

*Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas*



**ANÁLISIS DE LAS TENSIONES SURGIDAS EN ELEMENTOS PLANOS
DE HORMIGÓN ARMADO PRODUCTO A GRADIENTES DE
TEMPERATURA**

Trabajo de Diploma en Ingeniería Civil

Autor: Arianna Suárez Ayala

Tutor: MSc. Ing. Alejandro Hernández Hernández

Matanzas, 2019

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por este medio declaro que yo Arianna Suárez Ayala soy la única autora de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas a darle el uso que estime más conveniente.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

DEDICATORIA

A mi àngel que me cuida desde el cielo y vive eternamente en mi corazòn, por enseñarme a ser fuerte y obstinada ante la vida, a tener carácter, palabra, a no callar, a no tener miedo de decir lo que pienso y hacer lo que siento. A ti papà dedico todos mis triunfos, porque todas las mañanas me levanto con el mismo objetivo: que te sientas orgulloso de mi.

AGRADECIMIENTOS

- A la más valiente de todas las guerreras, gracias mami por tanto amor, por siempre caminar junta a mí y dejarme ser quien he querido, por no ponerme barreras, sino en cambio darme alas para volar; por ser mi héroe, motivo de esfuerzo y superación cada día; porque me llena de orgullo hablarle a todos del ser tan maravilloso que me dio la vida.
- A mi hermano: el amor de mi vida, mi confidente, cómplice y mi orgullo, a quien le debo más cosas de las que he sido capaz de agradecer, por darme esa seguridad y protección que solo tú puedes, por ser mi fortaleza y mi debilidad.
- A tiita Yude por cuidarme siempre, por ser mí amiga y a veces hasta ser tú la sobrina, por estar a mi lado y llevarme de la mano a todos lados como si aún fuera una niña, por protegerme y mimarme. A su esposo Alfredo, gracias por quererme y aceptarme de corazón. A Alex le agradezco que me haya permitido estar junto a él y sentirme la hermana mayor, por dejarme entrar en su vida.
- A mis abuelos, por tanto amor, por su sabiduría, su comprensión y paciencia, por hacerme sentir especial. A mi familia en general, por brindarme siempre todo y más de lo que me pueden dar.
- A mis amigos, en especial a Lianet, Arletys, Ernesto y Pepe por soportarme cuando ni yo misma he podido, por tantas horas de risas pero también de estrés.
- A mi tutor, por tanta dedicación, fidelidad, paciencia y apoyo incondicional, gracias por creer en mí.
- A mis profesores por sus conocimientos y entrega.

RESUMEN

El impetuoso desarrollo de la construcción está dominado básicamente por las estructuras de hormigón armado, viéndose afectadas por una de las patologías más significativas que caracterizan las obras de hormigón: las fisuras, las cuales pueden ser provocadas por fuertes cambios de temperatura. Los elementos planos de hormigón; muros y losas, son sometidos a estas variaciones también llamadas gradiente térmico. En Cuba se está desarrollando sistemas de edificaciones donde la estructura portante está compuesta por elementos planos de hormigón armado sometidos a marcados gradientes de temperatura, debido al sistema de climatización en el interior de las habitaciones y la temperatura del medio circundante. Para analizar el comportamiento de estos elementos que presentan fisuras se realizan dos modelos, un módulo aislado expuesto a la variación de la temperatura ambiente y otro módulo total sometido al gradiente de temperatura para analizar el comportamiento de las tensiones ante la influencia del diferencial térmico. Después de consultar diversas bibliografías y con la modelación en el software SAP 2000 se muestran resultados con los que se puede concluir que: las tensiones que se generan alcanzan la rotura no solo por la temperatura sino por la aplicación de otras cargas. En ocasiones el diferencial térmico si produce un aumento de las tensiones demostrándose que existe un efecto por temperatura en los elementos planos de hormigón armado.

Palabras claves: Elementos planos; Gradiente térmico; Fisuración; Modelación estructural.

ABSTRACT

The impetuous development of the construction is dominated by the reinforced concrete structures, being affected by one of the most significant pathologies that characterize the concrete works: the fissures, which can be caused by strong changes of temperature. The flat elements of concrete; walls and slabs, are subjected to these variations also called thermal gradient. In Cuba is developing systems of buildings where the load-bearing structure is composed of flat elements of reinforced concrete subjected to marked temperature gradients, due to the air conditioning system inside the rooms and the temperature of the surrounding environment. To analyze the behavior of these elements that present cracks, two models are made, an isolated module exposed to the variation of the ambient temperature and another total module subjected to the temperature gradient to analyze the behavior of the stresses under the influence of the thermal differential. After consulting various bibliographies and modeling in the SAP 2000 software, results are shown with which it can be concluded that: the stresses that are generated reach breakage not only by temperature but by the application of other loads. Sometimes the thermal differential if it produces an increase in the stresses demonstrating that there is an effect by temperature on the flat elements of reinforced concrete.

Keywords: Flat elements; Thermal gradient; Cracking; Structural modeling

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1 "Marco teórico Referencial de la investigación"	5
1.1 Elementos planos de hormigón armado	5
1.1.1 Generalidades.....	5
1.1.2 Muros de hormigón armado.....	6
1.1.3 Losas de hormigón armado.....	6
1.2 Experiencias nacionales e internacionales en el empleo de elementos planos de hormigón armado.....	7
1.3 Ventajas y desventajas del uso de elementos planos de hormigón armado.....	8
1.4 Patologías constructivas en elementos planos de hormigón armado.....	8
1.4.1 Sintomatología en elementos planos de hormigón armado	10
1.5 Gradientes de temperatura en elementos planos de hormigón armado.....	12
1.5.1 Generalidades. Antecedentes a la investigación	12
1.5.2 Influencia de los gradientes de temperatura en elementos planos de hormigón armado.....	15
1.6 Modelación estructural.....	16
1.6.1 Generalidades. Ventajas y desventajas	16
1.7 Método de Elementos Finitos	18
1.7.1 Generalidades.....	18
1.7.2 Tipos de elementos y mallado.....	18
1.7.3 Ventajas y desventajas del Método de los Elementos Finitos	20
1.8 <i>Software</i> de cálculo de estructuras. SAP 2000.....	21
1.9 Conclusiones parciales del capítulo.....	22
Capítulo 2: " Modelación de elementos planos de hormigón armado"	23
2.1 Módulo aislado.....	23
2.1.1 Descripción del modelo	23
2.1.2 Ajuste del modelo	26
2.2 Módulo total.....	29
2.2.1 Descripción del modelo	29
2.2.2 Ajuste del modelo	31
2.3 Conclusiones parciales del capítulo.....	42
Capítulo 3: " Modelación de elementos de hormigón armado".....	43
3.1 Módulo aislado.....	43
3.1.1 Tensiones Máximas y Tensiones Von Misses	43
3.2 Módulo total.....	52
3.2.1 Tensiones Máximas y Tensiones Von Misses	52
3.3 Conclusiones parciales del capítulo	74
Conclusiones	75
Recomendaciones	76
Referencias Bibliográficas	77
Anexos	79
Anexo 1 Tablas de las tensiones en los puntos comprobados para el ajuste del modelo total	79

Anexo 1.1 Resultado de las tensiones en los puntos comprobados en muros laterales	79
Anexo 1.2 Resultado de las tensiones en los puntos comprobados en muros frontales	81
Anexo 1.3 Resultado de las tensiones en los puntos comprobados en cubierta	82
Anexo 1.4 Resultado de las tensiones en los puntos comprobados en entresijos	82
Anexo 2 Tablas de las deformaciones en los puntos comprobados para el ajuste del modelo total	83
Anexo 2.1 Resultado de las deformaciones en los puntos comprobados en muros laterales	83
Anexo 2.2 Resultado de las deformaciones en los puntos comprobados en muros frontales.....	85
Anexo 2.3 Resultado de las deformaciones en los puntos comprobados en cubierta	86
Anexo 2.4 Resultado de las deformaciones en los puntos comprobados en entresijos	86
Anexo 3 Gráficos de tensiones y deformaciones de los elementos planos de hormigón en el proceso de ajuste	87
Anexo 3.1 Gráficos de tensiones y deformaciones de muros laterales.....	87
Anexo 3.2 Gráficos de tensiones y deformaciones de muros frontales	92
Anexo 3.3 Gráficos de tensiones y deformaciones de cubierta	96
Anexo 3.3 Gráficos de tensiones y deformaciones de entresijos	97
Anexo 4 Tabla de Tensiones Máximas y Von Misses luego de aplicar de manera gradual temperatura al módulo aislado	99
Anexo 5 Tabla de Tensiones Máximas y Von Misses luego de someter el módulo total al gradiente térmico.....	102
Anexo 5.1 Tabla de Tensiones Máximas y Von Misses de muros frontales	102
Anexo 5.2 Tabla de Tensiones Máximas y Von Misses de muros laterales.....	106

INTRODUCCIÓN

La modelación estructural se basa en la traducción de un problema físico a una forma matemática, con el objetivo de dar una idea inmediata sobre cómo se definen las variables, los objetivos y las limitaciones en diferentes situaciones, mostrando la conducta real de la estructura al ser construida. Frecuentemente este es el único método de investigación y análisis disponible para fenómenos y procesos que no pueden ser reproducidos o experimentados en la realidad, o que su costo y peligrosidad hacen la experimentación real impracticable, conjuntamente con la connotación de obtener alguna solución aproximada.

Para la modelación de las estructuras se emplean métodos de análisis y diseño de las mismas, los cuales permiten llegar a resultados aproximados de los elementos que la conforman. Uno de los métodos más empleados hoy en día es **el método del elemento finito** (MEF en español o FEM en inglés), siendo una técnica numérica para hallar soluciones aproximadas a ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, así como a ecuaciones integrales. Es aplicable en muchas ramas de la ciencia y la técnica, por ejemplo, en mecánica del sólido, mecánica de los fluidos, transferencia de calor, electrostática y magnetostática, entre otras.

En los últimos años se han desarrollado numerosos modelos numéricos para analizar elementos estructurales de hormigón, sin embargo, es necesario profundizar en el comportamiento de elementos planos de hormigón armado cuando estos se fisuran.

