PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

APLICACIÓN CONCEPTUAL DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL EN CASOS DE INCENDIO POR IMPLEMENTAR EN LA NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN AL CASO DE UN EDIFICIO MODELO DE ACERO DE CINCO PLANTAS, Y COMPARACIÓN CON LA ESTRUCTURA SIN REQUERIMIENTOS CONTRA INCENDIO.

AUTORES:

COBO HERVAS JUAN ESTEBAN

JÁCOME PONCE NICOLE ESTEFANÍA

Trabajo previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil

QUITO, NOVIEMBRE, 2022

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción ..... - 11 -

1.1. Justificación ..... - 11 -

1.2. Planteamiento del problema..... - 12 -

1.3. Objetivos ..... - 12 -

1.3.1. Objetivo general ..... - 12 -

1.3.2. Objetivos específicos..... - 13 -

1.4. Alcance ..... - 13 -

2.2. Ingeniería estructural para casos de incendio ..... - 18 -

2.2.1. La influencia de la temperatura en el acero..... - 19 -

2.2.2. Los efectos de las restricciones térmicas sobre el comportamiento estructural ..... - 20 -

2.2.3. Materiales aislantes ..... - 20 -

2.3. Análisis de riesgos de incendios. ..... - 21 -

2.3.1. Concepto de riesgo. ..... - 21 -

2.3.2. Concepto de consecuencia. ..... - 22 -

3. Desarrollo del caso de análisis estructural considerando riesgo de incendio - 22 -

3.1. El edificio base..... - 23 -

3.1.1. Presentación del edificio base..... - 23 -

3.1.2. Características del sistema estructural..... - 31 -

3.1.3. Requerimientos de resistencia ..... - 31 -

3.2. Determinación de riesgos de incendio en la estructura ..... - 32 -

3.3. Generación de curvas de incendio ..... - 33 -
3.3.1. Curvas tiempo-temperatura ..... - 33 -
3.3.2. Curva estándar según UNE EN 1991-1-2 ..... - 33 -
3.3.2.1. Curva paramétrica según UNE EN 1991-1-2 ..... - 34 -
3.3.3. Curvas de temperatura del miembro ..... - 40 -
3.3.4. Variaciones de las temperaturas de los miembros analizados ..... - 43 -
3.4. Comportamiento estructural de elementos individuales para los escenarios de incendio ..... - 47 -
3.4.1. Conceptos de análisis estructural en incendio ..... - 47 -
3.4.1.1. Tracción ..... - 48 -
3.4.1.2. Compresión ..... - 49 -
3.4.1.3. Flexión ..... - 49 -
3.4.1.4. Corte ..... - 50 -
3.4.2. Comportamiento estructural de los elementos analizados ..... - 50 -
3.5. Verificación de resistencia de los elementos estructurales ..... - 51 -
4. Análisis de resultados ..... - 52 -
4.1. Presentación de resultados ..... - 52 -
4.1.1. Curvas de resistencia bodega ..... - 53 -
4.1.2. Curvas de resistencia oficina ..... - 54 -
4.1.3. Curvas de resistencia dormitorio ..... - 56 -
4.1.4. Comparación de curvas de resistencia de espesores calculados vs espesores tabulados ..... - 58 -
4.1.5. Cálculos vs ETABS bodega ..... - 61 -

4.1.6. Cálculos vs ETABS oficina ..... - 64 -
4.1.7. Cálculos vs ETABS dormitorio ..... - 68 -
4.2. Análisis de resultados ..... - 71 -
4.2.1. Bodega ..... - 71 -
4.2.3. Dormitorio ..... - 72 -
4.2.4. Análisis global ..... - 72 -
5. Conclusiones y recomendaciones ..... - 74 -
5.1. Conclusiones ..... - 74 -
5.2. Recomendaciones ..... - 76 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Simbología tipo de ocupación. ..... - 23 -

Tabla 2.Distribución espacial de un almacén de libros y cantidad de material almacenado. ..... - 24 -

Tabla 3. Superficie de vivienda máxima de acuerdo con número de personas que residen en la vivienda. ..... - 28 -

Tabla 4. Perfiles de vigas y columnas analizados por ocupación. ..... - 31 -

Tabla 5. Tiempo mínimo de resistencia al fuego de cada ocupación. ..... - 32 -

Tabla 6. Crecimiento del fuego por ocupación. ..... - 36 -

Tabla 7. Coeficientes de configuración. ..... - 38 -

Tabla 8. Coeficiente de función de medidas activas antiincendios. ..... - 38 -

Tabla 9. Factores para la determinación de la deformación y la rigidez del acero inoxidable a temperaturas elevadas. ..... - 48 -

Tabla 10. Cargas vivas de la norma ecuatoriana de la construcción (NEC-SE-CG) por ocupación. ..... - 52 -

Tabla 11.Capacidad vs demanda viga bodega. ..... - 62 -

Tabla 12. Capacidad vs demanda columna bodega. ..... - 63 -

Tabla 13. Capacidad vs demanda viga oficina. ..... - 65 -

Tabla 14. Capacidad vs demanda columna oficina. ..... - 66 -

Tabla 15. Capacidad vs demanda viga dormitorio. ..... - 68 -

Tabla 16. Capacidad vs demanda columna dormitorio. ..... - 69 -

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Fenómenos de transferencia de calor ..... - 15 -

Gráfico 2. Etapas del desarrollo del incendio ..... - 18 -

Gráfico 3. Propiedades térmicas de algunos materiales comunes ..... - 21 -

Gráfico 4. Modelo 3D del edificio ..... - 23 -

Gráfico 5. Distribución de los pisos ..... - 24 -

Gráfico 6. Distribución interna de la bodega ..... - 25 -

Gráfico 7. Distribución mínima de espacio de trabajo individual ..... - 26 -

Gráfico 8. Distribución interna de la zona de oficinas ..... - 26 -

Gráfico 9. Distribución interna de un despacho ..... - 27 -

Gráfico 10. Distribución interna de la zona de departamentos ..... - 29 -

Gráfico 11. Distribución interna de un dormitorio ..... - 30 -

Gráfico 12. Curva estándar tiempo-temperatura ..... - 44 -

Gráfico 13. Historial tiempo-temperatura viga de bodega ..... - 44 -

Gráfico 14. Historial tiempo-temperatura columna de bodega ..... - 45 -

Gráfico 15. Historial tiempo-temperatura viga de oficina ..... - 45 -

Gráfico 16. Historial tiempo-temperatura columna de oficina ..... - 46 -

Gráfico 17. Historial tiempo-temperatura viga de dormitorio ..... - 46 -

Gráfico 18. Historial tiempo-temperatura columna de dormitorio ..... - 47 -

Gráfico 19. Resistencia a la flexión viga de bodega ..... - 53 -

Gráfico 20. Resistencia al corte viga de bodega ..... - 53 -

Gráfico 21. Resistencia a la flexión columna de bodega ..... - 54 -

Gráfico 22. Resistencia a la compresión columna de bodega ..... - 54 -

Gráfico 23. Resistencia a la flexión viga de oficina ..... - 55 -

Gráfico 24. Resistencia al corte viga de oficina ..... - 55 -

Gráfico 25. Resistencia a la flexión columna de oficina ..... - 56 -

Gráfico 26. Resistencia a la compresión columna de oficina ..... - 56 -

Gráfico 27. Resistencia a la flexión viga de dormitorio ..... - 57 -

Gráfico 28. Resistencia al corte viga de dormitorio ..... - 57 -

Gráfico 29. Resistencia a la flexión columna de dormitorio ..... - 58 -

Gráfico 30. Resistencia a la compresión columna de dormitorio ..... - 58 -

Gráfico 31. Historial tiempo-temperatura con espesor de protección tabulado viga de bodega ..... - 59 -

Gráfico 32. Resistencia a la flexión con espesor de protección tabulado viga de bodega ..... - 59 -

Gráfico 33. Resistencia al corte con espesor de protección tabulado viga de bodega- 60 -

Gráfico 34. Historial tiempo-temperatura con espesor de protección tabulado columna de bodega ..... - 60 -

Gráfico 35. Resistencia a la flexión con espesor de protección tabulado columna de bodega ..... - 61 -

Gráfico 36. Resistencia a compresión con espesor de protección tabulado columna de bodega ..... - 61 -

Gráfico 37. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a flexión viga de bodega ..... - 62 -

Gráfico 38. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a corte viga de bodega ..... - 63 -

Gráfico 39. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a flexión columna de bodega ..... - 64 -

Gráfico 40. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a compresión columna de bodega ..... - 64 -

Gráfico 41. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a flexión viga de oficina ..... - 66 -

Gráfico 42. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a corte viga de oficina - 66 -

Gráfico 43. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a flexión columna de oficina ..... - 67 -

Gráfico 44. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a compresión columna de oficina ..... - 67 -

Gráfico 45. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a flexión viga de dormitorio ..... - 68 -

Gráfico 46. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a corte viga de dormitorio ..... - 69 -

Gráfico 47. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a flexión columna de dormitorio ..... - 70 -

Gráfico 48. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a compresión columna de dormitorio ..... - 70 -

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ley de Fourier (Conducción calorífica) ..... - 16 -

Ecuación 2. Ley de enfriamiento de Newton ..... - 16 -

Ecuación 3. Ecuación de Stefan-Boltzmann ..... - 17 -

Ecuación 4. Intensidad de energía radiante. ..... - 17 -

Ecuación 5. Curva estándar variación de temperatura en °C ..... - 33 -

Ecuación 6. Ecuación paramétrica para la temperatura en la fase de calentamiento. - 34 -

Ecuación 7. Factor de apertura del compartimento. ..... - 34 -

Ecuación 8. Factor de capacidad de paredes, piso y techo del compartimento. ..... - 35 -

Ecuación 9. Parámetro "b" para cada superficie. ..... - 35 -

Ecuación 10. Momento en el que se agota el material combustible (Fase de enfriamiento) ..... - 36 -

Ecuación 11. Densidad de carga de fuego relacionada al área total del compartimento. - 37 -

Ecuación 12. Densidad de carga de fuego relacionado al área del piso del compartimento. ..... - 37 -

Ecuación 13. Coeficiente que tienen en cuenta las medidas de protección antiincendio con las que cuenta la edificación. ..... - 38 -

Ecuación 14. Densidad de carga de fuego característica por cada unidad de área del piso ..... - 38 -

Ecuación 15. Cálculo temperatura durante enfriamiento. ..... - 39 -

Ecuación 16. Factor "k" ..... - 40 -

Ecuación 17. Valor de variación de temperatura del miembro sin protección pasiva.- 40 -

Ecuación 18. Factor de corrección para el efecto sombra.....- 41 -

Ecuación 19. Flujo de calor neto.....- 41 -

Ecuación 20. Flujo de calor neto por convección. .....- 41 -

Ecuación 21. Flujo de calor neto por radiación. .....- 42 -

Ecuación 22. Valor de variación de temperatura del miembro con protección pasiva.- 43 -

Ecuación 23. Resistencia nominal en compresión por flexión.....- 49 -

Ecuación 24.Resistencia nominal en flexión para pandeo lateral torsional de miembros de simetría doble sin arriostramiento lateral cuando Lb ≤ Lr(T) .....- 49 -

Ecuación 25. Resistencia nominal en flexión para pandeo lateral torsional de miembros de simetría doble sin arriostramiento lateral cuando Lb > Lr(T) .....- 49 -

Ecuación 26. Estimación de carga de diseño para condición de fuego.....- 51 -

Ecuación 27. Combinación de carga para acciones generadas a temperatura ambiente. .....- 52 -

Ecuación 28. Combinación de carga que considera solicitaciones adicionales generadas por la dilatación del material. .....- 52 -

1. Introducción

1.1. Justificación

Las normas establecen los criterios y requisitos mínimos para el diseño, instalación, operación y mantenimiento de un sistema, producto o servicio; y su objetivo principal es brindar seguridad, sostenibilidad y un nivel mínimo de calidad en lo que se realice.

En el caso de la ingeniería civil, las normas utilizadas contienen especificaciones técnicas que aseguran el uso, protección y seguridad de las estructuras y procesos. Pero la verdadera importancia de estas normas radica en que, al cumplir con estas, se puede evitar poner en riesgo vidas humanas y garantizar su seguridad.

La ingeniería estructural para casos de incendio es una disciplina relativamente nueva a nivel local, pero de aplicación exitosa en otros países. En este trabajo, se analizarán los criterios de aplicación del Eucocódigo, la ASIC y la ASCE (los cuales se están aplicando en la NEC) para casos de incendio que la ingeniería estructural debe contemplar en las fases de planificación y ejecución de proyectos.

La importancia de este trabajo de integración curricular radica en que debido a que actualmente en el Ecuador no existe una normativa de ingeniería estructural contra incendios, luego de analizar la literatura técnica pertinente se desarrollará un estudio de caso en que se consideren todos los aspectos técnicos involucrados en este tipo de análisis estructural. Según el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias

en el 2014 en 16 provincias del país ocurrieron 81 eventos relacionados a incendios, se reportaron 192 personas afectadas, 83 heridos y seis fallecidos, lo cual demuestra que en el país es necesaria la implementación de una normativa de ingeniería estructural contra incendios.

1.2. Planteamiento del problema

Ya que el Ecuador no cuenta con una norma que regule el diseño y la construcción de estructuras contra incendio, la actualización de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, actualmente en proceso, contemplará la aplicación de técnicas de diseño estructural para casos de carga generados por la exposición a incendios. Esta disciplina ha sido desarrollada extensamente desde los años 80 en el Reino Unido y, actualmente, ha sido adoptada en algunos países de la región, como es el caso de Colombia. En ese sentido, al ser una metodología que aún no está estructurada en nuestro país, es necesario generar casos de aplicación práctica, como el que se desarrollará en el presente trabajo, para que la NEC pueda ser utilizada de manera integral a todo nivel de desarrollo de ingeniería estructural.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Aplicar los criterios de diseño estructural en casos de incendio, de acuerdo con las consideraciones que actualmente se están implementando en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, al caso de un edificio de acero de cinco plantas, y comparar su

comportamiento estructural con el mismo edificio modelado sin consideraciones contra incendio.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estudiar la base teórica de los fenómenos de combustión y efectos del calor que se producen en casos de incendio en el diseño estructural, analizar los efectos de un incendio en elementos estructurales y su comportamiento y restricciones térmicas, así como considerar la gestión de riesgos por incendio.
- Desarrollar un caso de análisis estructural considerando riesgo de incendio para un edificio conceptual didáctico que cuenta con 5 pisos de altura, 4 metros de altura de entrepiso, columnas, vigas y riostras concéntricas, fabricado con acero ASTM A572 Gr50, sistema de piso compuesto de vigas secundarias de acero ASTM A572 Gr 50, deck de acero ASTM A653 y hormigón de 21MPa, para determinar niveles de daño y resistencia de los elementos estructurales. Generar modelos estructurales del edificio con y sin requerimientos contra incendio, y comparar el comportamiento de sus elementos más críticos.
- Analizar y presentar los resultados relacionados con el análisis estructural considerando riesgo de incendio.

1.4. Alcance

Este trabajo de integración curricular establecerá los criterios y un proceso guía para la aplicación de la Ingeniería Estructural para casos de incendio acorde con los lineamientos en desarrollo de la nueva Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC).

Para el análisis de dichos criterios se hará uso de las ecuaciones definidas en distintos códigos de construcción, las cuales se aplicarán a un edificio modelo de acero, asignándole diferentes ocupaciones (bodega, oficina y habitación de departamento). A cada ocupación se la analizará de manera individual.

Además, se realizará un análisis comparativo en los elementos más críticos de la estructura modelo sin considerar los parámetros estructurales contra incendio frente a la misma estructura, pero sí teniendo en cuenta dichos parámetros; ambas sometidas a la misma carga de incendio. Estos análisis se realizarán usando ETABS.

La información y modelo serán de carácter secundario, proporcionados por el equipo que, al momento, se encuentra encargado de desarrollar e incorporar el capítulo correspondiente a ingeniería estructural contra incendios en la nueva versión de la norma ecuatoriana de la construcción (NEC).

2. Fundamentación teórica

2.1. Conceptos sobre incendios

2.1.1. Fenómenos de combustión

Los sólidos requieren altas energías para descomponerse químicamente a su forma gaseosa. Esta es la razón por la que se queman a temperaturas tan elevadas (normalmente alrededor de 400°C).

En termodinámica, el calor se define como el movimiento de energía térmica a través de un sistema. La velocidad con la que se da este movimiento se la conoce como “velocidad de transferencia de calor”, la cual es un indicador de la cantidad de energía que emite el

elemento que se está combustionando; se mide en unidades de potencia y se la denota con la letra *q.* Por otro lado, el flujo de calor corresponde a la cantidad de energía que aquel elemento imprime en la superficie de otro elemento, que se convierte en el receptor, y se lo representa con la letra q''. (Diller, 1993)

La velocidad de transferencia de calor es el factor más importante para estimar el comportamiento de un incendio, ya que las temperaturas que se alcancen dependerán totalmente de aquella. (Drysdale, 2011) Si la velocidad de transferencia es baja, las pérdidas serán considerables y, consecuentemente, el incendio será menor.

2.1.2. Transferencia de calor

Existen tres mecanismos básicos de transferencia de calor, los cuales se pueden dar simultáneamente durante el desarrollo del incendio: la conducción, la convección y la radiación. Cada uno depende de diferentes parámetros asociados a los elementos encendidos y al entorno que los rodea.



Gráfico 1. Fenómenos de transferencia de calor

Fuente: (Guamanaquispe, 2022)

- Conducción: la transferencia se da entre sólidos, fluyendo el calor a través de la materia desde la región con temperatura elevada a la región con temperatura

baja. Este proceso, que depende del material que se está incendiando, está dado por la Ley de Fourier de conducción calorífica:

$$\dot{q}''_x = -k\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Ecuación 1. Ley de Fourier (Conducción calorífica)

donde ΔT y Δx son la diferencia de temperatura y la distancia entre los puntos de estudio, respectivamente; y k es una constante que depende del material, conocida como constante de conductividad térmica, la cual está en unidades de potencia sobre temperatura por longitud. (Drysdale, 2011)

- Convección: la convección es la transferencia de calor que se da por el movimiento de un fluido. Depende de la velocidad de dicho movimiento, el cual puede ser natural o artificial. El fenómeno está dado por la Ley de Enfriamiento de Newton:

$$\dot{q}'' = h\Delta T$$

Ecuación 2. Ley de enfriamiento de Newton

h se conoce como el coeficiente de transferencia convectiva, dado en unidades de potencia sobre área por temperatura, y que depende netamente del fluido mediante el cual se transmite el calor. (Inzunza, 2013)

- Radiación: la transmisión de calor se da por las ondas electromagnéticas emitidas por el elemento encendido. Unas características de la radiación son que genera luz visible, y que no necesita un medio que intervenga entre la fuente de calor y el receptor. La energía total emitida está dada por la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$E = \varepsilon\sigma T^4$$

Ecuación 3. Ecuación de Stefan-Boltzmann

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, medida en unidades de potencia sobre área por temperatura a la cuarta; y ε es una medida de la eficiencia de la superficie como un radiador, conocida como emisividad.

La energía, multiplicada por un factor de configuración φ, el cual tiene en cuenta la relación geométrica entre el emisor y el receptor, da como resultado la intensidad de energía radiante que recibe este último:

$$\dot{q}'' = \varphi\varepsilon\sigma T^4$$

Ecuación 4. Intensidad de energía radiante.

El valor de φ depende de la distancia entre los elementos y la relación de aspecto del elemento emisor.

Gracias a la cuarta potencia de la ecuación, el fenómeno de radiación es el que más calor transmite durante la combustión. (Drysdale, 2011)

2.1.3. Desarrollo del incendio

Un incendio puede ser dividido en tres partes:

- El período de crecimiento, cuando la temperatura media del compartimento es baja, excepto en el área localizada donde se encuentra el fuego.
- El pico de desarrollo o desarrollo completo, cuando el fuego alcanza su máximo en volumen, consumiendo todos los elementos combustibles del compartimento.
- El período de decaimiento, cuando el fuego empieza perder combustible gradualmente. La temperatura cae al 80% del valor que alcanzó en la anterior etapa. (Drysdale, 2011)

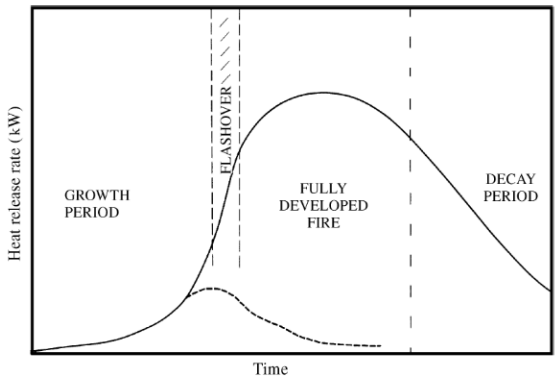


Gráfico 2. Etapas del desarrollo del incendio

Fuente: (Drysdale, 2011)

El evento más importante en un incendio es el flashover, el cual da paso al desarrollo completo del fuego. Cuando ocurre, todos los elementos que no estaban participando originalmente en el incendio empiezan a combustionar espontánea y simultáneamente.

