se identifica el cambio en algunas de las propiedades geométricas de su sección transversal. Es decir, para el caso de las vigas y columnas el fuego ocasiona una alteración del área y los módulos de inercia respectivos. A partir de esta consecuencia, se propone considerar que el efecto del fuego sobre el elemento estructural genera cambios en la sección transversal, este tipo de efecto se denominará mediante la abreviatura EF-S. (E de efecto, F

de fuego y  $S$  de sección transversal). Este caso se argumenta en cierto modo con el método en el cual se divide la sección transversal en grupos de elementos de temperaturas aproximadamente iguales definido en [7], debido a que el área de la sección transversal es afectada siempre que se encuentre en zona de exposición al fuego.

Debido a que el cambio de dimensiones de la sección genera cambios más drásticos en los momentos de inercia, algunos modelos se trabajaron con la modificación de inercia de la vigas. Para identificar estos casos, la notación de este efecto se amplía indicando las propiedades de la sección transversal afectadas. Por ejemplo, la denominación EF-S-IA.

En la figura 3-10 se puede apreciar un perfil I bajo la influencia de altas temperaturas, en donde se presenta tres escenarios de la exposición: se puede afectar la aleta inferior, condición que puede generar reducción de sección del espesor de la aleta inferior y con esto la modificación de la inercia con respecto al eje X; una segunda opción es que el perfil sea expuesto al fuego en la parte superior e inferior, así mismo afecta el espesor de sus dos aletas y la inercia respecto al eje X; el último caso es la exposición del perfil solamente en la aleta superior, afectando el espesor de la aleta superior y con esto la inercia respecto al eje X.



**Figura 3-10.:** Afectación de la sección transversal bajo influencia de Altas Temperaturas

Los cambios en las propiedades de la sección transversal provienen de la afectación que el fuego genera en el área de las aletas, bien sea en su espesor o en su ancho. Estos cambios pueden ocurrir en la aleta inferior, o en la aleta superior, o en las dos aletas, situaciones que obedecen a los lados afectados directamente por el fuego, los cuales se tratarán más adelante como escenarios de exposición al fuego.

### 3.6. Escenarios de exposición al fuego en sistemas aporticados

En forma similar a la teoría de los grupos de cargas que permite determinar las condiciones más críticas de las cargas vivas sobre un sistema estructural, se definen las condiciones en



las cuales el fuego puede generar las máximas solicitaciones. La teoría de los grupos de carga basada en la construcción de las líneas de influencia para cargas móviles identifica tres situaciones particulares que generan las máximas acciones de cortante y flexión en los elementos tipo viga. Estas condiciones se conocen como disposición de la carga móvil en forma alternada o de ajedrez, en forma inversa a la anterior, y en forma de parejas de vanos cargados. Como modelos que consideran de presencia de fuego en las diferentes celdas reticuladas del pórtico, la autora de este trabajo, considera los siguientes escenarios: Escenario de exposición al fuego en todas las celdas reticulares EEF-C y escenario de exposición al fuego en las celdas reticulares en forma alternada EEF-A. A continuación, se explican los escenarios y sus abreviaciones.

### **3.6.1. Escenario de exposición al fuego en todas las celdas reticulares: EEF-C**

Este escenario corresponde al caso de la aplicación de la carga viva, en el cual todos los vanos de las vigas en todos los pisos se encuentran solicitados por este tipo carga. En el caso del fuego este escenario corresponde a la presencia y exposición de todos los elementos estructurales al fuego. La teoría de grupos para esta configuración de carga permite establecer valores máximos para reacciones y acciones de cortantes cercanas a las columnas igualmente se generan momentos negativos en las vigas que ameritan ser comparados con otros escenarios. Por facilidad en la lectura este escenario se denominará con las siglas EEF-C. (E de escenario, E de exposición, F de fuego y C que significa carga completa).

### **3.6.2. Escenario de exposición al fuego en forma de tablero ajedrez: EEF-A**

El escenario de carga en forma de tablero de ajedrez corresponde al caso de la aplicación de la carga viva, en el cual los vanos de las vigas se cargan de forma alternada tanto horizontal como verticalmente. En el caso del fuego, este escenario corresponde a la presencia y exposición de las celdas reticulares pares o impares del sistema estructural expuestas al fuego. La teoría de grupos para esta configuración de carga permite establecer valores máximos para flexiones en las luces de las vigas y eventualmente momentos negativos en los apoyos de las vigas. Por facilidad en la lectura este escenario se denominará con las siglas EEF-A. (E de escenario, E de exposición, F de fuego y A que significa alternado o en forma de tablero de ajedrez).

### **3.6.3. Efecto del fuego considerando su comportamiento como una curva de tiempo-temperatura: EF-TT**

El tercer modelo que considera el efecto del fuego sobre la estructura, en general, corresponde a la construcción de una curva o función de los incrementos de temperatura generados

por el fuego durante un período de tiempo determinado. La información de este tipo de modelo proviene de ensayos reales donde se someten a fuego normalizados diferentes tipos de estructuras, también estandarizadas. Se trata de ensayos costosos que requieren instrumentación y personal especializado. Como puede apreciarse, las curvas tiempo-temperatura dependen de muchos factores, tipo de fuego, material de la estructura, amoblamiento de la edificación, duración del fuego y condiciones ambientales entre otras. Existen diferentes tipos de organizaciones como la ISO, ASTM, EUROCÓDIGO, NFPA, que han publicado los resultados de sus ensayos, bien sea en forma tabular o de curvas.

Para el desarrollo de los modelos contemplados en este trabajo se consideraron la curva estándar publicadas por la ISO 834 a esta curva se llegó según se muestra en la figura 3-11.

Para poder establecer la incidencia directa del fuego de un incendio en una estructura, se recurre al uso de una curva de calor estándar y se implementa en la modelación matemática de cada uno de los pórticos. De las curvas indicadas en el capítulo anterior se recurre, para este estudio, a la curva de calor estándar ISO 834 que se replica para efectos de estudio en la figura 3-11. Una de las razones de su elección atiende a que es una curva muy recurrente en investigaciones, y que, además está incluida dentro de la normativa NSR-10 [6] en el capítulo *F.2.18-Diseño para condiciones de incendio*.

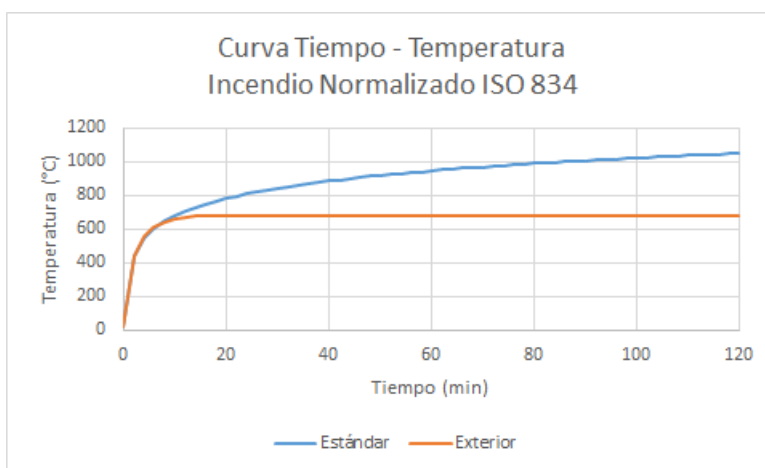
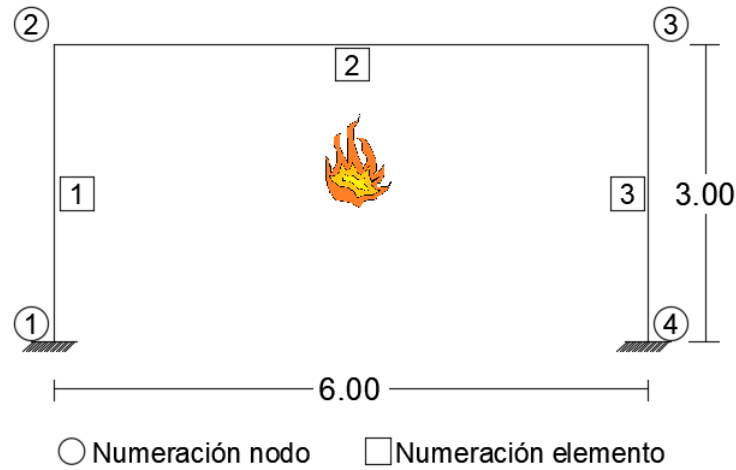


Figura 3-11.: Curva de calor Iso 834 utilizada para el análisis. Adaptada de [32]

A continuación, se presenta los prototipos de acuerdo con la exposición al fuego:

### Configuración estructural CE:A

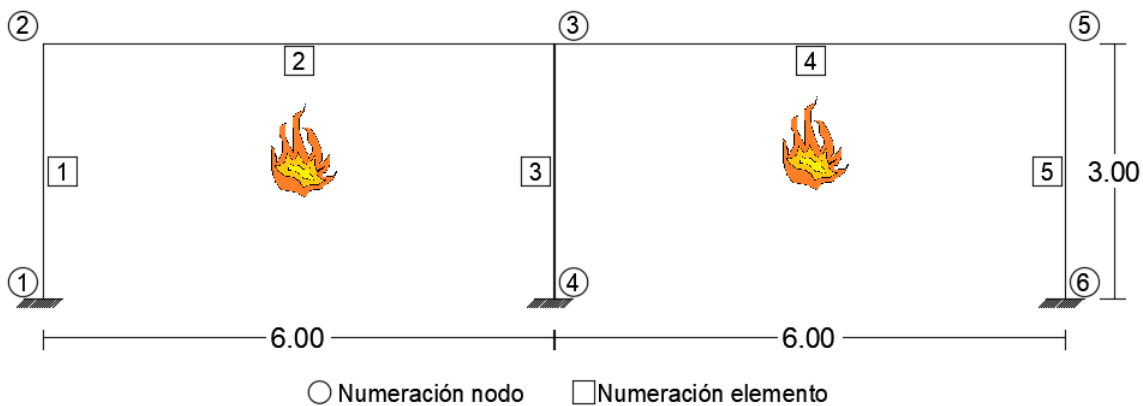
En el Prototipo A presenta una afectación en la sección transversal de la viga por su aleta inferior, elemento 2, y patín interno de las columnas 1 y 3, como se puede ver en la figura 3-12.



**Figura 3-12.:** Afectación del área transversal de la viga bajo influencia de Altas Temperaturas -CE:A

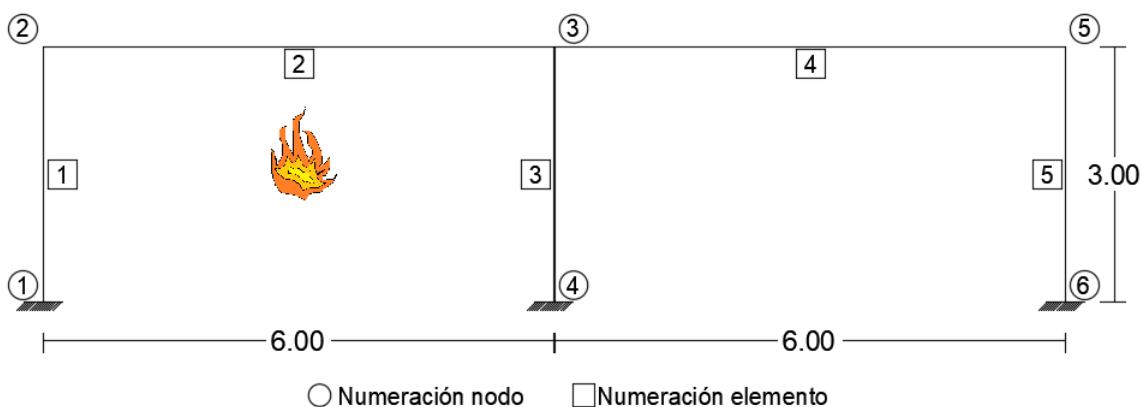
### Configuración estructural CE:B

En el Prototipo B presenta una afectación en la sección transversal de las vigas por su aleta inferior, elementos 2 y 4, así como las aletas internas de las columnas 1 y 5, y las dos aletas de la columna 3, tal como se indica en la figura 3-13.



**Figura 3-13.:** Afectación del área transversal de la viga bajo influencia de Altas Temperaturas -CE:B

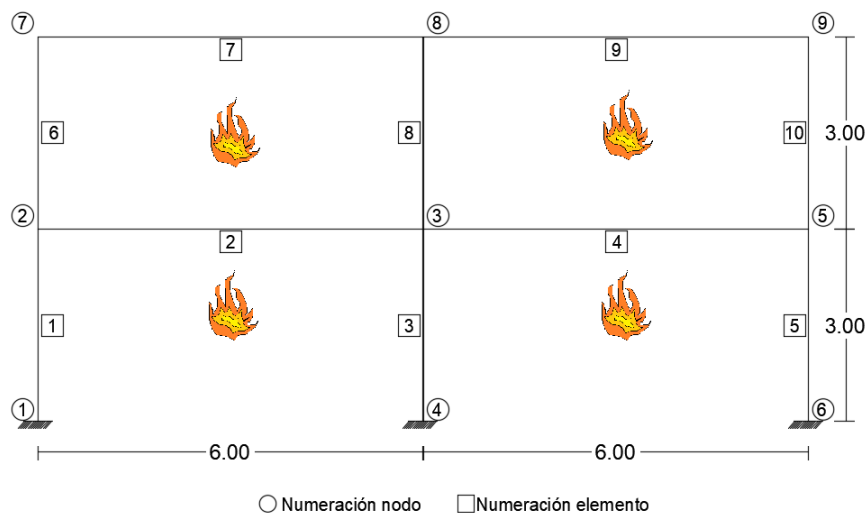
Así también, se considera una segunda opción de exposición cuando el pórtico solo se afecta un vano por el fuego, afectando la sección transversal de la viga en su aleta inferior, elemento 2, y aletas por su lado interno de las columnas 1 y 3, tal como se aprecia en la figura 3-14.



**Figura 3-14.:** Afectación del área transversal de la viga bajo influencia de Altas Temperaturas en un vano -CE:B

### Configuración estructural CE:C

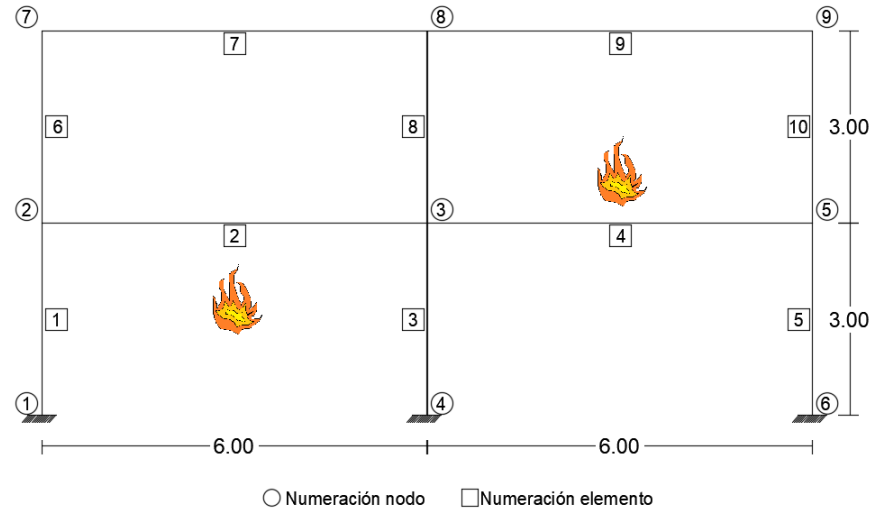
En el Prototipo C presenta afectación en la sección transversal de las vigas de primer piso por su aleta inferior y superior, elementos 2 y 4, y en el segundo piso presenta afectación de los elementos 7 y 9 en su aleta inferior. También las columnas 1, 5, 6 y 10 se ven afectadas en su aleta interna, y las columnas 3 y 8 ambas aletas, tal como se muestra en la figura 3-15



**Figura 3-15.:** Afectación del área transversal de la viga bajo influencia de Altas Temperaturas -CE:C

Como segundo caso se considera aplicar fuego a dos zonas tal como se muestra en la figura 3-16. Se presenta afectación en la sección transversal de las vigas 2 y 9 por su aleta inferior,

y viga 4 se muestra afectación por en su aleta superior. También las columnas 1, 3, 8 y 10 se ven afectadas en su aleta interna.



**Figura 3-16.:** Afectación del área transversal de la viga bajo influencia de Altas Temperaturas en dos vanos -CE:C

### 3.7. Panorama de los casos de estudio propuestos

En las secciones anteriores se describieron los siguientes aspectos o parámetros que fueron objeto de estudio en este trabajo.

Configuración estructural: CE

- CE-A
- CE-B
- CE-B

Efectos del fuego: EF

- EF-M
- EF-S
- EF-TT

Escenarios de exposición al fuego: EEF

- EEF-C
- EEF-A

Condiciones de apoyo: CA

- CA-E Apoyo empotrado
- CA-S Apoyo simple

El panorama del plan de sistemas estructurales bajo condiciones de altas temperaturas desarrollado en los siguientes capítulos se presenta en la siguiente tabla 3-2.

			CE-A	CE-B	CE-C
CA-E	EF-M	EEF-C			
		EEF-A	No aplica		
	EF-S	EEF-C			
		EEF-A	No aplica		
	EF-TT	EEF-C			
		EEF-A	No aplica		
CA-S	EF-TT	EEF-C	No se aborda	No se aborda	
		EEF-A	No se aborda	No se aborda	

Tabla 3-2.: Panorama de los casos de estudio propuestos que considera diferentes configuraciones y exposiciones al fuego

## 3.8. Dimensionamiento de los elementos estructurales en acero

El dimensionamiento de la estructura básicamente se limita a cumplir los criterios mínimos establecidos en el capítulo F.2. de la NSR-10 [6]

### 3.8.1. Dimensionamiento de vigas

Para dimensionar y definir el perfil de viga de los pórticos, bajo las condiciones de carga ya definidas, se comienza encontrando el momento y cortante máximos.

Suponiendo una viga simplemente apoyada con carga distribuida  $w$  en toda su longitud  $L$ , se tiene que:

las reacciones  $R$  a cada extremo  $A$  y  $B$  está dada por la ecuación 3-9:

$$R_{A,B} = \frac{w * L}{2} \quad (3-9)$$

y, el momento máximo está dado por la ecuación 3-10:

$$M_{m\acute{a}x} = M_u = \frac{wL^2}{8} \quad (3-10)$$

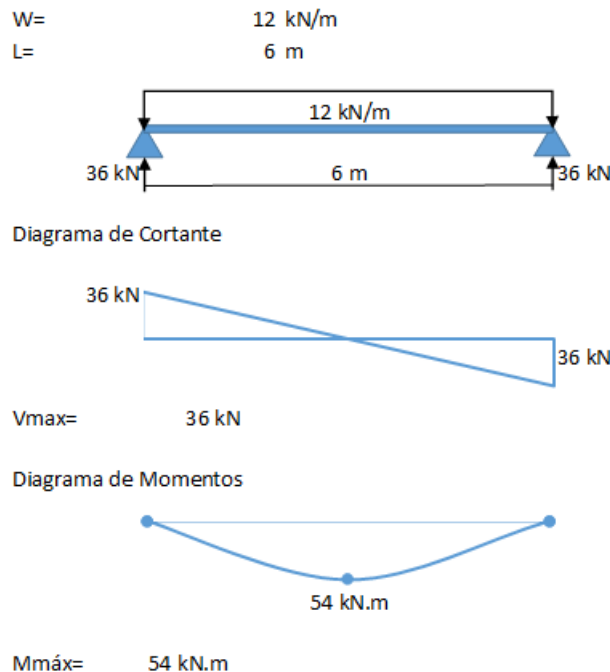


Figura 3-17.: Diagrama de cortante y momento de la viga

Supongamos una sección compacta, para lo cual igualamos momentos en la ecuación 3-11, ecuación 3-12 y ecuación 3-13 para obtener el módulo de sección plástica en la ecuación 3-14.

$$M_n = M_p \quad (3-11)$$

$$\phi M_n = M_u \quad (3-12)$$

$$\phi F_y Z_x = M_u \quad (3-13)$$

Luego,

$$Z_x = \frac{54000000}{0,9 * 250} = 240000mm^3 = 240cm^3 \quad (3-14)$$

Se debe buscar un perfil que su módulo de resistencia plástica, ecuación 3-14, sea mayor que  $240 \text{ cm}^3$ .

Se escoge un perfil IPE300, cuyas propiedades se muestran en la figura 3-18. Del perfil se chequea la compacidad, como se muestra en la ecuación 3-15 y ecuación 3-16, y la esbeltez, como se muestra en la ecuación 3-17 y ecuación 3-18.

Las propiedades de los perfiles de acero son tomadas de catálogos [61] comerciales en Colombia.

Dimensiones		IPE 300	
h=	300.0 mm		
t <sub>w</sub> =	7.1 mm		
b <sub>f</sub> =	150.0 mm		
t <sub>f</sub> =	10.7 mm		
r=	15.0 mm		
h <sub>1</sub> =	278.6 mm		
h <sub>w</sub> =	248.6 mm		
A <sub>g</sub> =	53.8 cm <sup>2</sup>		
Propiedades elásticas			
I <sub>x</sub> =	8356.0 cm <sup>4</sup>		
S <sub>x</sub> =	557.0 cm <sup>3</sup>		
r <sub>x</sub> =	12.5 cm		
I <sub>y</sub> =	604.0 cm <sup>4</sup>		
S <sub>y</sub> =	80.5 cm <sup>3</sup>		
r <sub>y</sub> =	3.4 cm		
Parámetros de torsión			
Z <sub>t</sub> =	628.0 cm <sup>3</sup>		
Z <sub>p</sub> =	125.0 cm <sup>3</sup>		
J=	20.1 cm <sup>4</sup>		

Figura 3-18.: Propiedades perfil IPE300

Chequeo sección compacta

$$\frac{b_f}{2t_f} = 7,01 < 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 10,75; \text{ Patín Compacto} \quad (3-15)$$



$$\frac{h_w}{t_w} = 35,01 < 3,76\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 106,35; \text{ Alma Compacta} \quad (3-16)$$

Chequeo Sección esbelta

$$\frac{b_f}{2t_f} = 7,01 < 0,56\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 15,84; \text{ Patín No Esbelto} \quad (3-17)$$

$$\frac{h_w}{t_w} = 35,01 < 1,49\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 42,14; \text{ Alma No Esbelta} \quad (3-18)$$

### 3.8.2. Dimensionamiento de columnas

Para el dimensionamiento de las columnas se verifica que no presenten pandeo por flexión, así se debe garantizar el cumplimiento de la ecuación 3-19. No obstante, para dimensionamiento se toma la ecuación para encontrar  $r_y$  como se indica en las ecuaciones 3-20, 3-21 y 3-22.

De acuerdo con la sección F.2.3 y F.2.21 de la NSR-10 [6], se toma  $K_y=1$ .

$$\frac{k_y L_y}{r_y} < \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3-19)$$

$$\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 133,22 < r_y \quad (3-20)$$

$$\frac{1 * 600}{133,22} < r_y \quad (3-21)$$

$$r_y > 4,5cm \quad (3-22)$$

El perfil que cumple con un valor superior para  $r_y$  es HEA400, cuyas propiedades se muestran en la figura **3-19**, para la cual se chequea la compacidad, como se muestra en la ecuación 3-23 y ecuación 3-24, y la esbeltez, como se muestra en la ecuación 3-25 y ecuación 3-26.

Dimensiones		HEA 400			
h=	390.0 mm				
tw=	11.0 mm				
bf=	300.0 mm				
tf=	19.0 mm				
r=	27.0 mm				
h1=	352.0 mm				
hw=	298.0 mm				
Ay=	159.0 cm <sup>2</sup>				
Propiedades elásticas					
Ix=	45070.0 cm <sup>4</sup>				
Sx=	2311.0 cm <sup>3</sup>				
rx=	16.8 cm				
Iy=	8564.0 cm <sup>4</sup>				
Si=	571.0 cm <sup>3</sup>				
Parámetros de torsión					
Zt=	2562.0 cm <sup>3</sup>				
Zp=	873.0 cm <sup>3</sup>				
J=	189.0 cm <sup>4</sup>				

Figura 3-19.: Propiedades perfil HEA400

Chequeo sección compacta

$$\frac{b_f}{2t_f} = 7,89 < 0,38\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 10,75; \text{ Patín Compacto} \quad (3-23)$$

$$\frac{h_w}{t_w} = 27,09 < 3,76\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 106,35; \text{ Alma Compacta} \quad (3-24)$$

Chequeo Sección esbelta

$$\frac{b_f}{2t_f} = 7,89 < 0,56\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 15,84; \text{ Patín No Esbelto} \quad (3-25)$$

$$\frac{h_w}{t_w} = 27,09 < 1,49\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 42,14; \text{ Alma No Esbelta} \quad (3-26)$$

## 4. Descripción de las herramientas computacionales empleadas

Luego de revisar los diferentes programas para análisis estructural utilizados en el medio se identificó que no disponen de una metodología específica para el tratamiento de solicitaciones debidas a altas temperaturas. Por este motivo se adelantaron algunas consultas para identificar un software adecuado para el tratamiento de solicitación de altas temperaturas. En esta sección se expone las herramientas computacionales utilizadas para el análisis de estructuras reticulares bajo exposición de altas temperaturas. Dentro de estos programas, tales como *ANSYS*, *SAFIR*, *OpenFOAM*, *ABAQUS*, *SIFBUILDER*, *LS-DYNA*, se seleccionó OpenSees debido a que es un programa de código abierto y libre distribución que dispone de una amplia documentación acerca del problema a tratar en este trabajo. Este trabajo pretende complementar el modelo del tratamiento de las solicitaciones por altas temperaturas con una metodología de su implementación en OpenSees.

Las instrucciones relacionadas con el uso de las herramientas computacionales se identificaron en forma similar al de las ecuaciones, mediante el uso de una numeración entre paréntesis. De esta forma se facilita su referencia a lo largo del capítulo.

### 4.1. Elección de las herramientas computacionales

Para el análisis se usa dos herramientas computacionales, una que por su condición investigativa y como evolución dentro de la academia ha tenido gran acogida como lo es OpenSees, y por otro lado un software más comercial con el que se tiene familiaridad como lo es SAP2000. Se utiliza este último como medio de verificación ya que en nuestro entorno es de uso frecuente y tiene resultados confiables.

OpenSees tienen una gran biblioteca de elementos finitos y excelentes guías para permitir el modelado eficiente y detallado de casi todos los tipos de comportamiento estructural involucrados en incendios, y también permiten subrutinas de usuario para modelar características especiales de comportamiento. A pesar de las ventajas obvias, los paquetes comerciales requieren una inversión recurrente sustancial para la compra y el mantenimiento y, por lo tanto, a menudo no son asequibles para los investigadores[35].

OpenSees tiene incluido nuevos elementos que definen distribuciones de temperatura dependientes del tiempo en la sección transversal de los miembros, asimismo, ha venido modificando las clases de materiales para incluir propiedades dependientes de la temperatura basadas en el Eurocódigo [65] [66]. OpenSees es una herramienta con desarrollo y actualizaciones constantes que son de gran soporte para implementar análisis estructural y con cierta oportunidad de implementar un código propio a partir de los comando establecidos, de esa manera se facilita el uso por accesibilidad, uso y resultados.

Adicionalmente, por versatilidad y fácil manejo se recurre también al uso de Microsoft Office Excel, en el cual se realizan cálculos varios, gráficas y tablas.

De igual manera, se utiliza AutoCad [12], versión estudiante que además está licenciado para el campus de la Universidad Nacional, con la finalidad de realizar esquemas o dibujos representativos para mejorar la comprensión de la temática.

## 4.2. OpenSees

OpenSees es un software de sistema abierto para simulación de Ingeniería Sísmica, apto para presentar la respuesta sísmica de sistemas estructurales y geotécnicos. OpenSees se ha desarrollado como la plataforma computacional para investigaciones en ingeniería sísmica basada en el rendimiento del PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center).

Una característica favorable en la academia e investigación es que OpenSees es de libre acceso y tanto su instalación como instructivo está detalladamente descrito en la página oficial[16]. Además, OpenSees al ser un código abierto significa que así como están disponibles las funciones y el código en sí, también tiene la posibilidad de implementar funciones, materiales y demás, por lo que los usuarios se convierten a su vez en desarrolladores y evaluadores del software.

El lenguaje madre de OpenSees es C++, se proporcionan conjuntos de C++ para que se puedan utilizar procedimientos heredados y nuevos (elementos, materiales, rutinas numéricas) escritos en otros lenguajes C y Fortran. Sin embargo, requiere de una interfaz en lenguaje TLC (Tool Command Language) necesario para interpretar los procedimientos o códigos.

OpenSees ha sido financiado por: PEER (Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico); NEES (George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation) a través de NEESit; NSF (Fundación Nacional de Ciencias)

Hacia el año 2016, OpenSees implementa el desarrollo del fuego en *OpenSees For Fire*[44], aunque los estudios iniciaron hacia el año 2009 en la Universidad Edimburgo, estudiantes

e investigadores trabajaron en este proyecto a largo plazo con sus propias contribuciones que permiten a OpenSees realizar análisis de *estructuras en llamas*, incluidos transferencia de calor, análisis termomecánicos y análisis integrados. Básicamente utiliza la interfaz de OpenSees con comandos adaptados para contener los parámetros o especificaciones definidas para una estructura en condición de exposición al fuego.

En las páginas oficiales de OpenSees y OpenSees For Fire, se presentan la documentación, ejemplos, codificación que puede ser descargada por las personas que estén haciendo sus estudios y consideren que el programa les pueda proporcionar una herramienta de trabajo.

A continuación, de manera resumida y concisa se expone un paso a paso desde la descarga hasta el uso de OpenSees visto desde la experiencia propia de este estudio:

#### 4.2.1. Alojamiento de la plataforma y descarga del software

En la página oficial[16] de OpenSees se ingresa en la pestaña *DOWNLOAD* (Descarga) al costado izquierdo de la pantalla, donde se abre una ventana que a su vez permite la opción de registrarse o ingresar si ya se tiene un usuario.

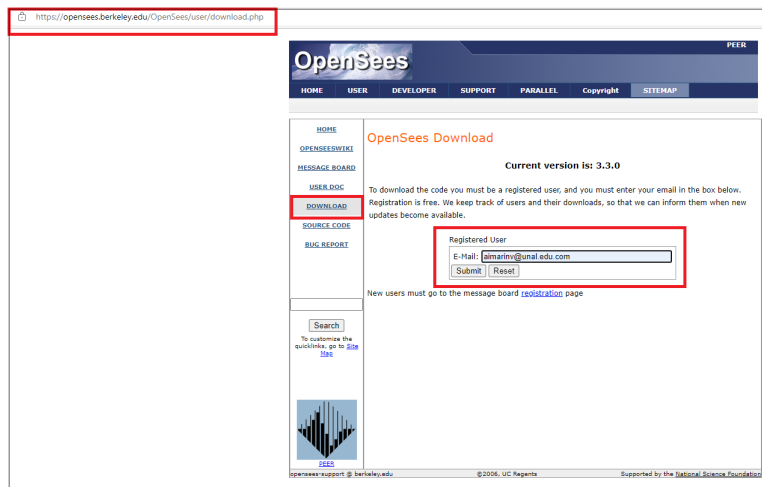


Figura 4-1.: Ingreso a la página OpenSees. Tomada de [16].

Una vez se haya ingresado, al final de la pantalla, según la versión del sistema operativo, se encuentran las opciones de descarga para Windows y MAC. Se descarga una carpeta ZIP (carpeta comprimida).



Figura 4-2.: Links de descarga OpenSees. Tomada de [16].

## 4.2.2. Instalación

La instalación es un paso muy sencillo, simplemente se extraen los archivos de la carpeta comprimida que se descargó preliminarmente, y se generan dos carpetas: Bin y Lib. En bin está el archivo ejecutable de “OpenSees”, el cual es el acceso a la interfaz, que se puede anclar al inicio o generar un acceso directo, este es el acceso a la aplicación.

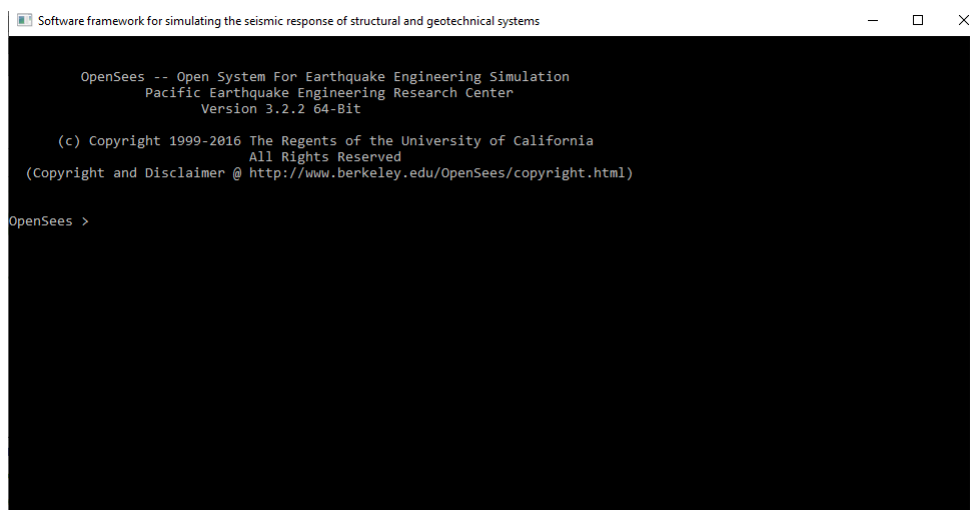


Figura 4-3.: Visualización de la ventana de Opensees.

### 4.2.3. Gestión de archivos

Si bien en la interfaz de OpenSees se puede crear el código, no es una manera visualmente cómoda, y es cuando se debe acudir a un editor de texto que contenga lenguaje TCL. Por lo tanto, lo mostrado en la figura 4-3 funciona generalmente como una plataforma donde se ejecuta un archivo TCL, guardado dentro de la carpeta Bin.

Se puede considerar los siguientes tipos de archivos:

- Archivo de entrada o principal: es el archivo, con extensión *.TCL*, que contiene el código de programación, este archivo se debe guardar en la carpeta *Bin* del programa OpenSees para que pueda ser ejecutado por el mismo, si no está dentro de la carpeta, al ejecutar el archivo, OpenSees va a indicar que no se encuentra la ubicación.
- Archivo secundario: también pueden estar otros archivos con extensión *.TCL* que si bien no es el archivo principal puede ser llamado dentro del principal, pueden ser subrutinas o librerías. También se guarda en la carpeta *Bin* del programa OpenSees.
- Resultados en la interfaz de OpenSees: si bien no es un archivo como tal, son los resultados que aparecen en la pantalla del ejecutable, figura 4-3, aparecen siempre y cuando sea una orden dentro del código y utilice los comandos adecuados para que así sean reportados.
- Archivos de salida: son los archivos *.OUT* que imprime los resultados que se solicitan mediante comandos dentro del código, quedan guardados en la carpeta *Bin* del programa OpenSees.
- Archivos complementarios: para el análisis se puede necesitar de archivos externos en los que se almacenan condiciones de diseño, éstos se guardan con extensión *.DATA*, como por ejemplo un espectro de respuesta, un acelerogram, una curva de calor, entre otros. También se guarda en la carpeta *Bin* del programa OpenSees.

### 4.2.4. Primeros pasos

Para llamar el archivo que se quiere ejecutar siempre se comienza con el comando *source* (se puede abreviar a *sou*) seguido del nombre exacto del archivo, seguido de la extensión *.tcl*, por ejemplo, *source portico2dv1.tcl*.

El código se ejecuta con *enter* y de acuerdo al procedimiento se pueden visualizar los resultados o bien en la pantalla de la imagen 4-4 o bien en un archivo *.out* o en una carpeta que contenga dicho archivo, todo a su vez queda guardado en la carpeta bin.

Es importante tener en cuenta que OpenSees diferencia mayúsculas de minúsculas y todos los signos gramaticales.

```

OpenSees -- Open System For Earthquake Engineering Simulation
Pacific Earthquake Engineering Research Center
Version 3.2.2 64-bit

(c) Copyright 1999-2016 The Regents of the University of California
All Rights Reserved
(Copyright and Disclaimer @ http://www.berkeley.edu/OpenSees/copyright.html)

OpenSees > source portico2dvi.tcl
node 3 Displacement: 0.0000388769577329961 -0.000010397808660487189 0.0001124968323
182660

Node: 3
Coordinates : 6 3
Disps: -3.88877e-05 -1.03978e-05 0.0001125
unbalanced Load: 0 0 0
ID : 3 4 5

ElasticBeam2d: 1
Connected Nodes: 1 2
CoordTransf: 1
mass density: 0, cMass: 0
release code: 0
End 1 Forces (P V M): 30 -13.9487 -11.8229
End 2 Forces (P V M): -30 13.9487 -29.9994

ElasticBeam2d: 2

```

Figura 4-4.: Visualización de ejecución de Opensees.

#### 4.2.5. Comandos y sintaxis

OpenSees contiene una serie de comandos para la elaboración del modelo y funcionamiento del mismo como fundamento del enfoque conceptual utilizado para simulación, tal como se muestra en la figura 4-5. En este capítulo vamos a mencionar los más utilizados en este trabajo. Para mayor información se puede revisar la página oficial de OpenSees [16] [44], así como alguna literatura de la referencia [46] [25].

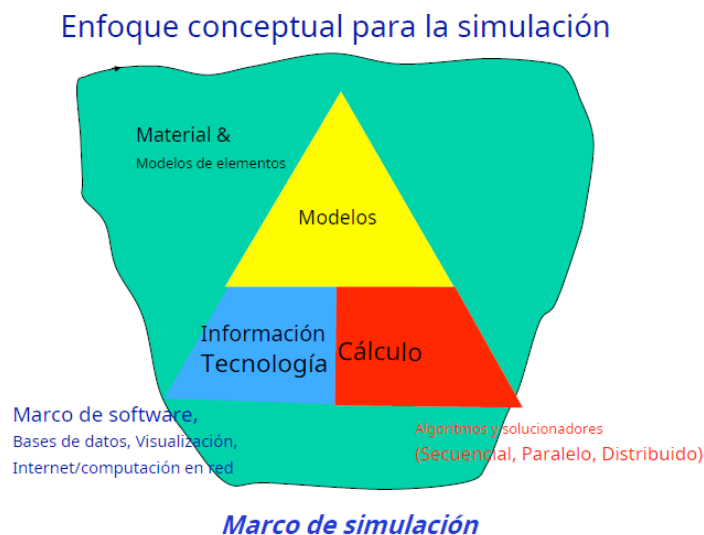


Figura 4-5.: Enfoque conceptual de funcionamiento de OpenSees. Tomado de [16].



OpenSees no maneja unidades, por lo que éstas se deben determinar con anticipación, se deja un comentario al inicio del código simplemente como indicativo. Los valores deben ser proporcionales de acuerdo a las unidades que se definieron para cada modelo. Los comentarios se anteceden por el signo numeral #.

Las acciones que principalmente operan en OpenSees son básicamente:

### Construcción del modelo

Con la unión de dos comandos *model BasicBuilder* se da la orden de crear el modelo, en la tabla 4-1 se puede ver la sintaxis de los comandos.

model BasicBuilder -ndm \$ndm <-ndf \$ndf>	
\$ndm	Dimensión espacial del problema (1,2, or 3)
\$ndf	Número de grados de libertad en el nodo (opcional)
	El valor predeterminado depende del valor de ndm:
	ndm=1 -> ndf=1
	ndm=2 -> ndf=3
	ndm=3 -> ndf=6

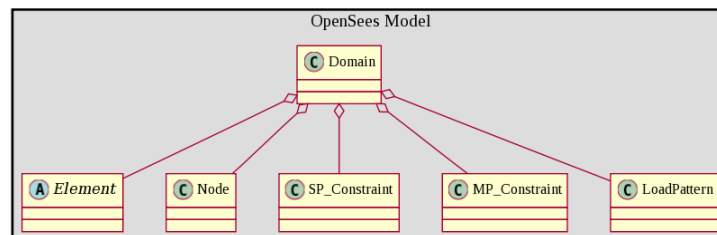
**Tabla 4-1.:** Comando para creación del modelo en OpenSees. Adaptado de[16]

En el ejemplo 4-27 se pide crear un modelo de 2 dimensiones y tres grados de libertad.

*model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3* (4-27)

### Dominio

En este aparte se crea nodos, restricciones, patrón de carga y series de tiempo. El dominio que utiliza OpenSees se presenta en la figura 4-6.



**Figura 4-6.:** Dominio de OpenSees. Tomado de [16].

Para crear nodos con el comando *node*, como se puede ver en la tabla 4-2, se debe tener en cuenta su numeración, coordenadas y grados de libertad.

node \$nodeTag (ndm \$coords) <-mass (ndf \$massValues)>	
\$nodeTag	Etiqueta de número entero que identifica al nodo
\$coords	coordenadas nodales (ndm argumentos)
\$massValues	Masa nodal correspondiente a cada DOF (ndf argumentos) (opcional))
La opción -mass permite asociar la masa nodal con el nodo	

**Tabla 4-2.:** Comando para creación de nodos en OpenSees. Adaptado de [16]

En el ejemplo 4-28, se indica crear el nudo número 3 con coordenadas (3, 6) con 3 grados de libertad.

$$\text{node } 3 \ 6 \ 3 \ -\text{ndf } 3 \quad (4-28)$$

También se debe determinar las restricciones en los nudos con el comando *fix*. Así como se muestra en la tabla: 4-3.

fix \$nodeTag (ndf \$constrValues)	
\$nodeTag	Etiqueta de número entero que identifica el nodo que será restringido
constrValues	Valores de restricción (0 o 1) correspondiente al ndf. 0 Sin restricción (or libre) o 1 Restringido (o fijo)

**Tabla 4-3.:** Comando para restricción de nodos en OpenSees. Adaptado de [16]

En el ejemplo 4-29 se indica crear el nodo 4 que esté restringido para desplazamientos laterales y giro.

$$\text{fix } 4 \ 1 \ 1 \ 1 \quad (4-29)$$

Se debe definir la transformación geométrica con el comando *geomTransf* y debe acompañarse siempre de una etiqueta de número entero. Algunos tipos de transformación geométrica disponibles son transformación lineal, transformación PDelta y transformación corrotacional.

El ejemplo 4-30 indica como crear la transformación geométrica número 1, tipo lineal. Cabe resaltar que dentro de un mismo código puede existir varias transformaciones geométricas dependiendo del análisis que se requiera realizar.

$$\text{geomTransf } \text{Linear } 1 \quad (4-30)$$

Antes de crear elementos se debe definir sus características como área, inercia, material, módulo de elasticidad, entre otras. Para este estudio se utilizan dos tipos de elementos, elemento elástico para viga y columna, y por otro lado un elemento afectado por temperatura. En la tabla 4-4 se puede ver las diferentes características que OpenSees puede tener en cuenta para la ejecución de su análisis.

Para un problema de dos dimensiones se utiliza el comando <code>element elasticBeamColumn \$eleTag \$iNode \$jNode \$A \$E \$Iz \$transfTag &lt;-mass \$massDens&gt;&lt;-cMass&gt;</code>	
Para un problema en tres direcciones se utiliza el comando <code>element elasticBeamColumn \$eleTag \$iNode \$jNode \$A \$E \$G \$J \$Iy \$Iz \$transfTag &lt;-mass \$massDens&gt;&lt;-cMass&gt;</code>	
<code>\$eleTag</code>	Etiqueta única del elemento
<code>\$iNode \$jNode</code>	nodo inicial i y nodo final j del elemento
<code>\$A</code>	Área transversal del elemento
<code>\$E</code>	Módulo de elasticidad o módulo de Young
<code>\$G</code>	Módulo de elasticidad a cortante
<code>\$J</code>	Momento de torsión de inercia de la sección transversal del elemento
<code>\$Iz</code>	Momento de inercia alrededor del eje z
<code>\$Iy</code>	Momento de inercia alrededor del eje y
<code>\$transfTag</code>	Identificador previamente definido para coordenadas-transformación
<code>\$massDens</code>	Elementos de masa por unidad de longitud (opcional, por defecto= 0.0)
<code>-cMass</code>	Para formar una matriz de masa consistente (opcional, por defecto se considera la matriz de masa concentrada)

**Tabla 4-4.:** Comando para creación de elementos elásticos en OpenSees. Adaptado de [16]

Se utiliza el comando `elasticBeamColumn` para definir un elemento elástico ya sea viga o columna. Por ejemplo en 4-31 se indica crear el elemento 1 que va desde el nudo 1 hasta el nudo 2, definido por área A, módulo elasticidad E, inercia I y finalmente la transformación de sus ejes locales está definida por la transformación geométrica lineal 1.

$$\text{element elasticBeamColumn 1 1 2 } \$A \$E \$I 1 \quad (4-31)$$

El signo pesos \$ se utiliza para llamar a una variable que ya fue definida mediante el comando `set` y se le asignó un valor. Por ejemplo, definir la variable E y asignarle el valor de 200.000.000, lo que a su vez denota que las unidades de fuerza están dadas en [kN] y las unidades de longitud en metros [m]. Muy bien sabemos que el módulo de elasticidad del acero es 200 GPa.