El impetuoso desarrollo de la construcción, dominado básicamente por las estructuras de hormigón armado, demanda cada día más de una rigurosa preparación técnica para que desde el diseño hasta las etapas finales de construcción sean debidamente aplicadas y cumplidas las distintas normativas y especificaciones que unidas a las modernas tecnologías de punta conlleven al logro de obras seguras, duraderas y estéticas.

En ocasiones estos atributos se ven afectados por una de las patologías más significativas que caracterizan las obras de hormigón; las fisuras, las cuales, por sus condiciones superficiales de aspecto, inciden directamente en lo funcional, siendo esta una de las razones de más peso en la durabilidad de una estructura y es por ello que como parte del cálculo estructural, las grietas y fisuras clasifican dentro de los estados límites de

servicio. De ahí que el establecer un correcto diagnóstico que va desde su identificación hasta las causas que lo originan, permite a proyectistas, constructores y productores de materiales, no solo minimizar o erradicar su efecto por medio de su reparación sino tomar las medidas profilácticas preventivas para eliminar o disminuir su aparición.

Las fisuras son roturas que aparecen en el hormigón como consecuencia de tensiones superiores a su capacidad resistente, pudiendo ser provocadas por fuertes cambios de temperatura. Los elementos planos de hormigón; muros y losas, son sometidos a estas variaciones también llamadas “gradiente térmico”.

Actualmente en Cuba se está desarrollando sistemas de edificaciones donde la estructura portante está compuesta por elementos planos de hormigón armado, losas y muros portantes, los cuales están sometidos a marcados gradientes de temperatura, debido al sistema de climatización en el interior de las habitaciones y la temperatura del medio circundante.

Planteando así la **Situación Problemática** existente en el caso de estudio de los elementos planos de hormigón armado que se usan en la construcción de obras climatizadas en el país, donde se generan posiblemente producto a los cambios de temperatura altas tensiones que dan pie a fisuraciones.

Por tanto, se evidencia como **problema científico**: la necesidad de modelar el comportamiento de las tensiones que se generan en los elementos planos de hormigón por los cambios de temperaturas.

Estableciendo ante la situación existente la **hipótesis** que mediante la modelación de los elementos en cuestión; con la ayuda de un *software* de cálculo se podría realizar el análisis de las tensiones en los elementos planos de hormigón armado; logrando así una mejor comprensión del fenómeno que produce daños en los elementos. Esto permitiría posteriormente poder eliminar o reducir gradualmente las afectaciones; por tanto se define como **objetivo general**: Analizar el comportamiento de las tensiones que se generan en elementos planos de hormigón armado producto del gradiente de temperatura.

Para alcanzar la realización del mismo se trazan **objetivos específicos**:

- Analizar el estado de conocimiento a nivel nacional e internacional sobre la modelación estructural y el comportamiento de materiales sometidos a gradientes de temperatura.

- Modelar los elementos planos de hormigón armado en el *software* de cálculo SAP 2000.
- Analizar los resultados obtenidos de la modelación estructural (comportamiento de las tensiones en los puntos notables).

Variable dependiente:

- Tensiones en elementos planos de hormigón armado

Variable independiente:

- Características del hormigón
- Tipología de la estructura
- Cargas aplicadas

Pertinencia: Se presenta como una guía y una herramienta para analizar el fenómeno de la fisuración, no solo en la tipología estudiada en la investigación sino para extrapolar el análisis a otros tipos de elementos muy utilizados en Cuba como pueden ser las tipologías de grandes paneles u otros.

Las tareas principales de la investigación están estrechamente relacionadas con los objetivos específicos, las cuales son:

- El análisis del estado de conocimiento de la temática a nivel nacional e internacional.
- La realización del modelo de elementos planos de hormigón en el *software* de cálculo SAP2000.
- El análisis de las tensiones en los puntos notables de muros y losas.

Métodos Científicos:

Analítico-sintético. Establece la relación recíproca entre el análisis y la síntesis.

Inductivo-deductivo. Mediante la inducción se lleva a cabo un proceso donde el pensamiento va de las partes que constituyen un objeto o fenómeno hasta el todo, mientras que la deducción es el camino contrario.

Histórico-lógico. Se refiere a la historicidad y a la lógica implícita en la investigación, sobre todo a la que se corresponde con el problema científico objeto de estudio.

Hipotético-deductivo. La hipótesis es la respuesta anticipada del problema científico que se aborda en la investigación, la cual se logra a través de deducciones.

Modelación. Se refiere a la utilización de un modelo que imita a la realidad a una escala por lo general reducida (modelo icónico), o que entra en analogía con esa realidad (modelo analógico), existiendo además los llamados modelos teóricos.

El Trabajo de Diploma se estructura de la siguiente forma:

- Resumen / Abstract.
- Índice.
- Introducción.

En la cual se traza una situación problemática y se define el problema científico, objetivo general, objetivos específicos, la hipótesis y los métodos a seguir para la realización de la investigación.

- Capítulo 1: "Marco teórico Referencial de la investigación".

Se realiza un análisis del estado de conocimiento de la temática a nivel nacional e internacional, principalmente lo relacionado con la modelación de estructuras y elementos planos de hormigón.

- Capítulo 2: "Modelación de elementos de hormigón armado".

Mediante la utilización de un *software* de cálculo se modelan los elementos planos de hormigón sometido al gradiente térmico y se realiza el refinamiento o ajuste del modelo empleado.

- Capítulo 3: "Análisis de los resultados obtenidos".

Se analizan y dan a conocer los resultados obtenidos con la investigación (tensiones en los puntos notables de muros y losas).

- Conclusiones.

Partiendo de los objetivos trazados para la investigación, y la situación problemática; aplicando los métodos de la investigación se muestran los resultados obtenidos arribando a las conclusiones que respondan a dichos objetivos.

- Recomendaciones.

Se sugiere tanto a la Universidad de Matanzas como a las otras empresas interesadas que continúen con esta investigación ya que esto conlleva a un mejor desarrollo de las construcciones en Cuba.

- Bibliografía.
- Anexos.

CAPÍTULO 1 "MARCO TEÓRICO REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN".

Se realiza un análisis del empleo de los elementos planos de hormigón armado; losas y muros, se aborda el tema del comportamiento de estos bajo los gradientes de temperatura y los avances de la modelación estructural a partir del Método de Elementos Finitos en la elaboración de modelos estructurales.

1.1 Elementos planos de hormigón armado

1.1.1 Generalidades

El hormigón armado está conformado por cemento, arena, grava, agua y armadura de acero, estos dos elementos llegan a formar un solo cuerpo. Esto significa que este material está compuesto por hormigón y acero que forman un conjunto para enfrentar las cargas a las que este elemento será sometido. (Bustamante and Vásquez, 2018)

El material hormigón resiste muy bien las fuerzas de compresión, pues estas fuerzas favorecen el endurecimiento de la masa de hormigón y tienden a unir las partículas que lo forman. Por el contrario, el hormigón resiste mal las fuerzas de tracción y las fuerzas de cortante. Para superar esta deficiencia se embebe acero en la masa, que es un material que presenta gran resistencia a la tracción, así como también a la compresión, aunque en este estado requiere rigidez para no perder o reducir su resistencia y estabilidad por efecto de pandeo.(Hernández, 2017)

Frank Lloyd Wright dijo: "Los cordones de acero están allí para resistir la tracción, y el hormigón resiste a la compresión. Juntos los dos pueden resistir los esfuerzo de cualquier naturaleza".(Hernández, 2017)

Alrededor del mundo, el hormigón armado ha sido uno de los materiales más usados en la construcción, pues presenta grandes ventajas constructivas si se encuentra correctamente puesto en obra. (Bustamante and Vásquez, 2018)

En Cuba el hormigón armado ha sido y será por mucho tiempo el material constructivo por excelencia debido a sus reales posibilidades de fabricación con materiales de

producción nacional en su casi totalidad. Después del triunfo de la Revolución y acompañando el gran auge y desarrollo de las construcciones, se ha producido un gran salto en el uso de hormigón armado, mediante el elevado empleo de elementos planos de hormigón, dígase muros y losas, en las diferentes edificaciones. Entiéndase por elementos planos, elementos estructurales de pequeño espesor respecto a sus otras dimensiones.

Todavía quedan propiedades o manifestaciones en la forma de trabajo de los elementos de hormigón armado que pueden aparecer como contradictorios a primera vista o al menos, no concordantes con una explicación teórica aparentemente lógica. Ejemplo de ello es el fenómeno de la fisuración que debido a la gran cantidad de variables que influyen en él, su análisis por vía puramente teórica es prácticamente imposible, especialmente si se tiene en cuenta el carácter aleatorio de algunas de las variables.

1.1.2 Muros de hormigón armado

Se denomina muro de carga o muro portante a las paredes de una edificación que poseen función estructural; es decir, aquellas que soportan otros elementos estructurales del edificio, como arcos, bóvedas, vigas y cubierta.

Son elementos estructurales bidimensionales, ya que la tercera dimensión (espesor) es pequeña comparada con las dos dimensiones principales (largo y ancho).(Vera, 2017)

1.1.3 Losas de hormigón armado

Las losas son elementos estructurales bidimensionales, ya que la tercera dimensión (espesor) es pequeña comparada con las dos dimensiones principales (largo y ancho). Las cargas que actúan en las losas son perpendiculares al plano principal (cargas gravitacionales CV-CM), por lo que su comportamiento está dominado por la flexión. (Vera, 2017)

Deben ser capaces de soportar las cargas de servicio u ocupación como son cargas vivas: personas, y cargas muertas: peso propio de la estructura y el de los elementos no estructurales. Además deben trabajar como un diafragma horizontal rígido para atender la función sísmica, es decir ante cargas horizontales (viento, sismo). (Leonardo, 2017)

1.2 Experiencias nacionales e internacionales en el empleo de elementos planos de hormigón armado.

En la actualidad el desarrollo de la construcción se encuentra dominado por las estructuras de hormigón armado debido a sus excelentes propiedades mecánicas, alcanzando un gran auge en el empleo de elementos planos: muros y losas.

