



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Uso de métodos analíticos en el diseño estructural de una edificación de acero de uso mixto en situación de incendio

Jadehr Francisco Ariza Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil
Medellín, Colombia
2019

Uso de métodos analíticos en el diseño estructural de una edificación de acero de uso mixto en situación de incendio

Jadehr Francisco Ariza Rodríguez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería-Estructuras

Director:

Msc. Luis Garza Vásquez

Codirector (a):

Ph.D., Juan David Gómez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil
Medellín, Colombia2019

A mis padres que me inculcaron la pasión por el estudio y me motivaron a luchar para alcanzar las metas sin importar que tan lejos pudieran estar.

A mi abuela Jobita que mientras elaboraba esta tesis pasó por tiempos difíciles de salud, pero me enseñó que hay que luchar siempre para salir adelante sin importar las dificultades.

A mi familia

Agradecimientos

Al profesor Luis Garza por la motivación para estudiar y desarrollar trabajos que sirven de guía para el aprendizaje de nuevos conocimientos.

Al Ingeniero Juan David Gómez, por su dedicación y aporte de su conocimiento en el desarrollo de este trabajo.

A Industrias del Hierro INHIERRO S.A. quien motivada por su compromiso misional me ha brindado el apoyo para mi formación y capacitación profesional.

A la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia por ser mi segunda alma mater en mi formación en el mundo de la ingeniería estructural.

Resumen

En el diseño estructural de una edificación en condición de incendio se pueden usar dos metodologías: la prescriptiva y la analítica. En virtud de que el diseño prescriptivo resulta demasiado oneroso y poco confiable para la protección pasiva de estructuras de acero, en este trabajo se presenta una metodología analítica y racional, basada en el riesgo de ocurrencia de incendio, de acuerdo a los métodos planteados en el Eurocódigo y en la normativa americana con fines de difusión y con el objeto de facilitar su comprensión e implementación en el diseño estructural.

Palabras clave: método prescriptivo, método analítico.

Abstract

In the structural design of a building in a fire condition, two methodologies can be used: prescriptive and analytical. Because the prescriptive design is too expensive and unreliable for the passive protection of steel structures, this paper presents an analytical and rational methodology, based on the risk of fire occurrence, according to the methods proposed in the Eurocode and in American regulations for dissemination purposes and in order to facilitate its understanding and implementation in structural design

Keywords: prescriptive methods, analytical methods

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Lista de figuras.....	10
Lista de tablas	13
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	16
Introducción	19
OBJETIVOS.....	20
METODOLOGÍA	21
1. Introducción al análisis de estructuras en situación de incendio	23
2. Análisis térmico.....	25
2.1 Curvas nominales Temperatura-Tiempo	25
2.1.1 La curva estándar Temperatura-Tiempo:	25
Esta curva se ha usado históricamente y todavía se sigue usando en las pruebas de fuego estándar (ISO 834, 1999). También se le conoce como de fuego celulósico, para diferenciarla del de hidrocarburos.	25
2.1.2 La curva externa de Temperatura-Tiempo:	26
2.1.3 La curva de hidrocarburos:.....	26
Es usada para representar los efectos de un incendio generado por hidrocarburos.	26
2.2 Curvas paramétricas de temperatura.....	29
2.2.1 Parámetro <i>b</i> :	29
2.2.2 Parámetro <i>O</i> (factor de aberturas):.....	30
2.2.3 Densidad de carga de fuego:	31
2.2.4 Densidad de carga de fuego relacionada al área total:.....	34
2.3 Tiempo equivalente de exposición al fuego	38
2.4 Modelos de Zona	40
2.5 Modelos CFD (<i>Computational Fluid Dynamics</i>).....	40
2.6 Fuegos localizados	41
2.6.1 Método de Heskestad	41
2.6.2 Método de Hasemi	43
3. Análisis de temperatura en secciones de acero	46

3.1	Factor de Forma AmV	46
3.2	Calor específico ca	49
3.3	Temperatura en elementos sin protección expuestos al fuego	49
3.4	Temperatura en elementos protegidos expuestos al fuego	53
4.	Resistencia al fuego de miembros estructurales	57
4.1	Reducción del límite elástico y módulo de elasticidad	57
4.2	Métodos de análisis simplificados.....	61
4.2.1	Combinación de carga	61
4.2.2	Miembros a tensión	62
4.2.3	Miembros a compresión.....	62
4.2.4	Miembros a flexión.....	63
4.2.5	Miembros en sección compuesta a flexión.....	64
4.2.6	Miembros a cortante	66
4.2.7	Miembros solicitados por fuerzas combinadas y por torsión	66
4.2.8	Diseño losas en <i>Steel deck</i>	66
4.2.8.1	Resistencia a momento positivo	67
4.2.8.2	Resistencia a momento negativo	70
4.2.8.3	Espesor equivalente de losa	72
5.	Resistencia al fuego de conexiones.....	74
5.1	Resistencia de pernos y soldaduras a temperaturas elevadas	74
5.2	Temperatura de las conexiones en situación de incendio.....	77
6.	Análisis Prescriptivo según NSR-10(2010)	79
6.1	Clasificación de la edificación por grupo de Uso.....	79
6.2	Clasificación de la edificación en función del riesgo de pérdida de vidas humanas o amenaza de combustión (J.3.3).....	80
6.2.1	Categoría I: Comprende las edificaciones con mayor riesgo de pérdidas de vidas humanas o con alta amenaza de combustión.	80
6.2.2	Categoría II: Comprende las edificaciones de riesgo intermedio.....	80
6.2.3	Categoría III: Comprende las edificaciones con baja capacidad de combustión.	80
6.3	Resistencia requerida contra el fuego	82
7.	Diseño estructural en situación de incendio aplicando métodos analíticos	83
7.1	Descripción de la edificación	83
7.1.1	Definición Arquitectónica	83
7.1.2	Definición Estructural	85
7.1.3	Cargas	85
7.1.4	Definición Sísmica	85
7.1.5	Definición de Sistema estructural.....	86
7.2	Zona comercial.....	89
7.2.1	Características del recinto	89
7.2.2	Cálculo de curva paramétrica	90
7.2.3	Cálculo estructural de elementos en situación de incendio Zona Comercial	94
7.3	Zona de oficinas.....	127
7.3.1	Características del recinto	127
7.3.2	Cálculo de curva paramétrica	127

7.3.3	Cálculo estructural de elementos en situación de incendio.....	131
7.4	Análisis de edificación por Método de Tiempo Equivalente.....	147
7.4.1.1	Zona Comercial.....	147
7.4.1.2	Zona Oficinas.....	152
8.	Análisis prescriptivo según NSR-10(2010) para el ejemplo de aplicación	157
8.1	Cálculo de espesores de material para protección basado en ensayos.	159
8.1.1	Análisis para columnas	159
8.1.2	Análisis para vigas de sistema de piso.....	161
8.2	Diseño de Losa en <i>Steel Deck</i>	163
8.2.1	Zona Comercial.....	163
8.2.1.1	Resistencia al fuego de acuerdo al aislamiento térmico	164
8.2.1.2	Resistencia a momento positivo	164
8.2.1.3	Resistencia a momento negativo	166
8.2.2	Zona de oficinas.....	170
8.2.2.1	Resistencia al fuego de acuerdo al aislamiento térmico	170
8.2.2.2	Resistencia a momento positivo	171
8.2.2.3	Resistencia a momento negativo	172
8.3	Cálculo de espesores de protección para elementos estructurales a partir de la curva estándar.....	177
8.3.1	Zona Comercial.....	177
8.3.2	Zona de Oficinas.....	181
8.3.3	Comparación de resultados.....	184
9.	Conclusiones y recomendaciones.....	186
9.1	Conclusiones	186
9.2	Recomendaciones	187
	Bibliografía	188

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Modelos de cálculo para resistencia al fuego en estructuras (Torres, 2017)	24
Figura 2-1: Comparación entre curvas nominales de Temperatura Vs Tiempo (Phan, McAllister, Gross, & Hurley, 2010)	27
Figura 2-2. Fases de un fuego natural, comparado con la curva estándar de fuego ISO 834(Fernández, 2003)	28
Figura 2-3. Modelo de fuego localizado de llama sin alcanzar el techo (Franssen & Real, 2015)	42
Figura 2-4: Método Hasemi	44
Figura 3-1. Influencia de la forma del perfil en el efecto sombra	50
Figura 4-1: Factores de reducción de resistencia para aceros estructurales (SS) y armaduras conformadas en frío (Rft) a temperaturas elevadas(Torres, 2017)	57
Figura 4-2: Parámetros de idealización de la curva esfuerzo-deformación a temperaturas elevadas (Takagi & Deierlein, 2007)	60
Figura 4-3: Definición de las dimensiones geométricas de losa en lámina colaborante(Lennon, Moore, Wang, & Bailey, 2007)	67
Figura 4-4: Definición de u_1, u_2 y u_3 (Lennon et al., 2007)	69
Figura 4-5: Puntos característicos de las isotérmicas	70
Figura 4-6: Dimensiones de la sección transversal de la losa compuesta(Lennon et al., 2007)	73
Figura 5-1: Factores de reducción para el acero estructural, pernos y soldaduras (Franssen & Real, 2015)	76
Figura 5-2: Variación de la temperatura en altura de acuerdo a la ubicación de la conexión (Franssen & Real, 2015)	78
Figura 7-1: Fachada por ejes 1 y 3	84
Figura 7-2: Fachadas Laterales de la edificación	84
Figura 7-3: Planta tipo de la edificación	86
Figura 7-4: Elevaciones Típicas de los PAC-DES	87
Figura 7-5: Modelo 3D de la estructura principal de la edificación.	88
Figura 7-6: Curva Paramétrica zona comercial	94
Figura 7-7: Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W12X96 sin protección.	103
Figura 7-8: Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W10X49 sin protección	105

Figura 7-9: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W12X96 protegido	108
Figura 7-10: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W10X49 protegido	109
Figura 7-11: Sistema de piso (vigas y viguetas) de la zona comercial	110
Figura 7-12: Sección de losa en <i>Steel deck</i>	110
Figura 7-13: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W14X22 sin protección	113
Figura 7-14: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W14X22 protegido	114
Figura 7-15: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W18X35 sin protección	117
Figura 7-16: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W18x35 protegido	118
Figura 7-17: Ubicación de pernos en conexión a cortante de W14x22	119
Figura 7-18: Geometría de conexión en cortante de W14x22 a W18x35	120
Figura 7-19: Ubicación de pernos en conexión a cortante de W18x35	123
Figura 7-20: Geometría de conexión en cortante de W18x35 a columna	124
Figura 7-21: Curva paramétrica Temperatura vs Tiempo zona de oficinas	131
Figura 7-22: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W12X96 sin protección pasiva	133
Figura 7-23: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W10X49 sin protección pasiva	135
Figura 7-24: Sección de losa en <i>Steel deck</i> de oficinas	137
Figura 7-25: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W14x22 sin protección pasiva	139
Figura 7-26: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W18X35 sin protección pasiva	141
Figura 7-27: Distribución de pernos en conexión a cortante W18x35	143
Figura 7-28: Geometría de conexión en cortante de W18x35 a columna zona de oficinas	144
Figura 7-29: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W12X96 protegido	149
Figura 7-30: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W10X49 protegido	150
Figura 7-31: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W14X22 protegido	150
Figura 7-32: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W18X35 protegido	151
Figura 7-33: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W12X96 protegido	153
Figura 7-34: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W10X49 protegido	154
Figura 7-35: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W14X22 protegido	155

Figura 7-36:	Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W18X35 protegido	156
Figura 8-1.	Idealización del <i>Steel deck</i> como viga continua	169
Figura 8-2:	Idealización del <i>Steel deck</i> como viga continua.....	176
Figura 8-3:	Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W12X96 protegido	178
Figura 8-4:	Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W10X49 protegido	179
Figura 8-5:	Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W14X22 protegido	179
Figura 8-6:	Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W18X35 protegido	180
Figura 8-7:	Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W12X96 protegido	181
Figura 8-8:	Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W10X49 protegido	182
Figura 8-9:	Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W14x22 protegido	183
Figura 8-10:	Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W18X35 protegido	183

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1 Coeficiente de transferencia de calor por convección (Franssen & Real, 2015)	29
Tabla 2-2. Densidades de carga de fuego q_f, k [MJ/m^2] para diferentes actividades (Torres, 2017)	32
Tabla 2-3. Coeficientes δq_1 y δq_2 (Torres, 2017).....	33
Tabla 2-4. Coeficientes δn (Torres, 2017).....	33
Tabla 2-5: Valor de t_{lim} como función de la tasa de crecimiento (Franssen & Real, 2015).....	36
Tabla 2-6. Factor de conversión kb en función de las propiedades térmicas de la envolvente (Torres, 2017)	38
Tabla 2-7. Valores de kc según el material estructural (EN1991-1-2, 2004).....	39
Tabla 3-1. Definición de Factores de sección para miembros de acero sin protección (Franssen & Real, 2015)	47
Tabla 3-2. Definición de Factores de sección para miembros de acero con protección(Franssen & Real, 2015)	48
Tabla 3-3: Valor de factor de sección $AmVcaja$ (Franssen & Real, 2015).....	51
Tabla 3-4: Coeficientes de emisividad εF (ANSI/AISC 360, 2016)	53
Tabla 4-1: Propiedades del acero a temperaturas elevadas (Tabla F.2.18.2-1 (NSR-10(2010),2010)).....	58
Tabla 4-2.: Factor de retención $r(T)$ para miembros de sección compuesta sometidos a flexión (ANSI/AISC 360, 2016)	65
Tabla 4-3.: Coeficientes para determinar la resistencia al fuego de acuerdo al aislamiento térmico (EN1994-1-2, 2005)	67
Tabla 4-4: Coeficientes para determinar la temperatura (Lennon et al., 2007).....	68
Tabla 4-5: Coeficientes para determinar la temperatura en las barras de refuerzo (Lennon et al., 2007)	69
Tabla 4-6: Coeficientes para determinar la temperatura límite (Lennon et al., 2007)	71
Tabla 4-7. Espesor mínimo efectivo en función de la resistencia a la curva de fuego estándar (EN1994-1-2, 2005).	73

Tabla 5-1: Propiedades de los pernos de alta resistencia de los grupos A y B a temperaturas elevadas (NSR-10, 2010).....	74
Tabla 5-2: Factores de reducción para tornillos y soldaduras a temperaturas elevadas (Franssen & Real, 2015).....	75
Tabla 6-1. Grupos y subgrupos de ocupación (Tabla J.1.1-1).....	80
Tabla 6-2. Clasificación de resistencia contra el fuego de acuerdo con su uso, área construida y número de pisos (Tabla J.3.3-1)	81
Tabla 6-3. Clasificación de resistencia contra el fuego de acuerdo con su uso, densidad de carga combustible y el número de pisos.	81
Tabla 6-4: Resistencia requerida al fuego normalizado NTC 1480 (ISO 834), en horas, de elementos de una edificación.....	82
Tabla 7-1. Características de los materiales de piso, techo y muros.....	89
Tabla 7-2. Cálculo de factor b de curva paramétrica.....	91
Tabla 7-3. Solicitación de cargas en columnas del primer nivel de la edificación.....	95
Tabla 7-4. Propiedades geométricas del perfil W12x96	95
Tabla 7-5: Propiedades geométricas del perfil W10x49	95
Tabla 7-6. Variación de la temperatura en el perfil sin protección.....	97
Tabla 7-7: Mayores solicitaciones de carga en columnas	107
Tabla 7-8. Propiedades de sección W14x22.....	111
Tabla 7-9. Propiedades de la sección W18x35.....	115
Tabla 7-10: Factores de reducción por temperatura para pernos y soldaduras de la conexión a cortante W14x22.....	120
Tabla 7-11: Datos de entrada para el diseño de la conexión.....	121
Tabla 7-12: Verificación de estados límites de la conexión a cortante W14x22.....	122
Tabla 7-13: Factores de reducción por temperatura para pernos y soldaduras de la conexión a cortante W18x35.....	124
Tabla 7-14: Datos de entrada para el diseño de la conexión a cortante W18x35 ...	125
Tabla 7-15: Verificación de estados límites de la conexión a cortante W18x35.....	126
Tabla 7-16: Solicitaciones de carga en columnas de oficinas.....	132
Tabla 7-17: Factores de reducción de capacidad de pernos y soldaduras en conexión a cortante de W18x35.....	144
Tabla 7-18: Datos de entrada para el diseño de la conexión a cortante de W18x35 a columna	145
Tabla 7-19: Verificación de estados límites en diseño de conexión a cortante.....	146
Tabla 8-1: Categorías de la edificación de acuerdo a su uso.....	157
Tabla 8-2: Clasificación según uso y riesgo.....	158
Tabla 8-3: Valores W/D para columnas	159
Tabla 8-4. Espesores mínimos de material de protección en perfiles según UL N782	161
Tabla 8-5. Valores W/D para vigas de sistema de piso.....	162
Tabla 8-6: Propiedades geométricas de <i>Steel deck</i>	163
Tabla 8-7: Distancia desde la lámina de <i>Steel deck</i> hasta el refuerzo positivo del valle	163

Tabla 8-8:	Cálculo de resistencia de cada componente de la losa	165
Tabla 8-9:	Capacidad a momento positivo de la losa de <i>Steel deck</i>	165
Tabla 8-10:	Coordenadas de los 4 punto de la Isoterma.....	167
Tabla 8-11:	Propiedades geométricas de <i>Steel deck</i>	170
Tabla 8-12:	Cálculo de resistencia de cada componente de la losa.....	171
Tabla 8-13:	Capacidad a momento positivo de la losa de <i>Steel deck</i>	172
Tabla 8-14:	Coordenadas de los 4 punto de la Isoterma.....	174
Tabla 8-15:	Espesores de protección pasiva requeridos en perfiles de acero con diferentes métodos.....	184
Tabla 8-16:	Comparación de Metodologías de diseño.....	185

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término
A_m	Área de superficie de un elemento expuesto a flujo de calor
a_c	Coeficiente de transferencia de calor por convección
a_r	Coeficiente de transferencia de calor por radiación
A_m/V	Factor de sección para secciones sin protección
A_p/V	Factor de sección para secciones con protección
$\left[\frac{A_p}{V}\right]_{caja}$	Factor de sección tipo caja para cálculo de efecto sombra
b	Parámetro de material en muros
c_a, c_s	Calor específico del acero
c_p	Calor específico de material de protección
d_p	Espesor del material de protección
E	Módulo de elasticidad del acero
F_u	Esfuerzo último del acero a temperatura ambiente (20°C)
$F_{u,\theta}$	Esfuerzo último del acero a una temperatura θ

Símbolo	Término
F_y	Esfuerzo de fluencia del acero a temperatura ambiente (20°C)
$F_{y,\theta}$	Esfuerzo de fluencia del acero a una temperatura θ
\dot{h}_{net}	Flujo de calor neto en la superficie de un elemento de acero
h_{eq}	Altura promedio de las aberturas verticales
k	Factor multiplicador en la curva paramétrica de fuego
$k_{b,\theta}$	Factor de reducción para pernos
$k_{E,\theta}$	Factor de reducción para el módulo de elasticidad
k_{sh}	Factor de corrección por el efecto sombra
$k_{w,\theta}$	Factor de reducción para soldaduras
$k_{y,\theta}$	Factor de reducción para el esfuerzo de fluencia
O	Factor de abertura
t^*	Tiempo ampliado en curvas paramétricas
T_F	Temperatura del incendio
T_s	Temperatura del acero
V	Volumen del elemento por unidad de longitud

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término
α_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección
ε	Emisividad

Símbolo	Término
ε_f	Emisividad de un incendio
ε_m	Superficie de emisividad de un elemento
θ_g	Temperatura del gas
θ_m	Temperatura de la superficie del elemento de acero
λ	Conductividad térmica
ρ_a	Densidad del acero
σ	Constante de Stephan-Boltzmann ($5.67 * 10^{-8} W/m^2 K^4$)
Γ	Coefficiente de expansión en un modelo de curvas paramétricas
Δ	Prefijo de incremento
Φ	Factor de configuración geométrica

Abreviaturas

Abreviatura Término

RHR *Rate of Heat Release*

AISC *American Institute of Steel Construction*

Introducción

En Colombia la construcción de edificaciones en estructura de acero ha aumentado en los últimos años debido a las ventajas que presentan, como la disminución en tiempos de construcción y el ahorro en la cimentación, debido a que son más livianas que las edificaciones convencionales.

Una de las desventajas competitivas que eventualmente tienen este tipo de construcciones son los costos de la protección contra incendio, principalmente porque no se realiza un estudio completo y detallado de la protección pasiva.

Para el diseño estructural de una edificación en condición de incendio se pueden usar dos metodologías: la prescriptiva y la analítica.

El enfoque prescriptivo se centra en seguir una curva normalizada Temperatura-Tiempo, sin importar las características de la edificación y el entorno, a partir de ésta se determinan los requerimientos de resistencia de los elementos estructurales.

Seguir esta metodología además de no evaluar las condiciones reales del escenario de incendio, conlleva a elevar los costos de las edificaciones en estructura de acero, debido a que los resultados son muy conservadores en espesores de los materiales de protección, o da lugar al uso inapropiado de los mismos para proteger una estructura ante condiciones de incendios de muy baja probabilidad de suceso (Torres, 2017).

En cambio, el objetivo de usar métodos analíticos es diseñar las medidas de protección acordes para cada estructura en particular, partiendo de un análisis probabilístico del riesgo y las consecuencias que pueden generar los diferentes escenarios de incendio y a partir de esta información desarrollar la simulación real de los incendios, el estudio de la transferencia de calor en los elementos estructurales y el análisis termo-mecánico de la estructura para garantizar la integridad y evitar el colapso en una situación de incendio en cumplimiento de las combinaciones de carga establecidas en la NSR-10(2010).

OBJETIVOS

- **OBJETIVO GENERAL**

Aplicar métodos analíticos en el análisis y diseño estructural de una edificación de acero de uso mixto en situación de incendio.

- **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar un análisis térmico aplicando varias metodologías como son: curvas paramétricas y tiempo equivalente para determinar las curvas tiempo vs temperatura de acuerdo al uso de la edificación.
- Calcular el espesor de protección pasiva de acuerdo a sus propiedades térmicas para los elementos estructurales de la edificación y compararlos con los obtenidos en un análisis prescriptivo.
- Plantear unos procedimientos que sirvan de guía a los diseñadores estructurales para el análisis en situación de incendio aplicando métodos analíticos.

METODOLOGÍA

- **Revisión Bibliográfica:** Se realizará una búsqueda y recopilación sistemática de artículos científicos, libros, normas nacionales e internacionales con el objetivo de contar con información actualizada y que sustente los métodos analíticos usados en el diseño estructural de edificación de uso mixto en situación de incendio.
- **Elaboración del Marco Teórico:** basado en la revisión bibliográfica, se debe estudiar y mostrar en el trabajo el comportamiento del fuego y las acciones térmicas (fuego localizado, fuego desarrollado), curva de fuego estándar, curva de fuego natural, el concepto de temperatura crítica y la resistencia de los elementos metálicos a altas temperaturas.
De igual forma, mostrar las alternativas de protección pasiva que se encuentran en el medio.
- **Determinar los principales métodos analíticos:** a partir de la revisión de literatura realizada se estudiarán los procedimientos más usados internacionalmente en el diseño estructural de edificaciones en situación de incendio para luego determinar si pueden ser aplicables dentro del marco de la norma NSR-10 y de esta manera aplicar estos métodos al edificio en estudio.
- **Modelación, análisis y diseño estructural sin considerar situación de incendio:** Se realizará el diseño estructural de un edificio metálico de uso mixto de varios pisos de acuerdo a los requerimientos establecidos en la norma NSR-10, con ayuda del software ETABS.
- **Desarrollar procedimientos guía:** a partir de los métodos analíticos definidos en los pasos anteriores, se desarrollará una serie de procedimientos que permitan analizar y diseñar la estructura en situación de incendio y que cumpla los requisitos normativos.

- **Aplicar procedimientos guía en diseño estructural:** apoyados en los procedimientos definidos, y teniendo el diseño estructural inicial de la edificación, se procede realizar los análisis requeridos para la edificación de uso mixto en situación de incendio, determinando la protección pasiva que requiere si es el caso, en varias alternativas.

1.Introducción al análisis de estructuras en situación de incendio

En la literatura se encuentran pautas definidas por normas internacionales para el análisis de las estructuras de acero en situación de incendio de las cuales las más representativas son las europeas y las americanas.

En 1918 la American Society for Testing Materials (ASTM E119, 2002) establece la curva tiempo-temperatura; esta curva ha sido adaptada por numerosos países presentando pequeñas variaciones (Boring et al., 1981), como es el caso de la establecida por la *International Organization for Standardization* (ISO 834, 1999). Esta curva estándar de tiempo-temperatura permitió a la industria de la construcción determinar la clasificación de resistencia al fuego de un elemento estructural en función del tiempo de falla en un horno de prueba.

En las últimas décadas, Estados Unidos lidera en América las investigaciones relacionadas con la ingeniería de fuego, cuenta con entidades que desarrollan normativas para definir los criterios de protección contra el fuego en las estructuras de acero, como lo es la *National Fire Protection Association*- NFPA quien ha publicado varias normas para la protección contra fuego, ejemplo de ellas son: NFPA 1, Fire Code, NFPA 3, *Recommended Practice for Commissioning of Fire Protection and Life Safety Systems*, NFPA 101, *Life Safety Code*, NFPA 251, *Standard for Determination of Fire Loads for Use in Structural Fire Protection Design* y la NFPA 5000, *Building Construction and Safety Code*.

Europa también tiene grupos de investigación que se dedican a estudiar el comportamiento de las estructuras de acero en situación de incendio. Lo anterior se debe a los acontecimientos catastróficos que han tenido que afrontar a causa de los incendios. Todas estas investigaciones han llevado a que tengan normativas como es el caso del

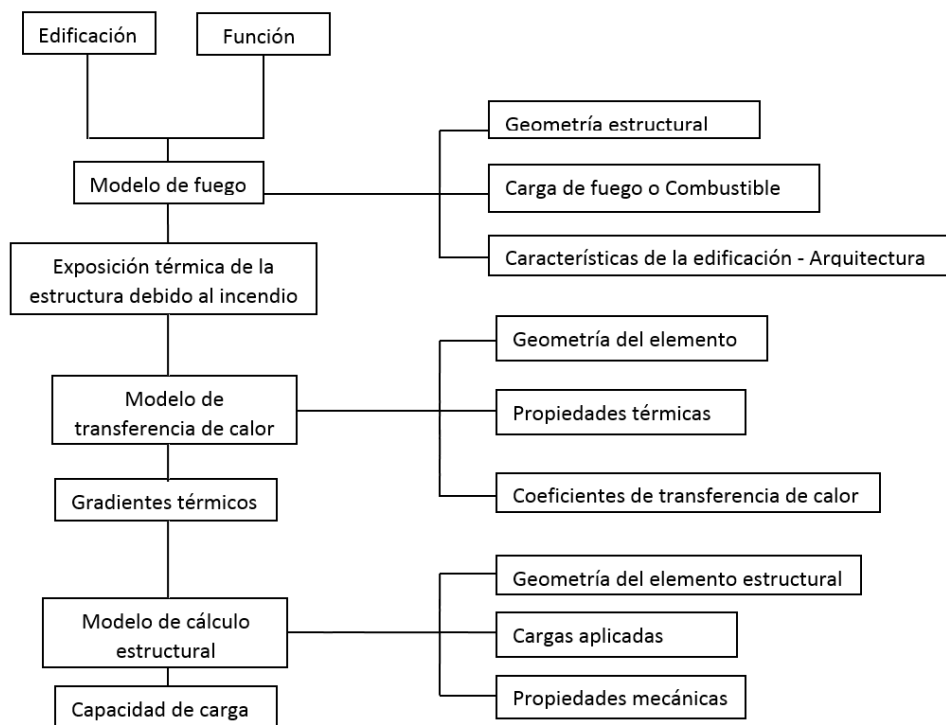
Eurocódigo, el cual estipula los requisitos que se deben cumplir en el diseño de las estructuras de acero incluyendo la protección contra fuego.

Varios países latinoamericanos toman como referencia las normas americanas y las europeas como base para definir sus códigos de construcción. Colombia es uno de ellos, donde para el diseño de las estructuras de acero toma como referencia el *American Institute of Steel Construction (ANSI/AISC 360, 2016)*

En cuanto al Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (NSR-10, 2010), establece en su título F los lineamientos de diseño estructural de edificaciones en acero, así como en su título J, define los requerimientos mínimos en cuanto a la protección de las estructuras frente a la acción del fuego.

La NSR-10(2010), también permite diseño con modelos de cálculo simplificados o avanzados. Estos modelos deben considerar los escenarios de fuego, las características de los elementos estructurales y el comportamiento de los materiales a altas temperaturas.

Figura 1-1. Modelos de cálculo para resistencia al fuego en estructuras (Torres, 2017)



2. Análisis térmico

Este análisis tiene como objetivo evaluar el desarrollo del incendio y predecir las acciones térmicas (temperatura del gas, flujo de calor, entre otras). Para este análisis se pueden tener varias metodologías como lo son: curvas estándar, curvas paramétricas, tiempo equivalente, modelos de zona, modelos avanzados.

2.1 Curvas nominales Temperatura-Tiempo

Son funciones analíticas y se llaman nominales porque no representan un fuego real. Estas son consideradas como funciones convencionales o arbitrarias.

La normativa del Eurocódigo 1 propone tres tipos de curvas nominales:

2.1.1 La curva estándar Temperatura-Tiempo:

Esta curva se ha usado históricamente y todavía se sigue usando en las pruebas de fuego estándar (ISO 834, 1999). También se le conoce como de fuego celulósico, para diferenciarla del de hidrocarburos.

Esta curva está dada por la Ecuación (2.1)

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2.1)$$

Donde,

θ_g = Temperatura del gas [°C]

t = Tiempo de exposición al fuego [min]

La curva estándar definida en ASTM E119 (2019) es similar a la expuesta anteriormente. La siguiente Ecuación es una aproximación de dicha curva:

$$\theta_g = 20 + 750 \left(1 - e^{-3.79553\sqrt{t_h}} \right) + 170.41\sqrt{t_h} \quad (2.2)$$

Donde,

t_h =Tiempo [horas]

2.1.2 La curva externa de Temperatura-Tiempo:

Es usada para analizar la parte externa de los muros expuestos al fuego desde diferentes partes de la fachada. Esta curva poco se usa en el análisis de estructuras de acero.

Esta curva está dada por la Ecuación (2.3)

$$\theta_g = 20 + 660(1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t}) \quad (2.3)$$

2.1.3 La curva de hidrocarburos:

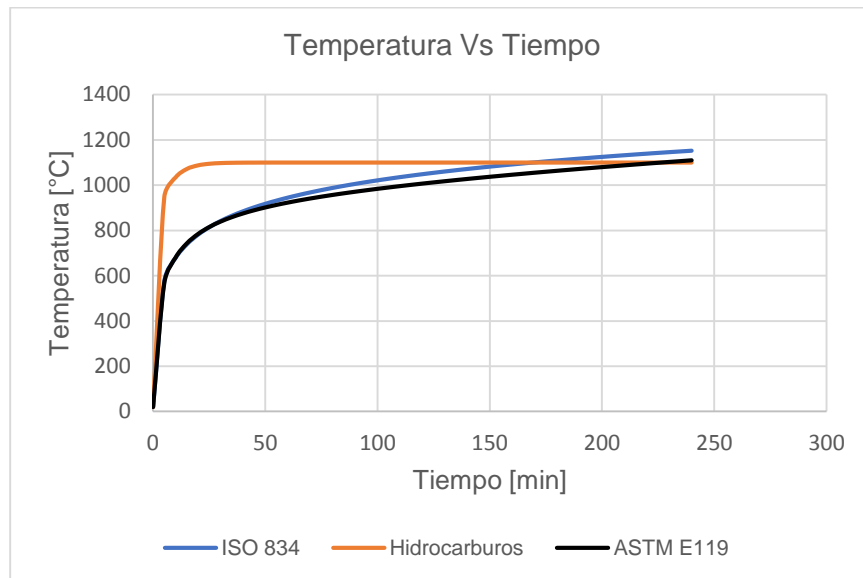
Es usada para representar los efectos de un incendio generado por hidrocarburos.

Esta curva está dada por la Ecuación (2.4)

$$\theta_g = 20 + 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) \quad (2.4)$$

En la Figura 2-1 se muestra una comparación de dos curvas estándar y la de hidrocarburos. Se puede observar que la curva de hidrocarburos incrementa rápidamente y libera un valor constante de 1100°C después de media hora mientras que las curvas estándar tienen un crecimiento no tan rápido, pero siguen creciendo en función del tiempo.

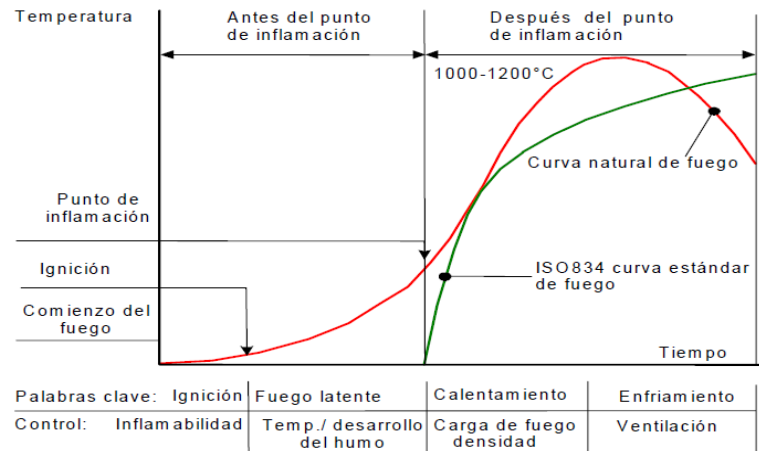
Figura 2-1: Comparación entre curvas nominales de Temperatura Vs Tiempo (Phan et al., 2010)



Estas curvas estándar no representan ningún tipo de fuego natural, sino que se basan en pruebas realizadas en hornos que se caracterizan por una temperatura que aumenta continuamente en el tiempo.

En la Figura 2-2. se representan las fases de un fuego natural comparado con una curva estándar de fuego, donde se puede evidenciar que hay grandes diferencias entre lo estandarizado con el comportamiento real de un incendio, especialmente porque en un fuego natural el combustible o el oxígeno necesario se agota, mientras que en el fuego estándar que se suministra en el horno, el suministro de combustible es continuo.

Figura 2-2. Fases de un fuego natural, comparado con la curva estándar de fuego ISO 834(Fernández, 2003)



Cuando se usan curvas nominales para representar la temperatura del gas en el recinto se puede usar la siguiente expresión para modelar el flujo de calor en la superficie de un elemento de acero:

$$\dot{h}_{net} = \alpha_c(\theta_g - \theta_m) + \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (2.5)$$

Donde,

\dot{h}_{net} = Flujo de calor en la superficie del elemento de acero [W/m^2]

α_c = Coeficiente de convección: $25 W/m^2K$ para curva estándar o externa y $50 W/m^2K$ para la curva de hidrocarburos.

θ_g =Temperatura del gas [$^{\circ}C$]

θ_m =Temperatura de la superficie del elemento de acero [$^{\circ}C$]

Φ = Factor de configuración tomado usualmente como 1.0

ε_m =Emisividad de la superficie del elemento de acero tomada como 0.7 para acero, 0.4 acero inoxidable y 0.8 para otros materiales.

ε_f =Emisividad del incendio, en general se toma como 1.0

$\sigma =$ Constante de Stephan-Boltzmann igual a $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$

$\theta_r =$ Temperatura de radiación del fuego en el recinto de análisis tomada como igual a θ_g en el caso de que los elementos estén completamente incendiados.

Tabla 2-1 Coeficiente de transferencia de calor por convección (Franssen & Real, 2015)

Superficie expuesta al fuego	$\alpha_c [W/m^2 K]$
Curva de fuego estándar ISO 834	25
Curva de hidrocarburos	50
Curvas Paramétricas, modelos de zona	35

2.2 Curvas paramétricas de temperatura

Son funciones analíticas que muestran la evolución de la temperatura de gas en un recinto en función del tiempo basado en parámetros que representan los fenómenos físicos más importantes que influyen en el desarrollo del incendio.

Estas curvas se pueden usar en recintos de área en planta menores a $500 m^2$ sin aberturas en el techo y una altura máxima de 4m.

La curva está definida por los siguientes parámetros:

2.2.1 Parámetro b :

Considera las propiedades térmicas del recinto. Está relacionado con la facultad de los elementos del entorno (muros, piso y techo) para absorber parte de la energía liberada por el incendio. Se calcula a partir de la Ecuación (2.6) cuando los muros son de un solo material:

$$b = \sqrt{c p \lambda} \quad (2.6)$$

c = calor específico del material [J/kgK]

ρ = densidad del material [kg/m^3]

λ = conductividad térmica del material [W/mK]

Cuando los muros, el piso o el techo son hechos con diferentes materiales, se debe calcular un valor global para el parámetro (b) del recinto haciendo un promedio de los valores (sin incluir aberturas):

$$b = \frac{\sum b_i A_i}{\sum A_i} \quad (2.7)$$

b_i = valor del factor para la parte i [m^2]

A_i = Área de la parte i , aberturas no incluidas [m^2]

El parámetro b debe tener un valor entre 100 y 2200 [$J/m^2 s^{1/2} K$]

2.2.2 Parámetro O (factor de aberturas):

Considera las aberturas en los muros del recinto. El incremento en los valores de este parámetro indica una mayor ventilación para el recinto. El valor de este parámetro debe estar entre 0.02 y 0.20.

Si el recinto tiene una sola abertura el parámetro se calcula con la siguiente Ecuación:

$$O = A_v \sqrt{h} / A_t \quad (2.8)$$

A_v = Área de la abertura [m^2]

h = Altura de la abertura [m]

A_t = Área total del recinto (muros, techo y piso) incluyendo las aberturas [m^2]

Si el recinto tiene varias aberturas, el factor de abertura se calcula como se indica a continuación:

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}/A_t} \quad (2.9)$$

h_{eq} = Altura promedio de las aberturas [m]

$$h_{eq} = \frac{\sum A_{vi} h_i}{A_v} \quad (2.10)$$

A_v = Área total de las aberturas [m^2]

2.2.3 Densidad de carga de fuego:

La densidad de carga de fuego puede ser calculada para cada tipología de proyecto debido a que depende del material combustible que se encuentre en el recinto.

Además, es frecuente determinar las características de la densidad de carga de fuego a partir de la clasificación de ocupación del recinto. El (EN1994-1-1, 2004) presenta la Tabla 2-2 de acuerdo a la actividad ocupacional que tenga:

Tabla 2-2. Densidades de carga de fuego $q_{f,k}$ [MJ/m^2] para diferentes actividades (Torres, 2017)

Actividad	Media	Fractil 80%
Vivienda	780	948
Hospital (habitación)	230	280
Hotel (habitación)	310	377
Biblioteca	1 500	1 824
Oficina	420	511
Aula de escuela	285	347
Centro comercial	600	730
Teatro (cine)	300	365
Transporte (espacio público)	100	122
NOTA – Para el fractil 80% se supone aplicada la ley de Gumbel.		

El valor de diseño de la carga de fuego $q_{f,d}$ se puede determinar a partir de la Ecuación (2.11):

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \delta_{q2} \delta_n m q_{f,k} \quad (2.11)$$

Donde,

m =Factor de combustión. Está entre 0 y 1. En los casos que se tenga material celulósico (madera, papel, etc) puede tomarse como $m = 0.8$.

δ_{q1} = Coeficiente que tiene en cuenta el riesgo de inicio de incendio, que está relacionado con el tamaño del recinto

δ_{q2} = Coeficiente que tiene en cuenta el riesgo de inicio de incendio debido al tipo de uso o actividad.