Seguidamente, haciendo uso del comando *timeSeries* se define el tipo de la serie de tiempo, que representa la relación entre el tiempo y el dominio, así como también se le asigna su numeración. En la tabla 4-5 se muestra exclusivamente el comando de la serie lineal. El tipo de timeseries creada y los argumentos adicionales necesarios dependen del tipo de la serie. Las series utilizadas por OpenSees son Constant TimeSeries, Linear TimeSeries, Trigonometric TimeSeries, Triangular TimeSeries, Rectangular TimeSeries, Pulse TimeSeries, Path TimeSeries, PeerMotion, PeerNGAMotion.

timeSeries Linear \$tag <-factor \$cFactor>	
\$tag	Etiqueta única de TimeSeries entre los objetos
\$cFactor	Factor lineal (opcional, por defecto=1.0)

**Tabla 4-5.:** Comando serie de tiempo lineal en OpenSees. Adaptado de [16]

El comando indicado en la tabla 4-5 se utiliza para construir un objeto TimeSeries Lineal en el que el factor de carga aplicado es linealmente proporcional al tiempo en el dominio, se caracteriza así como se indica en 4-32.

$$\text{timeSeries Linear 1} \quad (4-32)$$

Posteriormente, se crea los patrones de carga para un modelo convencional, lo que permite construir un objeto LoadPattern. Cada patrón de carga está asociado con un objeto TimeSeries y puede contener varios objetos de cargas puntuales, distribuidas, nodales, entre otras. El comando para generar el objeto LoadPattern se caracteriza de acuerdo a lo indicado en la tabla 4-6:

pattern Plain \$patternTag \$stsTag <-fact \$cFactor> {	
load...eleLoad...sp...}. Estos comandos además de generar los patrones de carga contienen las cargas y restricciones	
\$patternTag	Etiqueta única entre los patrones de carga
\$stsTag	Etiqueta de timeseries para ser usada en el patrón de carga
\$cFactor	Factor constante (opcional, por defecto=1.0)
load...	Comando para carga nodal
eleLoad ...	Comando para generar carga en los elementos
sp...	Comando para generar restricción en un solo punto

**Tabla 4-6.:** Comando patrones de carga de OpenSees. Adaptado de [16]

load \$nodeTag (ndf \$LoadValues)	
\$nodeTag	Etiqueta del nodo al cual se aplica la carga.
\$loadvalues	ndf Valores de carga.
NOTA: Los valores de carga son valores de carga de referencia. Es la serie temporal la que proporciona el factor de carga. El factor de carga multiplicado por los valores de referencia es la carga que realmente se aplica al nodo.	

**Tabla 4-7.:** Comando carga nodal en OpenSees. Adaptado de [16]

En el ejemplo 4-33 se indica como aplicar una carga de 180 kN en el nodo 2 en dirección x:

*load 2 180 0 0* (4-33)

Así mismo, se puede asignar cargas distribuidas y puntuales en los elementos, con el comando *eleLoad* como se muestra en la tabla 4-8. Se debe tener en cuenta que las cargas de los elementos solo se aplican a los elementos lineales.

load \$eleLoad \$arg1 \$arg2 \$arg3 ....	
Cuando ndm=2 los elementos aceptan los comandos de las siguiente forma:	
eleLoad -ele \$eleTag1 <\$eleTag2 ....> -type -beamUniform \$Wy <\$Wx>	
eleLoad -range \$eleTag1 \$eleTag2 -type -beamPoint \$Py \$xL <\$Px>	
Cuando ndm=3 los elementos aceptan los comandos de las siguiente forma:	
eleLoad -ele \$eleTag1 <\$eleTag2 ....> -type -beamUniform \$Wy \$Wz <\$Wx>	
eleLoad -range \$eleTag1 \$eleTag2 -type -beamPoint \$Py \$Pz \$xL <\$Px>	
\$eleTag1 \$eleTag2...	Etiqueta del elemento definida previamente
\$Wx	Carga uniformemente distribuida que actúa en dirección x
\$Wy	Carga uniformemente distribuida que actúa en dirección y
\$Wz	Carga uniformemente distribuida que actúa en dirección z
\$Px	Carga puntal que actúa en dirección x
\$Py	Carga puntal que actúa en dirección y
\$Pz	Carga puntal que actúa en dirección z
\$xL	Localización de la carga puntal relativa para el nodo i

**Tabla 4-8.:** Comando carga asignada a elementos OpenSees. Adaptado de [16]

El ejemplo 4-34 muestra como aplicar una carga distribuida de 12 kN en el elemento 2:

$$\text{eleLoad -ele 2 -type -beamUniform -12 0} \quad (4-34)$$

Cabe resaltar que el factor de carga multiplicado por los valores de referencia es la carga que realmente se aplica al elemento. Por otro lado, se debe tener en cuenta que eleLoads no funciona con elementos viga-columna dispuestas en el espacio si se utiliza la transformación geométrica corrotacional.

En el caso de elementos bajo influencias de fuego se utiliza dos comandos unidos *uniaxialMaterial Steel01Thermal* tal como se muestra en la tabla 4-9.

uniaxialMaterial Steel01Thermal \$matTag \$Fy \$E0 \$b <\$a1 \$a2 \$a3 \$a4>	
Esta clase de material se obtiene modificando el material de acero existente “Steel01” para incluir las propiedades dependientes de la temperatura según EN 1993-1-2. La definición de los parámetros del material Steel01Thermal se puede escribir de la siguiente manera:	
\$matTag	Etiqueta entera identificando al material
\$Fy	Esfuerzo de fluencia
\$E0	Módulo de elasticidad inicial
\$b	Relación de endurecimiento por deformación (relación entre la tangente posterior a la fluencia y la tangente elástica inicial)
\$a1	Parámetro de endurecimiento isotrópico, aumento del límite elástico a la compresión como proporción del límite elástico después de una deformación plástica de $a2*(Fy/E0)$ . (opcional)
\$a2	Parámetro de endurecimiento isotrópico (similar a \$a1). (opcional)
\$a3	Parámetro de endurecimiento isotrópico, aumento del límite elástico de tensión como proporción del límite elástico después de una deformación plástica de $a4*(Fy/E0)$ . (opcional)
\$a4	Parámetro de endurecimiento isotrópico (similar a \$a3). (opcional)

**Tabla 4-9.:** Comando material afectado por temperatura OpenSees. Adaptado de [16]

El ejemplo 4-35 muestra como crear el material de acero térmico número 1, cuando se le asigna esfuerzo de fluencia  $Fy=420$  MPa, módulo de elasticidad  $E=200000$  MPa, y un coeficiente de elongación térmica  $\alpha=0.1$ .

$$\text{uniaxialMaterial Steel01Thermal 1 420 2e5 0.1} \quad (4-35)$$

Para el análisis considerando la afectación por altas temperaturas, se crea como una sub-clase de la clase abstracta `ElementalLoad` para definir un campo térmico que almacena la distribución de temperatura (historial) a lo largo de una sección de tipo viga. De acuerdo con la tabla 4-10 la primera columna es para especificar intervalos de tiempo, y las columnas segunda a décima son temperaturas correspondientes a cada intervalo de tiempo y límites de zona.

Thermal Action Commands for Thermo-Mechanical analysis in OpenSees									
A. Definición de temperatura en línea									
<code>eleLoad -ele \$eleTag -type -beamThermal \$T1 \$y1 \$T2 \$Y2</code>									
B. Uso de un archivo externo de datos de temperatura									
<code>\$time1</code>	<code>\$T11</code>	<code>\$T12</code>	<code>\$T13</code>	<code>\$T14</code>	<code>\$T15</code>	<code>\$T16</code>	<code>\$T17</code>	<code>\$T18</code>	<code>\$T19</code>
<code>\$time2</code>	<code>\$T21</code>	<code>\$T22</code>	<code>\$T23</code>	<code>\$T24</code>	<code>\$T25</code>	<code>\$T26</code>	<code>\$T27</code>	<code>\$T28</code>	<code>\$T29</code>
...									
Para usar un archivo externo de curvas de fuego se debe seguir la siguiente línea:									
<code>eleLoad -ele \$eleTag -beamThermal -source \$fileName \$Y1 \$Y2 &lt; \$Y3 ... \$Y9&gt;</code>									

**Tabla 4-10.:** Comando acción térmica en OpenSees. Adaptado de [16]

En el ejemplo 4-36 se pide crear la acción térmica de una viga, con una distribución lineal de temperatura de 600°C sobre la parte inferior de la viga (-150mm) y 500°C sobre la parte superior de la viga (150mm), considerando una viga de 300 mm.

*pattern Plain 1 Linear {eleLoad -range 1 6 -type -beamThermal 600 -150 500 150}* (4-36)

Thermo-Mechanical Elements in OpenSees
1. <code>dispBeamColumnThermal</code> : Los elementos viga-columna basados en el desplazamientos termomecánicos
<code>element dispBeamColumnThermal \$eleID \$NodeTag0 \$NodeTag1 \$NumInts \$secTag \$TransfTag;</code>
2. <code>forceBeamColumnThermal</code> : Los elementos viga-columna basados en fuerzas termomecánicas
3. <code>element forceBeamColumnThermal \$eleID \$NodeTag0 \$NodeTag1 \$NumInts \$secTag \$TransfTag</code>

**Tabla 4-11.:** Comando carga térmica en OpenSees. Adaptado de [16]

El análisis térmico se puede considerar asignando a los elementos estructurales, ya sean vigas o columnas, las características o parámetros que los identifican al ser afectados por las altas temperaturas como se muestra en la tabla 4-11. Así, estos elementos serán cargados ya sea con fuerzas distribuidas o fuerzas puntuales.

### Análisis

En esta sección OpenSees define las diferentes herramientas de análisis lineales y no lineales disponibles. Para cada análisis, es necesario definir los siguientes elementos, de preferencia en el siguiente orden:

- **constrains:** construye un objeto que determina cómo se aplican las ecuaciones de restricción en el análisis.
- **number:** crea el objeto que determina la numeración de los grados de libertad.
- **system:** almacena y resuelve el sistema de ecuaciones en el análisis.
- **test:** se utiliza para determinar si se logró la convergencia al final de un paso de iteración.
- **algorithm:** se utiliza para determinar la secuencia de pasos que se deben seguir para resolver la ecuación no lineal.
- **integrador:** determina el significado de los términos en el objeto del sistema de ecuaciones.
- **analysis:** Este objeto de análisis se construye con los objetos componentes creados previamente. Todos los objetos de análisis disponibles actualmente emplean estrategias de solución incremental. Hay tres tipos de análisis disponibles actualmente: Estático - para análisis estático, Transitorio - para análisis transitorio con paso de tiempo constante, VariableTransient - para análisis transitorio con paso de tiempo variable.

**Otros comandos:** Algunos comandos de uso frecuente en la modelación se cita a continuación:

*wipe:* Este comando se usa para comenzar de nuevo sin tener que salir y reiniciar. Hace que todos los elementos, nodos, restricciones, cargas se eliminen del dominio. Además, elimina todos los registradores, objetos de análisis y todos los objetos materiales creados por el generador de modelos.

*remove:* Este comando se utiliza para eliminar componentes del modelo.



*print*: este comando se utiliza para imprimir la salida a la pantalla o al archivo y se resume en la tabla 4-12.

print <-file \$fileName>	
Para imprimir todos los objetos del dominio en un archivo JSON: print -JSON -file \$fileName	
Para imprimir información del nodo: print <-file \$fileName> -node <-flag \$flag> <\$node1 \$node2 ...>	
Para imprimir información de elementos: print <-file \$fileName> -ele <-flag \$flag> <\$ele1 \$ele2 ...>	
\$fileName	(opcional) Nombre del archivo al que se enviarán los datos, sobrescribe el archivo existente.
\$flag	indicador entero que se enviará al método print(), según el nodo y el tipo de elemento (opcional)
\$node1 \$node2...	(opcional) Etiquetas enteras de los nodos que se van a imprimir. Por defecto print es imprimir todo.
\$ele1 \$ele2...	(opcional) Etiquetas enteras de los elementos que se van a imprimir. Por defecto print es imprimir todo..

**Tabla 4-12.:** Comando imprimir en OpenSees. Adaptado de [16]

*puts*: funciona similar al comando *print*.

*mkdir*: Este comando crea una dirección dentro de la carpeta *Bin* donde se puede guardar los resultados y siempre está antecedido del comando *file*.

*exit*: Este comando se utiliza para salir del programa de forma controlada.

### 4.3. Notepad++

Notepad ++ es un editor de código fuente, gratuito, que admite varios idiomas. Ejecutándose en el entorno MS Windows, su uso se rige por GNU General Public License.

Notepad ++ está escrito en C ++ y utiliza API y STL de Win32, lo que garantiza una mayor velocidad de ejecución y un tamaño de programa más pequeño.

El uso de este editor básicamente se debe a que tiene incorporado el lenguaje TCL con el que principalmente trabaja OpenSees.

Es en NotePadd++ donde se va a digitalizar el código o programa implementado para validar la estructura de estudio y que a su vez será leído por OpenSees que se encarga del análisis.

### 4.3.1. Descarga e instalación

Se accede a la página oficial de notepad++[31], en la pestaña descarga la aplicación presenta opciones de descarga para Windows 64 y 32. La Versión 8.3.3 fue la que se descargó para el desarrollo de esta investigación. Se descarga la carpeta comprimida y se debe descomprimir. Dentro de la carpeta está el archivo de aplicación Notepad++ el cual se debe ejecutar, como se muestra en la figura 4-8. El link de descarga para Windows se muestra como en la figura 4-7. Cabe resaltar que este programa es de libre descarga y uso.

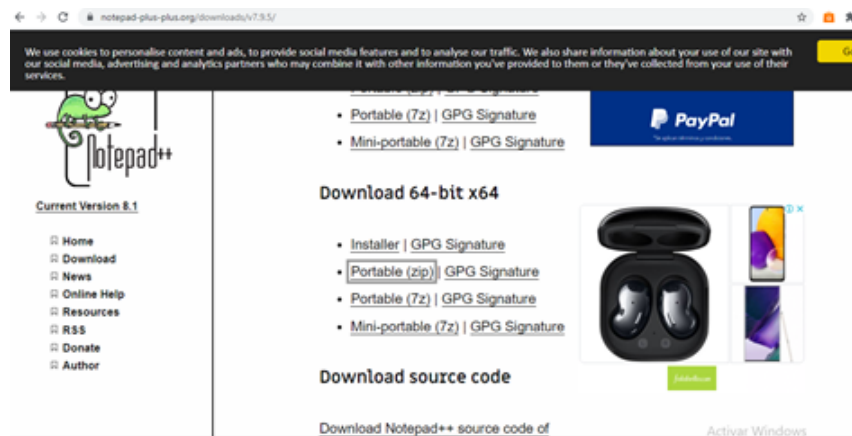


Figura 4-7.: Links de descarga Notepad++. Tomado de [31].

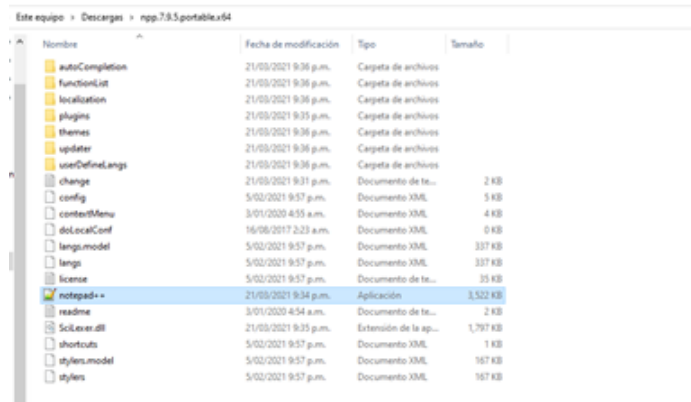


Figura 4-8.: Archivos de descarga Notepad++. Tomado de [31].

### 4.3.2. Uso

La aplicación es un editor de texto donde se puede modificar el código de programación. Para que estos archivos se puedan usar en OpenSees deben guardarse en lenguaje TCL tal como se muestra en figura 4-9.

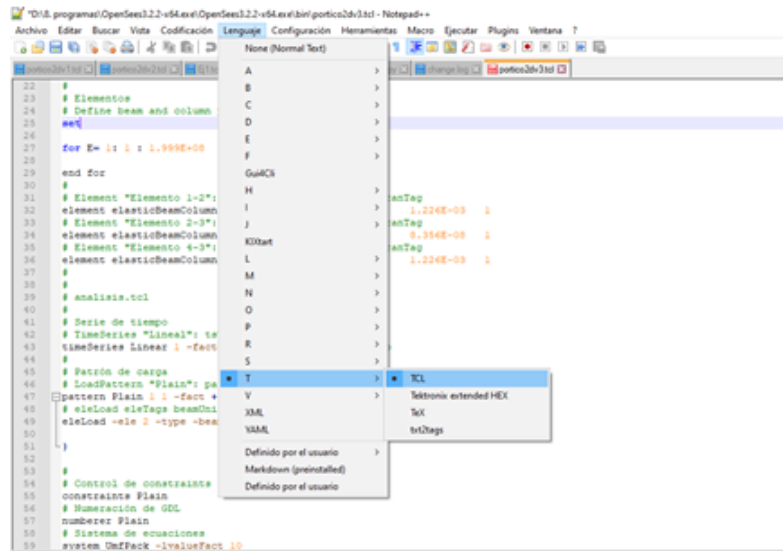


Figura 4-9.: Visualización de la ventana Notepad++ [31].

## 4.4. SAP2000

SAP2000 es un programa de elementos finitos para modelado, análisis y dimensionamiento de cualquier estructura, posee interfaz gráfico 3D [21]. Es importante dejar señalado que la Universidad Nacional de Colombia cuenta con licenciamiento para su uso.

### 4.4.1. Descarga e instalación

Se accede a la página oficial [21] se sigue los pasos para descarga e instalación, así como tutoriales para el manejo del mismo.

### 4.4.2. Uso

SAP2000 es una herramienta que desde el campo ingenieril es de gran ayuda para el diseño estructural por la confiabilidad en los resultados, la facilidad del uso y sobretodo que el análisis y diseño tiene incorporadas las normativas pioneras bases de otras normas incluyendo la NSR-10.

Para la elaboración del modelo se puede seguir el siguiente orden:

## Creación del modelo

Se crea un modelo nuevo, se define unidades y tipo de estructura. SAP2000 abre una ventana como la que se muestra en la figura 4-10 donde se puede apreciar los diferentes tipos de estructuras, entre las cuales se puede encontrar viga, cercha en el plano, cercha en el espacio, pórtico en el plano, pórticos en el espacio, muros, entre otros.

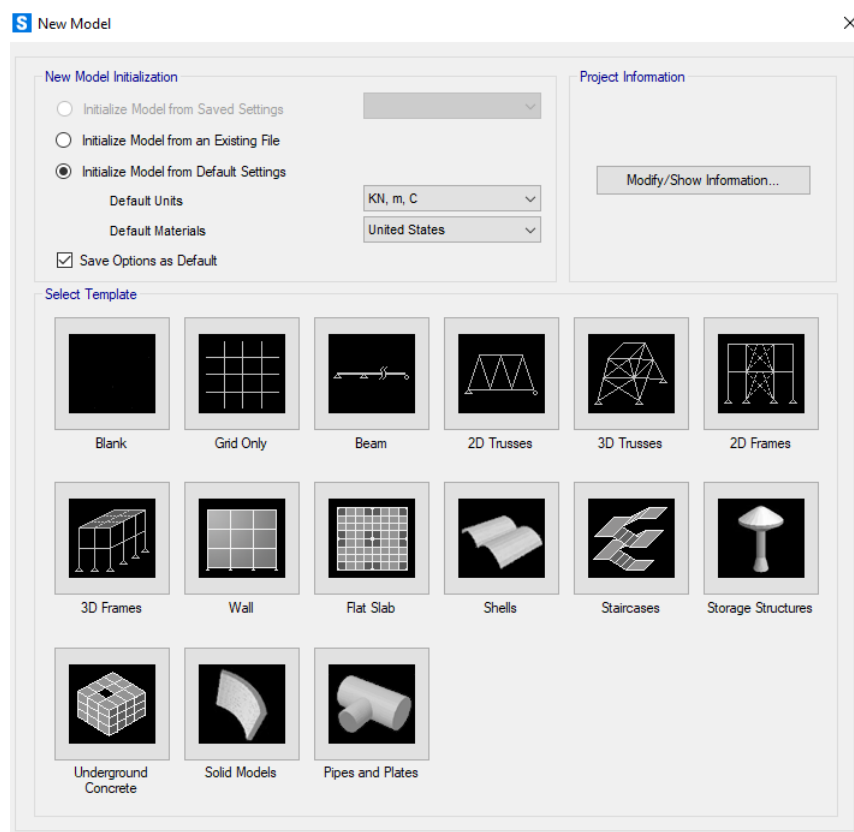


Figura 4-10.: Creación modelo nuevo SAP2000 [21].

En este paso también se debe definir el sistema de unidades y las unidades con las cuales se va a trabajar. Aunque posterior a la definición, durante la configuración de la estructura y asignaciones correspondientes, se puede modificar las unidades de acuerdo con la necesidad del usuario.

## Creación de materiales

Se crea materiales, siguiendo la línea *Define Materials/Add Material Property/* en donde hay múltiples opciones tanto de materiales como de normativas. SAP200 abre una ventana tal como se muestra en la figura 4-11 en donde se pide las principales características de entrada para el acero, por ejemplo es necesario modificar de acuerdo con los requerimientos

del proyecto el grado del acero, peso, módulo de elasticidad y esfuerzo de fluencia, y sobre todo revisar que las unidades correspondan con las requeridas.

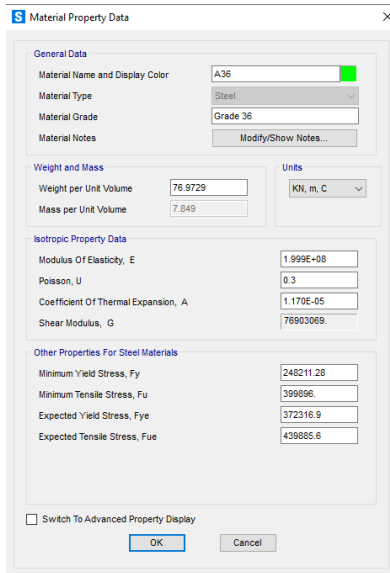


Figura 4-11.: Creación materiales SAP2000 [21].

### Creación de secciones

Se crea secciones ya sea de vigas o columnas, siguiendo la línea *Define Section Properties/Frame Sections/* en donde hay múltiples opciones para importar tanto secciones metálicas, como de otros materiales, modificarlas o crearlas desde cero. En la figura 4-12 se puede ver la creación de un sección de acero donde se debe digitalizar las dimensiones geométricas del elemento, generalmente se crean estos elementos de acuerdo a las secciones que existan en el mercado.

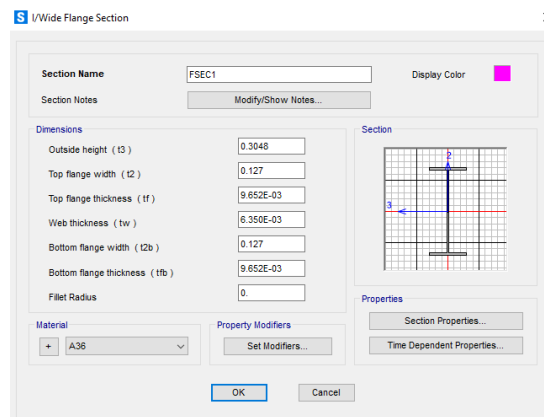


Figura 4-12.: Creación secciones SAP2000 [21].

## Asignación de elementos

Si bien el modelo se crea automáticamente con unas secciones por defecto, después de crear las secciones que se va a usar en el proyecto se puede asignar, mediante el comando *assing*, si no se creó automáticamente, se debe dibujar cada uno de los elementos con las secciones definidas.

## Creación de patrones de carga

Se crea patrones de carga siguiendo la línea *Define/Load Patterns*, donde se encuentra una variedad de tipos de carga. En la figura 4-13 se muestra la creación de patrones de carga, donde se debe especificar el tipo de carga y el multiplicador.

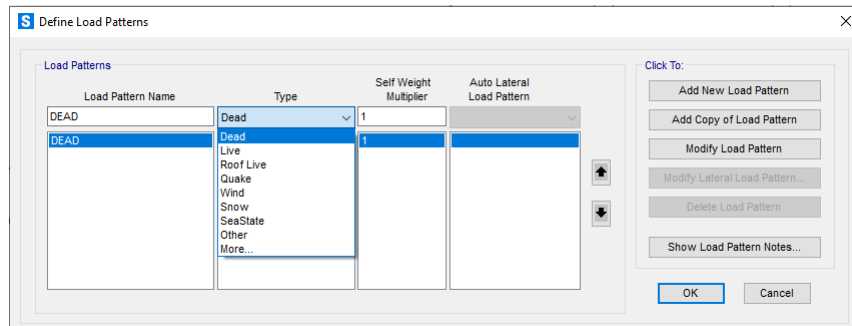


Figura 4-13.: Creación patrones de carga SAP2000 [21].

## Definición de casos de carga

Se puede determinar las características de cada caso de carga según la necesidad de análisis. En la imagen 4-14 se puede observar que para cada caso de carga se puede especificar el caso de carga, el tipo de análisis, entre otras.

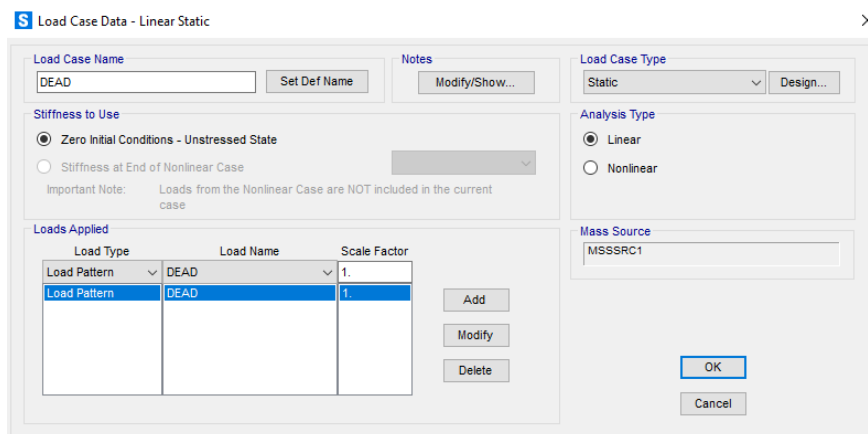


Figura 4-14.: Definición casos de carga SAP2000 [21].

### Definición de espectro

Definir el espectro siguiendo *Define/Functions/Response Spectrum/* elegir norma(Colombia NSR-10), definir parámetros de acuerdo al proyecto. Por ejemplo, en la figura 4-15 se muestra un espectro para la ciudad de Bogotá donde el grupo de uso es IV.

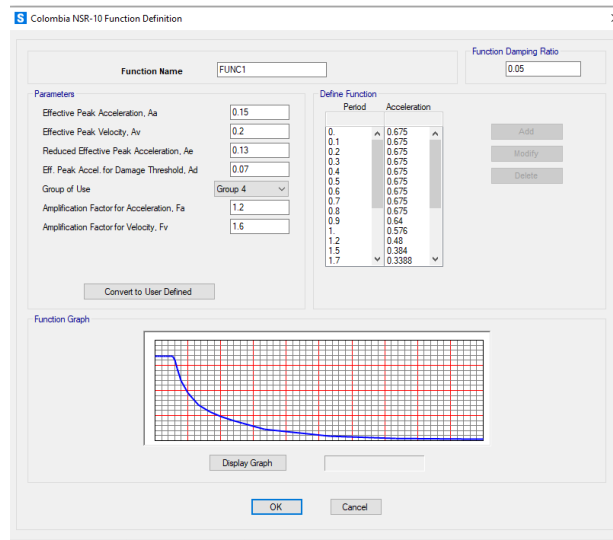


Figura 4-15.: Definición casos de carga SAP2000 [21].

### Asignaciones de cargas

Se puede asignar diferentes tipos de carga así como otro tipo de asignaciones ya sea al elemento o a los nodos, como es el caso de las restricciones. Siguiendo la siguiente línea *Assign/Frame Loads/Distributed* se puede asignar una carga distribuida como se muestra en la figura 4-16.

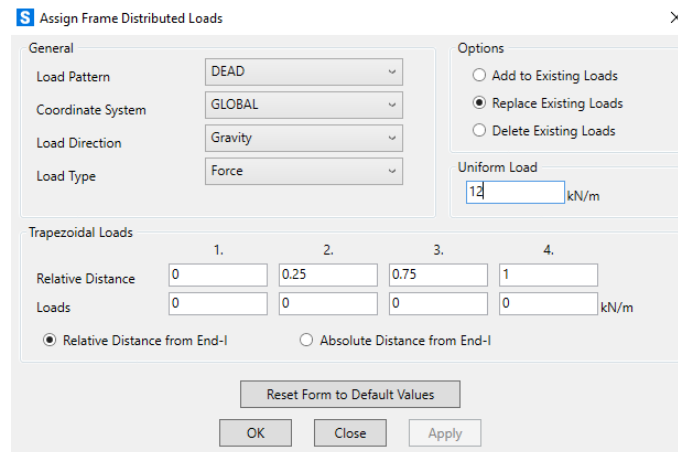


Figura 4-16.: Asignación carga distribuida SAP2000 [21].

Así mismo, siguiendo la línea *Assign/Joint Loads/Forces* se puede asignar una carga puntual como se puede ver en la figura 4-17.

S Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 180 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 0 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: 0 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Figura 4-17.: Asignación carga puntual SAP2000 [21].

Por otro lado, siguiendo la línea *Assign/Joint/Restraint* se asignan las restricciones tal como se muestra en la figura 4-18

S Assign Joint Restraints

Restraints in Joint Local Directions

Translation 1

Translation 2

Translation 3

Rotation about 1

Rotation about 2

Rotation about 3

Fast Restraints

OK Close Apply

Figura 4-18.: Definición casos de carga SAP2000 [21].



### **Análisis**

Para analizar simplemente se corre el programa con los casos que se desee revisar, se puede visualizar gráficamente y tabulado los resultados de reacciones, deformadas, fuerzas en los elementos, entre otras.

### **Diseño**

Antes de diseñar se debe crear las combinaciones de carga en *Define/Load Combinations*, se agrega una a una o se usa las definidas por defecto. El diseño se realiza cada vez que el programa esté ejecutado, indicando los parámetros de diseño según la normativa. Igualmente, los resultados se pueden visualizar gráficamente y tabulados.

## **4.5. Otros programas usados en este trabajo**

Si bien los anteriores programas computacionales fueron los más usados para dar soporte al presente trabajo, también se utilizaron otros programas para poder organizar y sistematizar la información de una manera didáctica.

### **Excel**

Excel es una herramienta de Microsoft que tiene diversas funcionalidades, por consiguiente, para este trabajo se utilizó Excel para la creación de tablas comparativas a partir de los resultados obtenidos en SAP2000 y en OpenSees, así mismo, se utilizó para la construcción de gráficas que mostraran el comportamiento de las estructuras bajo la incidencia de fuego.

Es importante dejar señalado que la Universidad Nacional de Colombia cuenta con licenciamiento para su uso.

### **AutoCAD**

El software de diseño AutoCAD fue utilizado para realizar dibujos y esquemas representativos de modo que la explicación de las metodologías fuera de mejor comprensión.

Es importante dejar señalado que la Universidad Nacional de Colombia cuenta con licenciamiento para su uso.

## 5. Implementación de los casos de estudio propuestos

En este capítulo se presenta la implementación de la formulación del modelo matemático descrita en el capítulo anterior, dentro de los estándares de las normativa vigente, simplificado en el diagrama de flujo de la imagen **5-1**.

Las configuraciones estructurales de estudio son estructuras reticulares convencionales de acero. Así como también, ya se conoce que las propiedades mecánicas del acero se ven afectadas una vez queden expuestas a altas temperaturas generadas por un incendio. A partir de ahí se realiza tres perspectivas de análisis: Disminución del módulo de elasticidad; Afectación del área expuesta; e Implementación de solicitaciones de fuego.

La implementación del modelo matemático tiene dos herramientas computacionales de análisis estructural, OpenSees y SAP2000, con los cuales se modeló en paralelo, utilizando la misma geometría y los mismo parámetros, con el fin de convalidar la información resultante de cada análisis.

Para el caso de implementación de la solicitación del fuego, se recurre a una curva estandarizada, curva de fuego ISO-834 indicada en la figura **3-11**, esta curva también está referida en la normativa colombiana NSR-10 [6].

Por otro lado, la definición de la geometría cumple con los parámetros mínimos establecidos en el título F y capítulo F.2.18 de la NSR-10 [6], con la salvedad de ser una estructura simple, con características comunes, pero que a su vez muestra un análisis claro y conciso de su comportamiento en estado inicial y bajo la influencia de altas temperaturas generadas por el fuego de un incendio.

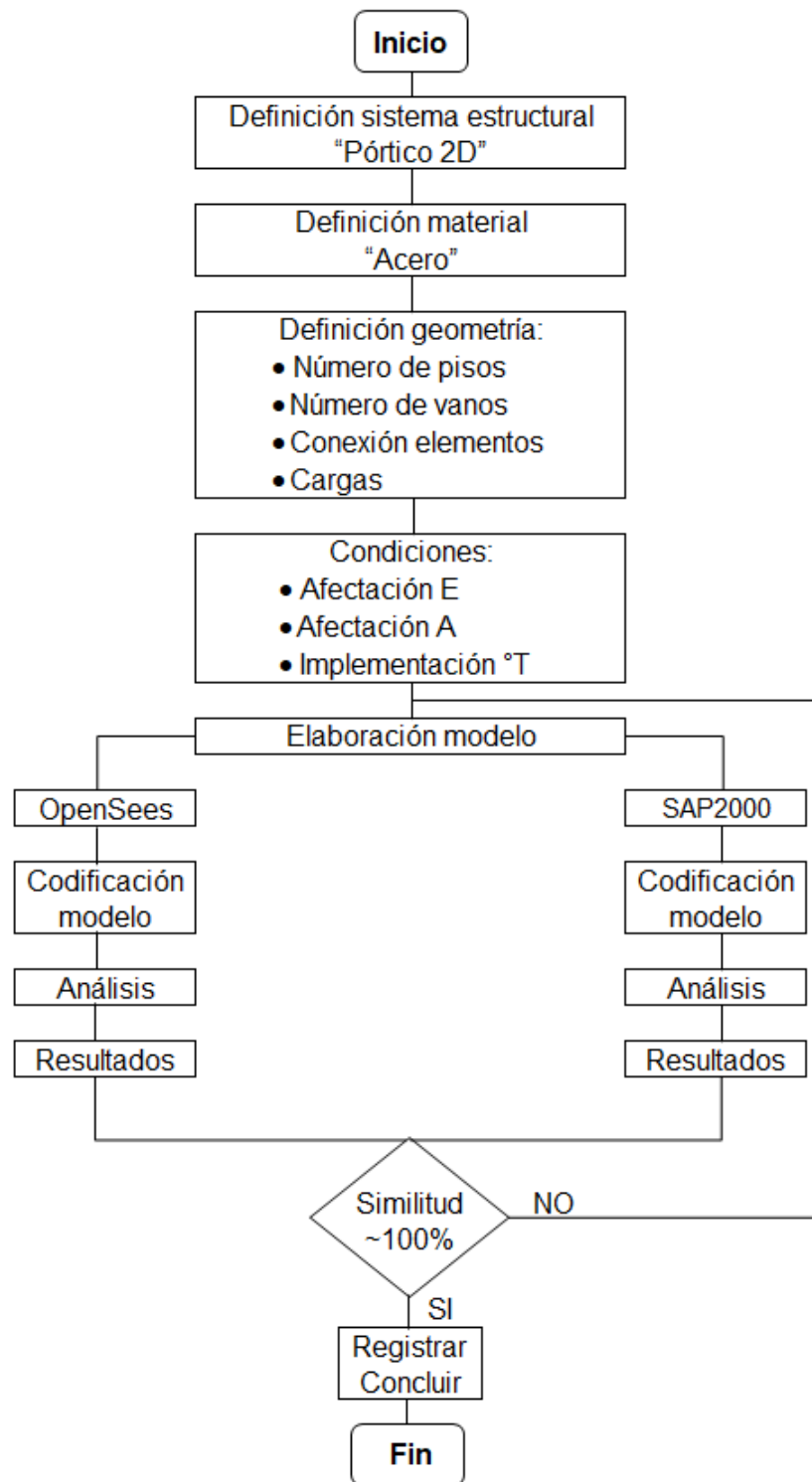


Figura 5-1.: Diagrama de flujo que indica la metodología propuesta.

## 5.1. Implementación de la afectación del módulo de elasticidad

Para cada uno de los casos de pórticos A(Ver figura: **3-3**), B(Ver figura: **3-4**) y C(ver figura: **3-5**), se conforma el modelo matemático en OpenSees, tal como se ha referenciado en el capítulo anterior, para este primer caso con el distintivo de la variación del módulo de elasticidad.

### 5.1.1. Implementación en OpenSees

Utilizando OpenSees se implementó un contador *for* para variar el módulo de elasticidad, con el fin de obtener la respuesta de la estructura en cuanto desplazamientos y fuerzas en los elementos. De esta manera, se va a mostrar en detalle el uso de OpenSees para considerar esta variación en el módulo de elasticidad.

#### Configuración estructural: CE-A

Con los comandos definidos en el capítulo 3 se codificó el pórtico A, teniendo en cuenta la variación del módulo de elasticidad.

```
1 # Análisis lineal estático
2 # Pórtico 2D con variación del módulo de elasticidad
3 # unidades en kN,m
4 #
5 # Borrar modelo existente
6 wipe
7 #
8 # Crear modelo
9 model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
10 #
11 # Crear directorio de almacenamiento
12 file mkdir DataEa;
13 #
14 # create Nodos
15 # Comando: Node- nodeID xCrd yCrd ndf
16 node 1 0 0 -ndf 3;
17 node 2 0 3 -ndf 3;
18 node 3 6 3 -ndf 3;
19 node 4 6 0 -ndf 3;
20 #
21 puts "ok"
22 #
23 # Asignación de apoyos
24 # Comando: fix- nodeID xRest yRest zRest
25 fix 1 1 1 1
26 fix 4 1 1 1
```

Figura 5-2.: Creación modelo, creación de nodos -CE:A en OpenSees

En la figura 5-2 se puede ver el inicio del código así: en la línea 9 se creó el modelo de dos dimensiones con 3 grados de libertad; en la línea 12 se creó una carpeta en la que se

almacenó los resultados obtenidos en el análisis, donde *file mkdir* es el direccionamiento de almacenamiento y *DataEa* es el nombre del archivo, recordando que la información se guarda en la carpeta *bin* del programa; en las líneas 16 a 19 se creó los nodos; la línea 21 es un punto de control y es opcional, lo que quiere decir que si en la ventana principal de OpenSees aparece *ok* quiere decir que hasta ahí el programa está funcionando; en la líneas 25 y 26 se definen los apoyos de la estructura, los comentarios están en color verde y se anteceden del signo #.

En la figura 5-3 se continúa con el código, en las líneas 33 a 37 se asignan las características de las secciones, en la líneas de 43 a 50 se recurre al contador *for* para hacer la variación del módulo de elasticidad, en este caso se hace una variación controlada con el fin que se reciba los resultados de temperaturas. La orden de la línea 52 *puts* "ok" es un control, como anteriormente ya se había indicado, esta orden se da para que escriba *ok* si se crearon bien los elementos.

```

31 # Elementos
32 # Características de las secciones
33 set E 2.0E+08; #Módulo de elasticidad
34 set Ab 5.38E-03; #Área sección de viga
35 set Ac 0.0159; #Área sección de Columna
36 set Ib 8.356E-05; #Inercia sección biga
37 set Ic 4.507E-05; #Inercia sección columna
38 #
39 #level no debe ser menor que el numero de elementos
40 #
41 # Creación de elementos
42 # Comando: elasticBeamColumn - eleID nodoi nodoj A I E geomTransf
43 for {set level 1} {$level <=10} {incr level 3} {
44     set a $level
45     set E0 [expr $E*$a*10/100]
46     set eleID $a
47     element elasticBeamColumn $eleID           1 2 $Ac $E0 $Ic 1;
48     element elasticBeamColumn [expr $eleID+1] 2 3 $Ab $E0 $Ib 1;
49     element elasticBeamColumn [expr $eleID+2] 4 3 $Ac $E0 $Ic 1;
50 }
51 #
52 puts "ok"

```

Figura 5-3.: Creación elementos -CE:A en OpenSees

Los elementos que se están creando contienen las características principales como el área, el módulo de elasticidad y la inercia. Así mismo, se configura entre los nodos que está el elemento.

Para concluir el código de variación del módulo de elasticidad: en la figura 5-4 se indica en la línea 57 el tipo de análisis que se realizó, y en este caso es de tipo lineal; en las líneas 61 a 65 se crearon los patrones de carga y se realiza la asignación de cargas, carga distribuida en el elemento 2 de 12 kN, y carga puntual en el nodo 2 de 180 kN en dirección x; en la línea 67 se están guardando los resultados tipo fuerzas; finalmente en la línea 70 a 84 se ejecuta

el análisis lineal estático.

```

54 # analisis.tcl
55 # Serie de tiempo
56 # TimeSeries "Lineal": tsTag cFactor
57 timeSeries Linear 1 -factor 1; # Problema es estático
58 #
59 # Patrón de carga
60 # LoadPattern "Plain": patternTag tsTag factor
61 pattern Plain 1 1 -fact +1 {
62   # eleLoad eleTags beamUniform Wy <Wx>
63   eleLoad -ele 2 -type -beamUniform -12 0; #Carga distribuida en elemento 2
64   load 2 180 0 0; # Carga puntual en el nodo 2
65 }
66 #
67 recorder Element -file DataEa/ForcesEa.out -time -ele 1 2 3 forces;
68 #
69 # Control de constraints
70 constraints Plain
71 # Numeración de GDL
72 numberer Plain
73 # Sistema de ecuaciones
74 system UmfPack -lvalueFact 10
75 # Prueba de convergencia
76 test EnergyIncr +1.000000E-06 25 0 2
77 # Algoritmo de solución
78 algorithm Newton
79 # Integrador
80 integrator LoadControl 1.0 4 0.001 1.0
81 # Tipo de análisis
82 analysis Static
83 # Ejecutar análisis
84 analyze 1

```

Figura 5-4.: Asignación de cargas, creación elementos -CE:A en OpenSees

### Configuración estructural: CE-B y CE-C

Para los pórticos B y C, simplemente se agregaron los nodos y elementos faltantes, y se procedió con el mismo análisis.

### 5.1.2. Implementación en SAP2000

Así mismo, se implementó en el software SAP2000, está misma condición de variar el módulo de elasticidad para los tres diferentes módulo de elasticidad bajo efectos de temperatura, además del módulo de elasticidad sin modificar.

### Configuración estructural: CE-A

Se asigna los módulos de elasticidad para el Pórtico A de acuerdo con la temperatura referenciada en la tabla 3-1.