A nivel internacional se han empleado en disímiles obras, tales como el Centro Biotecnológico Animal (Bellaterra) usada como universidad, la cual presenta una textura lisa salida de molde y color blanco en masa. También se encuentra La Gripiá (Terrassa) usada como viviendas, tiene una textura decapada fina de color beige-rojo en masa. Otra estructura compuesta por elementos planos de hormigón armado es el Parc Europa (Barbera del Vallés) de textura muy lisa de color blanco y uso como edificio de viviendas. Por último se puede mencionar el Standing at 33 Thomas Street in the Civic Center neighborhood of New York City.

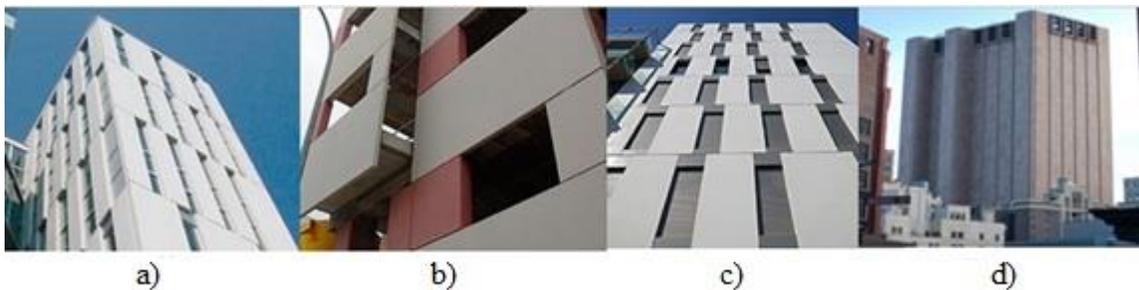


Figura 1.1 Empleo a nivel internacional de elementos planos de hormigón armado. a) Centro Biotecnológico Animal (Bellaterra) b) La Gripiá (Terrassa) c) Parc Europa (Barbera del Valles) d) Standing at 33 Thomas Street (New York City)

En Cuba también se ha puesto en práctica, por ejemplo en la construcción de sistemas prefabricados Gran Panel en todas las regiones del país. En el edificio FOCSA ubicado en la ciudad de La Habana y considerado entre las siete maravillas de la ingeniería civil en Cuba. Actualmente en la construcción de obras en Varadero se está desarrollando este

sistema de edificaciones en las cuales su estructura portante la componen elementos planos de hormigón armado, losas y muros portantes, siendo utilizados en el Hotel Internacional y Hotel Las Conchas.

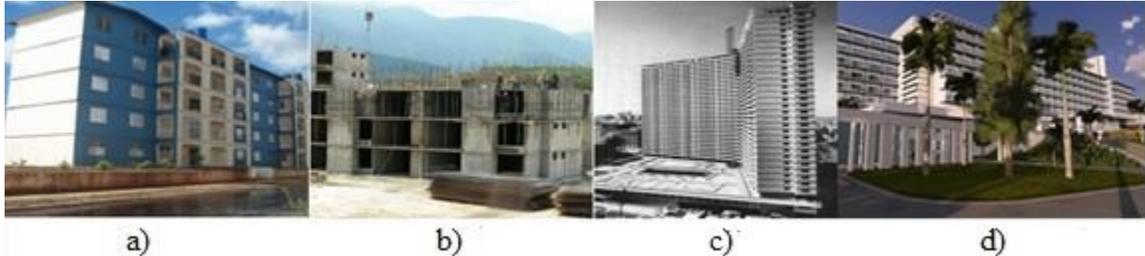


Figura 1.2 Empleo a nivel nacional de elementos planos de hormigón armado. a) Sistema Gran Panel VI b) Gran Panel 70 c) FOCSA d) Hotel Internacional

1.3 Ventajas y desventajas del uso de elementos planos de hormigón armado

Ventajas:

- Aumento de la capacidad portante total de la estructura.
- Facilidad de montaje y fabricación según el uso de los moldes o encofrados.
- Capacidad de cierre de los locales construidos según se terminan los elementos estructurales.

Desventajas:

- Dificultad para elaborar las uniones entre elementos.
- Surgimiento de áreas de tensiones producto a la alta hiperestaticidad que usualmente se presenta en estas estructuras.

1.4 Patologías constructivas en elementos planos de hormigón armado

Se puede definir la Patología Constructiva como la ciencia que estudia los problemas constructivos que aparecen en el edificio (o en algunas de sus unidades) después de su ejecución. (Sánchez, 2018)

Por tratarse de elementos de hormigón armado los defectos pueden ser originados por los materiales constitutivos componentes del hormigón: cemento, áridos, agua, aditivos. Cada uno de ellos puede presentar problemas específicos. (Pèrez, 2016)

Cemento

- Falso fraguado: debido a la hidratación rápida del yeso.
- Retracción hidráulica y por exceso de calor de hidratación.
- Exceso de cal libre: es expansivo, produciendo fisuraciones en el hormigón.

Áridos

- Exceso de finos (áridos de machaqueo), produce bajas de resistencia.
- Áridos muy alargados producen bajas de resistencia.
- Áridos compuestos de azufre, la pirita, que reaccionan con el cemento dando compuestos expansivos que destruyen completamente la masa de hormigón.

Agua

- Sustancias nocivas disueltas en agua que produzcan corrosión química del hormigón.
- Exceso de agua, que disminuye enormemente la resistencia final del hormigón.
- Empleo de agua de mar donde el exceso de iones cloro favorece la corrosión de la armadura.

Aditivos

- Algunos aditivos en exceso pueden modificar su comportamiento en sentido contrario. Esto se produce a nivel local, por lo que es muy importante que se repartan homogéneamente en toda la amasada.
- Los aditivos con menores problemas suelen ser los plastificantes.
- Cuidar las dosificaciones, asegurar un reparto homogéneo y utilizar aditivos de comportamiento suficientemente contrastado y convenientemente garantizados por el fabricante.

1.4.1 Sintomatología en elementos planos de hormigón armado

Las estructuras de hormigón armado pueden presentar numerosos tipos de problemas, que muchas veces rebasan los simples límites de los fallos resistentes, así fenómenos como la corrosión o la desagregación química pueden ser incluso más peligrosos y difíciles de reparar que un fallo en la armadura, que normalmente es el que parece más grave. (Pèrez, 2016)

Fenómenos a considerar:

- Fisuraciones
- Hinchazones
- Desagregaciones
- Disgregaciones
- Cambios de color
- Eflorescencias

Fisuración:

Las fisuras en el concreto se deben a las deformaciones de compresión y de tensión, y a las contracciones hidráulicas y térmicas. El concreto se deforma dependiendo de la carga y de las condiciones de apoyo. Además, las fisuras pueden ocurrir cuando no se han tomado las precauciones necesarias en el diseño y la construcción para soportar las sollicitaciones a las que se verá involucrada la estructura. (Yela, 2017)

Según (Pèrez, 2016) es una rotura en la masa de hormigón que se manifiesta exteriormente con un desarrollo lineal, y se clasifican de la siguiente manera:

- Microfisuras $e < 0,05\text{mm}$ en general carecen de importancia.
- Fisuras $0,1 < e < 0,2\text{mm}$ en general son poco peligrosas, salvo en ambientes agresivos, en los que pueden favorecer la corrosión.
- Macrofisuras $e > 0,2\text{mm}$ estas son las fisuraciones que pueden tener repercusiones estructurales de importancia.

En cuanto a su comportamiento se puede hablar de:

- Fisuras vivas; si continúan en movimiento, abriéndose o cerrándose.
- Fisuras muertas; si están ya estabilizadas en su estado final.

Tabla 1.1 Posibles causas de fisuras. (Pèrez, 2016)

<i>Causas</i>	
Curado deficiente	<i>Problemas del hormigón</i>
Retracción	
Entumecimiento	
Variaciones térmicas	
Ataque químico	
Solicitaciones excesivas	<i>Problemas de proyecto o de ejecución del hormigón</i>
Errores de proyecto	
Errores de ejecución	
Asientos	

Fisuras de origen térmico:

Se pueden producir por el gradiente de temperatura que se produce en el hormigón por su baja conductividad. Es importante una buena técnica de curado.

Otros efectos térmicos:

- Variaciones fuertes de temperatura.
- Focos puntuales de calor como chimeneas o calderas.
- Empujes producidos por congelación de agua, etc.

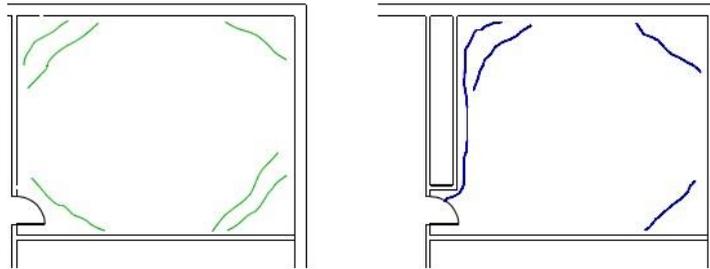


Figura 1.3 Fisuras en losas por variaciones fuertes de temperatura. (Pèrez, 2016)

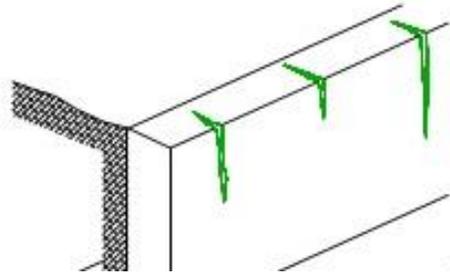


Figura 1.4 Fisuras en muros por variaciones fuertes de temperatura. (Pérez, 2016)

1.5 Gradientes de temperatura en elementos planos de hormigón armado

1.5.1 Generalidades. Antecedentes a la investigación

La temperatura es la propiedad física que se refiere a las nociones comunes de calor o ausencia de calor. La misma está en constante cambio; la temperatura del aire varía entre el día y la noche, entre una estación y otra, y también entre una ubicación geográfica y otra pudiendo llegar a estar bajo los 0° C y superar los 40° C en diferentes regiones del planeta. Las construcciones también se ven afectadas por estas variaciones llamadas gradientes de temperatura; cuando sus elementos están sometidos a bajas temperaturas en el interior de la edificación producto a la climatización, y en el exterior están expuestas a la radiación solar.