Tabla 2-3. Coeficientes δ_{q1} y δ_{q2} (Torres, 2017)

Superficie de suelo del sector A_f [m ²]	Riesgo de inicio del incendio δ_{q1}	Riesgo de inicio del incendio δ_{q2}	Ejemplos de tipos de actividad
25	1,10	0,78	galería de arte, museo, piscina
250	1,50	1,00	oficina, residencia, hotel, industria papelera
2 500	1,90	1,22	fábrica de maquinaria y de motores
5 000	2,00	1,44	laboratorio químico, taller de pintura
10 000	2,13	1,66	fábrica de fuegos artificiales o de pinturas

δ_n = Coeficiente que tiene en cuenta las medidas de protección activa contra incendios (rociadores, detección, alarmas, bomberos, etc). Y es calculado como el producto de los diferentes factores δ_{ni} , cada uno representa el efecto de una medida de protección.

Tabla 2-4. Coeficientes δ_n (Torres, 2017)

$\delta_{n,i}$ Función de las medidas activas de lucha contra incendios											
Extinción automática		Detección automática			Extinción manual						
Sistema automático de extinción por agua δ_{n1}	Fuentes independientes de suministro de agua δ_{n2}			Detección y alarma automática δ_{n3} δ_{n4}		Transmisión automática de la alarma a los bomberos δ_{n5}	Equipos propios de bomberos δ_{n6}	Bomberos ajenos δ_{n7}	Vías seguras de acceso δ_{n8}	Equipo de lucha contra incendios δ_{n9}	Sistema de control de humos δ_{n10}
	0	1	2	de calor	de humo						
0,61	1,0	0,87	0,7	0,87 ó 0,73		0,87	0,61 ó 0,78		0,9 ó 1 ó 1,5	1,0 ó 1,5	1,0 ó 1,5

δ_{n1} = 0.61 Si hay un sistema automático de extinción por agua, o 1.0 si no se tiene.

δ_{n2} = 1.0 Si hay un solo sistema de suministro, igual a 0.87 si hay un sistema adicional independiente de suministro de agua, igual a 0.70 si hay dos fuentes independientes de suministro de agua.

δ_{n3} = 0.87 Si hay una detección y alarma automática por calor, igual a 1.0 si no se tiene.

δ_{n4} = 0.73 Si hay una detección y alarma automática por humo, igual a 1.0 si no se tiene

Si ambos sistemas de detección están presentes, por humo y calor, solo debe considerarse

$\delta_{n4} = 0.73$, y tomar $\delta_{n3} = 1.0$

$\delta_{n5} = 0.87$ Si hay transmisión automática de la alarma a los bomberos

$\delta_{n6} = 0.61$ Si hay una brigada de bomberos que permanentemente está en el sitio (Bomberos propios). En ese caso $\delta_{n7} = 1.0$

$\delta_{n7} = 0.78$ Si hay brigadas de bomberos fuera del sitio (Bomberos ajenos)

$\delta_{n8} = 1.0$ Si se tienen rutas de acceso seguras, si no se tienen se debe tomar $\delta_{n8} = 1.5$. Y si adicional a las rutas de acceso seguras las escaleras se someten a sobrepresión en caso de alarma por incendio, este factor puede tomarse como $\delta_{n8} = 0.90$

$\delta_{n9} = 1.0$ Si se tienen equipos normales de extinción de incendios para ser usados por los ocupantes presentes, si no se tienen $\delta_{n9} = 1.5$

$\delta_{n10} = 1.0$ Si se tiene sistema de control de humos en las escaleras, en caso contrario este valor debe ser $\delta_{n10} = 1.5$

2.2.4 Densidad de carga de fuego relacionada al área total:

Es la carga de fuego por unidad de área en determinado recinto. El valor de diseño se determina a partir del área del piso en función del tipo de ocupación del recinto analizado y la presencia o no de medidas de protección activa contra incendios. Se puede determinar a partir de la Ecuación (2.12) :

$$q_{t,d} = q_{f,d} A_f / A_t \quad (2.12)$$

$q_{t,d}$ = valor de diseño de la densidad de carga de fuego relacionado al área total del recinto
 $[MJ/m^2]$

$q_{f,d}$ = valor de diseño de la densidad de carga de fuego relacionada al área de piso obtenido de la Ecuación (2.11) [MJ/m^2]

A_f = Área de piso [m^2]

A_t = Área total del recinto [m^2]

El modelo es válido para valores de $q_{t,d}$ entre 50 y 1000 MJ/m^2

Para la aplicación del modelo se debe calcular un coeficiente de expansión Γ :

$$\Gamma = \left(\frac{0/0.04}{b/1160} \right)^2 \quad (2.13)$$

En la cual los valores de 0 y b se obtienen como se refirió en subcapítulo curvas paramétricas.

La evolución de la temperatura durante la fase de calentamiento es dada por la Ecuación (2.14) como una función de un tiempo t^* :

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*}) \quad (2.14)$$

$$t^* = \Gamma t \quad (2.15)$$

t = tiempo [*horas*]

La curva que se obtiene al graficar la Ecuación (2.14) es muy cercana a la curva estándar de temperatura-tiempo.

La duración de la fase de calentamiento t_{max} está dada en horas y se determina con la siguiente Ecuación:

$$t_{max} = 0.0002q_{t,d}/0 \quad (2.16)$$

Este valor tiene que ser comparado con un valor límite t_{lim} que depende de la tasa de crecimiento asociada a la ocupación del recinto.

Tabla 2-5: Valor de t_{lim} como función de la tasa de crecimiento (Franssen & Real, 2015)

Tasa de Crecimiento	t_{lim} en minutos	t_{lim} en horas
Lenta (Transporte (espacio público))	25	0.417
Media (vivienda, cuartos de hospitales, hoteles, oficinas, salones de clase)	20	0.333
Rápida (biblioteca, centros comerciales, teatro, cines)	15	0.250

La comparación entre los valores de t_{lim} y t_{max} pueden llevar a dos escenarios:

- $t_{max} \geq t_{lim}$: **el fuego está controlado por la ventilación:**

El valor de la temperatura de gas al final de la fase de calentamiento, θ_{max} es calculado al sustituir el valor de t_{max} por t en las Ecuaciones (2.15) y (2.14).

El tiempo considerando el factor de expansión se calcula con la Ecuación (2.17):

$$t^*_{max} = \Gamma t_{max} \quad (2.17)$$

La temperatura en la fase de enfriamiento está dada por:

$$\theta_g = \theta_{max} - 625(t^* - t^*_{max}) \quad \text{para } t^*_{max} \leq 0.5 \quad (2.18)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t^*_{max})(t^* - t^*_{max}) \quad \text{para } 0.5 < t^*_{max} < 2.0 \quad (2.19)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t^* - t^*_{max}) \quad \text{para } t^*_{max} > 2.0 \quad (2.20)$$

- $t_{max} < t_{lim}$: **el fuego está controlado por material combustible:**

Se debe usar la Ecuación (2.21) para calcular la evolución de la temperatura durante la fase de calentamiento:

$$t^* = \Gamma_{lim} t \quad (2.21)$$

$$\Gamma_{lim} = \left(\frac{O_{lim}/0.04}{b/1160} \right)^2 \quad (2.22)$$

$$O_{lim} = 0.0001 q_{t,d}/t_{lim} \quad (2.23)$$

Si $O > 0.04$ y $q_{t,d} < 75$ y $b < 1160$, entonces Γ_{lim} debe ser multiplicado por el factor k dado a continuación:

$$k = 1 + \left(\frac{O - 0.04}{0.04} \right) \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \left(\frac{1160 - b}{1160} \right) \quad (2.24)$$

El tiempo con coeficiente de expansión corresponde al tiempo de máxima temperatura:

$$t^*_{max} = \Gamma_{lim} t_{lim} \quad (2.25)$$

El valor de la temperatura del gas al final de la fase de calentamiento, θ_{max} , es calculado al sustituir el valor de t^*_{max} por t^* :

La temperatura en la fase de enfriamiento está dada por:

$$\theta_g = \theta_{max} - 625(t^* - \Gamma t_{lim}) \quad \text{para } t^*_{max} \leq 0.5 \quad (2.26)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - \Gamma t_{lim})(t^* - \Gamma t_{lim}) \quad \text{para } 0.5 < t^*_{max} < 2.0 \quad (2.27)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t^* - \Gamma t_{lim}) \quad \text{para } t^*_{max} > 2.0 \quad (2.28)$$

Cuando se apliquen estas ecuaciones los valores de t^* y t^*_{max} son calculados a partir de las Ecuaciones (2.15) y (2.17) y no de las Ecuaciones (2.21) y (2.25).

Cuando se usa un modelo de fuego con curvas paramétricas, el flujo de calor en la superficie de un elemento de acero es calculado de la Ecuación (2.5) con un coeficiente de convección $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$

2.3 Tiempo equivalente de exposición al fuego

El Eurocódigo incluye un método para determinar la resistencia al fuego basado en las características físicas del recinto. Este método se usa para relacionar la gravedad de un incendio real esperado con el fuego de una prueba estándar.

El tiempo equivalente está definido por la Ecuación (2.29)

$$t_{e,d} = k_b * w_f * k_c * q_{f,d} \quad (2.29)$$

Donde,

k_b = Coeficiente de conversión que depende de las propiedades térmicas de los materiales del recinto:

- Cuando no se realice un análisis detallado de la envolvente del recinto, $k_b = 0.07$
- Si es calculado a partir de las propiedades térmicas, es decir con el parámetro $b = \sqrt{c p \lambda}$ explicado anteriormente en la sección 2.2.1 (Parámetro b), se usará la Tabla 2-6 .

Tabla 2-6. Factor de conversión k_b en función de las propiedades térmicas de la envolvente (Torres, 2017)

$b = \sqrt{(\rho c \lambda)}$ [J/m ² s ^{1/2} K]	k_b [min · m ² /MJ]
$b > 2\,500$	0,04
$720 \leq b \leq 2\,500$	0,055
$b < 720$	0,07

w_f = Coeficiente de ventilación en función de la forma y tamaño del recinto.

$$w_f = \left(\frac{6}{H}\right)^{0.3} * \left[0.62 + \frac{90 (0.4 - \alpha_v)^4}{(1 + b_v \alpha_h)}\right] \geq 0.5 \quad (2.30)$$

$\alpha_v = \frac{A_v}{A_f}$: Relación entre la superficie de las aberturas en fachada y la superficie del piso del recinto. Está limitado por $0.025 < \alpha_v < 0.25$

α_v = Relación entre la superficie de las aberturas en el techo y la superficie del piso del recinto

$$b_v = 12.5(1 + 10\alpha_v - \alpha_v^2) \geq 10$$

H =Altura del recinto [m]

Para recintos pequeños ($A_f < 100 m^2$) sin aberturas en el techo, el coeficiente w_f se puede calcular aproximadamente como se muestra a continuación:

$$w_f = \frac{A_f/A_t}{\sqrt{O}} \quad (2.31)$$

Donde,

O =Coeficiente de aberturas explicado anteriormente con limites $0.02 \leq O \leq 0.20$

A_t = Superficie total del recinto (paredes, piso, techo) incluyendo aberturas

k_c = Coeficiente de corrección que depende del material estructural:

Tabla 2-7. Valores de k_c según el material estructural (EN1991-1-2, 2004)

Valores de k_c según el material estructural	
Material de la sección transversal	k_c
Hormigón armado	1,0
Acero protegido	1,0
Acero sin proteger	13,7 · O

2.4 Modelos de Zona

Son modelos que pueden usarse para calcular el desarrollo de la temperatura en un recinto en situación de incendio basado en ecuaciones diferenciales de termodinámica que hacen equilibrio en balance de masas y energía (Franssen & Real, 2015):

- Los parámetros principales que influyen en el desarrollo de la temperatura son los mismos que los usados en los modelos de curvas paramétricas.
- Las aberturas son muy importantes porque estas proveen el aire que alimenta el fuego y pueden ventilar el recinto afectando la variación de la temperatura.
- A diferencia de las curvas paramétricas donde todas las aberturas están representadas por un solo parámetro O , en los modelos de zona cada abertura puede ser representada con sus propias dimensiones y posiciones.
- Para un modelo de zona la cantidad de combustible (q) presente en el recinto es de gran importancia, además de la velocidad a la que se liberará (*Rate of Heat Release, RHR*) como la tasa de pérdida de masa.
- Los modelos de zona no tienen ninguna forma prescrita para la curva de temperatura-tiempo, como es el caso de los modelos paramétricos. La forma de la curva de temperatura-tiempo es diferente para cada caso, aunque está fuertemente vinculada a la forma de la curva RHR que se haya introducido.

Cuando se usa un modelo de fuego con modelos de zona, el flujo de calor en la superficie de un elemento de acero es calculado de la Ecuación (2.5) con un coeficiente de convección $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$

2.5 Modelos CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

- Estos modelos se basan en una división del recinto en un número muy alto de celdas en las que se escriben y resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes.
- Los modelos producen gran cantidad de resultados a un nivel muy detallado, por ejemplo, presión, temperatura, velocidad y componentes químicos en cada celda.

- Las aplicaciones de dichos modelos requieren software específico, computadoras potentes y usuarios bien capacitados y altamente experimentados.

La metodología de análisis y desarrollo de estos modelos están fuera del alcance de este trabajo.

2.6 Fuegos localizados

El análisis prestacional permite analizar el comportamiento real de un incendio, y cada incendio en un edificio empieza pequeño y localizado. El fuego deja de ser localizado cuando se produce el incendio súbito generalizado (*flashover*).

La amenaza de un incendio localizado depende de su ubicación respecto a los elementos estructurales.

En el Anexo C del EN 1991-1-2 se presentan dos métodos para analizar los efectos de un incendio localizado, los cuales se muestran a continuación (Vassart et al., 2014):

2.6.1 Método de Heskestad

Este método permite realizar una evaluación de la acción térmica de un incendio localizado y está relacionado con la altura relativa de la llama al techo.

La longitud de la llama L_f de un incendio localizado (Figura 2-1) viene dada por:

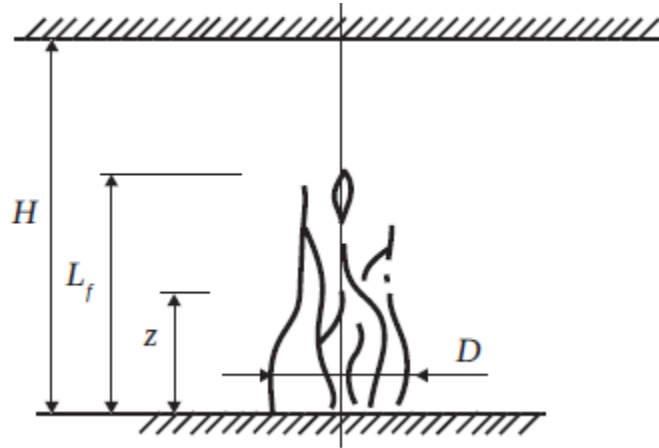
$$L_f = 0.0148Q^{0.4} - 1.02D \quad (2.32)$$

Donde,

D = Diámetro del fuego [m]

Q = Tasa de liberación de calor en [W]

Figura 2-3. Modelo de fuego localizado de llama sin alcanzar el techo (Franssen & Real, 2015)



H = Distancia vertical desde la fuente de fuego hasta el techo del recinto.

Cuando la llama no está impactando el techo de un recinto ($L_f < H$), o en caso de incendio a cielo abierto, la temperatura en la columna de humo simétrica a lo largo del eje vertical de la llama está definida por la siguiente Ecuación:

$$\theta_{(z)} = 20 + 0.25Q_c^{\frac{2}{3}}(Z - Z_0)^{-\frac{5}{3}} \leq 900 \quad (2.33)$$

Q_c = Parte de la tasa de liberación de calor por convección [W], tomada como $0.8Q$

Z = Altura a lo largo del eje de la llama desde la posición de la fuente [m]

Z_0 = Origen virtual de la fuente del incendio, calculado con la siguiente Ecuación:

$$Z_0 = 0.00524Q^{0.4} - 1.02D \quad (2.34)$$

El flujo de calor neto \dot{h}_{net} recibido por la superficie de un miembro estructural desde la fuente de fuego se calcula a partir de la siguiente Ecuación:

$$\dot{h}_{net} = \alpha_c(\theta_g - \theta_m) + \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (2.35)$$

α_c = Coeficiente de convección tomado como $35 W/m^2K$

θ_g =Temperatura del gas en °C, calculada de la Ecuación (2.33) si la superficie está en la columna de gases calientes, o tomada como 20°C si la superficie está a temperatura ambiente

θ_m =Temperatura de la superficie del elemento o del material de protección

Φ = Factor de configuración tomado usualmente como 1.0.

ε_m =Emisividad de la superficie del elemento de acero tomada como 0.7 para acero, 0.4 acero inoxidable y 0.8 para otros materiales.

ε_f =emisividad del incendio, en general se toma como 1.0

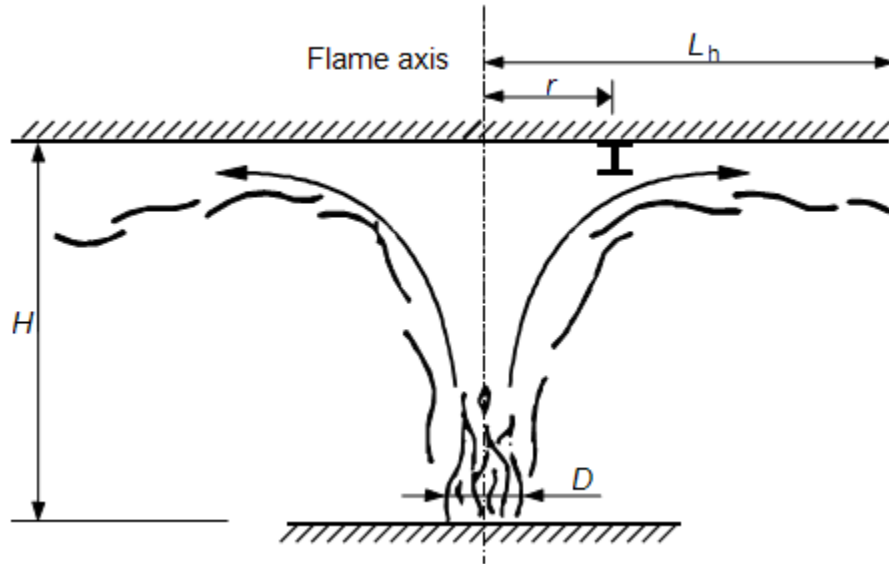
σ = Constante de Stephan-Boltzmann igual a $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$

θ_r =Temperatura de radiación del fuego en el recinto de análisis, tomada igual a θ_g en el caso de que los elementos estén completamente incendiados.

2.6.2 Método de Hasemi

Este modelo debe ser usado cuando la llama no alcanza el techo. Los parámetros usados en este modelo se muestran a continuación:

Figura 2-4: Método Hasemi



Este método tiene las siguientes limitaciones:

- El diámetro D de la fuente del incendio no debe ser mayor a los 10m
- La tasa de liberación de calor del incendio no debe ser mayor que 50 MW ($RHR < 50 \text{ MW}$)

En este modelo se calculan dos tasas de liberación de calor (RHR):

$$Q_H^* = \frac{Q}{1.11 * 10^6 H^{2.5}} \quad (2.36)$$

$$Q_D^* = \frac{Q}{1.11 * 10^6 D^{2.5}} \quad (2.37)$$

La longitud horizontal de la llama L_h es calculada a partir de la siguiente Ecuación:

$$L_h = [2.9H(Q_H^*)^{0.33}] - H \quad (2.38)$$

La posición vertical de la fuente virtual de calor z' se calcula así:

$$z' = 2.4D \left(Q_D^{*\frac{2}{5}} - Q_D^{*\frac{2}{3}} \right) \text{ donde } Q_D^* < 1.0 \quad (2.39)$$

$$z' = 2.4D \left(1 - Q_D^{*\frac{2}{5}}\right) \text{ donde } Q_D^* \geq 1.0 \quad (2.40)$$

Si r es la distancia horizontal desde el eje de la llama hasta el punto debajo del techo donde se evalúa el flujo de calor, el parámetro no dimensional y es la distancia relativa desde la fuente de fuego hasta el punto en consideración.

$$y = \frac{r + H + z'}{L_h + H + z'} \quad (2.41)$$

Finalmente, el flujo de calor recibido por el techo en el punto de análisis es:

$$\begin{aligned} \dot{h} &= 100000, & \text{si } y \leq 0.30 \\ \dot{h} &= 136000 - 121000y, & \text{si } 0.3 < y < 1.0 \\ \dot{h} &= 15000y^{-3.7}, & \text{si } y \geq 1.0 \end{aligned} \quad (2.42)$$

La anterior Ecuación sólo proporciona el flujo de calor recibido en la superficie, el flujo de calor neto debe calcularse a partir de la siguiente Ecuación:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h} - \alpha_c(\theta_m - 20) - \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma [(\theta_m + 273)^4 - 293^4] \quad (2.43)$$

En la anterior Ecuación podemos verificar que cuando el flujo de calor que está impactando \dot{h} es igual a 0, la temperatura del elemento θ_m a 20°C conducirá a una situación en la que el flujo neto recibido en la superficie \dot{h}_{net} es igual a cero

3. Análisis de temperatura en secciones de acero

El aumento en la temperatura de los elementos de acero depende de la temperatura del incendio del recinto, del área de acero expuesta al incendio y la cantidad de material de protección aplicado.

3.1 Factor de Forma $\frac{A_m}{V}$

También llamado factor de masividad, se define como la relación entre la superficie perimetral del perfil que está expuesta al flujo de calor y el área de la sección. Otra manera de expresarlo es la relación entre el área de superficie expuesta y el volumen del elemento por unidad de longitud:

$$\frac{A_m}{V} = \frac{P * L}{A * L} = \frac{P}{A} [m^{-1}] \quad (3.1)$$

Donde,

A_m = Área de la superficie del elemento expuesto al fuego. (Depende del número de caras expuestas)

A = Área de la sección transversal del elemento [m^2]

L = Longitud del elemento [m]

P = Perímetro de la sección expuesta al fuego [m]

Las siguientes tablas muestran la definición para el cálculo de los factores de sección para secciones con y sin protección

Tabla 3-1. Definición de Factores de sección para miembros de acero sin protección (Franssen & Real, 2015)

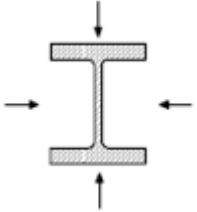
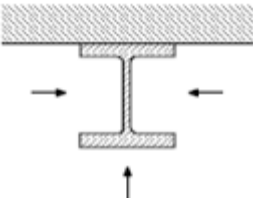
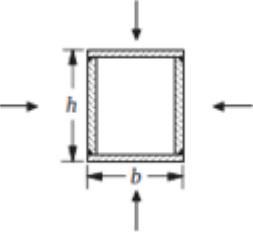

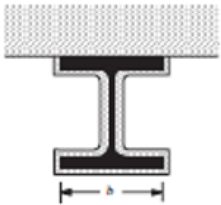
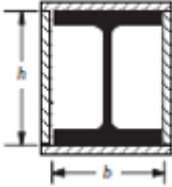
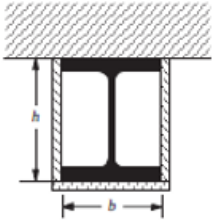
Esquema	Descripción	Factor de sección (A_m/V)
	4 lados expuestos	$\frac{\text{Perímetro de acero expuesto al fuego}}{A}$
	3 lados expuestos	$\frac{\text{Perímetro de acero expuesto al fuego}}{A}$
	4 lados expuestos	$\frac{2(b + h)}{A}$
<p>Nota: A es el área de la sección transversal de acero</p>		

Tabla 3-2. Definición de Factores de sección para miembros de acero con protección(Franssen & Real, 2015)

Esquema	Descripción	Factor de sección (A_p/V)
	Contorno de perfil protegido expuesto al fuego en 4 lados	$\frac{\text{Perímetro de acero}}{A}$
	Contorno de perfil protegido expuesto al fuego en 3 lados	$\frac{\text{Perímetro de acero} - b}{A}$
	Revestimiento hueco expuesto al fuego en 4 lados	$\frac{2(b + h)}{A}$
	Revestimiento hueco expuesto al fuego en 3 lados	$\frac{b + 2h}{A}$
Nota: A es el área de la sección transversal de acero		

3.2 Calor específico c_a

Se determina dependiendo de la temperatura del acero (θ_a) y se calcula de acuerdo a las siguientes expresiones:

- Para temperaturas $20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 600^\circ\text{C}$

$$c_a = 425 + 7.73 * 10^{-1}\theta_a - 1.69 * 10^{-3}\theta_a^2 + 2.22 * 10^{-6}\theta_a^3 \quad [\text{J}/\text{kgK}] \quad (3.2)$$

- Para temperaturas $600^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 735^\circ\text{C}$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad [\text{J}/\text{kgK}] \quad (3.3)$$

- Para temperaturas $735^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 900^\circ\text{C}$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad [\text{J}/\text{kgK}] \quad (3.4)$$

- Para temperaturas $900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$

$$c_a = 650 \quad [\text{J}/\text{kgK}] \quad (3.5)$$

3.3 Temperatura en elementos sin protección expuestos al fuego

El (EN1993-1-2, 2005) provee una formulación básica para calcular la respuesta térmica de los elementos de acero sin protección. Asumiendo una distribución uniforme de la temperatura en la sección transversal.

El incremento en temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ en el elemento en un intervalo de tiempo Δt está dado por la Ecuación (3.6):

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{k_{sh} \frac{A_m}{V}}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.6)$$

Donde,

$\frac{A_m}{V}$ = Factor de sección o masividad [m^{-1}] debe ser (≥ 10) para poder considerar una temperatura uniforme en la sección.

c_a = Calor específico del acero [J/kgK]

ρ_a = Densidad del acero, $7850 \frac{Kg}{m^3}$

Δt = Intervalo de tiempo [s] ($\leq 5[s]$)

$\dot{h}_{net,d}$ = Flujo de calor neto por unidad de área, determinado con la Ecuación (2.5)

k_{sh} = Factor de corrección por el efecto sombra. Se presenta debido a que ciertas partes de la sección debido a su localización se encuentran cubiertas de la fuente de calor como se observa en la Figura 3.1:

Figura 3-1. Influencia de la forma del perfil en el efecto sombra



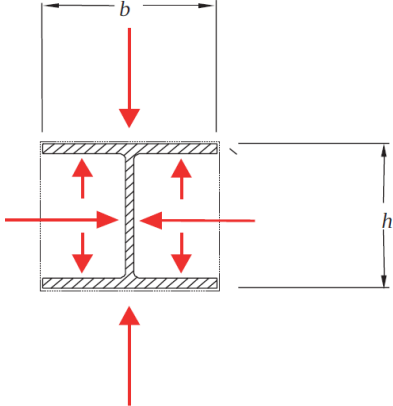
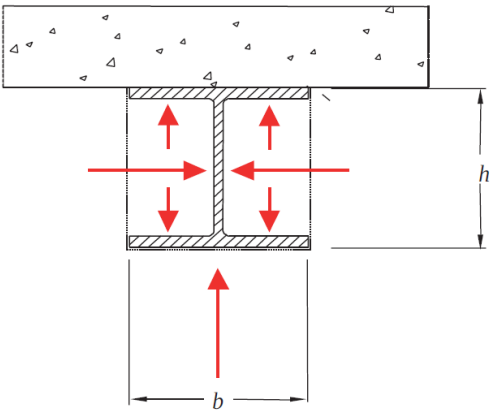
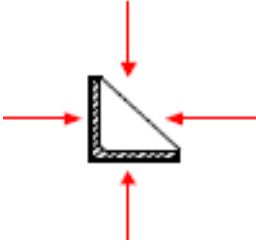
- Para secciones rectangulares y circulares huecas se toma como $k_{sh} = 1.0$.
- Para secciones tipo I analizados bajo curvas estándar, se debe calcular como se indica a continuación:

$$k_{sh} = 0.9 \frac{\left(\frac{A_m}{V}\right)_{caja}}{\frac{A_m}{V}} \quad (3.7)$$

Donde,

$\left(\frac{A_m}{V}\right)_{caja}$ = factor de sección o masividad definida como la relación entre el área expuesta de un cajón imaginario que delimita la sección en I y el volumen de acero.

Tabla 3-3: Valor de factor de sección $\left(\frac{A_m}{V}\right)_{caja}$ (Franssen & Real, 2015)

Esquema	Factor de sección $(A_m/V)_{caja}$
	$\frac{2(b + h)}{A}$
	$\frac{b + 2h}{A}$
	$\frac{\text{Perímetro de caja}^*}{A}$
<p>Nota: A es el área de la sección transversal de acero</p>	

- Para los demás casos

$$k_{sh} = \frac{\left(\frac{A_m}{V}\right)_{caja}}{\frac{A_m}{V}} \quad (3.8)$$

Ignorar el efecto de sombra lleva a soluciones conservadoras.

Los comentarios del anexo IV del AISC 360-16 proveen una formulación muy similar a la mostrada en el Eurocódigo, pero despreciando el factor del efecto sombra como se observa a continuación:

$$\Delta T_s = \frac{a}{c_s \left(\frac{W}{D}\right)} (T_F - T_s) \Delta t \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.9)$$

$a = a_c + a_r$ Coeficiente de transferencia [$W/m^2 - ^\circ C$]

a_c = coeficiente de transferencia de calor por convección $25W/m^2$

a_r = coeficiente de transferencia de calor por radiación

$$a_r = \frac{S_B \varepsilon_F}{T_F - T_S} (T_{FK}^4 - T_{SK}^4) \quad (3.10)$$

c_s = Calor específico del acero [$J/kg^\circ C$]

D = Perímetro expuesto al calor [m]

S_B = Constante de Stephan-Boltzmann [$5.67 * 10^{-8} W/m^2 - ^\circ K^4$].

T_F = Temperatura del incendio [$^\circ C$].

$T_{FK} = T_F + 273$ [$^\circ C$].

T_S = Temperatura del acero [$^\circ C$].

$T_{SK} = T_S + 273$ [$^\circ C$].

W = masa por unidad de longitud [kg/m]

ε_F = Coeficiente de emisividad de acuerdo a la tabla mostrada

Δt = Intervalo de tiempo [s] ($\leq 5[s]$)

Tabla 3-4: Coeficientes de emisividad ε_F (ANSI/AISC 360, 2016)

Tipo de elemento	ε_F
Columna, expuesta por todos lados	0.7
Viga de piso: Embebida en losa de concreto, con solo el patín inferior de la viga expuesto al fuego	0.5
Viga de piso, con losa de concreto apoyada en el patín superior de la viga	
Relación ancho de patín con peralte de viga ≥ 0.5	0.5
Relación ancho de patín con peralte de viga < 0.5	0.7
Viga cajón y viga en celosía	0.7

3.4 Temperatura en elementos protegidos expuestos al fuego

Existen varios sistemas de protección pasiva para controlar el aumento de temperatura. Los materiales aislantes se pueden aplicar como revestimiento del contorno o generando secciones tipo cajón.

Asumiendo una distribución uniforme de la temperatura en la sección, el incremento en temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ en el elemento protegido en un intervalo de tiempo Δt está dado por:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \frac{A_p}{V}}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{\left(1 + \frac{\phi}{3}\right)} \Delta t - \left(e^{\frac{\phi}{10}} - 1\right) \Delta\theta_{g,t} \quad [^\circ C] \quad (3.11)$$

$$\Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ si } \Delta\theta_{g,t} > 0$$

Esta Ecuación es una aproximación y sólo es válida para valores pequeños del factor ϕ . Y se recomienda que este valor no sea mayor que 1.5 (Wang, 2004).

Donde la cantidad de calor almacenado en el material de protección es:

$$\phi = \frac{c_p d_p \rho_p}{c_a \rho_a} \frac{A_p}{V} \quad (3.12)$$

Donde,

$\frac{A_p}{V}$ = Masividad para la sección de acero aislada por material de protección [m^{-1}]

λ_p = Conductividad térmica del material de protección [W/mK]

d_p = espesor del material de protección [m]

c_p = Calor específico del material de protección [J/kgK]

ρ_p = Densidad del material de protección [$\frac{Kg}{m^3}$]

c_a = Calor específico del acero [J/kgK]

$\theta_{a,t}$ = Temperatura del acero en un tiempo t [°C]

$\theta_{g,t}$ = Temperatura ambiente del gas en un tiempo t [°C]

$\Delta \theta_{g,t}$ = Incremento de la temperatura ambiente del gas durante un intervalo de tiempo
 Δt [K]

ρ_a = Densidad del acero 7850 [$\frac{Kg}{m^3}$]

Δt = intervalo de tiempo [s] $\leq 30s$

De acuerdo con (ECCS, 1985), para materiales de protección livianos la Ecuación se puede simplificar tomando $\phi = 0$. Y sugiere que la capacidad térmica del material de protección puede ser ignorada si esta es menor que la mitad de la sección de acero. (Franssen & Real, 2015)

$$\Delta \theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \frac{A_p}{V}}{d_p c_a \rho_a} (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t \quad [^{\circ}C] \quad (3.13)$$

Y para materiales de protección pesados provee una modificación en el factor de masividad, entonces el incremento de temperatura se debe calcular con la siguiente Ecuación:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \frac{A_p}{V}}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{\left(1 + \frac{\phi}{2}\right)} \Delta t \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.14)$$

La AISC 360-16 (2016) en sus comentarios presenta el siguiente procedimiento de análisis:

- Si la capacidad térmica del material de protección es mucho menor que la del acero tal que se satisface la siguiente desigualdad

$$\frac{c_s W}{D} > 2 c_p d_p \rho_p \quad (3.15)$$

Se debe aplicar la siguiente Ecuación para determinar el aumento de la temperatura en el acero:

$$\Delta T_s = \frac{k_p}{c_s d_p \left(\frac{W}{D}\right)} (T_F - T_s) \Delta t \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.16)$$

- Si la capacidad térmica del material de protección necesita ser considerada, es decir que no se satisface la inecuación, se debe aplicar la siguiente formulación:

$$\Delta T_s = \frac{k_p}{d_p} \left[\frac{T_F - T_s}{c_s \left(\frac{W}{D}\right) + \frac{c_p d_p \rho_p}{2}} \right] \Delta t \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.17)$$

Donde,

c_p = Calor específico del material de protección [$J/kg - ^{\circ}\text{C}$]

c_s = Calor específico del acero [$J/kg^{\circ}\text{C}$]

d_p = Espesor del material de protección [m]

k_p = Conductividad térmica del material de protección [$W/m - ^{\circ}\text{C}$]

ρ_p = Densidad del material de protección [kg/m^3]

Es importante tener en cuenta que el máximo del paso Δt debe ser 5 s

T_F = Temperatura del incendio [$^{\circ}\text{C}$].

T_S = Temperatura del acero [$^{\circ}\text{C}$].

W = masa por unidad de longitud [kg/m]

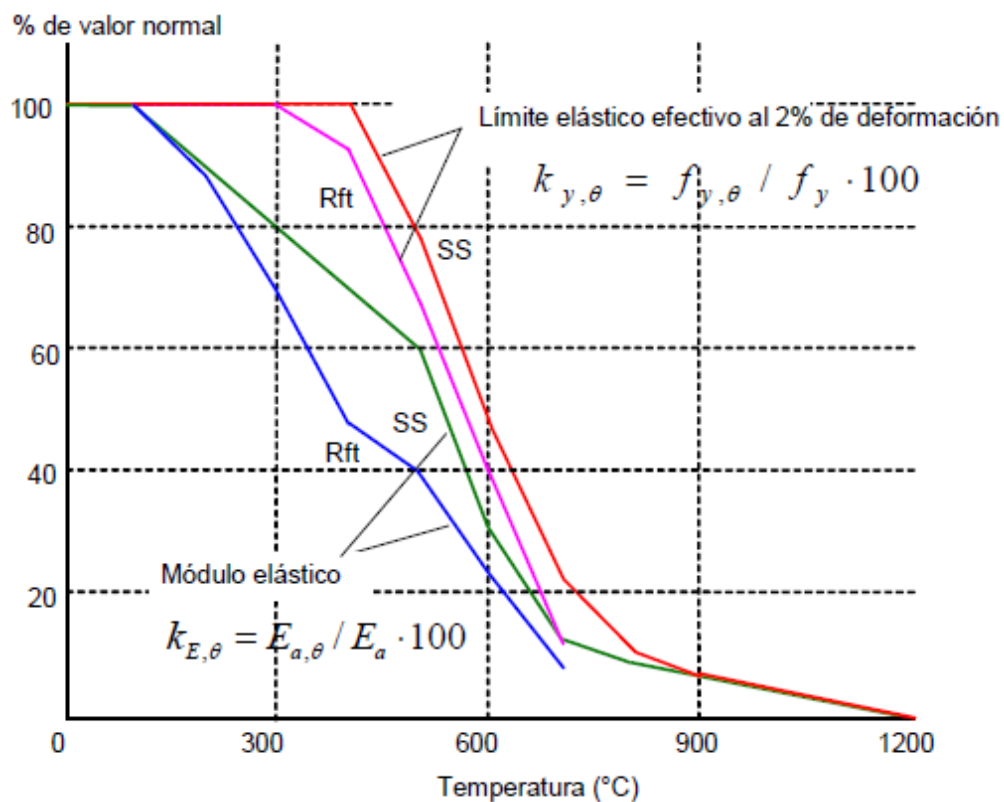
D = Perímetro expuesto al calor [m]

4. Resistencia al fuego de miembros estructurales

4.1 Reducción del límite elástico y módulo de elasticidad

La resistencia del acero disminuye a medida que la temperatura supera los 400°C. El límite elástico y módulo de elasticidad decrecen como se puede observar en la siguiente figura:

Figura 4-1: Factores de reducción de resistencia para aceros estructurales (SS) y armaduras conformadas en frío (Rft) a temperaturas elevadas (Torres, 2017)



El módulo de elasticidad a una temperatura θ , está definido por:

$$E_{a,\theta} = k_{E,\theta} * E_a \quad (4.1)$$

Donde,

$k_{E,\theta}$ = Factor de reducción debido al aumento de la temperatura

E_a =Módulo de elasticidad del acero a temperatura ambiente (20°C)

El módulo de elasticidad empieza a decrecer a partir de los 100°C.

El esfuerzo de fluencia a una temperatura θ , está definido por:

$$F_{y,\theta} = k_{y,\theta} * F_y \quad (4.2)$$

Donde,

$k_{y,\theta}$ = Factor de reducción debido al aumento de la temperatura

F_y = Esfuerzo de fluencia mínimo del acero a temperatura ambiente (20°C)

La especificación AISC 360-16 y la (NSR-10(2010),2010), usa las propiedades para el acero y concreto para temperaturas elevadas adoptadas por el Eurocódigo.

Tabla 4-1: Propiedades del acero a temperaturas elevadas (Tabla F.2.18.2-1 (NSR-10(2010),2010))

Temperatura del Acero °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

$E_{(T)}$ = Módulo de elasticidad a temperaturas elevadas, [MPa]

$G_{(T)}$ = Módulo de elasticidad a cortante a temperaturas elevadas, [MPa]

$F_{p(T)}$ = Límite de proporcionalidad a temperaturas elevadas, [MPa]

$F_{y(T)}$ = Esfuerzo de fluencia mínimo especificado a temperaturas elevadas, [MPa]

$F_{u(T)}$ = Resistencia a tensión mínima especificada a temperaturas elevadas, [MPa]

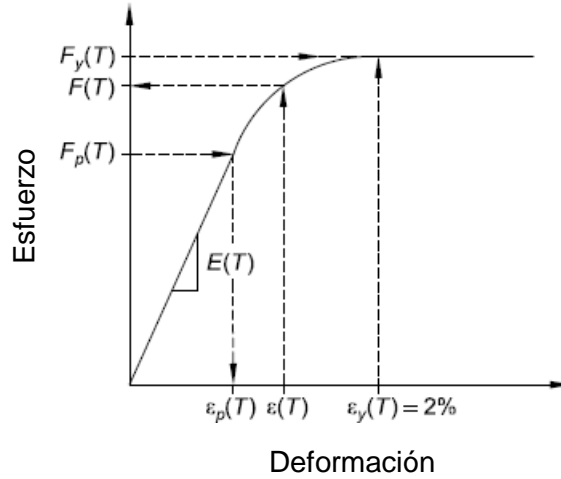
La (NSR-10(2010),2010), establece que se pueden usar estas tablas cuando no se dispone de ensayos para determinar las propiedades de los materiales a temperaturas elevadas. Estos datos no aplican para aceros con resistencia a la fluencia superior a 448 MPa o para concretos con una resistencia a la compresión mayor que 55 MPa.