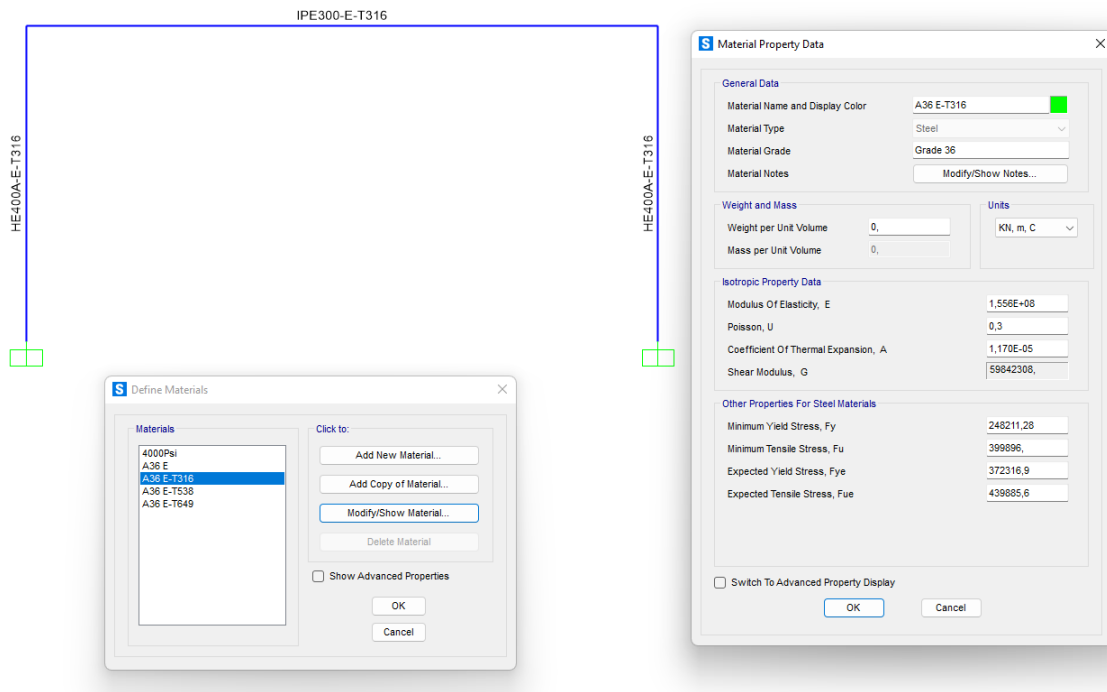


Figura 5-5.: Material bajo temperatura 316°C -CE:A en SAP2000

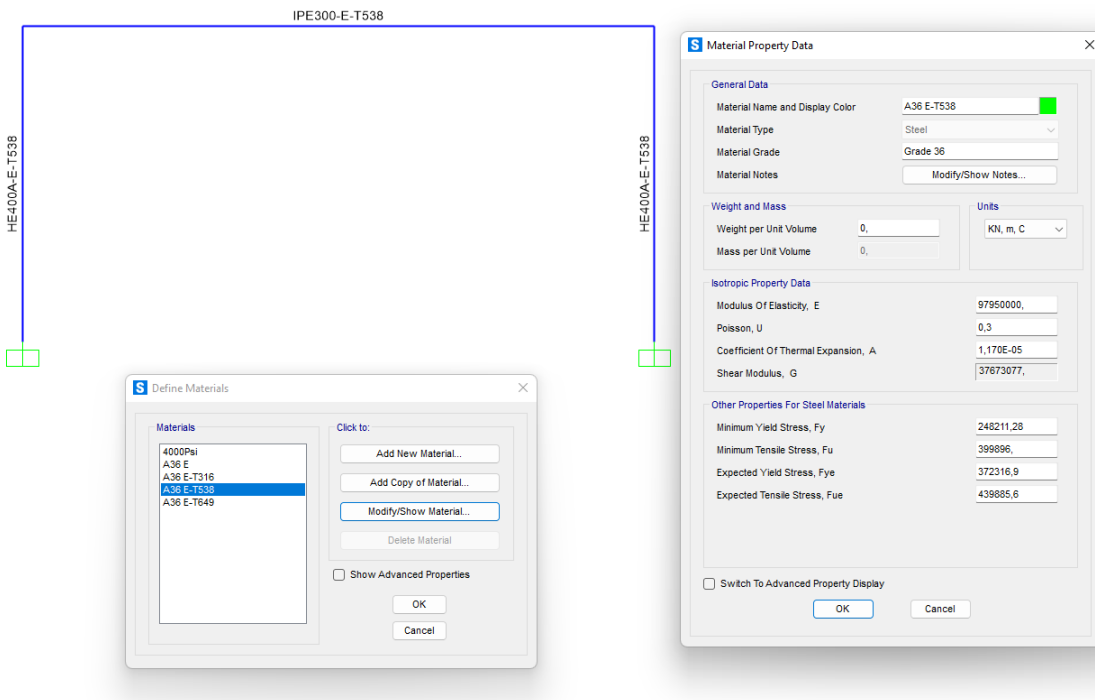


Figura 5-6.: Material bajo temperatura 538°C -CE:A en SAP2000

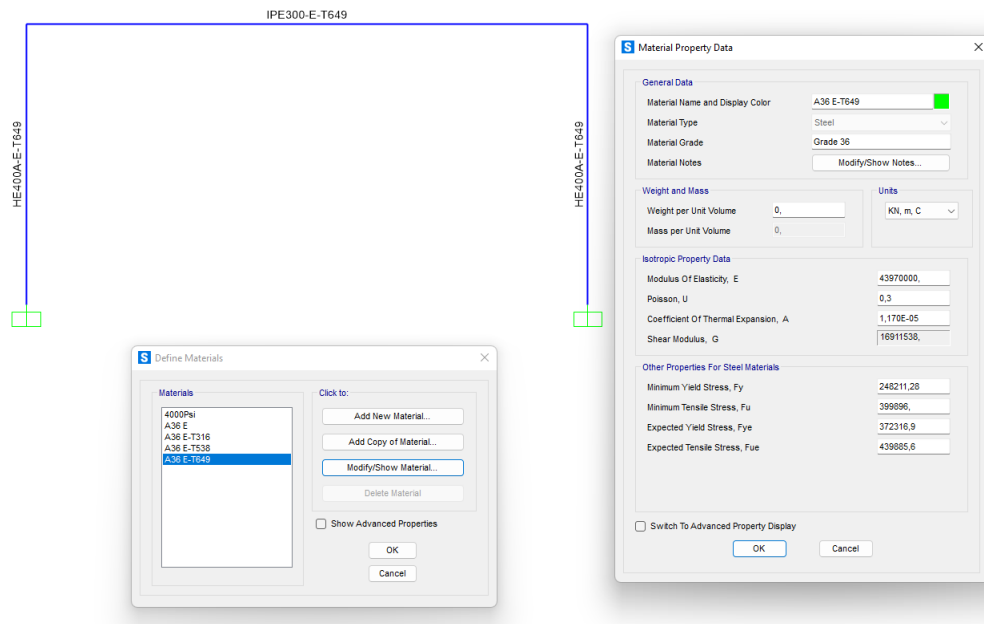


Figura 5-7.: Material bajo temperatura 649°C -CE:A en SAP2000

### Configuración estructural: CE-B

Se asigna los módulos de elasticidad para el Pórtico B de acuerdo con la temperatura referenciada en la tabla 3-1.

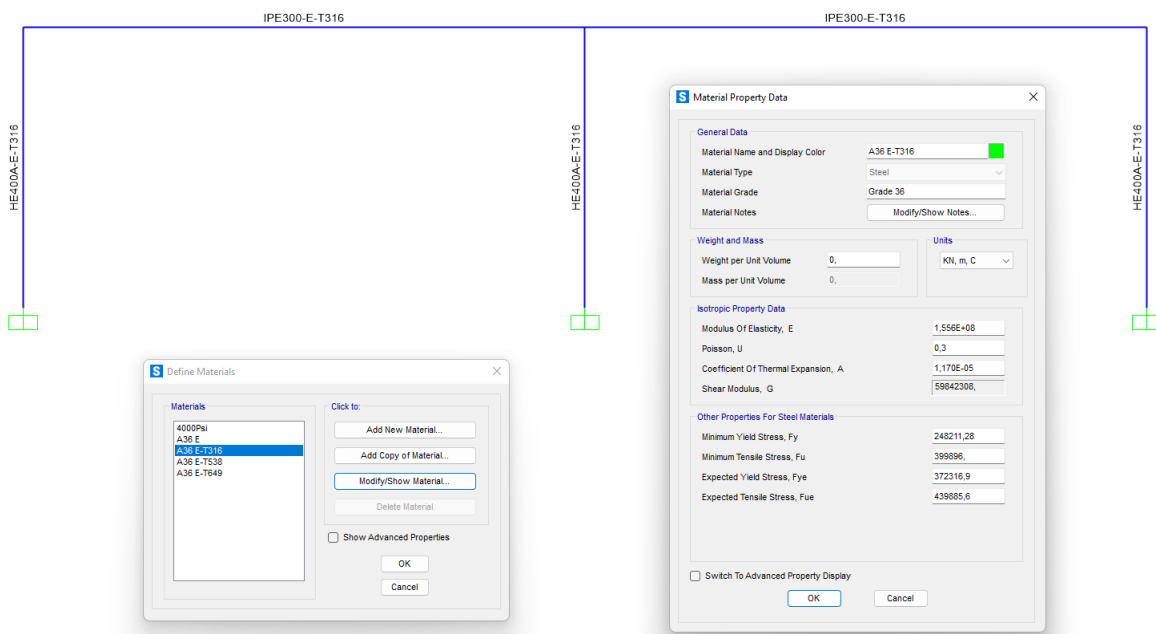


Figura 5-8.: Material bajo temperatura 316°C -CE:B en SAP2000



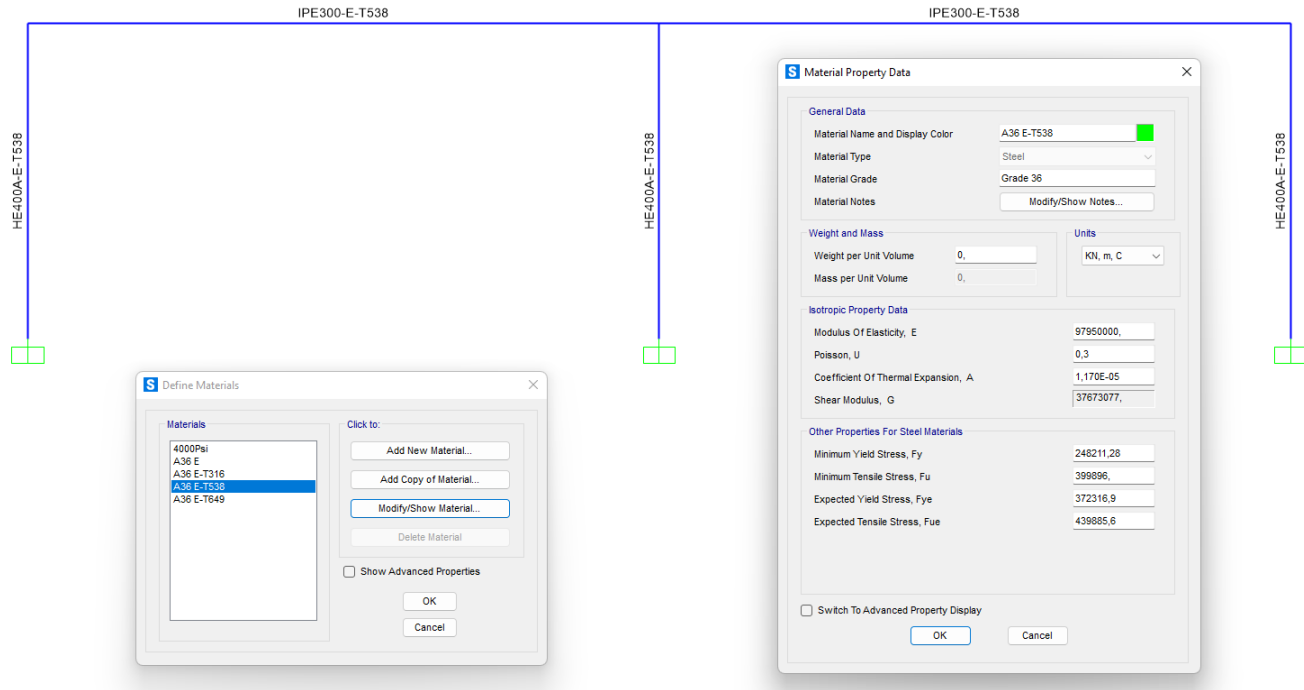


Figura 5-9.: Material bajo temperatura 538°C -Ce:B en SAP2000

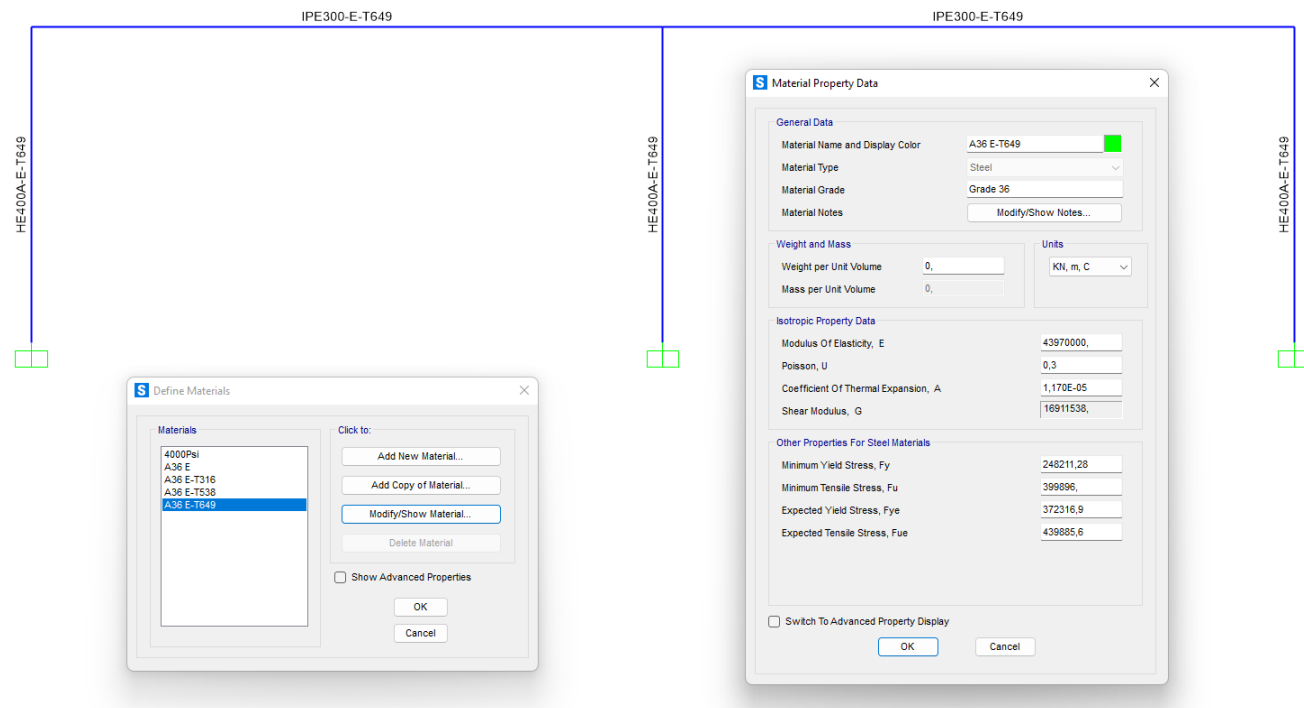


Figura 5-10.: Material bajo temperatura 649°C -CE:B en SAP2000

### Configuración estructural: CE-C

Se asigna los módulos de elasticidad para el Pórtico C de acuerdo con la temperatura referenciada en la tabla 3-1.

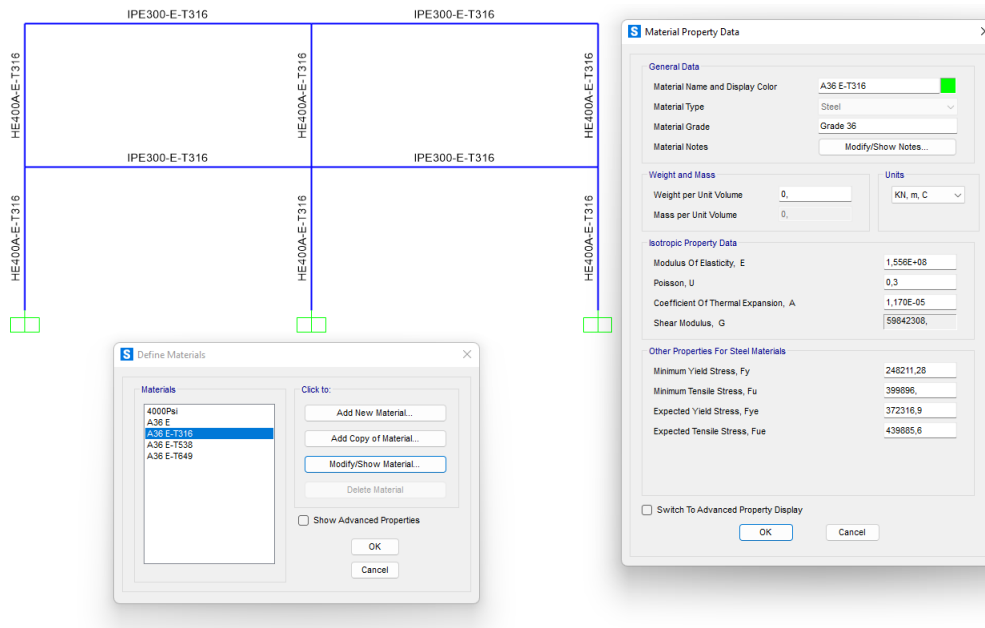


Figura 5-11.: Material bajo temperatura 316°C -CE:C en SAP2000

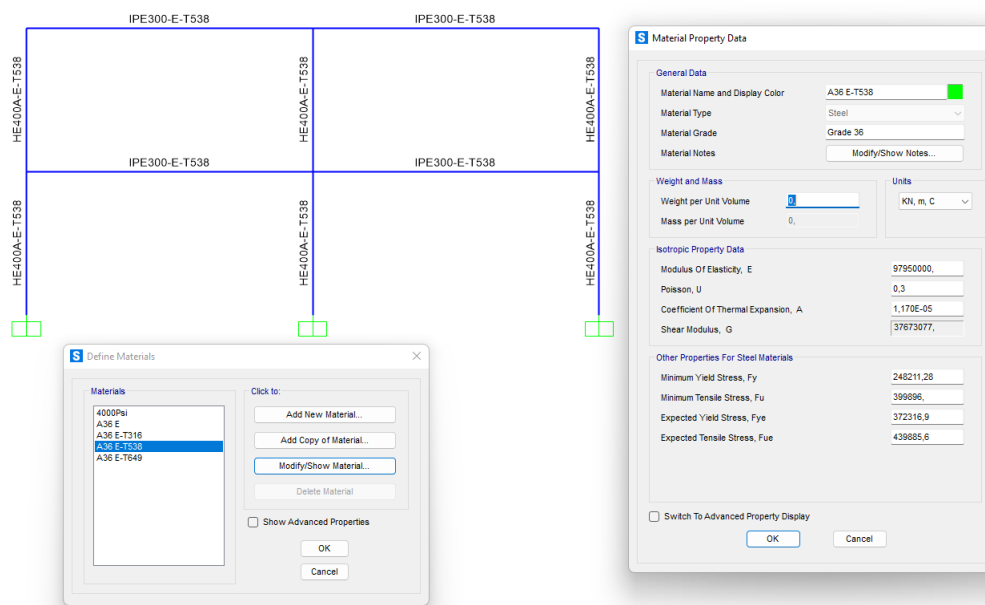


Figura 5-12.: Material bajo temperatura 538°C -CE:C en SAP2000

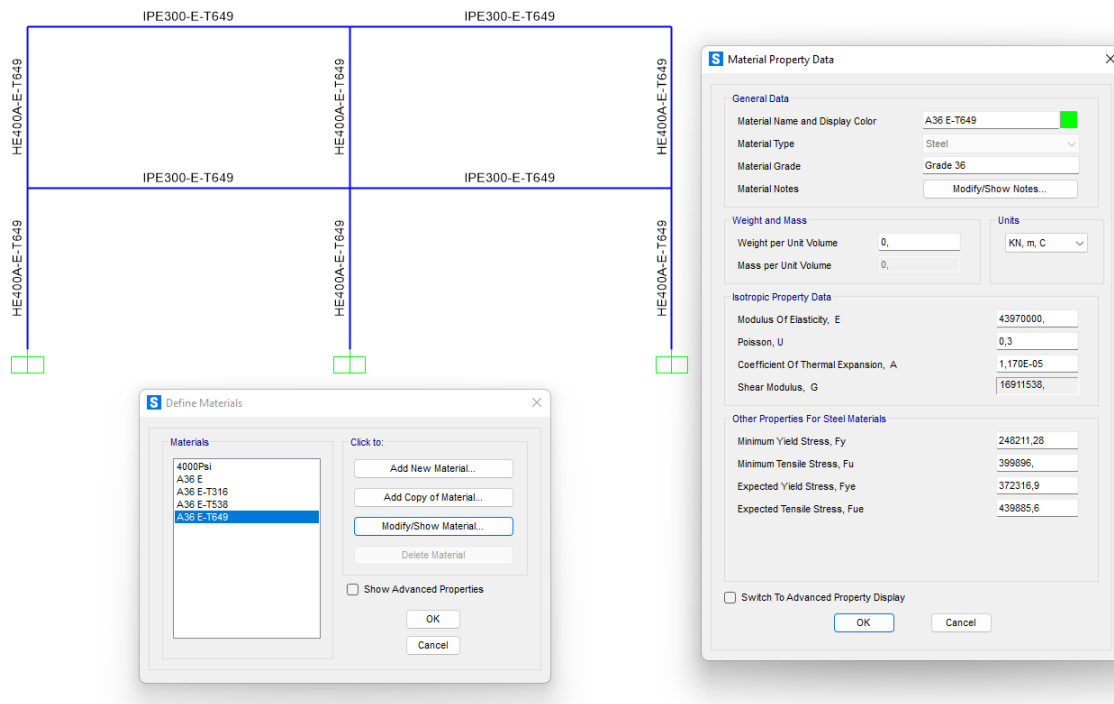


Figura 5-13.: Material bajo temperatura 649°C -CE:C en SAP2000

## 5.2. Implementación de la afectación de la sección transversal

Otro modo de ver la interferencia del fuego en el comportamiento de una estructura, radica en que una vez el fuego se ha prolongado en el tiempo y espacio, algunos elementos están propensos a sufrir afectaciones, en este caso se quiere mostrar una disminución en la sección transversal, afectando solamente el patín del elemento afectado por las altas temperaturas.

Para la implementación de esta condición se modifica directamente las propiedades, en este caso los valores que varían son las características definidas para los elementos tales como área e inercia. en cuanto a la creación de elementos se ingresan normalmente con el comando *elementBeamColum*, tal como ya se ha definido anteriormente.

Básicamente, esta afectación se realiza a las vigas de cada uno de los pórticos disminuyendo el espesor del patín inferior para pórticos A y B, y en el pórtico C el espesor inferior para vigas de piso 2 y ambos patines para vigas de piso 1. Similarmente, se realiza la afectación de las columnas disminuyendo el espesor del patín dependiendo de la posición del fuego.

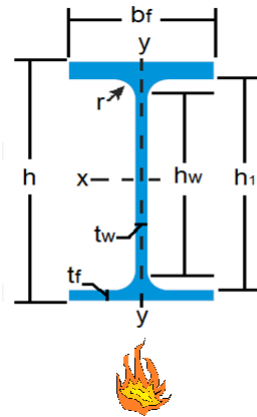


Figura 5-14.: Área transversal de perfil siendo afectado por altas temperaturas

### 5.3. Implementación del efecto del fuego como sollicitación

Para la implementación del fuego se recurre a una curva de calor que se muestra en la figura 3-11, correspondiente a la curva de ISO-834, y se debe guardar los datos de la curva en un archivo *.data* o *.tex*.

#### 5.3.1. Implementación del fuego en OpenSees

La implementación del código en OpenSees consistió en discretizar la sección transversal de viga de la siguiente manera:

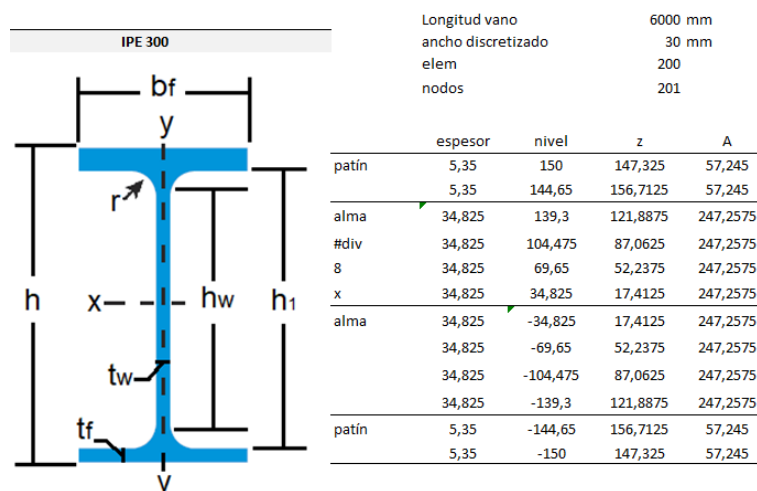


Figura 5-15.: Discretización viga -Pórtico A en OpenSees

Con el fin de obtener mayores resultado se discretiza las secciones transversales así como se observa en la figura 5-15. Se puede ver tabulado una serie de números: en la columna *espesor* que indica la discretización de la sección transversal a partir del eje neutro del perfil, los patines están discretizados cada uno en dos *fibras* y el alma en 8 fibras; la columna *nivel* es la longitud desde el eje neutro hasta la superficie de cada fibra; la columna *z* indica la longitud desde el eje neutro hasta el centro de cada fibra; y la columna *A* indica el área de cada fibra.

Dicha discretización se utiliza en las siguientes líneas del código, figura 5-16, donde las fibras representan los sub-secciones de la sección transversal mostrando el sentido exposición a altas temperaturas.

```

48 #define fibred section for steel beam;
49 section fiberSecThermal 1 {
50     fiber -147.325 0 57.245 1;
51     fiber -156.7125 0 57.245 1;
52     fiber -121.8875 0 247.2575 1;
53     fiber -87.0625 0 247.2575 1;
54     fiber -52.2375 0 247.2575 1;
55     fiber -17.4125 0 247.2575 1;
56     fiber 17.4125 0 247.2575 1;
57     fiber 52.2375 0 247.2575 1;
58     fiber 87.0625 0 247.2575 1;
59     fiber 121.8875 0 247.2575 1;
60     fiber 156.7125 0 57.245 1;
61     fiber 147.325 0 57.245 1;
62 }
63

```

Figura 5-16.: Discretización viga -CE:A en OpenSees

En la figura 5-17 se pueden apreciar las instrucciones para realizar la configuración de la discretización de las vigas en sentido longitudinal comenzando por la definición de nodos.

```

17 # define NODAL COORDINATES FOR BEAM
18 for {set level 1} {$level <=201} {incr level 1} {
19     set X [expr {$level-1}*30};
20     set nodeID $level
21     node $nodeID $X 0; # actually define node
22 }
23

```

Figura 5-17.: Discretización viga por nodos CE:A en OpenSees

Para cargar la viga con fuego se discretiza la longitud generando los elementos a lo largo de la viga, en este caso se discretiza en longitudes 30cm.

```

70 #ELES FOR BEAMS
71 for {set level 1} {$level <=200} {incr level 1} {
72     set node1 $level
73     set node2 [expr $node1+1]
74     set eleID $level
75     element dispBeamColumnThermal $eleID $node1 $node2 3 1 1;
76 }

```

Figura 5-18.: Discretización viga por elementos -CE:A en OpenSees

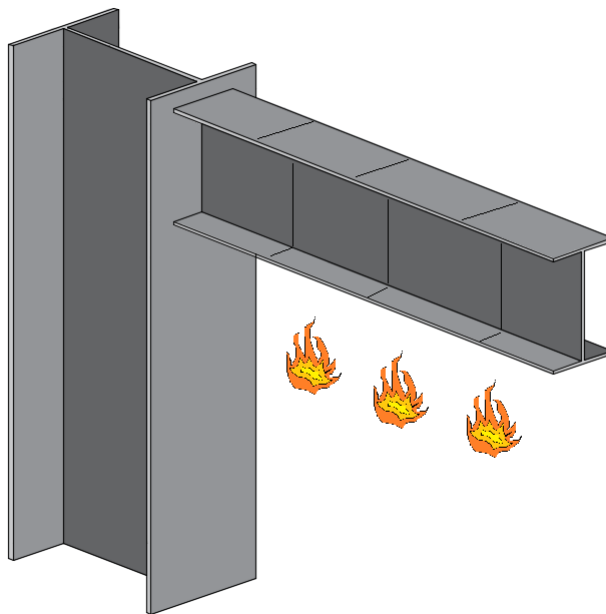


Figura 5-19.: Discretización viga longitudinalmente -CE:A en OpenSees

y finalmente se asigna la carga de fuego con la implementación de la curva de fuego,

```

109 # PATTERN AND TIME SERIES FOR STEEL
110 pattern Plain 2 Linear {
111     for {set level 1} {$level <=200} {incr level 1} {
112         set eleID $level
113         eleLoad -ele $eleID -type -beamThermal -source "Steeltemp.dat" -150.0 150.0;
114     }
115 }
116 }
117 }

```

Figura 5-20.: Discretización viga -CE:A en OpenSees

### 5.3.2. Implementación en SAP2000

En SAP2000 se implementa el fuego como una condición de carga en la opción *time history*.

De las implementaciones del fuego en forma de afectación al material o a la sección transversal, y para cada uno de las configuraciones estructurales, se obtuvo resultados de cada programa, OpenSees y SAP2000, con los cuales se configuró en Excel hojas de cálculo que recibieran la información y la organizarán de tal manera que se pudiera comparar los resultados de los dos programas para cada uno de los casos.

En cuanto a la implementación del fuego haciendo uso de la curva tiempo-temperatura, ISO-834, se obtuvo en OpenSees resultados de desplazamiento de cada uno los nodos y acciones de fuerzas internas para cada elemento, sin embargo, al realizar la discretización de los elementos afectados por las altas temperaturas, los resultados son demasiados para ser tabulados, por lo que se decidió mostrar en este trabajo solamente curvas de temperatura-desplazamiento para cada una de las configuraciones estructurales.

Estos resultados tabulados y graficados se muestran en el siguiente capítulo.

## 6. Resultados de los casos de estudio propuestos y validación

En este capítulo se presentan los resultados de la modelación matemática de diecisiete casos parametrizados. La verificación y validación de los casos de estudio se realizó utilizando el software comercial SAP2000. Para facilitar la comprensión de la información de la implementación los resultados arrojados, tanto por el programa OpenSees como por SAP2000, se procesaron y resumieron en forma de tablas auto explicativas. El capítulo concluye con la validación de la metodología propuesta a partir de la comparación de resultados con un modelo reportado en la literatura y el modelo propuesto en este trabajo.

### 6.1. Panorama de los casos de los estudiados

El resumen de los casos propuestos presentado en el capítulo 3, se complementa a continuación y se consolida en la tabla **6-1**:

Configuración estructural: CE-

- CE-A: Pórtico de una luz y una altura
- CE-B: Pórtico de dos luces y una altura
- CE-B: Pórtico de dos luces y dos alturas

Efectos del fuego: EF-

- EF-M: Efecto del fuego sobre el material
- EF-S: Efecto del fuego sobre la sección transversal
- EF-TT: Efecto del fuego en función del tiempo y temperatura

Escenarios de exposición al fuego: EEF-

- EEF-C: Exposición completa, todos los vanos bajo fuego
- EEF-A: Exposición alternada en forma de tablero de ajedrez

Condiciones de apoyo: CA-

- CA-S: Apoyo simple
- CA-E: Apoyo empotrado



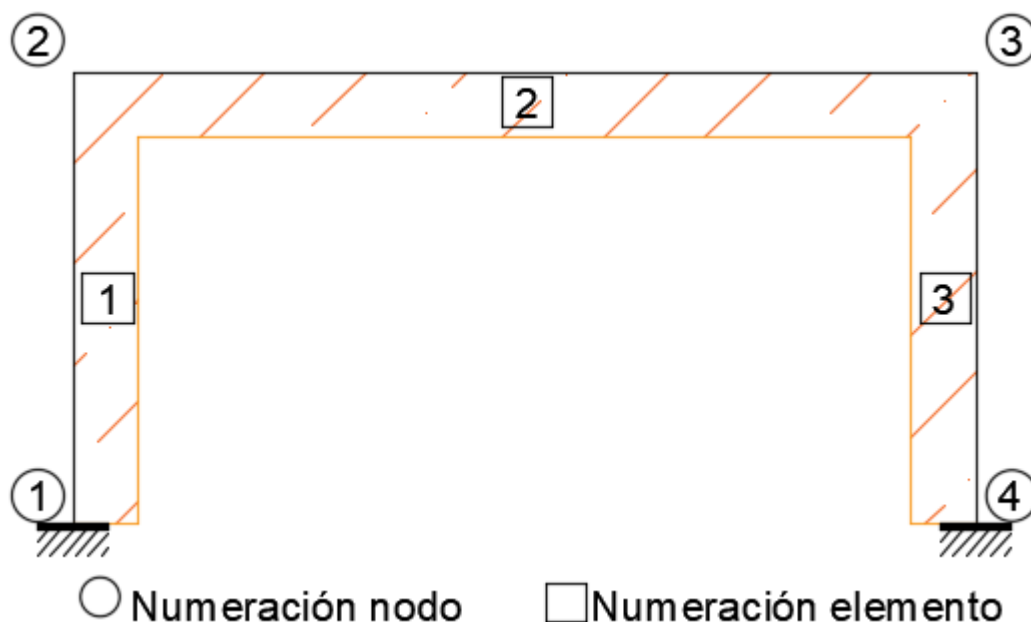
Configuración estructural			CE-A	CE-B	CE-C
Solicitaciones					
<b>CA-E</b> 	<b>EF-M</b> 	<b>EEF-C</b>  Sección 6.1.1	 Sección 6.1.4	 Sección 6.1.10	
		<b>EEF-A</b> No aplica	 Sección 6.1.5	 Sección 6.1.11	
	<b>EF-S</b> 	<b>EEF-C</b>  Sección 6.1.2	 Sección 6.1.6	 Sección 6.1.12	
		<b>EEF-A</b> No aplica	 Sección 6.1.7	 Sección 6.1.13	
	<b>EF-TT</b> 	<b>EEF-C</b>  Sección 6.1.3	 Sección 6.1.8	 Sección 6.1.14	
		<b>EEF-A</b> No aplica	 Sección 6.1.9	 Sección 6.1.15	
<b>CA-S</b> 	<b>EF-TT</b> 	<b>EEF-C</b>	Caso complementario que permite comparar el efecto generado por apoyos menos rígidos sobre la configuración estructural CE-C		
		<b>EEF-A</b>	 Sección 6.1.16	 Sección 6.1.17	

Tabla 6-1.: Panorama de los 17 casos de estudio desarrollados que consideran parámetros de configuración estructural, exposición al fuego y condición de apoyos.

### 6.1.1. CASO CE-A: CA-E/EF-M/EEF-C

#### Descripción del modelo y de la nomenclatura

Se trata de un pórtico simple (CE-A), como se muestra en la figura 6-1, con condición de apoyo empotrada (CA-E), modelado bajo efecto del fuego en forma de alteración del material (EF-M) y expuesto a una condición de fuego completa (EEF-C) hasta alcanzar una temperatura de aproximadamente 700°C. Se considera el efecto del fuego sobre el material cuando se hace referencia a la disminución del módulo de elasticidad. En cuanto a las solicitaciones, como se indicó en el capítulo 3 sección 3.4, todas las configuraciones estructurales se encuentran solicitadas por un estado de carga muerta y carga viva, para una carga última distribuida de 12 kN/m, y una carga horizontal de 180 kN actuando en el nodo superior izquierdo.



**Figura 6-1.:** Pórtico de una nave y un piso afectando el módulo de elasticidad. Caso CE-A: CA-E/EF-M/EEF-C

Los resultados de los diferentes modelos se presentan en algunos casos con un grado de precisión de seis cifras decimales con la intención de identificar variaciones entre los desplazamientos o acciones internas de fuerzas; entre los resultados de OpenSees y SAP2000; así como entre los resultados provenientes de las diferentes condiciones de temperatura y exposición al fuego. La variable denominada como “similitud” se introdujo en las tablas para dar información sobre la proximidad entre los resultados obtenidos de los dos programas. Esta variable corresponde al porcentaje absoluto de los resultados de OpenSees en referencia con los resultados de SAP2000; por este motivo pueden presentarse valores de similitud superiores al 100 %.

Los colores de los encabezados de las tablas tienen por intención facilitar la interpretación del contenido de las mismas. Así por ejemplo, el color gris indica el estado original, a una temperatura ambiente, de la configuración estructural, el color verde indica el efecto de temperatura de 316°C, el color rosado indica un estado de temperatura de 538°C y el color azul de 649°C.

## Desplazamientos

La siguiente tabla unificada presenta los resultados de los desplazamientos en los nudos habilitados bajo diferentes intensidades de la afectación del material, específicamente del módulo de elasticidad cuando se alcanzaron temperaturas de 316°C, 538°C y 649°C respectivamente.

$\delta$ [m]	Desplazamientos cuando E=2.00E+08 kPa y T=20 °C			Desplazamientos cuando E=1.56E+08 kPa y T=316 °C			Desplazamientos cuando E=9.80E+07 kPa y T=538 °C			Desplazamientos cuando E=4.40E+07 kPa y T=649 °C		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
U2	6.8697.E-03	9.6010.E-03	71.55%	8.8073.E-03	1.2309.E-02	71.55%	1.4020.E-02	1.9593.E-02	71.56%	3.1226.E-02	4.3640.E-02	71.55%
V2	-1.8806.E-05	-2.4000.E-05	78.36%	-2.4111.E-05	-3.1000.E-05	77.78%	-3.8380.E-05	-4.9000.E-05	78.33%	-8.5483.E-05	-1.0800.E-04	79.15%
02	-3.3137.E-03	4.4890.E-03	73.82%	-4.2483.E-03	5.7560.E-03	73.81%	-6.7626.E-03	9.1620.E-03	73.81%	-1.5062.E-02	2.0407.E-02	73.81%
U3	6.2902.E-03	8.5890.E-03	73.24%	8.0644.E-03	1.1011.E-02	73.24%	1.2837.E-02	1.7528.E-02	73.24%	2.8592.E-02	3.9040.E-02	73.24%
V3	-4.9118.E-05	-6.1000.E-05	80.52%	-6.2972.E-05	-7.8000.E-05	80.73%	-1.0024.E-04	-1.2500.E-04	80.19%	-2.2327.E-04	-2.7800.E-04	80.31%
03	-2.4643.E-03	2.8020.E-03	87.95%	-3.1593.E-03	3.5920.E-03	87.95%	-5.0291.E-03	5.7180.E-03	87.95%	-1.1201.E-02	1.2735.E-02	87.96%
U1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
01	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
U4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
04	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%

**Tabla 6-2.:** Resumen de los desplazamientos en los nudos bajo temperaturas de 20°C, 316°C, 538°C y 649°C. Caso CE-A: CA-E/EF-M/EEF-C

Se aprecia, de la tabla **6-2**, que el orden de magnitud de los desplazamientos horizontales del nudo 2 bajo una temperatura ambiente corresponde a valores de 6.8697E-03 m según OpenSees y 9.6010E-03 m según SAP2000. El orden de similitud entre los resultados arrojados por OpenSees y SAP2000 oscila entre 71.55 % y 87.95 %.

Debido a un incremento de temperatura hasta alcanzar los 316°C se puede establecer, que el orden de magnitud de los desplazamientos horizontales del nudo 2 corresponde a valores de 8.8073E-03 m según OpenSees y 1.2093E-02 m según SAP2000. Los desplazamientos debidos a este aumento de temperatura se incrementaron en 28.21 %, tomando los resultados de OpenSees y comparado con el estado de la temperatura ambiente. El orden de similitud entre los resultados arrojados por OpenSees y SAP2000 coincide con la situación inicial y oscila entre los mismos porcentajes 71.55 % y 87.95 %.

Para una temperatura de 538°C la afectación del módulo de elasticidad produjo los siguientes

desplazamientos horizontales en el nudo 2 de  $1.4020\text{E}-02$  m según OpenSees y  $1.9593\text{E}-02$  m según SAP2000. Los desplazamientos debidos a este aumento de temperatura se incrementaron en 59.18 %, tomando los resultados de OpenSees y comparado con el estado de temperatura  $316^\circ\text{C}$ . Se aprecia que el orden de similitud oscila entre los valores señalados en los dos casos anteriores 71.56 % y 87.95 %.

Finalmente, para una temperatura de  $649^\circ\text{C}$  la afectación del módulo de elasticidad produjo los siguientes desplazamientos horizontales en el nudo 2 de  $3.1226\text{E}-02$  m según OpenSees y  $4.3640\text{E}-02$  m según SAP2000. Los desplazamientos debidos a este aumento de temperatura se incrementaron en 254.55 %, tomando los resultados de OpenSees y comparado con el estado de temperatura  $316^\circ\text{C}$ . Se aprecia que el orden de similitud oscila entre los valores señalados en los dos casos anteriores 71.55 % y 87.96 %. Estos resultados son consistentes con los reportados en la literatura [65] [66] [48], y más específicamente [47], donde se indica que para estos niveles de temperatura el material ha perdido considerablemente su capacidad de resistencia.

### Acciones internas de fuerzas o fuerzas internas

Las acciones internas de fuerza, como la fuerza axial, cortante y momento de flexión en los extremos de los miembros estructurales, que experimentan las vigas y columnas del pórtico se registran en las siguientes tablas. Estas tablas, en forma similar a los desplazamientos, están en función del cambio del módulo de elasticidad por el efecto de altas temperaturas. Las tablas que contienen el resumen de las acciones internas de fuerzas están organizadas por el tipo de miembro estructural, columnas o vigas, en forma vertical y las respectivas acciones internas de fuerzas (X, Y, M) en los extremos de los elementos, en forma horizontal. Los resultados de las tablas se presentan con un nivel de precisión de seis cifras decimales con la intención de registrar el cambio de las acciones internas de fuerzas debidas a los incrementos de temperatura.

Acciones internas de fuerzas cuando $E=2.00\text{E}+08$ kPa y $T=20^\circ\text{C}$									
F	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
<b>Xi [kN]</b>	19.934600	-20.210000	98.64%	103.915000	-108.857000	95.46%	52.065400	-51.790000	100.53%
<b>Yi [kN]</b>	76.084700	71.143000	106.95%	19.934600	-20.210000	98.64%	103.915000	108.857000	95.46%
<b>Mi [kN-m]</b>	213.692000	214.629200	99.56%	-14.562000	15.129600	96.25%	229.916000	230.632600	99.69%
<b>Xj [kN]</b>	-19.934600	-20.210000	98.64%	-103.915000	-108.857000	95.46%	-52.065400	-51.790000	100.53%
<b>Yj [kN]</b>	-76.084700	71.143000	106.95%	52.065400	51.790000	100.53%	-103.915000	108.857000	95.46%
<b>Mj [kN-m]</b>	14.562000	15.129600	96.25%	-81.830100	-79.608600	102.79%	81.830100	-95.937000	85.30%

**Tabla 6-3.:** Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo temperatura ambiente. Caso CE-A: CA-E/EF-M/EEF-C

Como acción interna de fuerza representativa se eligió la componente de flexión. De la tabla

**6-3** se aprecia que el orden de magnitud de la flexión en el elemento 2, correspondiente a la viga figura **6-1**, experimenta una intensidad, en valor absoluto, de 81.8301 kN-m según OpenSees y 79.6086 kN-m según SAP2000. El orden de similitud entre los resultados arrojados por OpenSees y SAP2000 oscila entre 95.46 % y 102.79 %, representando este último valor porcentual con respecto a los resultados de SAP2000.

A continuación, se presentan los resultados del efecto que tuvo la modificación del módulo de elasticidad cuando se alcanzaron temperaturas de 316°C, 538°C y 649°C. respectivamente.

Acciones internas de fuerzas cuando E=1.56E+08 kPa y T=316 °C									
F \ Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
<b>Xi [kN]</b>	19.934600	-20.210000	98.64%	103.915000	-108.857000	95.46%	52.065400	-51.790000	100.53%
<b>Yi [kN]</b>	-76.084700	71.143000	106.95%	19.934600	-20.210000	98.64%	-103.915000	108.857000	95.46%
<b>Mi [kN-m]</b>	213.692000	214.629200	99.56%	-14.562000	15.129600	96.25%	229.916000	230.632600	99.69%
<b>Xj [kN]</b>	-19.934600	-20.210000	98.64%	-103.915000	-108.857000	95.46%	-52.065400	-51.790000	100.53%
<b>Yj [kN]</b>	76.084700	71.143000	106.95%	52.065400	51.790000	100.53%	103.915000	108.857000	95.46%
<b>Mj [kN-m]</b>	14.562000	15.129600	96.25%	-81.830100	-79.608600	102.79%	81.830100	-95.937000	85.30%

**Tabla 6-4.:** Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 316°C.  
Caso CE-A: CA-E/EF-M/EEF-C

Como se aprecia los resultados presentados en la tabla **6-3** en condiciones normales de temperatura no presentan variación con respecto a los resultados consignados en la tablas **6-4**, **6-5** y **6-6**. La explicación de la ausencia en el cambio de las acciones internas de fuerza debidas a la disminución en el módulo de elasticidad por el efecto del incremento de temperatura obedece a que mientras la estructura no haya colapsado global o localmente deben cumplirse las condiciones de equilibrio.

Acciones internas de fuerzas cuando E=9.80E+07 kPa y T=538 °C									
F \ Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
<b>Xi [kN]</b>	19.934600	-20.210000	98.64%	103.915000	-108.857000	95.46%	52.065400	-51.790000	100.53%
<b>Yi [kN]</b>	-76.084700	71.143000	106.95%	19.934600	-20.210000	98.64%	-103.915000	108.857000	95.46%
<b>Mi [kN-m]</b>	213.692000	214.629200	99.56%	-14.562000	15.129600	96.25%	229.916000	230.632600	99.69%
<b>Xj [kN]</b>	-19.934600	-20.210000	98.64%	-103.915000	-108.857000	95.46%	-52.065400	-51.790000	100.53%
<b>Yj [kN]</b>	76.084700	71.143000	106.95%	52.065400	51.790000	100.53%	103.915000	108.857000	95.46%
<b>Mj [kN-m]</b>	14.562000	15.129600	96.25%	-81.830100	-79.608600	102.79%	81.830100	-95.937000	85.30%

**Tabla 6-5.:** Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 538°C.  
Caso CE-A: CA-E/EF-M/EEF-C

Es decir, el módulo de elasticidad en este caso no afecta la intensidad de las acciones internas si no su efecto, en forma de desplazamiento.