Para que tenga lugar el flashover, debe existir suficiente oxígeno en la fase de crecimiento para mantener el proceso de combustión. Mientras se quema el combustible, se acumula una capa de humo extremadamente caliente en el techo del compartimento que comienza a intercambiar calor con el fuego, generando una cantidad de radiación que puede alcanzar hasta los 170 kW/m^2. Esto calienta todos los objetos de la habitación, los cuales empiezan a combustionar súbitamente. Una vez que se alcanza el período de desarrollo completo del incendio, la energía que libera el combustible es tan elevada que el suministro de aire es incapaz de consumir todos los gases, y los niveles de calor comienzan a descender. (Cortés, Gil, Azorín, Vandecasteele, & Verstockt, 2020)

2.2. Ingeniería estructural para casos de incendio

La presencia del fuego es la causa de miles de muertes y miles de dólares en pérdidas de propiedad cada año. Estas pérdidas podrían eliminarse mediante la prevención de los incendios. Para reducir la probabilidad de ocurrencia hay diversas posibilidades, pero es imposible prevenir absolutamente todos los incendios.

Es importante tener en cuenta la seguridad contra incendios dentro del diseño, la construcción y posterior uso de una estructura. Los objetivos del diseño contra incendios son proporcionar un entorno con una probabilidad aceptablemente baja de pérdida de vidas o de bienes. Este diseño se basa en el análisis de escenarios.

Los objetivos de seguridad contra incendios suelen cumplirse con una combinación de sistemas de protección contra incendios activos y pasivos. Un sistema activo limita el desarrollo del fuego y sus efectos mediante alguna acción realizada por una persona o un dispositivo automático. Por otro lado, un sistema pasivo controla el fuego o sus efectos mediante sistemas incorporados a la estructura o al tejido del edificio, y no requieren un funcionamiento específico en el momento del incendio. (Buchanan & K. Abu, 2017)

Actualmente, en el Ecuador, la ingeniería estructural anti-incendios consiste en la estimación de espesores de recubrimientos de materiales que aislan a los elementos estructurales del fuego mediante el uso de tablas estandarizadas.

2.2.1. La influencia de la temperatura en el acero

La resistencia al fuego se da diseñando a la estructura para condiciones de temperatura ambiente y luego envolviendo los elementos estructurales individuales en aislamiento protector en el caso de construcciones en acero, o en material de sacrificio para

construcciones realizadas con hormigón o madera. Esto con el objetivo de limitar las temperaturas en el interior de los componentes estructurales, de modo que la sección transversal fría sea suficiente para proporcionar la resistencia estructural requerida en condiciones de incendio. (Buchanan & K. Abu, 2017)

2.2.2. Los efectos de las restricciones térmicas sobre el comportamiento estructural

Al hablar de restricciones térmicas se deben tener en cuenta algunas propiedades determinantes como la conductividad térmica y el calor específico del material. En el caso de un material que presente un calor específico alto y baja conductividad térmica, se tendrá como consecuencia una alta elevación de tempera local, que a su vez ocasionará altos gradientes térmicos. De igual froma, se pueden presentar gradientes térmicos por variaciones de temperatura en distintos puntos del cuerpo o por la unión de materiales con diferente coeficiente de expansión térmica.

Cuando un material inicialmente frío se somete a altas temperaturas rápidamente no podrá expandirse, ocasionando esfuerzos de compresión debido a la resistencia que genere el material hacia su interior. Si es un material frágil se formarán fisuras de falla a 45 grados, mientras que en el caso de un material dúctil existirá fluencia. (Rimoldi, Cordisco & Mundo, 2020)

2.2.3. Materiales aislantes

Un control de fuego pasivo debe comenzar con la selección de materiales con resistencia al fuego que sean adecuados para la construcción y revestimientos interiores que no

favorezcan a la propagación de las llamas o a la producción de humo. A estos materiales, se los conoce como materiales aislantes: son materiales que presentan una resistencia considerable al someterlos a una fuente de calor. Su objetivo principal es proporcionar resistencia al fuego, contenerlo y evitar el colapso de la estructura (Drysdale, 2011)

A continuación, se detallan propiedades térmicas de algunos materiales comunes:

Table 2.1 Thermal properties of some common materials[a]

Material	k (W/m·K)	c_p (J/kg·K)	ρ (kg/m^3)	α (m^2/s)	$k\rho c_p$ (W^2·s/m^{4}K^2)
Copper	387	380	8940	1.14×10^{-4}	1.3×10^{9}
Steel (mild)	45.8	460	7850	1.26×10^{-5}	1.6×10^{8}
Brick (common)	0.69	840	1600	5.2×10^{-7}	9.3×10^{5}
Concrete	0.8–1.4	880	1900–2300	5.7×10^{-7}	2×10^{6}
Glass (plate)	0.76	840	2700	3.3×10^{-7}	1.7×10^{6}
Gypsum plaster	0.48	840	1440	4.1×10^{-7}	5.8×10^{5}
PMMA[b]	0.19	1420	1190	1.1×10^{-7}	3.2×10^{5}
Oak[c]	0.17	2380	800	8.9×10^{-8}	3.2×10^{5}
Yellow pine[c]	0.14	2850	640	8.3×10^{-8}	2.5×10^{5}
Asbestos	0.15	1050	577	2.5×10^{-7}	9.1×10^{4}
Fibre insulating board	0.041	2090	229	8.6×10^{-8}	2.0×10^{4}
Polyurethane foam[d]	0.034	1400	20	1.2×10^{-6}	9.5×10^{2}
Air	0.026	1040	1.1	2.2×10^{-5}	–

[a]From Pitts and Sissom (1977) and others. Most values for 0 or 20°C. Figures have been rounded off. Other compendia of data are to be found in most heat transfer texts (e.g., Incropera *et al*., 2007; Welty *et al*., 2008).
[b]Polymethylmethacrylate. Values of k, c_p and ρ for other plastics are given in Table 1.2.
[c]Properties measured perpendicular to the grain.
[d]Typical values only.

Gráfico 3. Propiedades térmicas de algunos materiales comunes

Fuente: (Drysdale, 2011)

2.3. Análisis de riesgos de incendios.

2.3.1. Concepto de riesgo.

El riesgo es la probabilidad de que una amenaza se convierta en un peligro o evento desastroso. Para que una amenaza llegue a representar un peligro, el elemento en riesgo debe ser vulnerable.

Al tener consciencia de nuestras vulnerabilidades frente a las amenazas que nos rodean, se pueden tomar medidas para prevenir los posibles riesgos. No se pueden impedir los fenómenos naturales que ocurren; pero sí se puede reducir los daños que causan.

Un riesgo de incendio se define como el peligro relativo de que un incendio se pueda iniciar y expandir. Es por esto, que la seguridad contra incendios es primordial en el diseño de un edificio, a pesar de que la probabilidad de que se produzca un incendio grave en cualquier edificio es baja, las posibles consecuencias son enormes. La seguridad contra incendios busca proporcionar un entorno con una probabilidad aceptablemente baja de pérdida de vidas o de bienes. (Buchanan; Abu, 2017)

2.3.2. Concepto de consecuencia.

Las consecuencias de un incendio se definen dependiendo del período de exposición al incendio estándar de prueba, pero no se pueden estimar exactamente debido a las características variables de los incendios reales. El concepto de consecuencia está atado a la legislación local y a la filosofía de diseño.

El daño de una estructura depende casi totalmente de la cantidad de calor que esta absorba durante el incendio, por lo que la severidad de un fuego es proporcional a las temperaturas alcanzadas y a su duración. (Buchanan & Kwabena Abu, 2017)

3. Desarrollo del caso de análisis estructural considerando riesgo de incendio

3.1. El edificio base

3.1.1. Presentación del edificio base

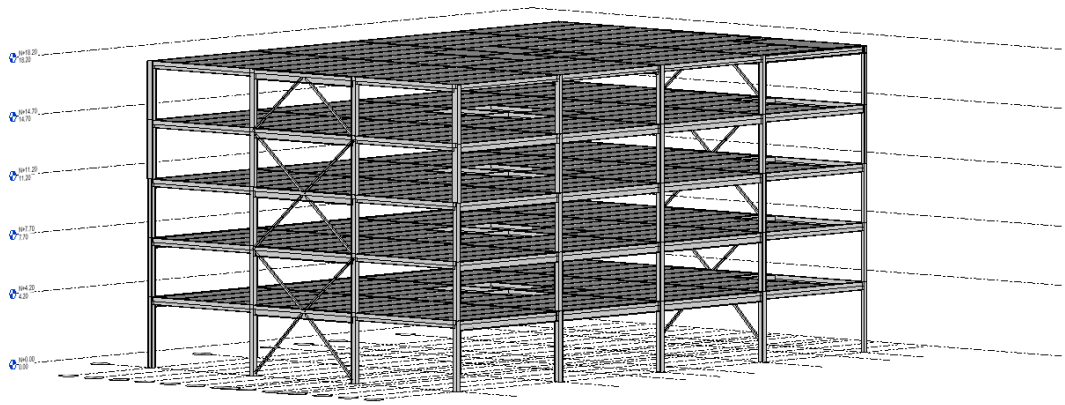


Gráfico 4. Modelo 3D del edificio

La distribución de las diferentes ocupaciones del edificio en cuestión es la siguiente, la que será igual para todos los pisos desde el segundo hasta el quinto piso, el primer piso será considerado como un lobby:

Tipo de ocupación	Simbología
Bodega	
Vivienda (Departamentos)	
Oficina	

Tabla 1. Simbología tipo de ocupación.

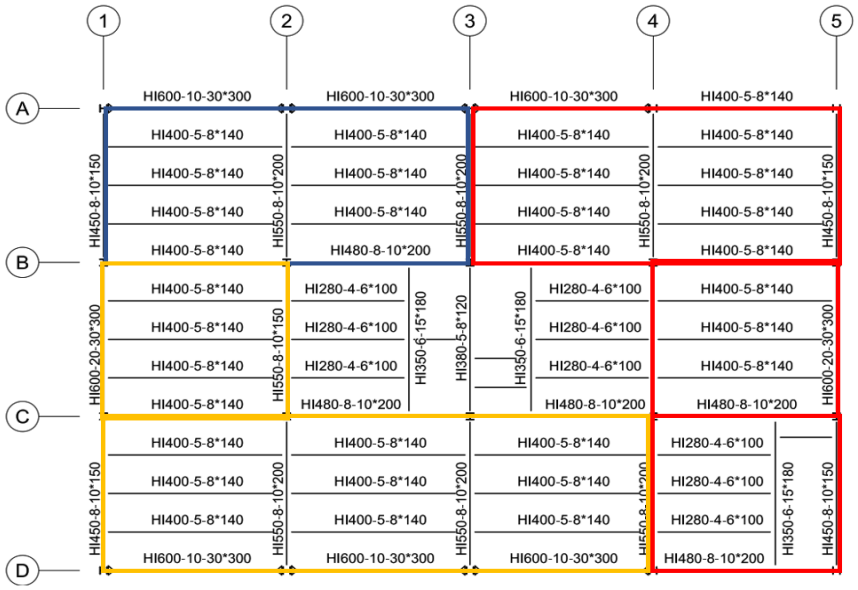


Gráfico 5. Distribución de los pisos

- **Bodega de libros/archivos**

Según Ernst Neufert (2013), la distribución espacial de un almacén de libros y la cantidad de material almacenado puede estimarse usando la siguiente tabla:

	Separación entre ejes de estanterías dobles [m]	Volúmenes por 1 m de estante	N° de estantes superpuestos	Vols. Por 1 metro de estantería doble	Sup. necesaria para 1000 vols. [m^2]	Vols. Por 1 m^2
Almacén no accesible para los usuarios	1.35	30	6	360	4.5	222.2
		30	6.5	390	4.15	240.9
		25	6.5	325	4.98	200.8
		30	7	420	3.85	259.7
		25	6	300	5.4	185.1

Tabla 2.Distribución espacial de un almacén de libros y cantidad de material almacenado.

Fuente: (Neufert, 2013)

De igual forma, Neufert recomienda para el cálculo del espacio una estantería estándar de 30 cm de ancho (60 cm de estantería doble). Esto da como resultado, con una separación de 1.35 m entre ejes, un pasillo de 75 cm de ancho entre las estanterías.

También se debe tener en cuenta el paso perimetral, que debe ser de 1.2 metros de ancho.

Suponiendo dos bloques del edificio definidos anteriormente para el uso como bodega, se tendría que el área total de la bodega es de 18x8.1 metros (145.8 m^2).

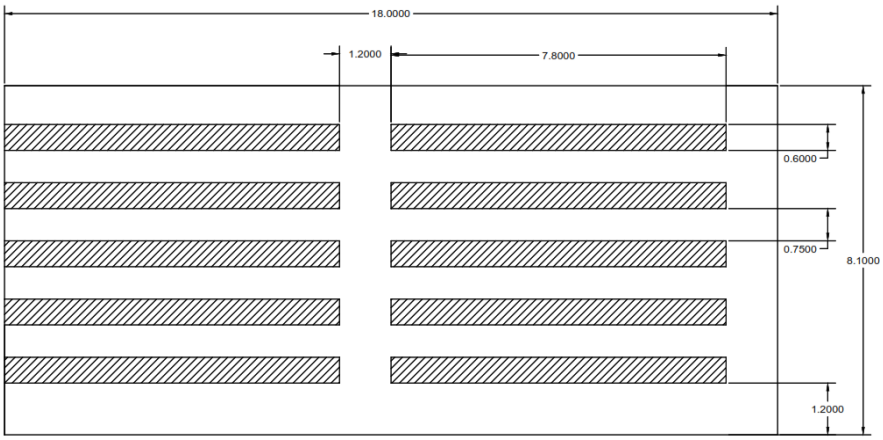


Gráfico 6. Distribución interna de la bodega

Donde las áreas sombreadas representan las repisas dobles. Cada repisa cuenta con 7 estantes superpuestos, por lo que en 1 metro de estantería hay 420 libros. Teniendo en cuenta la tabla, se estima que la bodega cuenta con, aproximadamente, 6778.17 volúmenes.

De igual forma, se puede estimar el volumen de libros teniendo en cuenta que la estantería estándar de bodega de Neufert mide 225 cm de alto con 5 repisas y 30 cm de ancho. Así, el volumen de libros por repisa de 7.8 m de largo sería:

$$(7.8 * 2.25 * 0.3) = 5.265\ m^3$$

Dado que el compartimento planteado cuenta con 10 repisas dobles, el volumen total de libros sería de: $5.265 * 10 * 2 = 105.3\ m^3$

La densidad del papel es de, aproximadamente, 120 kg/m^3, por lo que la masa total de papel en la bodega es de: $105.3 * 120 = 12636\ kg$

- **Oficinas**

Neufert establece la distribución mínima para una zona de trabajo individual:

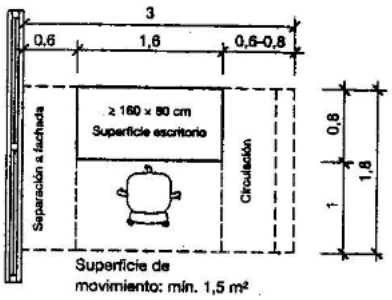


Gráfico 7. Distribución mínima de espacio de trabajo individual

(Neufert, 2013)

Para la distribución de la zona destinada a oficinas, se consideraron 10 despachos, espacios de trabajo individual, cada uno con 8.55 m^2, 2 salas de reuniones de 22 m^2 y 28m^2 aproximadamente, una zona de baños, y una cafetería y zona comunal.

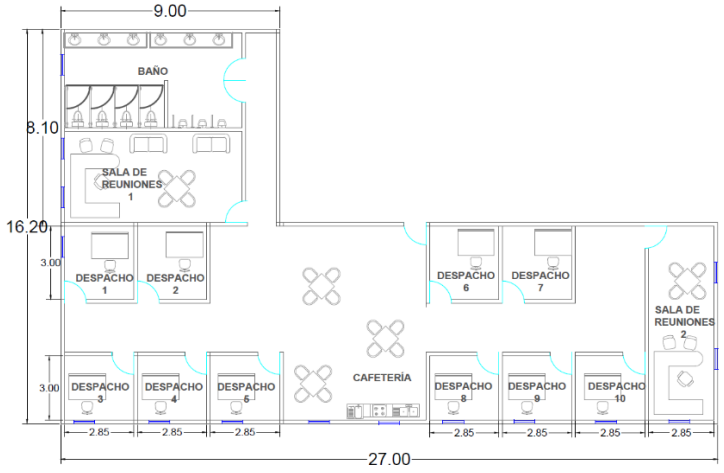


Gráfico 8. Distribución interna de la zona de oficinas

En el caso de las oficinas se analizará el despacho 3, cabe recalcar que todos los despachos cuentan con la misma distribución y área de ocupación, a excepción del despacho 6 y 7 que no cuentan con ventanas. Para los demás despachos las dimensiones de las ventanas a utilizar fueron de 0.75mx1.00m.

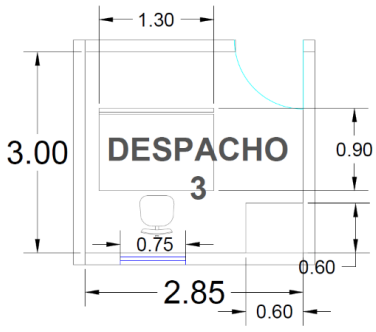


Gráfico 9. Distribución interna de un despacho

Dado que el compartimento planteado cuenta con un escritorio y una estantería, el volumen total de madera dentro de este sería:

Escritorio:

$$V = 1.30 * 0.90 * 0.75 - 1.1 * 0.8 * 0.6 = 0.35\, m^3$$

Estantería:

$$V = 0.6 * 0.6 * 0.02 * 5 + 0.6 * 1 * 0.02 * 2 = 0.06\, m^3$$

Volumen total:

$$V_T = 0.41\, m^3$$

La densidad de la madera es de, aproximadamente 500 kg/m^3, por lo que la masa total de madera en el compartimento es de:

$$m = 500\, \frac{kg}{m^3} * 0.41\, m^3 = 205\, kg$$

- **Departamentos**

Neufert establece una superficie de vivienda máxima de acuerdo con el número de personas que residan dentro de esta:

Número de miembros de la familia	Superficie de vivienda máxima	
1 persona	50 m²	Para cada miembro añadido al grupo familiar puede sobrepasarse la superficie en máximo 10 m²
2 personas	60 m²	
3 personas	75 m²	
4 personas	85 m²	

Tabla 3. Superficie de vivienda máxima de acuerdo con número de personas que residen en la vivienda.

Fuente: (Neufert, 2013)

Para la distribución de los departamentos dentro del edificio modelo, se consideró un promedio aproximado de 3 personas por familia para el diseño de dos departamentos cada una de 74 m^2 aproximadamente, y un tercer departamento para 4 miembros, que cuenta con aproximadamente 84 m^2.

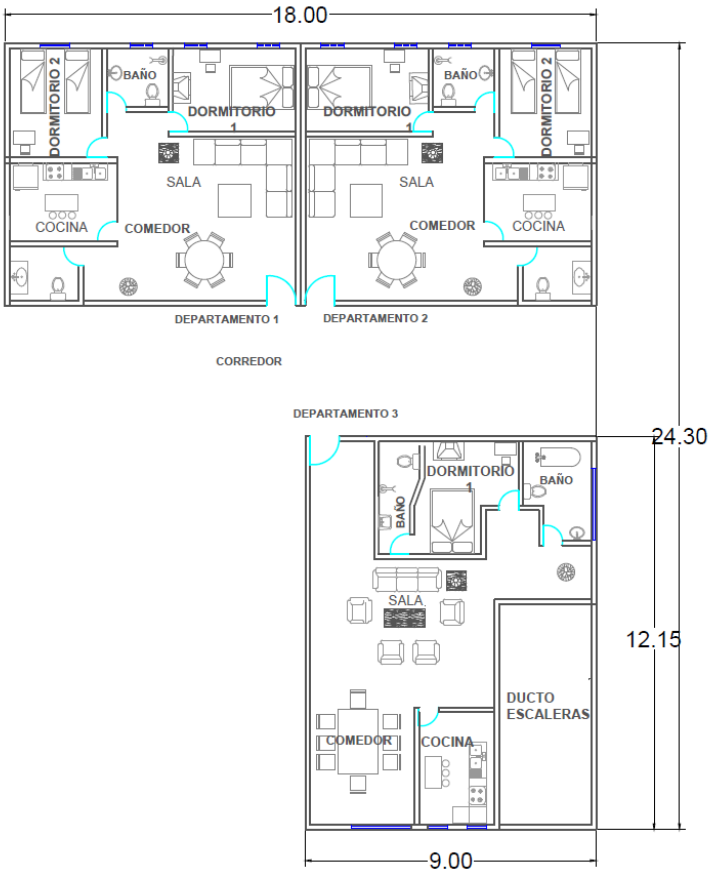


Gráfico 10. Distribución interna de la zona de departamentos

Para el presente trabajo solo se analizará el dormitorio 1, perteneciente al departamento 1.