El factor de reducción de la resistencia a fluencia puede calcularse aproximadamente a partir de la siguiente ecuación: (Franssen & Real, 2015):

$$k_{y,\theta} = \left(0.9674 * \left(e^{\frac{\theta_a - 482}{39.19}} + 1 \right) \right)^{-1/3.833} \leq 1 \quad (4.3)$$

La curva esfuerzo-deformación del acero a temperaturas elevadas presenta un comportamiento no lineal mayor que el presentado a temperatura ambiente y experimenta menor endurecimiento por deformación.

Figura 4-2: Parámetros de idealización de la curva esfuerzo-deformación a temperaturas elevadas (Takagi & Deierlein, 2007)



4.2 Métodos de análisis simplificados

Para el diseño de los elementos estructurales se seguirán los requisitos estipulados en la norma de sismo resistencia vigente en Colombia.

La (NSR-10(2010),2010) permite el uso de estos métodos para la evaluación del desempeño de los miembros individuales en situación de incendio considerando que las restricciones y condiciones de apoyo presentes a temperatura ambiente se mantienen inalterables durante la exposición al incendio.

Algunos investigadores han demostrado que las ecuaciones de resistencia estándar definidas en la normativa americana y por lo tanto en la NSR-10(2010) (a temperatura ambiente), con propiedades del acero (E , F_y y F_u) reducidas para temperaturas elevadas, pueden sobreestimar considerablemente las resistencias de los miembros que son sensibles a los efectos de estabilidad (Takagi & Deierlein, 2007).

Takagi & Deierlein (2007) desarrollaron unas ecuaciones que representan con mayor precisión la resistencia de los miembros de compresión sometidos a pandeo por flexión y los miembros de flexión sometidos a pandeo lateral-torsional. Estas ecuaciones son mucho más precisas en comparación con las ecuaciones del (*ECCS, Model Code on Fire Engineering, 2001*) y los análisis detallados realizados mediante elementos finitos que han sido validado con pruebas de laboratorio.

4.2.1 Combinación de carga

La NSR-10(2010) en F.2.18.1.4 estipula que la resistencia requerida de una estructura y sus elementos se determinará a partir de la siguiente combinación de cargas gravitacionales:

$$[0.9 \text{ ó } 1.2]D + T + 0.5L + 0.2G \quad (4.4)$$

Donde,

D = Carga muerta nominal

L = Carga viva nominal

G = Carga nominal de granizo

T = Fuerzas y deformaciones nominales causadas por el incendio de diseño

El Eurocódigo (EN1993-1-2, 2005) establece que es necesario considerar únicamente los efectos de las deformaciones térmicas producidas por los gradientes térmicos a través de la sección transversal. Pueden despreciarse los efectos de las expansiones térmicas axiales o en el plano.

4.2.2 Miembros a tensión

La resistencia de diseño de un miembro a tensión se determinará usando las provisiones de la Sección F.2.4 de la NSR-10(2010), con las propiedades del acero calculadas suponiendo una temperatura uniforme en la sección transversal.

4.2.3 Miembros a compresión

La resistencia de diseño de un miembro a compresión se determinará usando las provisiones de la sección F.2.5 NSR-10(2010), suponiendo una temperatura uniforme en la sección transversal.

La resistencia nominal a compresión para el estado límite de pandeo flexional se puede determinar a partir de la siguiente ecuación:

$$F_{cr}(T) = \left[0.42 \sqrt{\frac{F_y(T)}{F_e(T)}} \right] F_y(T) \quad (4.5)$$

La anterior ecuación corresponde a la Ecuación F.2.18.2-1 de la NSR-10(2010).

Donde,

$F_y(T)$ = Esfuerzo de fluencia para temperaturas elevadas, [MPa]

$F_e(T)$ = Esfuerzo crítico de pandeo elástico, usando modulo elástico a temperatura elevadas, [MPa]

$$F_e(T) = \frac{\pi^2 E_{(T)}}{\left(\frac{kL_c}{r}\right)_T^2} \quad (4.6)$$

$E_{(T)}$ = Módulo elástico a temperaturas elevadas [MPa]

k = Factor de longitud efectiva

L_c = Longitud no arriostrada del elemento [m]

r = Radio de giro asociado al modo de pando considerado [m]

Los comentarios del apéndice 4 del (ANSI/AISC 360, 2016), presentan la siguiente formulación para considerar la condición de apoyo de las columnas en situación de incendio:

$$\left(\frac{L_c}{r}\right)_T = \left(1 - \frac{T}{n * (2000)}\right) \left(\frac{L_c}{r}\right) - \left(\frac{35}{2000}\right) T \geq 0 \quad (4.7)$$

Donde,

T = Temperatura del acero, [°C]

$n = 1$ Elemento continuo en ambos extremos

$n = 2$ Elemento continuo en uno de sus extremos

4.2.4 Miembros a flexión

La resistencia de diseño de un miembro a flexión se determinará usando las provisiones de la sección F.2.6 NSR-10(2010), con las propiedades del acero suponiendo una temperatura uniforme en la sección transversal. La resistencia nominal a flexión para el estado límite de pando lateral-torsional de miembros con simetría doble sin arriostramiento lateral está definida por:

- Para $L_b \leq L_{r(T)}$

$$M_n(T) = C_b * \left(M_r(T) + \left(M_p(T) - M_r(T) * \left(1 - \frac{L_b}{L_r(T)} \right)^{c_x} \right) \right) \leq M_p(T) \quad (4.8)$$

- Para $L_b > L_r(T)$

$$M_n(T) = F_{cr}(T)S_x \leq M_p(T) \quad (4.9)$$

Donde,

$$F_{cr}(T) = \frac{C_b \pi^2 E(T)}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{C_b}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2} \quad (4.10)$$

$$L_r(T) = 1.95 r_{ts} \frac{E(T)}{F_L(T)} \sqrt{\frac{J_c}{S_x h_o} + \left(\frac{J_c}{S_x h_o} \right)^2 + 6.76 \left(\frac{F_L(T)}{E(T)} \right)^2} \quad (4.11)$$

$$M_r(T) = F_L(T)S_x \quad (4.12)$$

$$F_L(T) = F_y (k_p - 0.3k_y) \quad (4.13)$$

$$M_p(T) = Z_x F_y(T) \quad (4.14)$$

$$c_x = 0.6 + \frac{T}{250} \leq 3.0 \quad (T \text{ en } ^\circ C) \quad (4.15)$$

4.2.5 Miembros en sección compuesta a flexión

Para vigas compuestas sometidas a flexión, la temperatura calculada para la aleta inferior se tomará como constante desde la aleta inferior hasta la mitad de la profundidad del alma y decreciendo linealmente en no más de un 25% desde la mitad de la profundidad del alma hasta la aleta superior de la viga NSR-10(2010).

La resistencia nominal de un miembro compuesto a flexión se determinará usando las condiciones de la sección F.2.9 NSR-10(2010), con esfuerzos de fluencia en el acero reducidos de manera consistente con la variación de la temperatura descrita bajo respuesta térmica.

Alternativamente, la resistencia nominal a flexión de una viga compuesta, $M_n(T)$, se puede calcular utilizando la temperatura de la aleta inferior, T , de la siguiente manera:

$$M_n(T) = r(T)M_n \quad (4.16)$$

Donde,

$M_n(T)$ =resistencia nominal a flexión a temperatura ambiente, calculada de acuerdo con los requisitos de la sección F.2.9, [$N\cdot mm$]

$r(T)$ = factor de retención, que depende de la temperatura de la aleta inferior, T , como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 4-2.: Factor de retención $r(T)$ para miembros de sección compuesta sometidos a flexión (ANSI/AISC 360, 2016)

Temperatura de la aleta inferior °C	$r(T)$
20	1.00
150	0.98
320	0.95
430	0.89
540	0.71
650	0.49
760	0.26
870	0.12
980	0.05
1100	0.00

4.2.6 Miembros a cortante

La resistencia de diseño de un miembro a flexión se determinará usando las provisiones de la Sección F.2.7 NSR-10(2010), con las propiedades del acero suponiendo una temperatura uniforme en la sección transversal.

4.2.7 Miembros solicitados por fuerzas combinadas y por torsión

La resistencia nominal para combinaciones de fuerza axial y flexión alrededor de uno o ambos ejes, con o sin torsión, debe estar de acuerdo con los requisitos de la Sección F.2.8 de la NSR-10(2010), usando las resistencias de diseño a carga axial y a flexión de acuerdo con lo estipulado anteriormente.

La resistencia nominal de un miembro a torsión se determinará usando las provisiones de la sección F.2.8, con las propiedades del acero suponiendo una temperatura uniforme en la sección transversal.

4.2.8 Diseño losas en *Steel deck*

El anexo D de (EN1994-1-1, 2004) establece una formulación para calcular la resistencia de una losa en *steel deck*, de acuerdo a su geometría.

Primero se debe calcular la resistencia al fuego de acuerdo al aislamiento térmico o la sección mínima para cumplir el requisito de resistencia en tiempo:

$$t_i = a_0 + a_1 h'_1 + a_2 \Phi + a_3 \frac{A}{L_r} + a_4 \frac{1}{l_3} + a_5 \frac{A}{L_r} \frac{1}{l_3} \quad (4.17)$$

Donde

t_i = Tiempo de resistencia al fuego respecto al aislamiento térmico [*min*]

$h'_1 = h_1 + h_3$ Espesor del concreto sobre el *Steel deck* mas el espesor de piso acabado

a_i = Coeficientes para determinar la resistencia al fuego:

Tabla 4-3.: Coeficientes para determinar la resistencia al fuego de acuerdo al aislamiento térmico (EN1994-1-2, 2005)

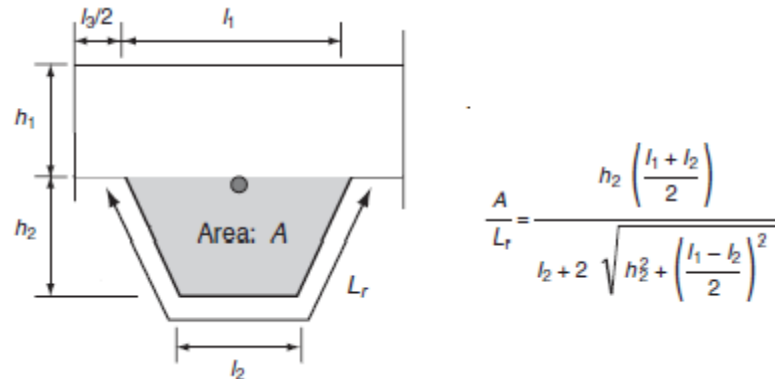
	a_0 [min]	a_1 [min/mm]	a_2 [min]	a_3 [min/mm]	a_4 [mm min]	a_5 [min]
Normal weight concrete	-28,8	1,55	-12,6	0,33	-735	48,0
Lightweight concrete	-79,2	2,18	-2,44	0,56	-542	52,3

$\frac{A}{L_r} =$ Factor de geometría de la lámina [mm]

$l_3 =$ Ancho de la cresta [mm]

$$\Phi = \frac{1}{l_3} \left[\sqrt{h_2^2 + \left(l_3 + \frac{l_1 - l_2}{2} \right)^2} - \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2} \right)^2} \right]$$

$\Phi =$ Es el factor de la aleta superior

Figura 4-3: Definición de las dimensiones geométricas de losa en lámina colaborante (Lennon et al., 2007)

4.2.8.1 Resistencia a momento positivo

Para determinar la capacidad de la losa a momento positivo se debe calcular la temperatura y resistencia en cada uno de los componentes (*Steel deck*, barras adicionales).

La temperatura θ_a de la pestaña inferior, alma y aleta superior de la lámina colaborante está dada por la siguiente Ecuación:

$$\theta_a = b_0 + b_1 \frac{1}{l_3} + b_2 \frac{A}{L_r} + b_3 \Phi + b_4 \Phi^2 \quad (4.18)$$

Donde,

$b_0 \dots b_4$ = Son los coeficientes para la determinación de las temperaturas de varias partes del *Steel deck* como se indica en la Tabla

$\frac{A}{L_r}$ = Factor de geometría de la lámina [mm]

A = Volumen de concreto del valle por metro de longitud [mm^3/m]

h_2 = Altura de la lámina [mm]

L_r = Área expuesta de la cresta, alma y valle por metro [mm^2/m]

l_1, l_2 = Son las distancias mostradas en la figura [mm]

l_3 = Ancho de la cresta [mm]

Tabla 4-4: Coeficientes para determinar la temperatura (Lennon et al., 2007)

Resistencia a fuego estándar (minutos)	Parte de lámina de <i>Steel Deck</i>	b_0 (°C)	b_1 (°C mm)	b_2 (°C mm)	b_3 (°C)	b_4 (°C)
R60	Aleta inferior	951	-1197	-2,32	86,4	-150,7
	Alma	661	-833	-2,996	537,7	-351,9
	Aleta superior	340	-3269	-2,62	1148,4	-679,8
R90	Aleta inferior	1018	-839	-1,55	65,1	-108,1
	Alma	816	-959	-2,21	464,9	-340,2
	Aleta superior	618	-2786	-1,79	767,9	-472
R120	Aleta inferior	1063	-679	-1,13	46,7	-82,8
	Alma	925	-949	-1,82	344,2	-267,4
	Aleta superior	770	-2460	-1,67	592,6	-379

La temperatura θ_s del acero de refuerzo ubicado en el valle se puede calcular a partir de la siguiente Ecuación:

$$\theta_s = c_0 + c_1 \frac{u_3}{h_2} + c_2 z + c_3 \frac{A}{L_r} + c_4 \alpha + c_5 \frac{1}{l_3} \quad (4.19)$$

Con:

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{\sqrt{u_1}} + \frac{1}{\sqrt{u_2}} + \frac{1}{\sqrt{u_3}}$$

Donde:

$\alpha =$ ángulo de inclinación del alma de la lámina (grados)

$c_0 \dots c_5 =$ Coeficientes para determinar la temperatura de las barras en el nervio de la losa, como se indica en la Tabla 4-5

$\frac{A}{L_r} =$ Factor de geometría del nervio [mm]

$A =$ Volumen de concreto del valle por metro de longitud [mm^3/m]

$h_2 =$ Altura de la lámina [mm]

$L_r =$ Área expuesta de la cresta, alma y valle por metro [mm^2/m]

$l_3 =$ Ancho de la cresta [mm]

$u_1, u_2 =$ Distancias más cortas desde el centro de la barra de refuerzo positivo hasta cualquier punto de las almas de la lámina [mm]

$u_3 =$ Distancias desde el centro de la barra de refuerzo hasta el valle de la lámina [mm]

$Z =$ Factor de posición de la barra en el nervio [$mm^{-1/2}$]

Figura 4-4: Definición de u_1, u_2 y u_3 (Lennon et al., 2007)

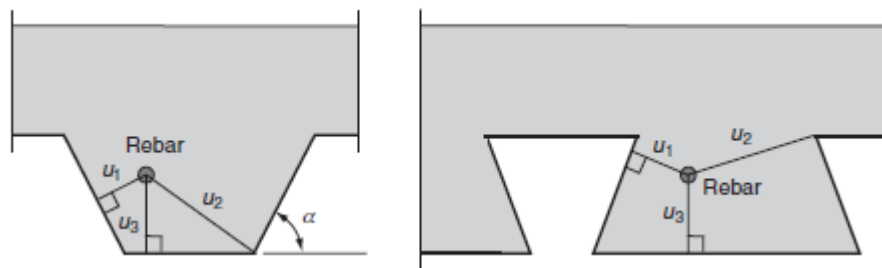


Tabla 4-5: Coeficientes para determinar la temperatura en las barras de refuerzo (Lennon et al., 2007)

CONCRETO	Resistencia [min]	$C_0(^{\circ}C)$	$C_1(^{\circ}C)$	$C_2(^{\circ}C \text{ mm}^{0.5})$	$C_3(^{\circ}C \text{ mm})$	$C_4(^{\circ}C/^{\circ})$	$C_5(^{\circ}C \text{ mm})$
NORMAL	R60	1191	-250	-240	-5.01	1.04	-925
	R90	1342	-256	-235	-5.3	1.39	-1267
	R120	1387	-238	-227	-4.79	1.68	-1326

Para concretos aligerados ver (EN1994-1-2, 2005)

Luego de determinar la temperatura en cada parte de la sección de la losa (parte inferior del valle, alma del deck, cresta, barra de refuerzo dentro del valle), se puede calcular el factor de reducción de resistencia (k_y) y su capacidad en tensión.

Igualando fuerzas en tracción y compresión se tiene:

$$\sum F_i = 0.85 * (l_1 + l_3) * Z_{pl} * f'_c \quad (4.20)$$

Donde,

F_i = Fuerza desarrollada por cada elemento en tracción

Z_{pl} = Profundidad del eje neutro plástico

f'_c = Resistencia a compresión del concreto.

Luego de determinar el eje neutro plástico, se realiza sumatoria de momentos en algún punto de la sección para obtener la capacidad de flexión positiva.

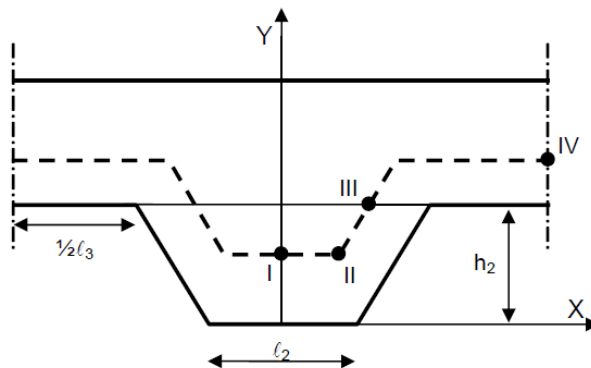
En el ejemplo de aplicación se presenta el procedimiento expuesto anteriormente.

4.2.8.2 Resistencia a momento negativo

Se ignora la contribución de la lámina colaborante a la resistencia a momento negativo.

La capacidad a momento negativo se calcula considerando una sección reducida basado en isotérmicas de temperatura límite de 4 puntos característicos.

Figura 4-5: Puntos característicos de las isotérmicas



La temperatura límite, θ_{lim} está definida por:

$$\theta_{lim} = d_0 + d_1 N_s + d_2 \frac{A}{L_r} + d_3 \phi + d_4 \frac{1}{l_3} \quad (4.21)$$

Donde,

N_s = Fuerza desarrollada por el refuerzo en tensión

d_i = Coeficientes para determinar la temperatura límite

Tabla 4-6: Coeficientes para determinar la temperatura límite (Lennon et al., 2007)

CONCRETO	Resistencia [min]	$d_0(^{\circ}\text{C})$	$d_1(^{\circ}\text{C})$	$d_2 (^{\circ}\text{C mm}^{0.5})$	$d_3(^{\circ}\text{C mm})$	$d_4(^{\circ}\text{C}/^{\circ})$
NORMAL	R60	867	-1.90E-04	-8.75	-123	-1378
	R90	1055	-2.20E-04	-9.91	-154	-1990
	R120	1144	-2.20E-04	-9.71	-166	-2155

Para concretos aligerados ver (EN1994-1-2, 2005)

Las coordenadas para los 4 puntos se determinan a partir de las siguientes expresiones:

$$X_I = 0$$

$$Y_I = Y_{II} = \frac{1}{\left(\frac{1}{z} - \frac{4}{\sqrt{l_1 + l_3}}\right)^2} \quad (4.22)$$

$$X_{II} = \frac{l_2}{2} + \frac{Y_I}{\sin \alpha} (\cos \alpha - 1) \quad (4.23)$$

$$X_{III} = \frac{l_1}{2} - \frac{b}{\sin \alpha} \quad (4.24)$$

$$Y_{III} = h_2 \quad (4.25)$$

$$X_{IV} = \frac{l_1}{2} + \frac{l_3}{2} \quad (4.26)$$

$$Y_{IV} = h_2 + b \quad (4.27)$$

Donde,

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2h_2}{l_1 - l_2}\right)$$

$$a = \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{\sqrt{h_2}} \right)^2 l_1 \sin \alpha$$

$$b = \frac{l_1}{2} \sin \alpha \left(1 - \frac{\sqrt{a^2 - 4a + c}}{a} \right)$$

$$c = -8(1 + \sqrt{1 + a}) \text{ si } a \geq 8$$

$$c = +8(1 + \sqrt{1 + a}) \text{ si } a < 8$$

$z =$ Se puede calcular con la Ecuación (4.19): asumiendo $\frac{u_3}{h_2} = 0.75$ y usando $\theta_s = \theta_{lim}$

Para aumentar la resistencia a momento negativo, además de la malla electrosoldada se pueden suministrar barras de refuerzo adicionales ubicadas en la parte superior de la losa.

Luego de determinar los valores de resistencia de acuerdo a la temperatura a la cual están expuestos se procede con el cálculo de sumatoria de fuerzas y momentos para determinar la capacidad a momento negativo de la sección. En el ejemplo aplicativo se muestra el procedimiento expuesto anteriormente.

4.2.8.3 Espesor equivalente de losa

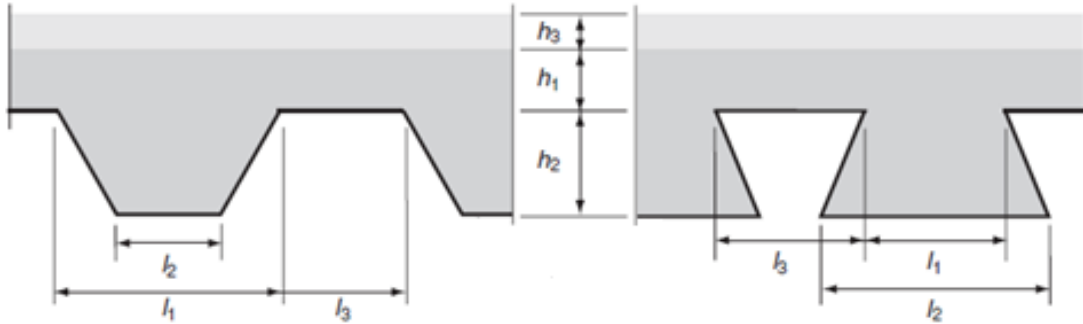
Para el cálculo de distribución de temperatura en el concreto sobre la lámina colaborante el Eurocódigo (EN1994-1-2, 2005) propone hacer una distribución basado en una losa maciza equivalente.

El espesor de la losa maciza equivalente h_{eff} viene dado por:

$$h_{eff} = h_1 + 0.5h_2 \left(\frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3} \right) \quad \text{para } \frac{h_2}{h_1} \leq 1.5 \text{ y } h_1 > 40 \text{ mm}$$

$$h_{eff} = h_1 \left[1 + 0.75 \left(\frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3} \right) \right] \quad \text{para } \frac{h_2}{h_1} > 1.5 \text{ y } h_1 > 40 \text{ mm} \quad (4.28)$$

Figura 4-6: Dimensiones de la sección transversal de la losa compuesta (Lennon et al., 2007)



El valor de h_3 corresponde al espesor de piso acabado que tenga la losa.

El Eurocódigo estipula unos espesores mínimos efectivos de acuerdo a la curva estándar de resistencia:

Tabla 4-7. Espesor mínimo efectivo en función de la resistencia a la curva de fuego estándar (EN1994-1-2, 2005).

Resistencia [min]	Espesor mínimo efectivo h_{eff} [mm]
R30	$60-h_3$
R60	$80-h_3$
R90	$100-h_3$
R120	$120-h_3$
R180	$150-h_3$
R240	$175-h_3$

5. Resistencia al fuego de conexiones

5.1 Resistencia de pernos y soldaduras a temperaturas elevadas

La NSR-10(2010) en el título F, define las siguientes propiedades para pernos a elevadas temperaturas para ser consideradas en el diseño de conexiones:

Tabla 5-1: Propiedades de los pernos de alta resistencia de los grupos A y B a temperaturas elevadas (NSR-10, 2010)

Temperatura del Acero °C	$F_{nt}(T)/F_{nt}$ o $F_{nv}(T)/F_{nv}$
20	1.00
93	0.97
150	0.95
200	0.93
320	0.88
430	0.71
480	0.59
540	0.42
650	0.16
760	0.08
870	0.04
980	0.01
1100	0.00

De acuerdo con la normativa americana (ANSI/AISC 360, 2016), estos valores se basan en una revisión de datos experimentales ((Gonzalez, F. and Lange, 2009); (François Hanus, 2010);(F. Hanus et al., 2011); (Kirby, 1995);(Kodur et al., 2011);(Yu, 2006))

La resistencia de los pernos depende tanto de la temperatura como del historial de temperatura. Los factores de reducción de resistencia mostrados en la anterior tabla suponen que la temperatura mostrada es la temperatura máxima a la que fue o será expuesto el perno. Por ejemplo, si un tornillo se calienta 650°C, la resistencia se puede calcular como el 16% de su valor normal a temperatura ambiente. Sin embargo, si el perno alcanzó una temperatura mayor y luego se enfría, la resistencia puede ser menor a la esperada.

El apéndice 4 de la AISC 360-16, no incluye disposiciones para calcular la resistencia a temperaturas elevadas de las soldaduras. El Euro código (EN1993-1-2, 2005) si presenta unos factores de reducción de resistencia para soldaduras y pernos los cuales se muestra a continuación:

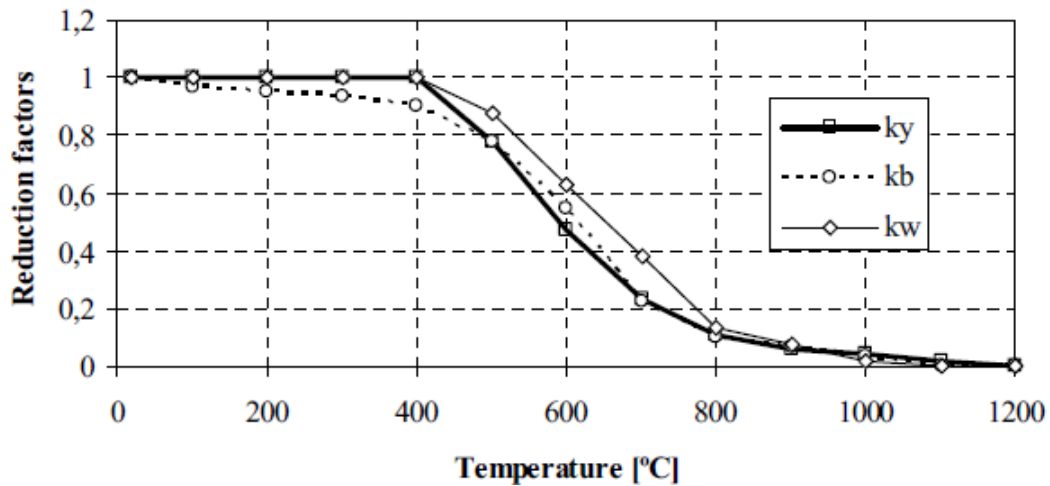
Tabla 5-2: Factores de reducción para tornillos y soldaduras a temperaturas elevadas (Franssen & Real, 2015)

Temperature, θ_a [°C]	Reduction factor for bolts, $k_{b,\theta}$ (Tension and shear)	Reduction factor for welds, $k_{w,\theta}$
20	1.000	1.000
100	0.968	1.000
150	0.952	1.000
200	0.935	1.000
300	0.903	1.000
400	0.775	0.876
500	0.550	0.627
600	0.220	0.378
700	0.100	0.130
800	0.067	0.074
900	0.033	0.018
1000	0.000	0.000

En la siguiente figura se muestra una comparación entre los factores de reducción del acero estructural (K_y), los pernos (K_b) y soldaduras (K_w). Donde se puede observar que

los pernos comienzan a perder su resistencia a temperaturas más bajas que el acero estructural o las soldaduras.

Figura 5-1: Factores de reducción para el acero estructural, pernos y soldaduras
(Franssen & Real, 2015)



5.2 Temperatura de las conexiones en situación de incendio

Como simplificación, puede suponerse una distribución uniforme de la temperatura dentro de la conexión. Esta temperatura se puede calcular utilizando el valor máximo de las relaciones de masividad de los miembros conectados.

Para las conexiones de viga a columna y de viga a viga, donde las vigas soportan un piso de concreto, la distribución de la temperatura de la conexión se puede determinar a partir de la temperatura del patín inferior de la viga conectada utilizando el siguiente método (Franssen & Real, 2015):

- Caso 1: Si la altura de la viga es menor o igual a 400mm

$$\theta_h = 0.88\theta_0 \left[1 - 0.3 \left(\frac{h}{D} \right) \right] \quad (5.1)$$

Donde:

θ_h = Temperatura a una altura h(mm) de la viga [°C]

θ_0 = Temperatura en el patín inferior de la viga [°C]

h = Altura a la que está ubicado cada perno por encima del patín inferior de la viga [mm]

D = Peralte de la viga [mm]

Caso 2: Si el peralte de la viga es mayor a 400mm

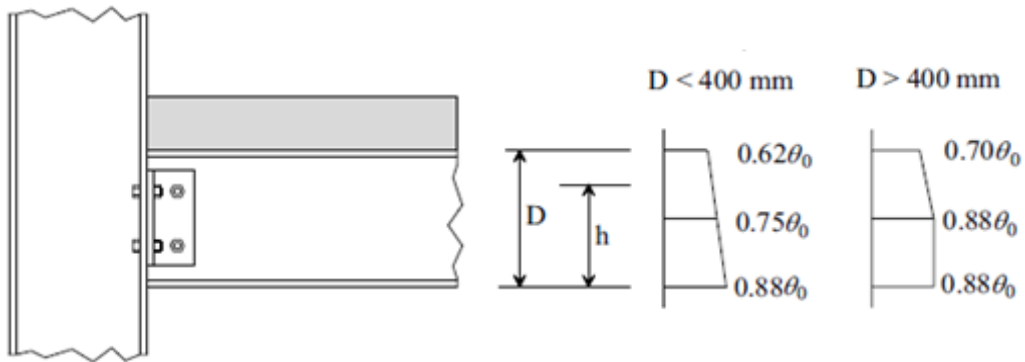
- Para $h < \frac{D}{2}$

$$\theta_h = 0.88\theta_0 \quad (5.2)$$

- Para $h > \frac{D}{2}$

$$\theta_h = 0.88\theta_0 \left[1 + 0.2 \left(1 - \frac{2h}{D} \right) \right] \quad (5.3)$$

Figura 5-2: Variación de la temperatura en altura de acuerdo a la ubicación de la conexión (Franssen & Real, 2015)



6.Análisis Prescriptivo según NSR-10(2010)

Los requerimientos de protección contra incendios estipulados en la NSR-10(2010) están fundamentados en las siguientes premisas estipuladas en el titulo J de la NSR-10(2010):

- Reducir en todo lo posible el riesgo de incendios en edificaciones
- Evitar la propagación del fuego tanto dentro de las edificaciones como hacia estructuras aledañas
- Facilitar las tareas de evacuación de los ocupantes de las edificaciones en caso de incendio
- Facilitar el proceso de extinción de incendios en las edificaciones
- Minimizar el riesgo de colapso de la estructura durante las labores de evacuación y extinción.

6.1 Clasificación de la edificación por grupo de Uso

El titulo J de la NSR-10(2010), establece unos grupos y subgrupos de acuerdo a la ocupación de la edificación:

Tabla 6-1. Grupos y subgrupos de ocupación (Tabla J.1.1-1)

Grupos y Subgrupos de ocupación	Clasificación
A	ALMACENAMIENTO
A-1	Riesgo moderado
A-2	Riesgo bajo
C	COMERCIAL
C-1	Servicios
C-2	Bienes
E	ESPECIALES
F	FABRIL E INDUSTRIAL
F-1	Riesgo moderado
F-2	Riesgo bajo
I	INSTITUCIONAL
I-1	Reclusión
I-2	Salud o incapacidad
I-3	Educación
I-4	Seguridad pública
I-5	Servicio público
L	LUGARES DE REUNION
L-1	Deportivos
L-2	Culturales y teatros
L-3	Sociales y recreativos
L-4	Religiosos
L-5	De transporte
M	MIXTO Y OTROS
P	ALTA PELIGROSIDAD
R	RESIDENCIAL
R-1	Unifamiliar y bifamiliar
R-2	Multifamiliar
R-3	Hoteles
T	TEMPORAL

6.2 Clasificación de la edificación en función del riesgo de pérdida de vidas humanas o amenaza de combustión (J.3.3)

6.2.1 Categoría I: Comprende las edificaciones con mayor riesgo de pérdidas de vidas humanas o con alta amenaza de combustión.

6.2.2 Categoría II: Comprende las edificaciones de riesgo intermedio

6.2.3 Categoría III: Comprende las edificaciones con baja capacidad de combustión.

Tabla 6-2. Clasificación de resistencia contra el fuego de acuerdo con su uso, área construida y número de pisos (Tabla J.3.3-1)

Grupos y subgrupos de ocupación	Área total construida, A_T m ²	Número de pisos						
		1	2	3	4	5	6	≥ 7
(C-1)	$A_T > 1500$	III	III	II	II	II	I	I
	$A_T < 1500$	III	III	III	II	II	II	I
(C-2)	$A_T > 500$	II	I	I	I	I	I	I
	$A_T < 500$			II	I	I	I	I
(E)	Sin límite	III	III	III	II	II	II	I
(I-2), (I-4)	$A_T > 1000$	III	II	II	I	I	I	I
	$500 < A_T < 1000$	III	III	II	II	I	I	I
	$A_T < 500$	III	III	III	II	II	II	I
(I-3)	$A_T > 1000$	II	II	I	I	I	I	I
	$A_T < 1000$		III	II	II	I	I	I
(L-1), (L-2), (L-3), (L-4)	$A_T > 1000$	II	I	I	I	I	I	I
(L-5), (I-1), (I-5)	$500 < A_T < 1000$	II	II	I	I	I	I	I
	$A_T < 500$	III	III	II	II	I	I	I
(R-1), (R-2)	Unidades > 140 m ²				II	I	I	I
	Unidades ≤ 140 m ²				III	II	II	I
(R-3)	$A_T > 5000$	III	II	I	I	I	I	I
	$A_T < 5000$	III	II	II	II	I	I	I

Tabla 6-3. Clasificación de resistencia contra el fuego de acuerdo con su uso, densidad de carga combustible y el número de pisos.

Grupos de ocupación de las edificaciones	Potencial combustible C_c (MJ / m ²)	Requieren protección				
		Número de pisos				
		1	2	3	4	≥ 5
(A-1), (A-2)	$C_c > 8\ 000$	II	II	I	I	I
	$4\ 000 < C_c < 8\ 000$	III	II	II	I	I
	$C_c < 4\ 000$	III	III	III	II	I
(F-1), (F-2)	$C_c > 8\ 000$	I	I	I	I	I
	$4\ 000 < C_c < 8\ 000$	II	II	I	I	I
	$2\ 000 < C_c < 4\ 000$	III	II	II	I	I
	$C_c < 2\ 000$	III	III	II	II	I
(P)	$C_c > 8\ 000$	I	I	I	I	I
	$4\ 000 < C_c < 8\ 000$	II	I	I	I	I
	$C_c < 4\ 000$	III	II	II	I	I

6.3 Resistencia requerida contra el fuego

La NSR-10(2010) estipula unas resistencias al fuego mínimas que deben cumplir los elementos estructurales y demás elementos de la construcción (J.3.4.3 NSR-10(2010))

Tabla 6-4: Resistencia requerida al fuego normalizado NTC 1480 (ISO 834), en horas, de elementos de una edificación.

Elementos de la construcción	Categoría según la clasificación dada en J.3.3.1		
	I	II	III
Muros Cortafuego	3	2 ½	2
Muros de cerramiento de escaleras, ascensores, buitrones, ductos para basuras y corredores de evacuación	2	2	1 ½
Muros divisorios entre unidades	2	1 ½	1
Muros interiores no portantes	½	¼	-
Columnas, vigas, viguetas, losas, y muros portantes de cualquier material, y estructuras metálicas en celosía	2	1 ½	1
Cubiertas	1	1	½
Escaleras interiores no encerradas con muros	2	1½	1

7. Diseño estructural en situación de incendio aplicando métodos analíticos

A continuación, se presentará el diseño estructural de una edificación de uso mixto en situación de incendio con el objetivo de aplicar los conceptos vistos anteriormente.

7.1 Descripción de la edificación

La estructura a diseñar corresponde a una edificación de uso mixto (Dos niveles de uso locales comerciales y dos niveles de uso oficinas), corresponde a un ejercicio académico donde se han asumido datos como ubicación, parámetros de sitio y arquitectura.

7.1.1 Definición Arquitectónica

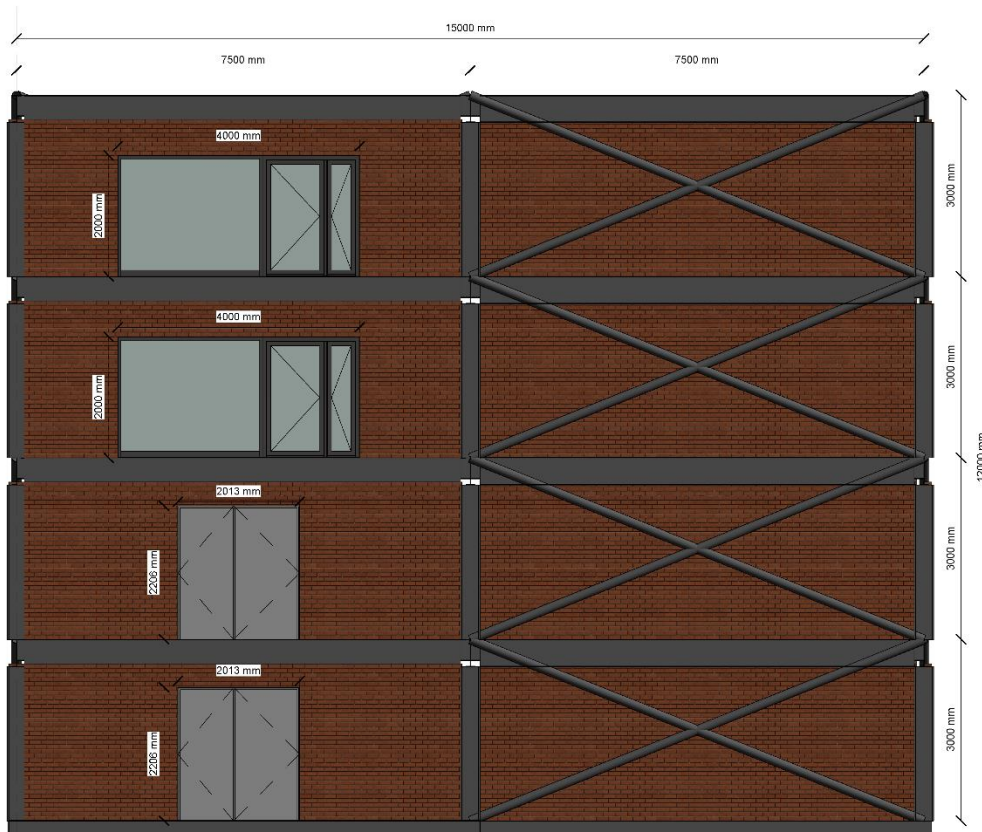
- N+0.00: a N+6.00 Uso comercial, muros perimetrales en mampostería de 15cm y divisiones internas en particiones livianas.
- N+6.00 a N+12.00: Uso oficinas, particiones livianas. Muros perimetrales en mampostería de 15cm de espesor y divisiones internas en particiones livianas.
- Losa: *Steel deck* 2" Cal 22, espesor de 120mm
- Piso acabado: espesor 50 mm

La edificación tendrá dos estructuras independientes para las escaleras de acceso. El análisis y diseño estructural de estas no se contempla en el presente trabajo.