Acciones internas de fuerzas cuando E=4.40E+07 kPa y T=649 °C									
Ele F	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
<b>Xi [kN]</b>	19.934600	-20.210000	98.64%	103.915000	-108.857000	95.46%	52.065400	-51.790000	100.53%
<b>Yi [kN]</b>	-76.084700	71.143000	106.95%	19.934600	-20.210000	98.64%	-103.915000	108.857000	95.46%
<b>Mi [kN-m]</b>	213.692000	214.629200	99.56%	-14.562000	15.129600	96.25%	229.916000	230.632600	99.69%
<b>Xj [kN]</b>	-19.934600	-20.210000	98.64%	-103.915000	-108.857000	95.46%	-52.065400	-51.790000	100.53%
<b>Yj [kN]</b>	76.084700	71.143000	106.95%	52.065400	51.790000	100.53%	103.915000	108.857000	95.46%
<b>Mj [kN-m]</b>	14.562000	15.129600	96.25%	-81.830100	-79.608600	102.79%	81.830100	-95.937000	85.30%

**Tabla 6-6.:** Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 649°C.  
Caso CE-A: CA-E/EF-M/EEF-C

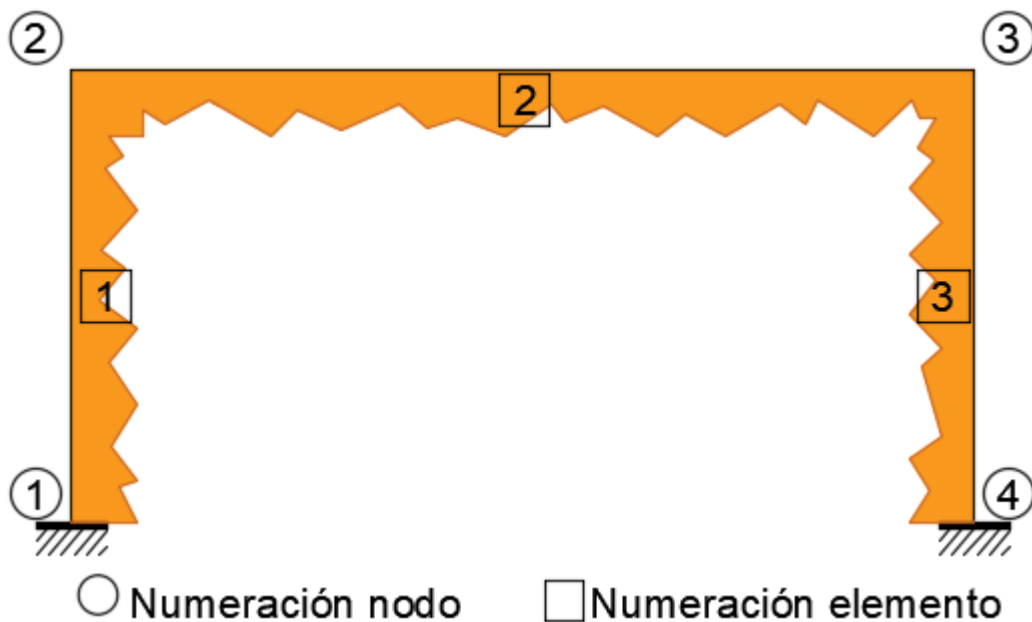
En resumen, las intensidades de las acciones internas de fuerza, para este caso, arrojaron los siguientes valores máximos: para fuerzas axiales 103.9150 kN a tracción para la viga, 52.0654 kN para la columna derecha; para fuerzas cortantes 52.0654 kN para la viga y 103.9150 kN para la columna; y momentos de flexión de 81.8301 kN-m en la viga.

*Nota: Para mantener la estructura en el capítulo y claridad en la presentación, cada caso se presenta al inicio de una nueva página.*

### 6.1.2. CASO CE-A: CA-E/EF-S/EEF-C

#### Modelo

El modelo consiste en un pórtico simple de una sola nave (CE-A), como se muestra en la figura 6-2, con condición de apoyo empotrada (CA-E), modelado bajo efecto del fuego en forma de alteración de la sección transversal (EF-S) y expuesto a una condición de fuego completa (EEF-C).



**Figura 6-2.:** Pórtico de una nave y un piso afectando la sección transversal. Caso CE-A: CA-E/EF-S/EEF-C

Los colores de los encabezados de las tablas tienen por intención facilitar la interpretación del contenido de las mismas. Así por ejemplo, el color azul celeste indica el estado original, sin afectación de la sección transversal, el color lila indica la afectación de la sección transversal.

#### Desplazamientos

En la siguiente tabla se presentan consolidados los resultados de los desplazamientos de los nudos habilitados tanto en condición normal como afectando la sección transversal. Se refiere a afectación a la sección transversal cuando se reduce los espesores de las aletas de los perfiles que están directamente expuestos, así mismo se modifica el momento de inercia.

$\delta$ [m]	Desplazamientos sin modificar sección transversal			Desplazamientos modificando sección transversal		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
U2	6.8697.E-03	9.6010.E-03	71.55%	7.4294.E-03	1.0281.E-02	72.26%
V2	-1.8806.E-05	-2.4000.E-05	78.36%	-1.9843.E-05	-2.5000.E-05	79.37%
$\theta$ 2	-3.3137.E-03	4.4890.E-03	73.82%	-3.5723.E-03	4.8190.E-03	74.13%
U3	6.2902.E-03	8.5890.E-03	73.24%	6.8257.E-03	9.2360.E-03	73.90%
V3	-4.9118.E-05	-6.1000.E-05	80.52%	-5.3130.E-05	-6.6000.E-05	80.50%
$\theta$ 3	-2.4643.E-03	2.8020.E-03	87.95%	-2.6600.E-03	3.0430.E-03	87.41%
U1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
$\theta$ 1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
U4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
$\theta$ 4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%

**Tabla 6-7.:** Resumen de los desplazamientos en los nudos sin y con afectación de la sección transversal. Caso CE-A: CA-E/EF-S/EEF-C

De la tabla 6-7 se puede identificar que el desplazamiento horizontal, bajo modificaciones de la sección transversal, en el nodo 2 para OpenSees y SAP2000 son de 7.4294E-03 m y 1.0281E-02 m respectivamente. Además, la intensidad de variación en los resultados obtenidos por los programas oscilan entre 72.26 % y 87.41 %. Tomando el desplazamiento horizontal en el nodo 2 de los resultados de OpenSees, se infiere respecto a la condición normal sin afectación a la sección transversal, corresponde a un aumento de 8.15 %. Cabe resaltar que la afectación en estas condiciones no están restringidas a un valor específico de temperatura si no a una reducción de la zona afectada.

### Acciones internas de fuerza

Las acciones internas de fuerza, como la fuerza axial, cortante y momento de flexión en los extremos de los miembros estructurales, que experimentan las vigas y columnas del pórtico se registran en las siguientes tablas. Estas tablas, en forma similar a los desplazamientos, están en función de la modificación de la sección transversal por el efecto de altas temperaturas.

Acciones internas de fuerzas sin modificar la sección transversal									
Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
<b>F</b>									
<b>Xi [kN]</b>	19.934600	-20.210000	98.64%	103.915000	-108.857000	95.46%	52.065400	-51.790000	100.53%
<b>Yi [kN]</b>	76.084700	71.143000	106.95%	19.934600	-20.210000	98.64%	103.915000	108.857000	95.46%
<b>Mi [kN-m]</b>	213.692000	214.629200	99.56%	-14.562000	15.129600	96.25%	229.916000	230.632600	99.69%
<b>Xj [kN]</b>	-19.934600	-20.210000	98.64%	-103.915000	-108.857000	95.46%	-52.065400	-51.790000	100.53%
<b>Yj [kN]</b>	-76.084700	71.143000	106.95%	52.065400	51.790000	100.53%	-103.915000	108.857000	95.46%
<b>Mj [kN-m]</b>	14.562000	15.129600	96.25%	-81.830100	-79.608600	102.79%	81.830100	-95.937000	85.30%

**Tabla 6-8.:** Resumen de las acciones internas de fuerzas en condición normal. Caso CE-A: CA-E/EF-S/EEF-C



Los porcentajes de similitud de los resultados entre programas son muy próximos, dando confiabilidad al uso de los software y a los resultados de análisis que arrojan. Para la viga se tiene similitud entre los resultados de los programas de 95.46 % y 102.79 %. Para columnas la similitud de los porcentajes oscila entre 85.30 % y 106.95 %.

Acciones internas de fuerzas modificando la sección transversal									
Ele F	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
<b>Xi [kN]</b>	19.578300	-19.845000	98.66%	104.028000	-108.880000	95.54%	52.421700	-52.155000	100.51%
<b>Yi [kN]</b>	-75.972100	71.120000	106.82%	19.578300	-19.845000	98.66%	-104.028000	108.880000	95.54%
<b>Mi [kN-m]</b>	212.243000	212.761700	99.76%	-15.673300	16.216600	96.65%	229.227000	230.306500	99.53%
<b>Xj [kN]</b>	-19.578300	-19.845000	98.66%	-104.028000	-108.880000	95.54%	-52.421700	-52.155000	100.51%
<b>Yj [kN]</b>	75.972100	71.120000	106.82%	52.421700	52.155000	100.51%	104.028000	108.880000	95.54%
<b>Mj [kN-m]</b>	15.673300	16.216600	96.65%	-82.857100	-80.715200	102.65%	82.857100	-96.334300	86.01%

**Tabla 6-9.:** Resumen de las acciones internas de fuerzas afectando la sección transversal.  
Caso CE-A: CA-E/EF-S/EEF-C

En comparación con el caso anterior, los resultados de las acciones internas de fuerzas de los elementos en condición de sección transversal modificada difieren de los resultados en condición normal. Considerando que se realiza una reducción milimétrica de la sección transversal así mismo es el incremento o reducción de acciones internas de fuerzas.

Los valores máximos de los resultados en OpenSees para fuerza axial del elemento 2, que corresponde al miembro estructural tipo viga, son 103.915 kN y 104.028 kN para condición normal y condición modificada respectivamente, con un aumento 0.1 %; para las columnas 52.0654 kN y 52.4217 kN en condición normal y modificada respectivamente, con un aumento de 0.68 %.

Las fuerzas cortantes máximas resultantes de OpenSees son 108.857 kN en condiciones normales y 108.880 kN con sección transversal modificada para elemento 3, con un aumento de 0.11 %.

En el caso de las columnas el momento a flexión máximo se presenta en el elemento 3, tomando los valores de OpenSees son 229.916 kN-m y 229.227 kN-m para condición normal y modificada respectivamente, presentando un disminución de 0.30 %.

*Nota: Por claridad, el nuevo caso se presenta al inicio de la siguiente página.*

### 6.1.3. CASO CE-A: CA-E/EF-TT/EEF-C

#### Modelo

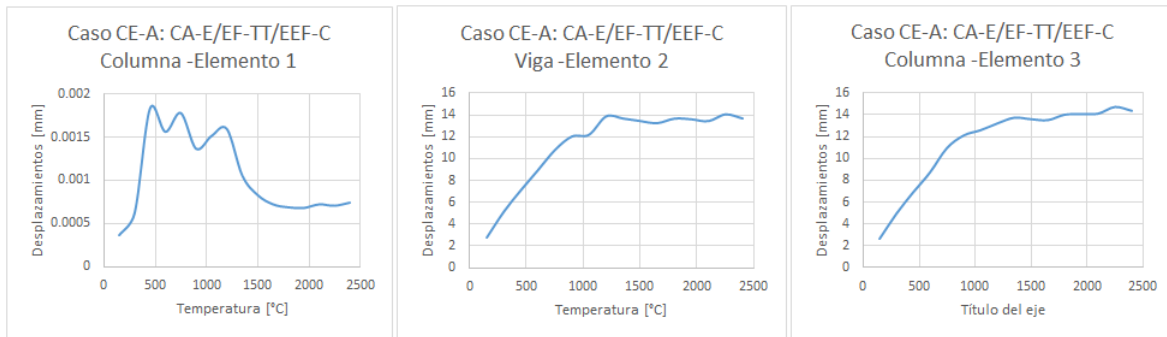
Consiste en un pórtico simple de una sola nave (CE-A), como se muestra en la figura 6-3, con condición de apoyo empotrada (CA-E), modelado bajo efecto del fuego en forma directa con implementación de una curva de calor que relaciona la temperatura en función del tiempo (EF-TT) y expuesto a una condición de fuego completa (EEF-C).



**Figura 6-3.:** Pórtico de una nave y un piso bajo consideraciones directas de fuego. CASO CE-A: CA-E/EF-TT/EEF-C

Los resultados en este caso se muestran en forma de gráfica de los desplazamientos en los puntos intermedios de los elementos en función de la variación de temperatura.

Los resultados de desplazamientos y las acciones internas de fuerzas se presentan como anexos debido a que los elementos fueron discretizados para conseguir un mejor resultado y la cantidad de datos es muy grande para presentar en tablas.



**Figura 6-4.:** Curvas desplazamiento-Temperatura de los elementos 1, 2 y 3. Caso CE-A: CA-E/EF-TT/EEF-C

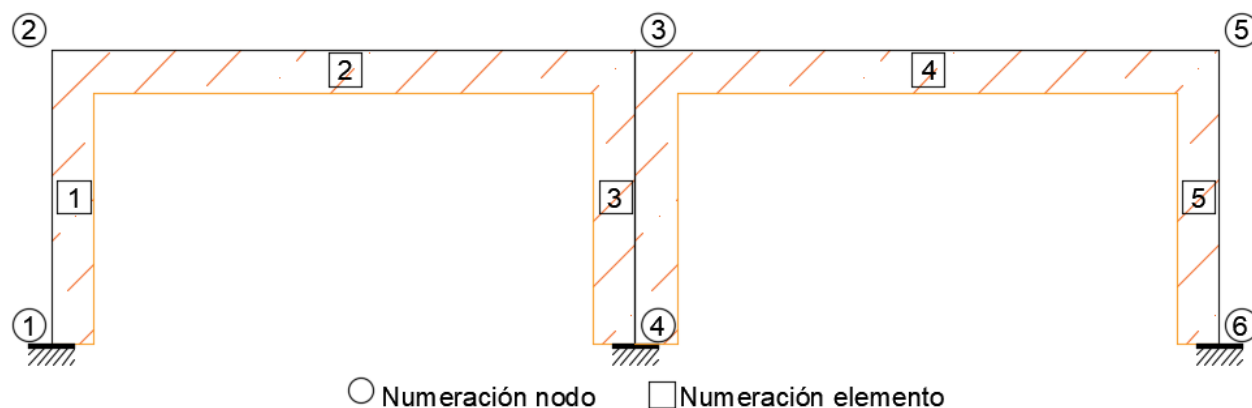
De la gráfica 6-4 se pueden inferir que los desplazamientos ocasionados en la mitad de la luz en los elementos que constituyen el pórtico del caso CE-B: CA-E/EF-TT/EEF-C que la viga, elemento 2, está teniendo un aumento constante hasta llegar aproximadamente a 14 mm a una temperatura de 2400°C. Por otro lado, la columna izquierda correspondiente al elemento 1, presenta un aumento en sus desplazamientos hasta alcanzar una temperatura de 500°C a partir de ahí comienza a descender, con altos y bajos que puede referirse a la pérdida de resistencia del elemento. El resultado de desplazamiento de las columnas no presenta un desplazamiento simétrico debido a que en la columna izquierda, en el nudo 2, tiene aplicada una carga lateral. Efecto que conjugado con el incremento de temperatura altera los desplazamientos.

*Nota: Por claridad, el nuevo caso se presenta al inicio de la siguiente página.*

### 6.1.4. CASO CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C

#### Modelo

Consiste en un pórtico doble de dos naves (CE-B), como se muestra en la figura 6-5, con condición de apoyo empotrada (CA-E), modelado bajo efecto del fuego en forma directa de afectación al material (EF-M) y expuesto a una condición de fuego completa (EEF-C). La afectación al material se refiere a la afectación del módulo de elasticidad considerando diferentes variaciones de temperatura.



**Figura 6-5.:** Pórtico de dos naves y un piso afectando el módulo de elasticidad. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C

A continuación, se presentan tabulados los resultados de los desplazamientos y de las acciones internas de fuerza obtenidos tanto en OpenSees como en SAP2000 y el porcentaje de similitud, que como bien se ha definido anteriormente, se hace respecto con los resultados de SAP2000.

Con relación a las tablas del caso anterior donde se modificaba el material, en este caso se registran más resultados por la misma razón que hay más elementos.

#### Desplazamientos

Las tablas que registran los desplazamiento de los nodos se presentan para condición inicial y para la variación de tres temperaturas: 316°C, 538°C y 649°C.

Los resultados de desplazamientos se unificaron en una única tabla con el fin de facilitar la comparación con cada variación de temperatura.

$\delta$ [m]	Desplazamientos cuando E=2.00E+08 kPa y T=20 °C			Desplazamientos cuando E=1.56E+08 kPa y T=316 °C			Desplazamientos cuando E=9.80E+07 kPa y T=538 °C			Desplazamientos cuando E=4.40E+07 kPa y T=649 °C		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
U2	4.7288.E-03	6.7280.E-03	70.29%	6.0626.E-03	8.6250.E-03	70.29%	9.6506.E-03	1.3730.E-02	70.29%	2.1495.E-02	3.0580.E-02	70.29%
V2	-2.3726.E-05	-2.9000.E-05	81.81%	-3.0418.E-05	-3.8000.E-05	80.05%	-4.8421.E-05	-6.0000.E-05	80.70%	-1.0785.E-04	-1.3300.E-04	81.09%
$\theta$ 2	-2.3737.E-03	3.3830.E-03	70.17%	-3.0432.E-03	4.3370.E-03	70.17%	-4.8443.E-03	6.9040.E-03	70.17%	-1.0790.E-02	1.5377.E-02	70.17%
U3	3.9861.E-03	5.5200.E-03	72.21%	5.1103.E-03	7.0770.E-03	72.21%	8.1348.E-03	1.1265.E-02	72.21%	1.8118.E-02	2.5090.E-02	72.21%
V3	-7.0638.E-05	-9.0000.E-05	78.49%	-9.0561.E-05	-1.1500.E-04	78.75%	-1.4416.E-04	-1.8300.E-04	78.77%	-3.2108.E-04	-4.0800.E-04	78.70%
$\theta$ 3	-1.5374.E-03	1.7890.E-03	85.94%	-1.9710.E-03	2.2930.E-03	85.96%	-3.1375.E-03	3.6500.E-03	85.96%	-6.9882.E-03	8.1300.E-03	85.96%
U5	3.6186.E-03	4.9970.E-03	72.42%	4.6392.E-03	6.4060.E-03	72.42%	7.3849.E-03	1.0198.E-02	72.42%	1.6448.E-02	2.2714.E-02	72.41%
V5	-4.1485.E-05	-5.1000.E-05	81.34%	-5.3186.E-05	-6.5000.E-05	81.82%	-8.4664.E-05	-1.0400.E-04	81.41%	-1.8857.E-04	-2.3100.E-04	81.63%
$\theta$ 5	-1.3159.E-03	1.4900.E-03	88.31%	-1.6870.E-03	1.9100.E-03	88.32%	-2.6854.E-03	3.0400.E-03	88.34%	-5.9812.E-03	6.7710.E-03	88.33%
U1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
$\theta$ 1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
U4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
$\theta$ 4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
U6	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V6	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
$\theta$ 6	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%

**Tabla 6-10.:** Resumen de los desplazamientos en los nudos bajo temperaturas de 20°C, 316°C, 538°C y 649°C. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C

Como se puede apreciar en la tabla **6-10** los porcentajes absolutos de similitud entre los resultados reportados por OpenSees y SAP2000 oscilan entre 70.17% y 88.34%. También se puede determinar que en el caso del nodo 3, en condición de temperatura ambiente, presenta un desplazamiento horizontal de 3.9861E-03 m y 5.5200E-03 m para OpenSees y SAP2000 respectivamente.

Cuando la estructura está expuesta a una temperatura de 316°C, en el nodo 3 se presentan valores de desplazamiento horizontal de 5.1103E-03 m y 7.077E-03 m para OpenSees y SAP2000 respectivamente. Con relación a la condición original, el nodo 3 bajo el incremento de temperatura a 316°C es de 28.21%.

Para una exposición a una temperatura de 538°C, el nodo 3 presenta desplazamiento horizontal de 8.13E-03 m y 1.13E-02 m para OpenSees y SAP2000 respectivamente. Con relación a la condición anterior, temperatura de 316°C, el nodo 3 bajo el incremento de temperatura a 538°C es de 59.18%.

Los resultados de desplazamiento horizontal para el nodo 3 son de 1.81E-02 m para OpenSees y 2.51E-03 m para SAP2000, cuando la temperatura alcanza 649°C. El incremento de los desplazamiento respecto a la temperatura de 538°C es del 123.73% que coincide con la pérdida de resistencia, en cuanto mayor sea la temperatura el pórtico se va debilitando e incrementa sus desplazamientos.

### Acciones internas de fuerza

Como en este caso hay dos elementos más que el caso anterior, los resultados de las acciones internas de fuerzas de los elementos se presentan para la condición normal y para cada cambio de temperatura: 316°C, 538°C y 649°C.

Acciones internas de fuerzas cuando E=2.00E+08 kPa y T=20 °C															
Ele F	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
Xi [kN]	25.149800	-24.825000	101.31%	133.198000	-138.969000	95.85%	74.875900	-76.035000	98.48%	65.895300	-68.562000	96.11%	43.974300	-43.139000	101.94%
Yi [kN]	46.801500	41.031000	114.06%	25.149800	-24.825000	101.31%	67.303100	70.407000	95.59%	28.025700	-28.861000	97.11%	65.895300	68.562000	96.11%
Mi [kN-m]	141.525000	142.861600	99.06%	1.119980	1.076400	104.05%	147.148000	148.603200	99.02%	11.460000	-13.915600	82.35%	138.380000	138.650800	99.80%
Xj [kN]	-25.149800	-24.825000	101.31%	-133.198000	-138.969000	95.85%	-74.875900	-76.035000	98.48%	-65.895300	-68.562000	96.11%	-43.974300	-43.139000	101.94%
Yj [kN]	-46.801500	41.031000	114.06%	46.850200	47.175000	99.31%	-67.303100	70.407000	95.59%	43.974300	43.139000	101.94%	-65.895300	68.562000	96.11%
Mj [kN-m]	-1.119980	1.076400	104.05%	-66.221100	-65.971400	100.38%	54.761100	-62.616900	87.45%	-59.305900	-56.752100	104.50%	59.305900	-67.036500	88.47%

**Tabla 6-11.:** Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo temperatura ambiente. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C

El miembro estructural correspondiente al elemento 2 que es viga, en la tabla 6-11 se puede observar que para el momento de flexión se obtiene los valores de 66.2211 kN-m para OpenSees y 65.9714 kN-m para SAP2000, con una porcentaje absoluto de similitud de aproximadamente 100.38 %, dando una confiabilidad en los resultados obtenidos en OpenSees.

Para un miembro estructural tipo columna en condición normal, el elemento 5 presenta un momento a flexión de 138.3800 kN-m para OpenSees y 138.6508 kN-m, con un porcentaje de similitud aproximadamente de 99.80 %.

Acciones internas de fuerzas cuando E=1.56E+08 kPa y T=316 °C															
Ele F	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
Xi [kN]	25.149800	-24.825000	101.31%	133.198000	-138.969000	95.85%	74.875900	-76.035000	98.48%	65.895300	-68.562000	96.11%	43.974300	-43.139000	101.94%
Yi [kN]	-46.801500	41.031000	114.06%	25.149800	-24.825000	101.31%	-67.303100	70.407000	95.59%	43.974300	43.139000	101.94%	-65.895300	68.562000	96.11%
Mi [kN-m]	141.525000	142.861600	99.06%	1.119980	1.076400	104.05%	147.148000	148.603200	99.02%	11.460000	-13.915600	82.35%	138.380000	138.650800	99.80%
Xj [kN]	-25.149800	-24.825000	101.31%	-133.198000	-138.969000	95.85%	-74.875900	-76.035000	98.48%	-65.895300	-68.562000	96.11%	-43.974300	-43.139000	101.94%
Yj [kN]	46.801500	41.031000	114.06%	46.850200	47.175000	99.31%	67.303100	70.407000	95.59%	28.025700	-28.861000	97.11%	65.895300	68.562000	96.11%
Mj [kN-m]	-1.119980	1.076400	104.05%	-66.221100	-65.971400	100.38%	54.761100	-62.616900	87.45%	-59.305900	-56.752100	104.50%	59.305900	-67.036500	88.47%

**Tabla 6-12.:** Resumen de acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 316°C. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C

Cuando se varía la temperatura hasta llegar a los 316°C momento a la flexión de la viga, elemento 2, presenta unos valores de 133.198 kN-m y 138.969 kN-m para OpenSees y SAP2000 respectivamente, tabla 6-12, que con relación a la condición inicial no presenta ningún tipo de variación coincidiendo con el caso del pórtico simple cuando se modifica el material.

También se puede observar que para el elemento 4 la fuerza axial está dada por 65.8953 kN para OpenSees y 68.5620 kN para SAP2000. Con un porcentaje de similitud del 96.11 % cuando la temperatura alcanza 316°C.

Acciones internas de fuerzas cuando E=9.80E+07 kPa y T=538 °C															
Ele F	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
<b>Xi [kN]</b>	25.149800	-24.825000	101.31%	133.198000	-138.969000	95.85%	74.875900	-76.035000	98.48%	65.895300	-68.562000	96.11%	43.974300	-43.139000	101.94%
<b>Yi [kN]</b>	-46.801500	41.031000	114.06%	25.149800	-24.825000	101.31%	-67.303100	70.407000	95.59%	43.974300	43.139000	101.94%	-65.895300	68.562000	96.11%
<b>Mi [kN-m]</b>	141.525000	142.861600	99.06%	1.119980	1.076400	104.05%	147.148000	148.603200	99.02%	11.460000	-13.915600	82.35%	138.380000	138.650800	99.80%
<b>Xj [kN]</b>	-25.149800	-24.825000	101.31%	-133.198000	-138.969000	95.85%	-74.875900	-76.035000	98.48%	-65.895300	-68.562000	96.11%	-43.974300	-43.139000	101.94%
<b>Yj [kN]</b>	46.801500	41.031000	114.06%	46.850200	47.175000	99.31%	67.303100	70.407000	95.59%	28.025700	-28.861000	97.11%	65.895300	68.562000	96.11%
<b>Mj [kN-m]</b>	-1.119980	1.076400	104.05%	-66.221100	-65.971400	100.38%	54.761100	-62.616900	87.45%	-59.305900	-56.752100	104.50%	59.305900	-67.036500	88.47%

**Tabla 6-13.:** Resumen de acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 538°C. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C

Para el elemento 3, que corresponde a la columna intermedia presenta una fuerza cortante de 67.3031 kN y 40.4070 para OpenSees y SAP2000 respectivamente, cuando la temperatura alcanza 538°C, así como se indica en la tabla 6-13 en donde se aprecia que el porcentaje de similitud es de 95.59 %.

También podemos apreciar de esta tablas la transmisión de la cargas cumplen con el equilibrio de fuerzas.

Acciones internas de fuerzas cuando E=4.40E+07 kPa y T=649 °C															
Ele F	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
<b>Xi [kN]</b>	25.149800	-24.825000	101.31%	133.198000	-138.969000	95.85%	74.875900	-76.035000	98.48%	65.895300	-68.562000	96.11%	43.974300	-43.139000	101.94%
<b>Yi [kN]</b>	-46.801500	41.031000	114.06%	25.149800	-24.825000	101.31%	-67.303100	70.407000	95.59%	43.974300	43.139000	101.94%	-65.895300	68.562000	96.11%
<b>Mi [kN-m]</b>	141.525000	142.861600	99.06%	1.119980	1.076400	104.05%	147.148000	148.603200	99.02%	11.460000	-13.915600	82.35%	138.380000	138.650800	99.80%
<b>Xj [kN]</b>	-25.149800	-24.825000	101.31%	-133.198000	-138.969000	95.85%	-74.875900	-76.035000	98.48%	-65.895300	-68.562000	96.11%	-43.974300	-43.139000	101.94%
<b>Yj [kN]</b>	46.801500	41.031000	114.06%	46.850200	47.175000	99.31%	67.303100	70.407000	95.59%	28.025700	-28.861000	97.11%	65.895300	68.562000	96.11%
<b>Mj [kN-m]</b>	-1.119980	1.076400	104.05%	-66.221100	-65.971400	100.38%	54.761100	-62.616900	87.45%	-59.305900	-56.752100	104.50%	59.305900	-67.036500	88.47%

**Tabla 6-14.:** Resumen de acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 649°C. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C

En la tabla se puede apreciar que bajo una temperatura de 649°C, tabla 6-14, los miembros estructurales tipo columna, elementos 1, 3 y 5 presentan un porcentaje absoluto de similitud desde 87.45 % hasta 114.06 %.

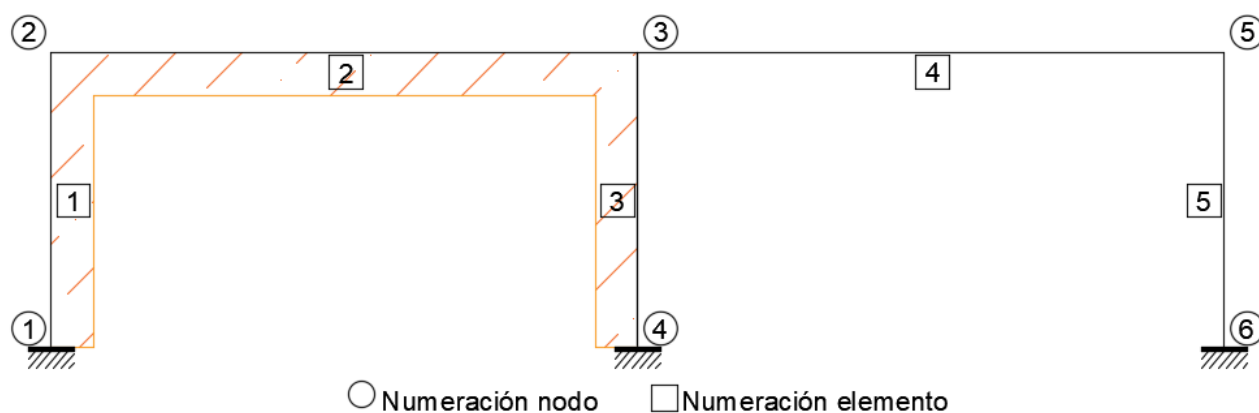
Por otro, los resultados de las vigas bajo una temperatura de 649°C, presenta un porcentaje absoluto de similitud que oscila entre 95.85 % y 104.50 %.

*Nota: Por claridad, el nuevo caso se presenta al inicio de la siguiente página.*

### 6.1.5. CASO CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A

#### Modelo

El modelo consiste en un pórtico doble de dos naves (CE-B), como se muestra en la figura 6-6, con condición de apoyo empotrada (CA-E), modelado bajo efecto del fuego en forma de afectación al material (EF-M) y expuesto a una condición de fuego alternada (EEF-A). La afectación al material se refiere a la afectación del módulo de elasticidad considerando diferentes variaciones de temperatura.



**Figura 6-6.:** Pórtico de dos naves y un piso afectando el módulo de elasticidad alternadamente. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A

En este caso, solamente una nave del pórtico estará expuesta a la afectación del módulo de elasticidad para cada variación de temperatura de 316°C, 538°C y 649°C.

Los valores en esta ocasión se presentan con cuatro decimales debido a que hay variación en los resultados de acciones internas de fuerzas, cuando el módulo de elasticidad es afectado bajo condiciones de altas temperaturas, cada vez que la afectación se realice a una parte de la estructura y no a su totalidad.

#### Desplazamientos

Los desplazamientos de los nodos se muestran a continuación para una condición normal y afectada bajo efectos de la temperatura sobre el material. Los resultados se encuentran consolidados en una única tabla.



$\delta$ [m]	Desplazamientos cuando E=2.00E+08kPa y T=20°C			Desplazamientos cuando E=1.56E+08kPa y T=316°C			Desplazamientos cuando E=9.80E+07kPa y T=538°C			Desplazamientos cuando E=4.40E+07kPa y T=649°C		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
U2	4.7288 E-03	6.7280 E-03	70.29%	5.6238 E-03	8.0290 E-03	70.04%	7.6080 E-03	1.0941 E-02	69.54%	1.2266 E-02	1.7872 E-02	68.63%
V2	-2.3726 E-05	-2.9000 E-05	81.81%	-3.1557 E-05	-3.9000 E-05	80.91%	-5.3693 E-05	-6.6000 E-05	81.35%	-1.3131 E-04	-1.6100 E-04	81.56%
02	-2.3737 E-03	3.3830 E-03	70.17%	-2.8527 E-03	4.1120 E-03	69.38%	-3.9570 E-03	5.8500 E-03	67.64%	-6.7748 E-03	1.0558 E-02	64.17%
U3	3.9861 E-03	5.5200 E-03	72.21%	4.6374 E-03	6.4240 E-03	72.19%	5.9332 E-03	8.2170 E-03	72.21%	8.1739 E-03	1.1251 E-02	72.65%
V3	-7.0638 E-05	-9.0000 E-05	78.49%	-8.7860 E-05	-1.1200 E-04	78.45%	-1.3190 E-04	-1.6900 E-04	78.05%	-2.6969 E-04	-3.4900 E-04	77.27%
03	-1.5374 E-03	1.7890 E-03	85.94%	-1.7269 E-03	1.9910 E-03	86.74%	-2.0127 E-03	2.2610 E-03	89.02%	-2.0504 E-03	2.0900 E-03	98.11%
U5	3.6186 E-03	4.9970 E-03	72.42%	4.2247 E-03	5.8600 E-03	72.09%	5.4316 E-03	7.5930 E-03	71.53%	7.5242 E-03	1.0630 E-02	70.78%
V5	-4.1485 E-05	-5.1000 E-05	81.34%	-4.2704 E-05	-5.2000 E-05	82.12%	-4.4908 E-05	-5.5000 E-05	81.65%	-4.7630 E-05	-5.8000 E-05	82.12%
05	-1.3159 E-03	1.4900 E-03	88.31%	-1.5848 E-03	1.8270 E-03	86.74%	-2.1241 E-03	2.5110 E-03	84.59%	-3.0771 E-03	3.7410 E-03	82.25%
U1	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
V1	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
01	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
U4	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
V4	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
04	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
U6	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
V6	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
06	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%

**Tabla 6-15.:** Resumen de los desplazamientos en los nudos bajo temperaturas de 20°C, 316°C, 538°C y 649°C. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A

De la tabla 6-15 se puede apreciar que el porcentaje absoluto de similitud de los resultados en los dos programas oscila entre 64.17% y 98.11%. También se puede observar que el nodo 3 presenta unos desplazamientos horizontales en condiciones normales de 3.9861E-03 m y 5.5200E-03 m, para OpenSees y SAP2000 respectivamente.

Así mismo, el nodo 3 presenta unos desplazamientos horizontales en condiciones bajo una temperatura de 316°C de 4.6374E-03 m y 6.4240E-03 m, para OpenSees y SAP2000 respectivamente. El incremento con respecto a las condiciones normales es de 16.34% tomando como referencia los valores de OpenSees.

Bajo una temperatura de 538°C el nodo 3 presenta unos desplazamientos horizontales de 5.9332E-03 m y 8.2170E-03 m, para OpenSees y SAP2000 respectivamente. El incremento con respecto a las condiciones normales es de 48.85% tomando como referencia los valores de OpenSees.

El nodo 3 presenta unos desplazamientos horizontales en condiciones bajo una temperatura de 649°C de 8.1739E-02 m y 1.1251E-02 m, para OpenSees y SAP2000 respectivamente. El incremento con respecto a las condiciones normales es de 105.06% tomando como referencia los valores de OpenSees.

### Acciones internas de fuerza

Las acciones internas de fuerzas tales como fuerzas axiales cortante y momento de flexión se resumen en las siguientes tablas, donde se unificó todos los elementos en una única tabla

para el caso en condición normal y demás que se está variando la temperatura.

Acciones internas de fuerzas cuando E=2.00E+08kPa y T=20°C															
Ele F	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
X1 [kN]	25.1498	-24.8250	101.31%	133.1980	-138.9690	95.85%	74.8759	-76.0350	98.48%	65.8953	-68.5620	96.11%	43.9743	-43.1390	101.94%
Y1 [kN]	46.8015	41.0310	114.06%	25.1498	-24.8250	101.31%	67.3031	70.4070	95.59%	28.0257	-28.8610	97.11%	65.8953	68.5620	96.11%
M1 [kN-m]	141.5250	142.8616	99.06%	1.1200	1.0764	104.05%	147.1480	148.6032	99.02%	11.4600	-13.9156	82.35%	138.3800	138.6508	99.80%
X2 [kN]	-25.1498	-24.8250	101.31%	-133.1980	-138.9690	95.85%	-74.8759	-76.0350	98.48%	-65.8953	-68.5620	96.11%	-43.9743	-43.1390	101.94%
Y2 [kN]	-46.8015	41.0310	114.06%	46.8502	47.1750	99.31%	-67.3031	70.4070	95.59%	43.9743	43.1390	101.94%	-65.8953	68.5620	96.11%
M2 [kN-m]	-1.1200	1.0764	104.05%	-66.2211	-65.9714	100.38%	54.7611	-62.6169	87.45%	-59.3059	-56.7521	104.50%	59.3059	-67.0365	88.47%

**Tabla 6-16.:** Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo temperatura ambiente. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A

La tabla **6-16** muestra los resultados de las acciones internas de fuerzas en los elementos cuando el pórtico está en condiciones normales. Los valores dados para la viga, el elemento 2, presenta una fuerza axial de 133.198 kN y 138.969 kN para OpenSees y SAP2000 respectivamente.

Acciones internas de fuerzas cuando E=1.56E+08kPa y T=316°C															
Ele F	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
X1 [kN]	26.0911	-25.7150	101.46%	137.9800	-143.9730	95.84%	72.6426	-73.9600	98.22%	74.0140	-77.4240	95.60%	45.2662	-44.3250	102.12%
Y1 [kN]	-42.0203	36.0270	116.64%	26.0911	-25.7150	101.46%	-63.9657	66.5480	96.12%	45.2662	44.3250	102.12%	-74.0140	77.4240	95.60%
M1 [kN-m]	129.8880	131.1356	99.05%	3.8276	-1.4582	262.49%	136.4220	137.1526	99.47%	7.8054	-10.6589	73.23%	158.6390	160.0499	99.12%
X2 [kN]	-26.0911	-25.7150	101.46%	-137.9800	-143.9730	95.84%	-72.6426	-73.9600	98.22%	-74.0140	-77.4240	95.60%	-45.2662	-44.3250	102.12%
Y2 [kN]	42.0203	36.0270	116.64%	45.9089	46.2850	99.19%	63.9657	66.5480	96.12%	26.7338	-27.6750	96.60%	74.0140	77.4240	95.60%
M2 [kN-m]	-3.8276	-3.4582	110.68%	-63.2807	-63.1694	100.18%	55.4753	-62.4927	88.77%	-63.4029	-60.6096	104.61%	63.4029	-72.2232	87.79%

**Tabla 6-17.:** Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 316°C. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A

En la tabla **6-17** se muestra los resultados de las acciones internas de fuerzas en los elementos cuando el pórtico está en condiciones bajo efecto de una temperatura de 316°C. Los valores dados para la viga, el elemento 2, presenta una fuerza axial de 137.980 kN y 143.973 kN para OpenSees y SAP2000 respectivamente. Estos datos comparados con la condición inicial se incrementan 3.59%.

Acciones internas de fuerzas cuando E=9.80E+07kPa y T=538°C															
Ele F	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
X1 [kN]	27.8881	-27.4150	101.73%	147.1680	-153.6510	95.78%	68.5090	-70.1510	97.66%	89.9599	-94.9700	94.72%	47.6029	-46.4340	102.52%
Y1 [kN]	-32.8319	26.3490	124.60%	27.8881	-27.4150	101.73%	-57.2082	58.6800	97.49%	47.6029	46.4340	102.52%	-89.9599	94.9700	94.72%
M1 [kN-m]	107.5060	108.4228	99.15%	9.0107	-6.3271	142.41%	115.4440	114.6550	100.69%	1.5017	-5.2529	28.59%	198.7610	202.8064	98.01%
X2 [kN]	-27.8881	-27.4150	101.73%	-147.1680	-153.6510	95.78%	-68.5090	-70.1510	97.66%	-89.9599	-94.9700	94.72%	-47.6029	-46.4340	102.52%
Y2 [kN]	32.8319	26.3490	124.60%	44.1119	44.5850	98.94%	57.2082	58.6800	97.49%	24.3971	-25.5660	95.43%	89.9599	94.9700	94.72%
M2 [kN-m]	-9.0107	-6.3271	142.41%	-57.6820	-57.8371	99.73%	56.1803	-61.3863	91.52%	-71.1190	-67.8586	104.80%	71.1190	-82.1041	86.62%

**Tabla 6-18.:** Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 538°C. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A

Por otro lado, al aumentar la temperatura a 538°C se obtienen los siguientes resultados de fuerzas axiales, tabla **6-18**, para el elemento 2, 147.168 kN y 153.651 kN para OpenSees y SAP2000 respectivamente. El incremento es de 10.49 % respecto a las condiciones normales.

Acciones internas de fuerzas cuando $E=4.40E+07\text{kPa}$ y $T=649^\circ\text{C}$															
Ele F	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
<b>X1 [kN]</b>	30.6204	-29.9940	102.09%	161.4550	-168.8870	95.60%	62.8915	-65.1460	96.54%	116.521	-124.574	93.54%	50.4881	-48.8600	103.33%
<b>Y1 [kN]</b>	-18.5445	11.1130	166.87%	30.6204	-29.9940	102.09%	-44.9347	44.3130	101.40%	50.4881	-23.14	218.19%	-116.5210	124.5740	93.54%
<b>M1 [kN-m]</b>	72.5999	72.5021	100.13%	16.9663	-13.8303	122.67%	80.9559	77.5236	104.43%	-4.60451	-1.0984	419.20%	267.2380	276.7782	96.55%
<b>X2 [kN]</b>	-30.6204	-29.9940	102.09%	-161.4550	-168.8870	95.60%	-62.8915	-65.1460	96.54%	-116.521	-124.574	93.54%	-50.4881	-48.8600	103.33%
<b>Y2 [kN]</b>	18.5445	11.1130	166.87%	41.3796	42.0060	98.51%	44.9347	44.3130	101.40%	21.5119	48.86	44.03%	116.5210	124.5740	93.54%
<b>M2 [kN-m]</b>	-16.9663	-13.8303	122.67%	-49.2438	-49.8677	98.75%	53.8483	-55.4163	97.17%	-82.3239	-78.2571	105.20%	82.3239	-96.9432	84.92%

**Tabla 6-19.:** Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 649°C.  
Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A

Finalmente, cuando la temperatura alcanza 649°C los resultados para el elemento 2, como se muestra en la tabla **6-19**, son de 161.455 kN y 168.887 kN para OpenSees y SAP2000 respectivamente. El aumento respecto a las condiciones iniciales es de 21.21 %.

*Nota: Por claridad, el nuevo caso se presenta al inicio de la siguiente página.*

### 6.1.6. CASO CE-B: CA-E/EF-S/EEF-C

#### Modelo

El modelo consiste en un pórtico doble de dos naves (CE-B), como se muestra en la figura 6-7, con condición de apoyo empotrada (CA-E), modelado bajo efecto del fuego en forma de afectación de la sección transversal (EF-S) y expuesto a una condición de fuego completa (EEF-C).

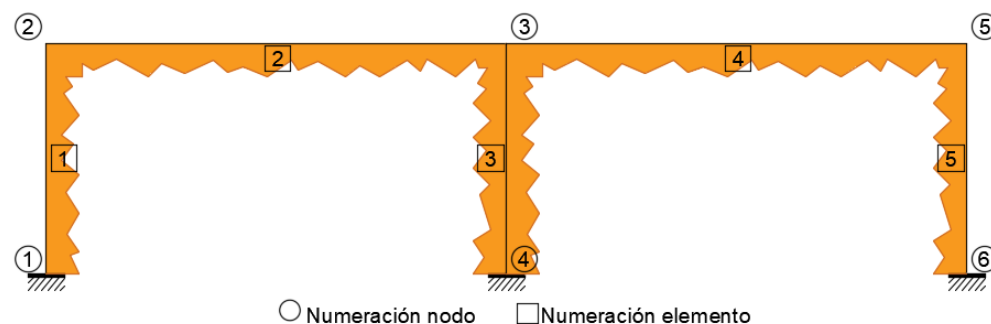


Figura 6-7.: Pórtico de dos naves y un piso afectando la sección transversal. Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-C

#### Desplazamientos

Los resultados de desplazamientos tanto en condiciones normales como considerando los efectos del fuego con afectación de la sección transversal se encuentran unificados en la tabla 6-20.