Teniendo en cuenta lo establecido en el libro Neufert acerca de los elementos principales que debe tener un dormitorio, el tamaño promedio de un dormitorio individual debería ser de aproximadamente 9 m^2 a 11 m^2. Para este caso se consideraron 11 m^2 por cada dormitorio individual, dentro del dormitorio se encuentran ubicados una cama doble, un escritorio y un armario, todos estos elementos cumplen con las dimensiones usuales que deben tener. Para las ventanas las dimensiones a utilizar fueron de 0.75mx1.00m.

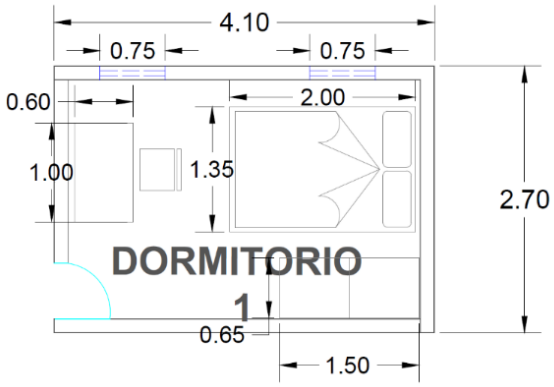


Gráfico 11. Distribución interna de un dormitorio

Dado que el compartimento planteado cuenta con una cama doble, un escritorio y un armario, el volumen total de madera dentro del dormitorio sería de:

Cama doble:

$$V = 1.35 * 2.00 * 0.65 - 1.29 * 1.94 * 0.59 = 0.28\, m^3$$

Escritorio:

$$V = 1 * 0.90 * 0.6 - 0.94 * 0.84 * 0.54 = 0.11\, m^3$$

Armario:

$$V = 1.50 * 0.65 * 3.50 - 1.44 * 0.59 * 3.3 = 0.61\, m^3$$

Volumen total:

$$V_T = 1\, m^3$$

La densidad de la madera es de, aproximadamente 500 kg/m^3 , por lo que la masa total de madera en el dormitorio es de:

$$m = 1\, m^3 * 500 \frac{kg}{m^3} = 500\, kg$$

3.1.2. Características del sistema estructural

La estructura en cuestión es un edifico de 5 pisos, con una altura de entrepiso de 4.20m en el primer nivel, y de 3.50m en los pisos restantes. Está fabricada con acero ASTM A527 grado 50, y se encuentra conformada por pórticos especiales resistentes a momento (SMF) en los ejes A (A-12, A-23, A-34) y D (D-12, D-23, D-34). Además, existen pórticos especiales con arriostramientos concéntricos (SCBF) en los ejes 1 (BC-1) y 5 (BC-5).

Se utilizaron perfiles HI para las columnas, vigas y vigas secundarias de la estructura. En el caso de los arriostramientos, se utilizaron perfiles TC, sistema de piso compuesto de vigas secundarias de acero ASTM A572 Gr 50, deck de acero ASTM A653 y hormigón de 21 MPa.

Para el presente trabajo se analizaron una viga y una columna para cada una de las tres ocupaciones, las cuales se detallan a continuación:

Ocupación	Viga	Columna
Bodega	HI550-8-10-200	HI340-12-30-340
Oficina	HI480-8-10-200	HI340-12-25-340
Dormitorio	HI480-8-10-200	HI340-12-25-340

Tabla 4. Perfiles de vigas y columnas analizados por ocupación.

3.1.3. Requerimientos de resistencia

La resistencia necesaria, denominada Resistencia Estándar en el dominio del tiempo, se determina en minutos y depende de la ocupación e importancia de la estructura y de los

materiales que se encuentren dentro de esta. Para que un elemento estructural sea lo suficientemente resistente durante el incendio, su pérdida de propiedades ante el calor no debe significar una caída de resistencia suficiente para ser menor a la requerida para soportar las cargas de diseño.

Las demandas a las que están sometidos los miembros estructurales durante el incendio son considerablemente menores a las que se usan en el diseño global, ya que otras condiciones accidentales como los sismos o huracanes cargan más a la estructura de lo que lo hace el fuego.

Para el presente trabajo, las resistencias requeridas de los miembros son las siguientes, determinadas según el tiempo que soporta un elemento en un ensayo estándar en un régimen de calentamiento según la norma ASTM E119.

Ocupación	Tiempo mínimo de resistencia al fuego [min]
Bodega	90
Oficina	60
Departamento	90

Tabla 5. Tiempo mínimo de resistencia al fuego de cada ocupación.

Dado que las tres ocupaciones están en el mismo edificio, el tiempo de resistencia de diseño de la estructura es de 60 minutos.

3.2. Determinación de riesgos de incendio en la estructura

La estructura cuenta con ocupaciones destinadas a oficinas, bodega y departamentos. En cuanto al peligro de activación de fuego, de acuerdo con los factores de configuración del Eurocódigo (Tabla E.4, EN 1991-1-2, Anexo E), la ocupación que cuenta con mayor peligro de activación de fuego es la bodega, ya que es el compartimento que cuenta con

un área de piso mayor (145.8 m^2), en comparación a los 8.55 m^2 de oficina y los 11m^2 de dormitorio. Además, al ser una bodega de papel, es la ocupación que cuenta con la mayor cantidad de combustible.

En cuanto al crecimiento del fuego, en base al Anexo E del Eurocódigo 1991-1-2, la ocupación que cuenta con un crecimiento rápido es la bodega, mientras que, la oficina y dormitorio cuentan con un crecimiento medio.

Se concluye que la bodega es la ocupación con mayor riesgo de incendio, seguida del dormitorio, y en último lugar la oficina.

3.3. Generación de curvas de incendio

3.3.1. Curvas tiempo-temperatura

Las curvas tiempo-temperatura representan la evolución de la masa de aire interna de la estructura en función del tiempo.

3.3.2. Curva estándar según UNE EN 1991-1-2

La curva estándar es una curva nominal, ya que no representa un fuego real. Se usa para cualquier compartimento independientemente de su contenido. La variación de temperatura, en °C, está dada por la siguiente ecuación:

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

Ecuación 5. Curva estándar variación de temperatura en °C

3.3.2.1. Curva paramétrica según UNE EN 1991-1-2

La curva paramétrica de temperatura es una aproximación más real a un incendio en una estructura, ya que considera el enfriamiento que sufre el fuego cuando se consume todo el combustible del recinto. Esta curva es aplicable a compartimentos con áreas de planta menores a 500 m^2 sin aperturas en el techo y una altura de entrepiso menor a 4 m.

3.3.2.1.1. Fase de calentamiento

La temperatura en la fase de calentamiento del aire ocurre mientras aún exista combustible en el recinto. La ecuación paramétrica para su cálculo es:

$$\theta_g = 20 + 1325\left(1 - 0{,}324 * e^{-0{,}2t^*} - 0{,}204 * e^{-1{,}7t^*} - 0{,}472 * e^{-19t^*}\right)$$

Ecuación 6. Ecuación paramétrica para la temperatura en la fase de calentamiento.

Siendo:

$$t^* = t * \tau\ [h] \qquad \tau = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0{,}04}{1160}\right)^2}$$

Donde:

O corresponde al factor de apertura del compartimento, el cual incrementa mientras más ventilación exista. Sus límites son 0,02 ≤ O ≤ 0,2 $[m^{-1}]$.

$$O = \frac{A_v\sqrt{h_{eq}}}{A_t}$$

Ecuación 7. Factor de apertura del compartimento.

Av es el área de las ventanas. $[m^2]$

At es el área total del compartimento. $[m^2]$

h_{eq} es el promedio de altura de las ventanas en todas las paredes. $[m]$

b es un factor que tiene en cuenta la capacidad que tienen las paredes, piso y techo del compartimento para absorber energía del incendio. Cuando los materiales de las superficies son diferentes, se debe establecer *b* con la siguiente ecuación:

$$b = \frac{\sum(b_j * A_j)}{A_t - A_v}$$

Ecuación 8. Factor de capacidad de paredes, piso y techo del compartimento.

Donde:

At es el área total del compartimento.

Av es el área de las ventanas.

Aj es el área de la superficie que ocupa cada material.

bj es el parámetro b para cada superficie, el cual debe estar entre 100 ≤ b ≤ 2200 $\left[\frac{J}{m^2 s^{\frac{1}{2}} K}\right]$.

$$b_j = \sqrt{\rho * c * \lambda}$$

Ecuación 9. Parámetro "b" para cada superficie.

ρ representa la densidad del material.

c representa el calor específico del material.

λ representa la conductividad térmica del material.

3.3.2.1.2. Fase de enfriamiento

La fase de enfriamiento comienza en el momento en que se agota el material combustible del recinto, conocido como t_{max}. En ese momento, la temperatura alcanza

su pico θ_{max} y luego decae progresivamente. El valor de θ_{max} se obtiene cuando $t^* = {t^*}_{max}$.

Existen dos posibles escenarios en el enfriamiento: fuego controlado por ventilación y fuego controlado por combustión, teniendo cada uno un procedimiento de cálculo diferente. Para determinar el agente de control, se debe establecer t_{max} con la siguiente ecuación:

$$t_{max} = \max\left[\frac{0.2 * 10^{-3} * q_{t,d}}{O};\ t_{lim}\right]\ [h]$$

Ecuación 10. Momento en el que se agota el material combustible (Fase de enfriamiento).

Si $\frac{0.2*10^{-3}*q_{t,d}}{O} \geq t_{lim}$, el fuego es controlado por ventilación. Caso contrario, el fuego es controlado por combustible.

t_{lim} puede ser 25 min, 20 min o 15 min; dependiendo de si el fuego crece lenta, media o rápidamente. Esto depende de la cantidad de combustible que se tenga en el compartimento.

Puede usarse esta tabla de referencia (Tabla E.4, EN 1991-1-2, Anexo E):

Ocupación	**Crecimiento del fuego**
Vivienda	Medio
Hospital (habitación)	Medio
Hotel (habitación)	Medio
Librería	Rápido
Oficina	Medio
Aula	Medio
Centro comercial	Rápido
Sala de cine	Rápido
Estación de transporte	Lento

Tabla 6. Crecimiento del fuego por ocupación.

Fuente: Tabla E.4, EN 1991-1-2, Anexo E. (2013)

$q_{t,d}$ es el valor de la densidad de carga de fuego relacionado al área total del compartimento.

$$q_{t,d} = q_{f,d} * \frac{A_f}{A_t} \left[\frac{MJ}{m^2}\right]$$

Ecuación 11. Densidad de carga de fuego relacionada al área total del compartimento.

$$50 \leq q_{t,d} \leq 1000 \left[\frac{MJ}{m^2}\right]$$

Donde:

A_f es el área del piso. $[m^2]$

$q_{f,d}$ es el valor de la densidad de carga de fuego relacionado al área del piso del compartimento.

$$q_{f,d} = q_{f,k} * m * \delta_{q1} * \delta_{q2} * \delta_{qn} \left[\frac{MJ}{m^2}\right]$$

Ecuación 12. Densidad de carga de fuego relacionado al área del piso del compartimento.

m es el factor de combustión. Puede tomarse igual a 0.8.

δ_{q1} y δ_{q2} son coeficientes de configuración que tienen en cuenta el área total y el tipo de ocupación del recinto, respectivamente. Se toman de la siguiente tabla (Tabla E.1, EN 1991-1-2, Anexo E):

Área del piso del compartimento [m^2]	**Peligro de activación del fuego δq1**
25	1.10

Ejemplos de ocupación	**Peligro de activación del fuego δq2**
Museo, galería, piscina	0.78

250	1.50	Oficina, residencia, hotel, industria papelera	1.00
2500	1.90	Fábrica de maquinaria	1.22
5000	2.00	Laboratorio químico, tienda de pintura	1.44
10000	2.13	Fábrica de pintura o fuegos artificiales	1.66

Tabla 7. Coeficientes de configuración.

Fuente: Tabla E.1, EN 1991-1-2, Anexo E. (2002)

δ_{qn} es un coeficiente que tiene en cuenta las medidas de protección antincendio con las que cuenta la edificación.

$$\delta_{qn} = \prod_{i=1}^{10} \delta_{qni}$$

Ecuación 13. Coeficiente que tienen en cuenta las medidas de protección antiincendio con las que cuenta la edificación.

δ_{qni} se toma de la tabla (Tabla E.2, EN 1991-1-2, Anexo E):

Función de medidas activas antiincendios (δni)																
Supresión automática del fuego				Detección automática del fuego			Supresión manual del fuego									
Sistema de extinción de agua	Suministro independiente de agua			Detector de fuego automático y alarma		Detector de fuego y alerta automática a bomberos	Equipo propio de bomberos	Equipo de bomberos ajeno	Rutas seguras de acceso			Dispositivo de extinción de incendio		Sistema de escape de humo	
δn1	0	1	2	Por calor	Por humo	δn5	δn6	δn7	δn8			δn9		δn10	
	δn2			δn3	δn4										
0.61	1.0	0.87	0.7	0.87 o 0.73		0.87	0.61 o 0.78		0.9	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5

Tabla 8. Coeficiente de función de medidas activas antiincendios.

Fuente: Tabla E.2, Eurocódigo 1991-1-2, Anexo E. (2002)

$q_{f,k}$ es la densidad de carga de fuego característica por cada unidad de área del piso.

$$q_{f,k} = \frac{\sum M_{k,i} * H_{u,i} * \Psi_{fi,k,i}}{A_f} \quad \left[\frac{MJ}{m^2}\right]$$

Ecuación 14. Densidad de carga de fuego característica por cada unidad de área del piso.

Donde:

$M_{k,i}$ es la cantidad de combustible, en kg.

$H_{u,i}$ es el valor calorífico neto del material, en [MJ/kg].

$\Psi_{fi,k,i}$ es el factor por protección de cargas de incendio. Puede tomarse igual a 1.

- **Cálculo de θ_g:**

Las ecuaciones para calcular la temperatura durante el enfriamiento son:

$\theta_g = \theta_{max} - 625\ (t^* - t^*_{max} * x)$ cuando $t^*_{max} \leq 0.5$

$\theta_g = \theta_{max} - 250\ (3 - t^*_{max})\ (t^* - t^*_{max} * x)$ cuando $0.5 < t^*_{max} < 2$

$\theta_g = \theta_{max} - 250\ (t^* - t^*_{max} * x)$ cuando $t^*_{max} \geq 2$

Ecuación 15. Cálculo temperatura durante enfriamiento.

El valor de *x* depende del tipo de control bajo el que se encuentre el fuego.

3.3.2.1.2.1. Fuego controlado por ventilación

Los valores de t^*_{max} y de t^* son:

$$t^*_{max} = t_{max} * \tau \ \ [h]$$

$$t^* = t * \tau \ \ [h]$$

Y el valor de *x* para las ecuaciones de θ_g es igual a 1.

3.3.2.1.2.2. Fuego controlado por combustible

Los valores de t^*_{max} y de t^* son:

$$t^*_{max} = t_{max} * \tau \ \ [h]$$

$$t^* = t * \tau_{lim} \ \ [h]$$

Donde:

$$\tau_{lim} = \left(\frac{\frac{O_{lim}}{0.04}}{\frac{b}{1160}} \right)^2 \qquad O_{lim} = \frac{0.1 * 10^{-3} * q_{t,d}}{t_{lim}}$$

Si $O > 0.04$ y $q_{t,d} < 75$ y $b < 1160$, τ_{lim} debe ser multiplicado por un factor *k,* dado por:

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

Ecuación 16. Factor "k"

El valor de *x* para las ecuaciones de θ_g es igual a $\frac{t_{lim} * \tau}{t^*_{max}}$.

3.3.3. Curvas de temperatura del miembro

La temperatura del miembro θ_m en el tiempo t_i se calcula sumando la temperatura del miembro en el tiempo t_{i-1} más la variación de la temperatura entre t_i y t_{i-1}. Esta variación se conoce como $\Delta\theta_m$.

La ecuación para el cálculo de $\Delta\theta_m$ depende de si el miembro cuenta o no con protección pasiva.

3.3.3.1. Miembro sin protección pasiva

El valor de $\Delta\theta_m$ se calcula con la siguiente ecuación, en intervalos de tiempo no mayores a 5 segundos:

$$\Delta\theta_m = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{neto} \Delta t$$

Ecuación 17. Valor de variación de temperatura del miembro sin protección pasiva.

Donde:

k_{sh} es el factor de corrección para el efecto sombra. Para secciones tipo I es igual a:

$$k_{sh} = 0.9\frac{(A_m/V)_b}{A_m/V}$$

Ecuación 18. Factor de corrección para el efecto sombra.

$(A_m V)_b$ es el factor de sección considerando a la sección como encerrada en una caja

A_m/V es el factor de sección del miembro estructural sin protección [1/m]

A_m es el área superficial del miembro estructural por unidad de longitud [m^2/m]

V es el volumen del miembro estructural por unidad de longitud [m^3/m]

c_a es el calor específico del acero [J/kgK]

Fuente: EN 1993-1-2, Section 4

$\dot{h}_{neto}$ es el flujo de calor neto, el que se define como:

$$\dot{h}_{neto} = \dot{h}_{neto}c + \dot{h}_{neto}r$$

Ecuación 19. Flujo de calor neto.

Donde:

$\dot{h}_{neto}c$: Flujo de calor neto por convección en [W/m2].

Calculado como:

$$\dot{h}_{neto}c = \alpha_c(\theta_g - \theta_m)$$

Ecuación 20. Flujo de calor neto por convección.

Donde:

α_c: Coeficiente de transferencia de calor por convección en [W/m^{2}K].

θ_g: Temperatura del gas en los alrededores del componente estructural expuesto al incendio [°C].

θ_m: Temperatura de la superficie del componente estructural [°C].

$\dot{h}_{neto}r$: Flujo de calor neto por radiación en [W/m2].

Calculado como:

$$\dot{h}_{neto}r = \Phi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * \sigma * [(\theta_T + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]$$

Ecuación 21. Flujo de calor neto por radiación.

Donde:

Φ: Factor de configuración, podrá ser tomado menor que 1.0 en caso de que se consideren los efectos de posición y sombra.

ε_m: Emisividad de la superficie del componente estructural, puede ser tomada como 0.80.

ε_f: Emisividad del fuego, puede considerarse igual a 1.

σ=$5.67 * 10^{-8}$ constante de Stephan Boltzmann, en [W/m2.KW]

θT: Temperatura efectiva de radiación de los alrededores en el caso de incendio [°C]. En el caso de miembros estructurales envueltos por el incendio, la temperatura de radiación puede tomarse como la temperatura del gas (θg).

Fuente: EN 1991-1-2, Section 3

3.3.3.2. Miembros con protección pasiva.

El valor de $\Delta\theta_m$ se calcula con la siguiente ecuación, en intervalos de tiempo no mayores a 30 segundos:

$$\Delta\theta_m = \frac{\lambda_p \, A_p/V \, (\theta_g - \theta_m)}{d_p \, c_a \, \rho_a \, (1 + \frac{\phi}{3})} \, \Delta t - \left(e^{\frac{\phi}{10}} - 1\right) \Delta\theta_g$$

Ecuación 22. Valor de variación de temperatura del miembro con protección pasiva.

Con $\phi = \frac{c_p \, \rho_p}{c_a \, \rho_a} \, d_p \, A_p/V$

Donde:

A_p/V es el factor de sección para miembros de acero con protección pasiva.

A_p es el área apropiada de material de protección por unidad de longitud del miembro [m^2/m].

d_p es el espesor del material de protección [m].

λ_p es la conductividad térmica del material de protección [W/mK].

3.3.4. Variaciones de las temperaturas de los miembros analizados

Se generó una curva estándar, la cual muestra la temperatura del aire para todas las ocupaciones. Por otro lado, en un análisis más detallado se generó una curva paramétrica para el aire de cada ocupación y, usando dichas temperaturas, se generaron dos curvas de temperatura de miembro para cada elemento (una con y otra sin protección), resultando en un total de 5 curvas por cada ocupación (15 en total).