Figura 7-1: Fachada por ejes 1 y 3



Figura 7-2: Fachadas Laterales de la edificación



7.1.2 Definición Estructural

El ejercicio corresponde a una edificación que estaría ubicada en la ciudad de Bucaramanga, Departamento de Santander.

A continuación, se presentan un resumen de los datos considerados en el análisis y modelación estructural.

7.1.3 Cargas

De acuerdo a la NSR-10(2010) Título B.

- **Cargas Muertas**

Steeldeck 2" + concreto e= 12 cm	2.38 kN/m ²
Piso Acabado	1.50 kN/m ²
Particiones livianas	1.00 kN/m ²
Red contra incendios	0.20 kN/m ²
Cielo raso e instalaciones para losa	0.20 kN/m ²

- **Cargas Vivas**

Comercio, minorista	5.00 kN/m ²
Oficinas, corredores y escaleras	3.00 kN/m ²

7.1.4 Definición Sísmica

Ubicación :	BUCARAMANGA (SANTANDER)	
Coeficientes de aceleración y velocidad	Aceleración horizontal pico efectiva, Aa	0.25
	Velocidad horizontal pico efectiva, Av	0.25
	Aceleración pico efectiva umbral de daño, Ad	0.09
	Aceleración pico efectiva reducida, Ae	0.15
	Zona de amenaza sísmica	Alta
Tipo de suelo (General)	C, Perfiles de suelo muy densos o roca blanda con $760\text{m/s} > V_s \geq 360\text{ m/s}$ o Perfiles de suelo muy densos o roca blanda con $N \geq 50$ o $S_u \geq 100\text{ Kpa}$.	
Grupo de uso	Grupo I	1.00

7.1.5 Definición de Sistema estructural

El sistema estructural definido para la edificación son Pórticos Arriostrados Concéntricamente de disipación especial de energía (PAC-DES)

Figura 7-3: Planta tipo de la edificación

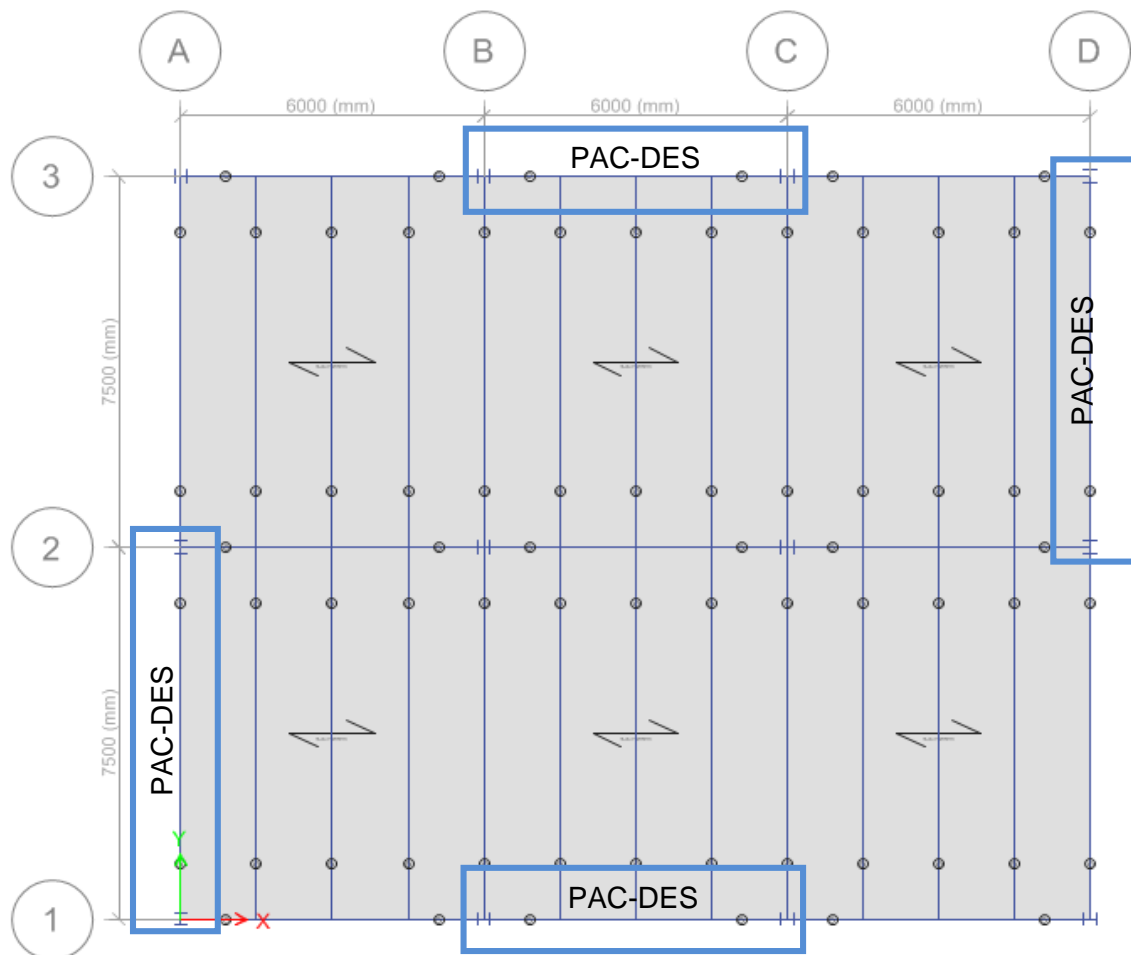


Figura 7-4: Elevaciones Típicas de los PAC-DES

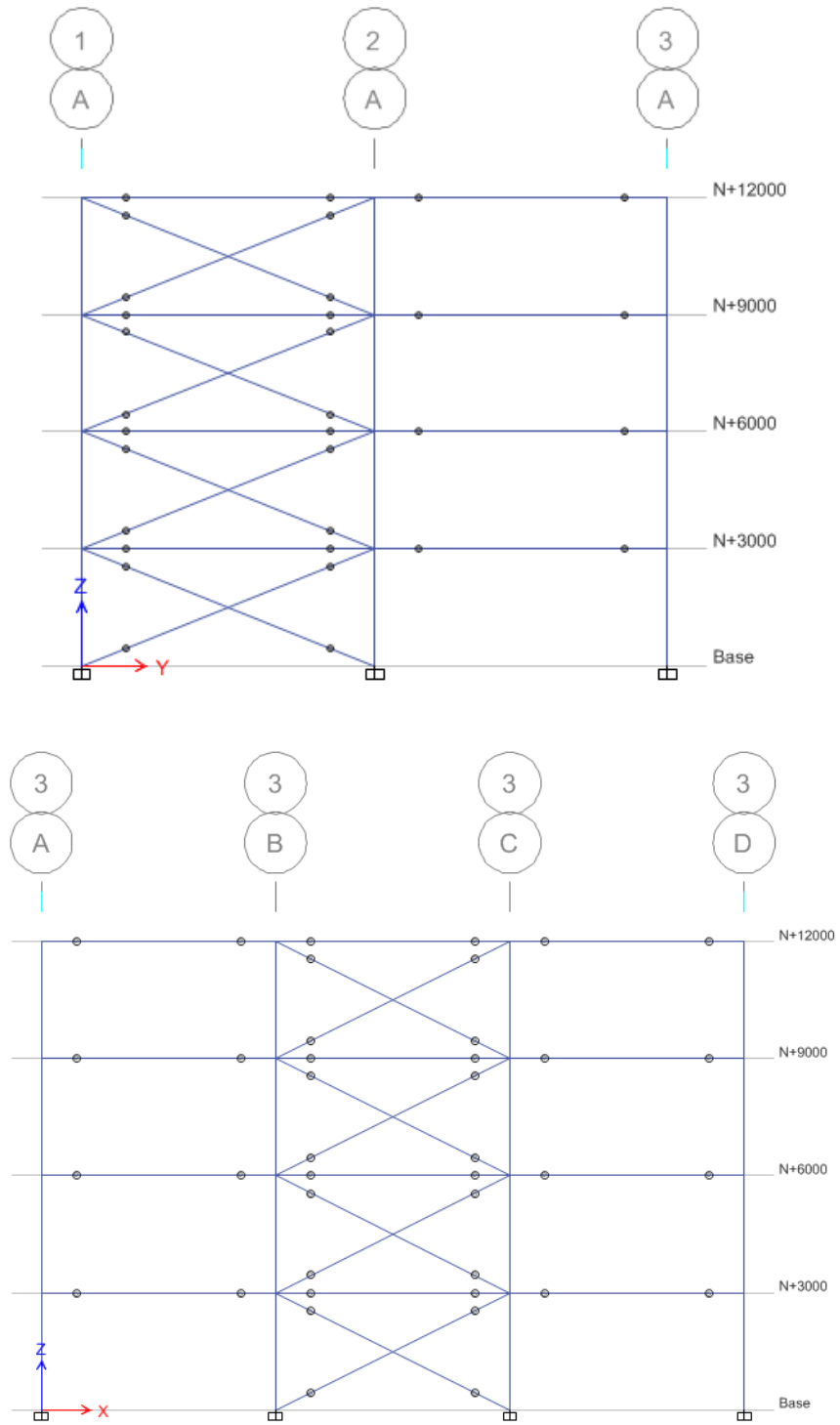
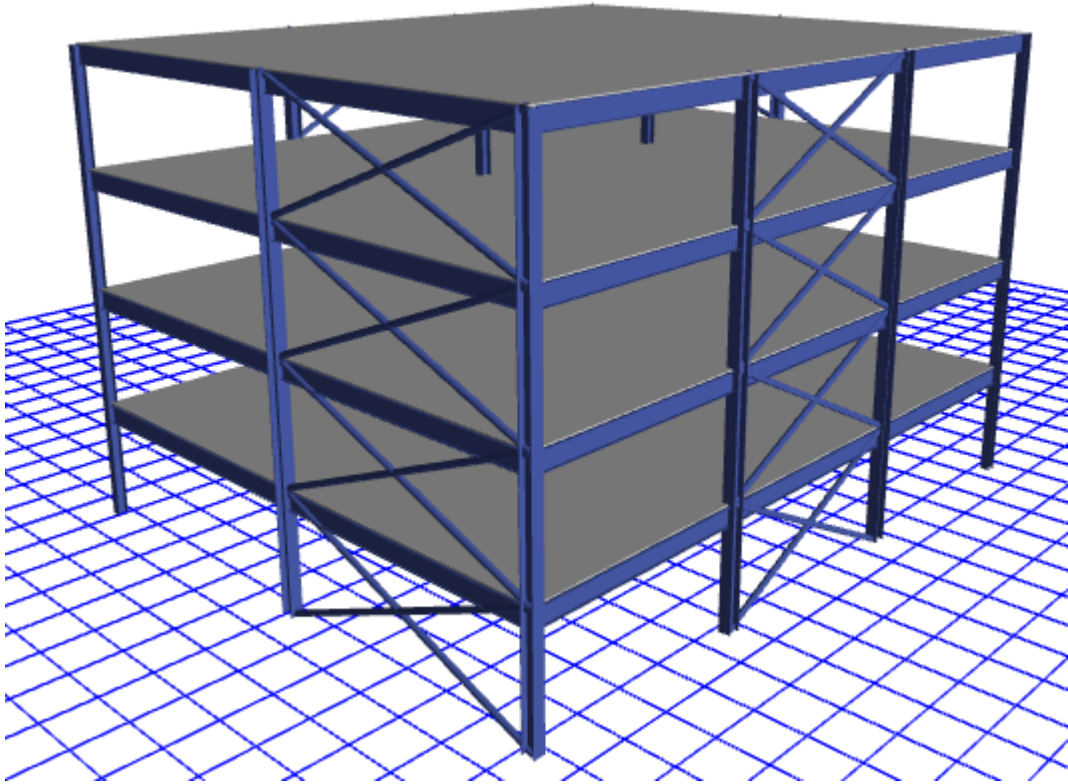


Figura 7-5: Modelo 3D de la estructura principal de la edificación.



7.2 Zona comercial

Corresponde a los dos primeros niveles de la edificación.

Se realizará el análisis a partir del cálculo de una curva paramétrica de incendio.

7.2.1 Características del recinto

Uso: Comercial

- Dimensiones del recinto

Ancho	15	m
Largo	18	m
Altura	3	m

Tabla 7-1. Características de los materiales de piso, techo y muros

Elemento	Material	Densidad [kg/m ³]	Conductividad [W/(Mk)]	Calor específico [J/(kgK)]
Piso	Concreto	2300	1.6	1000
Techo	Concreto	2300	1.6	1000
Muro 1	Ladrillo	1600	0.7	840
Muro 2	Ladrillo	1600	0.7	840
Muro 3	Ladrillo	1600	0.7	840
Muro 4	Ladrillo	1600	0.7	840

- Aberturas

Muro 1: Tiene dos ventanas de 3x1.5m

Muro 2: Tiene una Puerta de 2mx2m

Muro 3: Tiene dos ventanas de 3x1.5m

Muro 4: Tiene una Puerta de 2mx2m

7.2.2 Cálculo de curva paramétrica

- **Factor b:** Se determina el valor de b , para el techo, piso y muros. A continuación, se presenta el procedimiento de cálculo para el muro 1, los demás datos se presentan en la Tabla 7-2:

$$b = \sqrt{c p \lambda} = \sqrt{840 * 1600 * 0.7} = 969.95 \text{ J/kgK}$$

Luego de realizar el cálculo para cada una de las partes se calcula el factor b total:

$$b = \frac{\sum b_i A_i}{\sum A_i} = \frac{1202730.74}{712} = 1689.23 \text{ J/kgK}$$

- **Factor de aberturas O:** Como se tienen varias aberturas en los muros del recinto se debe calcular la altura promedio y aplicar la formulación:

$$O = \frac{A_v \sqrt{h_{eq}}}{A_t} = \frac{26 * \sqrt{1.6538}}{738} = 0.0453 \text{ m}^{0.5}$$

Tabla 7-2. Cálculo de factor b de curva paramétrica

Elemento	Factor b [J/m2s0.5K]	Area [m2]	Aberturas [m2]	Area sin aberturas	b*A	Av*Hi
Piso	1918.33	270.00	0.00	270.00	517949.80	0.00
Techo	1918.33	270.00	0.00	270.00	517949.80	0.00
Muro 1	969.95	45.00	9.00	36.00	34918.14	13.50
Muro 2	969.95	54.00	4.00	50.00	48497.42	8.00
Muro 3	969.95	45.00	9.00	36.00	34918.14	13.50
Muro 4	969.95	54.00	4.00	50.00	48497.42	8.00
Totales		738.00	26.00	712.00	1202730.74	43.00
hequivalente		1.6538	m			

- **Coefficiente de expansión Γ :**

$$\Gamma = \left(\frac{0/0.04}{b/1160}\right)^2 = \left(\frac{0.0453/0.04}{1689.23/1160}\right)^2 = 0.605$$

- **Carga de incendio de diseño**

El valor de diseño de la carga de fuego $q_{f,d}$ se determinará a partir de la Ecuación (2.11):

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \delta_{q2} \delta_n m q_{f,k}$$

De acuerdo con la Tabla 2-2 para zona comercial se tiene un valor de $q_{f,k} = 730 \text{ MJ/m}^2$

A continuación, se determinan cada uno de los factores de acuerdo a las condiciones que se tienen en la edificación.

$$m = 1$$

$$\delta_{q1} = 1.51, \text{ Realizando una interpolación de la Tabla 2-3 para un área de } 270\text{m}^2$$

$$\delta_{q2} = 1,$$

Superficie de suelo del sector A_f [m ²]	Riesgo de inicio del incendio δ_{q1}	Riesgo de inicio del incendio δ_{q2}	Ejemplos de tipos de actividad
25	1,10	0,78	galería de arte, museo, piscina
250	1,50	1,00	oficina, residencia, hotel, industria papelera
2 500	1,90	1,22	fábrica de maquinaria y de motores
5 000	2,00	1,44	laboratorio químico, taller de pintura
10 000	2,13	1,66	fábrica de fuegos artificiales o de pinturas

$\delta_{n1} = 0.61$ Se tienen rociadores

$\delta_{n2} = 1.0$ Hay un solo sistema de suministro

Se tienen sistemas de detección por humo y calor por lo tanto $\delta_{n4} = 0.73$ y tomar $\delta_{n3} = 1.0$

$\delta_{n5} = 1.0$ No hay transmisión automática de la alarma a los bomberos

$\delta_{n6} = 1.0$ No hay una brigada de bomberos que permanentemente está en el sitio (Bomberos propios)

$\delta_{n7} = 0.78$ La ciudad tiene bomberos

$\delta_{n8} = 1.0$ Se tienen rutas de acceso seguras

$\delta_{n9} = 1.0$ Se tienen equipos normales de extinción de incendios para ser usados por los ocupantes presentes.

$\delta_{n10} = 1.5$ No se tiene sistema de control de humos en las escaleras.

La densidad de carga por área de piso es:

$$q_{f,d} = 1.51 * 1 * 0.61 * 0.73 * 0.78 * 1.5 * 1 * 730 = 574.3 \text{ MJ/m}^2$$

La densidad de carga de fuego relacionada al área total del recinto sería:

$$q_{t,d} = q_{f,d} \frac{A_f}{A_t} = 574.3 * \frac{15 * 18}{738} = 210.1 \text{ MJ/m}^2$$

- **Duración de la fase de calentamiento**

La duración de la fase de calentamiento t_{max} es dado en horas de acuerdo con la siguiente Ecuación:

$$t_{max} = \frac{0.0002 q_{t,d}}{0} = \frac{0.0002 * 210.1}{0.0453} = 0.927 \text{ h} = 55.6 \text{ min}$$

Este valor debe ser comparado con un valor límite $t_{lim} = 0.25$ obtenido de la Tabla 2-5 que depende de la tasa de crecimiento asociada a la ocupación del recinto.

Como $t_{lim} = 0.25 < t_{max} = 0.927$ el incendio está controlado por ventilación, entonces se tiene:

$$t^*_{max} = \Gamma t_{max} = 0.605 * 0.927 = 0.561h$$

La temperatura máxima alcanzada en el recinto está se determina aplicando la Ecuación (2.14):

$$\theta_{max} = 20 + 1325(1 - 0.324e^{-0.2*0.561} - 0.204e^{-1.7*0.561} - 0.472e^{-19*0.561})$$

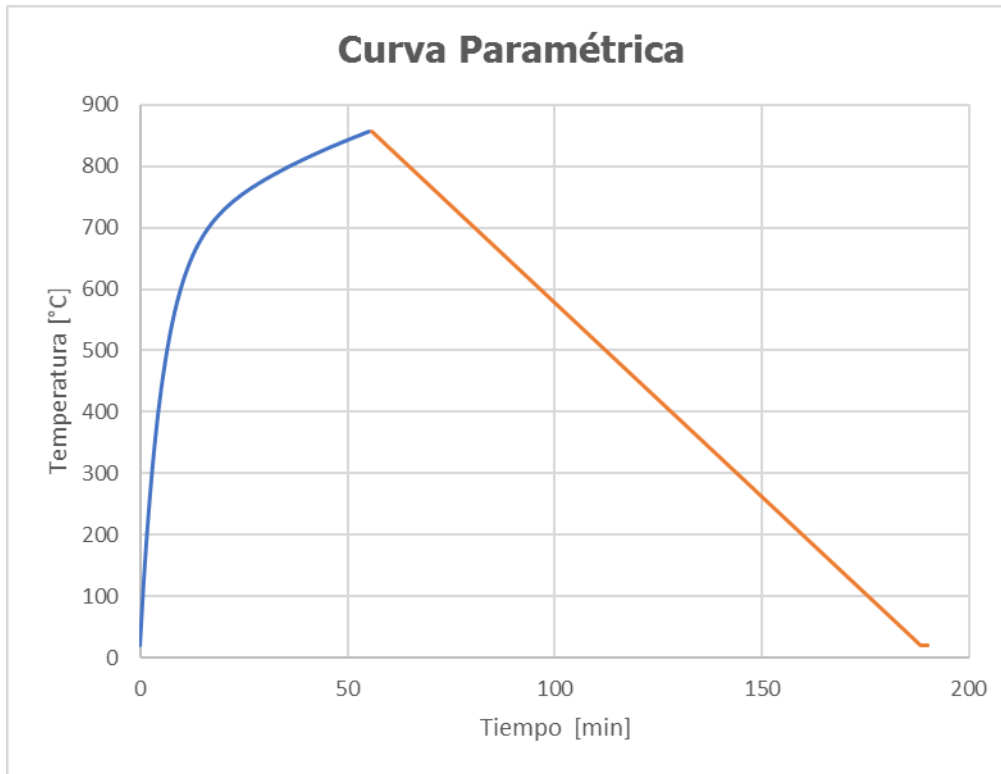
$$\theta_{max} = 857.13^\circ C$$

En resumen, el recinto alcanzaría una temperatura máxima de 857.13°C en 55.6 minutos.

La temperatura en la fase de enfriamiento está dada por la siguiente expresión, tomada de la Ecuación (2.18):

$$\theta_g = 857.13 - 625(t^* - 0.561)$$

A partir de las expresiones encontradas se puede graficar la variación de la temperatura en el recinto en función del tiempo.

Figura 7-6: Curva Paramétrica zona comercial

7.2.3 Cálculo estructural de elementos en situación de incendio Zona Comercial

- **Diseño columnas**

A partir de la combinación de carga $1.2D + T + 0.5L + 0.2G$, se obtiene la sollicitación de carga para cada columna.

Tabla 7-3. Solicitación de cargas en columnas del primer nivel de la edificación

Story	Column	Unique Name	Load Case/Combo	V2	V3	P	T	M2	M3	Perfil
				kN	kN	kN	kN-m	kN-m	kN-m	
Base	A1	2	1.2D+0.5L	2.86	23.33	582.75	-1.9	3.04	-0.003	W12x96
Base	A2	7	1.2D+0.5L	4.38	-17.04	923.43	1.2	4.36	0.003	W12x96
Base	B1	12	1.2D+0.5L	2.27	-1.16	543.04	1.2	2.02	0.000	W12x96
Base	B3	17	1.2D+0.5L	40.89	1.39	915.17	-1.3	1.4	0.001	W12x96
Base	C1	22	1.2D+0.5L	0.01	-0.001258	1397.81	0.0	0.01	0.000	W12x96
Base	C3	27	1.2D+0.5L	35.34	-1.4	868.70	1.4	0.16	0.000	W12x96
Base	D2	32	1.2D+0.5L	-35.34	1.4	868.70	-1.4	-0.16	0.000	W12x96
Base	D3	37	1.2D+0.5L	-0.01	0.001258	1397.81	0.0	-0.01	0.000	W12x96
Base	A3	42	1.2D+0.5L	-40.89	-1.39	915.17	1.3	-1.4	0.001	W10x49
Base	B2	47	1.2D+0.5L	-2.27	1.16	543.04	-1.2	-2.02	0.000	W10x49
Base	C2	52	1.2D+0.5L	-4.38	17.04	923.43	-1.2	-4.36	0.003	W10x49
Base	D1	57	1.2D+0.5L	-2.86	-23.33	582.75	1.9	-3.04	-0.003	W10x49

Se realizará el diseño para los elementos de mayor sollicitación de carga por tipo de perfil, Para las columnas del PAC (W12x96) y para las que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica (W10x49).

Tabla 7-4. Propiedades geométricas del perfil W12x96

PROPIEDADES DE LA SECCION DE ACERO			
Altura del perfil en "mm" (d) :	323.0	Area bruta de la sección en "mm ²ⁿ " (Ag) :	18200.0
Espesor del alma en "mm" (tw) :	14.00	Modulo de seccion en "mm ³ⁿ " (Sz) :	2153000
Ancho del patin en "mm" (bf) :	309.0	Modulo de seccion en "mm ³ⁿ " (Sy) :	729400
Espesor del patin en "mm" (tf) :	22.90	Inercia de la sección en "mm ⁴ⁿ " (Iz) :	347600000
Valor en "mm" de k (k=tf para vigas soldadas) :	37.90	Inercia de la sección en "mm ⁴ⁿ " (Iy) :	112700000
Radio de giro en "mm" (rz) :	138.1	Modulo plastico en "mm ³ " (Zz) :	2419000
Radio de giro en "mm" (ry) :	78.60	Modulo plastico en "mm ³ " (Zy) :	1109000
Constante torsional en " mm ⁴ " (J) :	2883000	Esfuerzo de fluencia en "MPa" (Fy) :	351.6
Constante de alabeo en " mm ^b " (Cw) :	253500000000	Peso del perfil en "Kg/m" (W) :	143.0

Tabla 7-5: Propiedades geométricas del perfil W10x49

PROPIEDADES DE LA SECCION DE ACERO			
Altura del perfil en "mm" (d) :	253.0	Area bruta de la sección en "mm ²ⁿ " (Ag) :	9290.0
Espesor del alma en "mm" (tw) :	8.60	Modulo de seccion en "mm ³ⁿ " (Sz) :	892100
Ancho del patin en "mm" (bf) :	254.0	Modulo de seccion en "mm ³ⁿ " (Sy) :	305500
Espesor del patin en "mm" (tf) :	14.20	Inercia de la sección en "mm ⁴ⁿ " (Iz) :	112900000
Valor en "mm" de k (k=tf para vigas soldadas) :	27.20	Inercia de la sección en "mm ⁴ⁿ " (Iy) :	38800000
Radio de giro en "mm" (rz) :	110.2	Modulo plastico en "mm ³ " (Zz) :	986100
Radio de giro en "mm" (ry) :	64.60	Modulo plastico en "mm ³ " (Zy) :	463300
Constante torsional en " mm ⁴ " (J) :	579400	Esfuerzo de fluencia en "MPa" (Fy) :	351.6
Constante de alabeo en " mm ^b " (Cw) :	552900000000	Peso del perfil en "Kg/m" (W) :	73.0

- **Cálculo de temperatura en el perfil sin protección**

A partir de la curva paramétrica determinada para el recinto se calcula la temperatura del perfil aplicando la formulación para perfiles sin protección vista en el capítulo 3:

Análisis de perfil W12x96

Área expuesta=1.83m²/m

$$\frac{A_m}{V} = \frac{1.83}{18200 * 10^{-6}} = 100.549m^{-1}$$

$$\left[\frac{A_m}{V} \right]_b = \frac{2 * (b_f + d)}{A_g} * 1000 = \frac{2 * (309 + 323)}{18200} * 1000 = 69.450m^{-1}$$

$$k_{sh} = \frac{69.450}{100.549} = 0.69$$

La masividad modificada por el factor se sombra= 0.69 * 100.549 = 69.38m⁻¹

c_a =Calor específico que varía con la temperatura

$\dot{h}_{net,d}$ =Flujo de calor neto por unidad de área.

Aplicando la Ecuación (3.11), teniendo un $\Delta t = 5seg$, se determina la temperatura del perfil en función de la curva paramétrica definida.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{k_{sh} \frac{A_m}{V}}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t [^{\circ}C]$$

A continuación, se muestra el cálculo de temperatura para 120 min

Tabla 7-6. Variación de la temperatura en el perfil sin protección.

t(seg)	t(min)	θ_g [°C]	θ_m [°C]	Ca[J/kgK]	hnet	ΔT [°C]	T acum [°C]
0	0.00	20	20	439.80	0		20
60	1.00	134	22	441.07	3612.06	0.30	22
120	2.00	230	27	445.02	7275.13	0.62	27
180	3.00	310	37	451.45	11014.79	0.95	37
240	4.00	376	50	459.97	14754.66	1.25	50
300	5.00	432	67	470.07	18384.40	1.54	67
360	6.00	479	87	481.14	21799.07	1.78	87
420	7.00	518	110	492.66	24916.16	2.00	110
480	8.00	552	135	504.19	27679.42	2.17	135
540	9.00	580	162	515.48	30056.28	2.31	162
600	10.00	604	191	526.41	32032.98	2.42	191
660	11.00	625	220	537.02	33609.72	2.49	220
720	12.00	643	250	547.48	34796.74	2.53	250
780	13.00	659	281	558.01	35611.49	2.54	281
840	14.00	672	311	568.86	36076.85	2.53	311
900	15.00	684	341	580.29	36220.05	2.49	341
960	16.00	695	371	592.52	36071.89	2.43	371
1020	17.00	704	400	605.71	35665.99	2.35	400

t(seg)	t(min)	θ_g [°C]	θ_m [°C]	Ca[J/kgK]	hnet	ΔT [°C]	T acum [°C]
1080	18.00	713	427	619.92	35037.94	2.26	427
1140	19.00	720	454	635.17	34224.25	2.15	454
1200	20.00	727	479	651.39	33261.11	2.04	479
1260	21.00	734	503	668.46	32183.24	1.93	503
1320	22.00	740	525	686.23	31022.89	1.81	525
1380	23.00	745	546	704.52	29809.04	1.69	546
1440	24.00	751	566	723.17	28566.97	1.58	566
1500	25.00	756	584	742.00	27318.06	1.47	584
1560	26.00	760	601	760.79	26079.93	1.37	601
1620	27.00	765	617	773.22	24857.95	1.29	617
1680	28.00	769	632	788.24	23659.16	1.20	632
1740	29.00	773	646	806.57	22501.47	1.12	646
1800	30.00	777	658	829.30	21400.90	1.03	658
1860	31.00	781	670	857.93	20371.83	0.95	670
1920	32.00	785	681	894.72	19427.39	0.87	681
1980	33.00	789	691	943.15	18579.98	0.79	691
2040	34.00	792	700	1008.69	17841.90	0.71	700
2100	35.00	796	708	1100.36	17226.03	0.63	708
2160	36.00	799	715	1233.59	16746.30	0.55	715

t(seg)	t(min)	θ_g [°C]	θ_m [°C]	Ca[J/kgK]	hnet	ΔT [°C]	T acum [°C]
2220	37.00	803	721	1435.91	16417.57	0.46	721
2280	38.00	806	726	1758.29	16254.02	0.38	726
2340	39.00	809	730	2298.51	16265.37	0.29	730
2400	40.00	813	733	3249.06	16450.98	0.21	733
2460	41.00	816	735	4996.91	16795.14	0.14	735
2520	42.00	819	737	3562.06	17154.56	0.19	737
2580	43.00	822	740	2619.03	17359.24	0.26	740
2640	44.00	825	743	2005.68	17378.53	0.34	743
2700	45.00	828	748	1606.27	17195.79	0.42	748
2760	46.00	831	753	1343.55	16814.35	0.49	753
2820	47.00	834	760	1167.61	16256.74	0.55	760
2880	48.00	837	766	1047.01	15558.27	0.59	766
2940	49.00	839	774	962.14	14759.22	0.61	774
3000	50.00	842	781	900.82	13898.70	0.61	781
3060	51.00	845	788	855.36	13011.00	0.61	788
3120	52.00	848	796	820.87	12124.12	0.59	796
3180	53.00	850	803	794.14	11259.60	0.57	803
3240	54.00	853	809	773.01	10433.10	0.54	809
3300	55.00	855	815	756.03	9655.16	0.51	815

t(seg)	t(min)	θ_g [°C]	θ_m [°C]	Ca[J/kgK]	hnet	ΔT [°C]	T acum [°C]
3360	56.00	855	821	742.30	8160.52	0.45	821
3420	57.00	849	826	732.98	5529.20	0.31	826
3480	58.00	842	829	727.36	3280.57	0.19	829
3540	59.00	836	830	724.48	1374.23	0.08	830
3600	60.00	830	831	723.75	-233.05	-0.01	831
3660	61.00	823	830	724.79	-1583.68	-0.08	830
3720	62.00	817	829	727.35	-2716.98	-0.14	829
3780	63.00	811	827	731.31	-3668.25	-0.20	827
3840	64.00	805	824	736.59	-4468.33	-0.24	824
3900	65.00	798	821	743.17	-5143.78	-0.27	821
3960	66.00	792	817	751.12	-5717.22	-0.30	817
4020	67.00	786	814	760.49	-6207.72	-0.32	814
4080	68.00	779	810	771.44	-6631.35	-0.34	810
4140	69.00	773	806	784.16	-7001.62	-0.35	806
4200	70.00	767	801	798.89	-7329.93	-0.36	801
4260	71.00	760	797	815.97	-7625.96	-0.37	797
4320	72.00	754	792	835.83	-7898.01	-0.38	792
4380	73.00	748	788	859.02	-8153.33	-0.38	788
4440	74.00	741	783	886.29	-8398.36	-0.38	783

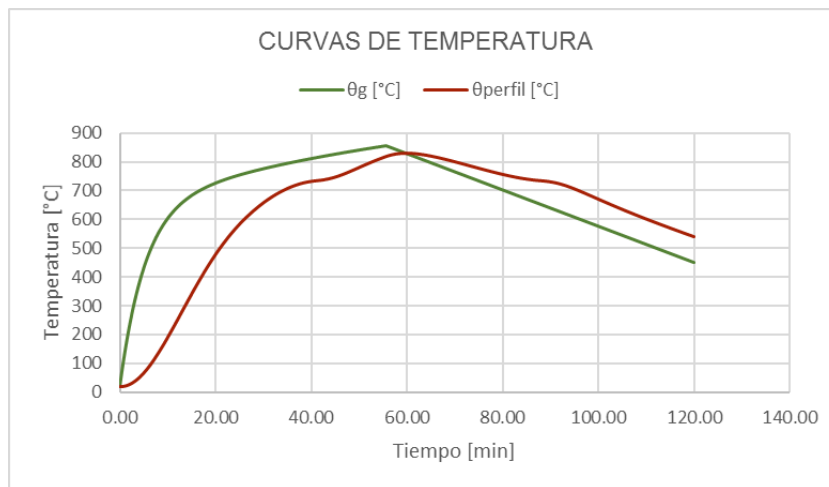
t(seg)	t(min)	θ_g [°C]	θ_m [°C]	Ca[J/kgK]	hnet	ΔT [°C]	T acum [°C]
4500	75.00	735	779	918.59	-8638.96	-0.37	779
4560	76.00	729	774	957.20	-8880.65	-0.37	774
4620	77.00	723	770	1003.84	-9128.74	-0.36	770
4680	78.00	716	766	1060.87	-9388.56	-0.35	766
4740	79.00	710	761	1131.57	-9665.51	-0.34	761
4800	80.00	704	757	1220.55	-9965.23	-0.33	757
4860	81.00	697	754	1334.43	-10293.57	-0.31	754
4920	82.00	691	750	1482.88	-10656.61	-0.29	750
4980	83.00	685	747	1680.32	-11060.39	-0.26	747
5040	84.00	678	744	1948.56	-11510.63	-0.24	744
5100	85.00	672	741	2321.24	-12012.13	-0.21	741
5160	86.00	666	739	2851.18	-12568.09	-0.18	739
5220	87.00	660	737	3622.63	-13179.37	-0.15	737
5280	88.00	653	735	4772.35	-13843.97	-0.12	735
5340	89.00	647	734	3672.32	-14499.98	-0.15	734
5400	90.00	641	731	2642.97	-15008.75	-0.22	731
5460	91.00	634	728	2004.02	-15340.11	-0.30	728
5520	92.00	628	724	1607.28	-15486.15	-0.38	724
5580	93.00	622	719	1357.09	-15461.65	-0.45	719

t(seg)	t(min)	θ_g [°C]	θ_m [°C]	Ca[J/kgK]	hnet	ΔT [°C]	T acum [°C]
5640	94.00	615	713	1194.95	-15297.68	-0.51	713
5700	95.00	609	707	1086.26	-15031.06	-0.55	707
5760	96.00	603	700	1010.74	-14696.27	-0.58	700
5820	97.00	597	693	956.44	-14321.56	-0.60	693
5880	98.00	590	686	916.14	-13928.23	-0.60	686
5940	99.00	584	679	885.39	-13531.47	-0.61	679
6000	100.00	578	671	861.33	-13141.56	-0.61	671
6060	101.00	571	664	842.10	-12765.18	-0.60	664
6120	102.00	565	657	826.43	-12406.35	-0.60	657
6180	103.00	559	650	813.45	-12067.25	-0.59	650
6240	104.00	552	643	802.54	-11748.79	-0.58	643
6300	105.00	546	636	793.25	-11451.03	-0.58	636
6360	106.00	540	629	785.25	-11173.48	-0.57	629
6420	107.00	534	622	778.30	-10915.28	-0.56	622
6480	108.00	527	616	772.19	-10675.39	-0.55	616
6540	109.00	521	609	766.79	-10452.64	-0.54	609
6600	110.00	515	603	761.97	-10245.84	-0.54	603
6660	111.00	508	596	755.54	-10053.11	-0.53	596
6720	112.00	502	590	748.51	-9871.09	-0.53	590

t(seg)	t(min)	θ_g [°C]	θ_m [°C]	Ca[J/kgK]	hnet	ΔT [°C]	T acum [°C]
6780	113.00	496	584	741.72	-9698.78	-0.52	584
6840	114.00	489	577	735.15	-9535.43	-0.52	577
6900	115.00	483	571	728.80	-9380.34	-0.51	571
6960	116.00	477	565	722.66	-9232.89	-0.51	565
7020	117.00	471	559	716.72	-9092.50	-0.51	559
7080	118.00	464	553	710.96	-8958.67	-0.50	553
7140	119.00	458	547	705.39	-8830.92	-0.50	547
7200	120.00	452	541	699.99	-8708.82	-0.50	541

La siguiente figura muestra la gráfica de los datos tabulados anteriormente junto con la temperatura del recinto de análisis:

Figura 7-7: Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W12X96 sin protección.



Se observa que el perfil alcanza una temperatura de 830°C a los 59 min

El factor de reducción para la temperatura máxima alcanzada (830°C) es igual a:

$$k_{y,\theta} = \left(0.9674 * \left(e^{\frac{830-482}{39.19}} + 1 \right) \right)^{-1/3.833} = 0.1$$

$$F_y(T) = 0.10 * 350 = 35 \text{ MPa}$$

$k_{E,\theta} = 0.085$ Se obtiene realizando interpolación de la Tabla 4-1

$$E(T) = E_s k_{E,\theta} = 204000 * 0.085 = 17340 \text{ MPa}$$

$$L_c = 3000 \text{ mm}$$

El menor radio de giro es $r_y = 78.60 \text{ mm}$

$n = 2$, las columnas son continuas en un extremo

$$\left(\frac{L_c}{r} \right)_T = \left(1 - \frac{830}{2 * (2000)} \right) \left(\frac{3000}{78.60} \right) - \left(\frac{35}{2000} \right) * 830 \geq 0$$

$$\left(\frac{L_c}{r} \right)_T = 15.72$$

$$F_e(T) = \frac{\pi^2 E(T)}{\left(\frac{k L_c}{r} \right)_T^2} = \frac{\pi^2 * 17340}{15.72^2} = 692.5 \text{ MPa}$$

$$F_{cr}(T) = \left[0.42 \sqrt{\frac{F_y(T)}{F_e(T)}} \right] F_y(T) = \left[0.42 \sqrt{\frac{35}{692.5}} \right] * 35 = 28.8 \text{ MPa}$$

La resistencia a compresión del elemento a 830°C sería:

$$\Phi P_n(T) = \Phi F_{cr}(T) A_g = 0.9 * 28.8 * 18200 = 471744 \text{ N}$$

$$\Phi P_n(T) = 471.744 \text{ kN}$$

Es decir, ninguna columna W12x96 cumple las solicitaciones para condición de incendio. Hay que proteger el perfil.