$\delta$ [m]	Desplazamientos sin modificar la sección			Desplazamientos modificando la sección		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
U2	4.7288 E-03	6.7280 E-03	70.29%	5.1857 E-03	7.2910 E-03	71.12%
V2	-2.3726 E-05	-2.9000 E-05	81.81%	-2.5179 E-05	-3.1000 E-05	81.22%
θ2	-2.3737 E-03	3.3830 E-03	70.17%	-2.5933 E-03	3.6620 E-03	70.82%
U3	3.9861 E-03	5.5200 E-03	72.21%	4.4170 E-03	6.0410 E-03	73.12%
V3	-7.0638 E-05	-9.0000 E-05	78.49%	-8.2602 E-05	-1.0500 E-04	78.67%
θ3	-1.5374 E-03	1.7890 E-03	85.94%	-1.6523 E-03	1.9330 E-03	85.48%
U5	3.6186 E-03	4.9970 E-03	72.42%	4.0277 E-03	5.4980 E-03	73.26%
V5	-4.1485 E-05	-5.1000 E-05	81.34%	-4.4863 E-05	-5.5000 E-05	81.57%
θ5	-1.3159 E-03	1.4900 E-03	88.31%	-1.4659 E-03	1.6710 E-03	87.73%
U1	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
V1	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
θ1	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
U4	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
V4	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
θ4	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
U6	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
V6	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
θ6	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%

Tabla 6-20.: Resumen de los desplazamientos en los nudos sin y con afectación de la sección transversal. Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-C

Se puede observar que los desplazamientos se incrementan y el mayor incremento se puede ver en el nodo 3, en el desplazamiento vertical, presentando valores de  $8.2602E-05$  m y  $1.0500E-04$  m, con un incremento de 16.94% y 16.67% comparados con los resultados en condición normal para OpenSees y SAP2000 respectivamente.

### Acciones internas de fuerza

Los resultados de acciones internas de fuerzas se presentan para condición normal y bajo las consideración de reducción de la sección transversal por afectación de las altas temperaturas.

Acciones internas de fuerzas sin modificar la sección															
Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
F															
X1 [kN]	25.14980	-24.82500	101.31%	133.19800	-138.96900	95.85%	74.87590	-76.03500	98.48%	65.89530	-68.56200	96.11%	43.97430	-43.13900	101.94%
Y1 [kN]	-46.80150	41.03100	114.06%	25.14980	-24.82500	101.31%	67.30310	70.40700	95.59%	28.02570	-28.86100	97.11%	65.89530	68.56200	96.11%
M1 [kN-m]	141.52500	142.86160	99.06%	1.11998	1.07640	104.05%	147.14800	148.60320	99.02%	11.46000	-13.91560	82.35%	138.38000	138.65080	99.80%
X2 [kN]	-25.14980	-24.82500	101.31%	-133.19800	-138.96900	95.85%	-74.87590	-76.03500	98.48%	-65.89530	-68.56200	96.11%	-43.97430	-43.13900	101.94%
Y2 [kN]	-46.80150	41.03100	114.06%	46.85020	47.17500	99.31%	-67.30310	70.40700	95.59%	43.97430	43.13900	101.94%	-65.89530	68.56200	96.11%
M2 [kN-m]	-1.11998	1.07640	104.05%	-66.22110	-65.97140	100.38%	54.76110	-62.61690	87.45%	-59.30590	-56.75210	104.50%	59.30590	-67.03650	88.47%

**Tabla 6-21.:** Resumen de acciones internas de fuerzas en condición normal. Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-C

Tomando como referencia el miembro estructural tipo viga, elemento 4, se puede observar que los resultados para fuerza cortante son 28.0257 kN y 28.8610 kN para OpenSees y SAP2000 respectivamente. Presenta una similitud entre los dos programas de 97.11%.

Acciones internas de fuerzas modificando la sección															
Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
F															
X1 [kN]	24.84360	-24.53400	101.26%	132.46500	-138.10300	95.92%	74.89200	-76.01400	98.52%	67.08930	-69.72200	96.22%	44.26440	-43.45200	101.87%
Y1	-47.53500	41.89700	113.46%	24.84360	-24.53400	101.26%	-65.37580	68.38100	95.61%	44.26440	43.45200	101.87%	-67.08930	69.72200	96.22%
M1	142.65200	143.45300	99.44%	0.04694	0.04820	97.40%	139.85700	141.68020	98.71%	10.71480	-13.09190	81.84%	140.96700	141.36360	99.72%
X2 [kN]	-24.84360	-24.53400	101.26%	-132.46500	-138.10300	95.92%	-74.89200	-76.01400	98.52%	-67.08930	-69.72200	96.22%	-44.26440	-43.45200	101.87%
Y2	47.53500	41.89700	113.46%	47.15640	47.46600	99.35%	65.37580	68.38100	95.61%	27.73560	-28.54800	97.15%	67.08930	69.72200	96.22%
M2	-0.04694	0.04820	97.40%	-66.98550	-66.74520	100.36%	56.27070	-63.46270	88.67%	-60.30110	-57.80180	104.32%	60.30110	-67.80360	88.93%

**Tabla 6-22.:** Resumen de acciones internas de fuerzas afectando la sección transversal. Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-C

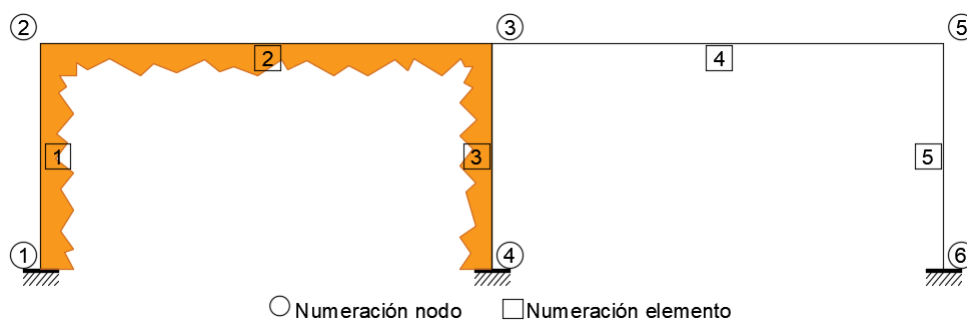
Cuando se realiza una reducción de la sección transversal el miembro estructural tipo viga, elemento 4, presenta resultados para fuerza cortante de 44.2644 kN y 43.452 kN-m para OpenSees y SAP2000 respectivamente. Presenta una similitud entre los dos programas de 101.87%. El aumento de estas fuerzas respecto a la condición normal es 57.94% tomando de referencia los resultados de OpenSees.

*Nota: Por claridad, el nuevo caso se presenta al inicio de la siguiente página.*

### 6.1.7. CASO CE-B: CA-E/EF-S/EEF-A

#### Modelo

El modelo consiste en un pórtico doble de dos naves (CE-B), como se muestra en la figura 6-8, con condición de apoyo empotrada (CA-E), modelado bajo efecto del fuego en forma de afectación a la sección transversal (EF-S) y expuesto a una condición de fuego alternada (EEF-A).



**Figura 6-8.:** Pórtico de dos naves y un piso afectando la sección transversal alternadamente.  
Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-A

#### Desplazamientos

A continuación, se presentan los resultados de desplazamientos para sección en condiciones normal y sección modificada, tanto para OpenSees como para SAP2000.

$\delta$ [m]	Desplazamientos sin modificar la sección			Desplazamientos modificando la sección		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
U2	4.7288.E-03	6.7280.E-03	70.29%	4.9847.E-03	7.0320.E-03	70.89%
V2	-2.3726.E-05	-2.9000.E-05	81.81%	-2.5564.E-05	-3.2000.E-05	79.89%
θ2	-2.3737.E-03	3.3830.E-03	70.17%	-2.5039.E-03	3.5600.E-03	70.33%
U3	3.9861.E-03	5.5200.E-03	72.21%	4.2018.E-03	5.7700.E-03	72.82%
V3	-7.0638.E-05	-9.0000.E-05	78.49%	-7.5393.E-05	-9.6000.E-05	78.53%
θ3	-1.5374.E-03	1.7890.E-03	85.94%	-1.5954.E-03	1.8680.E-03	85.41%
U5	3.6186.E-03	4.9970.E-03	72.42%	3.8194.E-03	5.2330.E-03	72.99%
V5	-4.1485.E-05	-5.1000.E-05	81.34%	-4.1876.E-05	-5.1000.E-05	82.11%
θ5	-1.3159.E-03	1.4900.E-03	88.31%	-1.4052.E-03	1.5890.E-03	88.43%
U1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
θ1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
U4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
θ4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
U6	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V6	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
θ6	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%

**Tabla 6-23.:** Resumen de los desplazamientos en los nudos sin y con afectación de la sección transversal. Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-A

De la tabla **6-23** se puede apreciar que los desplazamientos mantienen un orden de similitud entre programas por encima de 70 %.

El desplazamiento horizontal en el nodo 5 en condición normal es de 3.6186E.03 m para OpenSees y 4.997E-03 m para SAP2000, mientras que cuando se afecta la sección transversal, los desplazamientos aumenta en 5.55 % y 4.72 % respectivamente, quedando 3.8194E-03 m y 5.233E-03 m.

### Acciones internas de fuerza

Las acciones internas de fuerzas se presentan a continuación para exposición normal y exposición afectando la sección transversal alternadamente.

Acciones internas de fuerzas sin modificar la sección															
Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
<b>F</b>															
<b>X1 [kN]</b>	25.14980	-24.82500	101.31%	133.19800	-138.96900	95.85%	74.87590	-76.03500	98.48%	65.89530	-68.56200	96.11%	43.97430	-43.13900	101.94%
<b>Y1 [kN]</b>	-46.80150	41.03100	114.06%	25.14980	-24.82500	101.31%	67.30310	70.40700	95.59%	28.02570	-28.86100	97.11%	65.89530	68.56200	96.11%
<b>M1 [kN-m]</b>	141.52500	142.86160	99.06%	1.11998	1.07640	104.05%	147.14800	148.60320	99.02%	11.46000	-13.91560	82.35%	138.38000	138.65080	99.80%
<b>X2 [kN]</b>	-25.14980	-24.82500	101.31%	-133.19800	-138.96900	95.85%	-74.87590	-76.03500	98.48%	-65.89530	-68.56200	96.11%	-43.97430	-43.13900	101.94%
<b>Y2 [kN]</b>	-46.80150	41.03100	114.06%	46.85020	47.17500	99.31%	-67.30310	70.40700	95.59%	43.97430	43.13900	101.94%	-65.89530	68.56200	96.11%
<b>M2 [kN-m]</b>	-1.11998	1.07640	104.05%	-66.22110	-65.97140	100.38%	54.76110	-62.61690	87.45%	-59.30590	-56.75210	104.50%	59.30590	-67.03650	88.47%

**Tabla 6-24.:** Resumen de acciones internas de fuerzas en condición normal. Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-A

En la tabla **6-24** se puede apreciar que la fuerza cortante, en condición normal, del elemento 4 en OpenSees es de 28.0257 kN y en SAP2000 es de 28.8610 kN, con un porcentaje absoluto de similitud de 97.11 %.

Acciones internas de fuerzas modificando la sección															
Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
<b>F</b>															
<b>X1 [kN]</b>	25.22310	-24.87100	101.42%	134.92100	-140.56400	95.99%	74.38820	-75.54900	98.46%	68.57150	-71.39500	96.05%	44.38870	-43.57900	101.86%
<b>Y1 [kN]</b>	-45.07930	39.43600	114.31%	25.22310	-24.87100	101.42%	-66.34920	69.16900	95.92%	44.38870	43.57900	101.86%	-68.57150	71.39500	96.05%
<b>M1 [kN-m]</b>	136.50900	137.51520	99.27%	1.27118	0.95810	132.68%	143.41900	144.87480	99.00%	10.30390	-12.63550	81.55%	145.07800	145.36410	99.80%
<b>X2 [kN]</b>	-25.22310	-24.87100	101.42%	-134.92100	-140.56400	95.99%	-74.38820	-75.54900	98.46%	-68.57150	-71.39500	96.05%	-44.38870	-43.57900	101.86%
<b>Y2 [kN]</b>	45.07930	39.43600	114.31%	46.77690	47.12900	99.25%	66.34920	69.16900	95.92%	27.61130	-28.42100	97.15%	68.57150	71.39500	96.05%
<b>M2 [kN-m]</b>	-1.27118	0.95810	132.68%	-65.93270	-65.81300	100.18%	55.62880	-62.63240	88.82%	-60.63640	-58.11020	104.35%	60.63640	-68.81940	88.11%

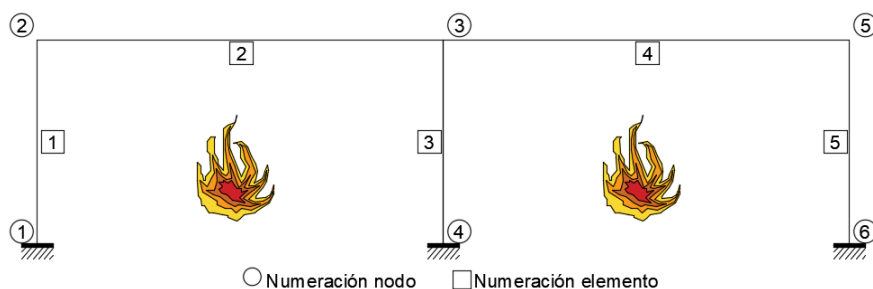
**Tabla 6-25.:** Resumen de acciones internas de fuerzas afectando la sección transversal. Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-A

Comparando el elemento 4 cuando se ha afectado la sección en su nave izquierda, se obtiene los siguientes resultados para fuerza cortante 44.3887 kN para OpenSees y 43.5790 kN para SAP2000, con un aumento de 58.39 % y 51.0 % respectivamente con sus análogos en condición normal.

### 6.1.8. CASO CE-B: CA-E/EF-TT/EEF-C

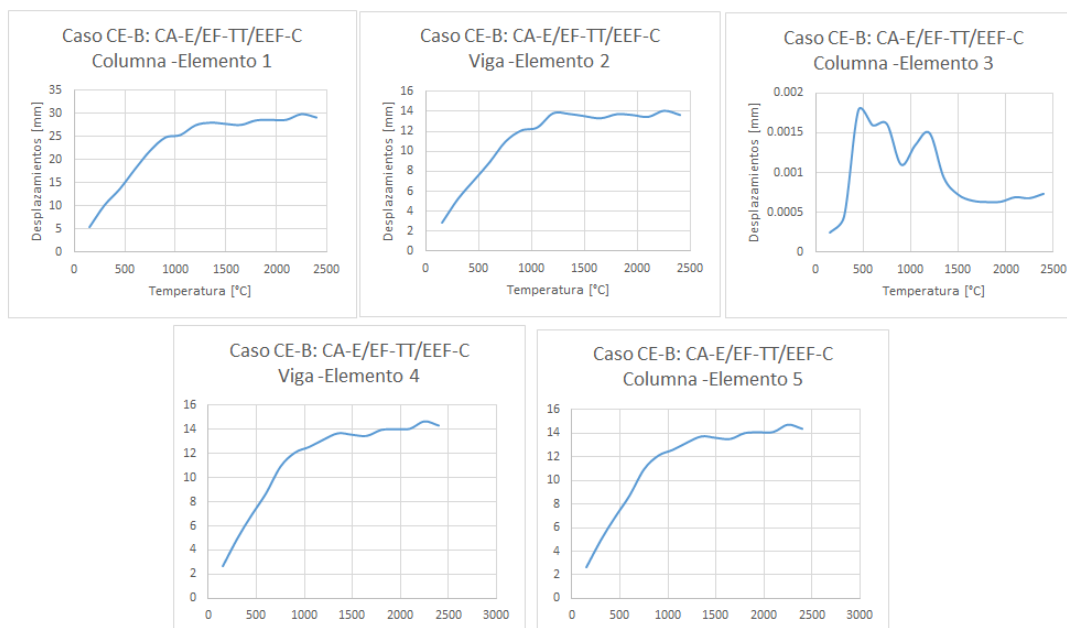
#### Modelo

El modelo consiste en un pórtico doble de dos naves (CE-B), como se muestra en la figura 6-9, con condición de apoyo empotrada (CA-E), modelado bajo efecto del fuego en forma directa del fuego (EF-TT) y expuesto a una condición de fuego completa (EEF-C).



**Figura 6-9.:** Pórtico de dos naves y un piso bajo consideraciones directas de fuego. Caso CE-B: CA-E/EF-TT/EEF-C

A continuación, se muestran las curvas desplazamiento-temperatura para pórtico caso CE-B: CA-E/EF-TT/EEF-C. Las curvas están consolidadas en una única imagen. Los resultados de desplazamientos están relacionados con los puntos medios de cada miembro estructural.



**Figura 6-10.:** Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 1 a 5. Caso CE-B: CA-E/EF-TT/EEF-C



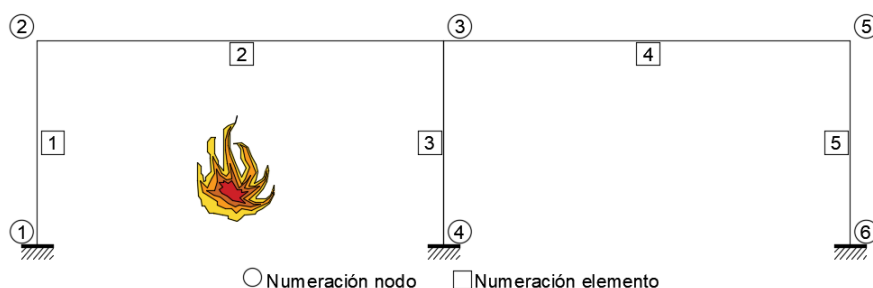
De acuerdo con los resultados obtenidos para desplazamientos bajo un efecto de fuego directo, indicados en la figura **6-10**, se puede apreciar que las vigas elemento 2 y 4 a una temperatura de 2400°C alcanzan un desplazamiento de aproximadamente 14 mm. En cuanto a las columnas de los extremos estas experimentan un desplazamiento creciente y constante hasta una temperatura de 2400°C presentando desplazamientos de 30 mm y 14 mm respectivamente, mientras que la columna intermedia experimenta un desplazamiento creciente hasta 500°C alcanzando un desplazamiento de 0.0015 mm y a partir de esa temperatura el desplazamiento comienza a decrecer por la pérdida de resistencia y teniendo en cuenta que recibe calor de las dos naves.

*Nota: Por claridad, el nuevo caso se presenta al inicio de la siguiente página.*

### 6.1.9. CASO CE-B: CA-E/EF-TT/EEF-A

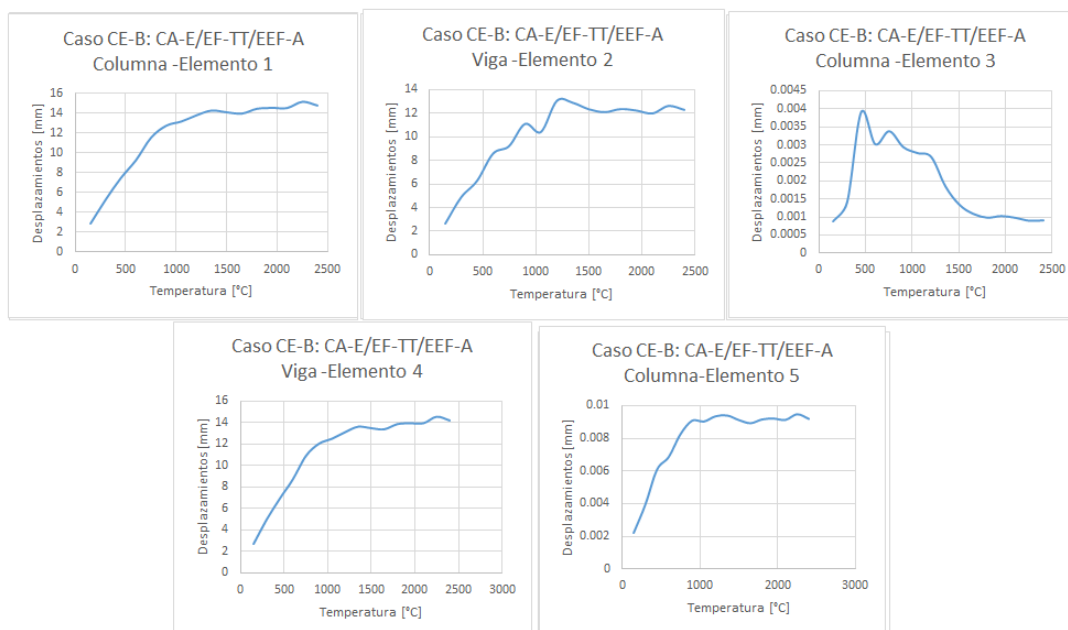
#### Modelo

El modelo consiste en un pórtico doble de dos naves (CE-B), como se muestra en la figura 6-11, con condición de apoyo empotrada (CA-E), modelado bajo efecto del fuego en forma directa del fuego y expuesto a una condición de fuego alternada (EEF-A).



**Figura 6-11.:** Pórtico de dos naves y un piso bajo consideraciones directas de fuego alternadamente. Caso CE-B: CA-E/EF-TT/EEF-A

En la siguiente tabla se muestra de manera compilada los resultados de los desplazamientos obtenidos bajo el efecto de una solicitación de altas temperaturas, de cada uno de los elementos analizados en su punto medio. Este caso es afectado en una de sus naves, la otra conserva las condiciones iniciales.



**Figura 6-12.:** Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 1 a 5. Caso CE-B: CA-E/EF-TT/EEF-A

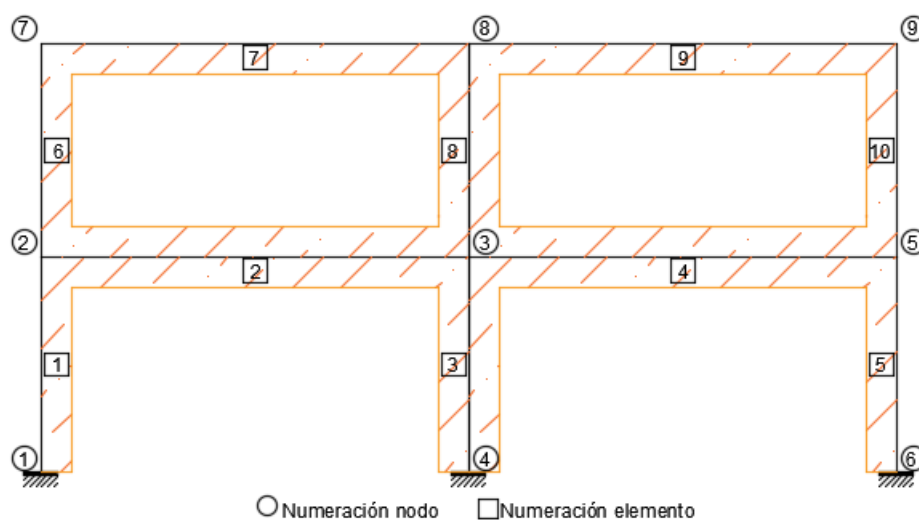
De acuerdo con los resultados obtenidos para desplazamientos bajo un efecto de fuego directo, indicados en la figura **6-10**, se puede apreciar que las vigas elemento 2 y 4 a una temperatura de 2400°C alcanzan un desplazamiento de aproximadamente 14 mm. En cuanto a las columnas de los extremos experimentan un desplazamiento creciente y constante hasta una temperatura de 2400°C presentando desplazamientos de 14 mm y 0.008 mm respectivamente. Mientras que la columna intermedia experimenta un desplazamiento creciente hasta 500°C alcanzando un desplazamiento de 0.004 mm y a partir de esa temperatura el desplazamiento comienza a decrecer por la pérdida de resistencia.

*Nota: Por claridad, el nuevo caso se presenta al inicio de la siguiente página.*

### 6.1.10. CASO CE-C: CA-E/EF-M/EEF-C

#### Modelo

El modelo consiste en un pórtico de dos naves por dos pisos (CE-C), como se muestra en la figura 6-13, con condición de apoyo empotrada (CA-E), modelado bajo efecto del fuego en forma de afectación al material (EF-M) y expuesto a una condición de fuego completa (EEF-C).



**Figura 6-13.:** Pórtico de dos naves y dos pisos afectando el módulo de elasticidad. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-C

#### Desplazamientos

Los resultados de los desplazamientos se encuentran consolidados en una única tabla, donde se presentan los resultados para condición normal, y las tres exposiciones de temperatura: 316°C, 538°C y 649°C.

Así mismo, al aumentar un piso la cantidad de nodos aumenta y con estos los resultados de desplazamiento, de ahí la largura de la tabla. Cabe resaltar que los últimos nodos de las tablas corresponden a los apoyos restringidos, que se están dejando registrados para corroborar que sus desplazamiento son ceros, tanto en OpenSees como en SAP2000. Es importante tenerlos en cuenta porque solamente para esta configuración estructural se evalúa cuando los apoyos no están restringidos.

En este caso se continúa conservando los colores en los encabezados de las tablas para diferenciar los cambios de temperaturas.

$\delta$ [m]	Desplazamientos cuando E=2.00E+08 kPa y T=20 °C			Desplazamientos cuando E=1.56E+08 kPa y T=316 °C			Desplazamientos cuando E=9.80E+07 kPa y T=538 °C			Desplazamientos cuando E=4.40E+07 kPa y T=649 °C		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
U2	6.8480.E-03	9.2230.E-03	74.25%	8.7795.E-03	1.1825.E-02	74.24%	1.3975.E-02	1.8823.E-02	74.25%	3.1127.E-02	4.1924.E-02	74.25%
V2	-2.8140.E-05	-3.5000.E-05	80.40%	-3.6077.E-05	-4.5000.E-05	80.17%	-5.7429.E-05	-7.1000.E-05	80.89%	-1.2791.E-04	-1.5900.E-04	80.45%
02	-3.8133.E-03	4.8760.E-03	78.21%	-4.8888.E-03	6.2510.E-03	78.21%	-7.7822.E-03	9.9500.E-03	78.21%	-1.7333.E-02	2.2162.E-02	78.21%
U3	6.9047.E-03	9.2830.E-03	74.38%	8.8522.E-03	1.1901.E-02	74.38%	1.4091.E-02	1.8944.E-02	74.38%	3.1385.E-02	4.2194.E-02	74.38%
V3	-1.3892.E-04	-1.7500.E-04	79.38%	-1.7810.E-04	-2.2500.E-04	79.15%	-2.8350.E-04	-3.5800.E-04	79.19%	-6.3144.E-04	-7.9600.E-04	79.33%
03	-3.4781.E-03	4.4120.E-03	78.83%	-4.4591.E-03	5.6560.E-03	78.84%	-7.0982.E-03	9.0030.E-03	78.84%	-1.5810.E-02	2.0053.E-02	78.84%
U5	6.8878.E-03	9.2880.E-03	74.16%	8.8305.E-03	1.1908.E-02	74.16%	1.4057.E-02	1.8955.E-02	74.16%	3.1308.E-02	4.2218.E-02	74.16%
V5	-1.0464.E-04	-1.2900.E-04	81.12%	-1.3416.E-04	-1.6600.E-04	80.82%	-2.1355.E-04	-2.6400.E-04	80.89%	-4.7564.E-04	-5.8800.E-04	80.89%
05	-3.4736.E-03	4.4070.E-03	78.82%	-4.4533.E-03	5.6500.E-03	78.82%	-7.0890.E-03	8.9940.E-03	78.82%	-1.5789.E-02	2.0032.E-02	78.82%
U7	2.0151.E-02	2.6931.E-02	74.83%	2.5835.E-02	3.4526.E-02	74.83%	4.1125.E-02	5.4960.E-02	74.83%	9.1597.E-02	1.2241.E-01	74.83%
V7	-4.1380.E-05	-5.1000.E-05	81.14%	-5.3052.E-05	-6.5000.E-05	81.62%	-8.4450.E-05	-1.0400.E-04	81.20%	-1.8809.E-04	-2.3200.E-04	81.07%
07	-4.4731.E-03	6.1530.E-03	72.70%	-5.7347.E-03	7.8890.E-03	72.69%	-9.1287.E-03	1.2558.E-02	72.69%	-2.0332.E-02	2.7969.E-02	72.70%
U8	1.9343.E-02	2.5585.E-02	75.60%	2.4799.E-02	3.2801.E-02	75.60%	3.9475.E-02	5.2214.E-02	75.60%	8.7923.E-02	1.1630.E-01	75.60%
V8	-2.0914.E-04	-2.6400.E-04	79.22%	-2.6813.E-04	-3.3900.E-04	79.09%	-4.2682.E-04	-5.4000.E-04	79.04%	-9.5065.E-04	-1.2020.E-03	79.09%
08	-3.4689.E-03	4.2050.E-03	82.50%	-4.4474.E-03	5.3910.E-03	82.50%	-7.0795.E-03	8.5820.E-03	82.49%	-1.5768.E-02	1.9114.E-02	82.49%
U9	1.8985.E-02	2.5138.E-02	75.52%	2.4340.E-02	3.2228.E-02	75.52%	3.8745.E-02	5.1302.E-02	75.52%	8.6296.E-02	1.1426.E-01	75.52%
V9	-1.5702.E-04	-1.9400.E-04	80.94%	-2.0131.E-04	-2.4900.E-04	80.85%	-3.2046.E-04	-3.9600.E-04	80.92%	-7.1375.E-04	-8.8100.E-04	81.02%
09	-3.5237.E-03	4.3520.E-03	80.97%	-4.5176.E-03	5.5800.E-03	80.96%	-7.1913.E-03	8.8820.E-03	80.96%	-1.6017.E-02	1.9782.E-02	80.97%
U1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
01	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
U4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
04	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
U6	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V6	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
06	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%

**Tabla 6-26.:** Resumen de los desplazamientos en los nudos bajo temperaturas de 20°C, 316°C, 538°C y 649°C. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-C

La tabla **6-26** muestra que las similitud de resultados entre OpenSees y SAP2000 oscilan entre 72.69 % y 82.50 %.

Bajo temperatura ambiente, el nodo 7 presenta un desplazamiento horizontal de 2.0151E-02 m y 2.6931E-02 m para OpenSees Y SAP2000 respectivamente.

Cuando se expone el módulo de elasticidad a una temperatura de 316°C el desplazamiento es de 2.5835E-02 m para OpenSees y 3.4526E-02 m para SAP2000. De acuerdo con la condición en temperatura ambiente presenta un incremento de 28.21 % en los resultados de OpenSees y 28.20 % en SAP2000

Para una temperatura de 538°C los resultados de desplazamientos horizontales para el nodo 7 son 4.1125E-02 m y 5.4960E-02 m, con un incremento respecto a las condiciones iniciales de 104.08 % y 172.74 %, en OpenSees y SAP2000 respectivamente.

En cuanto a los resultados de la temperatura 649°C el desplazamiento horizontal del nodo 7 en OpenSees es de 9.1597E-02 m y 1.2241E-01 m en SAP2000, presentando un incremento respecto a condiciones ambientes de 354.55 % y 507.46 % respectivamente.

### Acciones internas de fuerza

Como ya se evidenció, en las condiciones estructurales A y B, las acciones de fuerzas internas no presentan variación cuando hay exposición al fuego afectando el módulo de elasticidad. Por lo tanto, en este caso solamente se presentan los resultados de fuerzas externas en condiciones normal teniendo en cuenta que cuando se varía el módulo de elasticidad para temperaturas de 316°C, 538 °C y 649 °C no representa un aumento o disminución en los resultados de fuerzas internas.

Acciones internas de fuerzas cuando E=2.00E+08 kPa y T=20 °C															
F	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
X1 [kN]	29.82850	-29.63900	100.64%	-10.18020	18.51300	54.99%	147.25200	-148.58400	99.10%	3.04274	6.81580	44.64%	110.92000	-109.77700	101.04%
Y1 [kN]	45.19160	47.40100	95.34%	15.79390	-15.95500	98.99%	67.60890	66.15100	102.20%	16.60540	-16.83700	98.62%	67.19950	66.44800	101.13%
M1 [kN-m]	182.36400	188.29840	96.85%	-25.55190	25.16900	101.52%	205.91800	205.26970	100.32%	-22.19630	21.49940	103.24%	205.16900	205.60660	99.79%
X2 [kN]	-29.82850	-29.63900	100.64%	10.18020	18.51300	54.99%	-147.25200	-148.58400	99.10%	-3.04274	6.81580	44.64%	-110.92000	-109.77700	101.04%
Y2 [kN]	-45.19160	47.40100	95.34%	56.20610	56.04500	100.29%	-67.60890	66.15100	102.20%	55.39460	55.16300	100.42%	-67.19950	66.44800	101.13%
M2 [kN-m]	-46.78930	46.09590	101.50%	-95.68460	-95.10100	100.61%	-3.09180	6.81580	45.36%	-94.17120	-93.47940	100.74%	-3.57059	6.26300	57.01%
F	Elemento 6			Elemento 7			Elemento 8			Elemento 9			Elemento 10		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
X1 [kN]	14.03460	-13.68400	102.56%	144.98900	-151.11200	95.95%	74.44010	-75.70200	98.33%	64.15680	-67.29300	95.34%	55.52530	-54.61400	101.67%
Y1 [kN]	35.01140	28.88800	121.20%	14.03460	-13.68400	102.56%	80.83180	83.82000	96.43%	16.47470	-17.38600	94.76%	64.15680	67.29300	95.34%
M1 [kN-m]	72.34120	74.04190	97.70%	-32.69300	35.28800	92.65%	120.97300	120.76590	100.17%	-22.42340	19.51380	114.91%	97.74180	99.61570	98.12%
X2 [kN]	-14.03460	-13.68400	102.56%	-144.98900	-151.11200	95.95%	-74.44010	-75.70200	98.33%	-64.15680	-67.29300	95.34%	-55.52530	-54.61400	101.67%
Y2 [kN]	-35.01140	28.88800	121.20%	57.96540	58.31600	99.40%	-80.83180	83.82000	96.43%	55.52530	54.61400	101.67%	-64.15680	67.29300	95.34%
M2 [kN-m]	32.69300	28.88800	113.17%	-99.09930	-98.60600	100.50%	121.52300	-130.69280	92.98%	-94.72860	-92.16870	102.78%	94.72860	-102.26260	92.63%

**Tabla 6-27.:** Resumen de las acciones internas de fuerzas bajo temperatura ambiente. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-C

De la tabla 6-27 se puede inferir que para miembros estructurales tipo vigas: el máximo axial se presenta en el elemento 7 con un valor de 144.989 kN en OpenSees y 151.112 kN en SAP2000; máximo cortante en el elemento 7 es de 57.965 kN en OpenSees y 58.316 kN en SAP2000; en cuanto a máximo momento a flexión también se encuentra en el elemento 7, 99.099 kN-m y 98.606 kN-m para OpenSees y SAP2000 respectivamente.

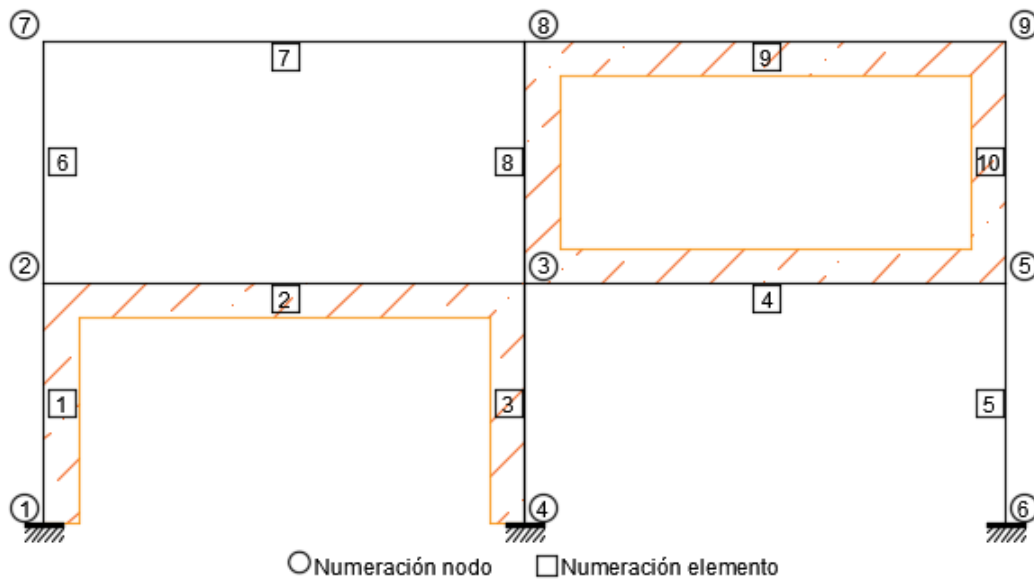
Por otro lado, para miembros estructurales tipo columna lo máximos valores de fuerzas internas se muestran así: axial en el elemento 3, 147.252 kN y 148.584 kN para OpenSees y SAP2000 respectivamente; cortante en el elemento 8, 80.831 kN en OpenSees y 83.82 kN en SAP2000; momento a flexión en el elemento 3, 205.918 kN-m en OpenSees y 205.269 kN-m en SAP2000.

*Nota: Por claridad, el nuevo caso se presenta al inicio de la siguiente página.*

### 6.1.11. CASO CE-C: CA-E/EF-M/EEF-A

#### Modelo

El modelo consiste en un pórtico de dos naves por dos pisos (CE-C), como se muestra en la figura 6-13, con condición de apoyo empotrada (CA-E), modelado bajo efecto del fuego en forma de afectación al material (EF-M) y expuesto a una condición de fuego alternada (EEF-A).



**Figura 6-14.:** Pórtico de dos naves y dos pisos afectando el módulo de elasticidad alternadamente. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-A

Para este caso, se está exponiendo dos compartimientos o naves pero de manera alternada, no consecutiva. La estructura al no tener una continuidad con las características de sus elementos experimenta un aumento en los desplazamientos de los nodos.

Siguiendo con la disposición de los resultados en los casos anteriores, se presentan los datos consolidados en un única tabla para cada una de las exposiciones de fuego con alteración al módulo de elasticidad. De igual manera, se conserva el color de los encabezados de las tablas.

La amplitud en los resultados corresponde a que es la configuración estructural más grande estudiada en este trabajo, por lo tanto es importante considerar el comportamiento de la estructura a través de los resultados obtenidos para cada uno de los nudo.

#### Desplazamientos

Los desplazamiento para cada una de la variación de temperatura se muestra a continuación:

$\delta$ [m]	Desplazamientos cuando E=2.00E+08 kPa y T=20 °C			Desplazamientos cuando E=1.56E+08 kPa y T=316 °C			Desplazamientos cuando E=9.80E+07 kPa y T=538 °C			Desplazamientos cuando E=4.40E+07 kPa y T=649 °C		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
U2	6.8480 E-03	9.2230 E-03	74.25%	8.1559 E-03	1.1076 E-02	73.64%	1.1260 E-02	1.5148 E-02	74.33%	1.7866 E-02	2.3994 E-02	74.46%
V2	-2.8140 E-05	-3.5000 E-05	80.40%	-3.3425 E-05	-4.2000 E-05	79.58%	-4.6426 E-05	-5.8000 E-05	80.04%	-7.7454 E-05	-9.7000 E-05	79.85%
02	-3.8133 E-03	4.8760 E-03	78.21%	-4.6058 E-03	5.9580 E-03	77.30%	-6.4847 E-03	8.4070 E-03	77.13%	-1.0578 E-02	1.4003 E-02	75.54%
U3	6.9047 E-03	9.2830 E-03	74.38%	8.1609 E-03	1.1061 E-02	73.78%	1.1119 E-02	1.4897 E-02	74.64%	1.7088 E-02	2.2837 E-02	74.83%
V3	-1.3892 E-04	-1.7500 E-04	79.38%	-1.8484 E-04	-2.3200 E-04	79.67%	-3.1166 E-04	-3.9200 E-04	79.51%	-7.6161 E-04	-9.5600 E-04	79.67%
03	-3.4781 E-03	4.4120 E-03	78.83%	-4.1384 E-03	5.2920 E-03	78.20%	-5.7449 E-03	7.2920 E-03	78.78%	-9.4362 E-03	1.2057 E-02	78.26%
U5	6.8878 E-03	9.2880 E-03	74.16%	8.0292 E-03	1.0932 E-02	73.45%	1.0632 E-02	1.4274 E-02	74.49%	1.4994 E-02	1.9986 E-02	75.02%
V5	-1.0464 E-04	-1.2900 E-04	81.12%	-9.8494 E-05	-1.2600 E-04	78.17%	-9.6235 E-05	-1.1900 E-04	80.87%	-8.7105 E-05	-1.0800 E-04	80.65%
05	-3.4736 E-03	4.4070 E-03	78.82%	-4.0605 E-03	5.1890 E-03	78.25%	-5.4107 E-03	6.8030 E-03	79.53%	-7.7242 E-03	9.6240 E-03	80.26%
U7	2.0151 E-02	2.6931 E-02	74.83%	2.3566 E-02	3.1804 E-02	74.10%	3.1838 E-02	4.2574 E-02	74.78%	4.9414 E-02	6.6628 E-02	74.16%
V7	-4.1380 E-05	-5.1000 E-05	81.14%	-4.3063 E-05	-5.4000 E-05	79.75%	-5.0845 E-05	-6.3000 E-05	80.71%	-7.1970 E-05	-9.0000 E-05	79.97%
07	-4.4731 E-03	6.1530 E-03	72.70%	-5.0494 E-03	7.0030 E-03	72.10%	-6.5258 E-03	8.8890 E-03	73.41%	-9.6503 E-03	1.3248 E-02	72.84%
U8	1.9343 E-02	2.5585 E-02	75.60%	2.2799 E-02	3.0438 E-02	74.90%	3.1072 E-02	4.1105 E-02	75.59%	4.8680 E-02	6.4652 E-02	75.30%
V8	-2.0914 E-04	-2.6400 E-04	79.22%	-2.8138 E-04	-3.5400 E-04	79.49%	-4.8230 E-04	-6.0700 E-04	79.46%	-1.2082 E-03	-1.5160 E-03	79.69%
08	-3.4689 E-03	4.2050 E-03	82.50%	-3.9105 E-03	4.7780 E-03	81.84%	-4.8612 E-03	5.7510 E-03	84.53%	-5.7403 E-03	6.4060 E-03	89.61%
U9	1.8985 E-02	2.5138 E-02	75.52%	2.2359 E-02	2.9919 E-02	74.73%	3.0411 E-02	4.0438 E-02	75.20%	4.7314 E-02	6.3650 E-02	74.33%
V9	-1.5702 E-04	-1.9400 E-04	80.94%	-1.6340 E-04	-2.0600 E-04	79.32%	-1.9382 E-04	-2.3900 E-04	81.10%	-2.8298 E-04	-3.5000 E-04	80.85%
09	-3.5237 E-03	4.3520 E-03	80.97%	-4.1793 E-03	5.2170 E-03	80.11%	-5.8026 E-03	7.2190 E-03	80.38%	-9.7454 E-03	1.2249 E-02	79.56%
U1	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
V1	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
01	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
U4	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
V4	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
04	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
U6	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
V6	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
06	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%

**Tabla 6-28.:** Resumen de los desplazamientos en los nudos bajo temperaturas de 20°C, 316°C, 538°C y 649°C. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-A

De la tabla **6-28** se obtiene que el máximo aumento de desplazamiento se da cuando se alcanza una temperatura de 649°C y se presenta en el nodo 8. Este movimiento está referido a un desplazamiento vertical. Considerando los resultados en OpenSees se tiene que: a temperatura ambiente el resultado es 2.0914E-04 m; a 316°C es de 2.8138E-04 m con un incremento del 34.54%; a 538°C el aumento respecto a condición iniciales es de 130.61% y es de 4.823E-04 m; y finalmente cuando la temperatura es de 649°C en el nudo se presenta un desplazamiento vertical de 1.2082E-03 m que comparado con las condiciones iniciales aumenta 477.67%.

Respecto a los resultados en SAP2000, del nudo 8 para desplazamiento vertical, se tiene los siguientes valores y porcentajes de aumento en relación con la condición inicial: a temperatura ambiente el resultado es 2.64E-04 m; a 316°C es de 3.54E-04 m con un incremento del 34.09%; a 538°C el aumento respecto a condición inicial es de 190.23% y es de 6.07E-04 m; y finalmente cuando la temperatura es de 649°C en el nudo se presenta un desplazamiento vertical de 1.516E-03 m que comparado con las condiciones iniciales aumenta 624.86%.

Los porcentajes absolutos de similitud de los resultados en los dos programas oscilan entre 72.10% y 89.61%, siguen siendo los resultados de OpenSees aceptables en relación con



los resultados de SAP2000.

**Acciones internas de fuerza**

Como se está evaluando la condición estructural cuando se expone a condiciones de fuego con afectación al módulo de elasticidad de manera alternada, en este caso con el cambio de temperatura sí se evidencia cambios en los resultados de acciones de fuerzas internas.