En el Anexo 1 se evidencia el ejemplo de cálculo manual de las temperaturas del aire y la columna de la bodega en el minuto 90.

- Curva estándar

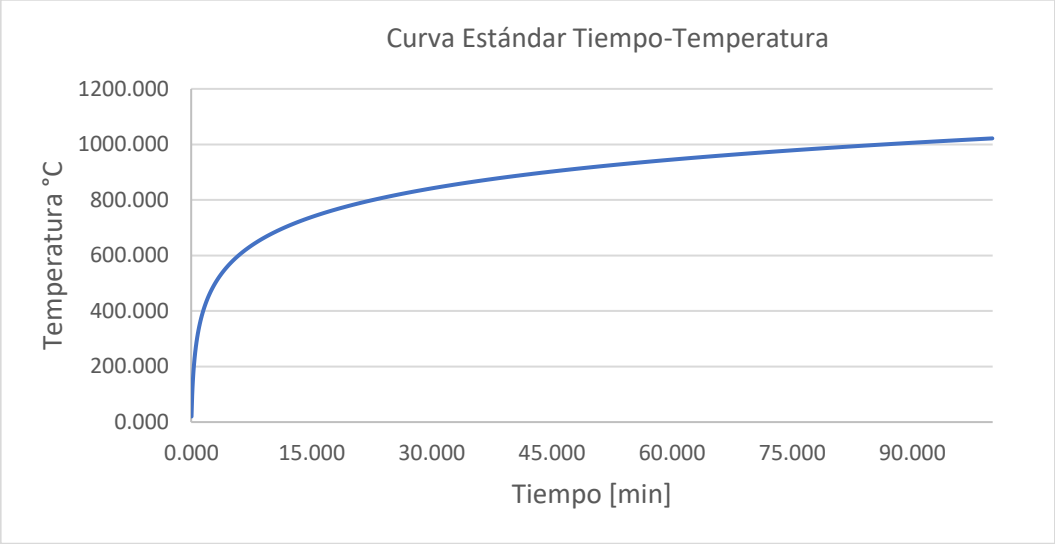


Gráfico 12. Curva estándar tiempo-temperatura

- Bodega

Con un espesor de mortero ignífugo calculado para el miembro protegido de 4mm:

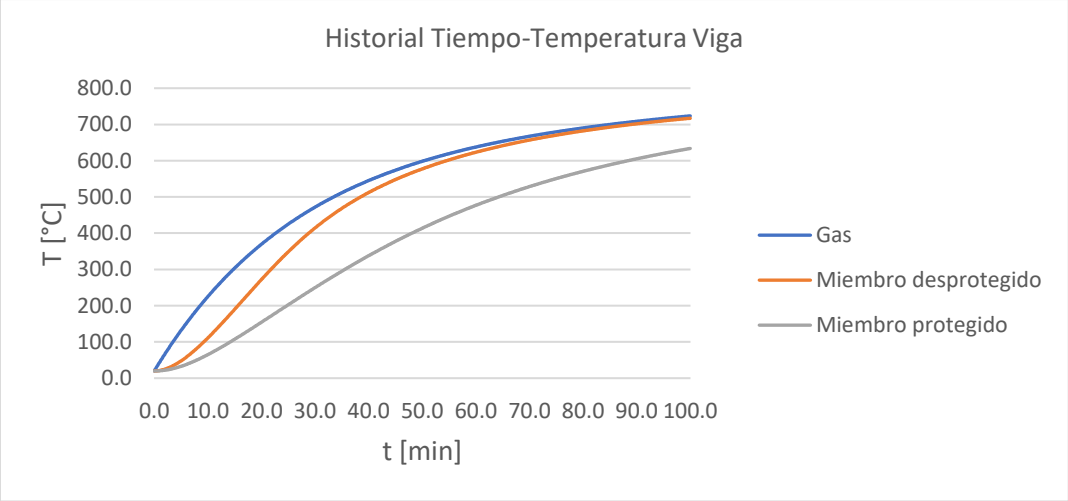


Gráfico 13. Historial tiempo-temperatura viga de bodega

Con un espesor de mortero ignífugo calculado para el miembro protegido de 4mm:

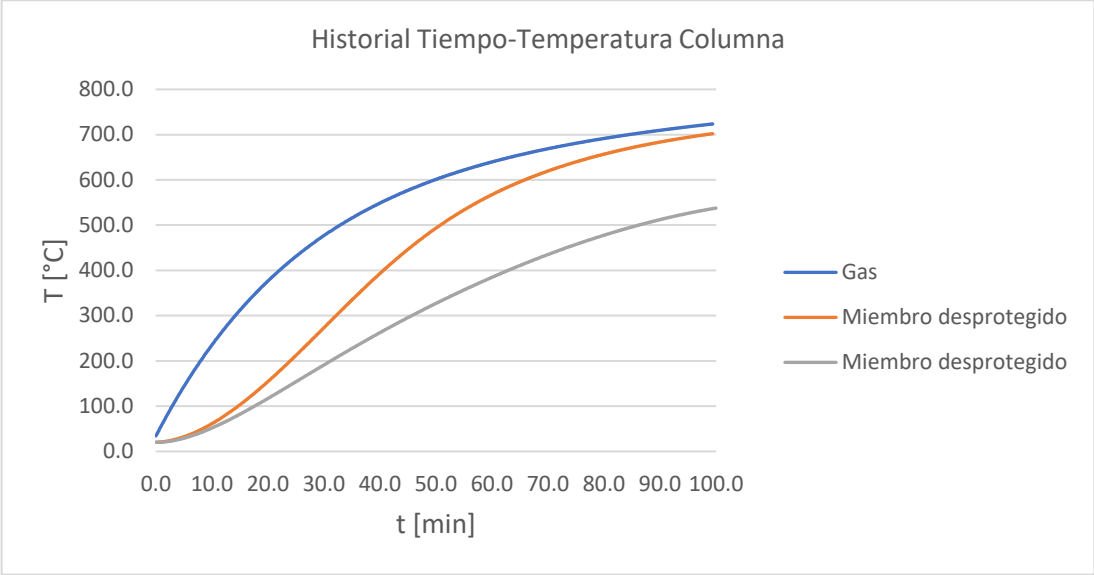


Gráfico 14. Historial tiempo-temperatura columna de bodega

- Oficina

No requiere protección anti-incendio:

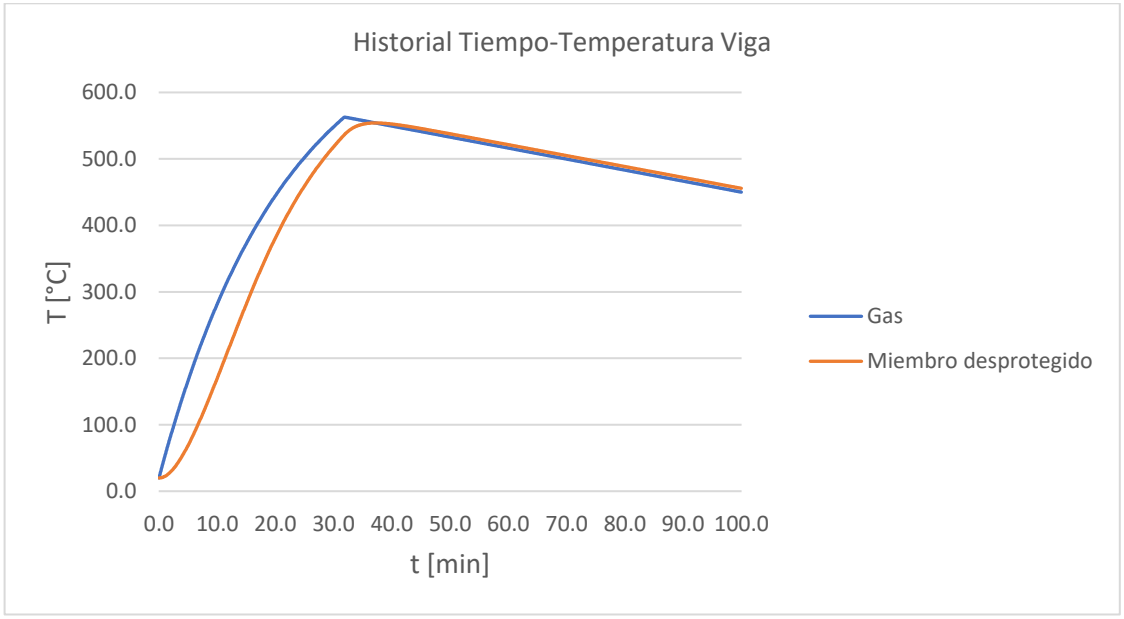


Gráfico 15. Historial tiempo-temperatura viga de oficina

No requiere protección anti-incendio:

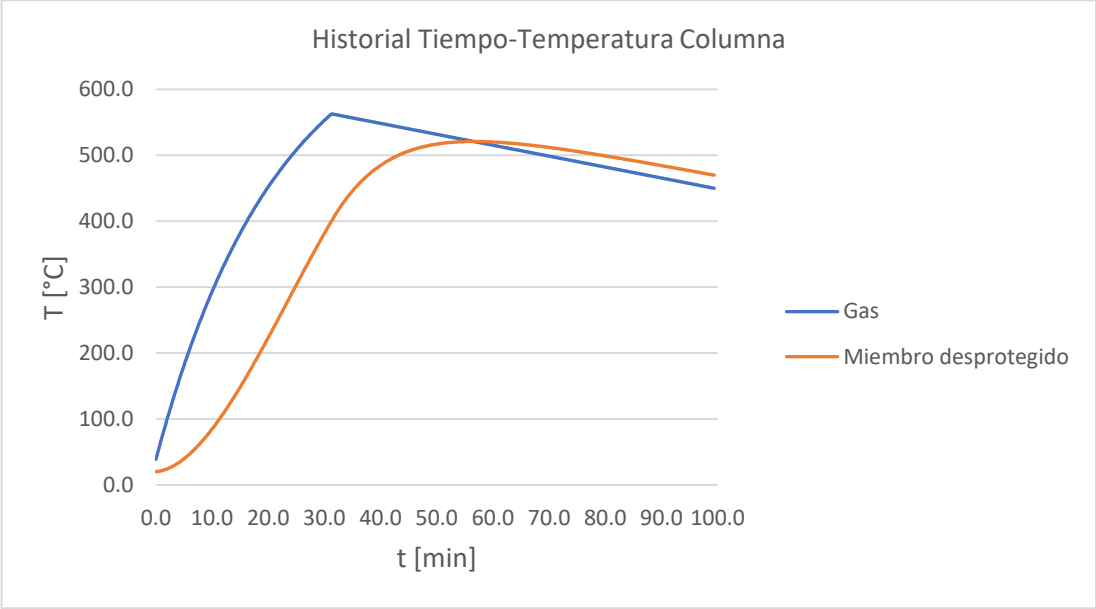


Gráfico 16. Historial tiempo-temperatura columna de oficina

- Departamento

Con un espesor de recubrimiento de gypsum resistente al fuego calculado de 7.5 mm:

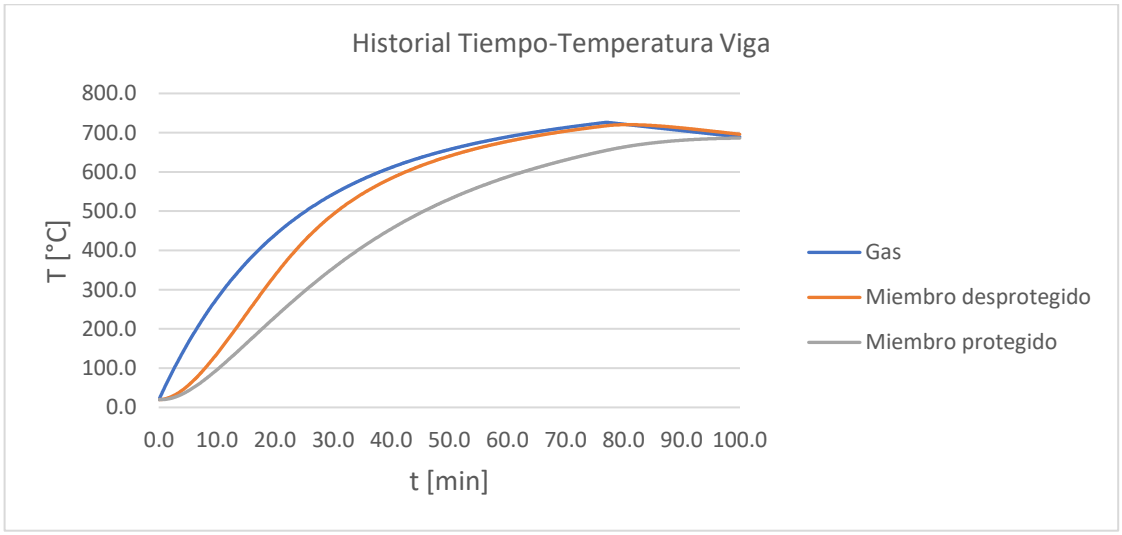


Gráfico 17. Historial tiempo-temperatura viga de dormitorio

No requiere protección anti-incendio:

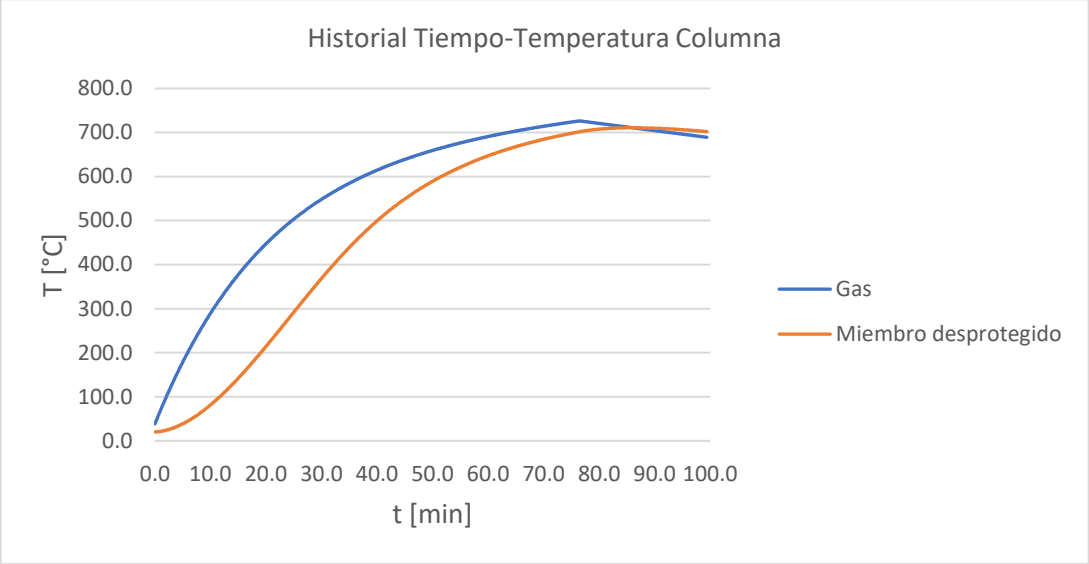


Gráfico 18. Historial tiempo-temperatura columna de dormitorio

Las justificaciones para los espesores utilizados se pueden ver en el capítulo 4.

3.4. Comportamiento estructural de elementos individuales para los escenarios de incendio

3.4.1. Conceptos de análisis estructural en incendio

Para el análisis estructural se usaron los criterios dictados en el Anexo 4 “Diseño estructural para la condición de fuego” de la Especificación para Construcciones de Acero AISC 360-16, en el subcapítulo 4d. Diseño por métodos simples de análisis. Dichos criterios fueron programados en una hoja de Excel, con el fin de analizar la variación de resistencia de los elementos conforme evoluciona el fuego.

Las ecuaciones de análisis estructural en incendio establecen una disminución de las propiedades de resistencia de los materiales a elevadas temperaturas, las cuales se determinan usando la Tabla A-4.2.1:

Temperatura del acero	Tabla A-4.2.1			
Θa	kE = G(T)/G kE = E(T)/E	kp = Fp(T)/Fy	ky = Fy(T)/Fy	ku = Fu(T)/Fy
[°C]	kE	kp	ky	ku
20	1.0000	1.0000	*	*
93	1.0000	1.0000	*	*
200	0.9000	0.8000	*	*
320	0.7800	0.5800	*	*
400	0.7000	0.4200	1.0000	1.0000
430	0.6700	0.4000	0.9400	0.9400
540	0.4900	0.2900	0.6600	0.6600
650	0.2200	0.1300	0.3500	0.3500
760	0.1100	0.0600	0.1600	0.1600
870	0.0700	0.0400	0.0700	0.0700
980	0.0500	0.0300	0.0400	0.0400
1100	0.0200	0.0100	0.0200	0.0200
1200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabla 9. Factores para la determinación de la deformación y la rigidez del acero inoxidable a temperaturas elevadas.

Fuente: Tabla A-4.2.1 EN 1993-1-2 (2005)

Donde los valores marcados con * corresponden a las propiedades a temperatura ambiente; y los valores intermedios deben interpolarse.

Con estos conceptos factores se pueden determinar las propiedades disminuidas por la acción del fuego, mismas que deben ser aplicadas al momento del análisis en lugar de las propiedades a 20°C.

3.4.1.1. Tracción

Las resistencias nominales y de diseño a tracción se determinan utilizando las disposiciones del Capítulo D de la AISC 360-16 con las propiedades de acero modificadas.

3.4.1.2. Compresión

Las resistencias nominales y de diseño a compresión se determinan utilizando las disposiciones del Capítulo E de la AISC 360-16 con las propiedades de acero modificadas, pero usando la siguiente ecuación para la resistencia nominal en compresión por flexión:

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

Ecuación 23. Resistencia nominal en compresión por flexión.

3.4.1.3. Flexión

Las resistencias nominales y de diseño a compresión se determinan utilizando las disposiciones del Capítulo F de la AISC 360-16 con las propiedades de acero modificadas, pero usando las siguientes ecuaciones para la resistencia nominal en flexión para el pandeo lateral torsional de miembros de simetría doble sin arriostramiento lateral.

Cuando $L_b \leq L_r(T)$

$$M_n(T) = C_b \left\{ M_r(T) + \left[M_p(T) - M_r(T)\right] \left[1 - \frac{L_b}{L_r(T)}\right]^{C_x} \right\} \leq M_p(T)$$

Ecuación 24.Resistencia nominal en flexión para pandeo lateral torsional de miembros de simetría doble sin arriostramiento lateral cuando Lb ≤ Lr(T)

Cuando $L_b > L_r(T)$

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

Ecuación 25. Resistencia nominal en flexión para pandeo lateral torsional de miembros de simetría doble sin arriostramiento lateral cuando Lb > Lr(T)

Donde:

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

$$L_r(T) = 1.95 r_{ts} \frac{E(T)}{F_L(T)} \sqrt{\frac{Jc}{S_x\, h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{S_x\, h_o}\right)^2 + 6.76 \left[\frac{F_L(T)}{E(T)}\right]^2}}$$

$$M_r(T) = F_L(T)\, S_x$$

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

$$M_p(T) = F_y(T)\, Z_x$$

$$c_x = 0.6 + \frac{T}{250} \leq 3$$

3.4.1.4. Corte

Las resistencias nominales y de diseño a tracción se determinan utilizando las disposiciones del Capítulo G de la AISC 360-16 con las propiedades de acero modificadas.

3.4.2. Comportamiento estructural de los elementos analizados

Los casos de falla analizados, de acuerdo con la AISC 360-16, fueron:

- Tracción: fluencia y ruptura.
- Compresión: pandeo por flexión y pandeo torsional y flexotorsional.
- Flexión: fluencia, pandeo lateral torsional y pandeo local del ala en compresión.

Para cada ocupación se generaron 5 curvas de variación de resistencia según el aumento de temperatura (15 en total), cada una con su análisis particular:

- Columnas:

- Variación de la resistencia de diseño a la tracción.
- Variación de la resistencia de diseño a la compresión.
- Variación de la resistencia de diseño a la flexión.

- Vigas:
  - Variación de la resistencia de diseño a la flexión.
  - Variación de la resistencia de diseño al corte.

3.5. Verificación de resistencia de los elementos estructurales

Después de determinar las evoluciones de las resistencias de los miembros mientras transcurre el incendio, se debe verificar que estas nunca sean menores a las requeridas para soportar las solicitaciones hasta el tiempo máximo de evacuación (60 minutos). Una vez alcanzado este tiempo, el edificio puede fallar.

La expresión para estimar la carga de diseño para la condición de fuego, según la EN 1991-1-2:2005, es la siguiente:

$$E_{incedio} = \eta_{fi} * E_{t=0}$$

Ecuación 26. Estimación de carga de diseño para condición de fuego.