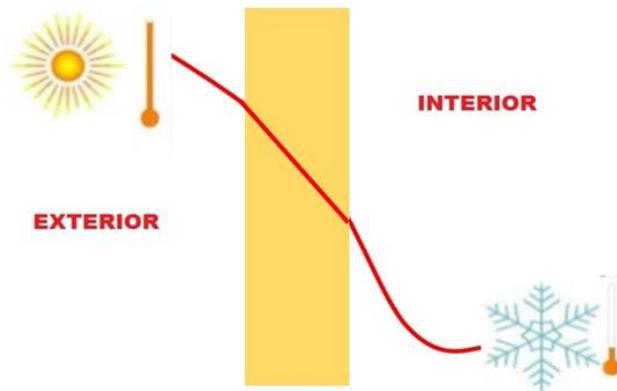


Figura 1.5 Esquema de concepto de gradiente térmico. (Elaboración propia)

Son muchos los autores que han investigado sobre el comportamiento térmico de estructuras de hormigón armado, así como el desarrollo de modelos computacionales que permiten un mejor estudio y comprensión de este fenómeno.

(Croppi and Sánchez, 2018) presentan un modelo numérico por el MEF donde se analiza el fenómeno de variación de temperatura, evolución de propiedades mecánicas y respuesta del material ante las tensiones generadas en el tablero de hormigón del viaducto de acceso al puente de Öresund, Dinamarca. Se tiene en cuenta condiciones ambientales extremas (temperaturas por debajo de los -20°C). La investigación se centra en poder contar con una herramienta capaz de modelar el fenómeno en dos y tres dimensiones, para optimizar el diseño y construcción de estructuras masivas de hormigón, donde el potencial de fisuración es elevado.

(Chalco and Proaño, 2018) también realizan estudios sobre el comportamiento térmico de las estructuras de hormigón armado, planteando que los diferenciales de temperatura son proporcionales a los valores de esfuerzos generados en los sistemas estructurales.

(Aguirre and Aguirre, 2018) exponen elementos de hormigón armado a altas temperaturas durante diferentes tiempos, y luego son enfriados a temperatura ambiente durante 24 h, momento en que se evaluaron mediante observación los cambios producidos.

Las variaciones de temperatura en el medio ambiente traen consigo efectos sobre las estructuras. Una consecuente fisuración puede influir notablemente en la durabilidad y funcionalidad de estas estructuras. (Crespo, 2011)

Cuando el hormigón aumenta de temperatura, se produce una disminución de las propiedades mecánicas que causa la reducción de la capacidad de carga de un elemento, se producen cambios de volumen inducidos por tensiones térmicas, además de generar expansión, tensiones, deformaciones y reducción de resistencia en los componentes estructurales. A esto, se suma la degradación de la adherencia en el acero inducida por la temperatura que influye en la propagación de grietas en el hormigón y que tiene un efecto sobre la integridad del mismo. (Aguirre and Aguirre, 2018)

La modelación numérica es una herramienta ampliamente utilizada hasta la fecha en la solución de problemas de ingeniería estructural en situación de elevadas temperaturas. (Larrua and Pignatta, 2013). El hormigón armado ante la presencia de altas temperaturas, aunque lentamente, puede desintegrarse hasta su total destrucción, incluyendo la corrosión de su armadura. (Zafra and Castellanos, 2019)

Con el desarrollo de la tecnología y la ingeniería se ha podido profundizar en el comportamiento de elementos de hormigón armado cuando son expuestos a fuertes gradientes térmicos, mediante *software* de modelación que permiten experimentar los fenómenos que sus estudios en la realidad son impracticables por su costo o peligrosidad.

Entre las investigaciones realizadas se puede citar a (Larrua and Pignatta, 2013) quienes desarrollan un modelo numérico bidimensional del ensayo de conexiones acero – hormigón a elevadas temperaturas, mediante el programa de computación SuperTempcalc (Temperature Calculation and Design v.5 para la modelación de problemas de transferencia de calor en ingeniería estructural), basado en el método de los elementos finitos. En general, se obtiene un modelo relativamente simple, eficiente y fácil de usar, que ofrece temperaturas fiables para el análisis estructural. Se plantea que la conductividad térmica y el calor específico del acero y el hormigón adoptan valores dependientes de la temperatura, en tanto la densidad de cada material se considera constante.

Dentro del estudio del comportamiento térmico de estructuras de hormigón armado se encuentran investigaciones basadas en la simulación de incendios reales, a través de modelos que permiten analizar la influencia de las variaciones de temperaturas en los diferentes elementos estructurales. En la tabla 1.2 se aprecian algunas de estas referencias.

Tabla 1.2 Referencias sobre simulaciones reales de incendios. (Elaboración propia)

<i>Autores</i>	<i>Software</i>	
(Medina, 2017)	FDS también conocido como “Fire Dynamics Simulator”.	Se determinó con bastante precisión qué elementos se verían mayormente afectados y estos han coincidido con aquellos que se especificaban en el incendio real.
(Carrera and Irigoyen, 2018)	FEA facilita la modelación térmica y estructural	Se simuló el sistema de entrepiso del edificio TORINO de la ciudad de Quito.
(Capote et al., 2011)	ABAQUS, SAP2000 y SAFE, mediante MEF	Se modelo la Torre Windsor de Madrid. Permite calcular el impacto global de la temperatura dentro de la estructura, así como el comportamiento de los elementos dentro de la trama estructural.

1.5.2 Influencia de los gradientes de temperatura en elementos planos de hormigón armado

Los elementos planos de hormigón armado son sometidos a la variación de la temperatura por causas inherentes a las temperaturas ambientales, las que se derivan de las condiciones de servicio de las estructuras o a condiciones extremas causadas por fenómenos naturales o fortuitos como el fuego. La radiación solar es uno de los factores climatológicos que muestra una gran influencia sobre la respuesta térmica de las estructuras de hormigón por la influencia sobre su superficie.

Problemas de elementos planos de hormigón en climas cálidos:

1. Pérdida de resistencia a edades de 28 días y posteriores como resultado de una mayor demanda de agua y de una temperatura mayor del hormigón.

2. Reducción de la durabilidad.
3. Mayor variación en la apariencia superficial.
4. Tendencia al agrietamiento y fisuración debido a diferenciales térmicos.

Una elevada temperatura, una baja humedad relativa y una alta velocidad del viento, o la combinación de estos factores pueden ocasionar problemas en elementos planos de hormigón. La diferencia de temperatura máxima permitida, debe ser controlada con el objeto de minimizar la posible fisuración térmica; esto sucede cuando las contracciones debidas al enfriamiento de la superficie provocan tensiones de tracción que superan la resistencia a tracción del hormigón, sobre todo a primeras edades. A altas temperaturas se ocasionan tensiones internas altas de tracción por las diferencias de deformaciones entre el cemento, los áridos y el refuerzo. (Almusallam, 2001)

La diferencia de temperatura máxima permitida está en función de las propiedades mecánicas del hormigón, tales como la expansión térmica, la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad, así como del tamaño y restricciones existentes en el elemento estructural. (Gajda and Vangeem, 2002)

Las variaciones de temperaturas de carácter climático, inducen principalmente en las estructuras hiperestáticas de hormigón armado, tensiones complementarias, las cuales, cuando la longitud de la estructura es grande, llegan a ser considerables. Para disminuirlos, las estructuras y edificios largos se dividen en partes, mediante juntas de dilatación o temperatura, las cuales generalmente coinciden o se hacen coincidir con las juntas de retracción. (Gajda and Vangeem, 2002)

1.6 Modelación estructural

1.6.1 Generalidades. Ventajas y desventajas

La modelación es el proceso mediante el cual se genera una idealización matemática que pretende representar la conducta real de la estructura a ser construida. (Sánchez, 2018)

Su empleo para el análisis estructural se ha extendido a tal grado, que se ha llegado a la etapa de dimensionamiento con algunos programas más sofisticados, a la elaboración de

planos estructurales y sus especificaciones. Este proceso sin duda alguna es muy beneficioso y va a redundar con mayor eficiencia y precisión en el diseño, siempre y cuando se empleen con cordura y con conocimientos adecuados del programa.(Sánchez, 2018)

Conlleva a la toma de decisiones respecto a los siguientes aspectos: la geometría de la estructura, las propiedades de los materiales que la constituyen, la magnitud y ubicación de cargas permanentes y variables, los tipos de elementos que la pueden representar con mayor fidelidad (1, 2 o 3 dimensiones), las conexiones internas entre estos elementos, los apoyos externos y la interacción de la estructura con el medio circundante (suelos, líquidos u otros materiales). (Quiroga, 2017)

Ventajas de la modelación computacional:

- Es empleada cuando no existe una formulación matemática analíticamente resoluble. Muchos sistemas reales no pueden ser modelados matemáticamente con las herramientas actualmente disponibles. Existe una formulación matemática, pero es difícil obtener una solución analítica.
- No existe el sistema real. Es problema del ingeniero que tiene que diseñar un sistema nuevo. El diseño del sistema mejorará notablemente si se cuenta con un modelo adecuado para realizar experimentos.
- Los experimentos son imposibles debido a impedimentos económicos, de seguridad, de calidad o éticos. En este caso el sistema real está disponible para realizar experimentos, pero la dificultad de los mismos hace que se descarte esta opción.

Desventajas de la modelación computacional:

- El desarrollo de un modelo puede ser costoso, laborioso y lento.
- Existe la posibilidad de cometer errores. No se debe olvidar que la experimentación se lleva a cabo con un modelo y no con el sistema real; entonces,

si el modelo está mal o se cometen errores en su manejo, los resultados también serán incorrectos.

1.7 Método de Elementos Finitos

1.7.1 Generalidades

El MEF permite realizar un modelo matemático del problema real, que aunque se obtienen resultados aproximados, el nivel de aproximación al sistema real es lo suficientemente bueno como para aceptarlo, lo cual ha influido en que se usen menos los modelos a escala, reduciendo así los costos de análisis y el tiempo necesario para resolver los problemas (Quiza, 2015)

En todos los modelos de elementos finitos el dominio o continuo se divide en un número finito de formas simples denominadas elementos. Las propiedades y las relaciones gobernantes del fenómeno estudiado se asumen sobre estos elementos, y se expresan matemáticamente en términos de valores desconocidos en puntos específicos de los elementos denominados nodos. Estos nodos sirven de conexión entre los elementos. El método de los elementos finitos trata de seleccionar los desplazamientos nodales de forma que los esfuerzos estén en equilibrio (de forma aproximada) con las cargas aplicadas.(García, 2016)

1.7.2 Tipos de elementos y mallado

La discretización consiste en la sustitución del sistema continuo por otro discreto más sencillo cuya solución sea una aproximación con un alto grado de precisión del primero. Esta discretización puede afectar tanto al dominio espacial como al temporal. Cuando se lleva a cabo sobre el dominio temporal, se denomina mallado.(Xenos and Grassl, 2016)

Los elementos que conforman la malla pueden tomar diferentes formas, en dependencia de las características del sistema modelado. Teniendo en cuenta su dimensionalidad, los elementos se clasifican en unidimensionales (barras, vigas, etc.), bidimensionales (triángulos, cuadriláteros, etc.) y tridimensionales (tetraedros, pentaedros, hexaedros, etc.).