Acciones internas de fuerzas cuando E=2.00E+08 kPa y T=20 °C															
Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
F															
X1 [kN]	29.82850	-29.63900	100.64%	-10.18020	18.51300	54.99%	147.25200	-148.58400	99.10%	3.04274	6.81580	44.64%	110.92000	-109.77700	101.04%
Y1 [kN]	45.19160	47.40100	95.34%	15.79390	-15.95500	98.99%	67.60890	66.15100	102.20%	16.60540	-16.83700	98.62%	67.19950	66.44800	101.13%
M1 [kN-m]	182.36400	188.29840	96.85%	-25.55190	25.16900	101.52%	205.91800	205.26970	100.32%	-22.19630	21.49940	103.24%	205.16900	205.60660	99.79%
X2 [kN]	-29.82850	-29.63900	100.64%	10.18020	18.51300	54.99%	-147.25200	-148.58400	99.10%	-3.04274	6.81580	44.64%	-110.92000	-109.77700	101.04%
Y2 [kN]	-45.19160	47.40100	95.34%	56.20610	56.04500	100.29%	-67.60890	66.15100	102.20%	55.39460	55.16300	100.42%	-67.19950	66.44800	101.13%
M2 [kN-m]	-46.78930	46.09590	101.50%	-95.68460	-95.10100	100.61%	-3.09180	6.81580	45.36%	-94.17120	-93.47940	100.74%	-3.57059	6.26300	57.01%
Ele	Elemento 6			Elemento 7			Elemento 8			Elemento 9			Elemento 10		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
F															
X1 [kN]	14.03460	-13.68400	102.56%	144.98900	-151.11200	95.95%	74.44010	-75.70200	98.33%	64.15680	-67.29300	95.34%	55.52530	-54.61400	101.67%
Y1 [kN]	35.01140	28.88800	121.20%	14.03460	-13.68400	102.56%	80.83180	83.82000	96.43%	16.47470	-17.38600	94.76%	64.15680	67.29300	95.34%
M1 [kN-m]	72.34120	74.04190	97.70%	-32.69300	35.28800	92.65%	120.97300	120.76590	100.17%	-22.42340	19.51380	114.91%	97.74180	99.61570	98.12%
X2 [kN]	-14.03460	-13.68400	102.56%	-144.98900	-151.11200	95.95%	-74.44010	-75.70200	98.33%	-64.15680	-67.29300	95.34%	-55.52530	-54.61400	101.67%
Y2 [kN]	-35.01140	28.88800	121.20%	57.96540	58.31600	99.40%	-80.83180	83.82000	96.43%	55.52530	54.61400	101.67%	-64.15680	67.29300	95.34%
M2 [kN-m]	32.69300	28.88800	113.17%	-99.09930	-98.60600	100.50%	121.52300	-130.69280	92.98%	-94.72860	-92.16870	102.78%	94.72860	-102.26260	92.63%

**Tabla 6-29.:** Resumen de acciones internas de fuerzas bajo temperatura ambiente. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-A

Tomando el miembro estructural tipo viga, como por ejemplo el elemento 9, se puede apreciar que el momento de flexión es de 94.7286 kN-m en OpenSees y de 92.1687 kN-m en SAP2000, con un porcentaje absoluto de similitud de 102.78%.

Acciones internas de fuerzas cuando E=1.56E+08 kPa y T=316 °C															
Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
F															
X1 [kN]	27.63540	-27.73200	99.65%	-0.69137	9.49200	7.28%	152.82900	-153.47900	99.58%	18.42170	8.54040	215.70%	107.53600	-106.78900	100.70%
Y1 [kN]	38.97610	41.40400	94.14%	17.11240	-17.07100	100.24%	61.03470	60.45500	100.96%	18.12490	-18.20600	99.55%	79.98920	78.14100	102.37%
M1 [kN-m]	166.40600	173.81850	95.74%	-21.67810	21.94400	98.79%	188.54200	189.90530	99.28%	-17.79480	17.56130	101.33%	245.64700	241.93700	101.53%
X2 [kN]	-27.63540	-27.73200	99.65%	0.69137	9.49200	7.28%	-152.82900	-153.47900	99.58%	-18.42170	8.54040	215.70%	-107.53600	-106.78900	100.70%
Y2 [kN]	-38.97610	41.40400	94.14%	54.88760	54.92900	99.92%	-61.03470	60.45500	100.96%	53.87510	53.79400	100.15%	-79.98920	78.14100	102.37%
M2 [kN-m]	-49.47790	49.60620	99.74%	-91.64750	-91.62850	100.02%	-5.43794	8.54040	63.67%	-89.45600	-89.20220	100.28%	-5.67963	7.51420	75.59%
Ele	Elemento 6			Elemento 7			Elemento 8			Elemento 9			Elemento 10		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
F															
X1 [kN]	10.52300	-10.66100	98.71%	141.71500	-148.08800	95.70%	79.81600	-80.34400	99.34%	61.56750	-65.39600	94.15%	53.66100	-52.99500	101.26%
Y1 [kN]	38.28480	31.91200	119.97%	10.52300	-10.66100	98.71%	80.14780	82.69300	96.92%	18.33900	-19.00500	96.50%	61.56750	65.39600	94.15%
M1 [kN-m]	71.15600	72.97410	97.51%	-43.69830	44.97430	97.16%	114.88000	114.39450	100.42%	-16.39910	14.22120	115.31%	95.13560	98.62810	96.46%
X2 [kN]	-10.52300	-10.66100	98.71%	-141.71500	-148.08800	95.70%	-79.81600	-80.34400	99.34%	-61.56750	-65.39600	94.15%	-53.66100	-52.99500	101.26%
Y2 [kN]	-38.28480	31.91200	119.97%	61.47700	61.33900	100.22%	-80.14780	82.69300	96.92%	53.66100	52.99500	101.26%	-61.56750	65.39600	94.15%
M2 [kN-m]	43.69830	31.91200	136.93%	-109.16400	-107.05840	101.97%	125.56300	-133.68360	93.93%	-89.56680	-87.74940	102.07%	89.56680	-97.55870	91.81%

**Tabla 6-30.:** Resumen de acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 316°C. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-A

Cuando la temperatura alcanza los 316°C los momentos de flexión para el elemento 9 son 89.5668 kN-m y 87.7494 kN-m, presentando un disminución respecto a la condición inicial de 5.45 % y 4.79 % para OpenSees y SAP2000 respectivamente.

Acciones internas de fuerzas cuando E=9.80E+07 kPa y T=538 °C															
Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
F															
X1 [kN]	24.11360	-24.06700	100.19%	12.44910	-5.93000	209.93%	161.87800	-162.93800	99.35%	42.73090	13.68790	312.18%	102.00900	-100.99500	101.00%
Y1 [kN]	30.09600	30.85900	97.53%	19.42950	-19.43100	99.99%	49.09930	48.13500	102.00%	20.67660	-20.92100	98.83%	100.80500	101.00600	99.80%
M1 [kN-m]	140.61800	145.30950	96.77%	-14.72120	14.92420	98.64%	158.23100	158.09320	100.09%	-10.42620	9.77140	106.70%	313.78100	315.03100	99.60%
X2 [kN]	-24.11360	-24.06700	100.19%	-12.44910	-5.93000	209.93%	-161.87800	-162.93800	99.35%	-42.73090	13.68790	312.18%	-102.00900	-100.99500	101.00%
Y2 [kN]	-30.09600	30.85900	97.53%	52.57050	52.56900	100.00%	-49.09930	48.13500	102.00%	51.32340	51.07900	100.48%	-100.80500	101.00600	99.80%
M2 [kN-m]	-50.32980	52.73190	95.44%	-84.70180	-84.48990	100.25%	-10.93270	13.68790	79.87%	-81.51390	-80.70260	101.01%	-11.36670	12.01380	94.61%
F															
Ele	Elemento 6			Elemento 7			Elemento 8			Elemento 9			Elemento 10		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
X1 [kN]	4.68407	-4.63600	101.04%	137.45500	-143.21000	95.98%	88.63060	-89.44800	99.09%	58.07380	-62.40600	93.06%	50.68530	-49.91600	101.54%
Y1 [kN]	42.54510	36.79000	115.64%	4.68407	-4.63600	101.04%	79.38110	80.80400	98.24%	21.31470	-22.08400	96.52%	58.07380	62.40600	93.06%
M1 [kN-m]	65.05100	66.76660	97.43%	-62.58420	65.08390	96.16%	106.06100	103.04880	102.92%	-6.77117	4.14530	163.35%	92.88060	98.50640	94.29%
X2 [kN]	-4.68407	-4.63600	101.04%	-137.45500	-143.21000	95.98%	-88.63060	-89.44800	99.09%	-58.07380	-62.40600	93.06%	-50.68530	-49.91600	101.54%
Y2 [kN]	-42.54510	36.79000	115.64%	67.31590	67.36400	99.93%	-79.38110	80.80400	98.24%	50.68530	49.91600	101.54%	-58.07380	62.40600	93.06%
M2 [kN-m]	62.58420	36.79000	170.11%	-125.31100	-123.09820	101.80%	132.08300	-139.36410	94.78%	-81.34090	-79.35090	102.51%	81.34090	-88.71180	91.69%

**Tabla 6-31.:** Resumen de acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 538°C. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-A

Cuando la temperatura alcanza los 538°C los momentos de flexión para el elemento 9 son 81.3409 kN-m y 79.3509 kN-m, presentando un disminución respecto a la condición inicial de 14.13 % y 13.91 % para OpenSees y SAP2000 respectivamente.

Acciones internas de fuerzas cuando E=4.40E+07 kPa y T=649 °C															
Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
X1 [kN]	18.06230	-18.09700	99.81%	30.68460	-27.31200	112.35%	177.60600	-178.33300	99.59%	82.62400	24.84640	332.54%	92.33140	-91.57100	100.83%
Y1 [kN]	17.61650	16.32700	107.90%	23.87550	-23.70000	100.74%	25.85980	25.94300	99.68%	25.34680	-25.51800	99.33%	136.52400	137.73000	99.12%
M1 [kN-m]	96.34930	98.53970	97.78%	-1.07330	1.85400	57.89%	101.16500	102.67510	98.53%	2.99145	-3.36090	89.01%	436.87100	437.94180	99.76%
X2 [kN]	-18.06230	-18.09700	99.81%	-30.68460	-27.31200	112.35%	-177.60600	-178.33300	99.59%	-82.62400	24.84640	332.54%	-92.33140	-91.57100	100.83%
Y2 [kN]	-17.61650	16.32700	107.90%	48.12450	48.30000	99.64%	-25.85980	25.94300	99.68%	46.65320	46.48200	100.37%	-136.52400	137.73000	99.12%
M2 [kN-m]	-43.49980	49.55840	87.77%	-71.67370	-71.94660	99.62%	-23.58590	24.84640	94.93%	-66.91040	-66.25400	100.99%	-27.30010	24.75170	110.30%
F															
Ele	Elemento 6			Elemento 7			Elemento 8			Elemento 9			Elemento 10		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
X1 [kN]	-5.81317	5.60300	103.75%	131.69900	-136.36100	96.58%	104.13500	-104.51500	99.64%	53.89980	-59.26500	90.95%	45.67820	-45.08800	101.31%
Y1 [kN]	48.30110	43.63900	110.68%	-5.81317	5.60300	103.75%	77.79910	77.09600	100.91%	26.32180	-26.91200	97.81%	53.89980	59.26500	90.95%
M1 [kN-m]	44.57310	47.31570	94.20%	-100.33000	104.05570	96.42%	92.26810	85.75910	107.59%	9.41961	-11.59940	81.21%	94.21050	102.77550	91.67%
X2 [kN]	5.81317	5.60300	103.75%	-131.69900	-136.36100	96.58%	-104.13500	-104.51500	99.64%	-53.89980	-59.26500	90.95%	-45.67820	-45.08800	101.31%
Y2 [kN]	-48.30110	43.63900	110.68%	77.81320	77.60300	100.27%	-77.79910	77.09600	100.91%	45.67820	45.08800	101.31%	-53.89980	59.26500	90.95%
M2 [kN-m]	100.33000	43.63900	229.91%	-150.54900	-145.56420	103.42%	141.12900	-145.52920	96.98%	-67.48880	-66.12930	102.06%	67.48880	-75.01900	89.96%

**Tabla 6-32.:** Resumen de acciones internas de fuerzas bajo una temperatura de 649°C. Caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-A

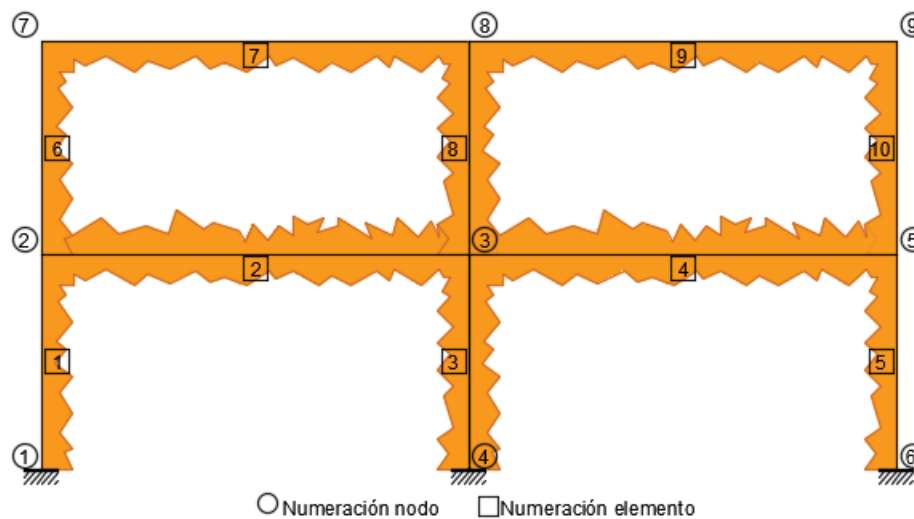
Cuando la temperatura alcanza los 538°C los momentos de flexión para el elemento 9 son 67.4888 kN-m y 66.1293 kN-m, presentando un disminución respecto a la condición inicial de 28.75 % y 28.25 % para OpenSees y SAP2000 respectivamente, lo que representa este elemento es la disminución de capacidad de resistir momento a flexión.

*Nota: Por claridad, el nuevo caso se presenta al inicio de la siguiente página.*

### 6.1.12. CASO CE-C: CA-E/EF-S/EEF-C

#### Modelo

El modelo consiste en un pórtico de dos naves por dos pisos (CE-C), como se muestra en la figura 6-15, con condición de apoyo empotrada (CA-E), modelado bajo efecto del fuego en forma de afectación a la sección transversal (EF-S) y expuesto a una condición de fuego completa (EEF-C).



**Figura 6-15.:** Pórtico de dos naves y dos pisos afectando la sección transversal. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-C

#### Desplazamientos

Los resultados de desplazamiento de la tabla 6-33 corresponde a la condición original en paralelo con la condición modificada.

Tomando los resultados de los desplazamiento horizontal en el nodo 7 en condición normal se tiene un valor de 2.0151E-02 m en OpenSees y 2.6931E-02 en SAP2000, con un porcentaje absoluto de similitud de 74.83 %.

Para el nodo 7, cuando se ha afectado la sección transversal, se registran los siguientes datos 2.2225E-02 m en OpenSees y 2.9512E-02 m en SAP2000, con un porcentaje absoluto de similitud de 75.31 %. Con relación a las condiciones normales, es decir, sin afectar las secciones trasversales, el nodo 7 presenta un incremento de los desplazamientos horizontales de 10.29 % para los resultados de OpenSees y 9.58 % para SAP2000.

$\delta$ [m]	Desplazamientos sin modificar la sección			Desplazamientos modificando la sección		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
U2	6.8480.E-03	9.2230.E-03	74.25%	7.6111.E-03	1.0165.E-02	74.88%
V2	-2.8140.E-05	-3.5000.E-05	80.40%	-2.9941.E-05	-3.7000.E-05	80.92%
$\theta$ 2	-3.8133.E-03	4.8760.E-03	78.21%	-4.2230.E-03	5.3800.E-03	78.49%
U3	6.9047.E-03	9.2830.E-03	74.38%	7.6824.E-03	1.0239.E-02	75.03%
V3	-1.3892.E-04	-1.7500.E-04	79.38%	-1.6234.E-04	-2.0400.E-04	79.58%
$\theta$ 3	-3.4781.E-03	4.4120.E-03	78.83%	-3.8442.E-03	4.8830.E-03	78.73%
U5	6.8878.E-03	9.2880.E-03	74.16%	7.6581.E-03	1.0240.E-02	74.79%
V5	-1.0464.E-04	-1.2900.E-04	81.12%	-1.1278.E-04	-1.4000.E-04	80.56%
$\theta$ 5	-3.4736.E-03	4.4070.E-03	78.82%	-3.8597.E-03	4.8900.E-03	78.93%
U7	2.0151.E-02	2.6931.E-02	74.83%	2.2225.E-02	2.9512.E-02	75.31%
V7	-4.1380.E-05	-5.1000.E-05	81.14%	-4.3640.E-05	-5.4000.E-05	80.82%
$\theta$ 7	-4.4731.E-03	6.1530.E-03	72.70%	-4.8816.E-03	6.6780.E-03	73.10%
U8	1.9343.E-02	2.5585.E-02	75.60%	2.1385.E-02	2.8105.E-02	76.09%
V8	-2.0914.E-04	-2.6400.E-04	79.22%	-2.4443.E-04	-3.0800.E-04	79.36%
$\theta$ 8	-3.4689.E-03	4.2050.E-03	82.50%	-3.7029.E-03	4.4860.E-03	82.54%
U9	1.8985.E-02	2.5138.E-02	75.52%	2.1010.E-02	2.7657.E-02	75.97%
V9	-1.5702.E-04	-1.9400.E-04	80.94%	-1.6959.E-04	-2.1000.E-04	80.76%
$\theta$ 9	-3.5237.E-03	4.3520.E-03	80.97%	-3.8685.E-03	4.7860.E-03	80.83%
U1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
$\theta$ 1	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
U4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
$\theta$ 4	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
U6	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
V6	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%
$\theta$ 6	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%	0.0000.E+00	0.0000.E+00	100%

Tabla 6-33.: Resumen de desplazamientos en los nudos sin y con afectación de la sección transversal. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-C

### Acciones internas de fuerza

Los resultado de las acciones internas de fuerzas se presentan para condición normal, tabla 6-34, y para condición de exposición del fuego afectando a la sección transversal, tabla 6-35.

Acciones internas de fuerzas sin afectar la sección															
Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
F															
X1 [kN]	29.82850	-29.63900	100.64%	-10.18020	18.51300	54.99%	147.25200	-148.58400	99.10%	3.04274	6.81580	44.64%	110.92000	-109.77700	101.04%
Y1 [kN]	45.19160	47.40100	95.34%	15.79390	-15.95500	98.99%	67.60890	66.15100	102.20%	16.60540	-16.83700	98.62%	67.19950	66.44800	101.13%
M1 [kN-m]	182.36400	188.29840	96.85%	-25.55190	25.16900	101.52%	205.91800	205.26970	100.32%	-22.19630	21.49940	103.24%	205.16900	205.60660	99.79%
X2 [kN]	-29.82850	-29.63900	100.64%	10.18020	18.51300	54.99%	-147.25200	-148.58400	99.10%	-3.04274	6.81580	44.64%	-110.92000	-109.77700	101.04%
Y2 [kN]	-45.19160	47.40100	95.34%	56.20610	56.04500	100.29%	-67.60890	66.15100	102.20%	55.39460	55.16300	100.42%	-67.19950	66.44800	101.13%
M2 [kN-m]	-46.78930	46.09590	101.50%	-95.68460	-95.10100	100.61%	-3.09180	6.81580	45.36%	-94.17120	-93.47940	100.74%	-3.57059	6.26300	57.01%
Ele	Elemento 6			Elemento 7			Elemento 8			Elemento 9			Elemento 10		
	OpenSees	SAP2001	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2001	Similitud	OpenSees	SAP2002	Similitud
F															
X1 [kN]	14.03460	-13.68400	102.56%	144.98900	-151.11200	95.95%	74.44010	-75.70200	98.33%	64.15680	-67.29300	95.34%	55.52530	-54.61400	101.67%
Y1 [kN]	35.01140	28.88800	121.20%	14.03460	-13.68400	102.56%	80.83180	83.82000	96.43%	16.47470	-17.38600	94.76%	64.15680	67.29300	95.34%
M1 [kN-m]	72.34120	74.04190	97.70%	-32.69300	35.28800	92.65%	120.97300	120.76590	100.17%	-22.42340	19.51380	114.91%	97.74180	99.61570	98.12%
X2 [kN]	-14.03460	-13.68400	102.56%	-144.98900	-151.11200	95.95%	-74.44010	-75.70200	98.33%	-64.15680	-67.29300	95.34%	-55.52530	-54.61400	101.67%
Y2 [kN]	-35.01140	28.88800	121.20%	57.96540	58.31600	99.40%	-80.83180	83.82000	96.43%	55.52530	54.61400	101.67%	-64.15680	67.29300	95.34%
M2 [kN-m]	32.69300	28.88800	113.17%	-99.09930	-98.60600	100.50%	121.52300	-130.69280	92.98%	-94.72860	-92.16870	102.78%	94.72860	-102.26260	92.63%

Tabla 6-34.: Resumen de acciones internas de fuerzas en condición normal. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-C

Para un miembro estructural tipo viga en condiciones normales, tomando solo los valores de OpenSees se presentan los siguientes resultados en el elemento 3: fuerza axial de 147.252 kN, fuerza cortante de 67.6089 kN y momento de flexión de 205.918 kN-m.

Acciones internas de fuerzas modificando la sección transversal																
F	Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
		OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
X1 [kN]		29.54180	-29.34300	100.68%	-11.71060	19.49500	60.07%	147.18500	-148.45600	99.14%	3.99117	3.64950	109.36%	111.27300	-110.20100	100.97%
Y1 [kN]		46.83310	48.84600	95.88%	16.02530	-16.14800	99.24%	64.62000	63.43700	101.86%	16.77880	-16.95100	98.98%	68.54690	67.71700	101.23%
M1 [kN-m]		186.43800	191.68580	97.26%	-24.86700	24.54390	101.32%	194.16200	193.96040	100.10%	-21.62510	21.13410	102.32%	209.01300	209.21040	99.91%
X2 [kN]		-29.54180	-29.34300	100.68%	11.71060	19.49500	60.07%	-147.18500	-148.45600	99.14%	-3.99117	3.64950	109.36%	-111.27300	-110.20100	100.97%
Y2 [kN]		-46.83310	48.84600	95.88%	55.97470	55.85200	100.22%	-64.62000	63.43700	101.86%	55.22120	55.04900	100.31%	-68.54690	67.71700	101.23%
M2 [kN-m]		-45.93830	45.14890	101.75%	-94.98090	-94.56620	100.44%	-0.30237	3.64950	8.29%	-93.70230	-93.16040	100.58%	-3.37274	6.05830	55.67%
F	Ele	Elemento 6			Elemento 7			Elemento 8			Elemento 9			Elemento 10		
		OpenSees	SAP2001	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2001	Similitud	OpenSees	SAP2002	Similitud
X1 [kN]		13.51650	-13.19500	102.44%	144.87800	-150.64900	96.17%	74.43180	-75.65300	98.39%	64.55570	-67.67400	95.39%	56.05170	-55.15200	101.63%
Y1 [kN]		35.12240	29.35100	119.66%	13.51650	-13.19500	102.44%	80.32180	82.97500	96.80%	15.94830	-16.84800	94.66%	64.55570	67.67400	95.39%
M1 [kN-m]		70.80530	72.61700	97.51%	-34.56200	37.04550	93.30%	116.90800	116.41900	100.42%	-23.71790	20.82060	113.92%	97.07510	99.22520	97.83%
X2 [kN]		-13.51650	-13.19500	102.44%	-144.87800	-150.64900	96.17%	-74.43180	-75.65300	98.39%	-64.55570	-67.67400	95.39%	-56.05170	-55.15200	101.63%
Y2 [kN]		-35.12240	29.35100	119.66%	58.48350	58.80500	99.45%	-80.32180	82.97500	96.80%	56.05170	55.15200	101.63%	-64.55570	67.67400	95.39%
M2 [kN-m]		34.56200	29.35100	117.75%	-100.33900	-99.78380	100.56%	124.05700	-132.50730	93.62%	-96.59220	-94.08890	102.66%	96.59220	-103.79690	93.06%

**Tabla 6-35.:** Resumen de acciones internas de fuerzas afectando la sección transversal. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-C

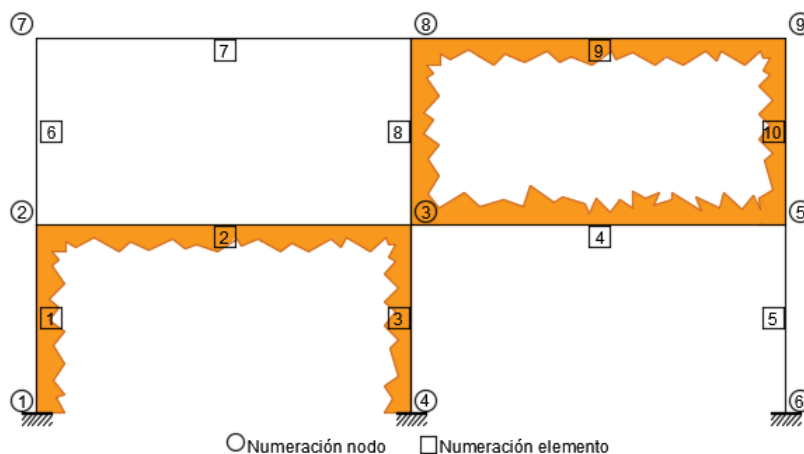
Para un miembro estructural tipo viga con afectación de la sección transversal, tomando solo los valores de OpenSees se presentan los siguientes resultados del elemento 3: fuerza axial de 147.185 kN, fuerza cortante de 64.62 kN y momento de flexión de 194.162 kN-m. De acuerdo con los resultados en condiciones normales la fuerza axial disminuye en 0.05 %, la fuerza cortante disminuye en un 4.42 % y el momento de flexión disminuye 5.70 %.

*Nota: Por claridad, el nuevo caso se presenta al inicio de la siguiente página.*

### 6.1.13. CASO CE-C: CA-E/EF-S/EEF-A

#### Modelo

El modelo consiste en un pórtico de dos naves por dos pisos (CE-C), como se muestra en la figura 6-15, con condición de apoyo empotrada (CA-E), modelado bajo efecto del fuego en forma de afectación a la sección transversal (EF-S) y expuesto a una condición de fuego alternada (EEF-A).



**Figura 6-16.:** Pórtico de dos naves y dos pisos afectando la sección transversal alternadamente. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-A

Como se puede ver en la figura 6-16 los compartimentos afectados por el efecto del fuego en forma de afectación a la sección transversal se determinan de manera alternada, o en forma de tablero de ajedrez, de este modo se puede observar el comportamiento de la estructura bajo acción de altas temperaturas en algunas de sus naves.

Los resultados se presentan tal cual como se ha venido realizando en cada uno de los casos tanto los obtenidos en OpenSees como los obtenidos en SAP2000.

#### Desplazamientos

Los resultados de desplazamientos se unifican en la tabla 6-36, donde se puede ver que el mayor desplazamiento se da verticalmente en el nodo 8 para condición normal, donde se tiene para OpenSees  $2.0914E-02$  m y para SAP2000  $2.64E-02$  m, el porcentaje de similitud de los resultados obtenidos en los dos programas es 79.22 %.

Cuando se afecta la sección transversal el nudo 8 presenta para OpenSees un desplazamiento vertical de  $2.2689E-02$  m y para SAP2000  $2.87E-02$ , con respecto a las condiciones normales presenta un aumento de 8.48 % y 8.71 % respectivamente.

$\delta$ [m]	Desplazamientos sin modificar la sección			Desplazamientos modificando la sección		
	Open Sees	SAP2000	Similitud	Open Sees	SAP2000	Similitud
U2	6.8480 E-03	9.2230 E-03	74.25%	7.2310 E-03	9.6820 E-03	74.68%
V2	-2.8140 E-05	-3.5000 E-05	80.40%	-2.9449 E-05	-3.7000 E-05	79.59%
02	-3.8133 E-03	4.8760 E-03	78.21%	-4.0353 E-03	5.1550 E-03	78.28%
U3	6.9047 E-03	9.2830 E-03	74.38%	7.2748 E-03	9.7250 E-03	74.80%
V3	-1.3892 E-04	-1.7500 E-04	79.38%	-1.5038 E-04	-1.9000 E-04	79.15%
03	-3.4781 E-03	4.4120 E-03	78.83%	-3.6533 E-03	4.6370 E-03	78.78%
U5	6.8878 E-03	9.2880 E-03	74.16%	7.2324 E-03	9.6970 E-03	74.58%
V5	-1.0464 E-04	-1.2900 E-04	81.12%	-1.0431 E-04	-1.2900 E-04	80.86%
05	-3.4736 E-03	4.4070 E-03	78.82%	-3.6411 E-03	4.6010 E-03	79.14%
U7	2.0151 E-02	2.6931 E-02	74.83%	2.1140 E-02	2.8109 E-02	75.21%
V7	-4.1380 E-05	-5.1000 E-05	81.14%	-4.1945 E-05	-5.2000 E-05	80.66%
07	-4.4731 E-03	6.1530 E-03	72.70%	-4.6439 E-03	6.3480 E-03	73.16%
U8	1.9343 E-02	2.5585 E-02	75.60%	2.0335 E-02	2.6763 E-02	75.98%
V8	-2.0914 E-04	-2.6400 E-04	79.22%	-2.2689 E-04	-2.8700 E-04	79.05%
08	-3.4689 E-03	4.2050 E-03	82.50%	-3.5872 E-03	4.3260 E-03	82.92%
U9	1.8985 E-02	2.5138 E-02	75.52%	1.9966 E-02	2.6312 E-02	75.88%
V9	-1.5702 E-04	-1.9400 E-04	80.94%	-1.6033 E-04	-1.9800 E-04	80.97%
09	-3.5237 E-03	4.3520 E-03	80.97%	-3.6912 E-03	4.5630 E-03	80.89%
U1	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
V1	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
01	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
U4	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
V4	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
04	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
U6	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
V6	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
06	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%

Tabla 6-36.: Resumen de desplazamientos en los nudos sin y con afectación de la sección transversal. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-A

**Acciones internas de fuerza**

Las acciones internas de fuerzas se presentan para condición sin modificar y modificando la sección transversal, manteniendo los colores de encabezado para el caso de sección transversal.

Acciones internas de fuerza sin modificar la sección															
Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	Open Sees	SAP2000	Similitud	Open Sees	SAP2000	Similitud	Open Sees	SAP2000	Similitud	Open Sees	SAP2000	Similitud	Open Sees	SAP2000	Similitud
F															
X1 [kN]	29.82850	-29.63900	100.64%	-10.18020	18.51300	54.99%	147.25200	-148.58400	99.10%	3.04274	6.81580	44.64%	110.92000	-109.77700	101.04%
Y1 [kN]	45.19160	47.40100	95.34%	15.79390	-15.95500	98.99%	67.60890	66.15100	102.20%	16.60540	-16.83700	98.62%	67.19950	66.44800	101.13%
M1 [kN-m]	182.36400	188.29840	96.85%	-25.55190	25.16900	101.52%	205.91800	205.26970	100.32%	-22.19630	21.49940	103.24%	205.16900	205.60660	99.79%
X2 [kN]	-29.82850	-29.63900	100.64%	10.18020	18.51300	54.99%	-147.25200	-148.58400	99.10%	-3.04274	6.81580	44.64%	-110.92000	-109.77700	101.04%
Y2 [kN]	-45.19160	47.40100	95.34%	56.20610	56.04500	100.29%	-67.60890	66.15100	102.20%	55.39460	55.16300	100.42%	-67.19950	66.44800	101.13%
M2 [kN-m]	-46.78930	46.09590	101.50%	-95.68460	-95.10100	100.61%	-3.09180	6.81580	45.36%	-94.17120	-93.47940	100.74%	-3.57059	6.26300	57.01%
Ele	Elemento 6			Elemento 7			Elemento 8			Elemento 9			Elemento 10		
	Open Sees	SAP2000	Similitud	Open Sees	SAP2000	Similitud	Open Sees	SAP2000	Similitud	Open Sees	SAP2000	Similitud	Open Sees	SAP2000	Similitud
F															
X1 [kN]	14.03460	-13.68400	102.56%	144.98900	-151.11200	95.95%	74.44010	-75.70200	98.33%	64.15680	-67.29300	95.34%	55.52530	-54.61400	101.67%
Y1 [kN]	35.01140	28.88800	121.20%	14.03460	-13.68400	102.56%	80.83180	83.82000	96.43%	16.47470	-17.38600	94.76%	64.15680	67.29300	95.34%
M1 [kN-m]	72.34120	74.04190	97.70%	-32.69300	35.28800	92.65%	120.97300	120.76590	100.17%	-22.42340	19.51380	114.91%	97.74180	99.61570	98.12%
X2 [kN]	-14.03460	-13.68400	102.56%	-144.98900	-151.11200	95.95%	-74.44010	-75.70200	98.33%	-64.15680	-67.29300	95.34%	-55.52530	-54.61400	101.67%
Y2 [kN]	-35.01140	28.88800	121.20%	57.96540	58.31600	99.40%	-80.83180	83.82000	96.43%	55.52530	54.61400	101.67%	-64.15680	67.29300	95.34%
M2 [kN-m]	32.69300	28.88800	113.17%	-99.09930	-98.60600	100.50%	121.52300	-130.69280	92.98%	-94.72860	-92.16870	102.78%	94.72860	-102.26260	92.63%

Tabla 6-37.: Resumen de las acciones internas de fuerza en condición normal. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-A

Respecto al miembro estructural tipo columna, elemento 6, se tiene para condición normal los siguientes resultados de OpenSees y SAP2000 respectivamente: fuerza axial de 14.0346 kN y 13.684 kN; fuerza cortante de 35.0114 kN y 28.888 kN, y momento de flexión de 72.3412 kN-m y 74.0419 kN-m.

Acciones internas de fuerzas modificando la sección															
F	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
X1 [kN]	29.05650	-28.81900	100.82%	-7.55171	16.06500	47.01%	148.37700	-149.76000	99.08%	7.29746	5.24370	139.17%	110.56600	-109.42100	101.05%
Y1 [kN]	43.21390	45.45500	95.07%	15.81110	-15.95100	99.12%	65.84460	64.54900	102.01%	16.70480	-16.93700	98.63%	70.94150	69.99600	101.35%
M1 [kN-m]	175.84600	181.64690	96.81%	-25.57510	25.24010	101.33%	199.28000	198.89060	100.20%	-21.91780	21.26420	103.07%	215.81500	215.84910	99.98%
X2 [kN]	-29.05650	-28.81900	100.82%	7.55171	16.06500	47.01%	-148.37700	-149.76000	99.08%	-7.29746	5.24370	139.17%	-110.56600	-109.42100	101.05%
Y2 [kN]	-43.21390	45.45500	95.07%	56.18890	56.04900	100.25%	-65.84460	64.54900	102.01%	55.29520	55.06300	100.42%	-70.94150	69.99600	101.35%
M2 [kN-m]	-46.20420	45.28280	102.03%	-95.55810	-95.05320	100.53%	-1.74647	5.24370	33.31%	-93.85360	-93.11390	100.79%	-2.99079	5.86020	51.04%
F	Elemento 6			Elemento 7			Elemento 8			Elemento 9			Elemento 10		
	OpenSees	SAP2001	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2001	Similitud	OpenSees	SAP2002	Similitud
X1 [kN]	13.24540	-12.86800	102.93%	144.33800	-150.61100	95.83%	75.48350	-76.77400	98.32%	63.64400	-66.87600	95.17%	55.27100	-54.35800	101.68%
Y1 [kN]	35.66220	29.38900	121.35%	13.24540	-12.86800	102.93%	80.69380	83.73500	96.37%	16.72900	-17.64200	94.82%	63.64400	66.87600	95.17%
M1 [kN-m]	71.77930	72.82750	98.56%	-35.20710	37.93180	92.82%	119.22200	118.76810	100.38%	-21.53850	18.57530	115.95%	96.84440	99.46250	97.37%
X2 [kN]	-13.24540	-12.86800	102.93%	-144.33800	-150.61100	95.83%	-75.48350	-76.77400	98.32%	-63.64400	-66.87600	95.17%	-55.27100	-54.35800	101.68%
Y2 [kN]	-35.66220	29.38900	121.35%	58.75460	59.13200	99.36%	-80.69380	83.73500	96.37%	55.27100	54.35800	101.68%	-63.64400	66.87600	95.17%
M2 [kN-m]	35.20710	29.38900	119.80%	-101.32000	-100.86210	100.45%	122.85900	-132.43550	92.77%	-94.08770	-91.57270	102.75%	94.08770	-101.16620	93.00%

**Tabla 6-38.:** Resumen de las acciones internas de fuerzas afectando la sección transversal. Caso CE-C: CA-E/EF-S/EEF-A

En condición modificada el elemento 6 presenta para OpenSees y SAP2000 respectivamente: fuerza axial 13.2454 kN y 12.868 con una reducción de 5.62% y 5.96%; fuerza cortante de 35.6622 kN y 29.389 kN con un aumento de 1.86% y 1.73%; y un momento a flexión de 71.7793 kN-m y 72.8275 kN-m, con una reducción de 0.78% y 1.64%.

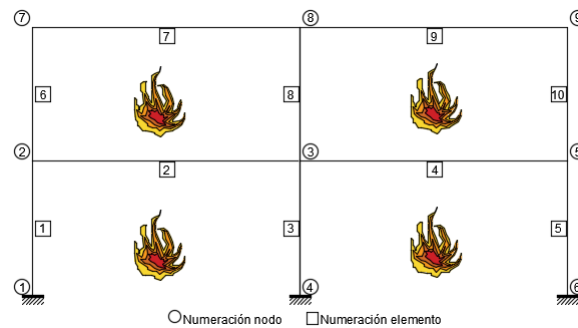
*Nota: Por claridad, el nuevo caso se presenta al inicio de la siguiente página.*



### 6.1.14. CASO CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-C

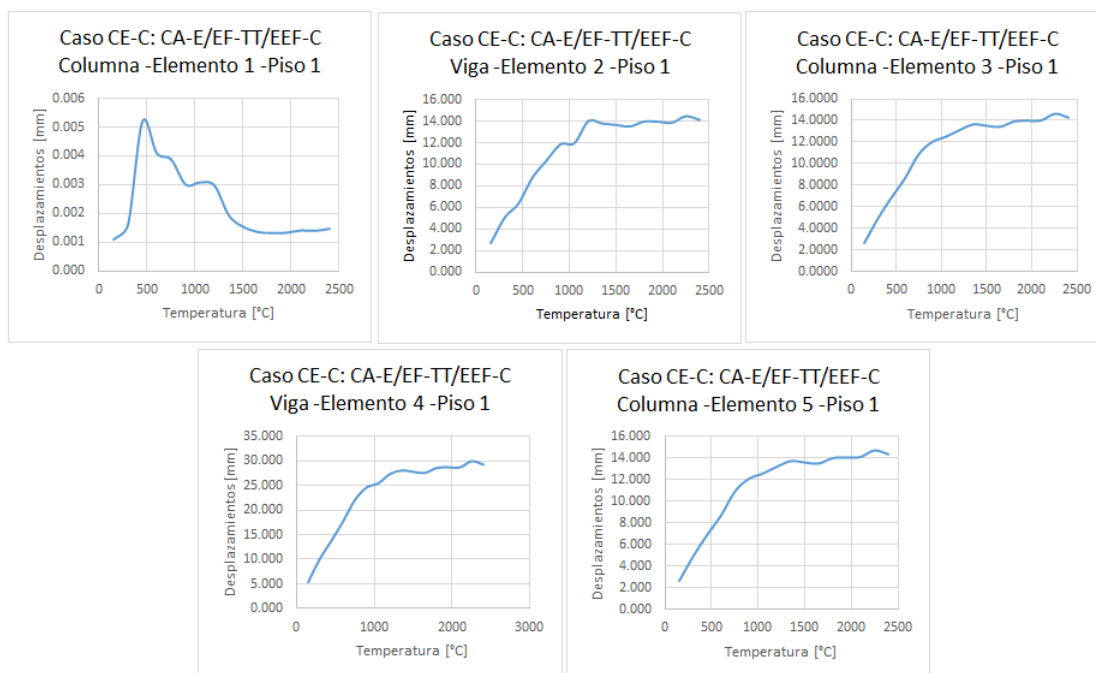
#### Modelo

El modelo consiste en un pórtico de dos naves por dos pisos (CE-C), como se muestra en la figura 6-17, con condición de apoyo empotrada (CA-E), modelado bajo efecto del fuego en forma directa con implementación de la curva de tiempo-temperatura (EF-TT) y expuesto a una condición de fuego completa (EEF-C).



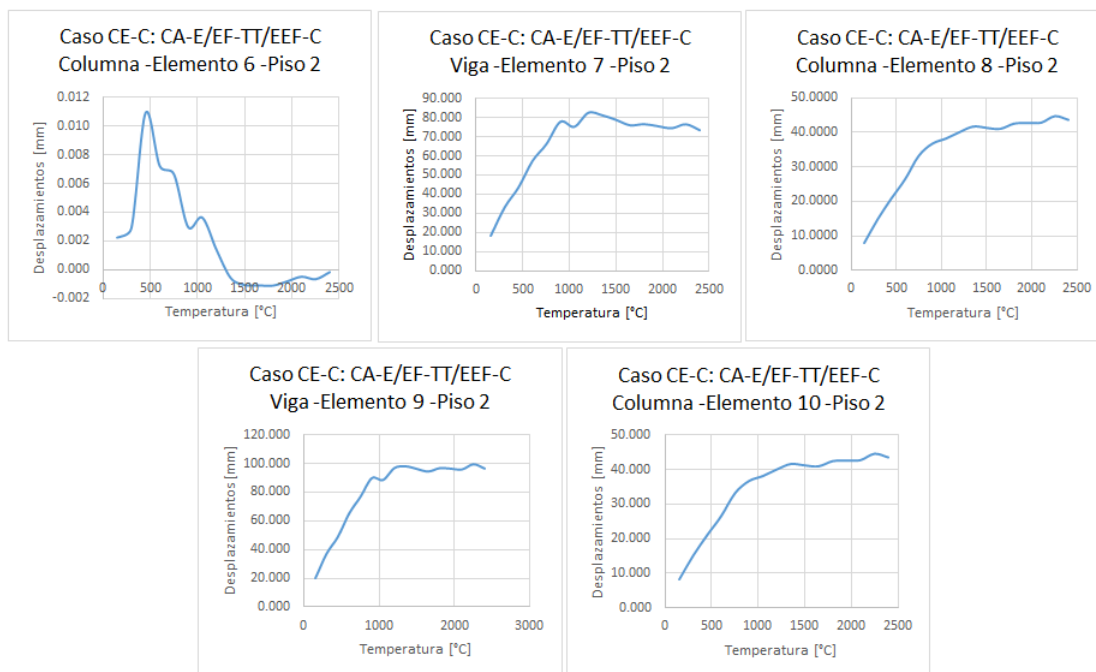
**Figura 6-17.:** Pórtico de dos naves y dos pisos bajo consideraciones directas de fuego. Caso CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-C

Los resultados se presentan en forma de gráficas temperatura versus desplazamientos.



**Figura 6-18.:** Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 1 a 5 del primer piso. Caso CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-C

De la figura 6-18 se puede inferir que la viga que alcanza un mayor desplazamiento de casi 30 mm cuando alcanza una temperatura de 2500°C es el elemento 2. En cuanto a columnas, los elementos 5 y 3 presentan un desplazamiento creciente hasta llegar a 14 mm, mientras que el elemento 1 después de 500°C presenta un comportamiento decreciente con altos y bajos.



**Figura 6-19.:** Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 6 a 10 del segundo piso.  
Caso CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-C

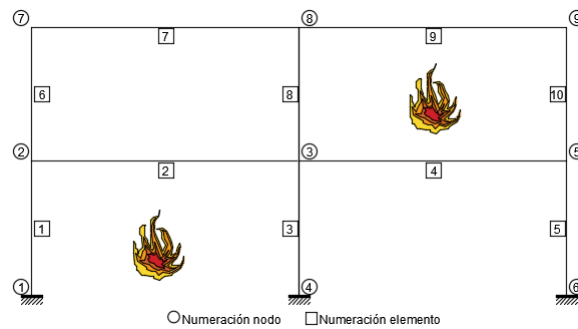
En el segundo piso, figura 6-19, a una temperatura de 2400°C alcanzan los 80 mm en el elemento 7 y 100 mm en el elemento 9. Las columnas al igual que en el primer piso, elemento 8 y 10, presentan un desplazamiento creciente hasta llegar a los 45 mm, mientras que el elemento 6 hasta los 500°C alcanza 0.010 mm y a partir de ahí comienza a decrecer.