Donde:

$E_{incendio}$ es el efecto de las acciones generadas en la combinación de carga de incendio.

$E_{t=0}$ es el efecto de las acciones generadas en la combinación de carga utilizada para el diseño a temperatura ambiente.

η_{fi} es el coeficiente de reducción de cargas para el caso de incendio, el cual puede tomarse como igual a 0.70.

Para determinar las acciones generadas a temperatura ambiente, se usó la combinación:

$$1.2D + 1.6L$$

Ecuación 27. Combinación de carga para acciones generadas a temperatura ambiente.

Se usaron las cargas establecidas en la NEC-SE-CG para las cargas vivas de las ocupaciones.

Ocupación	Carga viva [kN/m^2]
Bodega	7.2
Oficina	2.4
Departamento	2
Balcones	4.8
Corredores, cubiertas	4.8

Tabla 10. Cargas vivas de la norma ecuatoriana de la construcción (NEC-SE-CG) por ocupación.

Fuente: Norma ecuatoriana de la construcción, Cargas no sísmicas (NEC-SE-CG). (2015)

La sobrecarga muerta típica en el medio es de 3.2 kN/m^2.

Adicionalmente, para los modelos generados en ETABS, se usó la combinación de diseño determinada en la norma AISC 7-16:

$$1.2D + AT + 0.5L$$

Ecuación 28. Combinación de carga que considera solicitaciones adicionales generadas por la dilatación del material.

Donde AT representa las solicitaciones adicionales generadas por la dilatación del material.

4. Análisis de resultados

4.1. Presentación de resultados

Los resultados de las resistencias individuales de los miembros se pueden ver en el Anexo 2.