Análisis para W10x49

$$\frac{A_m}{V} = 159.31m^{-1}$$

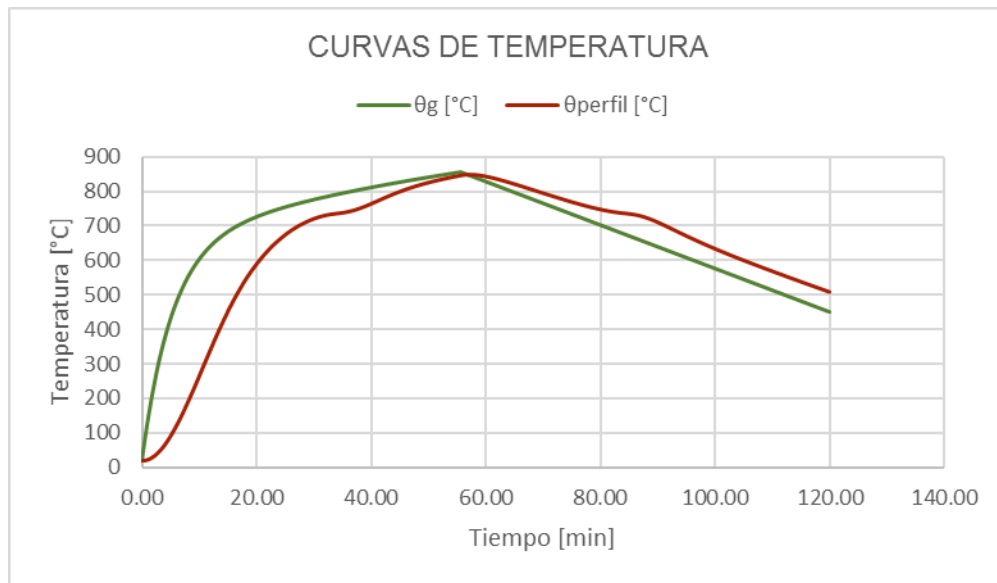
$$\left[\frac{A_m}{V}\right]_b = 109.15m^{-1}$$

$$k_{sh} = \frac{109.15}{159.31} = 0.69$$

La masividad modificada por el factor se sombra: $0.69 * 159.31 = 109.9m^{-1}$

Realizando el mismo procedimiento mostrado en el análisis anterior (W12x96), se obtiene la siguiente grafica para el perfil W10x49.

Figura 7-8: Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W10X49 sin protección



El perfil alcanza una temperatura de 848°C a los 56min

El factor de reducción para la temperatura máxima alcanzada (848°C) es:

$$k_{y,\theta} = \left(0.9674 * \left(e^{\frac{848-482}{39.19}} + 1 \right) \right)^{-1/3.833} = 0.088$$

$$F_y(T) = 0.09 * 350 = 30.8MPa$$

$$k_{E,\theta} = 0.078 \text{ Se obtiene realizando interpolación de la Tabla 4-1}$$

$$E_{(T)} = E_s k_{E,\theta} = 204000 * 0.078 = 15912 MPa$$

$$L_c = 3000 mm$$

El menor radio de giro es $r_y = 64.60 mm$

$n = 2$, las columnas son continuas en un extremo

$$\left(\frac{L_c}{r}\right)_T = \left(1 - \frac{848}{2 * (2000)}\right) \left(\frac{3000}{64.60}\right) - \left(\frac{35}{2000}\right) * 848$$

$$\left(\frac{L_c}{r}\right)_T = 21.75$$

$$F_e(T) = \frac{\pi^2 E_{(T)}}{\left(\frac{k L_c}{r}\right)_T^2} = \frac{\pi^2 * 15912}{21.75^2} = 331.9 MPa$$

$$F_{cr}(T) = \left[0.42 \sqrt{\frac{F_y(T)}{F_e(T)}}\right] F_y(T) = \left[0.42 \sqrt{\frac{30.8}{331.9}}\right] * 30.8 = 23.65 MPa$$

La resistencia a compresión del elemento a 848°C sería:

$$\Phi P_n(T) = \Phi F_{cr}(T) A_g = 0.9 * 23.65 * 9290 = 197737.65 N$$

$$\Phi P_n(T) = 197.73 kN$$

Es decir, ninguna columna W10x49 cumple las sollicitaciones para condición de incendio.

Se debe proteger el perfil.

Debido a que ningún perfil cumple las sollicitaciones de carga, se deben proteger. Con el objetivo de optimizar el espesor de la protección, se debe calcular la temperatura crítica del perfil, es decir, la temperatura a la cual el elemento resiste las cargas a las que estará sometido en situación de incendio.

Para efectos prácticos en este ejercicio se calculará la temperatura crítica para la columna con mayor carga, tanto para la W10x49 como para la W12x96.

Las cargas de diseño, para cálculo de temperatura crítica serían:

Tabla 7-7: Mayores solicitaciones de carga en columnas

Story	Column	Unique Name	Load Case/Combo	FX	FY	FZ	MX	MY	Perfil
				kN	kN	kN	kN-m	kN-m	
Base	C1	22	1.2D+0.5L	0.01	-0.00126	1397.81	0.0	0.01	W12x96
Base	C2	52	1.2D+0.5L	-4.38	17.04	923.43	-1.2	-4.36	W10x49

Material de Protección: Vermiculita

Densidad: $\rho_p = 350 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Contenido de humedad: $p = 15\%$

Conductividad térmica: $\lambda_p = 0.12 \text{ [W/(mK)]}$

Calor específico: $c_p = 1200 \text{ [J/(kgK)]}$

- **Análisis para W12x96 con protección**

Luego de realizar varias iteraciones, se determina que la columna W12x96 resiste 1398KN, la carga máxima que tiene de acuerdo a la Tabla 7-7, cuando alcanza una temperatura crítica igual a 650°C.

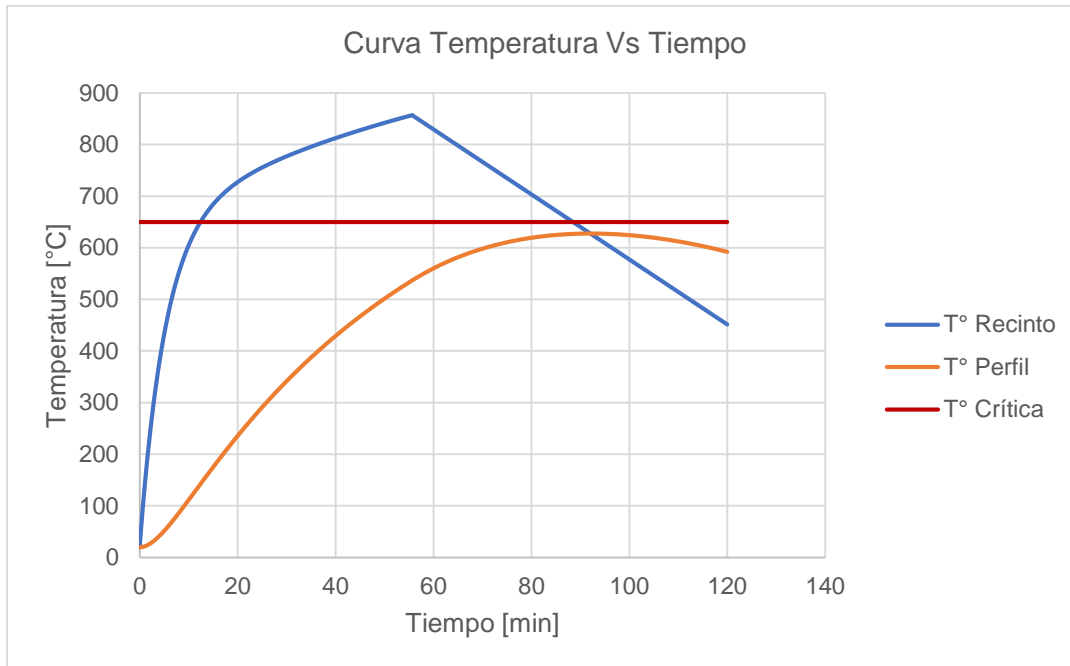
Se procede a calcular el espesor de protección requerido:

La masividad para el perfil protegido es:

$$\frac{A_p}{V} = 100.55m^{-1}$$

Aplicando la formulación de la variación de temperatura para perfil protegido se obtienen los siguientes resultados:

Si se aplican 7mm de espesor del material de protección analizado (Vermiculita), el perfil alcanza una temperatura máxima de 627°C, es decir no supera la temperatura crítica por lo tanto el elemento cumple las solicitaciones de carga.

Figura 7-9: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W12X96 protegido

- **Análisis para W10x49 con protección**

Luego de realizar varias iteraciones, se determina que la columna W10x49 resiste 924KN cuando está a una temperatura crítica igual a 605°C.

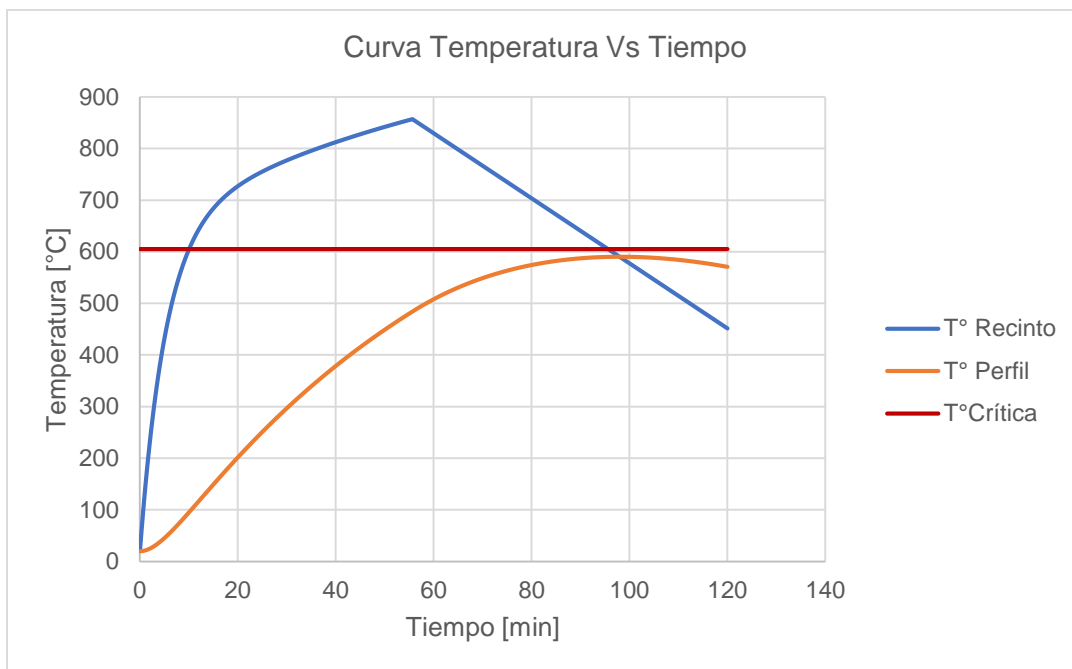
Se procede a calcular el espesor de protección requerido:

La masividad para el perfil protegido es:

$$\frac{A_p}{V} = 159.3m^{-1}$$

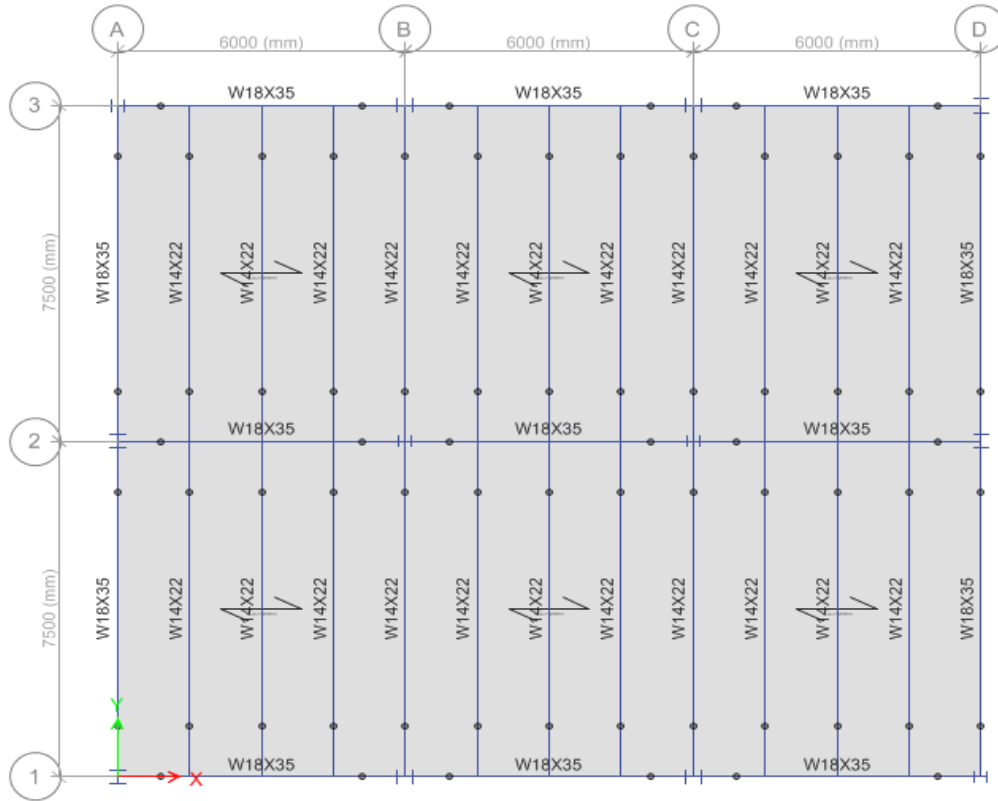
Aplicando la formulación de la variación de temperatura para perfil protegido se obtienen los siguientes resultados:

Si se aplican 13mm de espesor del material de protección analizado (Vermiculita), el perfil alcanza una temperatura máxima de 590°C, es decir no supera la temperatura crítica por lo tanto el elemento cumple las solicitaciones de carga.

Figura 7-10: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W10X49 protegido

DISEÑO VIGAS Y VIGUETAS EN SECCIÓN COMPUESTA

Figura 7-11: Sistema de piso (vigas y viguetas) de la zona comercial



La sección de la losa corresponde a la mostrada a continuación:

Figura 7-12: Sección de losa en *Steel deck*



Los perfiles W18x35 corresponden a vigas y los perfiles W14x22 a viguetas.

El diseño para situación de incendio se realizará usando el factor de retención, de acuerdo a la temperatura de la aleta inferior del perfil.

- **Diseño vigueta W14x22**

Propiedades de la sección de acero:**Tabla 7-8.** Propiedades de sección W14x22

Altura del perfil, d (mm) =	349
Espesor del alma, tw (mm) =	5.84
Ancho del patín, bf (mm) =	127
Espesor del patín, tf (mm) =	8.51
Módulo de sección, Sx (mm ³) =	4.78E+05
Área de la sección, As (mm ²) =	4187
Inercia de la sección, Ix (mm ⁴) =	8.340E+07
Esfuerzo de fluencia, Fy (Mpa) =	352
Peso del perfil, W (kg/m) =	33.0
Modulo plástico, Zx (mm ³) =	5.48E+05
Ancho aferente de la vigueta, baf (mm) =	1500
Ancho aferente de la vigueta a la derecha, bafd (mm) =	750
Ancho aferente de la vigueta a la izquierda, bafi (mm) =	750
Distancia entre apoyos, Lt (mm) =	7500

Cargas sobre la vigueta

Metaldeck Cal 22 + concreto en kN/m ² :	2.35
Piso acabado en "kN/m ² " :	1.50
Particiones en "kN/m ² " :	1.00
Cielo raso e instalaciones en "kN/m ² " :	0.40
Peso propio viguetas en 'kN/m ² ' :	0.23
Total carga muerta " D " en "kN/m ² " :	5.48
Total carga viva " L " en "kN/m ² " :	5.00

Combinaciones de carga

1.4 D en "kN/m ² " :	7.67
1.2 D + 1.6 L en "kN/m ² " :	14.57
1.2 D + 0.5 L en "kN/m ² " :	9.07

Fuerzas últimas cargas permanentes

Momento máximo en "kN-m" :	153.7
Cortante máximo en "kN" :	82.0
Distancia al punto de momento máx. positivo, Xmp (mm)=	3750

A continuación, se presenta la resistencia del perfil para temperatura ambiente:

Porcentaje de conexión máximo, con stud	100.0%
Porcentaje de conexión máximo, con canal	100.0%
Porcentaje de conexión	100.0%
Se supone que: $L_b < L_p$, para la sección simple	
Momento plástico sección simple, ϕM_p (kN-m) =	173.6
Momento plástico sección compuesta, ϕM_n (kN-m) =	354.1
Resistencia a corte del perfil, ϕV_n (kn) =	430.6 kN
Centroide de la sección en "mm" (y) :	353
El perfil cumple a flexión	F.I. = 0.44
El perfil cumple a cortante en el apoyo	F.I. = 0.20

Fuerzas últimas situación de incendio

1.2 D + 0.5 L en "kN/m ² " :	9.07
Momento máximo en situación de incendio "kN-m" :	95.7
Cortante máximo en situación de incendio "kN" :	51.0

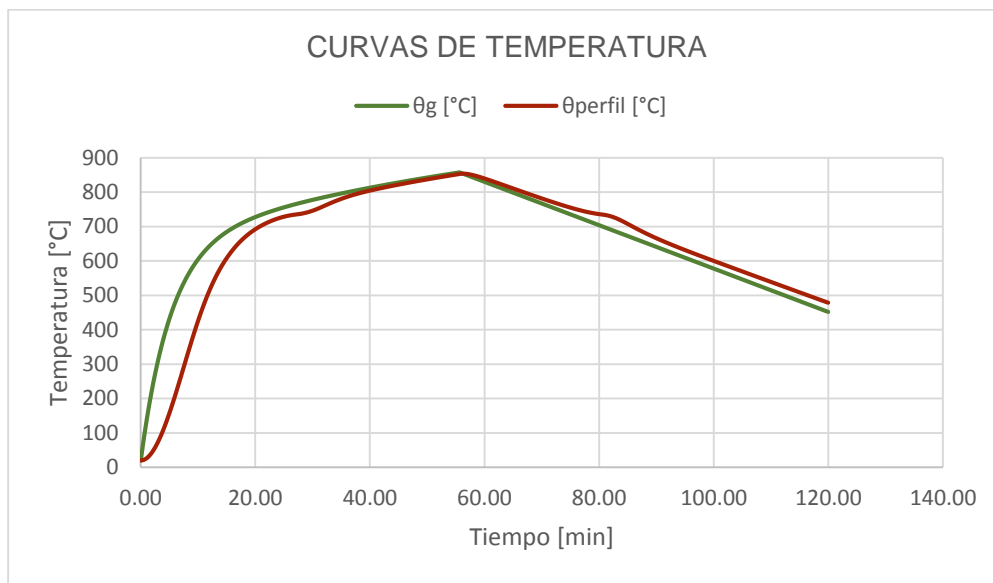
Luego de calcular las solicitaciones de cargas se debe calcular la temperatura a la que estará sometido el perfil en situación de incendio.

- Masividad de la vigueta (Perfil expuesto por tres lados-W14x22)

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{Perimetro} - b_f}{A_g} = 251.49 \text{ m}^{-1}$$

Realizando el análisis se obtiene que el perfil alcanza una temperatura máxima de 854°C a los 56min:

Figura 7-13: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W14X22 sin protección



Interpolando de la tabla de coeficientes de retención (Tabla 4-2), se obtiene un valor de $r(T) = 0.14$. Por lo tanto, la resistencia del perfil sería:

$$\phi M_n(T) = \phi r(T) M_n = 0.14 * 354.1 = 49.57 \text{ kN} * \text{m} < 95.7 \text{ kN} * \text{m} \text{ (No cumple)}$$

Como no cumplen las viguetas se deben proteger.

Se debe calcular la temperatura de la vigueta para que resista un momento último:

$$M_u = 95.7 \text{ kN} * \text{m}$$

Para ello, se determina cual debe ser el factor de retención para conocer la temperatura máxima que debe alcanzar el perfil.

$$r(T) > \frac{M_u}{\phi M_n} = \frac{95.7}{354.1} = 0.27$$

Realizando interpolación lineal de la tabla de factores de retención, se obtiene:

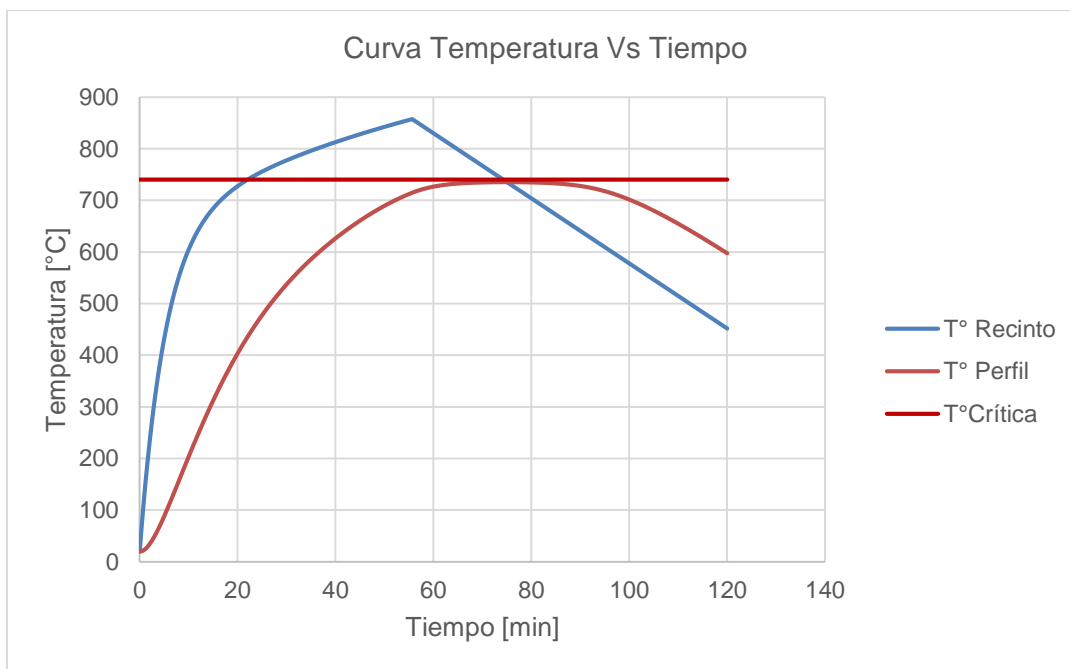
$$r(755^{\circ}\text{C}) = 0.27.$$

Es decir, se debe calcular el espesor de material de protección requerido para que el perfil no supere los 755°C.

$$\frac{A_p}{V} = 251.49 \text{ m}^{-1}$$

Si se aplican 7 mm de espesor del material de protección analizado (Vermiculita), el perfil alcanza una temperatura máxima de 735°C, es decir no supera la temperatura crítica por lo tanto el elemento cumple las solicitaciones de carga.

Figura 7-14: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W14X22 protegido



- Diseño a cortante de vigueta W14x22

El cortante para situación de incendio $V_u = 51 \text{ kN}$

$$F_y(735^\circ\text{C}) = 0.2 * 352 = 70.4 \text{ MPa}$$

$$\phi V_n = \phi_v * 0.6 A_w F_y(T) = 1.0 * 0.6 * 5.8 * 349 * \frac{70.4}{1000} = 85.5 \text{ kN} > 51 \text{ kN (Cumple)}$$

- **DISEÑO VIGA W18X35 EN SECCIÓN COMPUESTA**

Se analizarán las vigas centrales que son las que más solicitaciones de carga tienen:

Tabla 7-9. Propiedades de la sección W18x35

Altura del perfil, d (mm) =	450
Espesor del alma, t _w (mm) =	7.62
Ancho del patín, b _f (mm) =	152
Espesor del patín, t _f (mm) =	10.80
Módulo de sección, S _x (mm ³) =	9.65E+05
Área de la sección, A _s (mm ²) =	6645
Inercia de la sección, I _x (mm ⁴) =	2.170E+08
Esfuerzo de fluencia, F _y (Mpa) =	352
Peso del perfil, W (kg/m) =	52.0
Modulo plástico, Z _x (mm ³) =	1.12E+06

Cargas sobre la viga

Metaldeck Cal 22 + concreto en kN/m ² :	2.35
Piso acabado en "kN/m ² " :	1.50
Particiones en "kN/m ² " :	1.00
Cielo raso e instalaciones en "kN/m ² " :	0.40
Peso propio vigas+viguetas en 'kN/m ² ' :	0.30
Total carga muerta " D " en "kN/m ² " :	5.55
Total carga viva " L " en "kN/m ² " :	5.00

Combinaciones de carga

1.4 D en "kN/m ² " :	7.77
1.2 D + 1.6 L en "kN/m ² " :	14.66
1.2 D + 0.5 L en "kN/m ² " :	9.16

Fuerzas últimas cargas permanentes

Momento máximo en "kN-m" :	494.7
Cortante máximo en "kN" :	329.8

A continuación, se presenta la resistencia del perfil para temperatura ambiente:

Porcentaje de conexión máximo, con stud	100.0%
Porcentaje de conexión máximo, con canal	100.0%
Porcentaje de conexión	100.0%
Se supone que: $L_b < L_p$, para la sección simple	
Momento plástico sección simple, ϕM_p (kN-m) =	354.8
Momento plástico sección compuesta, ϕM_n (kN-m) =	616.1
Resistencia a corte del perfil, ϕV_n (kn) =	724.2 kN
Centroide de la sección en "mm" (y) :	405

Fuerzas últimas situación de incendio

1.2 D + 0.5 L en "kN/m ² " :	9.16
Momento máximo en situación de incendio "kN-m" :	309.0
Cortante máximo en situación de incendio "kN" :	206.0

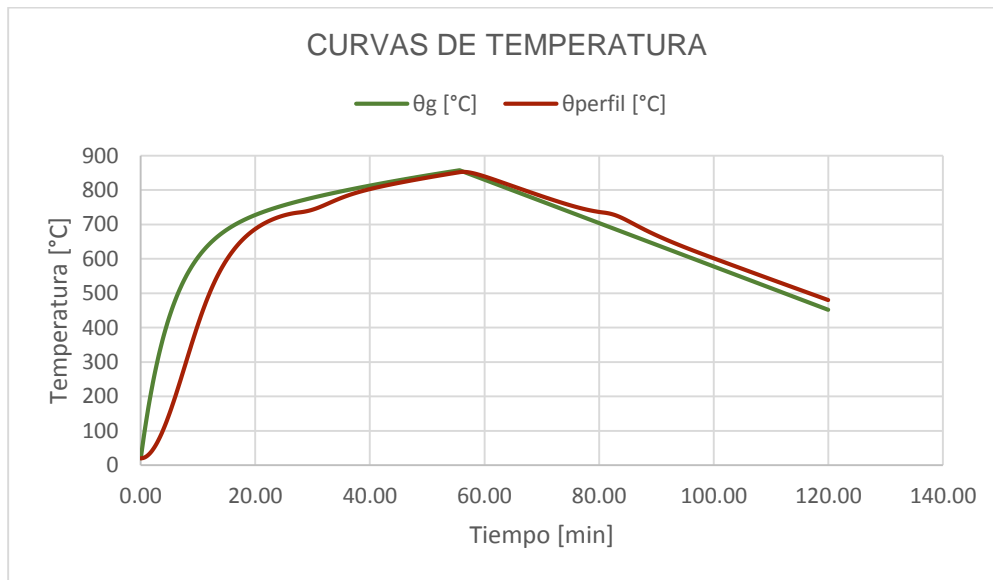
Luego de calcular las solicitaciones de cargas se debe calcular la temperatura a la que estará sometido el perfil en situación de incendio.

- Masividad de la viga (Perfil expuesto por tres lados-W18x35)

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{Perimetro} - b_f}{A_g} = 199.85 \text{ m}^{-1}$$

Realizando el análisis se obtiene que el perfil alcanza una temperatura máxima de 854°C a los 56min:

Figura 7-15: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W18X35 sin protección



Interpolando de la tabla de coeficientes de retención (Tabla 4-2), se obtiene un valor de $r(T) = 0.14$. Por lo tanto, la resistencia del perfil sería:

$$\phi M_n(T) = \phi r(T) M_n = 0.14 * 616.1 = 86.25 \text{ kN} * \text{m} < 309 \text{ kN} * \text{m} \text{ (No cumple)}$$

Como no cumplen las vigas se deben proteger.

Se debe calcular la temperatura de la viga para que resista un momento último igual a:

$$M_u = 309.0 \text{ kN} * \text{m}$$

Para ello, se determina cual debe ser el factor de retención para conocer la temperatura máxima que debe alcanzar el perfil.

$$r(T) > \frac{M_u}{\phi M_n} = \frac{309}{616.1} = 0.50$$

Realizando interpolación lineal de la tabla de factores de retención (Tabla 4-2) se obtiene:

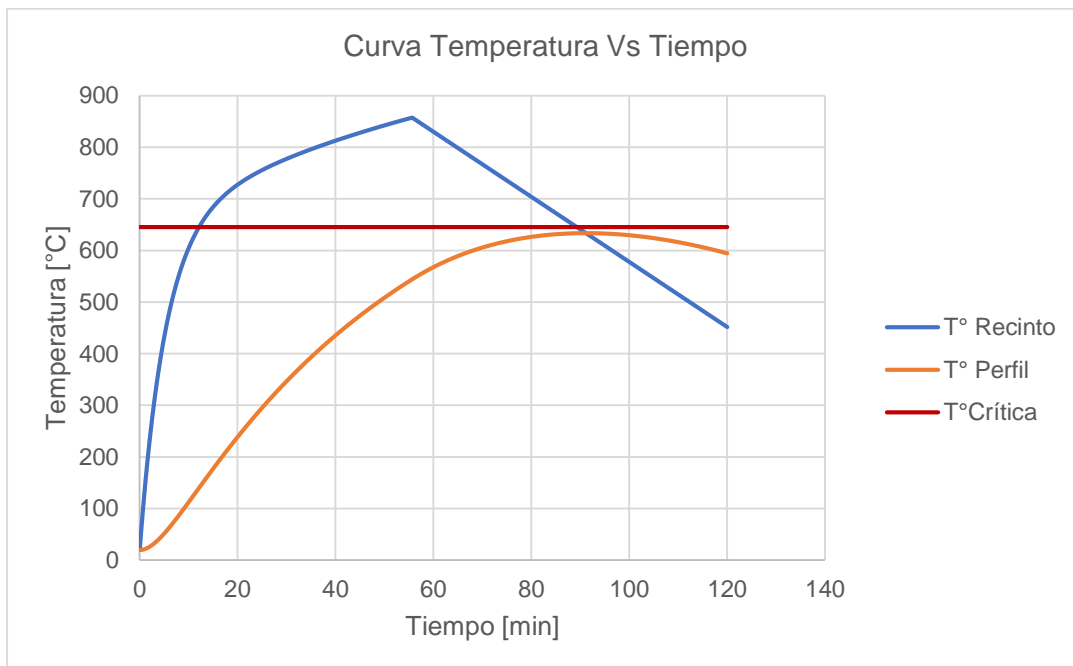
$$r(645^{\circ}\text{C}) = 0.50.$$

Es decir, se debe calcular el espesor de material de protección requerido para que el perfil no supere los 645°C .

$$\frac{A_p}{V} = 199.85 \text{ m}^{-1}$$

Si se aplican 12 mm de espesor del material de protección analizado (Vermiculita), el perfil alcanza una temperatura máxima de 635°C , es decir no supera la temperatura crítica por lo tanto el elemento cumple las solicitaciones de carga.

Figura 7-16: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W18x35 protegido



- Diseño a cortante de viga W18x35

El cortante para situación de incendio $V_u = 206 \text{ kN}$

$$F_y(635^{\circ}\text{C}) = 0.39 * 352 = 137.28 \text{ MPa}$$

$$\phi V_n = \phi_v * 0.6 A_w F_y(T) = 1.0 * 0.6 * 7.6 * 450 * \frac{137.28}{1000} = 281.6 \text{ kN} > 206 \text{ kN (Cumple)}$$

- **DISEÑO DE CONEXIÓN A CORTANTE**

Las cargas de diseño de las conexiones de cortante son:

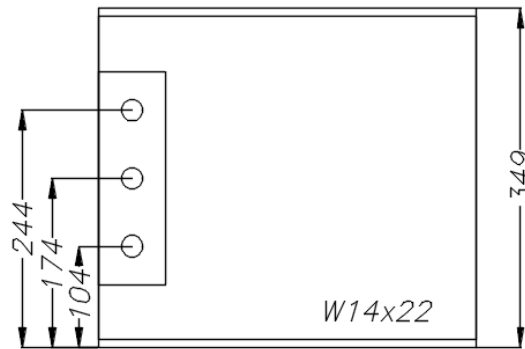
Perfil	Cortante Permanente Vu [kN]=	Cortante Situación de Incendio Vu [kN]=	Temperatura del patín inferior perfil [°C]
W14x22	82.0	51.0	735
W18x35	329.8	206.0	635

En este ítem, se procederá a revisar las conexiones diseñadas para las cargas en situación de incendio.

- **Conexión W14x22**

Aplica el Caso 1 ya que la altura de la viga es menor a 400mm

Figura 7-17: Ubicación de pernos en conexión a cortante de W14x22



La temperatura del perfil protegido es de 735°C

Se puede calcular la temperatura a la altura de cada perno:

Para $h = 104 \text{ mm}$ $\theta_h = 0.88 * 735 \left[1 - 0.3 \left(\frac{104}{349} \right) \right] = 589^\circ \text{C}$

$$\text{Para } h = 174\text{mm} \quad \theta_h = 0.88 * 735 \left[1 - 0.3 \left(\frac{174}{349} \right) \right] = 550^\circ\text{C}$$

$$\text{Para } h = 244\text{mm} \quad \theta_h = 0.88 * 735 \left[1 - 0.3 \left(\frac{244}{349} \right) \right] = 511^\circ\text{C}$$

Se toma de manera conservadora la menor resistencia para todos los pernos de la conexión. De acuerdo con la Tabla 5-1 realizando una interpolación se tiene que para una temperatura de 589°C la relación de resistencias $\frac{F_{nv}(T)}{F_{nv}} = 0.30$

A partir de esta temperatura se realiza un chequeo de todos los estados límites de la conexión, teniendo en cuenta la reducción de resistencia por el incremento de temperatura:

Tabla 7-10: Factores de reducción por temperatura para pernos y soldaduras de la conexión a cortante W14x22

Conexión	Temperatura [°C]	Factor de reducción pernos K_b	Factor de reducción soldadura K_w	Factor de reducción K_y	Factor de reducción K_u
W14x22	589	0.30	0.44	0.52	0.52

A continuación, se presenta el diseño de la conexión:

Figura 7-18: Geometría de conexión en cortante de W14x22 a W18x35

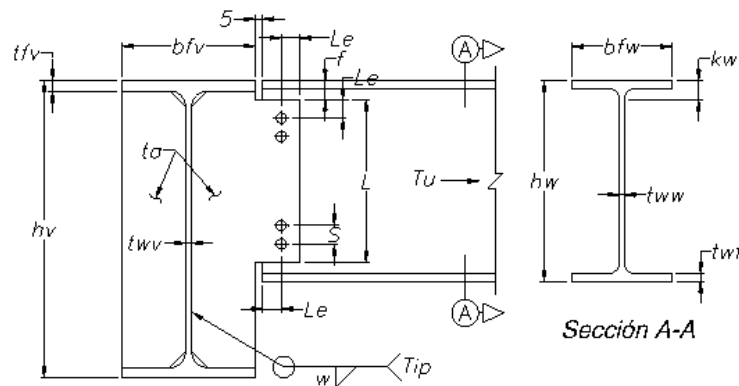


Tabla 7-11: Datos de entrada para el diseño de la conexión

Sección de la vigueta	W14x22, en acero A572 Gr50
Sección de la viga	W18X35, en acero A572 Gr50
Atiesador	Lámina de : PL6mm, en acero ASTM A36
Atiesador interno	Lámina de : PL6mm, en acero ASTM A36
Soldadura a usar	Electrodo : E70XX
Rosca (excluida o Incluida)	Incluida
Tipo de cortante en el pasador	Sencilla
Cortante última en la conexión, $V_u =$	51.0 kN
Tensión última en la conexión, $T_u =$	0.0 kN
Atiesador	
Distancias al borde, $L_e =$	40 mm
Distancias entre pernos, $S =$	70 mm
Longitud de la aleta del aties., $L_a =$	220 mm
Distancia a la aleta del atiesador, $f =$	65 mm
Viga	
Ancho del patín de la viga, $b_{fv} =$	152 mm
Altura de la viga, $h_v =$	450 mm
Espesor del patín de la viga, $t_{fv} =$	11 mm
Espesor del alma de la viga, $t_{wv} =$	8 mm
Vigueta	
Ancho del patín de la vigueta, $b_{fw} =$	127 mm
Altura de la vigueta, $h_w =$	349 mm
Espesor del patín de la vigueta, $t_{fw} =$	9 mm
Valor de la constante, $k_w =$	22 mm

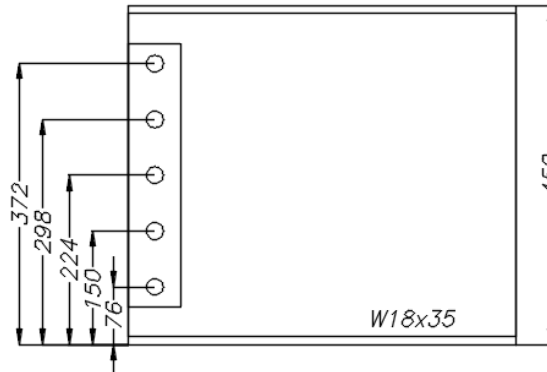
Tabla 7-12: Verificación de estados límites de la conexión a cortante W14x22

Tornillos : 3 Ø7/8 x 1-1/2", A325	
En los pernos, $\phi R_n =$	106.2 kN
Soldadura atiesador	
Tamaño del filete, $w =$	3.5 mm
holgura =	10.0 mm
Vigueta	
Desgarramiento y aplastam., $\phi R_n =$	181.6 kN
Por cortante en el área bruta, $\phi R_n =$	201.5 kN
Por cortante en el área neta, $\phi R_n =$	170.8 kN
Desg. y aplastam. Por tensión, $\phi R_n =$	128.3 kN
Tensión alma (Área gruesa), $\phi^* T_n =$	335.9 kN
Tensión alma (Área neta), $\phi^* T_n =$	256.1 kN
Atiesador	
Desgarramiento y aplastamiento, $\phi R_n =$	165.7 kN
Por cortante en el área bruta, $\phi R_n =$	93.8 kN
Por cortante en el área neta, $\phi R_n =$	82.3 kN
Por bloque de cortante, $\phi R_n =$	90.0 kN
Flexión, $\phi R_n =$	171.9 kN
Desg. y aplastam. Por tensión, $\phi R_n =$	117.1 kN
Tensión en el área gruesa, $\phi^* T_n =$	156.3 kN
Tensión en el área neta, $\phi^* T_n =$	123.4 kN

- **Conexión W18x35**

Aplica el Caso 2 ya que la altura de la viga es mayor a 400mm

Figura 7-19: Ubicación de pernos en conexión a cortante de W18x35



La temperatura del perfil protegido es de 635°C

Se puede calcular la temperatura a la altura de cada perno:

Para $h = 76\text{mm}$ $\theta_h = 0.88 * 635 = 559^\circ\text{C}$

Para $h = 150\text{mm}$ $\theta_h = 0.88 * 635 = 559^\circ\text{C}$

Para $h = 224\text{mm}$ $\theta_h = 0.88 * 635 = 559^\circ\text{C}$

Para $h = 298\text{mm}$ $\theta_h = 0.88 * 635 \left[1 + 0.2 \left(1 - \frac{2*298}{450} \right) \right] = 523^\circ\text{C}$

Para $h = 372\text{mm}$ $\theta_h = 0.88 * 635 \left[1 + 0.2 \left(1 - \frac{2*372}{450} \right) \right] = 486^\circ\text{C}$

Se toma de manera conservadora la menor resistencia para todos los pernos de la conexión. De acuerdo con la Tabla 5-1 realizando una interpolación se tiene que para una

temperatura de 559°C la relación de resistencias $\frac{F_{nv}(T)}{F_{nv}} = 0.38$

A partir de esta temperatura se realiza un chequeo de todos los estados límites de la conexión, teniendo en cuenta la reducción de resistencia por el incremento de temperatura:

Tabla 7-13: Factores de reducción por temperatura para pernos y soldaduras de la conexión a cortante W18x35

Conexión	Temperatura [°C]	Factor de reducción pernos K_b	Factor de reducción soldadura K_w	Factor de reducción K_y	Factor de reducción K_u
W18x35	559	0.38	0.49	0.60	0.60

A continuación, se presenta el diseño de la conexión:

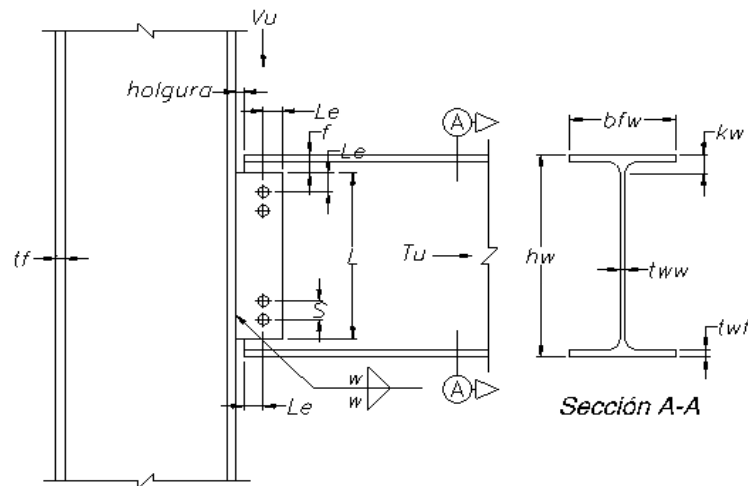
Figura 7-20: Geometría de conexión en cortante de W18x35 a columna

Tabla 7-14: Datos de entrada para el diseño de la conexión a cortante W18x35

Sección de la vigueta	W18x35, en acero A572 Gr50
Sección de la viga	W10x49, en acero A572 Gr50
Atiesador	Lámina de : PL8mm, en acero ASTM A36
Soldadura a usar	Electrodo : E70XX
Rosca (excluida o Incluida)	Incluida
Tipo de cortante en el pasador	Sencilla
(Doble, sencilla)	
Cortante última en la conexión, $V_u =$	206.0 kN
Atiesador	
Distancias al borde, $L_e =$	45 mm
Distancias entre pernos, $S =$	74 mm
Longitud de la aleta del aties., $L_a =$	386 mm
Distancia a la aleta del atiesador, $f =$	32 mm
Viga	
Ancho del patín de la viga, $b_{fv} =$	254 mm
Altura de la viga, $h_v =$	253 mm
Espesor del patín de la viga, $t_{fv} =$	14 mm
Espesor del alma de la viga, $t_{wv} =$	9 mm
Vigueta	
Ancho del patín de la vigueta, $b_{fw} =$	152 mm
Altura de la vigueta, $h_w =$	450 mm
Espesor del patín de la vigueta, $t_{fw} =$	11 mm
Valor de la constante, $k_w =$	29 mm

El chequeo para cada estado límite de la conexión se muestra a continuación:

Tabla 7-15: Verificación de estados límites de la conexión a cortante W18x35

Tornillos : 5 Ø1 x 1-3/4" , A325	
En los pernos, $\phi R_n =$	256.3 kN
Soldadura atiesador	
Tamaño del filete, w =	4.5 mm
holgura =	10.0 mm
En la soldadura, $\phi R_n =$	524.9 kN
Viga	
Por material base, $\phi_v V_n =$	1250.2 kN
Desgarramiento y aplastam., $\phi R_n =$	501.1 kN
Por cortante en el área bruta, $\phi R_n =$	391.1 kN
Por cortante en el área neta, $\phi R_n =$	289.6 kN
Desg. y aplastam. Por tensión, $\phi R_n =$	362.0 kN
Tensión alma (Área gruesa), $\phi^* T_n =$	651.8 kN
Tensión alma (Área neta), $\phi^* T_n =$	434.4 kN
Atiesador	
Desgarramiento y aplastamiento, $\phi R_n =$	467.4 kN
Por cortante en el área bruta, $\phi R_n =$	253.1 kN
Por cortante en el área neta, $\phi R_n =$	214.0 kN
Por bloque de cortante, $\phi R_n =$	231.4 kN
Flexión, $\phi R_n =$	740.2 kN
Desg. y aplastam. Por tensión, $\phi R_n =$	337.6 kN
Tensión en el área gruesa, $\phi^* T_n =$	421.9 kN
Tensión en el área neta, $\phi^* T_n =$	321.0 kN

7.3 Zona de oficinas

Se realizará el análisis a partir del cálculo de una curva paramétrica.