*Nota: Por claridad, el nuevo caso se presenta al inicio de la siguiente página.*

### 6.1.15. CASO CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-A

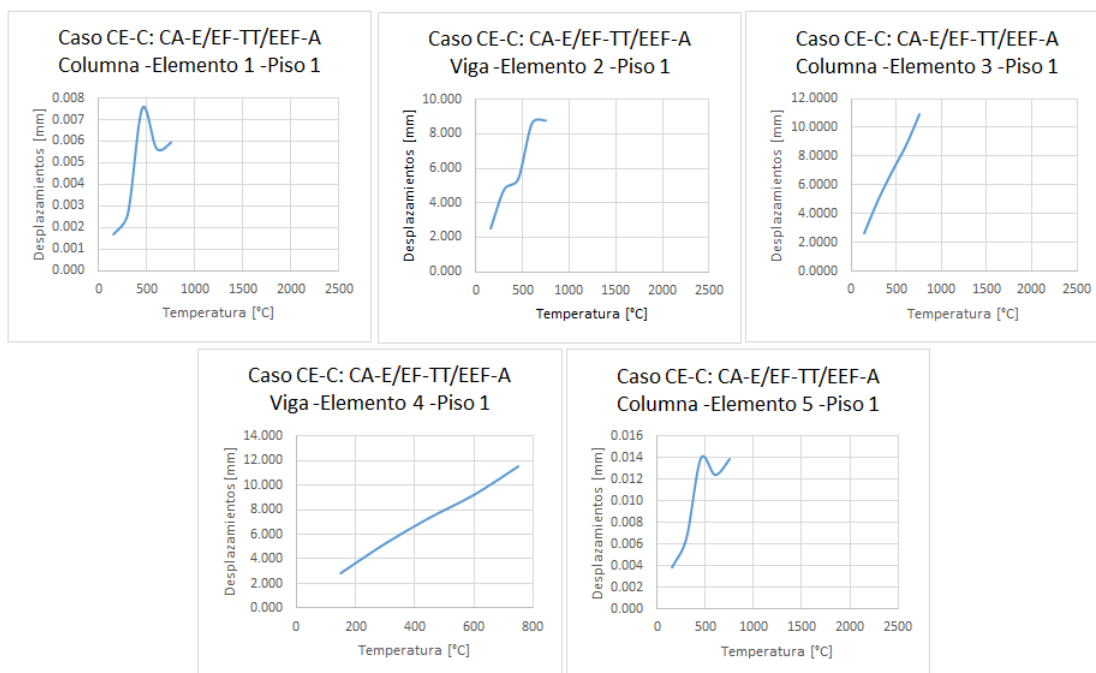
#### Modelo

El modelo consiste en un pórtico de dos naves por dos pisos (CE-C), como se muestra en la figura 6-20, con condición de apoyo empotrada (CA-E), modelado bajo efecto del fuego en forma directa con implementación de la curva de tiempo-temperatura (EF-TT) y expuesto a una condición de fuego alternada (EEF-A).



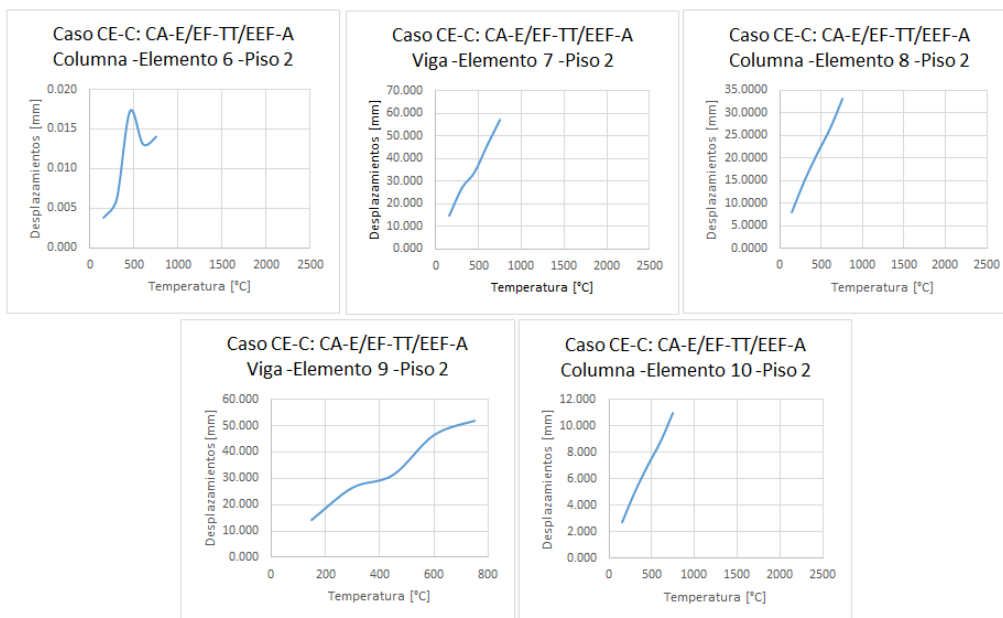
**Figura 6-20.:** Pórtico de dos naves y dos pisos bajo consideraciones directas de fuego alternadamente. Caso CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-A

Los resultados se presentan en forma de gráficas temperatura versus desplazamientos.



**Figura 6-21.:** Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 1 a 5 del primer piso. Caso CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-A

La figura 6-21 muestra un comportamiento creciente en los desplazamiento en la medida que se aumenta la temperatura hasta 700°C, donde se puede apreciar que el mayor desplazamiento lo presenta el miembro estructural tipo viga, elemento 4, alcanzando los 12 mm.



**Figura 6-22.:** Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 6 a 10 del segundo piso.  
Caso CE-C: CA-E/EF-TT/EEF-A

En el segundo piso, así como lo muestra la figura 6-22, los desplazamientos son mayores y los alcanza el elemento 7 llegando a los 58 mm.

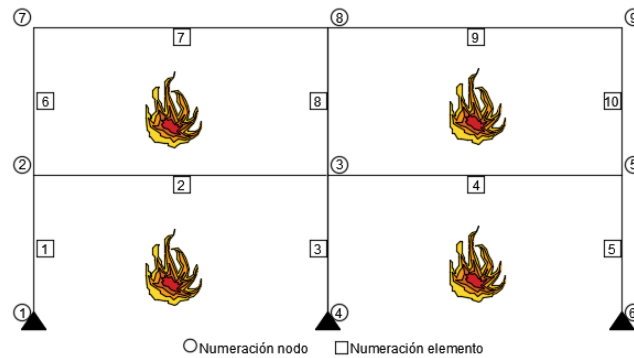
En este caso al ser una exposición de fuego alternada algunos elementos oscilan arrojan resultados dependientes de una temperatura que oscila entre 600°C y 750°C.

*Nota: Por claridad, el nuevo caso se presenta al inicio de la siguiente página.*

### 6.1.16. CASO CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-C

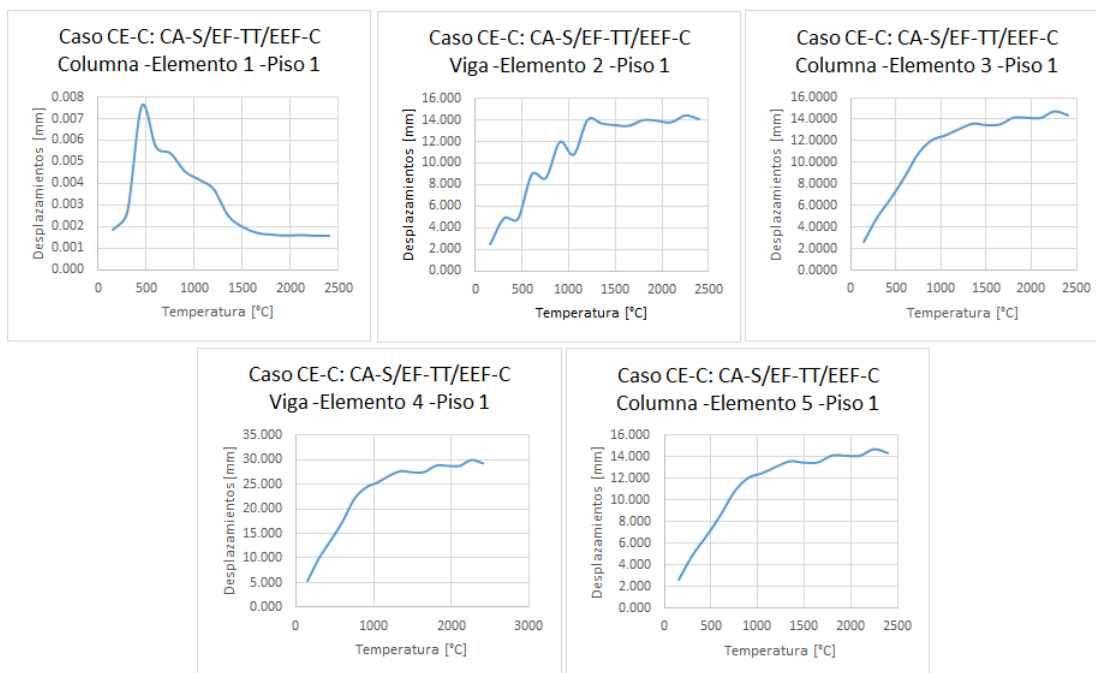
#### Modelo

El modelo consiste en un pórtico de dos naves por dos pisos (CE-C), como se muestra en la figura 6-23, con condición de apoyo simplemente apoyado (CA-S), modelado bajo efecto del fuego en forma directa con implementación de la curva de tiempo-temperatura (EF-TT) y expuesto a una condición de fuego completa (EEF-C).



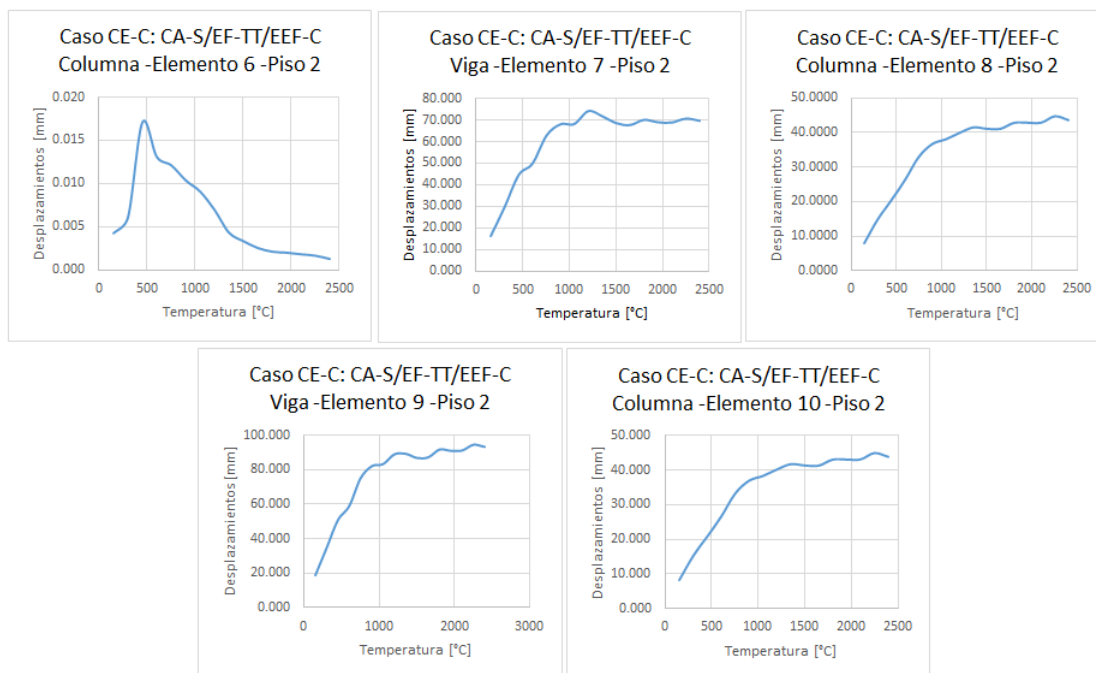
**Figura 6-23.**: Pórtico de dos naves y dos pisos bajo consideraciones directas de fuego. Caso CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-C

Los resultados se presentan en forma de gráficas temperatura versus desplazamientos.



**Figura 6-24.**: Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 1 a 5 del primer piso. Caso CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-C

Para el primer piso mostrado en la figura 6-24, el elemento 1 continúa presentando un crecimiento hasta 500°C con un desplazamiento de 0.007 mm, mientras que los otros elementos alcanzan temperaturas de 2400°C llegando a desplazamientos de 30 mm.



**Figura 6-25.:** Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 6 a 10 del segundo piso.  
Caso CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-C

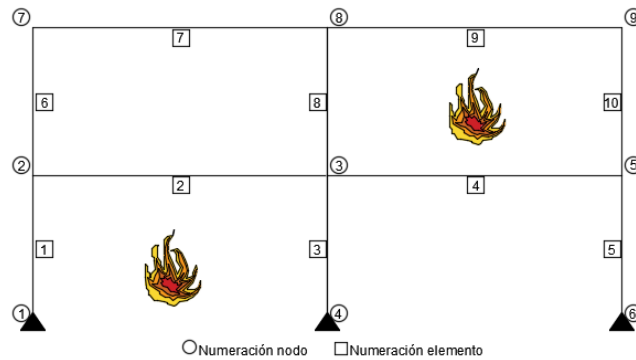
La figura 6-25 muestra los desplazamiento del segundo piso, donde los elementos 7 a 10 oscilan entre 40 mm y los 90 mm a temperatura de 2400°C. En cuanto a la columna, elemento 6, presenta un desplazamiento de 0.15 mm a los 500°C y a partir de esta temperatura los desplazamiento decrecen.

*Nota: Por claridad, el nuevo caso se presenta al inicio de la siguiente página.*

### 6.1.17. CASO CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-A

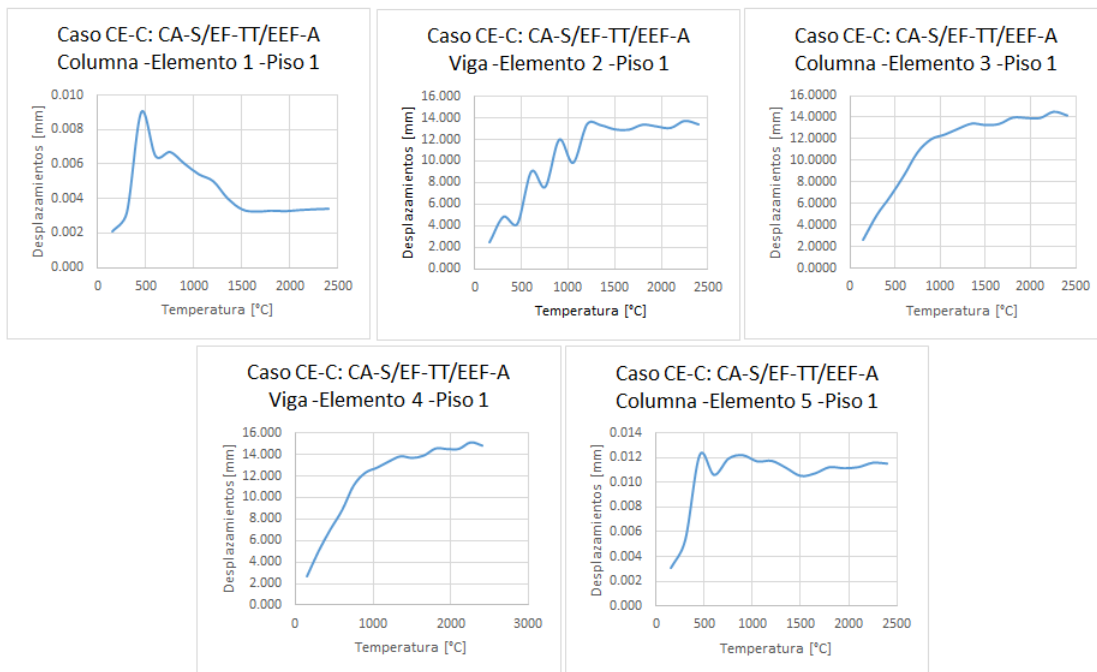
#### Modelo

El modelo consiste en un pórtico de dos naves por dos pisos (CE-C), como se muestra en la figura 6-26, con condición de apoyo simplemente apoyada (CA-S), modelado bajo efecto del fuego en forma directa con implementación de la curva de tiempo-temperatura (EF-TT) y expuesto a una condición de fuego alternada (EEF-A).



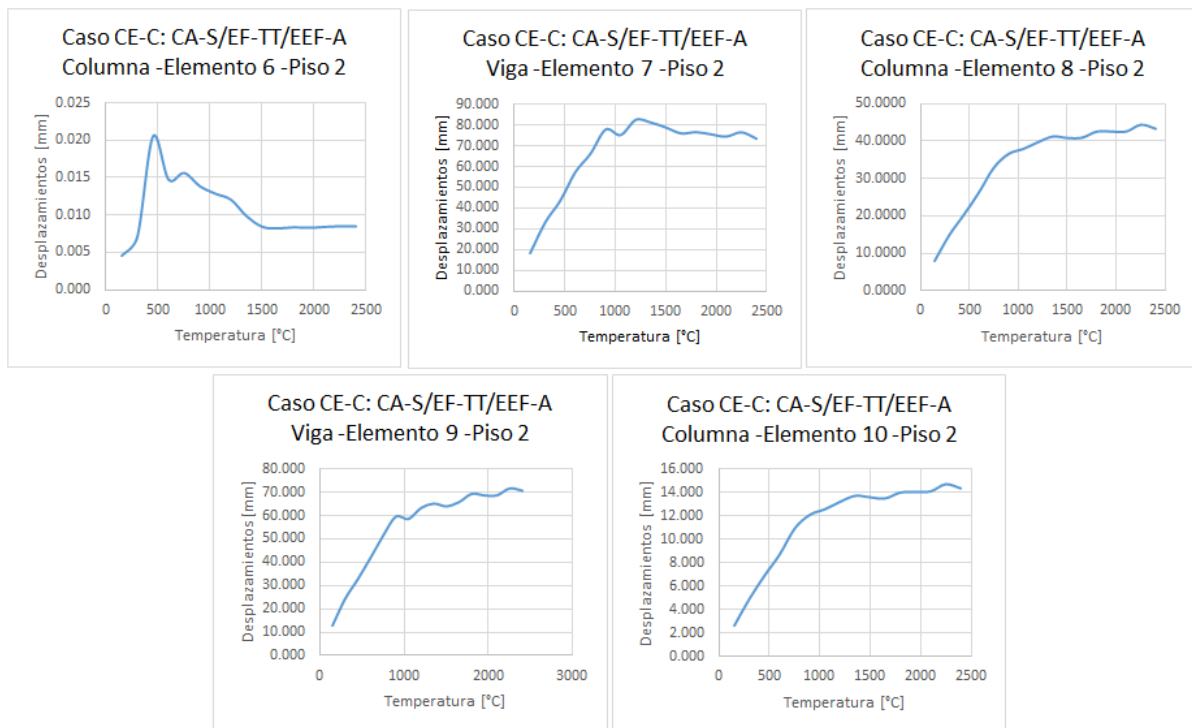
**Figura 6-26.:** Pórtico de dos naves y dos pisos bajo consideraciones directas de fuego alternadamente. Caso CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-A

Los resultados se presentan en forma de gráficas temperatura versus desplazamientos.



**Figura 6-27.:** Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 1 a 5 del primer piso. Caso CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-A

Cuando el fuego se presenta alternadamente, la figura 6-27 muestra las gráficas de los desplazamientos de los elementos del primer piso. Se puede observar que la columna 1 alcanza un desplazamiento de 0.008 mm a los 500°C, la viga 2 y 4 alcanzan los 14 mm a los 2400°C; aunque en el elemento 2 no se da un crecimiento constante.



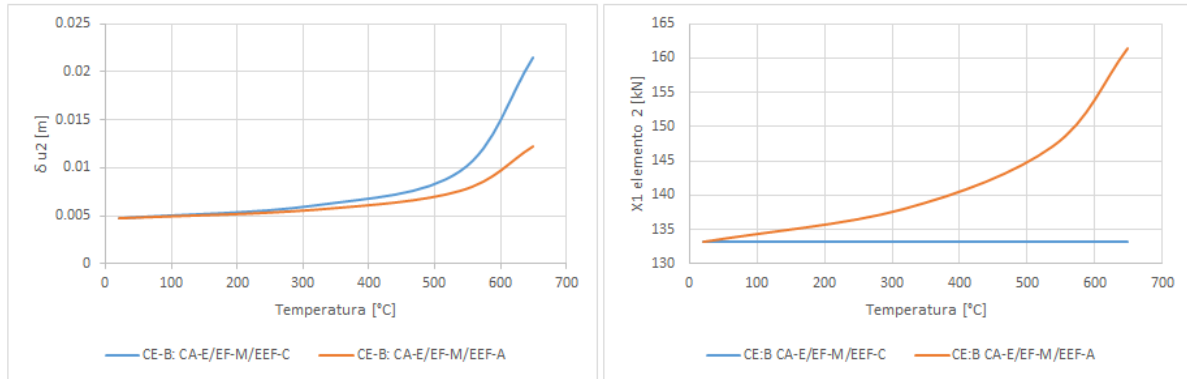
**Figura 6-28.:** Curvas desplazamiento-temperatura de los elementos 6 a 10 del segundo piso.  
Caso CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-A

En el segundo piso el elemento 7 alcanza un desplazamiento de 83 mm a los 1200°C, mientras que la viga 9 alcanza 70mm a 2400°C. En lo que corresponde a las columnas, el elemento 8 presenta un desplazamiento de 44 mm a los 2400°C, tal como se registran en el figura 6-28.

## 6.2. Discusión de resultados

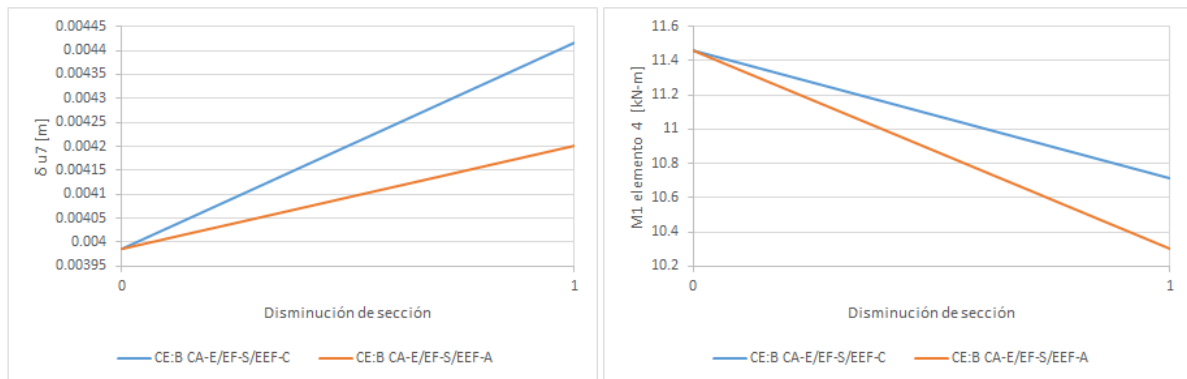
En esta sección se compara el comportamiento de los casos de estudio y se presentan los resultados en forma gráfica. Para cada uno de los casos bajo efectos del fuego: en forma de afectación al material, en forma de afectación de la sección transversal y bajo efecto del fuego directo mediante curva tiempo-temperatura; se compara los desplazamientos de un nodo cuando la exposición es completa y cuando la exposición es alternada. Así mismo, se compara la fuerza interna de un elemento en un extremo. A continuación, se presenta en las gráficas correspondientes para cada una de las configuraciones estructurales con diferente efecto del fuego:





**Figura 6-29.:** Comparación de desplazamientos y fuerzas para el Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-C y el Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A

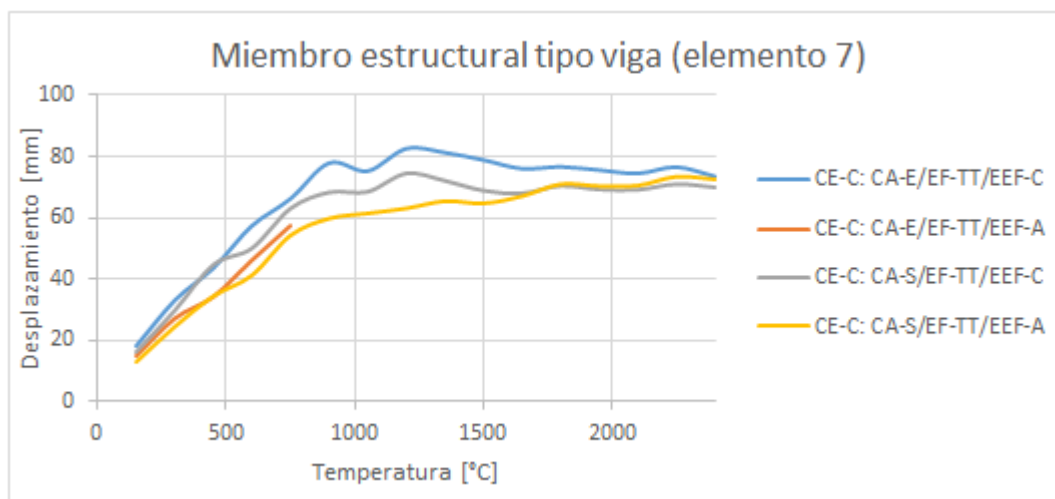
En la figura 6-29 se muestra en paralelo los resultados de desplazamiento y acciones internas de fuerzas de la configuración estructural B, pórtico de dos naves y un piso, comparando en cada una la exposición completa con la alterna. Los desplazamientos son mayores cuando toda la estructura está expuesta al fuego en forma de afectación del módulo de elasticidad, mientras que cuando solo se afecta una nave los desplazamientos son menores. En cuanto a las acciones internas de fuerza, como la fuerza axial del elemento 2 que corresponde a una viga, cuando la exposición es completa permanece constante, mientras que cuando la exposición es alternada el elemento experimenta un crecimiento en la sollicitación de fuerza axial.



**Figura 6-30.:** Comparación de desplazamientos y fuerzas para el Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-C y el Caso CE-B: CA-E/EF-S/EEF-A

Para la estructura de la configuración estructural B cuando está expuesta al fuego en forma de afectación de la sección transversal, en la figura 6-30, se muestra en paralelo los resultados de desplazamiento y acciones internas de fuerzas, comparando en cada una la exposición completa con la alterna. De ahí se puede observar que para un cambio de sección transversal los desplazamientos son mayores cuando toda la estructura está expuesta al fuego

llegando a 0.00443 m, mientras que cuando solo se afecta una nave los desplazamientos son menores alcanzando 0.0042 m. En cuanto a las acciones internas de fuerza, como el momento de flexión del elemento 4 que corresponde a una viga, en los dos casos hay disminución en la sollicitación, sin embargo, para la exposición completa la estructura se encuentra más sollicitada a momento por flexión.



**Figura 6-31.:** Comparación de desplazamientos para todas las condiciones de exposición de la configuración estructural C

Bajo consideraciones de afectación de fuego directamente, haciendo uso de una curva tiempo-temperatura, y teniendo en cuenta los cuatro casos para la configuración estructural C, se tiene que los mayores desplazamientos los presenta el caso cuando la estructura está empotrada y la exposición es completa alcanzando un desplazamiento máximo de 82 mm a una temperatura de 1200°C, mientras que con los mismos apoyos pero con exposición alternada solo alcanza 57 mm a una temperatura de 750°C. Para la estructura simplemente apoyada presenta menores desplazamientos, en exposición completa presenta 74 mm a 1200°C y con exposición alternada 73 mm a 2250°C.

*Nota: Por claridad, el caso de validación se presenta al inicio de la siguiente página.*

### 6.3. Caso de validación

A partir de los casos presentados en la sección anterior se puede apreciar que el tema de investigación, referente a la modelación, se abordó desde tres enfoques: efecto del fuego en forma de afectación del material (EF-M), efecto del fuego en forma de afectación a la sección transversal de los miembros estructurales (EF-S) y efecto del fuego en forma directa en forma de curva tiempo-temperatura (EF-TT). Como caso de validación de la metodología propuesta se tomó un caso reportado en la literatura [35].

De la literatura consultada durante la realización de este trabajo, se tomó como referencia los trabajos de investigación realizados por Jian Jiang de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Tongji ubicada en Shanghai-China y Asif Usmani de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Edimburgo en el Reino Unido, quienes recopilaron los resultados en la publicación [35]. En este artículo los autores presentan varias configuraciones estructurales, partiendo desde una viga, un marco, hasta llegar a un pórtico de dos luces y un piso como el utilizado para la validación. La autora de este trabajo consideró pertinente revisar el comportamiento general del pórtico propuesto por Jiang y Usmani con respecto al comportamiento de los casos de estudio de la sección anterior, específicamente con el caso CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-A. Igualmente, la autora consideró relevante establecer el orden de magnitud entre los resultados presentados por Jiang y Usmani y los resultados obtenidos de la metodología propuesta, utilizando los dos casos el modelo mostrado en la figura 6-32 reportado en la literatura. Estas validaciones se denominan como validación del comportamiento y validación de resultados respectivamente. A continuación, se describen las principales características de los modelos propuestos para el proceso de validación.

#### I. Modelo de validación del comportamiento

Para identificar patrones de comportamiento de la estructura bajo el fuego reportada en la literatura citada anteriormente, se consideró el caso CE-C: CA-S/EF-TT/EEF-A. Este caso de validación coincide con el propuesto por Jiang y Usmani en los siguientes aspectos:

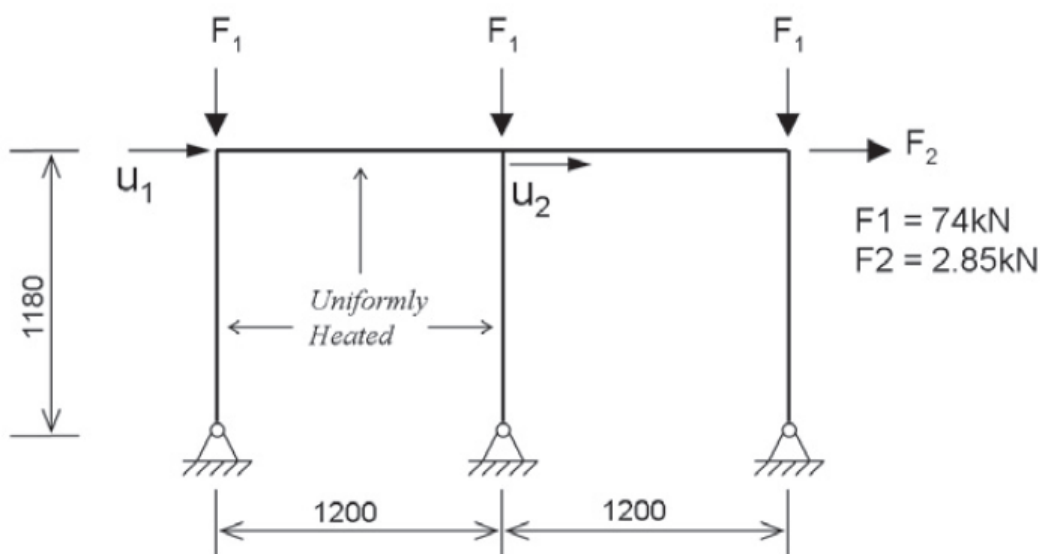
- Las estructuras se encuentran simplemente apoyadas y presentan la misma topología
- Las estructuras se modelaron bajo la solicitación de fuego haciendo uso de la curva ISO-834 [32]
- Las estructuras se encuentran bajo una solicitación de fuego alternada
- Las estructuras se modelaron bajo una carga permanente vertical y horizontal
- Las estructuras se modelaron utilizando la misma herramienta computacional, OpenSees

- El material utilizado para la construcción de los modelos corresponde a acero y su caracterización se formuló a partir de la información del Eurocódigo

Sin embargo, las estructuras difieren en el siguiente aspecto:

- A pesar de que las estructuras topológicamente son iguales, sus dimensiones son diferentes
- Las estructuras se encuentran cargadas verticalmente, en el caso de Jiang y Usmani, en forma puntual y en el caso de la validación mediante carga distribuida
- Las secciones transversales de las dos configuraciones estructurales son diferentes

El objeto de la validación de este modelo radica principalmente en identificar patrones y similitudes en el comportamiento de las estructuras ante la sollicitación del fuego; por este motivo se revisaron los resultados en su representación gráfica. Los resultados utilizados para esta representación provienen de los modelos realizados en OpenSees.

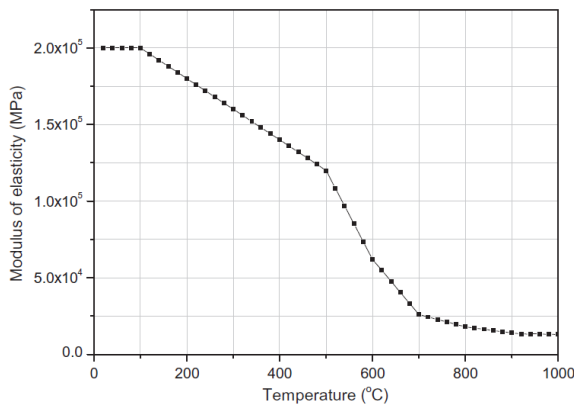


**Figura 6-32.:** Esquema de prueba de un pórtico de acero según Jiang y Usmani. Tomado de [35]

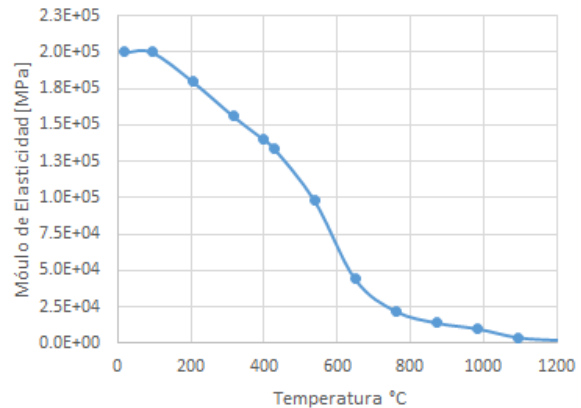
### Comportamiento del material

Los investigadores realizaron la caracterización y análisis del modelo descrito utilizando OpenSees y validaron sus resultados mediante el software de modelación ABAQUS. En este trabajo utilizaron la gráfica del módulo de elasticidad a partir del Eurocódigo, figura 6.33(a). La curva de degradación del material, figura 6.33(b), en forma de disminución del módulo

de elasticidad, se construyó a partir de los límites de temperatura, 316°C, 538°C y 649°C, que indican cambios representativos en el comportamiento del acero. Las dos curvas presentan un alto grado de similitud que existe en el comportamiento del material, en su forma y valores, usado por los autores y mostrado en la figura 6-33. Se puede apreciar como un acero con módulo de elasticidad de  $2.00\text{E}+05$  MPa al ser expuesto a altas temperaturas comienza a descender hasta perder su resistencia bajo una exposición cercana a 1200°C.



(a) T-E utilizado por Jiang y Usmani en [35]



(b) T-E de esta investigación

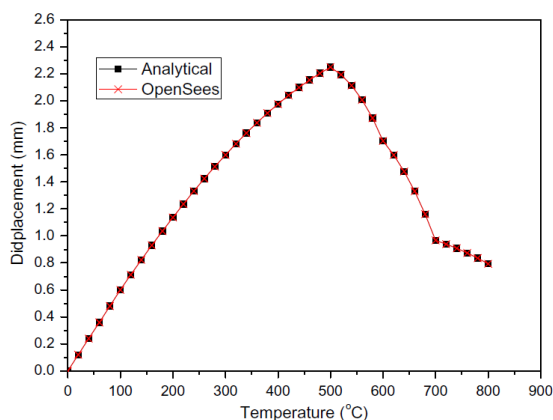
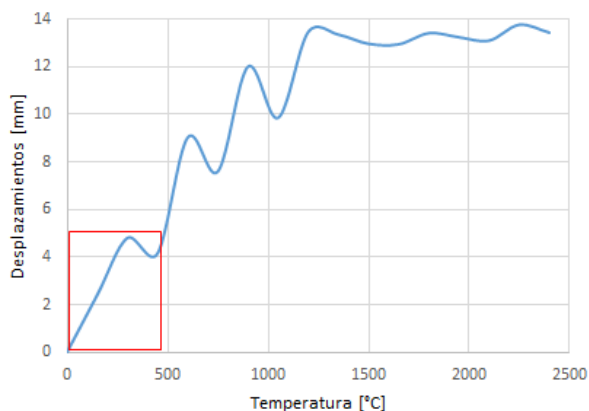
**Figura 6-33.:** Afectación del Módulo de Elasticidad bajo influencia de Altas Temperaturas

### Comportamiento de la estructura

Como referencia para establecer el comportamiento de la estructura se tomó el desplazamiento que experimenta la viga del pórtico expuesta bajo efectos de altas temperaturas como se muestra en la figura 6-32. Mientras que los autores Jiang y Usmani reportan el desplazamiento de la viga hasta una temperatura cercana a los 800°C, figura 6.34(a), en esta investigación se logró establecer el comportamiento de desplazamiento de la viga del pórtico de estudio hasta temperaturas cercanas a los 2400°C, figura 6.34(b).

Como era de esperarse, debido al incremento de temperatura se pueden apreciar cuatro fases en los resultados de esta investigación, figura 6.34(b): un comportamiento elástico hasta alcanzar una temperatura cercana a los 300°C, una zona de plastificación y eventual recuperación hasta una temperatura cercana a los 600°C, un comportamiento oscilatorio elasto-plástico hasta alcanzar temperaturas cercanas a los 1250°C, para continuar con un comportamiento completamente plástico hasta los 2400°C.

En el recuadro de la figura 6.34(b) se puede apreciar el comportamiento en los desplazamientos comparados es igual en forma y de valores muy similares con los resultados presentados por Jiang y Usmani.

(a) T- $\delta$  utilizado por Jiang y Usmani en [35](b) T- $\delta$  utilizado en esta investigación

**Figura 6-34.:** Desplazamiento de un miembro estructural tipo viga bajo influencias de altas temperaturas

## II. Modelo de validación del orden de magnitudes

Para validar la calidad de los resultados del modelo propuesto y sus diferentes enfoques se tomó como referencia la configuración estructural, condiciones de apoyo, exposición al fuego, material, condición de cargas reportadas en el artículo de Jiang y Usmani; el mismo artículo que se tomó como referencia para validar el comportamiento estructural [35] y se complementó con información referenciada en otro artículo [34] de los mismos autores en conjunto con otros investigadores. La metodología para el caso de validación corresponde a la metodología usada para los casos de estudio propuestos para el hallazgo de desplazamientos y se presenta a continuación:

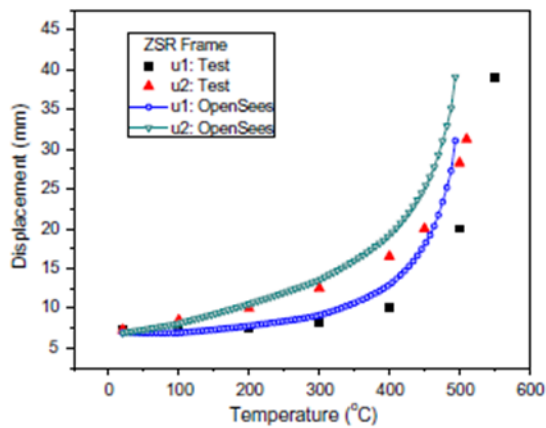
### Modelo

El modelo consiste en un pórtico de dos naves por un pisos (CE-D), como se muestra en la figura 6-32, con condición de apoyo simplemente apoyada (CA-S), modelado bajo efecto del fuego en forma directa con implementación de la curva de tiempo-temperatura (EF-TT) y expuesto a una condición de fuego alternada (EEF-A). Siguiendo con la misma nomenclatura utilizada en este documento, este caso se denomina CE-D: CA-S/EF-TT/EEF-A.

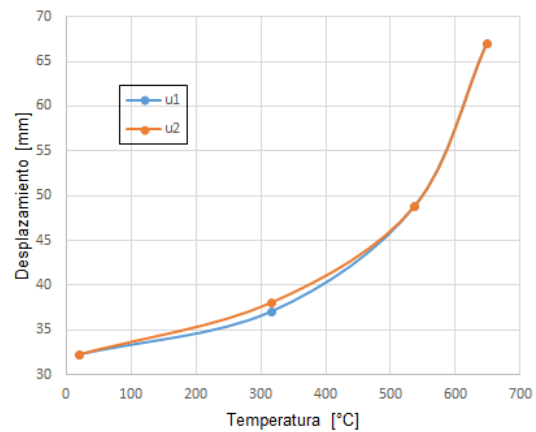
El modelo se construyó con la información suministrada por Jiang y Usmani: geometría y asignación de cargas como se muestra en la figura 6-32; sección transversal IPE-80, aunque dicho estudio no especifica la disposición de los elementos, para esta validación la viga se conecta por el eje débil de la columna; el módulo de elasticidad se tomó de 200 GPa.

## Desplazamientos

Los desplazamientos se muestran en forma de gráfico, paralelamente con los resultados obtenidos en el trabajo investigativo de Jiang y Usmani. Para validar la metodología de estudio del efecto de fuego en forma de afectación del material, cuando se modifica el módulo de elasticidad, se analizó el modelo de los investigadores [35] con el código de OpenSees que analizamos para el caso CE-B: CA-E/EF:M/EEF-A, con la diferencia que la condición de apoyo se consideró simplemente apoyada.



(a) T- $\delta$  utilizado por Jiang y Usmani en [35]



(b) T- $\delta$  utilizado en esta investigación

**Figura 6-35.:** Desplazamientos horizontales en los nodos 2 y 3

Para establecer el comportamiento de la estructura se tomó los desplazamientos horizontales, en los nodos 1 y 2, cuando el pórtico se expone a efectos de altas temperaturas, en el caso de Jiang y Usmani con afectación directa y en el caso de validación con afectación al material. En la figura 6-35 se puede observar que los resultados presentan una coherente similitud, las curvas muestran un crecimiento exponencial en la medida que la temperatura aumenta, entre 0 y 600°C aproximadamente. De esta manera, se puede considerar que la implementación del fuego es muy congruente al realizarse bajo condiciones de afectación al material.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

Las conclusiones que resultaron de este trabajo se clasificaron de acuerdo con las etapas descritas en los capítulos anteriores y se relacionan a continuación:

### 7.1. Conclusiones sobre la modelación del fuego

La representación del fuego en una curva de tiempo temperatura se debe realizar experimentalmente bajo condiciones del entorno, sin embargo, en el desarrollo de este trabajo se utilizó una curva estándar que ya ha sido utilizado en otras investigaciones y que también es citada en la norma colombiana de construcciones sismo resistente NSR-10, como lo es la curva tiempo-temperatura ISO-834.

Aunque si bien la curva ISO-834 es una curva estandarizada, en este trabajo se utilizó la ecuación para construir la curva con un incremento de temperatura de 20°C. La formulación de su ecuación se encuentra en la norma ISO-834 y en varios de los estudios referenciados en este trabajo.

### 7.2. Conclusiones sobre la implementación

En la literatura se reportan diferentes versiones para la implementación del fuego mediante herramientas computacionales. En este trabajo se abordó la implementación del fuego, tanto en programas comerciales como en programas de distribución libre, encontrando mayor facilidad de modelación en este último.

El comportamiento del fuego se modeló a partir de tres tipos de exposición que se pueden realizar fácilmente en el programa OpenSees. Los resultados obtenidos fueron confiables y comparables con los reportados en la literatura.

El manejo de la plataforma y software OpenSees se realizó en una forma progresiva, haciendo cada vez modelos más representativos. Se trata de un programa en desarrollo de bastante aceptación que dispone de módulos especiales para modelar el fuego. El lenguaje propio del programa permitió ajustar el modelo matemático a los requerimientos computacionales del programa, incluyendo algunas prescripciones consignadas en los códigos especializados.



El programa OpenSees por la facilidad para la implementación del fuego funcionó mejor que SAP2000, aunque este último tiene la manera de asignar el fuego como carga. Una visión parametrizada del efecto del fuego permitió incluirlo en el proceso de análisis del programa.

SAP2000 arroja resultados muy aproximados en comparación con OpenSees con las dos primeras formas de exposición de fuego, ya sea afectando al material en cuanto al módulo de elasticidad se refiere, como afectando la sección transversal de los elementos, debido a que se realiza mediante un análisis lineal, mientras que la implementación del fuego se debe realizar mediante un análisis no lineal.

En consecuencia, se puede concluir que el uso del software comercial de diseño para modelar el fenómeno de la exposición al fuego representa mayores dificultades que el uso de OpenSees. La razón fundamental radica en la facilidad de programación que ofrece OpenSees contra SAP2000.

### **7.3. Conclusiones sobre los resultados**

Los resultados de OpenSees comparados con los resultados de SAP2000 para cada uno de los casos en cuanto a desplazamientos presentaron una similitud mayor del 70 %, mientras que para los resultados de acciones de fuerzas internas la similitud siempre estuvo cercana al 100 %, concluyendo que el grado de confiabilidad del uso de los programas es alto.

Cuando se utilizó la condición de afectación del módulo de elasticidad para temperaturas de 316°C, 538°C y 649°C se evidenció que las configuraciones estructurales presentaron mayores desplazamientos. Desplazamientos que duplicaban la condición inicial y en algunos casos hasta superando por cinco veces esa condición. Estos resultados son concluyentes y respaldan el concepto presentado en la literatura de que, a más de 316°C el acero estructural comienza a reducir su módulo de elasticidad bajo exposición de altas temperaturas.

Se pudo apreciar que ante la exposición de altas temperaturas los desplazamientos máximos ocurrieron cuando los pórticos se encontraron completamente expuestos, como es el caso CE-C: CA-E/EF-M/EEF-C. Caso correspondiente al pórtico de dos naves y dos pisos expuesto completamente a los efectos del fuego en forma de afectación al módulo de elasticidad. Este pórtico presentó un desplazamiento horizontal en el nodo 7, bajo una temperatura de 649°C, de 4.94E-02 m con un aumento respecto a su condición inicial de 354 %.

Los modelos con exposición alternada en la configuración estructural B, pórtico de dos naves y un piso, y configuración estructural C, pórtico de dos naves y dos pisos, presentan menores

desplazamientos que los pórticos expuestos completamente a condiciones de incendio. Es de esta manera que se puede definir los elementos a proteger o a diseñar con mayor rigurosidad. Este efecto se puede complementar con un análisis de colapso progresivo.