4.1.1. Curvas de resistencia bodega

- **Viga**

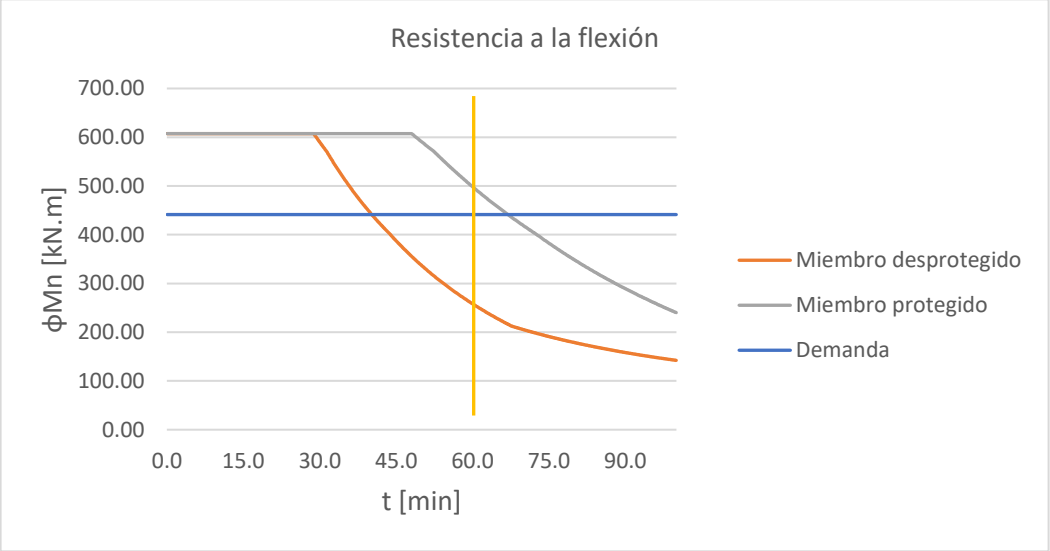


Gráfico 19. Resistencia a la flexión viga de bodega

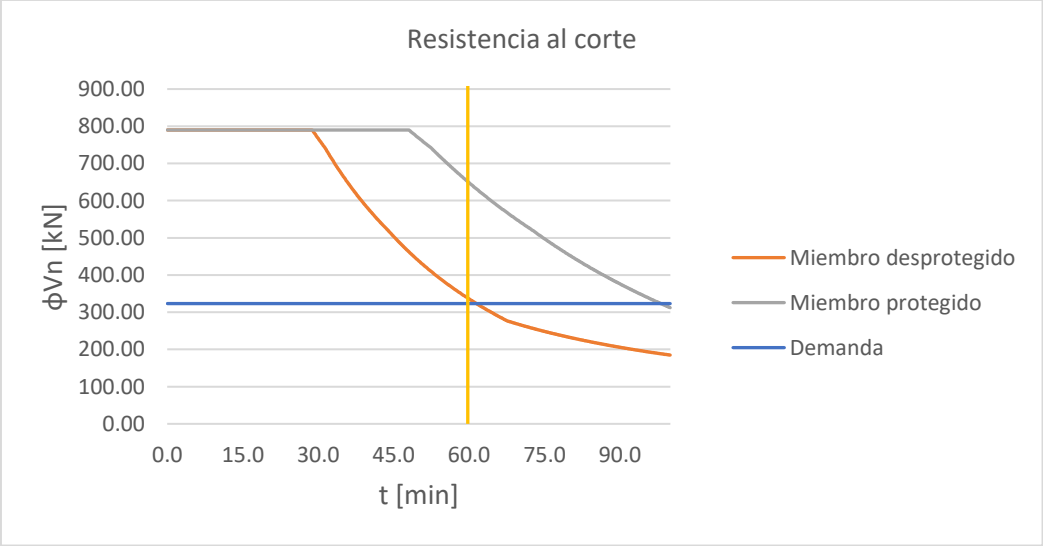


Gráfico 20. Resistencia al corte viga de bodega

- **Columna**

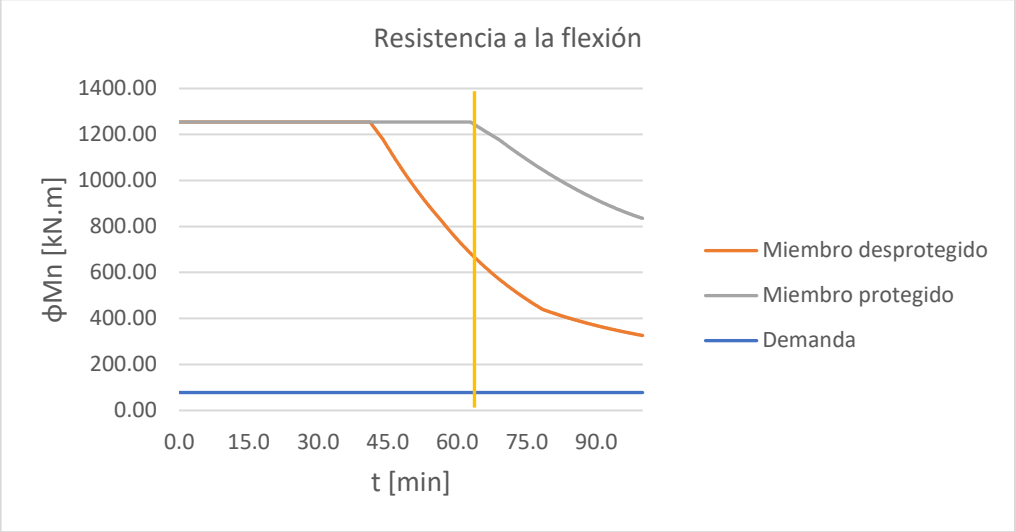


Gráfico 21. Resistencia a la flexión columna de bodega

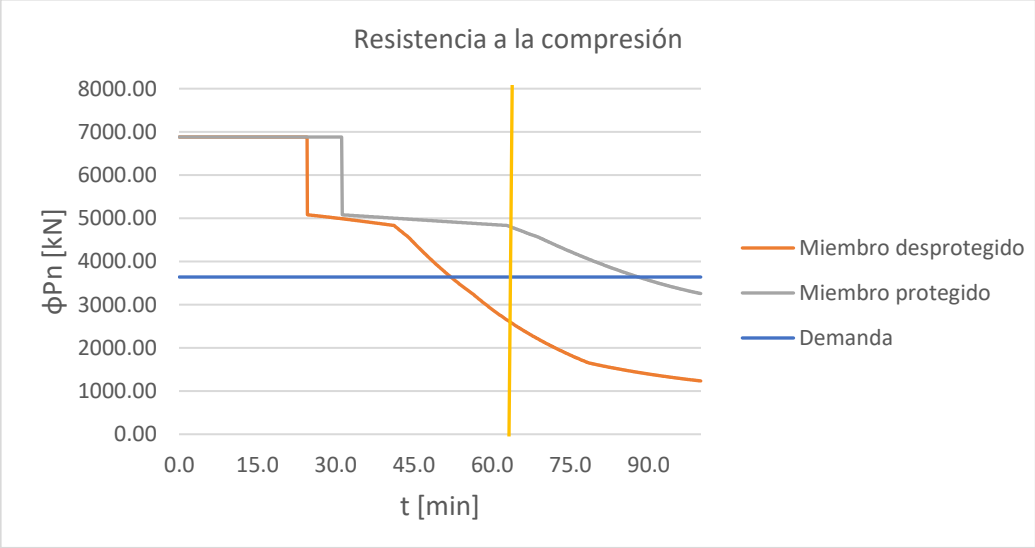


Gráfico 22. Resistencia a la compresión columna de bodega

4.1.2. Curvas de resistencia oficina

- **Viga**

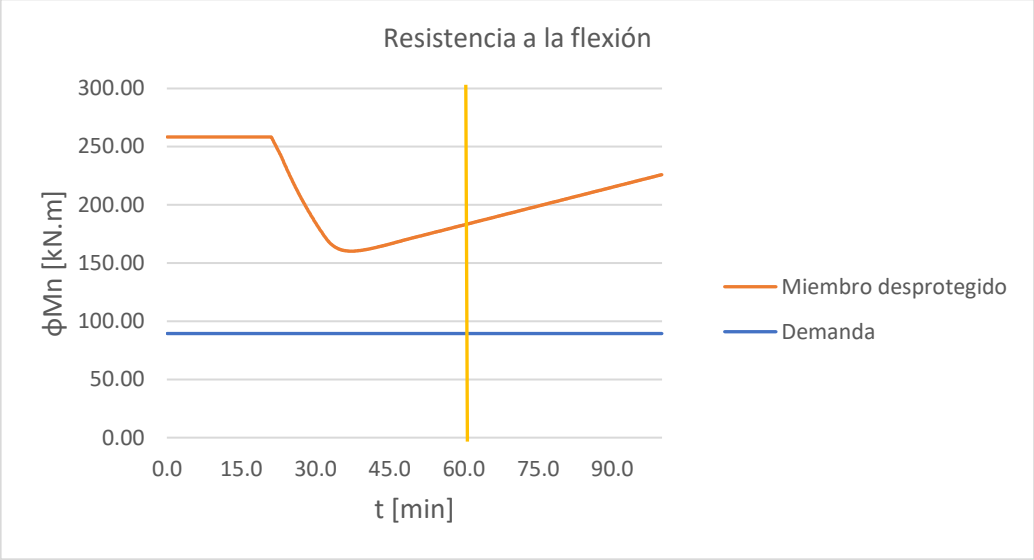


Gráfico 23. Resistencia a la flexión viga de oficina

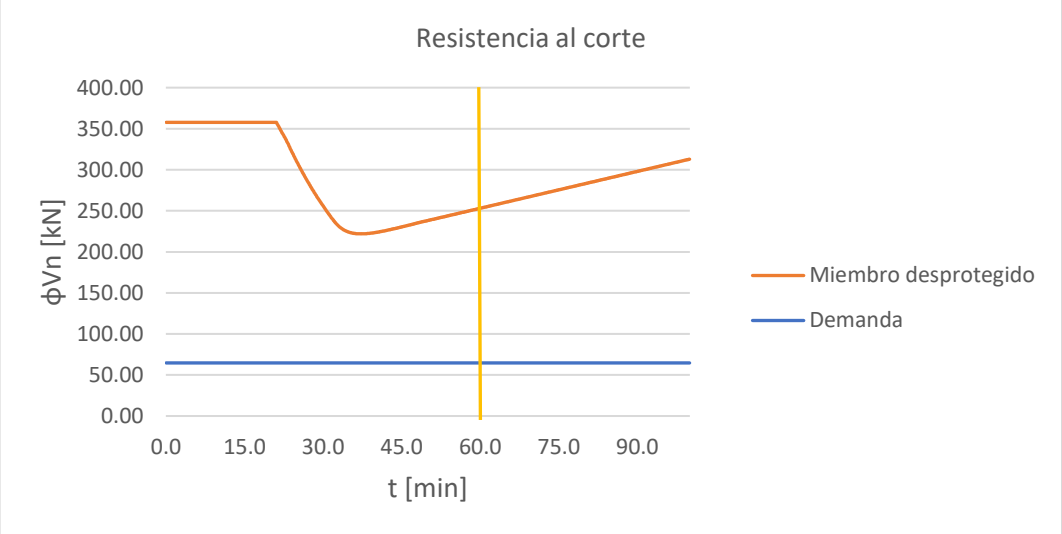


Gráfico 24. Resistencia al corte viga de oficina

- **Columna**

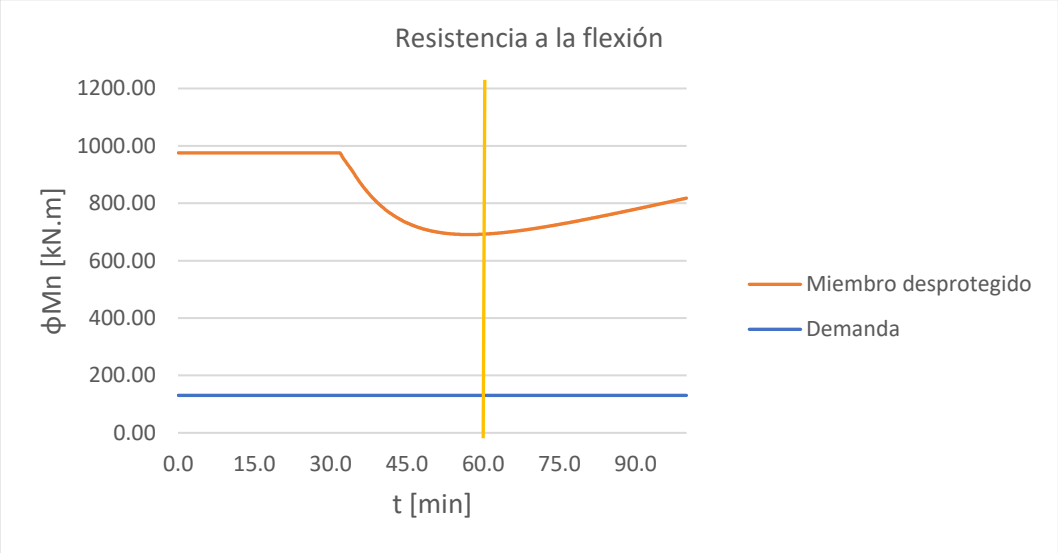


Gráfico 25. Resistencia a la flexión columna de oficina

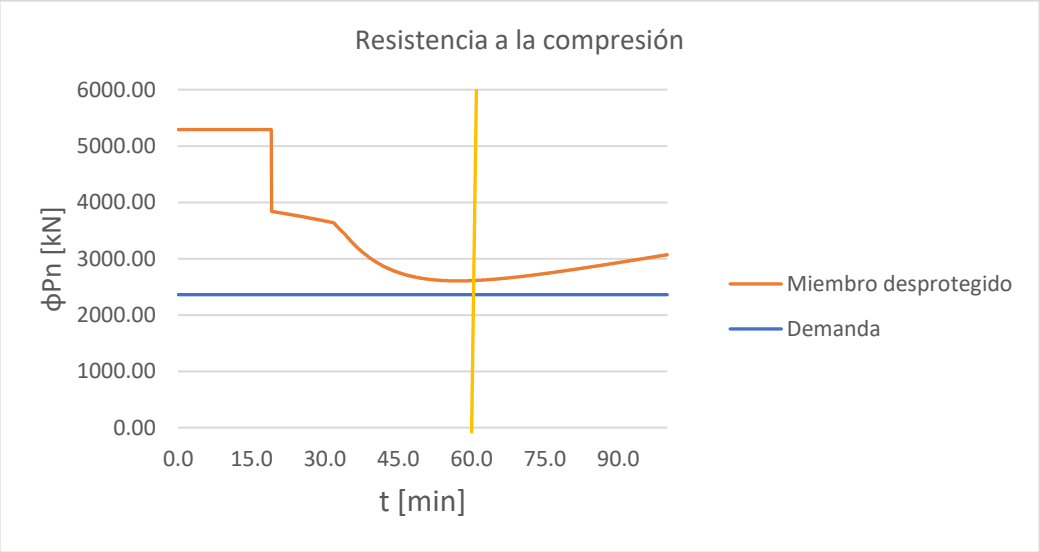


Gráfico 26. Resistencia a la compresión columna de oficina

4.1.3. Curvas de resistencia dormitorio

- **Viga**

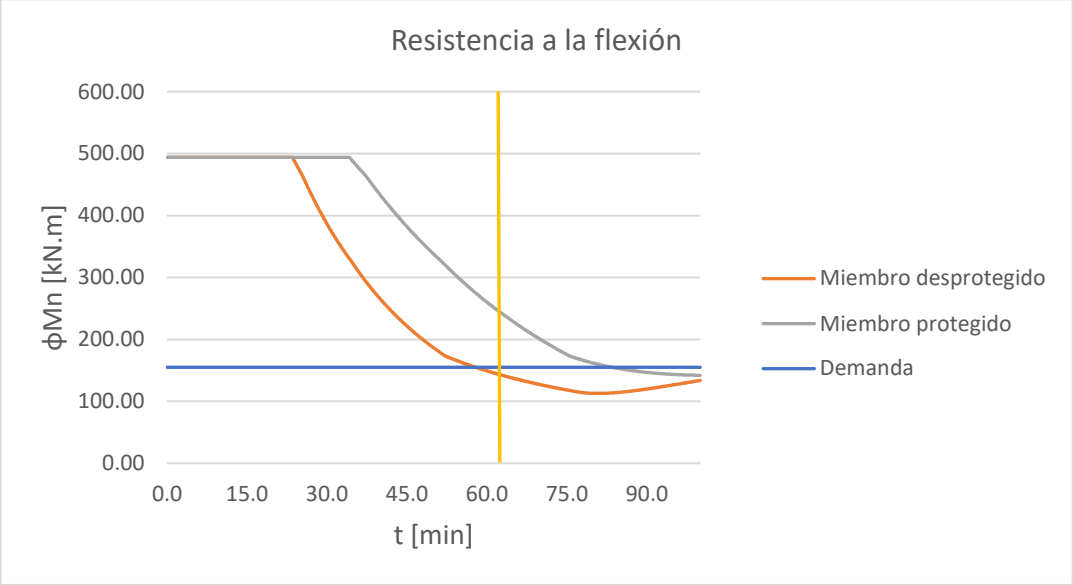


Gráfico 27. Resistencia a la flexión viga de dormitorio

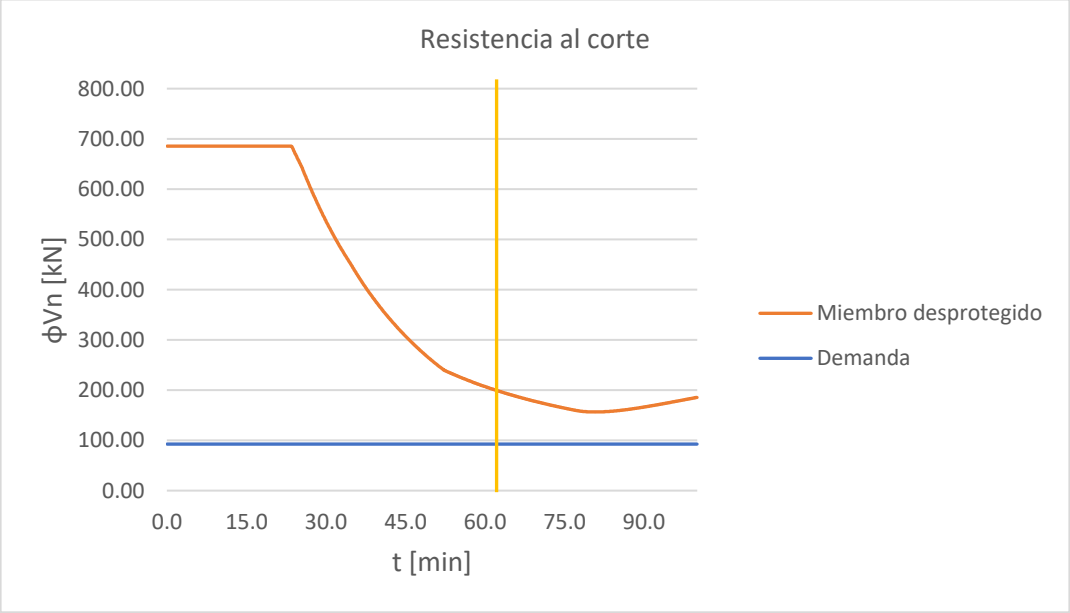


Gráfico 28. Resistencia al corte viga de dormitorio

- **Columna**

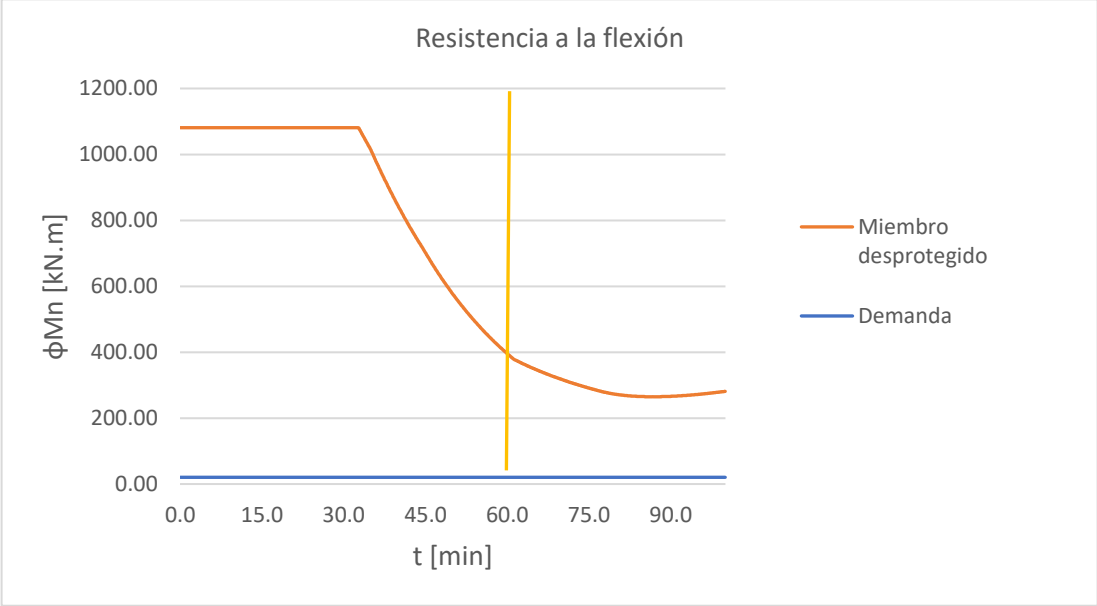


Gráfico 29. Resistencia a la flexión columna de dormitorio

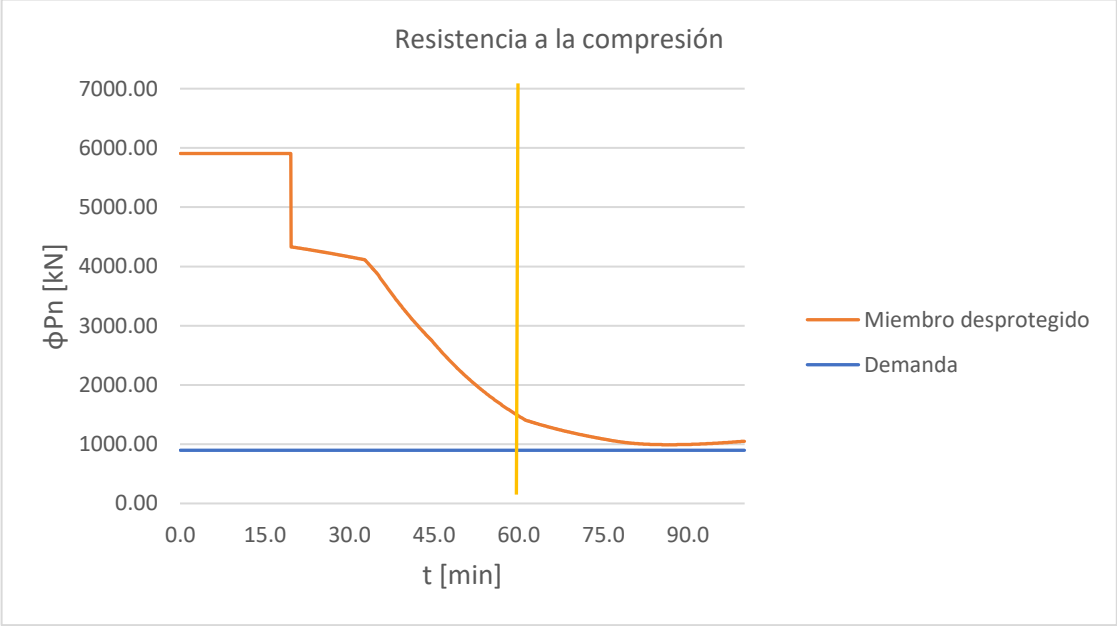


Gráfico 30. Resistencia a la compresión columna de dormitorio

4.1.4. Comparación de curvas de resistencia de espesores calculados vs espesores tabulados

Los resultados mostrados corresponden a los elementos estructurales de la bodega.

- Viga

Con un espesor de mortero ignífugo calculado para el miembro protegido de 4mm y un espesor tabulado de 12.5 mm:

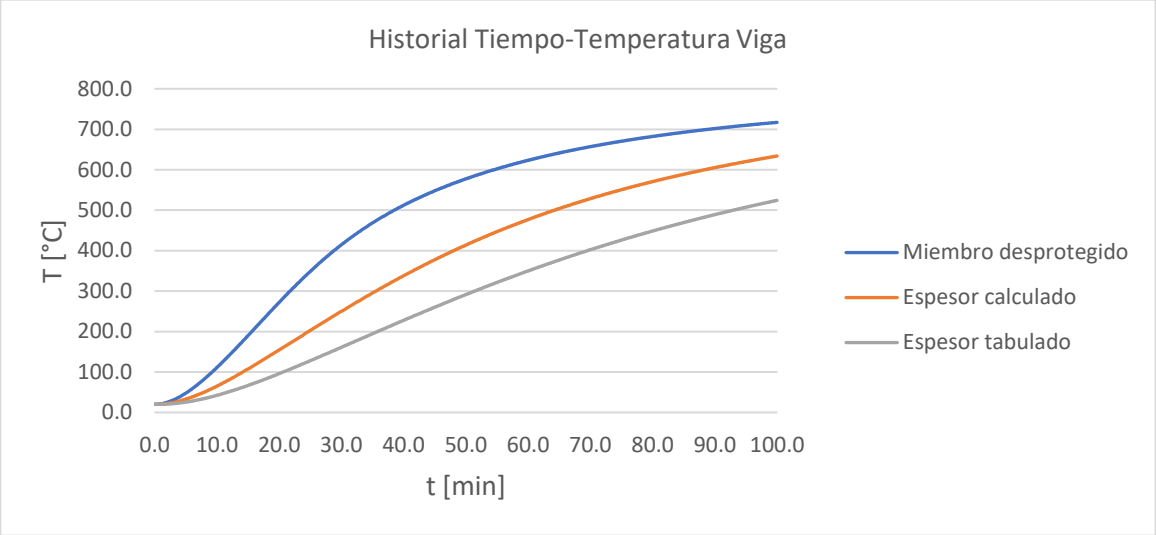


Gráfico 31. Historial tiempo-temperatura con espesor de protección tabulado viga de bodega

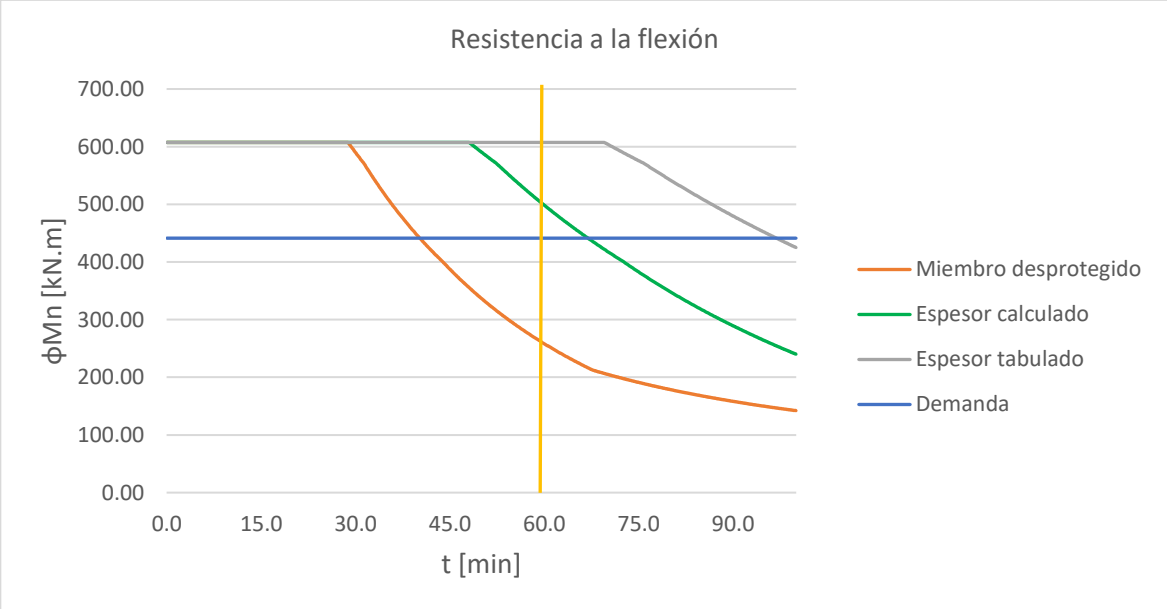


Gráfico 32. Resistencia a la flexión con espesor de protección tabulado viga de bodega

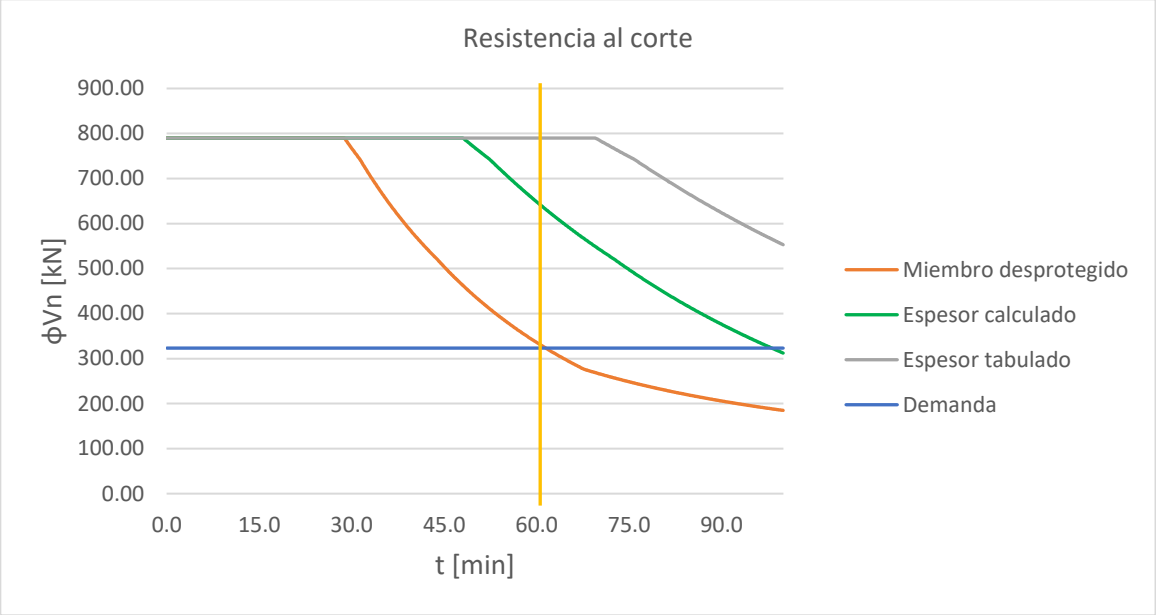


Gráfico 33. Resistencia al corte con espesor de protección tabulado viga de bodega

- Columna

Con un espesor de mortero ignífugo calculado para el miembro protegido de 4mm y un espesor tabulado de 12.5 mm:

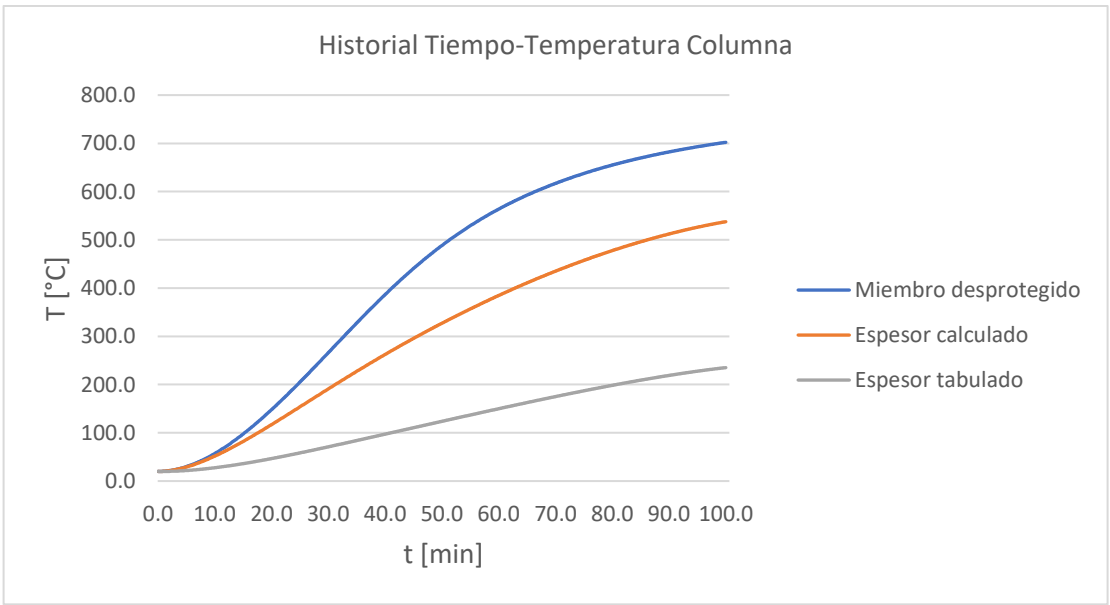


Gráfico 34. Historial tiempo-temperatura con espesor de protección tabulado columna de bodega

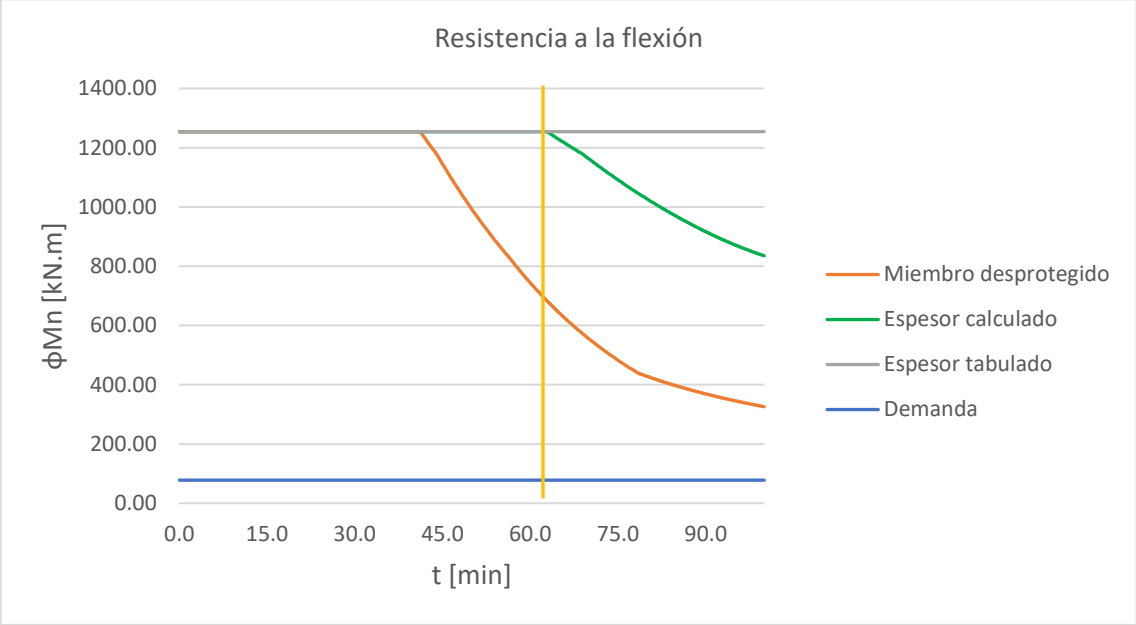


Gráfico 35. Resistencia a la flexión con espesor de protección tabulado columna de bodega



Gráfico 36. Resistencia a compresión con espesor de protección tabulado columna de bodega

4.1.5. Cálculos vs ETABS bodega

- **Viga**

Tiempo [min]	Viga								
	Temperatura [°C]	Corte [kN]				Flexión [kN.m]			
		Capacidad		Demanda		Capacidad		Demanda	
		Calculada SP	Calculada CP	ETABS	Calculada	Calculada SP	Calculada CP	ETABS	Calculada
0	20.00	789.91	789.91	278.83	323.33	607.38	607.38	412.12	441.35
10	111.05	789.91	789.91	280.62	323.33	607.38	607.38	419.87	441.35
20	272.14	789.91	789.91	284.98	323.33	607.38	607.38	438.56	441.35
30	414.49	767.02	789.91	290.60	323.33	589.78	607.38	462.54	441.35
40	512.18	577.27	789.91	296.29	323.33	443.88	607.38	486.76	441.35
50	577.42	438.04	789.91	301.08	323.33	336.83	607.38	507.13	441.35
60	623.34	335.83	789.91	304.63	323.33	258.23	607.38	522.23	441.35

Tabla 11.Capacidad vs demanda viga bodega.