Figura 1.6 Elementos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales.
(Elaboración propia)

Es importante señalar que la dimensionalidad de los elementos no tiene que coincidir necesariamente, con la del sistema. Por ejemplo, una armadura tridimensional puede discretizarse a través de elementos unidimensional tipo barra.

Los nodos son determinados puntos de los elementos, que se utilizan tanto para definir su geometría como para concentrar los grados de libertad. Los nodos se ubican, normalmente, en los vértices de los elementos, aunque en los elementos de orden superior (cuadráticos, cúbicos, etc.), también están situados en los lados y en el interior de los elementos.

Los grados de libertad totales de un elemento es la suma de los grados de libertad de cada uno de sus nodos.

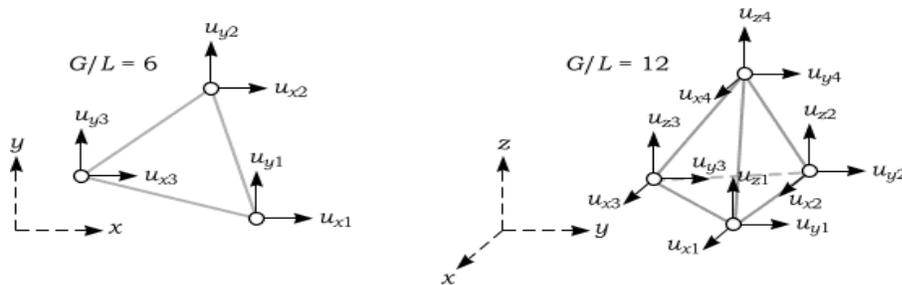


Figura 1.7 Grados de libertad. (Quiza, 2015)

El mallado es un proceso complejo y muchas veces debe probarse diferentes soluciones antes de poder determinar cuál es más efectiva, la principal regla para llevar a cabo el mallado de un sistema es hacerlo tan simple como sea posible, esto es: no utilizar elementos de orden superior, a menos que sea absolutamente necesario; y emplear los elementos tan

grandes como sea posible, sin afectar la precisión de los resultados.(Bitencourt et al., 2018)

El mallado debe hacerse más fino en aquellas regiones donde se espera un alto gradiente de deformaciones o tensiones, por ejemplo: en entalladuras, grietas o radios de redondos muy agudos; en la vecindad de cargas o reacciones concentradas; en lugares con cambios bruscos de la sección transversal, el espesor o las propiedades del material. A este proceso se le conoce como refinado de la malla.(Hajiloo and Green, 2019)

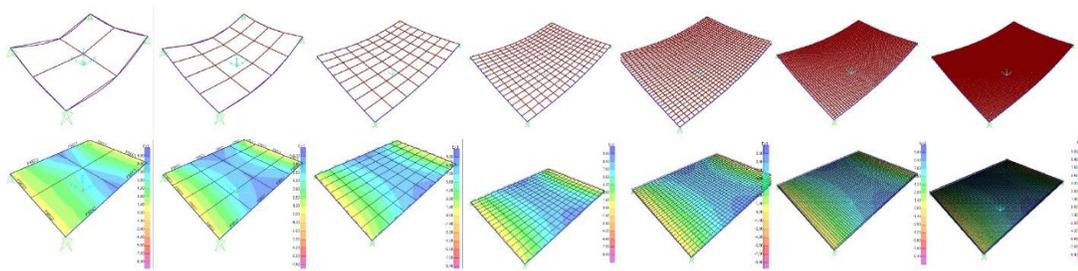


Figura 1.8 Refinado de la malla. (Elaboración propia)

Un aspecto importante para garantizar el correcto funcionamiento del método de elementos finitos es que los elementos del mallado tengan una adecuada relación de aspecto, es decir, que se parezcan lo más posible a la correspondiente figura regular.

1.7.3 Ventajas y desventajas del Método de los Elementos Finitos

El método de los Elementos Finitos es un método muy versátil y poderoso, permitiéndoles a los ingenieros obtener información respecto al comportamiento de objetos de forma complicada bajo cualquier estado de carga. Puede resolver problemas en estado estable o dependientes del tiempo, lineal o no lineal, así como manejar materiales especiales: no homogéneos, ortotrópicos y anisotrópicos. Se pueden considerar además efectos especiales sobre los materiales: plasticidad, propiedades dependientes de la temperatura, etc. A nivel empresarial, son notorias la ventajas que trae consigo, la etapa de desarrollo de un producto se acorta, se pueden identificar

problemas de diseño antes de la fabricación de cualquier prototipo, se reducen las etapas de prueba y error en el diseño de un nuevo producto. (García, 2016)

Una de las principales limitaciones del método es que para una mejor precisión de los resultados, se deben aumentar la densidad de los elementos en la malla, pero aumenta considerablemente el tiempo computacional, generando así un mayor costo. Los *software* de Elementos Finitos se han vuelto casi que indispensables para los ingenieros estructurales, en el diseño de estructuras, pero esto no salva la necesidad de que los mismos pasen por un proceso de validación, para detallar con más exactitud los resultados obtenidos. La formulación de los resultados puede ser tan bien presentada que infunden una gran confianza en el análisis hecho, es cuando se comenten errores con gran confianza. Los resultados deben ser comparados con los obtenidos de modelos de cálculos simplificados calculados a mano. "El método de los Elementos Finitos puede hacer de un ingeniero bueno uno mejor, y de un mal ingeniero uno más peligroso".(García, 2016)

1.8 Software de cálculo de estructuras. SAP 2000

Es evidente que la informática es una herramienta de uso común en el cálculo estructural. Son diversos los programas de análisis y diseño de estructuras, actualmente entre los programas de mayor importancia se encuentran SAP2000, ETABS, STAAD, TEKLA, CADRE y RESCOL.

SAP 2000 es un programa desarrollado por la empresa CSI, *Computer and Structures, Inc.* en Berkeley, California, EEUU. Desde hace más de 30 años ha estado en continuo desarrollo, para brindarle al ingeniero una herramienta, confiable, sofisticada y fácil de usar sobre la base de una poderosa e intuitiva interfaz gráfica con procedimientos de modelaje, análisis y diseño estructural a la vanguardia a nivel mundial, SAP 2000 es el descendiente directo de la familia SAP 90.

Dicho *software* determina a través del método de elementos finitos la respuesta en términos de fuerza, esfuerzos y deformadas en los elementos de área y sólidos, presentando una salida gráfica y por tablas, haciéndolo una herramienta muy versátil para

ingenieros estructurales dedicados a la investigación, desarrollo de proyectos y construcción. (García, 2016)

El programa de cálculo estructural SAP 2000, dentro del campo del cálculo estructural con base en elementos finitos, es uno de los más extendidos a nivel mundial gracias fundamentalmente a su flexibilidad; característica que lo hace igual de apropiado para su uso tanto en ingeniería como en arquitectura. (Gallardo, 2019)

1.9 Conclusiones parciales del capítulo

- Las fisuras son roturas que aparecen en el hormigón como consecuencia de tensiones superiores a su capacidad resistente, pudiendo ser provocadas por fuertes cambios de temperatura. Los elementos planos de hormigón armado (elementos estructurales de pequeño espesor respecto a sus otras dimensiones); muros y losas, son sometidos a estas variaciones también llamadas “gradiente térmico”.
- Las construcciones se ven afectadas por variaciones de temperatura; cuando sus elementos están sometidos a bajas temperaturas en el interior de la edificación producto a la climatización, y en el exterior están expuestas a la radiación solar.
- Con la existencia de *software* computacional, integrado con el método numérico de los elementos finitos, la modelación ha ganado en los últimos años un auge incomparable, permitiendo el análisis de fenómenos como la fisuración, que no pueden ser reproducidos o experimentados en la realidad.

CAPÍTULO 2: " MODELACIÓN DE ELEMENTOS PLANOS DE HORMIGÓN ARMADO "

Se realizan dos modelos, un módulo aislado expuesto a la temperatura ambiente y otro módulo total sometido al gradiente de temperatura para analizar la influencia del diferencial térmico. Se hace el refinamiento de la malla y el ajuste de ambos modelos.

2.1 Módulo aislado

Se realiza un módulo aislado con el objetivo de analizar cómo se distribuyen las tensiones en elementos que están relativamente aislados (poca área), y comprobar tensiones en elementos que no están puestos en explotación, es decir solo temperatura aplicada.

2.1.1 Descripción del modelo

Geometría: El elemento a analizar es un muro portante de hormigón armado con 0,20 m de espesor, 7 luces de 4 m de largo y 2,90 m de altura, con un área total de 81,2 m². Presenta una viga de cimentación de 0,20 m de ancho y 0,30 m de peralte.

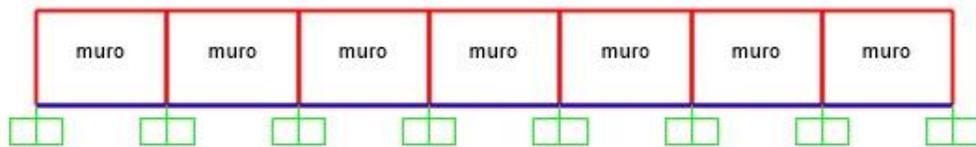


Figura 2.1. Muro de hormigón. (Elaboración propia en SAP 2000)

Condiciones de apoyo: El muro se considera rígido, unido en cada junta con el paño siguiente a partir de empotramientos y totalmente apoyado sobre la viga.