7.3.1 Características del recinto

Uso: Oficinas

- Dimensiones del recinto

Ancho	15	m
Largo	18	m
Altura	3	m

Las características de los materiales del piso, techo y muros: Corresponden a los mismos de la zona comercial

Aberturas

Muro 1: Tiene dos aberturas de 5mx2m

Muro 2: Tiene una abertura de 4mx2m

Muro 3: Tiene dos aberturas de 5mx2m

Muro 4: Tiene una abertura de 4mx2m

7.3.2 Cálculo de curva paramétrica

- **Factor b:** Se determina el valor de b, para el techo, piso y muros. A continuación, se presenta el procedimiento de cálculo para el muro 1, los demás datos se tabularon:

$$b = \sqrt{c p \lambda} = \sqrt{840 * 1600 * 0.7} = 969.95 \text{ J/kgK}$$

Luego de realizar el cálculo para cada una de las partes se calcula el factor b total:

$$b = \frac{\sum b_i A_i}{\sum A_i} = \frac{1173632}{682} = 1720.87 \text{ J/kgK}$$

- **Factor de aberturas O :** Como se tienen varias aberturas en los muros del recinto se debe calcular la altura promedio y aplicar la formulación:

$$O = \frac{A_v \sqrt{h_{eq}}}{A_t} = \frac{56 * \sqrt{2}}{738} = 0.107 m^{0.5}$$

A continuación, se muestran los cálculos tabulados:

Elemento	Factor b [J/m ² s0.5K]	Area [m ²]	Aberturas [m ²]	Area sin aberturas	b*A	Av*Hi
Piso	1918.33	270.00	0.00	270.00	517949.80	0.00
Techo	1918.33	270.00	0.00	270.00	517949.80	0.00
Muro 1	969.95	45.00	20.00	25.00	24248.71	40.00
Muro 2	969.95	54.00	8.00	46.00	44617.63	16.00
Muro 3	969.95	45.00	20.00	25.00	24248.71	40.00
Muro 4	969.95	54.00	8.00	46.00	44617.63	16.00
Totales		738.00	56.00	682.00	1173632.29	112.00
hequivalente		2.0000				

- **Coefficiente de expansión Γ :**

$$\Gamma = \left(\frac{O/0.04}{b/1160} \right)^2 = \left(\frac{0.107/0.04}{1720.87/1160} \right)^2 = 3.25$$

- **Carga de incendio de diseño**

El valor de diseño de la carga de fuego $q_{f,d}$ se puede determinar a partir de la Ecuación (2.11):

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \delta_{q2} \delta_n m q_{f,k}$$

De acuerdo con la Tabla 2-2 para actividad de oficinas se tiene un valor de $q_{f,k} = 511 \text{ MJ/m}^2$

El análisis de los factores se realiza como se mostró en el análisis del recinto de actividad comercial:

$$m = 1$$

$$\delta_{q1} = 1.51, \text{ Realizando una interpolación de la Tabla 2-3 para un área de } 270\text{m}^2$$

$$\delta_{q2} = 1,$$

$$\delta_{n1} = 0.61 \text{ Se tienen rociadores}$$

$$\delta_{n2} = 1.0 \text{ Hay un solo sistema de suministro}$$

$$\text{Se tienen sistemas de detección por humo y calor por lo tanto } \delta_{n4} = 0.73 \text{ y tomar } \delta_{n3} = 1.0$$

$$\delta_{n5} = 1.0 \text{ No hay transmisión automática de la alarma a los bomberos}$$

$$\delta_{n6} = 1.0 \text{ No hay una brigada de bomberos que permanentemente está en el sitio (Bomberos propios)}$$

$$\delta_{n7} = 0.78 \text{ La ciudad tiene bomberos}$$

$$\delta_{n8} = 1.0 \text{ Se tienen rutas de acceso seguras}$$

$$\delta_{n9} = 1.0 \text{ Se tienen equipos normales de extinción de incendios para ser usados por los ocupantes presentes.}$$

$$\delta_{n10} = 1.5 \text{ No se tiene sistema de control de humos en las escaleras.}$$

La densidad de carga por área de piso es:

$$q_{f,d} = 1.51 * 1 * 0.61 * 0.73 * 0.78 * 1.5 * 1 * 511 = 402.01 \text{MJ/m}^2$$

La densidad de carga de fuego relacionada al área total del recinto:

$$q_{t,d} = q_{f,d} \frac{A_f}{A_t} = 402.01 * \frac{15 * 18}{738} = 147.08 \text{MJ/m}^2$$

- **Duración de la fase de calentamiento**

La duración de la fase de calentamiento t_{max} es dado en horas de acuerdo con la siguiente Ecuación:

$$t_{max} = \frac{0.0002q_{t,d}}{0} = \frac{0.0002 * 147.08}{0.107} = 0.27h = 16min$$

Este valor tiene que ser comparado con un valor limite t_{lim} (Tabla 2-5) que depende de la tasa de crecimiento asociada a la ocupación del recinto.

Como $t_{max} = 0.27 > t_{lim} = 0.33$ el incendio está controlado por carga de fuego:

$$O_{lim} = 0.0001 * \frac{147.08}{0.333} = 0.0442 m^{0.5}$$

$$\Gamma_{lim} = \left(\frac{0.0442/0.04}{1720.87/1160} \right)^2 = 0.554$$

$$t^*_{max} = \Gamma_{lim} t_{lim} = 0.554 * 0.333 = 0.184h$$

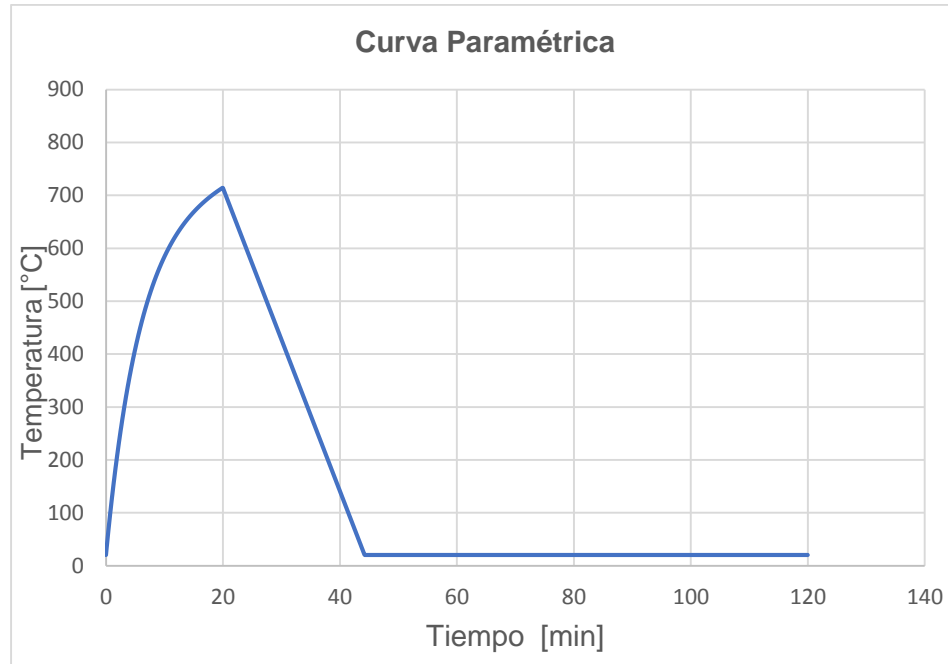
Entonces la temperatura máxima alcanzada en el recinto sería:

$$\theta_{max} = 20 + 1325(1 - 0.324e^{-0.2*0.184} - 0.204e^{-1.7*0.184} - 0.472e^{-19*0.184})$$

$$\theta_{max} = 714.9^\circ C$$

En resumen, el recinto alcanzaría una temperatura máxima de 714.9°C en 20 minutos.

A partir de esta expresión se puede graficar la variación de la temperatura en el recinto en función del tiempo.

Figura 7-21: Curva paramétrica Temperatura vs Tiempo zona de oficinas

7.3.3 Cálculo estructural de elementos en situación de incendio

- **Diseño columna**

Los dos últimos niveles son de uso oficinas se realizará el análisis para dichos elementos, los cuales corresponden a los mismos perfiles de los niveles inferiores W12x96 y W10x49.

De la combinación de carga $1.2D + T + 0.5L + 0.2G$ se obtienen las siguientes solicitaciones:

Tabla 7-16: Solicitaciones de carga en columnas de oficinas

Story	Column	Unique Name	Load Case/Combo	P	V2	V3	T	M2	M3	Perfil
				kN	kN	kN	kN-m	kN-m	kN-m	
N+9000	A1	3	1.2D+0.5L	281.81	-2.23	3.51	0	5.8	-3.34	W12x96
N+9000	A2	7	1.2D+0.5L	445.2	0.13	5.26	0	8.55	0.55	W12x96
N+9000	B1	15	1.2D+0.5L	438.18	-0.19	-1.67	0	-2.69	-0.53	W12x96
N+9000	B3	23	1.2D+0.5L	412.99	0.04	1.69	0	2.78	0.21	W12x96
N+9000	C1	27	1.2D+0.5L	412.99	-0.04	-1.69	0	-2.78	-0.21	W12x96
N+9000	C3	35	1.2D+0.5L	438.18	0.19	1.67	0	2.69	0.53	W12x96
N+9000	D2	43	1.2D+0.5L	445.2	-0.13	-5.26	0	-8.55	-0.55	W12x96
N+9000	D3	47	1.2D+0.5L	281.81	2.23	-3.51	0	-5.8	3.34	W12x96
N+9000	A3	11	1.2D+0.5L	265.92	-2.91	1.58	0	2.63	-4.65	W10x49
N+9000	B2	19	1.2D+0.5L	676.47	-0.04	0.003163	0	0.02	-0.06	W10x49
N+9000	C2	31	1.2D+0.5L	676.47	0.04	-0.003163	0	-0.02	0.06	W10x49
N+9000	D1	39	1.2D+0.5L	265.92	2.91	-1.58	0	-2.63	4.65	W10x49

- Cálculo de temperatura en el perfil sin protección

A partir de la curva paramétrica determinada para el recinto se calcula la temperatura del perfil aplicando la Ecuación para perfiles sin protección:

Análisis W12x96

Área expuesta=1.83m²/m

$$\frac{A_m}{V} = \frac{1.83}{18200 * 10^{-6}} = 100.549m^{-1}$$

$$\left[\frac{A_m}{V} \right]_b = \frac{2 * (b_f + d)}{A_g} * 1000 = \frac{2 * (309 + 323)}{18200} * 1000 = 69.450m^{-1}$$

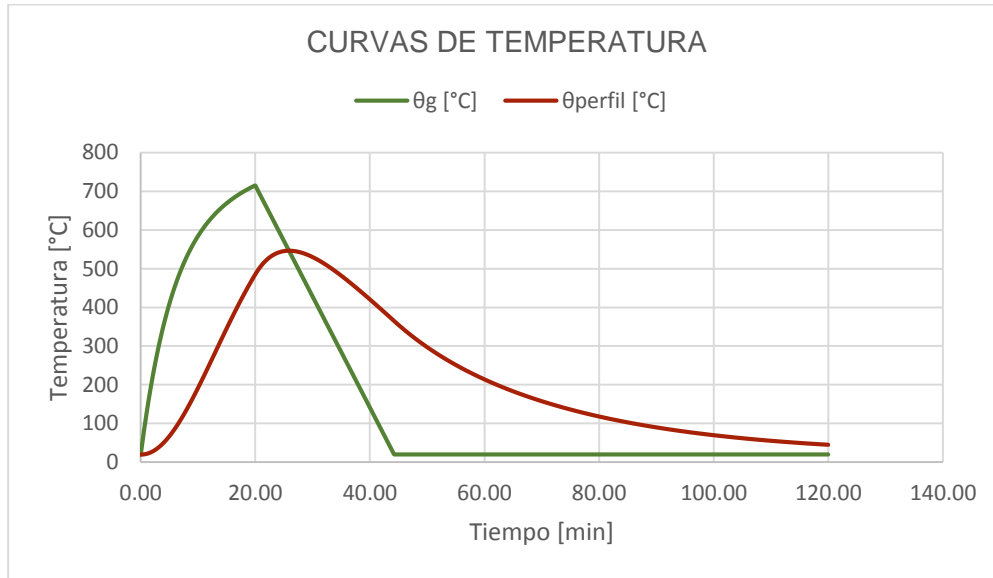
$$k_{sh} = \frac{69.450}{100.549} = 0.69$$

La masividad modificada por el factor se sombra quedaría: 0.69 * 100.549 = 69.38m⁻¹

Graficando los resultados se obtiene la siguiente gráfica para un análisis de 120 min.

Se puede observar que el perfil W12x96 alcanza una temperatura de 548°C a los 25.5min

Figura 7-22: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W12X96 sin protección pasiva



El factor de reducción para la temperatura máxima alcanzada (548°C) es igual a:

$$k_{y,\theta} = \left(0.9674 * \left(e^{\frac{548-482}{39.19}} + 1 \right) \right)^{-1/3.833} = 0.62$$

$$F_y(T) = 0.62 * 350 = 217 \text{ MPa}$$

$k_{E,\theta} = 0.47$ Se obtiene realizando interpolación de la Tabla 4-1

$$E(T) = E_s k_{E,\theta} = 204000 * 0.47 = 95880 \text{ MPa}$$

$$L_c = 3000 \text{ mm}$$

El menor radio de giro es $r_y = 78.60 \text{ mm}$

$n = 1$, la columna es continua en ambos extremos

$$\left(\frac{L_c}{r} \right)_T = \left(1 - \frac{548}{1 * (2000)} \right) \left(\frac{3000}{78.60} \right) - \left(\frac{35}{2000} \right) * 548 \geq 0$$

$$\left(\frac{L_c}{r}\right)_T = 18.12$$

$$F_e(T) = \frac{\pi^2 E(T)}{\left(\frac{kL_c}{r}\right)_T^2} = \frac{\pi^2 * 95880}{18.12^2} = 2882.12 \text{ MPa}$$

$$F_{cr}(T) = \left[0.42 \sqrt{\frac{F_y(T)}{F_e(T)}} \right] F_y(T) = \left[0.42 \sqrt{\frac{217}{2882.12}} \right] * 217 = 171.03 \text{ MPa}$$

La resistencia a compresión del elemento a 548°C es:

$$\Phi P_n(T) = \Phi F_{cr}(T) A_g = 0.9 * 171.03 * 18200 = 2801471 \text{ N}$$

$$\Phi P_n(T) = 2801.47 \text{ kN}$$

Todas las columnas en W12x96 ubicadas en los niveles de oficinas cumplen las sollicitaciones para condición de incendio sin requerir protección pasiva.

Análisis para W10x49

$$\frac{A_m}{V} = 159.31 m^{-1}$$

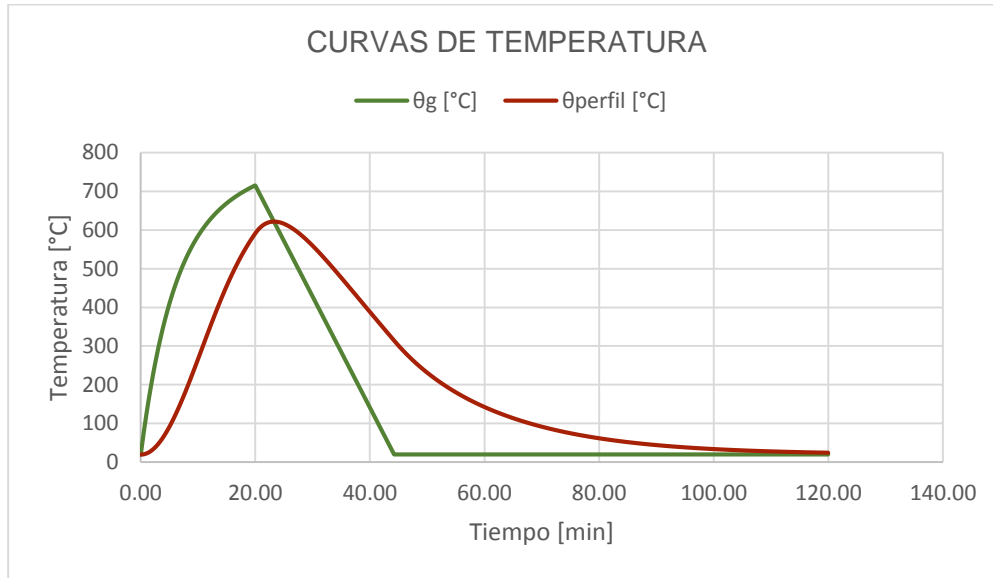
$$\left[\frac{A_m}{V}\right]_b = 109.15 m^{-1}$$

$$k_{sh} = \frac{109.15}{159.31} = 0.69$$

La masividad modificada por el factor se sombra quedaría: $0.69 * 159.31 = 109.9 m^{-1}$

Realizando el mismo procedimiento mostrado en el análisis anterior (W12x96), se obtiene la siguiente grafica para el perfil W10x49.

Figura 7-23: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W10X49 sin protección pasiva



El perfil alcanza una temperatura de 621°C a los 23min

El factor de reducción para la temperatura máxima alcanzada (621°C) es:

$$k_{y,\theta} = \left(0.9674 * \left(e^{\frac{621-482}{39.19}} + 1 \right) \right)^{-1/3.833} = 0.4$$

$$F_y(T) = 0.40 * 350 = 140MPa$$

$k_{E,\theta} = 0.29$ Se obtiene realizando interpolación de la Tabla 4-1

$$E(T) = E_s k_{E,\theta} = 204000 * 0.29 = 59160MPa$$

$$L_c = 3000mm$$

El menor radio de giro es $r_y = 64.60mm$

$n = 1$, el elemento es continuo en ambos extremos

$$\left(\frac{L_c}{r} \right)_T = \left(1 - \frac{621}{1 * (2000)} \right) \left(\frac{3000}{64.60} \right) - \left(\frac{35}{2000} \right) * 621$$

$$\left(\frac{L_c}{r}\right)_T = 21.15$$

$$F_e(T) = \frac{\pi^2 E(T)}{\left(\frac{kL_c}{r}\right)_T^2} = \frac{\pi^2 * 59160}{21.15^2} = 1305.29 \text{ MPa}$$

$$F_{cr}(T) = \left[0.42 \sqrt{\frac{F_y(T)}{F_e(T)}} \right] F_y(T) = \left[0.42 \sqrt{\frac{140}{1305.29}} \right] * 140 = 105.38 \text{ MPa}$$

La resistencia a compresión del elemento a 621°C es:

$$\Phi P_n(T) = \Phi F_{cr}(T) A_g = 0.9 * 105.38 * 9290 = 881082.18 \text{ N}$$

$$\Phi P_n(T) = 881.082 \text{ kN}$$

Es decir, Todas las columnas en W10x49 de los niveles de oficinas cumplen las sollicitaciones para condición de incendio, no se requiere protección pasiva.

- **DISEÑO VIGAS EN SECCIÓN COMPUESTA OFICINAS**

Las vigas y viguetas diseñadas para los niveles correspondientes a uso de oficinas son las mismas definidas para la zona comercial.

Figura 7-24: Sección de losa en *Steel deck* de oficinas



Los perfiles W18x35 corresponden a vigas y los perfiles W14x22 a viguetas.

El diseño para situación de incendio se realizará usando el factor de retención, de acuerdo a la temperatura de la aleta inferior del perfil.

- **Diseño vigueta W14x22**

Cargas sobre la vigueta

Metaldeck Cal 22 + concreto en kN/m ² :	2.35
Piso acabado en "kN/m ² " :	1.50
Particiones en "kN/m ² " :	1.00
Cielo raso e instalaciones en "kN/m ² " :	0.40
Peso propio viguetas en 'kN/m ² ' :	0.23
Total carga muerta " D " en "kN/m ² " :	5.48
Total carga viva " L " en "kN/m ² " :	3.00

Combinaciones de carga

1.4 D en "kN/m ² " :	7.67
1.2 D + 1.6 L en "kN/m ² " :	14.57

1.2 D + 0.5 L en "kN/m²" : 8.07

Fuerzas últimas cargas permanentes

Momento máximo en "kN-m" : 119.9

Cortante máximo en "kN" : 64.0

Distancia al punto de momento máx. positivo, Xmp (mm)= 3750

A continuación, se presenta la resistencia del perfil para temperatura ambiente:

Porcentaje de conexión máximo, con stud 100.0%

Porcentaje de conexión máximo, con canal 100.0%

Porcentaje de conexión 100.0%

Se supone que: $L_b < L_p$, para la sección simple

Momento plástico sección simple, ϕM_p (kN-m) = 173.6

Momento plástico sección compuesta, ϕM_n (kN-m) = 354.1

Resistencia a corte del perfil, ϕV_n (kn) = 430.6 kN

Centroide de la sección en "mm" (y) : 353

El perfil cumple a flexión F.I. = 0.44

El perfil cumple a cortante en el apoyo F.I. = 0.20

Fuerzas últimas situación de incendio

1.2 D + 0.5 L en "kN/m²" : 8.07

Momento máximo en situación de incendio "kN-m" : 85.1

Cortante máximo en situación de incendio "kN" : 45.4

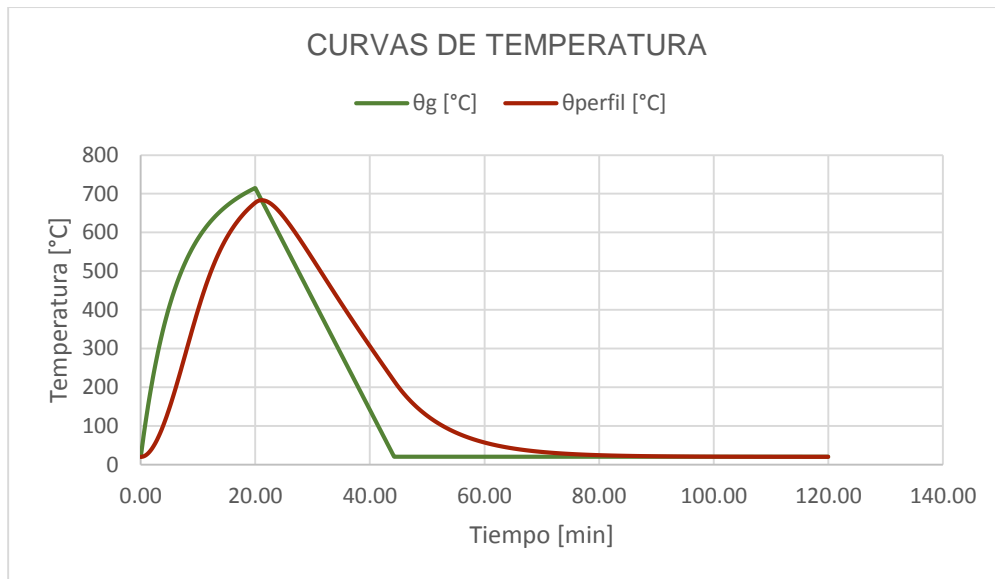
Luego de calcular las sollicitaciones de cargas se debe calcular la temperatura a la que estará sometido el perfil en situación de incendio.

- Masividad de la vigueta (Perfil expuesto por tres lados-W14x22)

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{Perimetro} - b_f}{A_g} = 251.49 \text{ m}^{-1}$$

Realizando el análisis se obtiene que el perfil alcanza una temperatura máxima de 683°C a los 21.1min:

Figura 7-25: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W14x22 sin protección pasiva



Interpolando de la tabla de coeficientes de retención (Tabla 4-2), se obtiene un valor de $r(T) = 0.42$. Por lo tanto, la resistencia del perfil es:

$$\phi M_n(T) = \phi r(T) M_n = 0.42 * 354.1 = 148.72 \text{ kN} * \text{m} > 85.1 \text{ kN} * \text{m} \text{ (Cumple)}$$

- Diseño a cortante de vigueta W14x22

El cortante para situación de incendio $V_u = 45.4 \text{ kN}$

$$F_y(683^\circ\text{C}) = 0.29 * 350 = 101.5 \text{ MPa}$$

$$\phi V_n = \phi_v * 0.6 A_w F_y(T) = 1.0 * 0.6 * 5.8 * 349 * \frac{101.5}{1000} = 123.27 \text{ kN} > 45.4 \text{ kN} \text{ (Cumple)}$$

Las viguetas cumplen las solicitaciones en situación de incendio, sin requerir protección pasiva.

- **Diseño viga W18x35 en sección compuesta**

Se analizarán las vigas centrales que son las que más solicitaciones de carga tienen:

Cargas sobre la viga

Metaldeck Cal 22 + concreto en kN/m ² :	2.35
Piso acabado en "kN/m ² " :	1.50
Particiones en "kN/m ² " :	1.00
Cielo raso e instalaciones en "kN/m ² " :	0.40
Peso propio vigas+viguetas en 'kN/m ² ' :	0.30
Total carga muerta " D " en "kN/m ² " :	5.55
Total carga viva " L " en "kN/m ² " :	3.00

Combinaciones de carga

1.4 D en "kN/m ² " :	7.77
1.2 D + 1.6 L en "kN/m ² " :	11.46
1.2 D + 0.5 L en "kN/m ² " :	9.16

Fuerzas últimas cargas permanentes

Momento máximo en "kN-m" :	386.7
Cortante máximo en "kN" :	257.8

A continuación, se presenta la resistencia del perfil para temperatura ambiente:

Porcentaje de conexión máximo, con stud	100.0%
Porcentaje de conexión máximo, con canal	100.0%
Porcentaje de conexión	100.0%
Se supone que: $L_b < L_p$, para la sección simple	
Momento plástico sección simple, ϕM_p (kN-m) =	354.8

Momento plástico sección compuesta, ϕM_n (kN-m) =	616.1
Resistencia a corte del perfil, ϕV_n (kn) =	724.2 kN
Centroide de la sección en "mm" (y) :	405

Fuerzas últimas situación de incendio

1.2 D + 0.5 L en "kN/m ² " :	8.16
Momento máximo en situación de incendio "kN-m" :	275.3
Cortante máximo en situación de incendio "kN" :	183.5

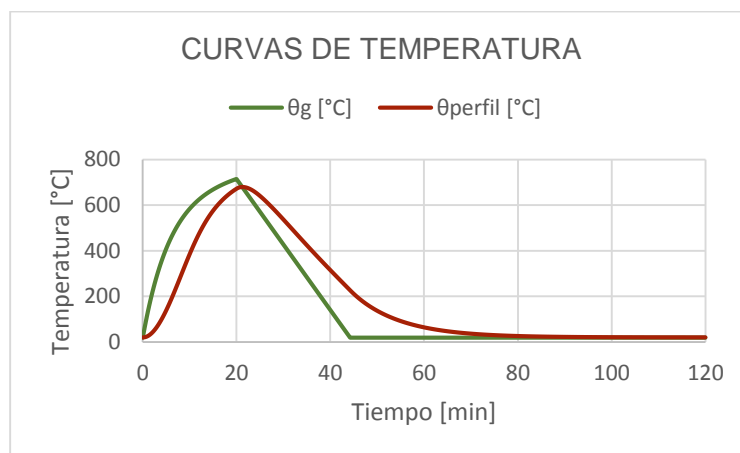
Luego de calcular las solicitaciones de cargas se debe calcular la temperatura a la que estará sometido el perfil en situación de incendio.

- Masividad de la viga (Perfil expuesto por tres lados-W18x35)

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{Perimetro} - b_f}{A_g} = 199.85 \text{ m}^{-1}$$

Realizando el análisis se obtiene que el perfil alcanza una temperatura máxima de 671°C a los 21min:

Figura 7-26: Curva Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W18X35 sin protección pasiva



Interpolando de la tabla de coeficientes de retención (Tabla 4-2) se obtiene un valor de $r(T) = 0.45$. Por lo tanto, la resistencia del perfil es:

$$\phi M_n(T) = \phi r(T) M_n = 0.45 * 616.1 = 277.25 \text{ kN} * \text{m} > 275.3 \text{ kN} * \text{m} \text{ (Cumple)}$$

- Diseño a cortante de viga W18x35

El cortante para situación de incendio $V_u = 183.5 \text{ kN}$

$$F_y(671^\circ\text{C}) = 0.31 * 350 = 108.5 \text{ MPa}$$

$$\phi V_n = \phi_v * 0.6 A_w F_y(T) = 1.0 * 0.6 * 7.6 * 450 * \frac{108.5}{1000} = 222.6 \text{ kN} > 183.5 \text{ kN} \text{ (Cumple)}$$

Las vigas cumplen las sollicitaciones en situación de incendio, sin requerir protección pasiva.

• DISEÑO DE CONEXIÓN A CORTANTE ZONA DE OFICINAS

Las cargas de diseño de las conexiones de cortante son:

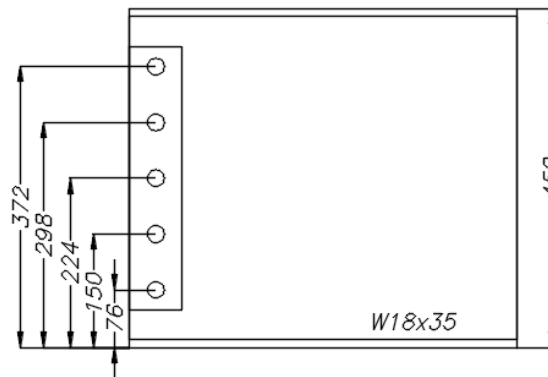
Perfil	Cortante Permanente V_u [kN]=	Cortante Situación de Incendio V_u [kN]=	Temperatura del perfil [°C]
W14x22	64.0	45.4	683
W18x35	257.8	183.5	671

En este ítem, se procederá a revisar las conexiones diseñadas para las cargas en situación de incendio.

- **Conexión W14x22:** Se puede dejar la misma conexión diseñada para la zona comercial ya que se diseñó para una temperatura de 735°C, es decir mayor que la alcanzada en zona de oficinas. Lo anterior con el objetivo de tener la misma tipología de elementos para optimizar procesos de producción en serie.
- **Conexión W18x35**

Aplica el Caso 2 ya que la altura de la viga es mayor a 400mm

Figura 7-27: Distribución de pernos en conexión a cortante W18x35



La temperatura del perfil protegido es de 671°C

Se puede calcular la temperatura a la altura de cada perno:

$$\text{Para } h = 76\text{mm} \quad \theta_h = 0.88 * 671 = 590^\circ\text{C}$$

$$\text{Para } h = 150\text{mm} \quad \theta_h = 0.88 * 671 = 590^\circ\text{C}$$

$$\text{Para } h = 224\text{mm} \quad \theta_h = 0.88 * 671 = 590^\circ\text{C}$$

$$\text{Para } h = 298\text{mm} \quad \theta_h = 0.88 * 671 \left[1 + 0.2 \left(1 - \frac{2*298}{450} \right) \right] = 552^\circ\text{C}$$

$$\text{Para } h = 372\text{mm} \quad \theta_h = 0.88 * 671 \left[1 + 0.2 \left(1 - \frac{2*372}{450} \right) \right] = 513^\circ\text{C}$$

Se toma de manera conservadora la menor resistencia para todos los pernos de la conexión. De acuerdo con la Tabla 5-1 realizando una interpolación se tiene que para una temperatura de 590°C la relación de resistencias $\frac{F_{nv}(T)}{F_{nv}} = 0.30$

A partir de esta temperatura se realiza un chequeo de todos los estados límites de la conexión, teniendo en cuenta la reducción de resistencia por el incremento de temperatura:

Tabla 7-17: Factores de reducción de capacidad de pernos y soldaduras en conexión a cortante de W18x35

Conexión	Temperatura [°C]	Factor de reducción pernos K_b	Factor de reducción soldadura K_w	Factor de reducción K_y	Factor de reducción K_u
W18x35	590	0.30	0.44	0.51	0.51

A continuación, se presenta el diseño de la conexión:

Figura 7-28: Geometría de conexión en cortante de W18x35 a columna zona de oficinas

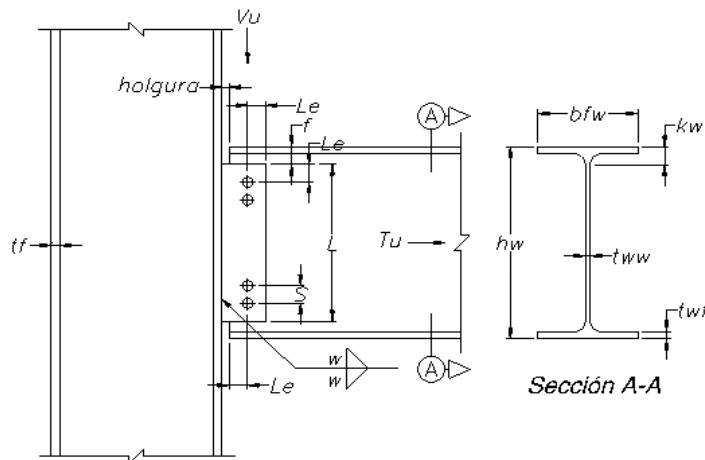


Tabla 7-18: Datos de entrada para el diseño de la conexión a cortante de W18x35 a columna

Sección de la vigueta	W18x35, en acero A572 Gr50
Sección de la viga	W10x49, en acero A572 Gr50
Atiesador	Lámina de : PL9mm, en acero ASTM A36
Soldadura a usar	Electrodo : E70XX
Rosca (excluida o Incluida)	Incluida
Tipo de cortante en el pasador (Doble, sencilla)	Sencilla
Cortante última en la conexión, $V_u =$	183.5 kN
Atiesador	
Distancias al borde, $L_e =$	45 mm
Distancias entre pernos, $S =$	74 mm
Longitud de la aleta del aties., $L_a =$	386 mm
Distancia a la aleta del atiesador, $f =$	32 mm
Viga	
Ancho del patín de la viga, $b_{fv} =$	254 mm
Altura de la viga, $h_v =$	253 mm
Espesor del patín de la viga, $t_{fv} =$	14 mm
Espesor del alma de la viga, $t_{wv} =$	9 mm
Vigueta	
Ancho del patín de la vigueta, $b_{fw} =$	152 mm
Altura de la vigueta, $h_w =$	450 mm
Espesor del patín de la vigueta, $t_{fw} =$	11 mm
Valor de la constante, $k_w =$	29 mm

Tabla 7-19: Verificación de estados límites en diseño de conexión a cortante

Tornillos : 5 Ø1 x 1-3/4" , A325	
En los pernos, $\phi R_n =$	228.8 kN
Soldadura atiesador	
Tamaño del filete, $w =$	5.0 mm
holgura =	10.0 mm
En la soldadura, $\phi R_n =$	583.2 kN
Viga	
Por material base, $\phi v \cdot V_n =$	1062.7 kN
Desgarramiento y aplastam., $\phi R_n =$	426.0 kN
Por cortante en el área bruta, $\phi R_n =$	332.4 kN
Por cortante en el área neta, $\phi R_n =$	246.2 kN
Desg. y aplastam. Por tensión, $\phi R_n =$	307.7 kN
Tensión alma (Área gruesa), $\phi \cdot T_n =$	554.0 kN
Tensión alma (Área neta), $\phi \cdot T_n =$	369.2 kN
Atiesador	
Desgarramiento y aplastamiento, $\phi R_n =$	447.0 kN
Por cortante en el área bruta, $\phi R_n =$	242.1 kN
Por cortante en el área neta, $\phi R_n =$	204.6 kN
Por bloque de cortante, $\phi R_n =$	221.2 kN
Flexión, $\phi R_n =$	707.8 kN
Desg. y aplastam. Por tensión, $\phi R_n =$	322.9 kN
Tensión en el área gruesa, $\phi \cdot T_n =$	403.4 kN
Tensión en el área neta, $\phi \cdot T_n =$	306.9 kN

7.4 Análisis de edificación por Método de Tiempo Equivalente

Como se explicó en el Capítulo 2 este método se usa para relacionar la gravedad de un incendio real esperado con el fuego de una prueba estándar o normalizada.