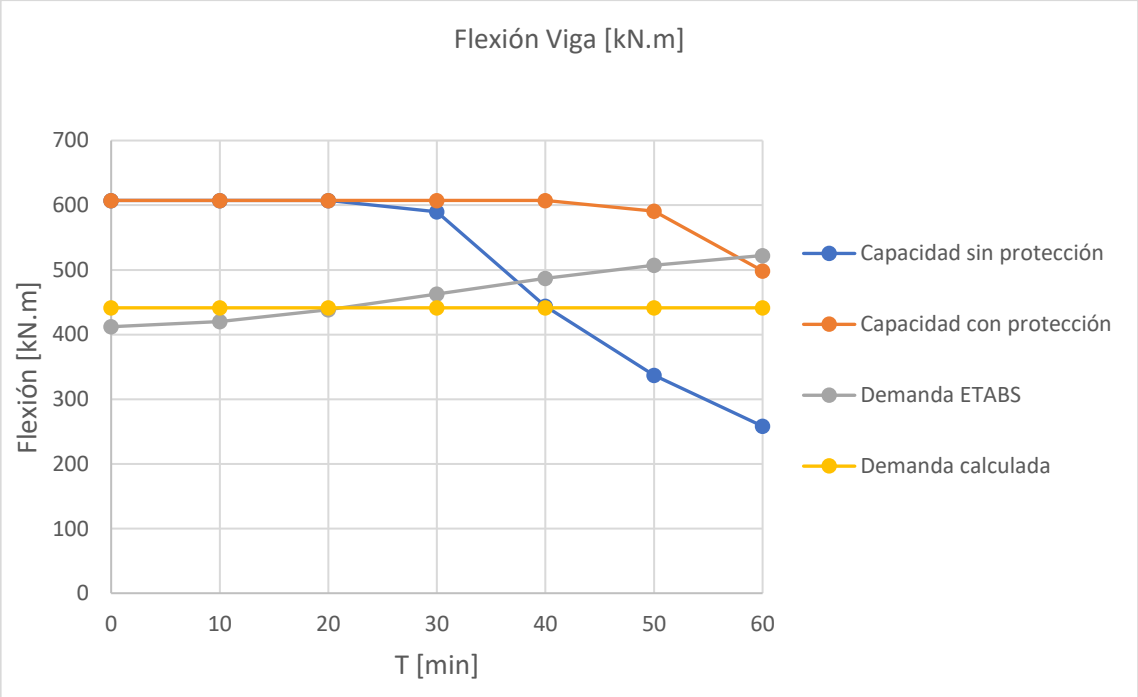


Gráfico 37. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a flexión viga de bodega

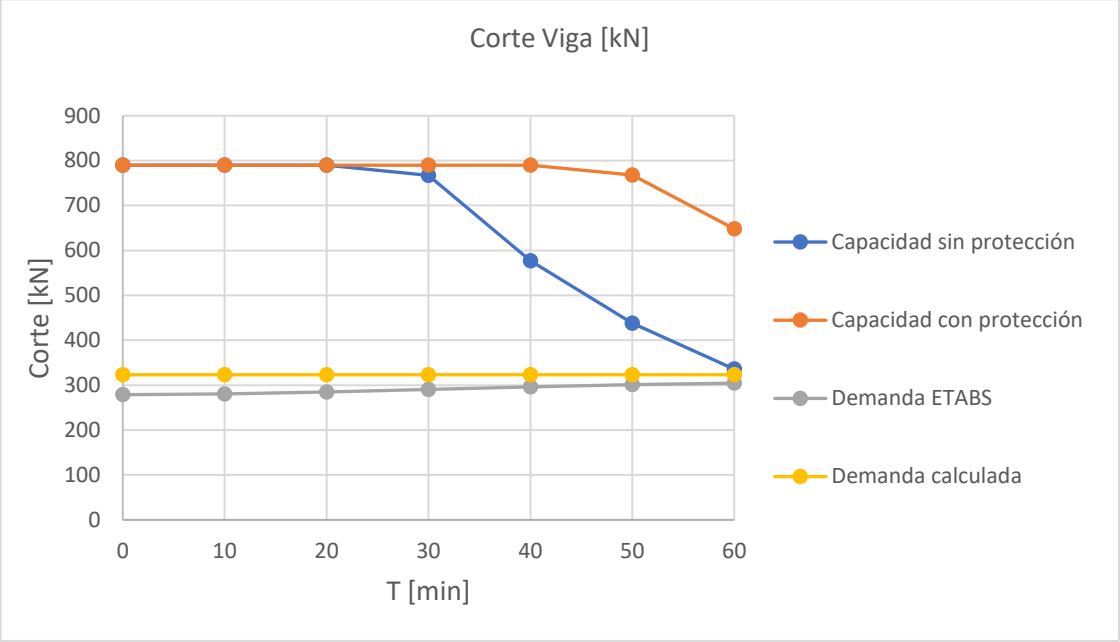


Gráfico 38. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a corte viga de bodega

- **Columna**

Tiempo [min]	Columna								
	Temperatura [°C]	Compresión [kN]				Flexión [kN.m]			
		Capacidad		Demanda		Capacidad		Demanda	
		Calculada SP	Calculada CP	ETABS	Calculada	Calculada SP	Calculada CP	ETABS	Calculada
0	20.00	6880.98	6880.98	2663.92	3640.14	1254.17	1254.17	66.79	77.95
10	57.07	6880.98	6880.98	2683.17	3640.14	1254.17	1254.17	69.99	77.95
20	147.94	6880.98	6880.98	2729.87	3640.14	1254.17	1254.17	75.68	77.95
30	266.07	5007.11	6880.98	2790.07	3640.14	1254.17	1254.17	80.72	77.95
40	386.54	4852.10	6880.98	2851.10	3640.14	1254.17	1254.17	84.21	77.95
50	488.24	3855.49	6880.98	2902.50	3640.14	992.99	1254.17	86.54	77.95
60	563.70	2890.45	6880.98	2940.61	3640.14	744.00	1254.17	88.19	77.95

Tabla 12. Capacidad vs demanda columna bodega.

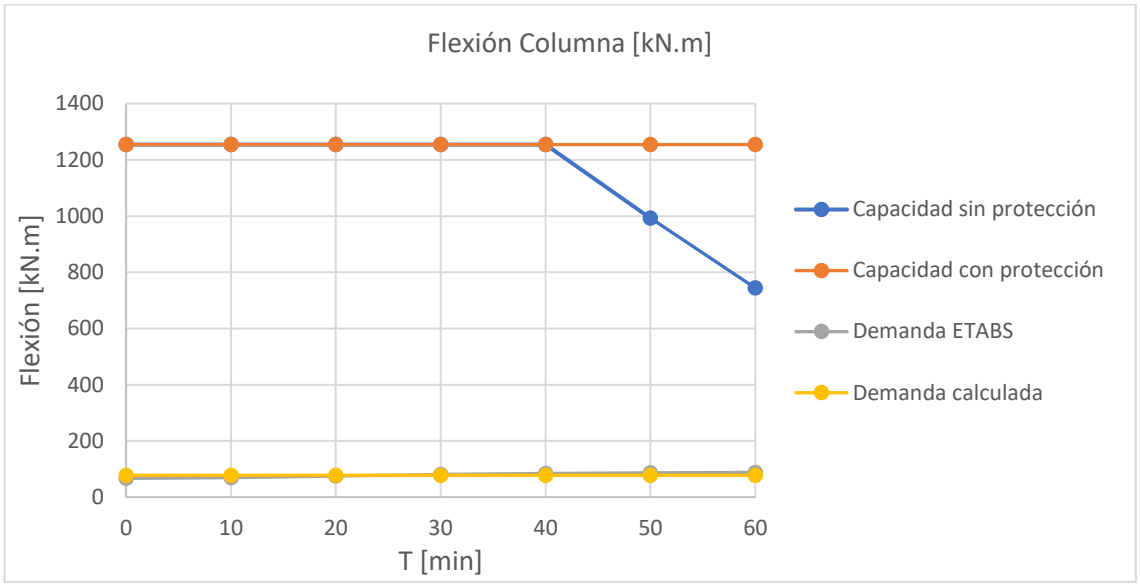


Gráfico 39. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a flexión columna de bodega

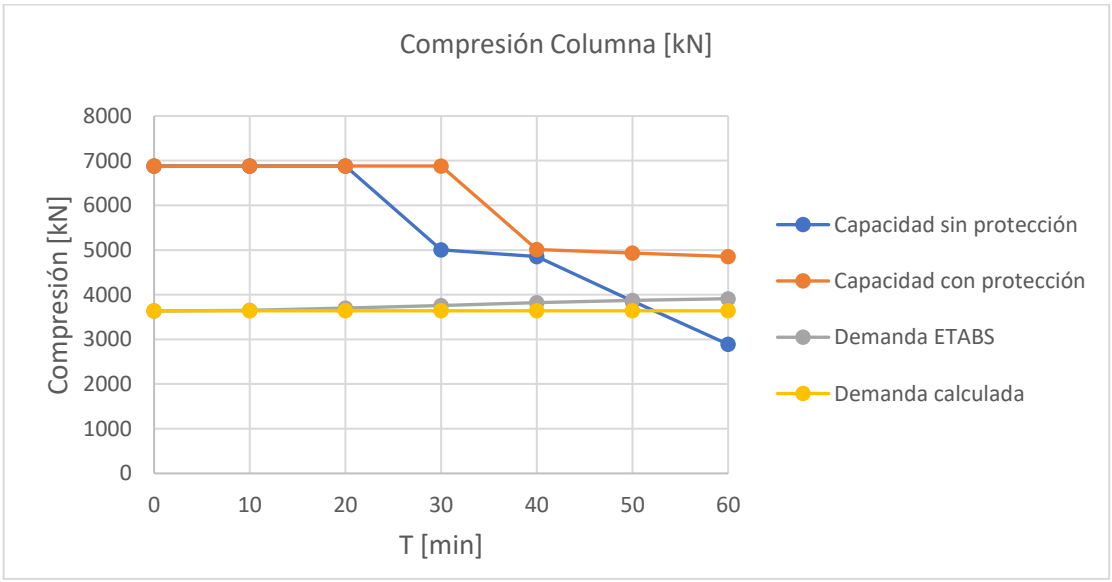


Gráfico 40. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a compresión columna de bodega

4.1.6. Cálculos vs ETABS oficina

- **Viga**

Tiempo [min]	Viga								
	Temperatura [°C]	Corte [kN]				Flexión [kN.m]			
		Capacidad		Demanda		Capacidad		Demanda	
		Calculada SP	Calculada CP	ETABS	Calculada	Calculada SP	Calculada CP	ETABS	Calculada
0	20.00	357.70	357.70	69.05	64.68	258.34	-	94.65	89.44
10	169.87	357.70	357.70	69.71	64.68	258.34	-	97.60	89.44
20	381.21	357.70	357.70	71.44	64.68	258.34	-	105.30	89.44
30	518.36	255.78	357.70	73.47	64.68	184.73	-	114.28	89.44
40	569.33	206.51	357.70	74.99	64.68	149.15	-	121.01	89.44
50	555.91	220.04	357.70	75.51	64.68	158.92	-	123.30	89.44
60	539.55	236.49	346.83	75.58	64.68	170.80	-	123.63	89.44

Tabla 13. Capacidad vs demanda viga oficina.

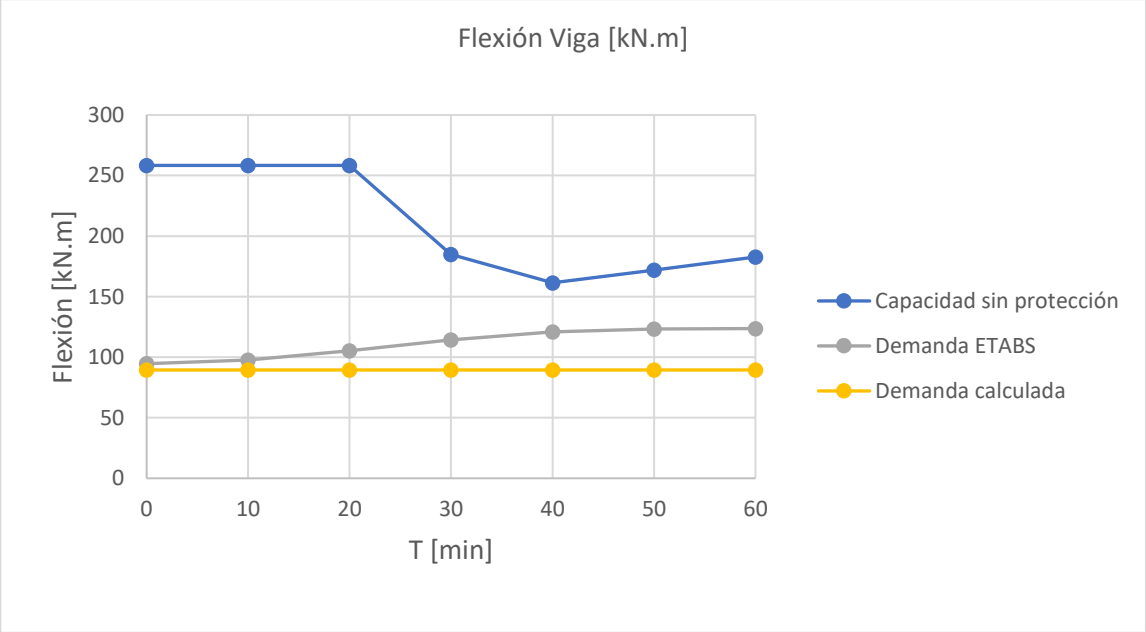


Gráfico 41. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a flexión viga de oficina

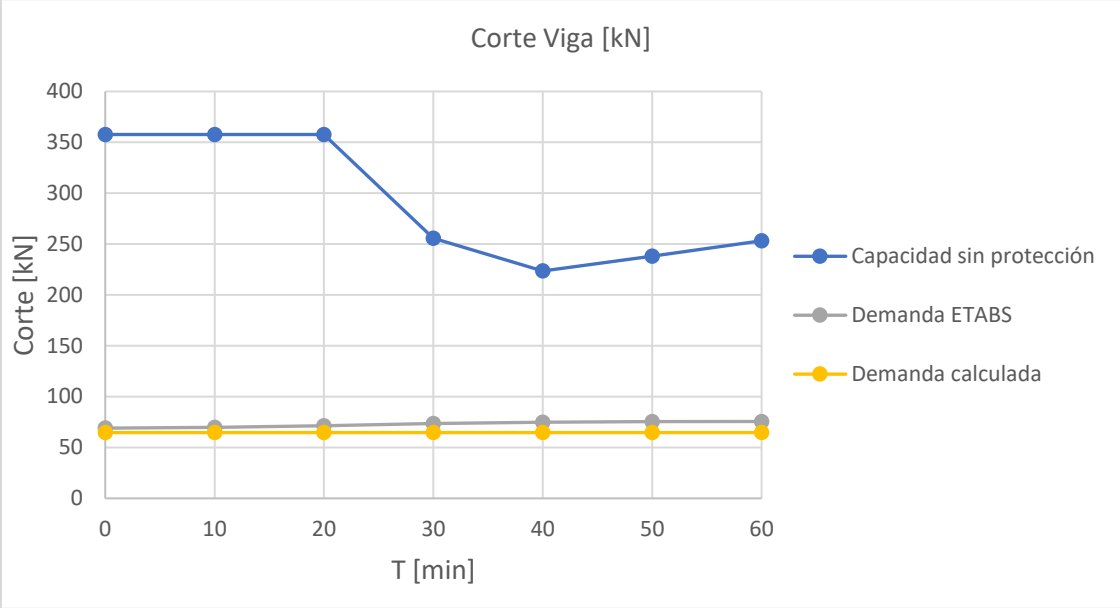


Gráfico 42. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a corte viga de oficina

- **Columna**

Tiempo [min]	Columna								
	Temperatura [°C]	Compresión [kN]				Flexión [kN.m]			
		Capacidad		Demanda		Capacidad		Demanda	
		Calculada SP	Calculada CP	ETABS	Calculada	Calculada SP	Calculada CP	ETABS	Calculada
0	20.00	5291.68	-	2479.15	2360.40	975.47	-	34.41	130.55
10	78.57	5291.68	-	2506.81	2360.40	975.47	-	35.31	130.55
20	214.40	3825.31	-	2570.41	2360.40	975.47	-	36.56	130.55
30	372.81	3668.00	-	2644.14	2360.40	975.47	-	37.34	130.55
40	491.54	2872.99	-	2699.18	2360.40	764.15	-	37.61	130.55
50	531.93	2505.53	-	2717.78	2360.40	663.85	-	37.51	130.55
60	537.82	2451.88	-	2720.43	2360.40	649.21	-	37.41	130.55

Tabla 14. Capacidad vs demanda columna oficina.

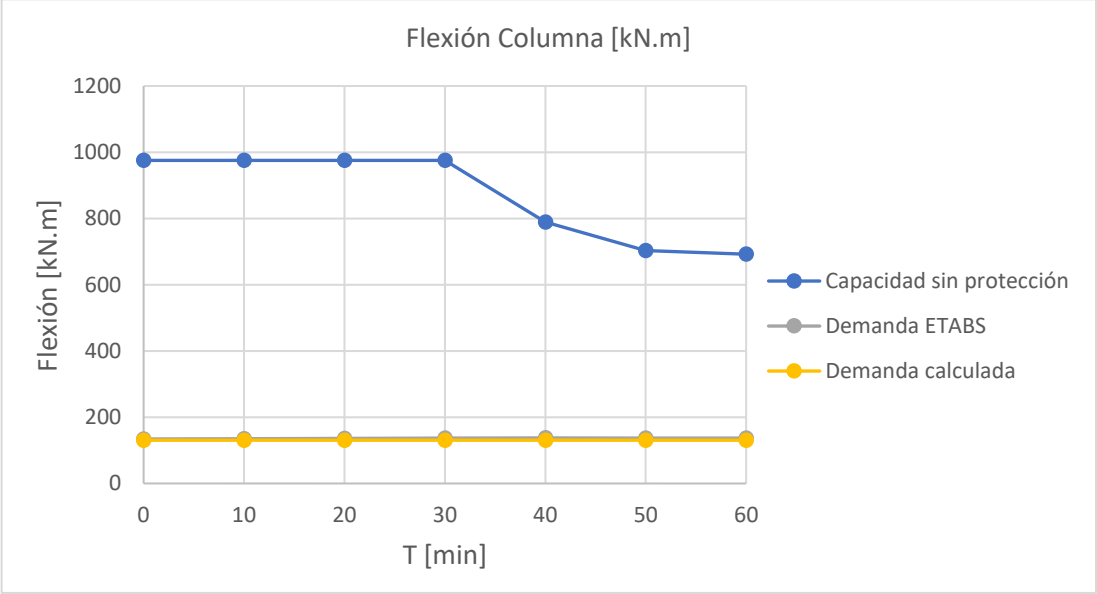


Gráfico 43. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a flexión columna de oficina

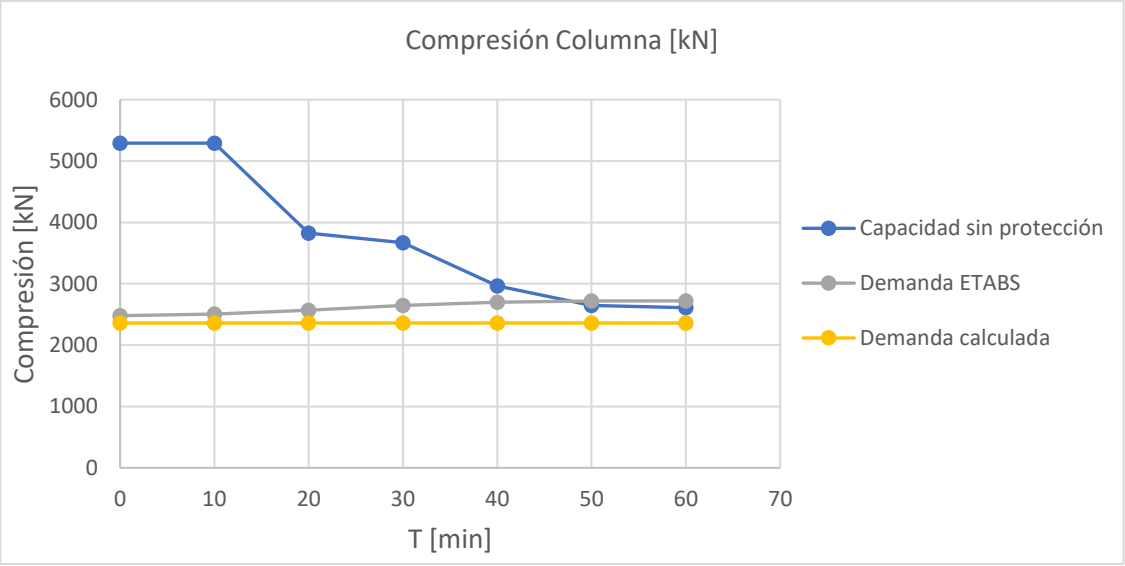


Gráfico 44. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a compresión columna de oficina

4.1.7. Cálculos vs ETABS dormitorio

- **Viga**

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Viga							
		Corte [kN]				Flexión [kN.m]			
		Capacidad		Demanda		Capacidad		Demanda	
		Calculada SP	Calculada CP	ETABS	Calculada	Calculada SP	Calculada CP	ETABS	Calculada
0	20.00	685.58	685.58	105.18	92.61	494.06	494.06	165.33	154.98
10	136.92	685.58	685.58	106.68	92.61	494.06	494.06	171.82	154.98
20	337.17	685.58	685.58	110.18	92.61	494.06	494.06	186.99	154.98
30	492.04	536.18	685.58	114.33	92.61	386.39	494.06	204.95	154.98
40	583.78	367.89	685.58	117.89	92.61	265.12	494.06	220.38	154.98
50	640.33	258.63	635.99	120.36	92.61	186.39	458.32	231.06	154.98
60	677.77	207.07	523.01	121.95	92.61	149.23	376.90	237.95	154.98

Tabla 15. Capacidad vs demanda viga dormitorio.