Materiales: El muro es de hormigón armado, del cual se muestra su curva de comportamiento a continuación, en ella se evidencia que las tensiones máximas a compresión son significativamente mayores que a tracción, se muestra además las deformaciones y tensiones de rotura.

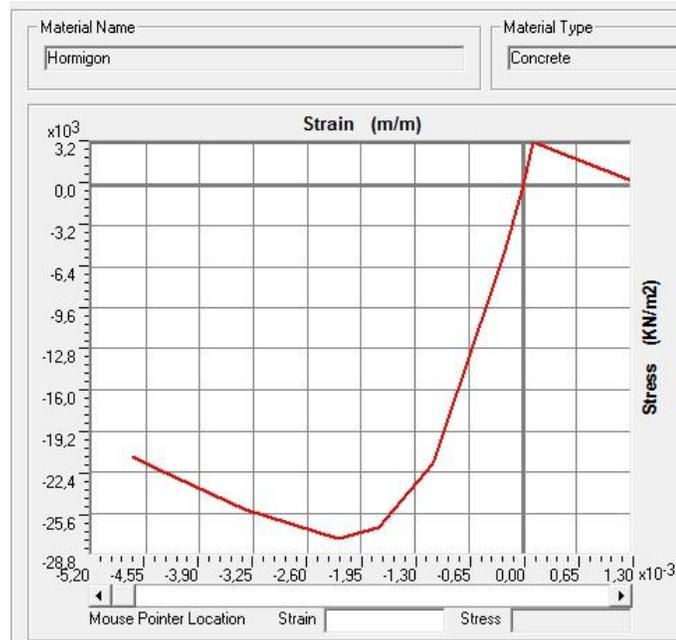


Figura 2.2 Curva de comportamiento tenso-deformacional del Hormigón. (SAP 2000)

Tabla 2.1 Detalles del hormigón

<i>Detalles del material</i>	
Peso por unidad de volumen [kN/m ³]	23,5631
Masa por unidad de volumen [kg/m ³]	2,4028
Módulo de elasticidad, E [kN/m ²]	24855578
Módulo de Poisson, U	0,2
Coefficiente de expansión térmica, A [°C ⁻¹]	9,900E-06
Módulo de cortante, G[kN/m ²]	10356491
Resistencia a compresión, f'c [kN/m ²]	27579,032

Cargas: Las cargas a tener en cuenta serán las del peso propio del material y por temperatura, la cual será aplicada con un aumento progresivo en cada paso de análisis, comenzando por 25⁰C hasta 34,3 ⁰C, siendo la máxima registrada en el año 2018.

Tabla 2.2 Datos de temperatura máxima de la Estación Meteorológica de Superficie Varadero (78328). Año 2018

	Máxima Absoluta Mensual (°C)
Enero	28.3
Febrero	28.5
Marzo	33.0
Abril	33.0
Mayo	30.5
Junio	32.5
Julio	34.3
Agosto	32.5
Septiembre	32.0
Octubre	31.1
Noviembre	32.0
Diciembre	31.2

Tipos de elementos:

Objetos de área: Son usados para modelar muros, pisos y otros miembros delgados, mientras que para los sólidos en dos dimensiones se emplean otros como: *plane stress*, *plane strain*, and *axisymmetric solids*.

Elementos finitos usados para modelar el muro de 0,20 m de espesor: Tipo *Shell*.

Elementos finitos usados para modelar la viga de cimiento de 0,20 m de ancho y 0,30 m de peralte: Tipo *Frame*.

2.1.2 Ajuste del modelo

Densidad del mallado: Se realiza un mallado progresivo 2^n , dando como resultado los siguientes modelos:

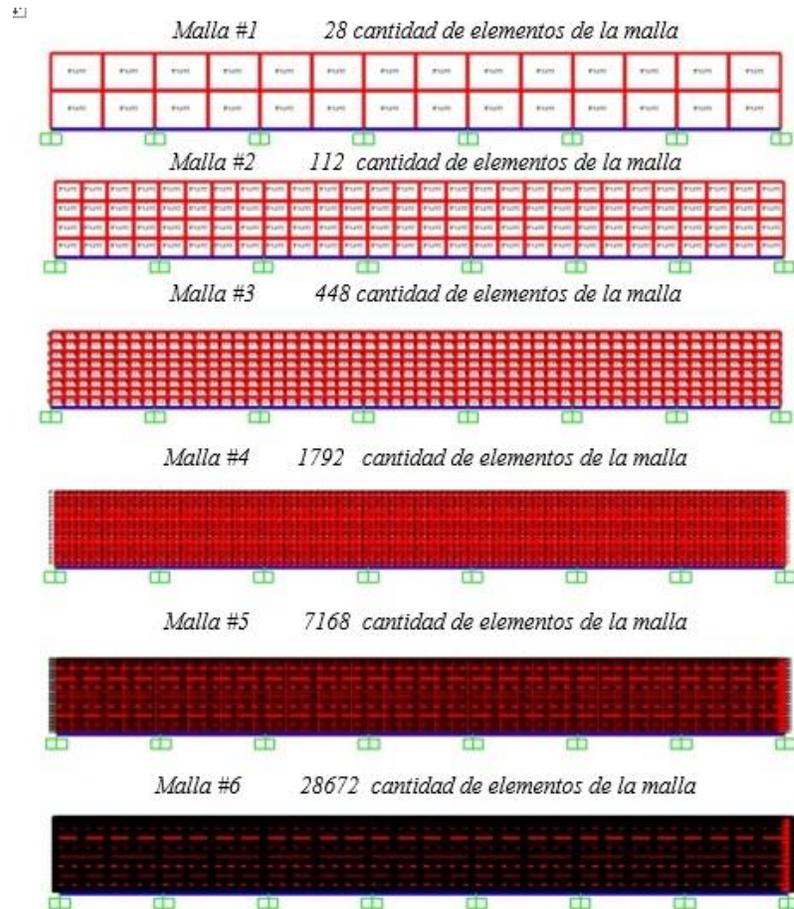


Figura 2.3 Mallado progresivo de muro de hormigón. (Elaboración propia en SAP 2000)

Ajuste de la malla: Para una mejor comprensión del comportamiento del muro se describen las tensiones y deformaciones que actúan en el mismo en los puntos siguientes:

- Borde bajo de la esquina del muro (Punto 1)
- Borde central de la esquina del muro (Punto 2)
- Borde alto de la esquina del muro (Punto 3)
- Borde alto del centro del muro (Punto 4)

- Centro del muro (Punto 5)
- Borde bajo del centro del muro (Punto 6)

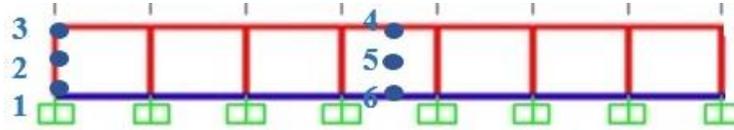


Figura 2.4 Puntos comprobados. (Elaboración propia en SAP 2000)

Tabla 2.3 Resultado de las tensiones en los puntos comprobados.

Cant. de elementos	Tensiones (kN/m ²)					
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
28	9,289592	38,166649	0,190899	1,215060	36,864933	124,33396
112	37,768829	13,301486	6,236738	1,895061	23,830505	64,822116
448	84513232	6,371803	1,321816	3,071005	4,951677	40,742226
1792	94,066498	1,481747	0,226535	2,359333	0,950911	36,659696
7168	176,046694	0,383348	0,119363	1,295104	0,978115	37,693822
28672	178,304025	0,382125	0,025304	1,283402	0,965703	37,504202

Tabla 2.4 Resultado de las deformaciones en los puntos comprobados.

Cant. de elementos	Deformaciones (m)					
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
28	0	0,00009378	0,00001105	0,00001143	0,00001106	0,00001497
112	0	0,00001334	0,00001541	0,00001654	0,00001665	0,00001775
448	0	0,00001651	0,00001832	0,00002001	0,00002003	0,00002068
1792	0	0,00001816	0,00001937	0,00002139	0,00002135	0,00002193
7168	0	0,00001824	0,00001969	0,00002188	0,00002180	0,00002238
28672	0	0,00001826	0,00001972	0,00002204	0,00002185	0,00002245

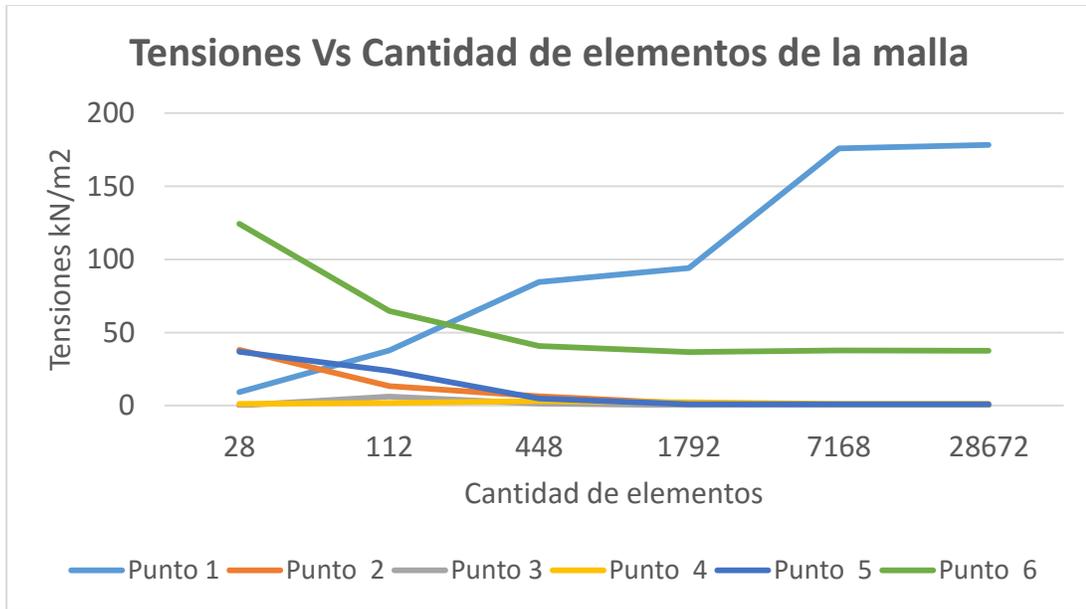


Figura 2.5 Tensiones en el muro de hormigón. (Elaboración propia)