En los resultados de las acciones de fuerzas internas de los elementos cuando la afectación se realizó al módulo de elasticidad y cuando la exposición es de forma completa, es decir afectación total de las naves del pórtico, los resultados para cada afectación de temperatura no son significativos debido a que la estructura debe conservar su estado de equilibrio hasta transmitir las fuerzas a la cimentación. En este caso no hay variación en los resultados. Todo lo contrario a cuando la exposición es alternada, en estos casos sí hay variación en los resultados de las acciones internas de fuerzas y los elementos experimentan pérdida de resistencia.

Cuando la afectación de fuego se realizó a la sección transversal de los elementos sí se presentó una variación en los resultados de acciones internas de fuerzas, debido a que se afectaron propiedades geométricas. Aunque la disminución es mínima se evidenció que este es otro modo de observar el comportamiento cuando hay afectaciones de altas temperaturas sobre la estructura. La pérdida de sección es otro caso que se puede estudiar gradualmente con un complemento de colapso progresivo.

En los casos donde se implementó el fuego mediante curvas de tiempo-temperatura los resultados se pudieron convalidar con un estudio realizado por Jiang y Usmani que, al igual que en este trabajo, se recurrió al uso de OpenSees como principal recurso computacional. El caso, aunque es muy similar presenta parámetros diferentes que hacen que los resultados varíen, no obstante se pudo observar que el comportamiento finalmente es muy similar.

El efecto de la teoría de los grupos, denominada así en este trabajo, para designar la forma de exposición al fuego en forma de tablero de ajedrez, fue de gran aporte por la calidad de los resultados obtenidos. Mediante esta teoría se reprodujeron condiciones extremas y realistas que condujeron a resultados reveladores sobre el comportamiento de las estructuras bajo condiciones de fuego. A partir de este modelo se identificaron los nudos que más se desplazaron así como los elementos que presentaron mayores solicitaciones. Se puede concluir que esta metodología puede conllevar a un análisis de protección de cuales elementos se deben proteger o reforzar en el diseño.

La metodología propuesta en este trabajo final de maestría para construir la curva de degradación del material coincide con la reportada por otros autores y normativa.

Finalmente, con los resultados obtenidos de OpenSees y las validaciones realizadas con SAP2000, así como con los reportes de la literatura consultada, se puede decir con certeza que la metodología propuesta para esta investigación es confiable. Se compararon diferen-

tes tipos de estructuras, diferentes modelos de afectación por parte del fuego, y diferentes modelos de exposición al fuego, se compararon arrojando resultados consistentes.

## 7.4. Recomendaciones

Al modelar en OpenSees se debe tener en cuenta que los código estén en el lenguaje apropiado, cumpliendo con la fonética de los comandos, respetando espacios y signos para evitar error al compilar y que no haya convergencia en el análisis. Además, es de mucha importancia que los valores sean coincidentes debido a que el programa no usa unidades. Por otro lado, el programa ofrece una interacción con el codificador, es decir que el programa está presto para modificarse según las necesidades del usuario. Así mismo, el programa presta absoluta facilidad de adquirir códigos que pueden servir de referencia, así como de un chat constante para presentar dudas y obtener respuestas o hacer un conversatorio de algún tema en particular.

En cuanto al uso de SAP2000 se debe tener en cuenta las unidades, las cargas y el sentido en que son aplicadas, la asignación de los elementos y sus ejes locales. Cuando se implementa el fuego se debe tener las mismas consideraciones además de que el archivo que contenga la curva tiempo-temperatura sea leído adecuadamente. Desafortunadamente los resultados no fueron consistentes, dejando este posible tema como estudio para un futuro trabajo.

Este estudio es el inicio de una línea de investigación que considere en el análisis la afectación de las altas temperaturas sobre estructuras, tanto en concreto como en acero. Con uso de codificación en lenguajes o plataformas de acceso libre como OpenSees.

Por tratarse de un trabajo exploratorio se sugiere investigar, para futuras tesis, por qué motivo algunas estructuras adquieren un comportamiento oscilatorio, cuando se considera los efectos del fuego. Surge el interrogante sobre la eventual presencia de un proceso de endurecimiento. El primer indicio de este comportamiento se evidencia cuando a partir de cierta temperatura la estructura comienza a perder resistencia.

La siguiente literatura, aunque no aparece citada en el trabajo si constituye una referencia de estudio y consulta: [17], [29], [37], [43], [62], [64].

# A. Anexo: Resultados obtenidos en OpenSees. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A

## Current Domain Information

Current Time: 1  
tCommitted Time: 1  
NODE DATA: NumNodes: 6

numComponents: 6

Node: 1

Coordinates : 0 0  
Disps: 0 0 0  
unbalanced Load: 0 0 0  
ID : -1 -1 -1

Node: 2

Coordinates : 0 3  
Disps: 0.00562382 -3.15568e-05 -0.00285274  
unbalanced Load: 180 0 0  
ID : 0 1 2

Node: 3

Coordinates : 6 3  
Disps: 0.00463741 -8.786e-05 -0.00172694  
unbalanced Load: 0 0 0  
ID : 3 4 5

Node: 4

Coordinates : 6 0  
Disps: 0 0 0  
unbalanced Load: 0 0 0  
ID : -1 -1 -1

Node: 5

Coordinates : 12 3  
Disps: 0.00422469 -4.2704e-05 -0.00158481  
unbalanced Load: 0 0 0  
ID : 6 7 8

Node: 6

Coordinates : 12 0  
Disps: 0 0 0  
unbalanced Load: 0 0 0  
ID : -1 -1 -1

ELEMENT DATA: NumEle: 5

ELEMENT DATA: NumEle: 5

numComponents: 5

ElasticBeam2d: 1

Connected Nodes: 1 2  
CoordTransf: 1  
mass density: 0, cMass: 0  
release code: 0  
End 1 Forces (P V M): 26.0911 42.0203 129.888  
End 2 Forces (P V M): -26.0911 -42.0203 -3.82757

ElasticBeam2d: 2

Connected Nodes: 2 3  
CoordTransf: 1  
mass density: 0, cMass: 0  
release code: 0  
End 1 Forces (P V M): 137.98 26.0911 3.82757  
End 2 Forces (P V M): -137.98 45.9089 -63.2807

ElasticBeam2d: 3

Connected Nodes: 4 3  
CoordTransf: 1  
mass density: 0, cMass: 0  
release code: 0  
End 1 Forces (P V M): 72.6426 63.9657 136.422  
End 2 Forces (P V M): -72.6426 -63.9657 55.4753

ElasticBeam2d: 4

Connected Nodes: 3 5  
CoordTransf: 1  
mass density: 0, cMass: 0  
release code: 0  
End 1 Forces (P V M): 74.014 26.7338 7.80538  
End 2 Forces (P V M): -74.014 45.2662 -63.4029

ElasticBeam2d: 5

Connected Nodes: 6 5  
CoordTransf: 1  
mass density: 0, cMass: 0  
release code: 0  
End 1 Forces (P V M): 45.2662 74.014 158.639  
End 2 Forces (P V M): -45.2662 -74.014 63.4029

SP\_Constraints: numConstraints: 9

numComponents: 9  
SP\_Constraint: 0 Node: 1 DOF: 1 ref value: 0 current value: 0  
SP\_Constraint: 1 Node: 1 DOF: 2 ref value: 0 current value: 0  
SP\_Constraint: 2 Node: 1 DOF: 3 ref value: 0 current value: 0  
SP\_Constraint: 3 Node: 4 DOF: 1 ref value: 0 current value: 0  
SP\_Constraint: 4 Node: 4 DOF: 2 ref value: 0 current value: 0

## B. Anexo: Resultados obtenidos en SAP2000. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A

TABLE: Joint Displacements

Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	m	m	m	Radians	Radians	Radians
1	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
2	DEAD	LinStatic	0.008029	0	-0.000039	0	0.004112	0
3	DEAD	LinStatic	0.006424	0	-0.000112	0	0.001991	0
4	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
5	DEAD	LinStatic	0.00586	0	-0.000052	0	0.001827	0
6	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0

TABLE: Element Forces - Frames

Frame	Station	OutputCase	CaseType	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	m	Text	Text	KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m	Text	m
1	0	DEAD	LinStatic	-25.715	36.027	0	0	0	131.1356	1-1	0
1	1.5	DEAD	LinStatic	-25.715	36.027	0	0	0	77.0949	1-1	1.5
1	3	DEAD	LinStatic	-25.715	36.027	0	0	0	-3.4582	1-1	3
2	0	DEAD	LinStatic	-143.973	-25.715	0	0	0	-1.4582	2-1	0
2	0.5	DEAD	LinStatic	-143.973	-19.715	0	0	0	9.8992	2-1	0.5
2	1	DEAD	LinStatic	-143.973	-13.715	0	0	0	18.2566	2-1	1
2	1.5	DEAD	LinStatic	-143.973	-7.715	0	0	0	23.614	2-1	1.5
2	2	DEAD	LinStatic	-143.973	-1.715	0	0	0	25.9714	2-1	2
2	2.5	DEAD	LinStatic	-143.973	4.285	0	0	0	25.3288	2-1	2.5
2	3	DEAD	LinStatic	-143.973	10.285	0	0	0	21.6862	2-1	3
2	3.5	DEAD	LinStatic	-143.973	16.285	0	0	0	15.0436	2-1	3.5
2	4	DEAD	LinStatic	-143.973	22.285	0	0	0	5.401	2-1	4
2	4.5	DEAD	LinStatic	-143.973	28.285	0	0	0	-7.2416	2-1	4.5
2	5	DEAD	LinStatic	-143.973	34.285	0	0	0	-22.8842	2-1	5
2	5.5	DEAD	LinStatic	-143.973	40.285	0	0	0	-41.5268	2-1	5.5
2	6	DEAD	LinStatic	-143.973	46.285	0	0	0	-63.1694	2-1	6
3	0	DEAD	LinStatic	-73.96	66.548	0	0	0	137.1526	3-1	0
3	1.5	DEAD	LinStatic	-73.96	66.548	0	0	0	37.33	3-1	1.5
3	3	DEAD	LinStatic	-73.96	66.548	0	0	0	-62.4927	3-1	3
4	0	DEAD	LinStatic	-77.424	-27.675	0	0	0	-10.6589	4-1	0
4	0.5	DEAD	LinStatic	-77.424	-21.675	0	0	0	1.6785	4-1	0.5
4	1	DEAD	LinStatic	-77.424	-15.675	0	0	0	11.016	4-1	1
4	1.5	DEAD	LinStatic	-77.424	-9.675	0	0	0	17.3534	4-1	1.5
4	2	DEAD	LinStatic	-77.424	-3.675	0	0	0	20.6909	4-1	2
4	2.5	DEAD	LinStatic	-77.424	2.325	0	0	0	21.0283	4-1	2.5
4	3	DEAD	LinStatic	-77.424	8.325	0	0	0	18.3658	4-1	3
4	3.5	DEAD	LinStatic	-77.424	14.325	0	0	0	12.7032	4-1	3.5
4	4	DEAD	LinStatic	-77.424	20.325	0	0	0	4.0407	4-1	4
4	4.5	DEAD	LinStatic	-77.424	26.325	0	0	0	-7.6219	4-1	4.5
4	5	DEAD	LinStatic	-77.424	32.325	0	0	0	-22.2844	4-1	5
4	5.5	DEAD	LinStatic	-77.424	38.325	0	0	0	-39.947	4-1	5.5
4	6	DEAD	LinStatic	-77.424	44.325	0	0	0	-60.6096	4-1	6
5	0	DEAD	LinStatic	-44.325	77.424	0	0	0	160.0499	5-1	0
5	1.5	DEAD	LinStatic	-44.325	77.424	0	0	0	43.9133	5-1	1.5
5	3	DEAD	LinStatic	-44.325	77.424	0	0	0	-72.2232	5-1	3

# C. Anexo: Resultados de OpenSees.

## Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A

Tabulación y espacio	U1	U2	U3
<b>Pegar en B2</b>			
<b>Node:1</b>	1		
Coordinates :	0	0	0
Disps:	0	0	0
unbalanced Load:	0	0	0
ID :	-1	-1	-1
<b>Node:2</b>	2		
Coordinates :	0	3	
Disps:	0.005624	-3.16E-05	-0.00285274
unbalanced Load:	180	0	0
ID :	0	1	2
<b>Node:3</b>	3		
Coordinates :	6	3	
Disps:	0.004637	-8.79E-05	-0.00172694
unbalanced Load:	0	0	0
ID :	3	4	5
<b>Node:4</b>	4		
Coordinates :	6	0	
Disps:	0	0	0
unbalanced Load:	0	0	0
ID :	-1	-1	-1
<b>Node:5</b>	5		
Coordinates :	12	3	
Disps:	0.004225	-4.27E-05	-0.00158481
unbalanced Load:	0	0	0
ID :	6	7	8
<b>Node:6</b>	6		
Coordinates :	12	0	
Disps:	0	0	0
unbalanced Load:	0	0	0
ID :	-1	-1	-1

Tabulación y espacio	P	V	M
<b>pegar en P4</b>			
<b>ElasticBeam:</b>	1		
Connected Nodes:	1	2	
CoordTransf:	1		
mass density:	0		cMass: 0
release code:	0		
<b>ElasticBeam2d:1-1</b>	1 Forces (P V M):	26.0911	42.0203 129.888
<b>ElasticBeam2d:1-2</b>	2 Forces (P V M):	-26.0911	-42.0203 -3.82757
<b>ElasticBeam:</b>	2		
Connected Nodes:	2	3	
CoordTransf:	1		
mass density:	0		cMass: 0
release code:	0		
<b>ElasticBeam2d:2-1</b>	1 Forces (P V M):	137.98	26.0911 3.82757
<b>ElasticBeam2d:2-2</b>	2 Forces (P V M):	-137.98	45.9089 -63.2807
<b>ElasticBeam:</b>	3		
Connected Nodes:	4	3	
CoordTransf:	1		
mass density:	0		cMass: 0
release code:	0		
<b>ElasticBeam2d:3-1</b>	1 Forces (P V M):	72.6426	63.9657 136.422
<b>ElasticBeam2d:3-2</b>	2 Forces (P V M):	-72.6426	-63.9657 55.4753
<b>ElasticBeam:</b>	4		
Connected Nodes:	3	5	
CoordTransf:	1		
mass density:	0		cMass: 0
release code:	0		
<b>ElasticBeam2d:4-1</b>	1 Forces (P V M):	74.014	26.7338 7.80538
<b>ElasticBeam2d:4-2</b>	2 Forces (P V M):	-74.014	45.2662 -63.4029
<b>ElasticBeam:</b>	5		
Connected Nodes:	6	5	
CoordTransf:	1		
mass density:	0		cMass: 0
release code:	0		
<b>ElasticBeam2d:5-1</b>	1 Forces (P V M):	45.2662	74.014 158.639
<b>ElasticBeam2d:5-2</b>	2 Forces (P V M):	-45.2662	-74.014 63.4029

ElasticBeam2d:		
Elemento	Nodo	
1	1 ElasticBeam2d:1-1 P	26.0911
1	2 ElasticBeam2d:1-2 V	-42.0203
1	1 ElasticBeam2d:1-1 M	129.888
1	2 ElasticBeam2d:1-2 P	-26.0911
1	1 ElasticBeam2d:1-1 V	42.0203
1	2 ElasticBeam2d:1-2 M	-3.82757
2	1 ElasticBeam2d:2-1 P	137.98
2	2 ElasticBeam2d:2-2 V	45.9089
2	1 ElasticBeam2d:2-1 M	3.82757
2	2 ElasticBeam2d:2-2 P	-137.98
2	1 ElasticBeam2d:2-1 V	26.0911
2	2 ElasticBeam2d:2-2 M	-63.2807
3	1 ElasticBeam2d:3-1 P	72.6426
3	2 ElasticBeam2d:3-2 V	-63.9657
3	1 ElasticBeam2d:3-1 M	136.422
3	2 ElasticBeam2d:3-2 P	-72.6426
3	1 ElasticBeam2d:3-1 V	63.9657
3	2 ElasticBeam2d:3-2 M	55.4753
4	1 ElasticBeam2d:4-1 P	74.014
4	2 ElasticBeam2d:4-2 V	45.2662
4	1 ElasticBeam2d:4-1 M	7.80538
4	2 ElasticBeam2d:4-2 P	-74.014
4	1 ElasticBeam2d:4-1 V	26.7338
4	2 ElasticBeam2d:4-2 M	-63.4029
5	1 ElasticBeam2d:5-1 P	45.2662
5	2 ElasticBeam2d:5-2 V	-74.014
5	1 ElasticBeam2d:5-1 M	158.639
5	2 ElasticBeam2d:5-2 P	-45.2662
5	1 ElasticBeam2d:5-1 V	74.014
5	2 ElasticBeam2d:5-2 M	63.4029

# D. Anexo: Resultados de SAP2000 en Excel. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A

	Joint Text	OutputCase	CaseType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 radians	R2 radians	R3 radians
1-DEAD	1	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
2-DEAD	2	DEAD	LinStatic	0.009601	0	-0.000024	0	0.004489	0
3-DEAD	3	DEAD	LinStatic	0.008589	0	-0.000061	0	0.002802	0
4-DEAD	4	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0

NODO	CASETYPE		U	U	COMB	DESP	NODO	ELEM
2	DEAD	2-DEAD	U1	9.601.E-03	DEAD	U1	1	1
2	DEAD	2-DEAD	U3	-2.400.E-05	1.4D	U2	2	2
2	DEAD	2-DEAD	R2	4.489.E-03		U3	3	3
3	DEAD	3-DEAD	U1	8.589.E-03		R1	4	4
3	DEAD	3-DEAD	U3	-6.100.E-05		R2		
3	DEAD	3-DEAD	R2	2.802.E-03		R3		
1	DEAD	1-DEAD	U1	0.000.E+00				
1	DEAD	1-DEAD	U3	0.000.E+00	L		Fuerza	
1	DEAD	1-DEAD	R2	0.000.E+00	0		P	
4	DEAD	4-DEAD	U1	0.000.E+00	3	jcol	V2	
4	DEAD	4-DEAD	U3	0.000.E+00	6	jvg	V3	
4	DEAD	4-DEAD	R2	0.000.E+00			T	
							M2	

Frame Text	Station m	OutputCase Text	CaseType Text	P kN	V2 kN	V3 kN	T kN.m	M2 kN.m	M3 kN.m
1-0-DEAD	1	0 DEAD	LinStatic	-20.21	71.143	0	0	0	214.6292
1-1.5-DEAD	1	1.5 DEAD	LinStatic	-20.21	71.143	0	0	0	107.9141
1-3-DEAD	1	3 DEAD	LinStatic	-20.21	71.143	0	0	0	15.1296
2-0-DEAD	2	0 DEAD	LinStatic	-108.857	-20.21	0	0	0	15.1296
2-0.5-DEAD	2	0.5 DEAD	LinStatic	-108.857	-14.21	0	0	0	23.7347
2-1-DEAD	2	1 DEAD	LinStatic	-108.857	-8.21	0	0	0	29.3399
2-1.5-DEAD	2	1.5 DEAD	LinStatic	-108.857	-2.21	0	0	0	31.945
2-2-DEAD	2	2 DEAD	LinStatic	-108.857	3.79	0	0	0	31.5502
2-2.5-DEAD	2	2.5 DEAD	LinStatic	-108.857	9.79	0	0	0	28.1553
2-3-DEAD	2	3 DEAD	LinStatic	-108.857	15.79	0	0	0	21.7605
2-3.5-DEAD	2	3.5 DEAD	LinStatic	-108.857	21.79	0	0	0	12.3657
2-4-DEAD	2	4 DEAD	LinStatic	-108.857	27.79	0	0	0	-0.0292
2-4.5-DEAD	2	4.5 DEAD	LinStatic	-108.857	33.79	0	0	0	-15.424
2-5-DEAD	2	5 DEAD	LinStatic	-108.857	39.79	0	0	0	-33.8189
2-5.5-DEAD	2	5.5 DEAD	LinStatic	-108.857	45.79	0	0	0	-55.2137
2-6-DEAD	2	6 DEAD	LinStatic	-108.857	51.79	0	0	0	-79.6086
3-0-DEAD	3	0 DEAD	LinStatic	-51.79	108.857	0	0	0	230.6326
3-1.5-DEAD	3	1.5 DEAD	LinStatic	-51.79	108.857	0	0	0	67.3478
3-3-DEAD	3	3 DEAD	LinStatic	-51.79	108.857	0	0	0	-95.937

Frame	OutputCase	CaseType	U	Value
1	0 DEAD	1-0-DEAD	P	-20.21
1	0 DEAD	1-0-DEAD	V2	71.143
1	0 DEAD	1-0-DEAD	M3	214.6292
1	3 DEAD	1-3-DEAD	P	-20.21
1	3 DEAD	1-3-DEAD	V2	71.143
1	3 DEAD	1-3-DEAD	M3	15.1296
2	0 DEAD	2-0-DEAD	P	-108.857
2	0 DEAD	2-0-DEAD	V2	-20.21
2	0 DEAD	2-0-DEAD	M3	15.1296
2	6 DEAD	2-6-DEAD	P	-108.857
2	6 DEAD	2-6-DEAD	V2	51.79
2	6 DEAD	2-6-DEAD	M3	-79.6086
3	0 DEAD	3-0-DEAD	P	-51.79
3	0 DEAD	3-0-DEAD	V2	108.857
3	0 DEAD	3-0-DEAD	M3	230.6326
3	3 DEAD	3-3-DEAD	P	-51.79
3	3 DEAD	3-3-DEAD	V2	108.857
3	3 DEAD	3-3-DEAD	M3	-95.937

# E. Anexo: Resultados de OpenSees y SAP2000 organizados en Excel. Caso CE-B: CA-E/EF-M/EEF-A

δ [m]	Desplazamientos cuando E=2.00E+08kPa y T=20°C			Desplazamientos cuando E=1.56E+08kPa y T=316°C			Desplazamientos cuando E=9.80E+07kPa y T=538°C			Desplazamientos cuando E=4.40E+07kPa y T=649°C		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
U2	4.7288 E-03	6.7280 E-03	70.29%	5.6238 E-03	8.0290 E-03	70.04%	7.6080 E-03	1.0941 E-02	69.54%	1.2266 E-02	1.7872 E-02	68.63%
V2	-2.3726 E-05	-2.9000 E-05	81.81%	-3.1557 E-05	-3.9000 E-05	80.91%	-5.3693 E-05	-6.6000 E-05	81.35%	-1.3131 E-04	-1.6100 E-04	81.56%
θ2	-2.3737 E-03	3.3830 E-03	70.17%	-2.8527 E-03	4.1120 E-03	69.38%	-3.9570 E-03	5.8500 E-03	67.64%	-6.7748 E-03	1.0558 E-02	64.17%
U3	3.9861 E-03	5.5200 E-03	72.21%	4.6374 E-03	6.4240 E-03	72.19%	5.9332 E-03	8.2170 E-03	72.21%	8.1739 E-03	1.1251 E-02	72.65%
V3	-7.0638 E-05	-9.0000 E-05	78.49%	-8.7860 E-05	-1.1200 E-04	78.45%	-1.3190 E-04	-1.6900 E-04	78.05%	-2.6969 E-04	-3.4900 E-04	77.27%
θ3	-1.5374 E-03	1.7890 E-03	85.94%	-1.7269 E-03	1.9910 E-03	86.74%	-2.0127 E-03	2.2610 E-03	89.02%	-2.0504 E-03	2.0900 E-03	98.11%
U5	3.6186 E-03	4.9970 E-03	72.42%	4.2247 E-03	5.8600 E-03	72.09%	5.4316 E-03	7.5930 E-03	71.53%	7.5242 E-03	1.0630 E-02	70.78%
V5	-4.1485 E-05	-5.1000 E-05	81.34%	-4.2704 E-05	-5.2000 E-05	82.12%	-4.4908 E-05	-5.5000 E-05	81.65%	-4.7630 E-05	-5.8000 E-05	82.12%
θ5	-1.3159 E-03	1.4900 E-03	88.31%	-1.5848 E-03	1.8270 E-03	86.74%	-2.1241 E-03	2.5110 E-03	84.59%	-3.0771 E-03	3.7410 E-03	82.25%
U1	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
V1	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
θ1	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
U4	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
V4	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
θ4	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
U6	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
V6	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%
θ6	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%	0.0000 E+00	0.0000 E+00	100%

Acciones internas de fuerzas cuando E=2.00E+08kPa y T=20°C															
Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
X1 [kN]	25.1498	-24.8250	101.31%	133.1980	-138.9690	95.85%	74.8759	-76.0350	98.48%	65.8953	-68.5620	96.11%	43.9743	-43.1390	101.94%
Y1 [kN]	46.8015	41.0310	114.06%	25.1498	-24.8250	101.31%	67.3031	70.4070	95.59%	28.0257	-28.8610	97.11%	65.8953	68.5620	96.11%
M1 [kN-m]	141.5250	142.8616	99.06%	1.1200	1.0764	104.05%	147.1480	148.6032	99.02%	11.4600	-13.9156	82.35%	138.3800	138.6508	99.80%
X2 [kN]	-25.1498	-24.8250	101.31%	-133.1980	-138.9690	95.85%	-74.8759	-76.0350	98.48%	-65.8953	-68.5620	96.11%	-43.9743	-43.1390	101.94%
Y2 [kN]	-46.8015	41.0310	114.06%	46.8502	47.1750	99.31%	-67.3031	70.4070	95.59%	43.9743	43.1390	101.94%	-65.8953	68.5620	96.11%
M2 [kN-m]	-1.1200	1.0764	104.05%	-66.2211	-65.9714	100.38%	54.7611	-62.6169	87.45%	-59.3059	-56.7521	104.50%	59.3059	-67.0365	88.47%

Acciones internas de fuerzas cuando E=1.56E+08kPa y T=316°C															
Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
X1 [kN]	26.0911	-25.7150	101.46%	137.9800	-143.9730	95.84%	72.6426	-73.9600	98.22%	74.0140	-77.4240	95.60%	45.2662	-44.3250	102.12%
Y1 [kN]	-42.0203	36.0270	116.64%	26.0911	-25.7150	101.46%	-63.9657	66.5480	96.12%	45.2662	44.3250	102.12%	-74.0140	77.4240	95.60%
M1 [kN-m]	129.8880	131.1356	99.05%	3.8276	-1.4582	262.49%	136.4220	137.1526	99.47%	7.8054	-10.6589	73.23%	158.6390	160.0499	99.12%
X2 [kN]	-26.0911	-25.7150	101.46%	-137.9800	-143.9730	95.84%	-72.6426	-73.9600	98.22%	-74.0140	-77.4240	95.60%	-45.2662	-44.3250	102.12%
Y2 [kN]	42.0203	36.0270	116.64%	45.9089	46.2850	99.19%	63.9657	66.5480	96.12%	26.7338	-27.6750	96.60%	74.0140	77.4240	95.60%
M2 [kN-m]	-3.8276	-3.4582	110.68%	-63.2807	-63.1694	100.18%	55.4753	-62.4927	88.77%	-63.4029	-60.6096	104.61%	63.4029	-72.2232	87.79%

Acciones internas de fuerzas cuando E=9.80E+07kPa y T=538°C															
Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
X1 [kN]	27.8881	-27.4150	101.73%	147.1680	-153.6510	95.78%	68.5090	-70.1510	97.66%	89.9599	-94.9700	94.72%	47.6029	-46.4340	102.52%
Y1 [kN]	-32.8319	26.3490	124.60%	27.8881	-27.4150	101.73%	-57.2082	58.6800	97.49%	47.6029	46.4340	102.52%	-89.9599	94.9700	94.72%
M1 [kN-m]	107.5060	108.4228	99.15%	9.0107	-6.3271	142.41%	115.4440	114.6550	100.69%	1.5017	-5.2529	28.59%	198.7610	202.8064	98.01%
X2 [kN]	-27.8881	-27.4150	101.73%	-147.1680	-153.6510	95.78%	-68.5090	-70.1510	97.66%	-89.9599	-94.9700	94.72%	-47.6029	-46.4340	102.52%
Y2 [kN]	32.8319	26.3490	124.60%	44.1119	44.5850	98.94%	57.2082	58.6800	97.49%	24.3971	-25.5660	95.43%	89.9599	94.9700	94.72%
M2 [kN-m]	-9.0107	-6.3271	142.41%	-57.6820	-57.8371	99.73%	56.1803	-61.3863	91.52%	-71.1190	-67.8586	104.80%	71.1190	-82.1041	86.62%

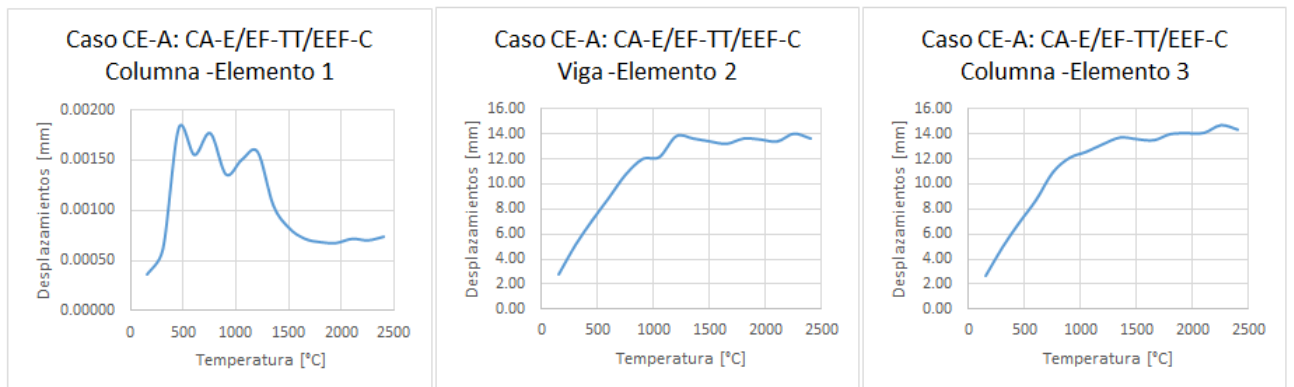
Acciones internas de fuerzas cuando E=4.40E+07kPa y T=649°C															
Ele	Elemento 1			Elemento 2			Elemento 3			Elemento 4			Elemento 5		
	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud	OpenSees	SAP2000	Similitud
X1 [kN]	30.6204	-29.9940	102.09%	161.4550	-168.8870	95.60%	62.8915	-65.1460	96.54%	116.521	-124.574	93.54%	50.4881	-48.8600	103.33%
Y1 [kN]	-18.5445	11.1130	166.87%	30.6204	-29.9940	102.09%	-44.9347	44.3130	101.40%	50.4881	-23.14	218.19%	-116.5210	124.5740	93.54%
M1 [kN-m]	72.5999	72.5021	100.13%	16.9663	-13.8303	122.67%	80.9559	77.5236	104.43%	-4.60451	-1.0984	419.20%	267.2380	276.7782	96.55%
X2 [kN]	-30.6204	-29.9940	102.09%	-161.4550	-168.8870	95.60%	-62.8915	-65.1460	96.54%	-116.521	-124.574	93.54%	-50.4881	-48.8600	103.33%
Y2 [kN]	18.5445	11.1130	166.87%	41.3796	42.0060	98.51%	44.9347	44.3130	101.40%	21.5119	48.86	44.03%	116.5210	124.5740	93.54%
M2 [kN-m]	-16.9663	-13.8303	122.67%	-49.2438	-49.8677	98.75%	53.8483	-55.4163	97.17%	-82.3239	-78.2571	105.20%	82.3239	-96.9432	84.92%



# F. Anexo: Manejo de resultados de OpenSees. Caso CE-A: CA-E/EF-TT/EEF-C

PÓRTICO CASO CE-A: CA-E/EF-TT/EEF-C					
Columna izquierda		Viga		Columna derecha	
Nodo 1050		Nodo 100		Nodo 2050	
150	0.00037	150	2.82	150	2.67
300	0.00062	300	5.18	300	4.95
450	0.00183	450	7.13	450	6.91
600	0.00156	600	8.94	600	8.72
750	0.00178	750	10.78	750	10.92
900	0.00136	900	12.01	900	12.08
1050	0.00151	1050	12.16	1050	12.56
1200	0.00159	1200	13.82	1200	13.18
1350	0.00106	1350	13.63	1350	13.70
1500	0.00083	1500	13.40	1500	13.57
1650	0.00072	1650	13.21	1650	13.48
1800	0.00069	1800	13.62	1800	13.97
1950	0.00068	1950	13.56	1950	14.04
2100	0.00072	2100	13.39	2100	14.07
2250	0.00071	2250	14.01	2250	14.68
2400	0.00074	2400	13.63	2400	14.33

PÓRTICO CASO CE-A: CA-E/EF-TT/EEF-C



# Bibliografía

- [1] *Dirección Nacional de Bomberos Colombia*. <https://dnbc.gov.co/>
- [2] *International Organization for Standardization*. <https://www.iso.org/about-us.html>. 1947
- [3] ABNT, Associação Brasileira de Normas T. *ABNT NBR 15200:2012 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – Procedimento*. 2012
- [4] ABNT, Associação Brasileira de Normas T. *ABNT NBR 14323:2013 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio*. 2013
- [5] ACI, American Concrete I. *ACI 216.1-97 Método normalizado para determinar la resistencia al fuego de las construcciones de hormigón y mampostería*. 1997
- [6] AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería S. *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10. Título: A, B, F, J, K*. 2010
- [7] AL-JABRI, Khalifa S.: Behavior of Steel-framed Buildings in a Fire. En: *Steel Structures* 7 (2007), p. 227–237
- [8] ALBERO, Vicente ; SERRA, E ; ESPINÓS, Ana ; ROMERO, Manuel L. ; HOSPITALER, Antonio: Innovative solutions for enhancing the fire resistance of slim-floor beams: Thermal experiments. En: *Journal of Constructional Steel Research* 165 (2020)
- [9] ARANCI, Asociación nacional de rociadores contra i.: *Guía de buenas prácticas para el desarrollo de proyectos de protección contra incendios*, 2021
- [10] ARANCI, Asociación nacional de rociadores contra i.: *Informe de gestión 2021*, 2021
- [11] ASTM, E119: Standard test methods for fire tests of building construction and materials ASTM Philadelphia, 2012
- [12] AUTODESK. *AutoCAD*. <https://www.autodesk.com/products/autocad>. Versión 19
- [13] AZEVEDO, Macksuel Soares d. ; MURAKAMI, Almir ; SILVA, Valdir P.: Segurança das estruturas de aço externas a edificações em situação de incêndio. En: *Rem: Revista Escola de Minas* 60 (2007), p. 295–301

- [14] BASCUÑÁN REYES, Diego: *Tecnologías constructivas para la protección frente al fuego en edificios de madera de mediana y gran altura*, Universitat Politècnica de Catalunya, Tesis de Grado, 2021
- [15] BUCHANAN, Andrew H. ; ABU, Anthony K.: *Structural design for fire safety*. John Wiley & Sons, 2017
- [16] OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA., The R. *OpenSees*. <https://opensees.berkeley.edu/>. 1999, 2000 versión 3.3.0
- [17] CHEN, HF ; PONTER, Alan R. ; AINSWORTH, RA: The linear matching method applied to the high temperature life integrity of structures. Part 1. Assessments involving constant residual stress fields. En: *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 83 (2006), Nr. 2, p. 123–135
- [18] CLEMENT, Gabriel V.: *Diseño básico de estructuras de acero de acuerdo con NSR-10*. Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010
- [19] COMMITTEE, Building Regulations A.: *2000 No. 2531 The Building Regulations 2000*, 2001
- [20] CRESPO, Marcelo. *Seguridad y Prevención*. <http://seguridadyprevencionmpc.blogspot.com/2016/06/nl-n11-300616.html>. 2016
- [21] CSI. *SAP2000*. <https://www.csiespana.com/software/2/sap2000>. Versión 19
- [22] DA CUNHA GOMES, Bruno M. *Caracterização mecânica, estabilidade térmica e reação ao fogo do bambu mossô*. 2019
- [23] DAI, Xu ; JIANG, Liming ; MACLEAN, JAMIE ; WELCH, STEPHEN ; USMANI, Asif: Implementation of a new design travelling fire model for global structural analysis. En: *the 9th International Conference on Structures in Fire*, 2016, p. 959–966
- [24] DUDLEY, Charles B. *American Society for Testing and Materials*. <https://www.astm.org/about/overview.html>. 1996
- [25] ENRIQUEZ, LI V. ; BOBADILLA, H G.: Introducción al análisis estructural con OpenSees. En: *Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, UNAM* (2020)
- [26] FERNANDÉZ, Fernando G. *Policías héroes anónimos del incendio al edificio Avianca*. <https://historiapolicianacionaldecolombia.blogspot.com/2017/03/heroes-anonimos-del-incendio-al.html>. 2017
- [27] FERREIRA, Flávio A. ; CLARET, Antonio M. ; SANTOLIN, Aldo: Determinação da distribuição de temperatura em perfis de aço parcialmente protegidos: método simplificado. En: *Rem: Revista Escola de Minas* 60 (2007), p. 645–655

- [28] GALES, John ; CHORLTON, Bronwyn ; JEANNERET, Chloe: The historical narrative of the standard temperature–time heating curve for structures. En: *Fire Technology* 57 (2021), Nr. 2, p. 529–558
- [29] GOUVEIA, Antônio Maria Claret de ; CARVALHO, Welber M.: Curva de resistência ao fogo de projeto para pilares de aço birrotulados e sem proteção. En: *Rem: Revista Escola de Minas* 56 (2003), p. 21–26
- [30] GOZÁLVEZ, JJ F. ; GISBERT, C F. ; SANTAFÉ, M R. ; ROMERO, FJ S. ; SOLER, JB T.: Resistencia al fuego de pórticos simples de acero a dos aguas. En: *Informes de la Construcción* 69 (2017), Nr. 545, p. e172–e172
- [31] HO, Don. *notepad plus*. <https://notepad-plus-plus.org/>. Versión 8.3.3
- [32] ISO: *Organización Internacional de normalización, ISO 834. Resistencia al fuego de materiales y elementos de construcción*, 2009
- [33] DE ARQUITECTURA E URBANISMO DO RIO DE JANEIRO, Conselho. *CAU/RJ*. <https://www.caurj.gov.br/conheca-o-projeto-de-reconstrucao-do-museu-nacional/>. 2021
- [34] JIANG, Jian ; JIANG, Liming ; KOTSOVINOS, Panagiotis ; ZHANG, Jian ; USMANI, Asif ; MCKENNA, Frank ; LI, Guo-Qiang: OpenSees software architecture for the analysis of structures in fire. En: *Journal of Computing in Civil Engineering* 29 (2015), Nr. 1, p. 04014030
- [35] JIANG, Jian ; USMANI, Asif: Modeling of steel frame structures in fire using OpenSees. En: *Computers & Structures* 118 (2013), p. 90–99
- [36] JIANG, Liming ; DAI, Xu ; USMANI, Asif ; KAMATH, Praveen: OpenSees-based integrated tool for modelling structures in fire. En: *The First International Conference on Structural Safety under Fire & Blast*, 2015, p. 461–468
- [37] KALOGEROPOULOS, Andreas ; DROSOPOULOS, Georgios A. ; STAVROULAKIS, Georgios E.: Thermal–stress analysis of a three-dimensional end-plate steel joint. En: *Construction and Building Materials* 29 (2012), p. 619–626
- [38] KHAN, Aatif A. ; USMANI, Asif ; TORERO, José Luis: Evolution of fire models for estimating structural fire-resistance. En: *Fire Safety Journal* 124 (2021), p. 103367
- [39] KHAN, Mustesin A. ; JIANG, Liming ; CASHELL, Katherine A. ; USMANI, Asif: Analysis of restrained composite beams exposed to fire using a hybrid simulation approach. En: *Engineering Structures* 172 (2018), p. 956–966

- [40] KHORASANI, Negar E. ; GARLOCK, Maria E. ; QUIEL, Spencer E.: Modeling steel structures in OpenSees: Enhancements for fire and multi-hazard probabilistic analyses. En: *Computers & Structures* 157 (2015), p. 218–231
- [41] KOELLER, Colégio. *Crônica: O futuro se tornando pó e a história se desfazendo.* <https://www.colegiokoelle.com.br/blog/cronica-o-futuro-se-tornando-po-e-a-historia-se-desfazendo/>, OPTlanguage = Portuguese. 2018
- [42] LAW, Margaret: Fire safety of external building elements. En: *Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, Second Quarter* (1978)
- [43] LI, B ; LIN, YQ ; ZHANG, HL ; MA, MJ: Fire behavior of the assembled monolithic hollow-ribbed slabs. En: *Advances in Civil Engineering* 2019 (2019)
- [44] LIMING, Jiang. *OpenSees For Fire.* <http://openseesforfire.github.io/about.html>. 2016
- [45] LUPO, Bianca M.: Patrimônio cultural e catástrofe: os concursos internacionais não-oficiais realizados para a Notre Dame de Paris após o incêndio de 2019. En: *Herança Naus* (2021)
- [46] MAZZONI, Silvia ; MCKENNA, Frank ; SCOTT, Michael H. ; FENVES, Gregory L. [u. a.]: OpenSees command language manual. En: *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center* 264 (2006), Nr. 1, p. 137–158
- [47] MCCORMAC, Jack: *Diseño de estructuras de acero.* Alfaomega Grupo Editor, 2012
- [48] NFPA. *National Fire Protection Association NFPA-101 Código de seguridad humana.* 2018
- [49] NTC, Normas Técnicas C.: *Elementos de construcción. ensayo de resitencia al fuego NTC 1480*, 1979
- [50] DE OLIVEIRA, Everton Breno dos S. ; MIRANDA, Lucas R.: Cuidados com estruturas de concreto em situação de incêndio. En: *RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218* 1 (2021), Nr. 1, p. E210934–E210934
- [51] PARKINSON, David L. *Performance-Based Design of Structural Steel for Fire Conditions.* 2009
- [52] PAÍS, El. *La restauración de Notre Dame toma impulso tres años después de su incendio.* <https://elpais.com/cultura/2022-04-15/la-restauracion-de-notre-dame-toma-impulso-tres-anos-despues-de-su-incendio.html>. 2022

- [53] PHAN, Long T. ; MCALLISTER, Therese P. ; GROSS, John L. ; HURLEY, Morgan J.: Best practice guidelines for structural fire resistance design of concrete and steel buildings. En: *NIST technical note* 1681 (2010), p. 199
- [54] RESTREPO, Javier D. *El incendio del Edificio Avianca (1973)*. <https://www.senalmemoria.co/piezas/incendio-edificio-avianca-1973>. 1984
- [55] REYES, Diego Ignacio B. *Tecnologías constructivas para la protección frente al fuego en edificios de madera de mediana y gran altura*. 2021
- [56] ROLDÁN, Juan David G.: *Guía técnica ICCA 4 Diseño de estructuras de acero en condición de incendio*, 2020
- [57] RUVALCABA-AYALA, Fabián René ; COVARRUBIAS-NAVARRO, Mario: La Ingeniería Estructural de Fuego un enfoque nacional y ejemplo de aplicación. En: *Ingeniería, investigación y tecnología* 18 (2017), Nr. 3, p. 253–264
- [58] SEMANA. *La bomba de El nogal*. <https://www.semana.com/para-no-repetir-bomba-de-club-el-nogal/459536/>. 2016
- [59] SILVA, Valdir P.: *Estruturas de aço em situação de incêndio*. (2004)
- [60] SIMMS, WI ; NEWMAN, GM: *Single storey steel framed buildings in fire boundary conditions*. Steel Construction Institute, 2002
- [61] STECKERL. *Catálogos: Perfil H Europeode Ala Ancha -HE y Perfil I Livianano de alas paralelas -IPE*. <https://steckerlaceros.com>. 2017
- [62] SULIK, Paweł ; SEDŁAK, Bartłomiej ; KINOWSKI, Jacek: Study on critical places for maximum temperature rise on unexposed surface of curtain wall test specimens. En: *MATEC web of conferences* Vol. 46 EDP Sciences, 2016, p. 02006
- [63] SÁNCHEZ, Belén B.: *Intervención en incendios interiores. Guía Visual para Bomberos*, 2017
- [64] TOUBIA, Elias A. ; SIHN, Sangwook ; PITZ, Jeremy ; VERNON, Jonathan P. ; FLORES, Mark ; PARKS, Stetson: Thermal response and edgewise compression failure of thermally degraded sandwich composite structures. En: *Composite Structures* 256 (2021)
- [65] UNE-EN, 1991-1-2: *Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 1-2: Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego*, 2004
- [66] UNE-EN, 1993-1-2: *Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-2: Reglas para el proyecto de estructuras de acero frente al fuego*, 2005

- [67] WALLS, Richard S. ; VILJOEN, Celeste ; DE CLERCQ, Hennie: Analysis of structures in fire as simplified skeletal frames using a customised beam finite element. En: *Fire technology* 54 (2018), Nr. 6, p. 1655–1682
- [68] WIKIPEDIA. *Incendio de la catedral de Notre Dame de París* — *Wikipedia, La enciclopedia libre*. [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Incendio\\_de\\_la\\_catedral\\_de\\_Notre\\_Dame\\_de\\_Par%C3%ADs&oldid=142931321](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Incendio_de_la_catedral_de_Notre_Dame_de_Par%C3%ADs&oldid=142931321). 2019