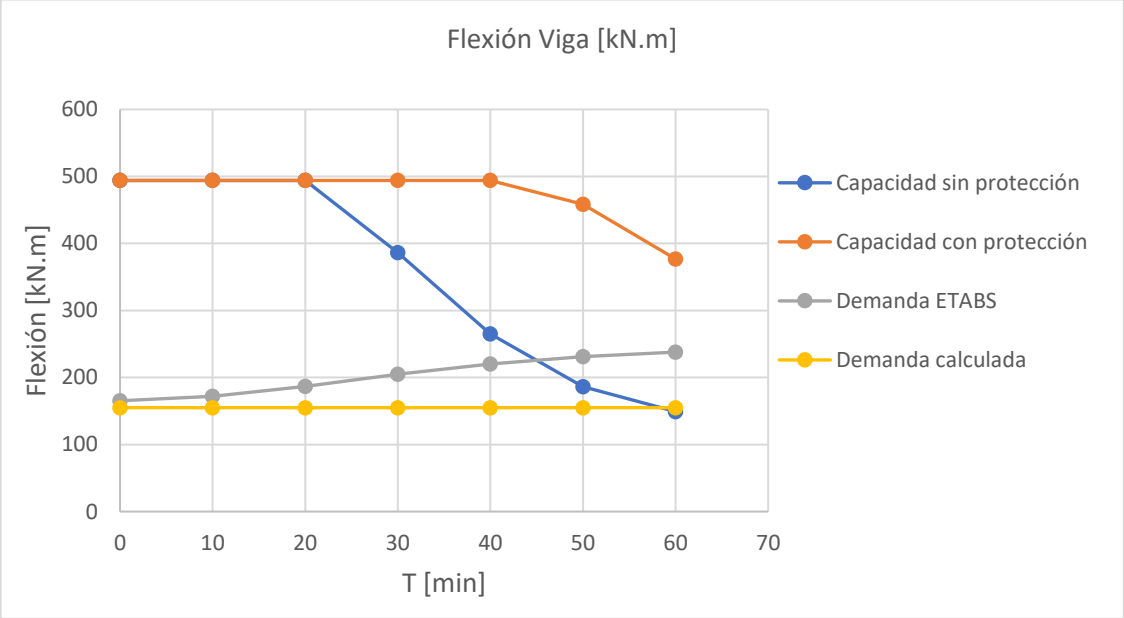


Gráfico 45. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a flexión viga de dormitorio

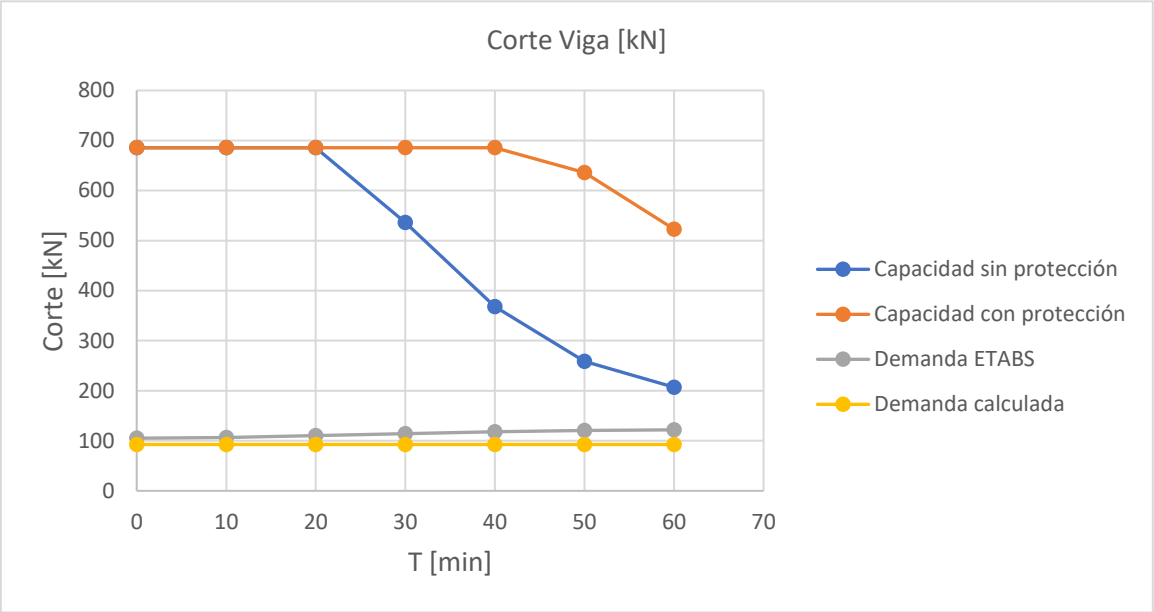


Gráfico 46. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a corte viga de dormitorio

- **Columna**

Tiempo [min]	Columna								
	Temperatura [°C]	Compresión [kN]				Flexión [kN.m]			
		Capacidad		Demanda		Capacidad		Demanda	
		Calculada SP	Calculada CP	ETABS	Calculada	Calculada SP	Calculada CP	ETABS	Calculada
0	20.00	5905.76	-	963.60	897.47	1081.04	-	107.69	77.95
10	75.48	5905.76	-	1040.54	897.47	1081.04	-	145.64	77.95
20	205.52	4324.65	-	1225.18	897.47	1081.04	-	211.67	77.95
30	360.00	4162.00	-	1449.34	897.47	1081.04	-	264.30	77.95
40	492.94	3233.36	-	1644.66	897.47	842.97	-	296.67	77.95
50	584.95	2201.43	-	1780.23	897.47	576.56	-	316.92	77.95
60	644.33	1474.87	-	1865.22	897.47	395.62	-	330.28	77.95

Tabla 16. Capacidad vs demanda columna dormitorio.

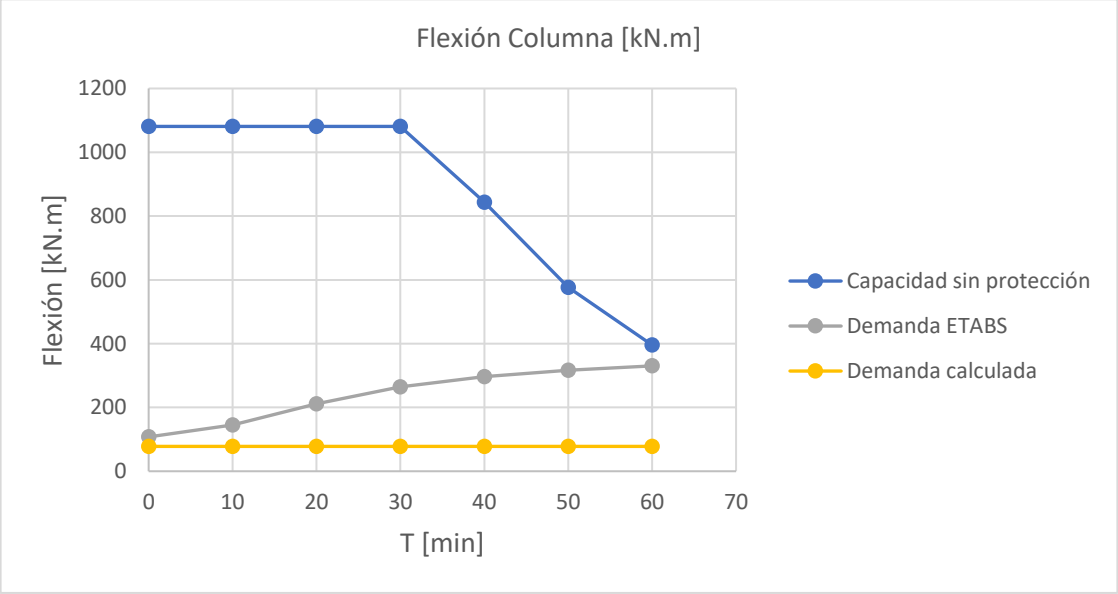


Gráfico 47. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a flexión columna de dormitorio

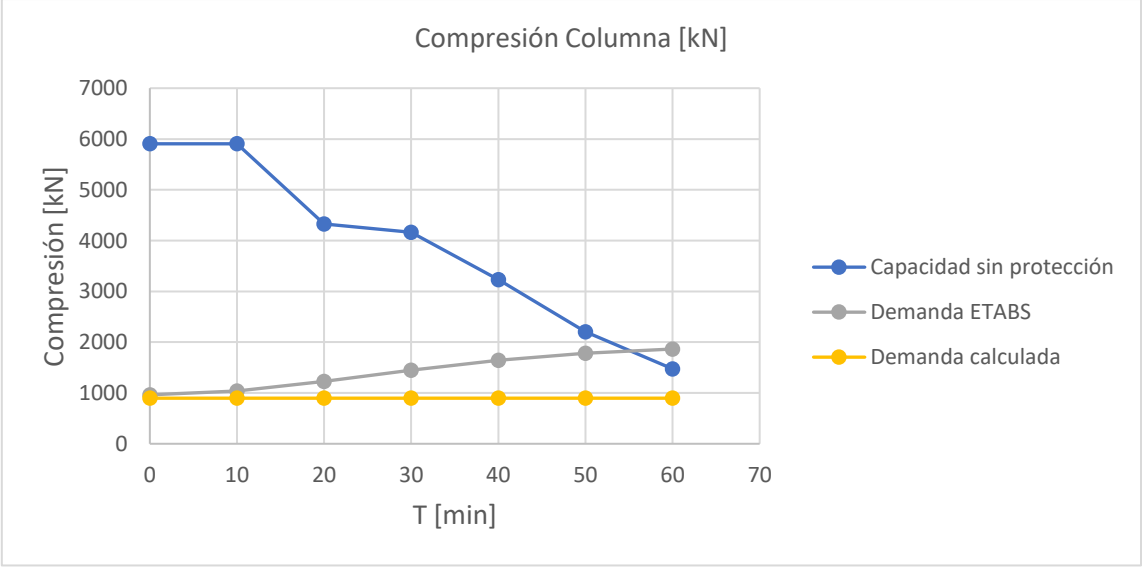


Gráfico 48. Capacidad-demanda calculada vs demanda ETABS a compresión columna de dormitorio

4.2. Análisis de resultados

4.2.1. Bodega

La bodega necesita un recubrimiento de 4mm de mortero ignífugo, tanto para la viga como para la columna, para resistir el tiempo mínimo de resistencia al fuego que es de 60 minutos. En el caso de la viga, necesita una capacidad a flexión de 441.35 [kN.m] y a corte de 323.33 [kN] calculada con la ecuación tal, y una capacidad a flexión de 522.23 [kN.m] y a corte de 304.63 [kN] calculada con el programa ETABS. Mientras que la columna necesita una capacidad a compresión de 3640.14 [kN] y a flexión de 77.95 [kN.m] calculada con la ecuación tal, y una capacidad a compresión de 2940.61 [kN] y a flexión de 88.19 [kN] calculada con el programa ETABS.

4.2.2. Oficina

Ninguno de los elementos analizados en la oficina requiere protección. Esto se debe a que el área es sumamente pequeña [8.55 m^2], que la cantidad de combustible es relativamente pequeña [205 kg de madera] y que la oficina es la única ocupación que cuenta con un sistema de detección de humo (las otras dos cuentan con detección de calor); lo que disminuye el pico de calor del gas y el tiempo en el que este se alcanza.

En el caso de la viga, necesita una capacidad a flexión de 89.44 [kN.m] y a corte de 64.68 [kN] calculada con la ecuación tal, y una capacidad a flexión de 123.63 [kN.m] y a corte de 75.58 [kN] calculada con el programa ETABS. Mientras que la columna necesita una capacidad a compresión de 2360.40 [kN] y a flexión de 130.55 [kN.m] calculada con la ecuación tal, y una capacidad a compresión de 2720.43 [kN] y a flexión de 37.41 [kN] calculada con el programa ETABS.

4.2.3. Dormitorio

El dormitorio necesita un recubrimiento de 7.5 mm de gypsum resistente al fuego, tanto para la viga como para la columna, para resistir el tiempo mínimo de resistencia al fuego que es de 60 minutos. En el caso de la viga, necesita una capacidad a flexión de 154.98 [kN.m] y a corte de 92.61 [kN] calculada con la ecuación tal, y una capacidad a flexión de 220.38 [kN.m] y a corte de 117.89 [kN] calculada con el programa ETABS. Mientras que la columna necesita una capacidad a compresión de 897.47 [kN] y a flexión de 77.95 [kN.m] calculada con la ecuación tal, y una capacidad a compresión de 1449.34 [kN] y a flexión de 264.30 [kN] calculada con el programa ETABS.

La viga necesita protección para resistir la flexión durante los 60 minutos de diseño. Sin embargo, la cantidad de recubrimiento es mucho mayor a la necesaria. Esto se debe a que, dado que se trata de un dormitorio, la protección utilizada fue Gypsum Resistente a Fuego, lo que limita los espesores que se pueden emplear. En este caso, el espesor utilizado fue de 7.5 mm, el mínimo que se puede conseguir según catálogos.

4.2.4. Análisis global

- Se determinó que los tiempos mínimos de resistencia al fuego, de acuerdo con el propósito de la edificación y la altura de esta, fueron de 90 minutos para la bodega y 60 minutos para la oficina y el departamento. Al ser 3 ocupaciones que van a formar parte de un mismo edificio, el tiempo que rige el diseño estructural anti-incendio es de 60 minutos.

- La variación en los resultados obtenidos mediante la ecuación 26 y el programa ETABS se debe a que las combinaciones de carga utilizadas fueron distintas. En el caso primer caso, la combinación fue de *0.7(1.2D+1.6L),* mientras que en el caso de ETABS fue de *1.2D+AT+0.5L.* A pesar de que ambos resultados inician igual, conforme avanza el tiempo los resultados de ETABS van creciendo.
- En las 3 ocupaciones analizadas, la resistencia de sus elementos estructurales está regida por la capacidad a flexión en el caso de la viga y por la capacidad a compresión en el caso de la columna.
- La creciente pendiente de la curva de demanda calculada con ETABS se debe a que la carga de temperatura asignada (ecuación 28) genera una dilatación del material conforme este se calienta, provocando esfuerzos adicionales. Sin embargo, este aumento en la demanda es demasiado lento, resultando en que los requerimientos de resistencia debidos a las solicitaciones adicionales no llegan a equiparar a los requerimientos en resistencia debidos a la pérdida de propiedades del material.
- Según los gráficos 31, 31, 34 y 35 se puede observar que los espesores tabulados dan mucha más resistencia que la necesaria ya que, en el caso de la viga, la disminución de resistencia al cortante y a la flexión empieza a los 69.58 minutos, y la disminución de la resistencia a la flexión y compresión de la columna inicia a los 80.75 minutos; mientras que los elementos cubiertos con espesores iterados inician su caída en resistencia al corte y a la flexión en el minuto 48.08 para la viga y su caída en resistencia a flexión y compresión en la columna al minuto 62.92.

- La ocupación con la demanda más elevada (Viga a flexión 522.23 [kN.m] y columna a compresión 2940.61 [kN]) es la bodega, esto se debe a que es la ocupación con mayor área (145.8 m^2), además de tener una cantidad considerable de combustible (12636 kg de papel) y de tratarse de una ocupación con altas solicitaciones gravitacionales.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- El diseño estructural anti-incendio es una rama del cálculo estructural con una amplia base teórica detrás que lo fundamenta. Actualmente, este campo es de total desconocimiento en el Ecuador, por lo que la implementación de estos conceptos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción es acertada y fundamental, ya que va a corregir todas las malas prácticas que actualmente se dan y ahorrar miles de dólares en construcción.
- Los métodos de diseño de protección pasiva utilizados actualmente en el Ecuador tienden a sobredimensionar los espesores de recubrimiento anti-incendio, ya que la determinación de estos se basa en tablas estandarizadas y no en un análisis tiempo-historia particular para cada elemento estructural. Al no tener certidumbre de las variaciones de las propiedades del material, los técnicos deben poner espesores innecesariamente elevados, lo que constituye un diseño ineficiente.

- La ecuación 28 para el cálculo de la demanda es más exacta que la 26 ya que, si bien es cierto que a temperatura ambiente son similares, la primera tiene en cuenta solicitaciones adicionales en el elemento estructural debidas a su propio ensanchamiento por dilatación al calentarse, lo que hace que vaya creciendo con el tiempo; mientras que la segunda se mantiene constante durante los 60 minutos.
- El software ETABS no tiene en cuenta la degradación de material por temperatura en los elementos, sino solamente el aumento de carga por dilatación. Por esto, la única consideración que realiza al insertar una variación de temperatura en el elemento es un aumento en la demanda y no una caída de resistencia, lo que inevitablemente tiende a un subdimensionamiento estructural ante incendio. Sin embargo, sí se puede usar ETABS en el cálculo de las solicitaciones, pues tiene en cuenta el aumento de carga debido al calor, permitiendo el uso de la ecuación 28 para el cálculo de demanda, la cual es más exacta que la ecuación 26.
- Gracias a este análisis se puede determinar exactamente qué elementos de la estructura necesitan protección pasiva anti-incendio, lo que puede generar un cambio en los requerimientos mínimos de recubrimientos de los bomberos, ya que ellos no los solicitan en base a un análisis de resistencia.
- En base al análisis realizado, se determina que las secciones transversales de los elementos estructurales en un diseño con consideraciones anti-incendio no necesitan ser mayores que las secciones transversales en un diseño sin dichas consideraciones. A pesar de que secciones transversales mayores resisten mejor las temperaturas elevadas debido a que tardan más en calentarse, aumentar el

tamaño de las secciones para contrarrestar los efectos de pérdida de resistencia durante incendio es ineficiente, ya que se puede lograr el mismo efecto protegiendo las secciones. Adicionalmente, las solicitaciones de la estructura durante incendio son considerablemente menores que las cargas previstas en otros eventos accidentales, por lo que las secciones a usarse en incendio están condicionadas por los demás eventos que se deben analizar. Por todo esto, si los elementos cuentan con la protección pasiva adecuada, menores secciones pueden resistir las solicitaciones óptimamente, refutando así la hipótesis planteada.

5.2. Recomendaciones

- Para el diseño estructural anti-incendio se recomienda utilizar un software que sí considere la pérdida de propiedades del material del que está hecho el elemento estructural y en el que se pueda observar el comportamiento de este al estar protegido con materiales aislantes. Por ejemplo, el software Diamonds, en el que se puede observar los esfuerzos reales a los que está sometido el elemento estructural.

  Sin embargo, la obtención de la demanda usando ETABS (o cualquier otro software similar) sí puede realizarse.
- Los espesores de recubrimientos de materiales aplicados en estado húmedo (como el mortero) no deben ser los mismos que se calcularon en el análisis de resistencia tiempo-historia, debido a que el método considera que el material de recubrimiento está en estado seco. Por esto, es necesario saber cuánto espesor

húmedo debe colocarse para que, al momento de reducirse por secado, este sea el calculado originalmente.

- Para la determinación del material aislante a utilizar, se recomienda realizar previamente un análisis de costos y considerar desde el punto de vista estético los acabados de este, ya que en cuanto a eficiencia los materiales aislantes (mortero ignífugo, pintura intumescente o gypsum) logran los mismos resultados.
- Se recomienda analizar el costo-beneficio de utilizar protecciones pasivas y cumplir con los requerimientos mínimos establecidos por los bomberos en cuanto a protecciones activas o utilizar protecciones activas adicionales y disminuir los recubrimientos utilizados como protección pasiva; debido a que utilizar una mayor cantidad de protección activa disminuye el valor de diseño de carga de fuego (*qfd*) y, por ende se reduce el tiempo necesario para alcanzar la etapa de enfriamiento del elemento estructural.
- Se recomienda que el criterio para determinar el tiempo mínimo de resistencia al fuego, además de basarse en el tipo de ocupación de la edificación que se esté analizando, tenga en cuenta la cantidad de personas que se pueden encontrar en la ocupación.

BIBLIOGRAFÍA:

American Institute of Steel Construction. (2016). *Specification for Structural Steel Buildings AISC 360-16.*

American Society for Testing and Materials. (2020). *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials ASTM E119.*

American Society of Civil Engineers. (2017). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and other Structures ASCE 7-16.*

Benemérito Cuerpo de Bomberos de Guayaquil. (2022). *Rendición de cuentas.* Guayaquil.

Buchanan, A., & Kwabena Abu, A. (2017). *Structural design for fire safety.* New Zealand.

Cortés, D., Gil, D., Azorín, J., Vandecasteele, F., & Verstockt, S. (2020). A Review of Modelling and Simulation Methods for Flashover Prediction in Confined Space Fires. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 3-5. doi:https://doi.org/10.3390/app10165609

Diller, T. (1993, octubre). Advances in Heat Flux Measurements. *Fire Safety Journal, 23*(3), 279-368. doi:https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70008-X

Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics.* Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.

European Committee for Standarization. (2010). *Eurocode 3: Design of Steel Structures EN 1993-1-2.*

European Committee for Standarization. (2013). *Eurocode 1: Actions on Structures EN 1991-1-2.*

Guamanaquispe, F. (2022). *Caracterización de elementos estructurales de acero que hayan sido expuestos a diferentes tiempos y temperaturas debido a un incendio.* Ambato: Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato.

Inzunza, J. (2013, diciembre 11). *Mecanismos de transmisión de calor.* Retrieved from Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/34475/1/Mecanismos%20de%20transmisi%C3%B3n%20de%20calor%20%28CONDUCCION%2C%20CONVECCION%2C%20RADIACION%29.pdf

Neufert, E. (2013). *El arte de proyectar en arquitectura.* Barcelona: Editorial GG.

Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). *Cargas No Sísmicas NEC-SE-CG.* Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda & Cámara de la Industria de la Construcción.

Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. (2014). *Incendios estructurales en Imbabura, Carchi y Esmeraldas.* Quito.