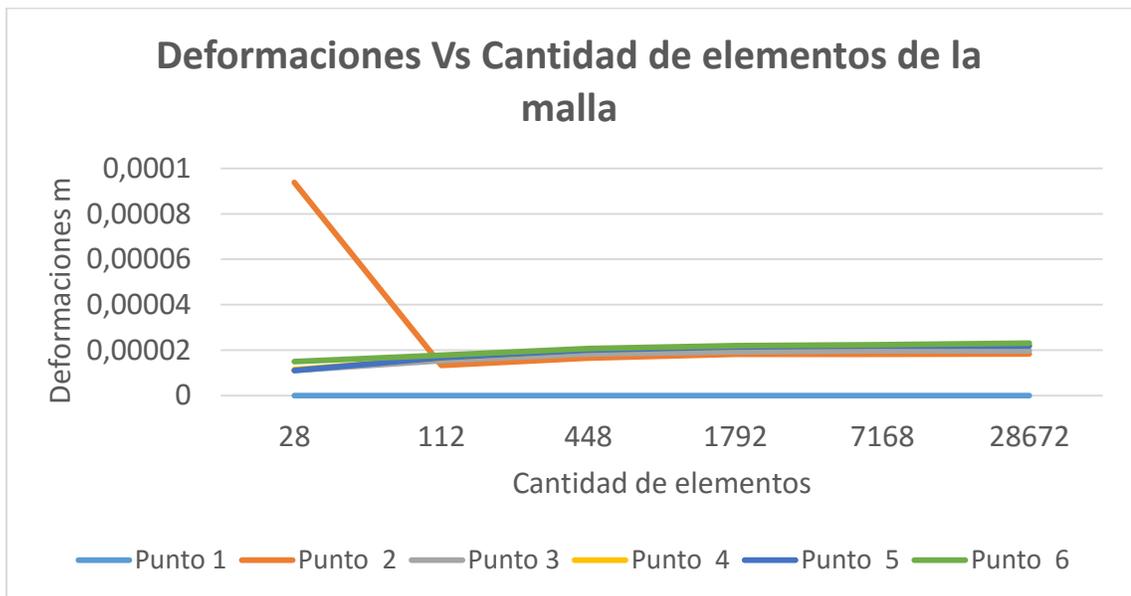


Figura 2.6 Deformaciones en el muro de hormigón. (Elaboración propia)

En ambos gráficos se puede observar como las tensiones y deformaciones mantienen un comportamiento lineal a partir de los 7168 cantidad de elementos de la malla, quedando así ajustado el modelo.

2.2 Módulo total

La estructura a modelar es un edificio de 3 plantas de muros portantes, la cual no es una edificación real, pero se toma como guía los planos de un edificio similar a este, la misma no posee ninguna irregularidad en planta o en elevación. Dicha edificación se supone ubicada en Varadero.

2.2.1 Descripción del modelo

Geometría: El modelo físico presenta en su geometría 7 luces de 4 m a lo largo y 3 luces de 5 m a lo ancho. Presenta 3 niveles. Se toma como referencia características del sistema de muros portantes de edificios similares construidos en Cuba. Los muros poseen un espesor de 0,20 m y las losas de 0,12 m. Puntal NPT a NPT = 2,90 m. Posee 1 escalera en el centro del edificio.

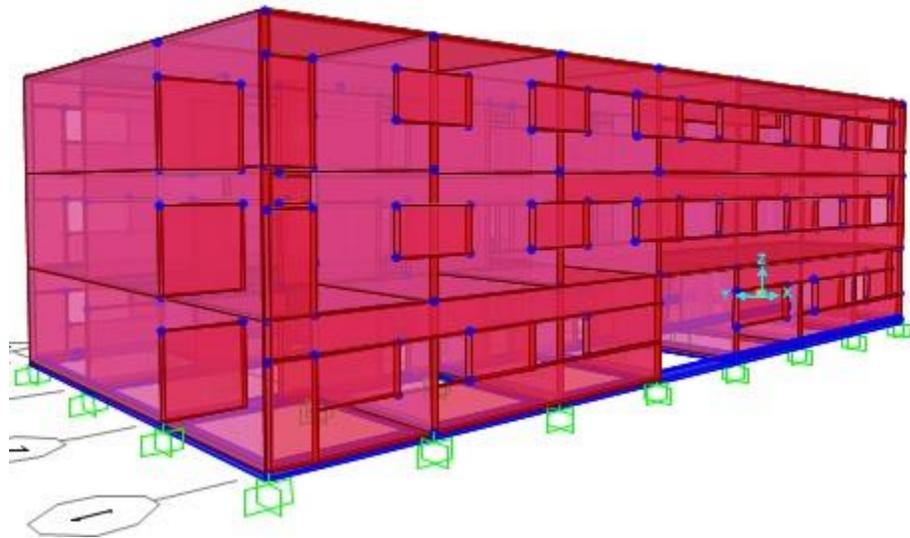


Figura 2.7 Geometría del edificio. (Elaboración propia en SAP 2000)

Condiciones de apoyo: La unión entre los muros se considera totalmente rígida así como la unión entre las losas. Las uniones losa muro se consideran totalmente empotradas. Los muros de la planta baja están apoyados sobre una viga de cimentación.

Materiales: La estructura está compuesta por hormigón de características iguales al empleado en el módulo aislado.

Cargas: Para la determinación de las cargas de uso, se tiene en cuenta el desagüe por tragante no accesible al público y como uso se pretende un edificio de habitaciones de hotel (según NC: 284:2003 Edificaciones. Cargas).

En cuanto a las cargas permanentes, la cubierta está compuesta por losas de hormigón armado y 3 capas de papel asfáltico, mientras que los entrepisos se componen de losa de hormigón armado, 5 cm de relleno de mejoramiento, 2 cm de mortero y losas cerámicas de 2 cm de espesor (según NC: 283:2003 Densidad de materiales naturales, artificiales y de elementos de construcción como carga de diseño).

Para las cargas térmicas se toma la temperatura máxima ambiente registrada en el año 2018 de 34,3 °C y 16 °C producto de la climatización. Se realiza la variación del gradiente para estudiar el comportamiento de las tensiones.

Se definen en el programa las Cargas de Uso, las Cargas Permanentes y Cargas Térmicas, se introduce una combinación igual a $1,2 (G + F + T) + 1,6 (Q + H) + 0,5 Q_c$ (como indica la NC: 450:2006 Edificaciones-Factores De Carga O Ponderación-Combinaciones).

Tipos de elementos: Al igual que en el modelo anterior se empleó el elemento finito tipo *Shell*.

Elementos finitos usados para modelar los muro de 0,20 m de espesor: Tipo *Shell*.

Elementos finitos usados para modelar las losas de 0,12 m de espesor: Tipo *Shell*.

Elementos finitos usados para modelar la viga de cimiento de 0,20 m de ancho y 0,30 m de peralte: Tipo *Frame*.

2.2.2 Ajuste del modelo

Densidad del mallado: Se realiza un mallado progresivo 2^n , dando como resultado los siguientes modelos:

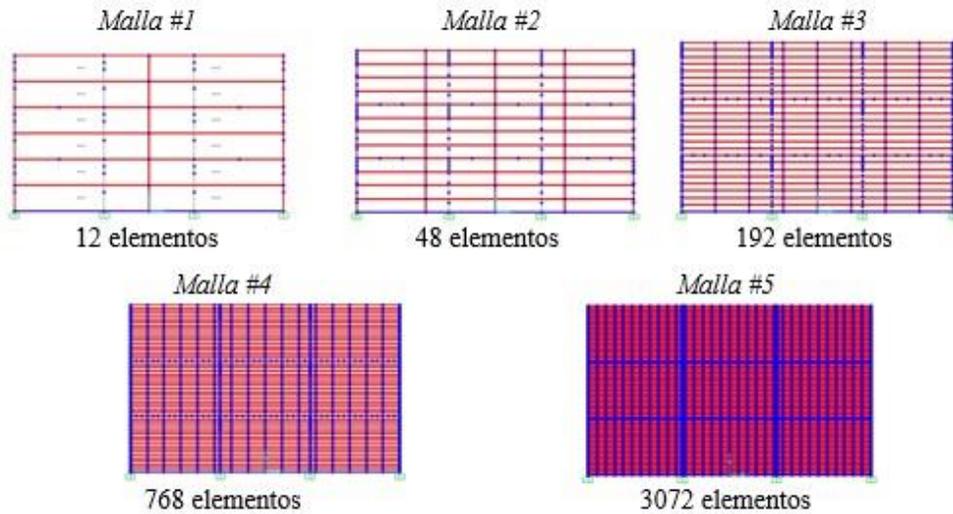


Figura 2.8 Mallado progresivo de muros laterales. ((Elaboración propia en SAP 2000))

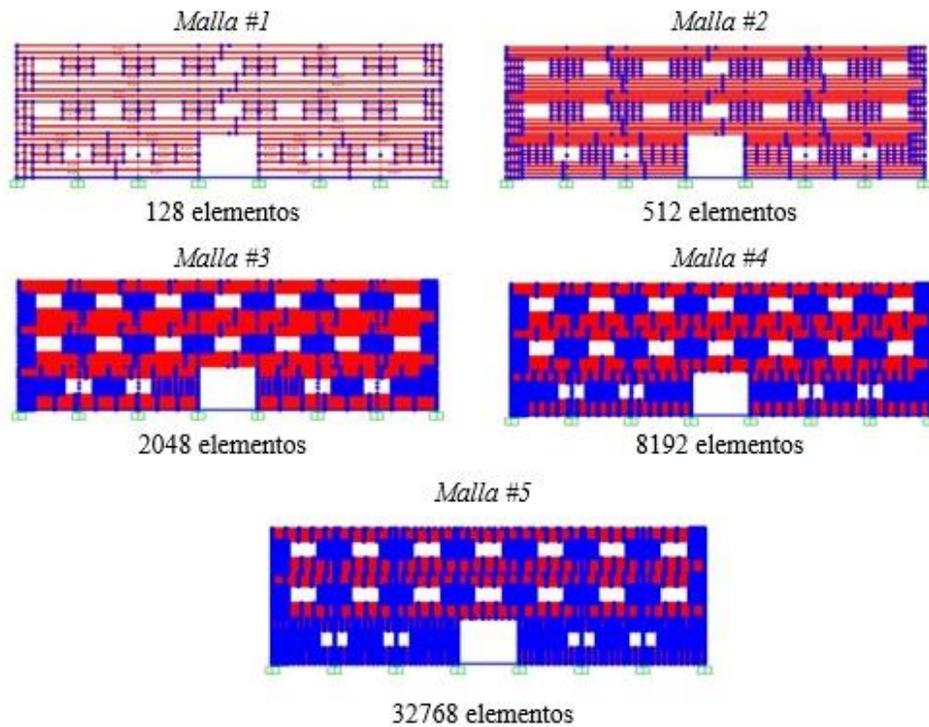


Figura 2.9 Mallado progresivo de muros frontales. ((Elaboración propia en SAP 2000))