Se tomarán las mismas características del recinto analizadas con el método de curvas paramétricas.

7.4.1.1 Zona Comercial

De acuerdo a los parámetros calculados anteriormente (Curvas paramétricas) se tiene la siguiente información:

$$b = 1689.23 \text{ [J/m}^2\text{s}^0.5\text{K]}$$

De la Tabla 2-6 se obtiene un valor de $k_b = 0.055 \text{ [min} \cdot \text{m}^2/\text{MJ}]$

Altura del recinto $H = 3.0 \text{ [m]}$

Aberturas: $A_v = 26 \text{ [m}^2\text{]}$

Área de piso $A_f = 18 \cdot 15 = 270 \text{ [m}^2\text{]}$

$$\alpha_v = \frac{A_v}{A_f} = \frac{26}{270} = 0.096$$

$\alpha_h = 0$ No hay aberturas en el techo.

$$b_v = 12.5(1 + 10\alpha_v - \alpha_v^2) = 12.5(1 + 10 \cdot 0.096 - 0.096^2) = 24.38 \geq 10$$

Aplicando la Ecuación (2.30) se calcula el coeficiente de ventilación:

$$w_f = \left(\frac{6}{3}\right)^{0.3} * \left[0.62 + \frac{90 (0.4 - 0.096)^4}{(1 + 0)}\right] = 1.71 \geq 0.5$$

De la Tabla 2-7 se obtiene un valor de $k_c = 1.0$

En el análisis de curvas paramétricas se determinó que la densidad de carga por área de piso es:

$$q_{f,d} = 1.51 * 1 * 0.61 * 0.73 * 0.78 * 1.5 * 1 * 730 = 574.3 \text{ MJ/m}^2$$

A partir de estos valores, aplicando la Ecuación (2.29) se tiene:

$$t_{e,d} = k_b * w_f * k_c * q_{f,d} = 0.055 * 1.71 * 1.0 * 574.3 = 54 \text{ [min]}$$

Es decir, los elementos de los niveles de la zona comercial se pueden diseñar para que resistan la temperatura alcanzada a los 54 min de la curva estándar ISO 834 la cual sería de 930°C.

Material de Protección: Vermiculita

Densidad: $\rho_p = 350 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Contenido de humedad: $p = 15\%$

Conductividad térmica: $\lambda_p = 0.12 \text{ [W/(mK)]}$

Calor específico: $c_p = 1200 \text{ [J/(kgK)]}$

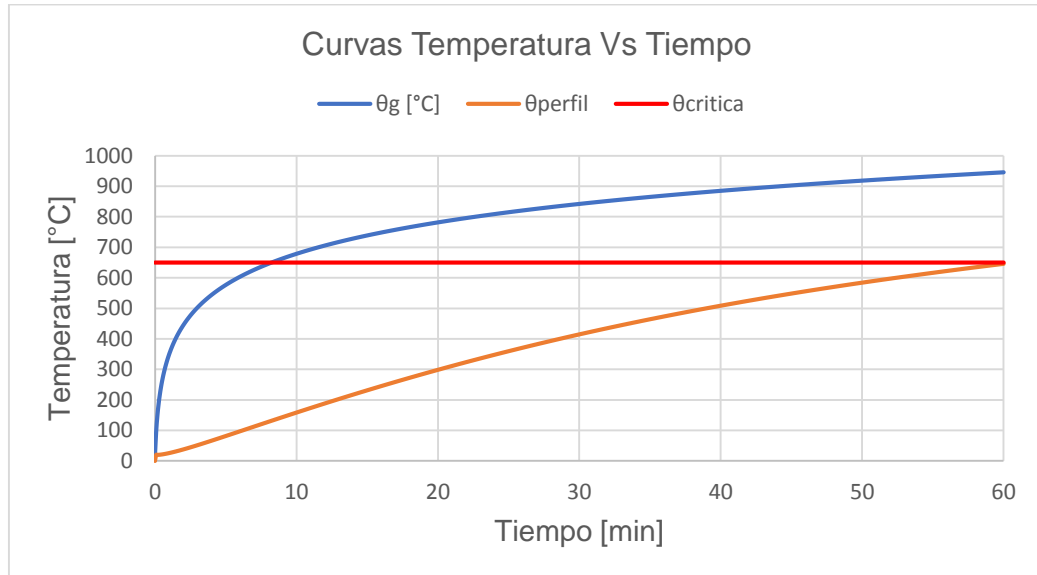
- Columna W12x96: La temperatura crítica es de 650°C

$$\frac{A_p}{V} = 100.55 \text{ m}^{-1}$$

Aplicando la formulación de la variación de temperatura para perfil protegido se obtienen los siguientes resultados:

Si se aplican 7 mm de espesor del material de protección analizado (Vermiculita), el perfil alcanza una temperatura máxima de 640°C, es decir no supera la temperatura crítica por lo tanto el elemento cumple.

Figura 7-29: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W12X96 protegido



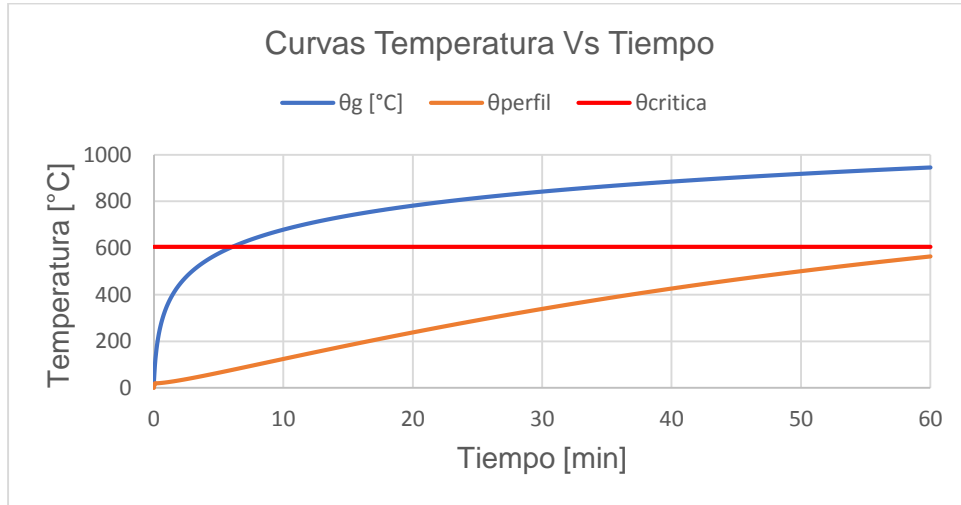
- Columna W10x49: La temperatura crítica es de 605 °C

$$\frac{A_p}{V} = 159.3m^{-1}$$

Aplicando la formulación de la variación de temperatura para perfil protegido se obtienen los siguientes resultados:

Si se aplican 13mm de espesor del material de protección analizado (Vermiculita), el perfil alcanza una temperatura máxima de 603°C, es decir no supera la temperatura crítica por lo tanto el elemento cumple.

Figura 7-30: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W10X49 protegido

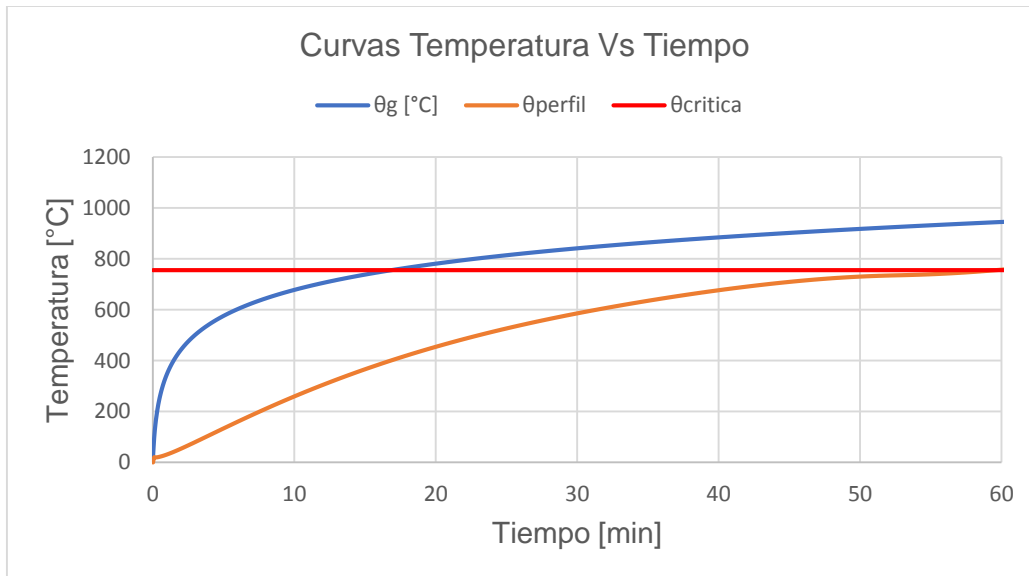


- Vigueta W14x22: La temperatura crítica es de 755 °C

$\frac{A_p}{V} = 159.3m^{-1}$. Se deben aplicar 7mm de espesor de material de protección (Vermiculita).

Para tener una temperatura de 751°C en el perfil y no se alcance la temperatura crítica.

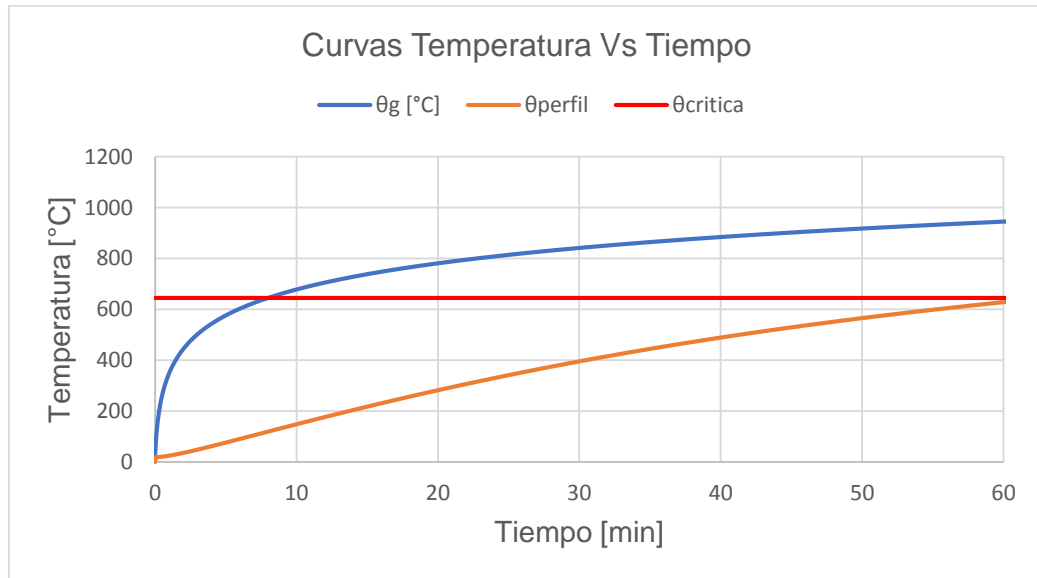
Figura 7-31: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W14X22 protegido



- Viga W18x35: La temperatura crítica es de 645 °C

$\frac{A_p}{V} = 199.85m^{-1}$. Se deben aplicar 12mm de espesor de material de protección (Vermiculita). Para tener una temperatura de 640°C en el perfil y no se alcance la temperatura crítica.

Figura 7-32: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W18X35 protegido



Como se puede observar se obtuvieron los mismos espesores de protección que los determinados para la curva paramétrica, esto no necesariamente ocurre en todos los casos como se podrá evidenciar más adelante.

7.4.1.2 Zona Oficinas

De acuerdo a los parámetros calculados anteriormente (Curvas paramétricas) se tiene la siguiente información:

$$b = 1720.87 \text{ [J/m}^2\text{s}^0.5\text{K]}$$

De acuerdo a la Tabla 2-6 se obtiene un valor de $k_b = 0.055 \text{ [min} \cdot \text{m}^2/\text{MJ]}$

Altura del recinto $H = 3.0 \text{ [m]}$

Aberturas: $A_v = 56 \text{ [m}^2\text{]}$

Área de piso $A_f = 18 \cdot 15 = 270 \text{ [m}^2\text{]}$

$$\alpha_v = \frac{A_v}{A_f} = \frac{56}{270} = 0.21$$

$\alpha_h = 0$ No hay aberturas en el techo.

$$b_v = 12.5(1 + 10\alpha_v - \alpha_v^2) = 12.5(1 + 10 \cdot 0.21 - 0.21^2) = 38.2 \geq 10$$

Aplicando la Ecuación (2.30) se calcula el coeficiente de ventilación:

$$w_f = \left(\frac{6}{3}\right)^{0.3} * \left[0.62 + \frac{90 (0.4 - 0.21)^4}{(1 + 0)}\right] = 0.91 \geq 0.5$$

De acuerdo a la Tabla 2-7 se obtiene un valor de $k_c = 1.0$

En el análisis de curvas paramétricas se determinó que la densidad de carga por área de piso es:

$$q_{f,d} = 1.51 * 1 * 0.61 * 0.73 * 0.78 * 1.5 * 1 * 511 = 402 \text{ MJ/m}^2$$

A partir de estos valores, aplicando la Ecuación (2.29) se tiene:

$$t_{e,d} = k_b * w_f * k_c * q_{f,d} = 0.055 * 1.71 * 1.0 * 402 = 38 \text{ [min]}$$

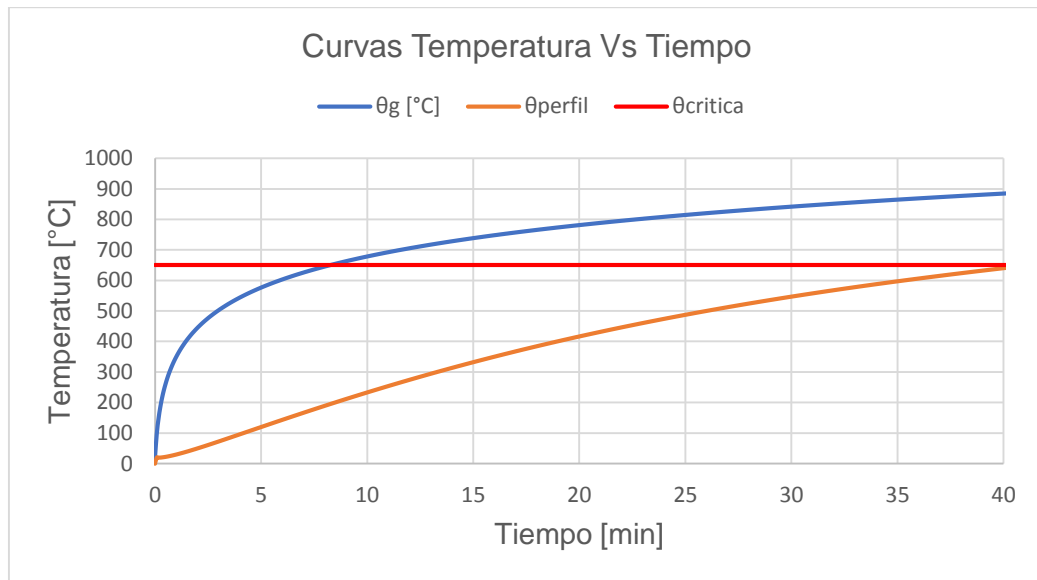
Es decir, los elementos de los niveles de la zona de oficinas se pueden diseñar para que resistan la temperatura alcanzada a los 38 min de la curva estándar ISO 834 la cual sería de 877°C.

- Columna W12x96: La temperatura crítica es de 650°C

$$\frac{A_p}{V} = 100.55m^{-1}$$

Si se aplican 4 mm de espesor del material de protección analizado (Vermiculita), el perfil alcanza una temperatura máxima de 640°C, es decir no supera la temperatura crítica por lo tanto el elemento cumple.

Figura 7-33: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W12X96 protegido



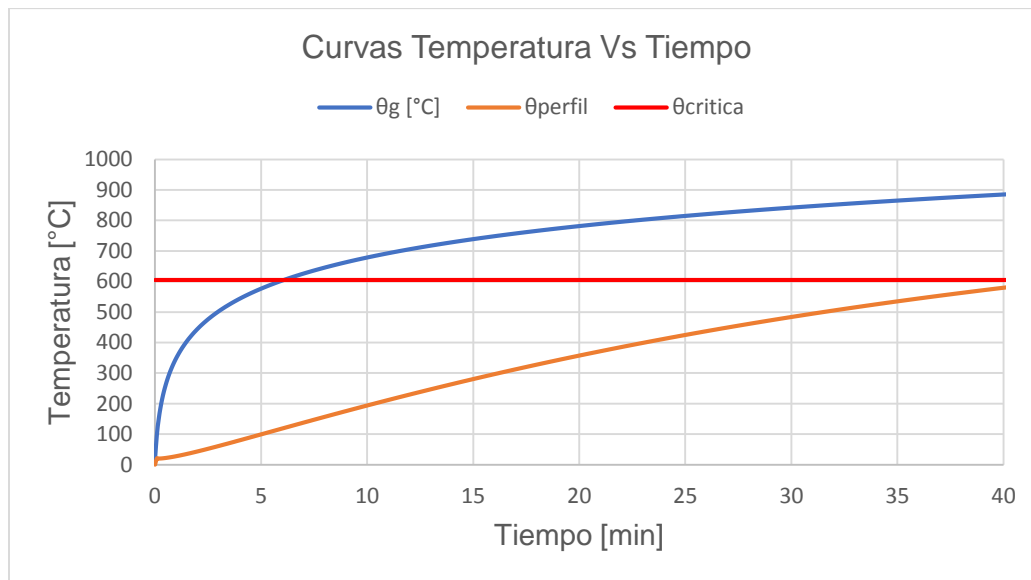
- Columna W10x49: La temperatura crítica es de 605 °C

$$\frac{A_p}{V} = 159.3m^{-1}$$

Aplicando la formulación de la variación de temperatura para perfil protegido se obtienen los siguientes resultados:

Si se aplican 7mm de espesor del material de protección analizado (Vermiculita), el perfil alcanza una temperatura máxima de 603°C, es decir no supera la temperatura crítica por lo tanto el elemento cumple.

Figura 7-34: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W10X49 protegido

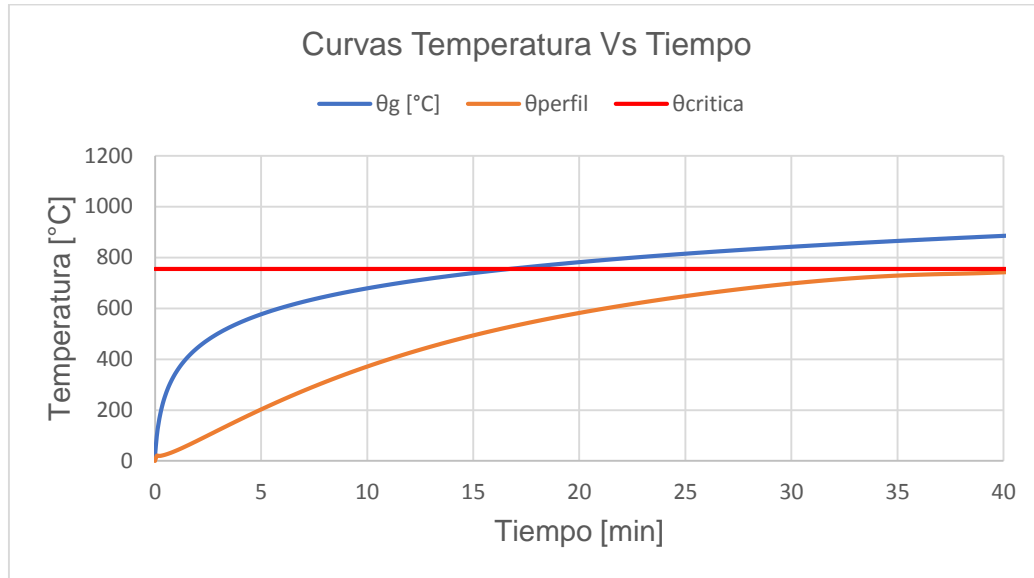


- Vigueta W14x22: La temperatura crítica es de 755 °C

$\frac{A_p}{V} = 159.3m^{-1}$. Se deben aplicar 4mm de espesor de material de protección (Vermiculita).

Para tener una temperatura de 751°C en el perfil y no se alcance la temperatura crítica.

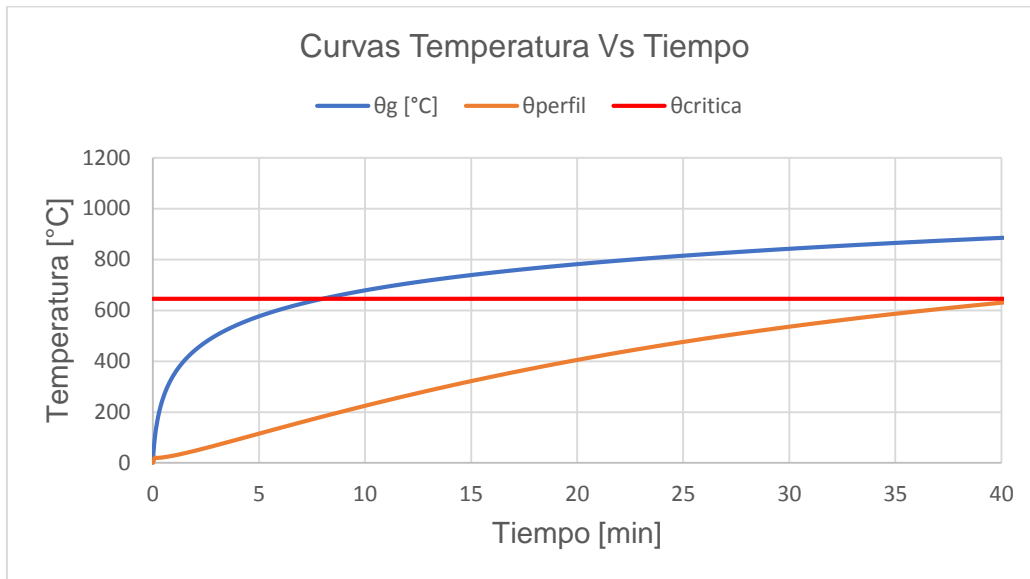
Figura 7-35: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W14X22 protegido



- Viga W18x35: La temperatura crítica es de 645 °C

$\frac{A_p}{V} = 199.85m^{-1}$. Se deben aplicar 7mm de espesor de material de protección (Vermiculita). Para tener una temperatura de 640°C en el perfil y no se alcance la temperatura crítica.

Figura 7-36: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W18X35 protegido



Como se puede observar a pesar de tener un tiempo menor de diseño en la curva estándar, los perfiles requieren protección pasiva en zona de oficinas; a diferencia de los resultados obtenidos en el análisis de las curvas paramétricas que arrojaron que no se requería protección pasiva.

8. Análisis prescriptivo según NSR-10(2010) para el ejemplo de aplicación

En este capítulo se presentará el diseño de los elementos analizados anteriormente, de acuerdo a la clasificación de la estructura y los requisitos estipulados en los títulos J y K de la NSR-10(2010), tal como se ha expuesto en el capítulo 6.

Tabla 8-1: Categorías de la edificación de acuerdo a su uso

Nivel	Área [m2]	USO	Categoría según ocupación
N+0.00	270	Locales comerciales	C-2
N+3.00	270	Locales comerciales	C-2
N+6.00	270	Oficinas	C-1
N+9.00	270	Oficinas	C-1

A partir de esta información se puede categorizar la edificación de acuerdo a su uso y número de pisos, para determinar la resistencia requerida para la estructura principal de la edificación.

Tabla 8-2: Clasificación según uso y riesgo

Nivel	Categoría según ocupación	Categoría de riesgo	Resistencia requerida al fuego en horas	Temperatura ISO 834
N+0.00	C-2	I	2	1049°C
N+3.00	C-2	I	2	1049°C
N+6.00	C-1	II	1 1/2	1006°C
N+9.00	C-1	II	1 1/2	1006°C

Como se puede observar, la temperatura requerida de resistencia al fuego definida por la curva estándar ISO 834, es mayor a las obtenidas a partir de las curvas paramétricas.

8.1 Cálculo de espesores de material para protección basado en ensayos.

Para el cálculo de los espesores se siguió el procedimiento especificado en la guías de diseño 19 del AISC (Steel Design Guide 19, 2003), y el documento (ASCE 29-05 Standard Calculation Methods for Structural Fire Protection, 2005).

8.1.1 Análisis para columnas

A continuación, se presenta una Ecuación que permite calcular el espesor de protección de las columnas a partir de la resistencia en horas requeridas y la masividad del perfil:

$$R = \left[C_1 \left(\frac{W}{D} \right) + C_2 \right] * h \quad (8.1)$$

Donde,

R = Resistencia requerida [horas]

h = Espesor del material de protección [in]

W = Peso de columna [lb/ft]

D = Perímetro de la columna expuesta en la interfaz de protección [in] [

C_1, C_2 = Constantes que dependen del material de protección.

Se usó la Vermiculita como material de protección, para este caso el producto analizado tiene validaciones para el UL 772 por lo tanto las constantes son:

$C_1 = 1.05$ y $C_2 = 0.61$.

Los valores de W/D para las columnas del proyecto se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 8-3: Valores W/D para columnas

Perfil	W/D
W12x96	1.34
W10x49	0.84

- **Análisis de columnas con resistencia requerida de 2 horas**

Despejando la variable h de la Ecuación (8.1) y reemplazando las constantes C_1, C_2 se tiene:

Para las columnas W12x96:

$$h = \frac{R}{1.05 \left(\frac{W}{D}\right) + 0.61} = \frac{2}{1.05 * 1.34 + 0.61} = 0.99 [in]$$

Las columnas W12x96 requieren 25mm de espesor de material de protección.

Para las columnas W10x49:

$$h = \frac{R}{1.05 \left(\frac{W}{D}\right) + 0.61} = \frac{2}{1.05 * 0.84 + 0.61} = 1.34 [in]$$

Las columnas W10x49 requieren 34 mm de espesor de material de protección.

- **Análisis de columnas con resistencia requerida de 1.5 horas**

Para las columnas W12x96:

$$h = \frac{R}{1.05 \left(\frac{W}{D}\right) + 0.61} = \frac{1.5}{1.05 * 1.34 + 0.61} = 0.74 [in]$$

Las columnas W12x96 requieren 19 mm de espesor de material de protección.

Para las columnas W10x49:

$$h = \frac{R}{1.05 \left(\frac{W}{D}\right) + 0.61} = \frac{1.5}{1.05 * 0.84 + 0.61} = 1.0 [in]$$

Las columnas W10x49 requieren 25 mm de espesor de material de protección.

8.1.2 Análisis para vigas de sistema de piso

A continuación, se presenta una Ecuación que permite calcular el espesor de protección de las vigas de sistema de piso con *Steel deck* a partir de una correlación con un perfil ensayado (en pruebas de horno) y la masividad del elemento.

$$T_1 = \frac{\left(\frac{W_2}{D_2} + 0.6\right)}{\left(\frac{W_1}{D_1} + 0.6\right)} * T_2 \quad (8.2)$$

Donde,

T = Espesor del material aplicado [in]

W = Peso de columna [lb/ft]

D = Perímetro del perfil expuesto en la interfaz de protección [in] [

Subíndice 1 = Datos de perfil analizado

Subíndice 2 = Datos de perfil ensayado en laboratorio

El diseño de sistema de piso se hizo basado en los ensayos UL N782, cuyo sistema de protección con vermiculita es similar al utilizado para el método analítico, y en la cual se ensayó un perfil W8x28 ($W/D=0.82$) y presenta los siguientes espesores requeridos de acuerdo a la resistencia en horas:

Tabla 8-4. Espesores mínimos de material de protección en perfiles según UL N782

Resistencia [horas]	Espesor mínimo [in]
1	3/8
1 1/2	3/8
2	9/16
3	1
4	1-7/16

A continuación, se presentan los valores W/D de los perfiles usados en el sistema de piso:

Tabla 8-5. Valores W/D para vigas de sistema de piso

Perfil	W/D
W14x22	0.53
W18x35	0.67

- **Análisis de vigas con resistencia requerida de 2 horas**

Para perfiles W14x22:

$$T_1 = \frac{(0.82 + 0.6)}{(0.53 + 0.6)} * \frac{9}{16} = 0.71[in]$$

Los perfiles W14x22 requieren 18mm de espesor de material de protección.

Para perfiles W18x35:

$$T_1 = \frac{(0.82 + 0.6)}{(0.67 + 0.6)} * \frac{9}{16} = 0.63[in]$$

Los perfiles W18x35 requieren 16 mm de espesor de material de protección.

- **Análisis de vigas con resistencia requerida de 1.5 horas**

Para perfiles W14x22:

$$T_1 = \frac{(0.82 + 0.6)}{(0.53 + 0.6)} * \frac{3}{8} = 0.47[in]$$

Los perfiles W14x22 requieren 12mm de espesor de material de protección.

Para perfiles W18x35:

$$T_1 = \frac{(0.82 + 0.6)}{(0.67 + 0.6)} * \frac{3}{8} = 0.42[in]$$

Los perfiles W18x35 requieren 11 mm de espesor de material de protección.

8.2 Diseño de Losa en *Steel Deck*

En el capítulo 4 se presentan las pautas para diseño de losas en *Steel deck*, a continuación, se muestra el diseño para la zona comercial y de oficinas, de acuerdo a la resistencia requerida en horas determinadas en el numeral anterior.

8.2.1 Zona Comercial

La losa de *Steel deck* debe resistir un tiempo de 2 horas (120 min).

Tabla 8-6: Propiedades geométricas de *Steel deck*

Cálculo de propiedades Geométricas	
t (espesor de la lámina-mm)	0.75
h_2 (altura de <i>Steel Deck</i> -mm)	50
L_1 (ancho superior del valle)	187.8
L_2 (ancho inferior del valle-mm)	115.2
L_3 (ancho de la cresta-mm)	125
h_1 (mm)	70
h_3 (mm)	50
$h'_1=h_1+h_3$ (mm)	120
A (Área del valle) (mm ²)	7575
L_r (mm)=	238.77
A/L_r =	31.72

Se va a chequear si la sección propuesta satisface las condiciones de diseño. La losa tiene una malla electrosoldada XX-131 y un gramil de 4.5 mm en cada valle espaciado 30mm de la base.

Tabla 8-7: Distancia desde la lámina de *Steel deck* hasta el refuerzo positivo del valle

U1 (mm)	58
U2 (mm)	58
U3 (mm)	30
Z (mm ^{0.5})	2.25
Alfa (°)	54

8.2.1.1 Resistencia al fuego de acuerdo al aislamiento térmico

Primero se debe calcular la resistencia al fuego de acuerdo al aislamiento térmico o la sección mínima para cumplir el requisito de resistencia en tiempo:

$$\Phi = \frac{1}{125} \left[\sqrt{50^2 + \left(125 + \frac{187.8 - 115.2}{2}\right)^2} - \sqrt{50^2 + \left(\frac{187.8 - 115.2}{2}\right)^2} \right] = 0.86$$

De la Tabla 4-3 se obtienen los coeficientes a_i y se aplica la Ecuación:

$$t_i = -28.8 + 1.55 * 120 + (-12.6) * 0.86 + 0.33 * 31.72 + (-735) * \frac{1}{125} + 48 * 31.72 * \frac{1}{125}$$

$$t_i = 163[\text{min}] > 120 [\text{min}] \text{ (Cumple)}$$

8.2.1.2 Resistencia a momento positivo

De la Tabla 4-4 se obtienen los coeficientes b_i y se determina la temperatura en cada componente del *Steel deck*:

La temperatura θ_a de la pestaña inferior:

$$\theta_a = 1063 + (-679) * \frac{1}{125} + (-1.13) * 31.72 + 46.7 * 0.86 + (-82.8) * 0.86^2 = 1001^\circ\text{C}$$

La temperatura θ_a en el alma

$$\theta_a = 925 + (-949) * \frac{1}{125} + (-1.82) * 31.72 + 344.2 * 0.86 + (-267.4) * 0.86^2$$

$$\theta_a = 958^\circ\text{C}$$

La temperatura θ_a en la aleta superior

$$\theta_a = 770 + (-2460) * \frac{1}{125} + (-1.67) * 31.72 + 592.6 * 0.86 + (-379) * 0.86^2$$

$$\theta_a = 927^\circ\text{C}$$

De la Tabla 4-5 se obtienen los coeficientes c_i para determinar la temperatura de la barra de refuerzo coloca en el valle:

$$\theta_s = 1387 + (-238) * \frac{30}{50} + (-227) * 2.25 + (-4.79) * 31.72 + 1.68 * 54 + (-1326) * \frac{1}{125}$$

$$\theta_s = 662 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Luego de calcular la temperatura, se puede determinar la capacidad resistente de los componentes de acuerdo a su factor de reducción:

Tabla 8-8: Cálculo de resistencia de cada componente de la losa

Componente	Temperatura [°C]	F. de reducción Kyj	Área de cada elemento Ai [mm2]	Fy (T° ambiente) [Mpa]	KI*Fyi	Fi[KN]
Parte Inferior del Valle=	1001.0	0.0366	86.4	280	10.24	0.89
Alma del deck=	958.3	0.0464	92.68	280	12.99	1.20
Cresta=	926.9	0.0549	93.75	280	15.37	1.44
Refuerzo dentro del valle=	662.5	0.3269	28.27	420	137.30	3.88
					Total:	7.41

Igualando estas fuerzas de tracción con la resistencia a compresión del concreto se puede determinar el eje neutro:

$$\sum F_i = 0.85 * (l_1 + l_3) * Z_{pl} * f'_c$$

$$Z_{pl} = \frac{7.41 * 10^3}{0.85 * (187.8 + 125) * 21} = 1.33 \text{ mm}$$

El cálculo de la capacidad a momento sería:

Tabla 8-9. Capacidad a momento positivo de la losa de *Steel deck*

	Fi(KN)	Zi(mm)	Mi (KN*m)
Parte Inferior del Valle=	0.89	119.63	0.106
Alma del deck=	1.20	95.00	0.114
Cresta=	1.44	69.63	0.100
Refuerzo dentro de valle=	3.88	90.00	0.349
Concreto	-7.41	0.66	-0.005
		Total	0.66
	Mn (KN*m/m)		2.12

La capacidad a momento positivo de un valle es de 0.67 KN*m y para una losa por metro de ancho es de 2.12 KN*m

$$\phi M_n(+) = 0.9 * 2.12 = 1.91 \text{KN} * m$$

8.2.1.3 Resistencia a momento negativo

Se dispone colocar una malla XX-131 con $F_y=485$ MPa a 20mm de la parte superior de la losa.

El ancho de análisis es el de un valle:

$$l_1 + l_3 = 187.8 + 125 = 312.8 \text{mm}$$

El acero de la malla electrosoldada es $131 \text{mm}^2/m$, es decir para el ancho de análisis se tiene:

$$A_s = 131 * 0.3128 = 40.98 \text{mm}^2$$

De la Tabla 4-6 se obtienen los coeficientes d_i para calcular la temperatura límite, θ_{lim} :

$$N_s = 40.98 * 485 = 19875 \text{N}$$

$$\theta_{lim} = 1144 + (-2.2 * 10^{-4}) * 19875 + (-9.71) * 31.72 + (-166) * 0.86 + (-2155) \frac{1}{125}$$

$$\theta_{lim} = 672 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A partir de esta temperatura se calcula el valor de Z (posición del refuerzo), asumiendo de acuerdo a la teoría que $u_3/h_2 = 0.75$.

$$z = \frac{672 - 1387 + 238 * 0.75 + 4.79 * 31.72 - 1.68 * 54 + 1326 * \frac{1}{125}}{-227}$$

$$z = 2.047 \text{ mm}$$

Las coordenadas de las isothermas serían:

$$X_I = 0$$

$$Y_I = Y_{II} = \frac{1}{\left(\frac{1}{2.047} - \frac{4}{\sqrt{187.8 + 125}} \right)^2} = 14.52 \text{mm}$$

$$Y_{III} = 50 \text{ mm}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2 * 50}{187.8 - 115.2}\right) = 54^\circ$$

$$a = \left(\frac{1}{2.047} - \frac{1}{\sqrt{50}}\right)^2 * 187.8 \sin 54 = 18.28 \text{ mm}$$

$$\text{Como } a \geq 8, \quad c = -8(1 + \sqrt{1 + 18.28}) = -43.13 \text{ mm}$$

$$b = \frac{187.8}{2} \sin(54) \left(1 - \frac{\sqrt{18.28^2 - 4 * 18.28 - 43.13}}{18.28}\right) = 14.62 \text{ mm}$$

$$X_{III} = \frac{187.8}{2} - \frac{14.62}{\sin(54)} = 75.9 \text{ mm}$$

$$X_{IV} = \frac{187.8}{2} + \frac{125}{2} = 156.4 \text{ mm}$$

$$Y_{IV} = 50 + 14.62 = 64.62 \text{ mm}$$

Tabla 8-10: Coordenadas de los 4 punto de la Isoterma

Punto	X [mm]	Y [mm]
I	0.0	14.5
II	50.2	14.5
III	75.9	50.0
IV	156.4	64.6

Haciendo sumatoria de fuerzas se puede encontrar el eje neutro plástico:

$$Z_{pl} = \frac{-0.85f'_c l_2 + \sqrt{(0.85f'_c l_2)^2 - 4 * \left(\frac{0.85f'_c}{\tan \alpha}\right) (-A_s F_y)}}{2 * \frac{0.85f'_c}{\tan \alpha}}$$

$$Z_{pl} = \frac{-0.85 * 21 * 115.2 + \sqrt{(0.85 * 21 * 115.2)^2 - 4 * \left(\frac{0.85 * 21}{\tan 54}\right) (-19875)}}{2 * \left(\frac{0.85 * 21}{\tan 54}\right)}$$

$$Z_{pl} = 9.1 \text{ mm}$$

El bloque a compresión tiene una altura de 9.1mm, a partir de los datos calculados anteriormente se puede calcular el área de concreto a compresión y su respectivo centroide para hacer la sumatoria de momentos.

Ancho del bloque de compresión a 9.1mm:

$$x_1 = 2 * \frac{Z_{pl}}{\tan \alpha} + l_2 = 2 * \frac{9.1}{\tan(54)} + 115.2 = 128.42 \text{ mm}$$

El centroide del área a compresión sería:

$$Y_c = \frac{Z_{pl}(l_2 + 2 * x_1)}{3 * (x_1 + l_2)} = \frac{9.1 * (115.2 + 2 * 128.42)}{3 * (128.42 + 115.2)} = 4.63 \text{ mm}$$

La distancia de acción de fuerza del refuerzo sería:

$$d = h_1 + h_2 - Y_I - Y_c = 50 + 70 - 14.52 - 4.63 = 100.85 \text{ mm}$$

El momento negativo resistente de la sección sería:

$$: M_n = d * A_s F_y = \frac{100.85 * 19875}{1 * 10^6} = 2 \text{ kN} * m$$

La resistencia del *Steel deck* para una losa de ancho de 1m sería

$$M_n(-) = \frac{2}{(187.8 + 125)/1000} = 6.39 \text{ kN} * m/m$$

$$\phi M_n(-) = 0.9 * 6.39 = 5.75 \text{ kN} * m$$

Las cargas que se tienen en la zona comercial son las siguientes

$$D = 5.25 \text{ kN}/m^2$$

$$L = 5.0 \text{ kN}/m^2$$

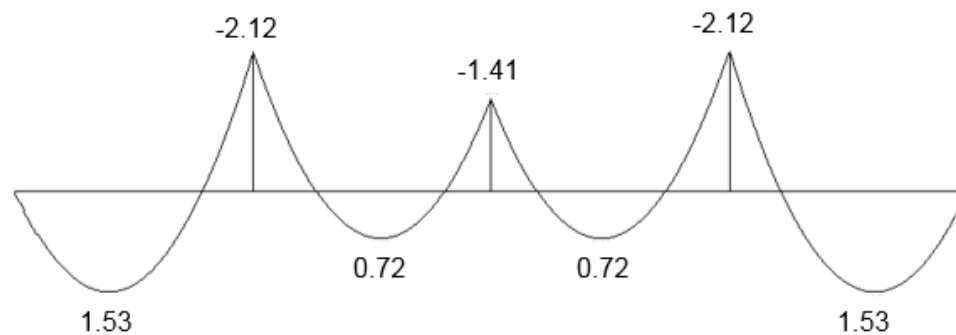
La combinación para situación de incendio para un ancho aferente de 1m sería:

$$W = 1.2D + 0.5L = 1.2 * 5.25 + 0.5 * 5 = 8.8 \text{ kN/m}$$

Si se idealiza una viga continua de longitud total 6m y apoyos cada 1.5m cargada con la carga distribuida de 8.8 kN/m , se pueden determinar los momentos a los que estará sometida la losa de *Steel deck* para situación de incendio.

Se usó un programa de versión libre denominado Beamax, para determinar estos valores:

Figura 8-1. Idealización del *Steel deck* como viga continua



Las mayores sollicitaciones serían:

$$M_u(+)= 1.53 \text{ kN} * m < 1.91 \text{ kN} * m \text{ (Cumple)}$$

$$M_u(-)= 2.12 \text{ kN} * m < 5.75 \text{ kN} * m \text{ (Cumple)}$$

8.2.2 Zona de oficinas

La losa de *Steel deck* debe resistir un tiempo de 1-1/2 horas (90 min).

Tabla 8-11: Propiedades geométricas de *Steel deck*

Cálculo de propiedades Geométricas	
t (espesor de la lámina-mm)	0.75
h ₂ (altura de <i>Steel Deck</i> -mm)	50
L ₁ (ancho superior del valle)	187.8
L ₂ (ancho inferior del valle-mm)	115.2
L ₃ (ancho de la cresta-mm)	125
h ₁ (mm)	70
h ₃ (mm)	50
h' ₁ =h ₁ +h ₃ (mm)	120
A (Área del valle) (mm ²)	7575
Lr (mm)=	238.77
A/Lr=	31.72

Se va a chequear si la sección propuesta satisface las condiciones de diseño. La losa tiene una malla electrosoldada XX-131 y a diferencia de la zona comercial no tiene refuerzo en el valle.

8.2.2.1 Resistencia al fuego de acuerdo al aislamiento térmico

Como la losa tiene las mismas características de aislamiento térmico se satisface el requisito de resistencia en tiempo:

$$\Phi = \frac{1}{125} \left[\sqrt{50^2 + \left(125 + \frac{187.8 - 115.2}{2}\right)^2} - \sqrt{50^2 + \left(\frac{187.8 - 115.2}{2}\right)^2} \right] = 0.86$$

De la Tabla 4-3 se obtienen los coeficientes a_i y se aplica la Ecuación:

$$t_i = -28.8 + 1.55 * 120 + (-12.6) * 0.86 + 0.33 * 31.72 + (-735) * \frac{1}{125} + 48 * 31.72 * \frac{1}{125}$$

$$t_i = 163[\text{min}] > 90 [\text{min}] \text{ (Cumple)}$$

8.2.2.2 Resistencia a momento positivo

De la Tabla 4-4 se obtienen los coeficientes b_i para un tiempo de 90min y se determina la temperatura en cada componente del *Steel deck*:

La temperatura θ_a de la pestaña inferior:

$$\theta_a = 1018 + (-839) * \frac{1}{125} + (-1.55) * 31.72 + 65.1 * 0.86 + (-108.1) * 0.86^2 = 939^\circ\text{C}$$

La temperatura θ_a en el alma

$$\theta_a = 816 + (-959) * \frac{1}{125} + (-2.21) * 31.72 + 464.9 * 0.86 + (-340.2) * 0.86^2$$

$$\theta_a = 887^\circ\text{C}$$

La temperatura θ_a en la aleta superior

$$\theta_a = 618 + (-2786) * \frac{1}{125} + (-1.79) * 31.72 + 767.9 * 0.86 + (-472) * 0.86^2$$

$$\theta_a = 850^\circ\text{C}$$

Luego de calcular la temperatura, se puede determinar la capacidad resistente de los componentes de acuerdo a su factor de reducción:

Tabla 8-12: Cálculo de resistencia de cada componente de la losa

	Temperatura	Factor de reducción	Área de cada	Fy temperatur	Fyi	Fi(KN)
Parte Inferior del Valle=	939	0.0517	86.4	280	14.49	1.25
Alma del deck=	887	0.0657	92.68	280	18.40	1.71
Cresta=	850	0.0867	93.75	280	24.28	2.28
					Total:	5.23

Igualando estas fuerzas de tracción con la resistencia a compresión del concreto se puede determinar el eje neutro:

$$\sum F_i = 0.85 * (l_1 + l_3) * Z_{pl} * f'_c$$

$$Z_{pl} = \frac{5.23 * 10^3}{0.85 * (187.8 + 125) * 21} = 0.94\text{mm}$$

El cálculo de la capacidad a momento sería:

Tabla 8-13: Capacidad a momento positivo de la losa de *Steel deck*

	Fi(KN)	Zi(mm)	Mi (KN*m)
Parte Inferior del Valle=	1.25	119.625	0.150
Alma del deck=	1.71	95	0.162
Cresta=	2.28	69.625	0.159
Concreto	-5.23	0.47	-0.002
		Total	0.47

Mn (Kn*m/m)	1.496
--------------------	--------------

La capacidad a momento positivo de un valle es de 0.47 KN*m y para una losa por metro de ancho es de 1.496 KN*m

$$\phi M_n(+) = 0.9 * 1.496 = 1.35 \text{KN} * m$$

8.2.2.3 Resistencia a momento negativo

Se dispone colocar una malla XX-131 con $F_y=485$ MPa a 20mm de la parte superior de la losa.

El ancho de análisis es:

$$l_1 + l_3 = 187.8 + 125 = 312.8 \text{mm}$$

El acero de la malla electrosoldada es $131 \text{mm}^2/\text{m}$, es decir para el ancho de análisis se tiene:

$$A_s = 131 * 0.3128 = 40.98 \text{mm}^2$$

De la Tabla 4-6 se obtienen los coeficientes d_i para 90min para calcular la temperatura límite, θ_{lim} :

$$N_s = 40.98 * 485 = 19875 \text{ N}$$

$$\theta_{lim} = 1055 + (-2.2 * 10^{-4}) * 19875 + (-9.91) * 31.72 + (-154) * 0.86 + (1990) \frac{1}{125}$$

$$\theta_{lim} = 589 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A partir de esta temperatura se calcula el valor de Z (posición del refuerzo), asumiendo de acuerdo a la teoría que $u_3/h_2 = 0.75$.

$$z = \frac{589 - 1342 + 256 * 0.75 + 5.30 * 31.72 - 1.39 * 54 + 1267 * \frac{1}{125}}{-235}$$

$$z = 1.95 \text{ mm}$$

Las coordenadas de las isotermas serían:

$$X_I = 0$$

$$Y_I = Y_{II} = \frac{1}{\left(\frac{1}{1.95} - \frac{4}{\sqrt{187.8 + 125}}\right)^2} = 12.1 \text{ mm}$$

$$Y_{III} = 50 \text{ mm}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2 * 50}{187.8 - 115.2}\right) = 54^\circ$$

$$a = \left(\frac{1}{1.95} - \frac{1}{\sqrt{50}}\right)^2 * 187.8 \sin 54 = 21.02 \text{ mm}$$

$$\text{Como } a \geq 8, \quad c = -8(1 + \sqrt{1 + 21.02}) = -45.54 \text{ mm}$$

$$b = \frac{187.8}{2} \sin(54) \left(1 - \frac{\sqrt{21.02^2 - 4 * 21.02 - 45.54}}{21.02}\right) = 12.1 \text{ mm}$$

$$X_{III} = \frac{187.8}{2} - \frac{12.1}{\sin(54)} = 78.9 \text{ mm}$$

$$X_{IV} = \frac{187.8}{2} + \frac{125}{2} = 156.4 \text{ mm}$$

$$Y_{IV} = 50 + 12.1 = 62.1 \text{ mm}$$

Tabla 8-14: Coordenadas de los 4 punto de la Isotherma

Punto	X	Y
I	0.0	12.1
II	51.4	12.1
III	78.9	50.0
IV	156.4	62.1

Haciendo sumatoria de fuerzas se puede encontrar el eje neutro plástico:

$$Z_{pl} = \frac{-0.85f'_c l_2 + \sqrt{(0.85f'_c l_2)^2 - 4 * \left(\frac{0.85f'_c}{\tan \alpha}\right) (-A_s F_y)}}{2 * \frac{0.85f'_c}{\tan \alpha}}$$

$$Z_{pl} = \frac{-0.85 * 21 * 115.2 + \sqrt{(0.85 * 21 * 115.2)^2 - 4 * \left(\frac{0.85 * 21}{\tan 54}\right) (-19875)}}{2 * \left(\frac{0.85 * 21}{\tan 54}\right)}$$

$$Z_{pl} = 9.1 \text{ mm}$$

El bloque a compresión tiene una altura de 9.1mm, a partir de los datos calculados anteriormente se puede calcular el área de concreto a compresión y su respectivo centroide para hacer la sumatoria de momentos.

Ancho del bloque de compresión a 9.1mm:

$$x_1 = 2 * \frac{Z_{pl}}{\tan \alpha} + l_2 = 2 * \frac{9.1}{\tan(54)} + 115.2 = 128.42 \text{ mm}$$

El centroide del área a compresión sería:

$$Y_c = \frac{Z_{pl}(l_2 + 2 * x_1)}{3 * (x_1 + l_2)} = \frac{9.1 * (115.2 + 2 * 128.42)}{3 * (128.42 + 115.2)} = 4.63 \text{ mm}$$

La distancia de acción de fuerza del refuerzo sería:

$$d = h_1 + h_2 - Y_I - Y_c = 50 + 70 - 12.1 - 4.63 = 103.27 \text{ mm}$$

El momento negativo resistente de la sección sería:

$$M_n = d * A_s F_y = \frac{103.27 * 19875}{1 * 10^6} = 2.05 \text{ kN} * \text{m}$$

La resistencia del *Steel deck* para una losa de ancho de 1m sería

$$M_n(-) = \frac{2.05}{(187.8 + 125)/1000} = 6.55 \text{ kN} * \text{m/m}$$

$$\phi M_n(-) = 0.9 * 6.39 = 5.90 \text{ kN} * \text{m}$$

Las cargas que se tienen en la zona de oficinas son las siguientes

$$D = 5.25 \text{ kN/m}^2$$

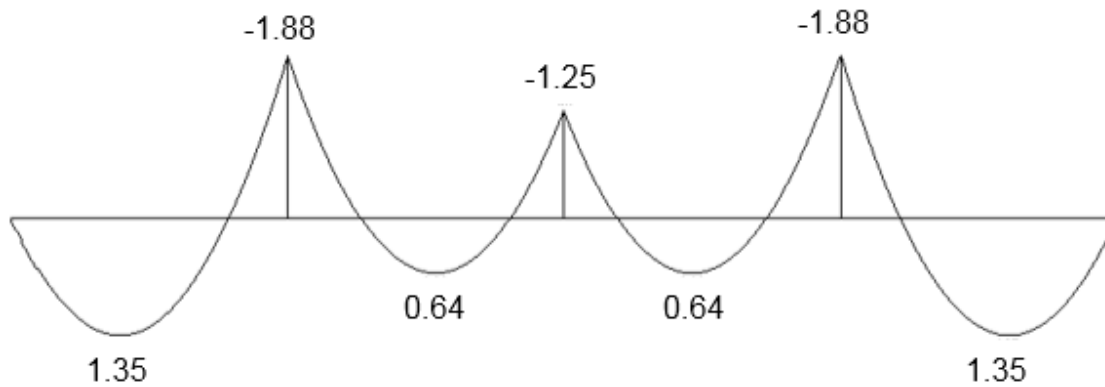
$$L = 2.0 \text{ kN/m}^2$$

La combinación para situación de incendio para un ancho aferente de 1m sería:

$$W = 1.2D + 0.5L = 1.2 * 5.25 + 0.5 * 3 = 7.8 \text{ kN/m}$$

Si se idealiza una viga continua de longitud total 6m y apoyos cada 1.5m cargada con la carga distribuida de 7.8 kN/m , se pueden determinar los momentos a los que estará sometida la losa de *Steel deck* para situación de incendio.

Se usó un programa de versión libre denominado Beamax, para determinar estos valores:

Figura 8-2: Idealización del *Steel deck* como viga continua

Las mayores sollicitaciones serían:

$$M_u(+) = 1.35 \text{ kN} \cdot \text{m} \leq 1.35 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (Cumple)}$$

$$M_u(-) = 1.88 \text{ kN} \cdot \text{m} < 5.90 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (Cumple)}$$

8.3 Cálculo de espesores de protección para elementos estructurales a partir de la curva estándar

Se debe realizar un análisis iterativo para encontrar el espesor óptimo de acuerdo a las temperaturas críticas de cada elemento (calculadas en el capítulo anterior). Analizando el mismo material de protección cuyas características se muestran a continuación:

Material de Protección: Vermiculita

Densidad: $\rho_p = 350 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Contenido de humedad: $p = 15\%$

Conductividad térmica: $\lambda_p = 0.12 \text{ [W/(mK)]}$

Calor específico: $c_p = 1200 \text{ [J/(kgK)]}$

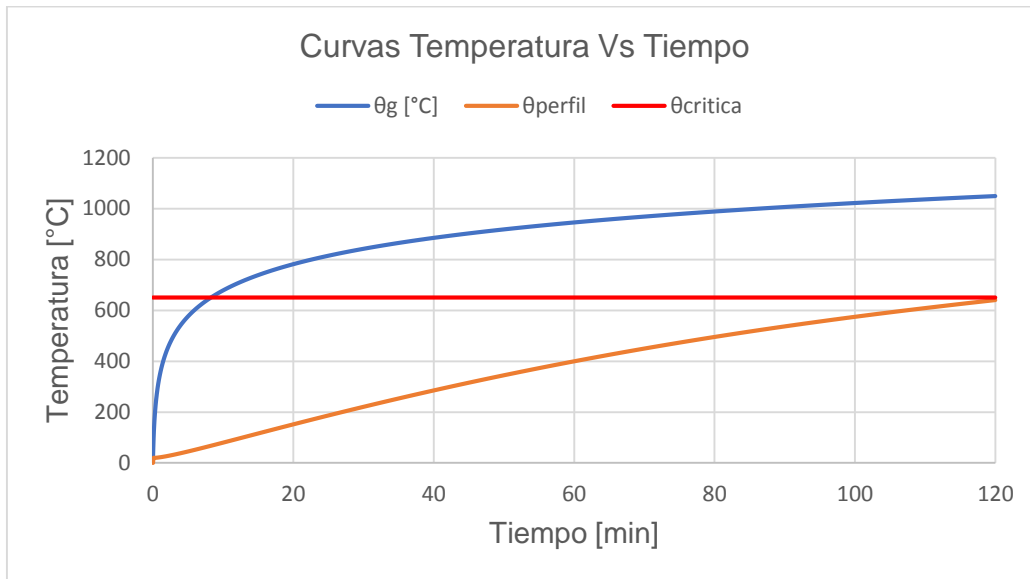
8.3.1 Zona Comercial

- Columna W12x96: La temperatura crítica es de 650°C

$$\frac{A_p}{V} = 100.55 \text{ m}^{-1}$$

Aplicando la formulación de la variación de temperatura para perfil protegido se obtienen los siguientes resultados:

Si se aplican 15mm de espesor del material de protección analizado (Vermiculita), el perfil alcanza una temperatura máxima de 640°C, es decir no supera la temperatura crítica por lo tanto el elemento cumple.

Figura 8-3: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W12X96 protegido

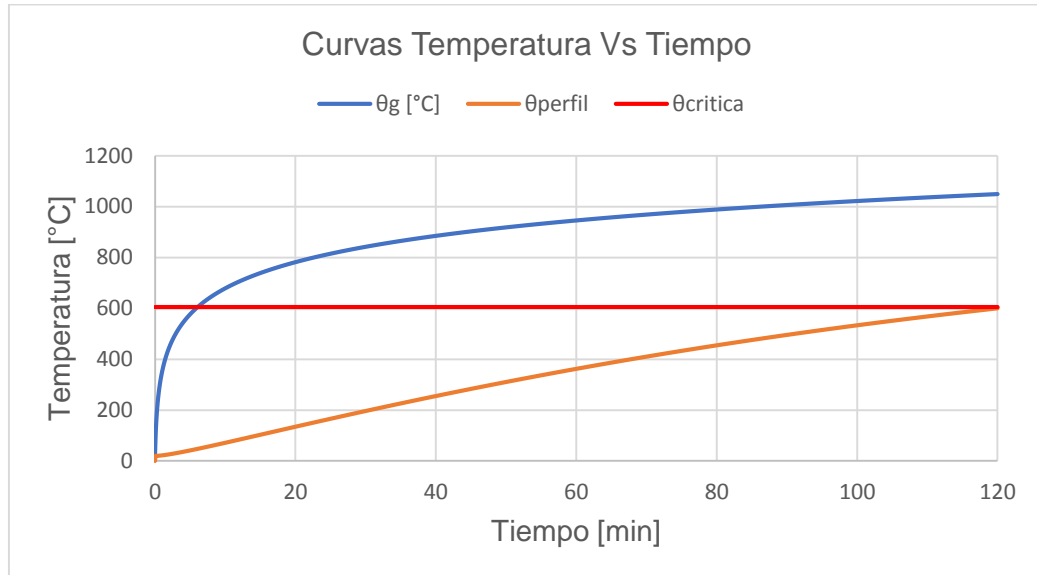
- Columna W10x49: La temperatura crítica es de 605 °C

$$\frac{A_p}{V} = 159.3m^{-1}$$

Aplicando la formulación de la variación de temperatura para perfil protegido se obtienen los siguientes resultados:

Si se aplican 25mm de espesor del material de protección analizado (Vermiculita), el perfil alcanza una temperatura máxima de 600°C, es decir no supera la temperatura crítica por lo tanto el elemento cumple.

Figura 8-4: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W10X49 protegido

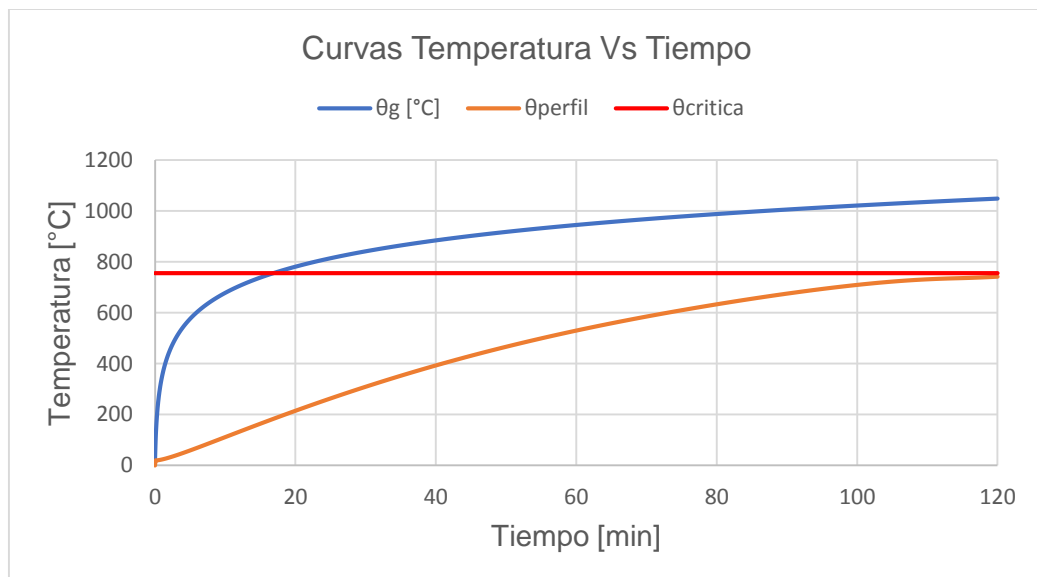


- Vigueta W14x22: La temperatura crítica es de 755 °C

$\frac{A_p}{V} = 159.3m^{-1}$. Se deben aplicar 20mm de espesor de material de protección (Vermiculita).

Para tener una temperatura de 751°C en el perfil y no se alcance la temperatura crítica.

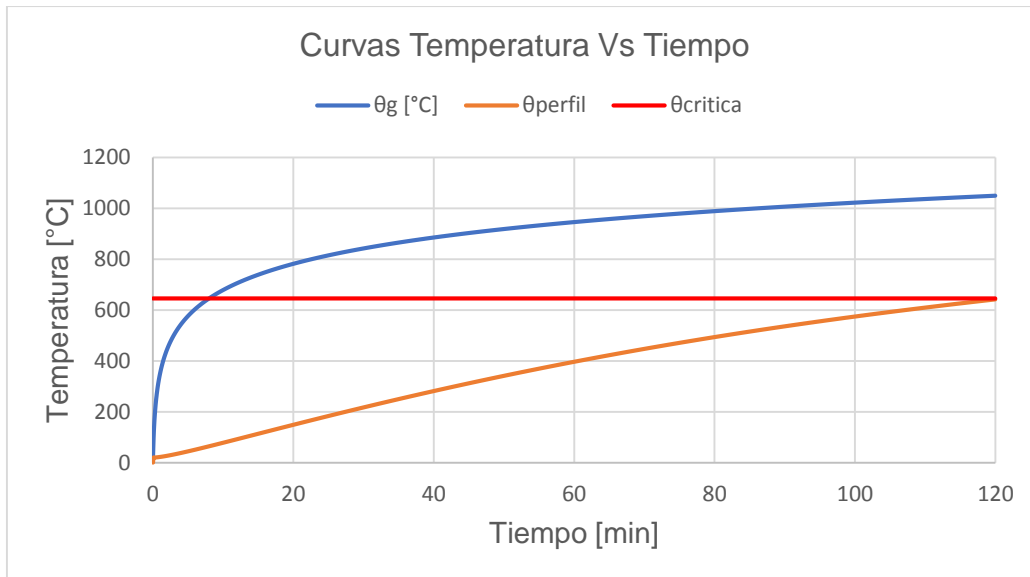
Figura 8-5: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W14X22 protegido



- Viga W18x35: La temperatura crítica es de 645 °C

$\frac{A_p}{V} = 199.85m^{-1}$. Se deben aplicar 20mm de espesor de material de protección (Vermiculita). Para tener una temperatura de 640°C en el perfil y no se alcance la temperatura crítica.

Figura 8-6: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W18X35 protegido



8.3.2 Zona de Oficinas

El análisis para los niveles de la edificación que tienen uso de oficinas corresponde a un tiempo de 90min.

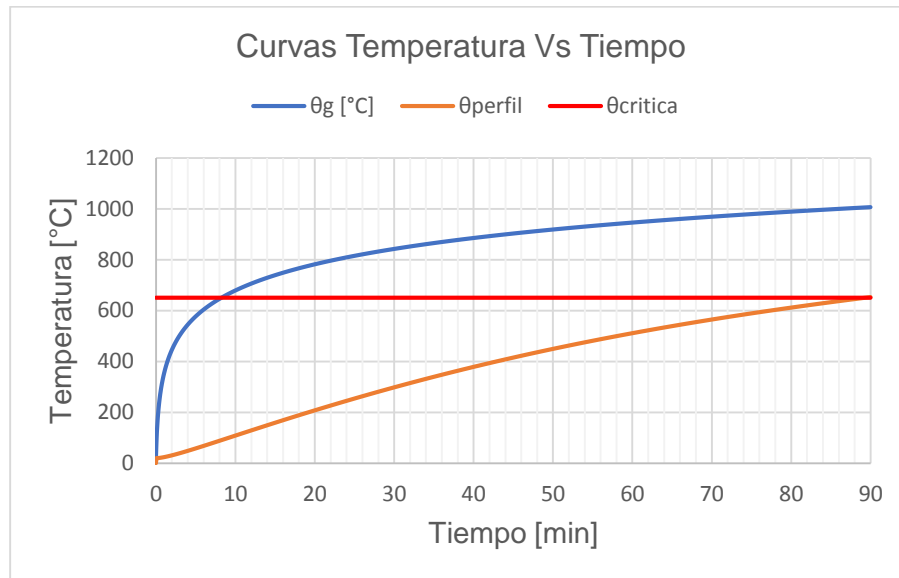
- Columna W12x96: La temperatura crítica es de 650°C

$$\frac{A_p}{V} = 100.55m^{-1}$$

Aplicando la formulación de la variación de temperatura para perfil protegido se obtienen los siguientes resultados:

Si se aplican 10mm de espesor del material de protección analizado (Vermiculita), el perfil alcanza una temperatura máxima de 650°C, es decir no supera la temperatura crítica por lo tanto el elemento cumple.

Figura 8-7: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W12X96 protegido



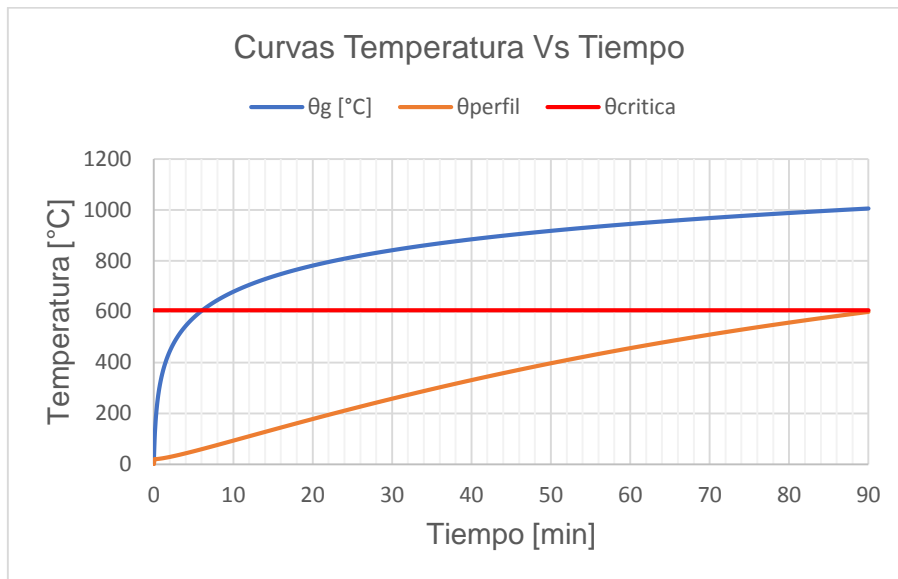
- Columna W10x49: La temperatura crítica es de 605 °C

$$\frac{A_p}{V} = 159.3m^{-1}$$

Aplicando la formulación de la variación de temperatura para perfil protegido se obtienen los siguientes resultados:

Si se aplican 18mm de espesor del material de protección analizado (Vermiculita), el perfil alcanza una temperatura máxima de 600°C, es decir no supera la temperatura crítica por lo tanto el elemento cumple.

Figura 8-8: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W10X49 protegido

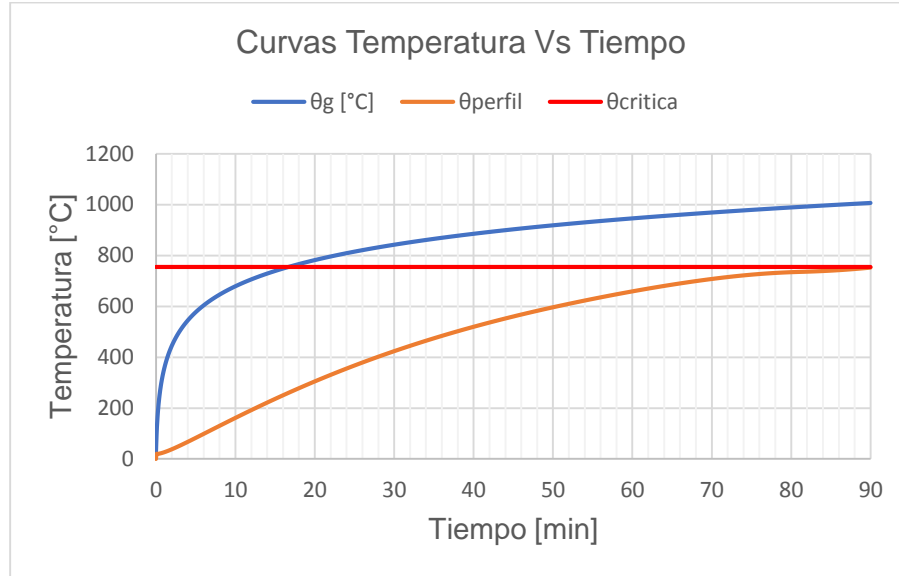


- Vigueta W14x22: La temperatura crítica es de 755 °C

$\frac{A_p}{V} = 159.3m^{-1}$. Se deben aplicar 13mm de espesor de material de protección (Vermiculita).

Para tener una temperatura de 752°C en el perfil y no se alcance la temperatura crítica.

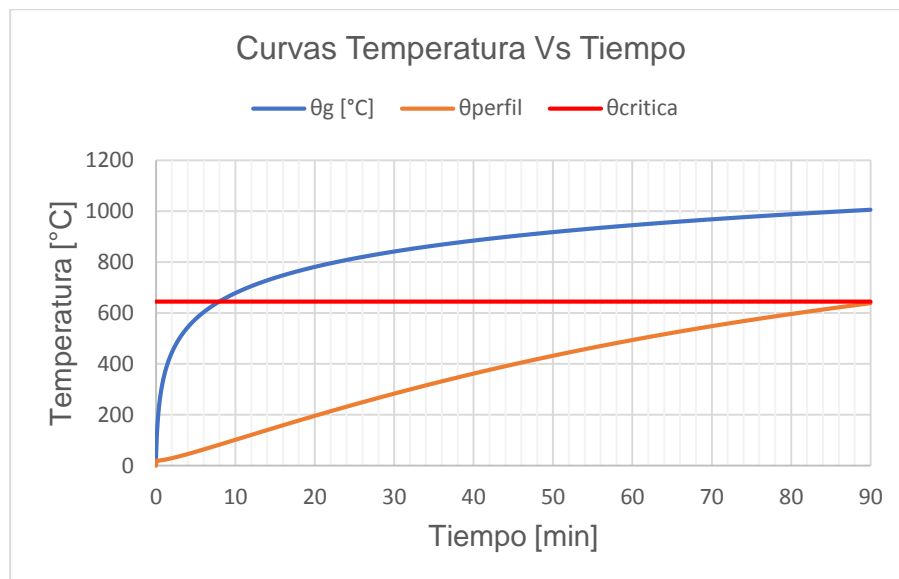
Figura 8-9: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W14x22 protegido



Viga W18x35: La temperatura crítica es de 645 °C

$\frac{A_p}{V} = 199.85m^{-1}$. Se deben aplicar 19mm de espesor de material de protección (Vermiculita). Para tener una temperatura de 640°C en el perfil y no se alcance la temperatura crítica.

Figura 8-10: Curva estándar Temperatura Vs Tiempo del recinto y del perfil W18X35 protegido



8.3.3 Comparación de resultados

Con el objetivo de ver con mayor claridad los resultados luego de realizar el cálculo de los espesores de material de protección requerido analizado a partir de curvas estándar y paramétricas se presenta la siguiente tabla comparativa:

Tabla 8-15: Espesores de protección pasiva requeridos en perfiles de acero con diferentes métodos.

Niveles	Perfiles	Espesor de Protección			
		Diseño Basado en Ensayos	Curva Estándar	Tiempo Equivalente	Curva Paramétrica
Zona Comercial	W12x96	25 mm	15 mm	7 mm	7 mm
	W10x49	34 mm	25 mm	13 mm	13 mm
	W14x22	18 mm	20 mm	7 mm	7 mm
	W18x35	16 mm	28 mm	12 mm	12 mm
Zona Oficinas	W12x96	19 mm	10 mm	4 mm	0 mm
	W10x49	25 mm	18 mm	7 mm	0 mm
	W14x22	12 mm	13 mm	4 mm	0 mm
	W18x35	11 mm	18 mm	7 mm	0 mm

Para ver con mayor claridad la incidencia de los resultados obtenidos, se comparan a continuación las cantidades requeridas de protección por metodología prescriptiva y para la curva paramétrica:

Tabla 8-16: Comparación de Metodologías de diseño

Niveles	Perfil	Longitud (m)	Peso (Kg)	Área expuesta (m2)	Cantidad de Protección (Kg)	
					Prescriptivo	Curva Paramétrica
Zona Comercial	W12x96	48	6866	88	769	215
	W10x49	24	3433	36	423	162
	W14x22	330	47203	347	2183	849
	W18x35	168	24031	223	1251	938
Zona Oficinas	W12x96	48	6866	88	584	0
	W10x49	24	3433	36	311	0
	W14x22	330	47203	347	1455	0
	W18x35	168	24031	223	860	0
Total					7836 Kg	2164 Kg
Diferencia					5672 Kg	
Diferencia (%)					362%	

Usando el método analítico (curva paramétrica) en el diseño se obtienen mejores resultados los cuales se manifiestan finalmente en economía para el proyecto.

9. Conclusiones y recomendaciones

9.1 Conclusiones

Aplicar métodos analíticos en el diseño estructural de una edificación de acero de uso mixto en situación de incendio permite evaluar las condiciones de un incendio real y su comportamiento considerando material combustible, ventilación, geometría, entre otras y de esta manera optimizar el diseño comparado con los resultados obtenidos a partir de un análisis prescriptivo usando una curva estándar como lo es la ISO 834 en la cual la temperatura aumenta continuamente en el tiempo.

La metodología de tiempo equivalente permite determinar el tiempo en el que se produce sobre la curva normalizada la máxima temperatura del incendio real al considerar algunas características del recinto (ventilación y propiedades térmicas de los materiales) lo que permite obtener temperaturas inferiores por lo tanto disminuir las cantidades requeridas de protección pasiva.

Los procedimientos para determinar las curvas paramétricas y el tiempo equivalente no requieren de análisis complejos y permiten una optimización en el diseño de los elementos de acero lo que le brinda la posibilidad a un diseñador estructural en conjunto con arquitectura encontrar soluciones eficientes desde el punto de vista técnico, funcional y económico.

El diseño estructural en condiciones de incendio de una estructura de acero no debe observarse como un inconveniente o desventaja competitiva frente a otros tipos de construcción, ya que se si se hace un análisis juicioso se obtienen resultados favorables. Como se pudo evidenciar, diseñar contra fuego no implica necesariamente aplicar protección pasiva.

9.2 Recomendaciones

Usar métodos analíticos en el diseño estructural en situación de incendio permite obtener resultados óptimos si se ejecutan adecuadamente; es muy importante conocer y tener en cuenta las limitaciones de cada método, por ejemplo, las curvas paramétricas no se pueden usar para recintos con área mayor a los 500m² y altura de 4m; si se tienen estas condiciones se deben hacer análisis con otros métodos.

Algunos métodos analíticos para el análisis del incendio como son los modelos de zonas y modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) permiten considerar otras variables para modelar el comportamiento de un incendio real, pero ejecutar este tipo de metodologías requiere de conocimientos avanzado en termodinámica, dinámica de fluidos y otras áreas que requieren una preparación especial en estos temas.

Bibliografía

- ECCS. (1985). *European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures*. European Convention for Constructional Steelwork, ECCS, Elsevier.
- ECCS. (2001). *Model Code on Fire Engineering*. Brussels: European Convention for Constructional Steelwork, ECCS publication N°111.
- EN1991-1-2. (2004). *Eurocode 1: Actions on structures-Part 1-2:General actions-Actions on structures exposed to fire*. Brussels: CEN (European Committee for Standardization).
- EN1993-1-2. (2005). *Eurocode 3: Design of steel Structures-Part 1-2:Structural fire design*. Brussels: CEN (European Committee for Standardization).
- EN1994-1-1. (2004). *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures-Part 1-1:General rules and rules for buildings*. Brussels, Belgium: CEN (European Committee for Standardization).
- EN1994-1-2. (2005). *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures-Part 1-1:General rules and rules for buildings*. Brussels: CEN (European Committee for Standardization).
- Wang, Z.-H. (2004). *Heat Transfer Analysis of Insulated Steel Members Exposed to Fire*. Singapore.
- ANSI/AISC 360. (2016). ANSI / AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings. *American Institute of Steel Construction*, 676.
- ASCE,SFPE, S. (2005). *ASCE 29-05 Standard Calculation Methods for Structural Fire Protection*.
- ASTM E119. (2002). Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials, ASTM International, PA. In *ASTM International*, PA (Issue 1). <https://doi.org/10.1520/E0119-14>
- Boring, D., Spence, J., & Wells, W. (1981). *AISI Fire Protection Through Modern*

- Building Codes* (A. I. and S. Institute (ed.); Fifth Edit).
- Fernández, C. R. (2003). *Estudio del fenómeno de transmisión del calor en situaciones de fuego en estructuras mixtas*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Franssen, J. M., & Real, P. V. (2015). (*ECCS Eurocode design manuals*)
Franssen, Jean-Marc_ Real, Paulo Vila - Fire design of steel structures_ Eurocode 1_ actions on structures, part 1-2_ General actions - Actions on structures exposed to .pdf (ECCS (ed.); 2da ed.).
- Gonzalez, F. and Lange, J. (2009). Behaviour of High Strength Grade 10.9 Bolts Under Fire Conditions,. *Proceedings, Application of Structural Fire Design, February*, 19–20.
- Hanus, F., Zilli, G., & Franssen, J. M. (2011). Behaviour of Grade 8.8 bolts under natural fire conditions-Tests and model. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(8), 1292–1298. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.03.012>
- Hanus, François. (2010). *Analysis of simple connections in steel structures subjected to natural fires*. 320.
- ISO 834. (1999). *ISO 834-Fire Resistance Tests- Elements of Building Construction*.
- Kirby, B. R. (1995). The behaviour of high-strength grade 8.8 bolts in fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 33(1–2), 3–38.
[https://doi.org/10.1016/0143-974X\(94\)00013-8](https://doi.org/10.1016/0143-974X(94)00013-8)
- Kodur, V., Kand, S., & Khaliq, W. (2011). Effect of Temperature on Thermal and Mechanical Properties of Steel Bolts. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(6), 765–774. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000445](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000445)
- Lennon, T., Moore, D. B., Wang, Y. C., & Bailey, C. G. (2007). *Designers' guide to EN1991-1-2*, (1ra ed.). Thomas Telford.
- NSR-10. (2010). *Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente Título F — Estructuras Metálicas*. 530–827.
- Phan, L. T., McAllister, T. P., Gross, J. L., & Hurley, M. J. (2010). Best practice guidelines for structural fire resistance design of concrete and steel buildings. *NIST Technical Note 1681*, 199. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1681>

- Steel Design Guide 19, A. (2003). Steel Design Guide 19. In *Steel Design Guide 19* (Issue 1).
- Takagi, J., & Deierlein, G. G. (2007). Strength design criteria for steel members at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(8), 1036–1050. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.10.005>
- Torres, F. (2017). *Estado del arte en colombia del diseño estructural para condiciones de incendio bajo el reglamento colombiano de construcciones sismo resistentes – nsr10, antecedentes y precedentes*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Vassart, O., Zhao, B., Cajot, L. ., Robert, F., Meyer, U., & Frangi, A. (2014). Eurocodes : Background & Applications Structural Fire Design. In *JRC Science and policy reports*. <https://doi.org/10.2788/85432>
- Yu, L. (2006). *Behavior of bolted connections during and after a fire*. PhD Disser, 196.
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsndl&AN=edsndl.oai.union.ndltd.org.UTEXAS.oai.repositories.lib.utexas.edu.2152.2959&site=eds-live>