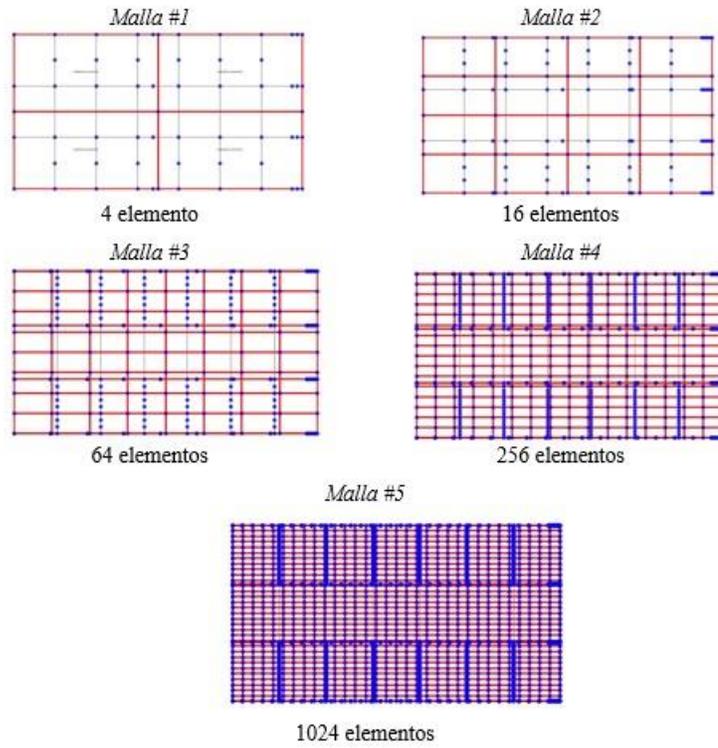


Figura 2.10 Mallado progresivo de losa de cubierta. (Elaboración propia en SAP 2000)

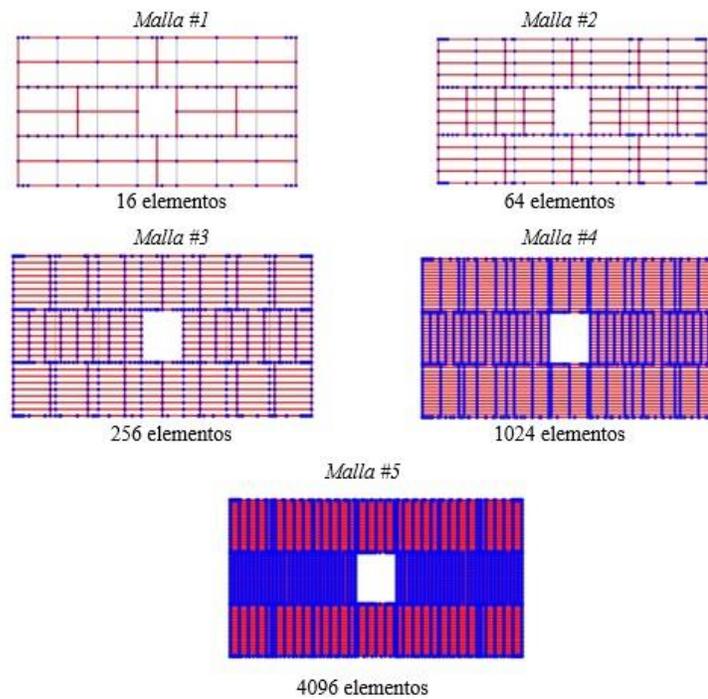


Figura 2.11 Mallado progresivo de entrepisos. (Elaboración propia en SAP 2000)

Ajuste de la malla: Para una mejor comprensión del comportamiento de los muros y losas se describen las tensiones y deformaciones que actúan en los puntos donde se esperan los valores más elevados.

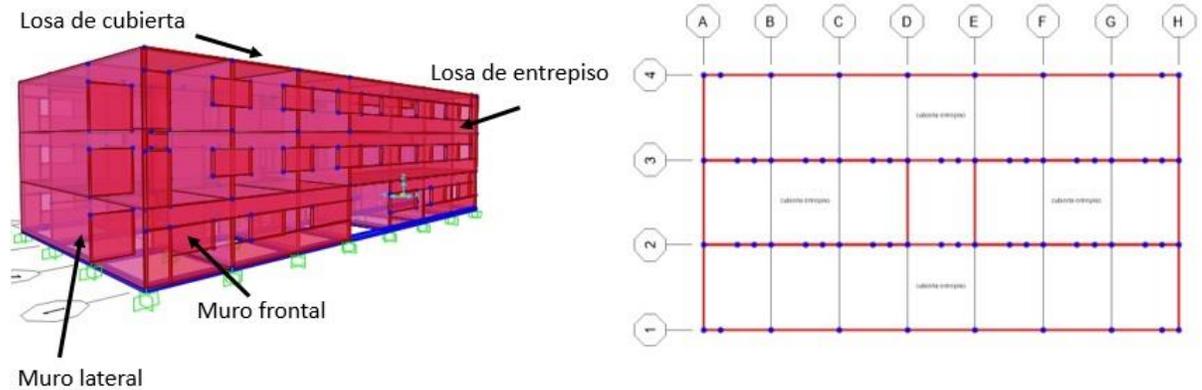


Figura 2.12 Vista en planta y elevación del edificio. (Elaboración propia en SAP 2000)

Se determinaron las tensiones y deformaciones en todos los elementos del modelo: muros laterales acotados de A-H, muros frontales de 1-4, losa de cubierta y losa de entrepisos 1 y 2. Los resultados de estas mediciones se encuentran en anexos 1 y 2.

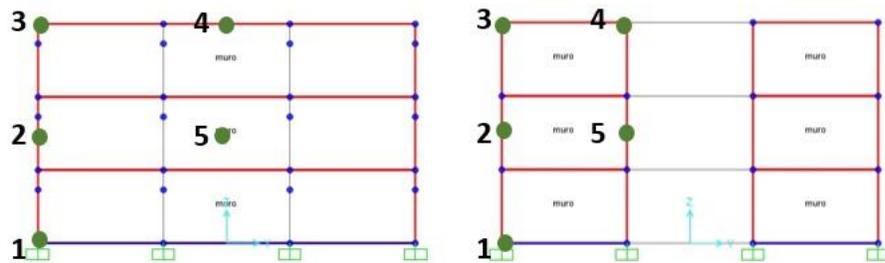


Figura 2.13 Puntos del muro lateral. (Elaboración propia en SAP 2000)

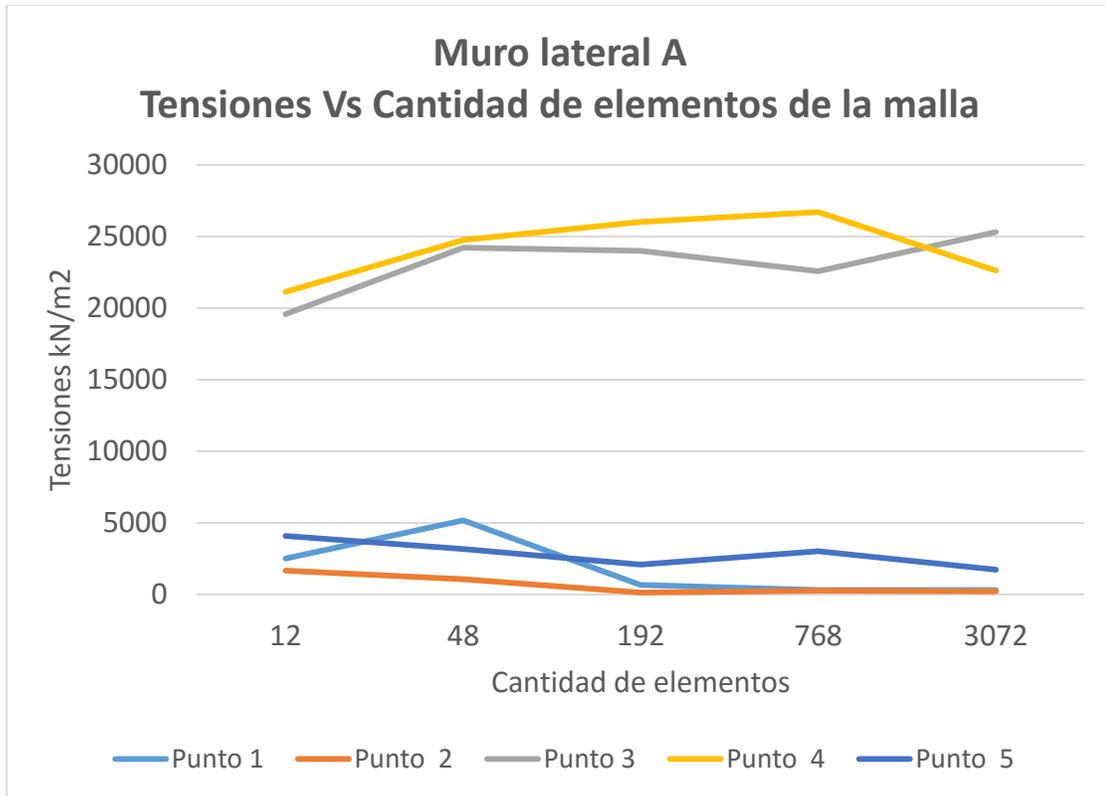


Figura 2.14 Tensiones en el muro lateral A. (Elaboración propia)

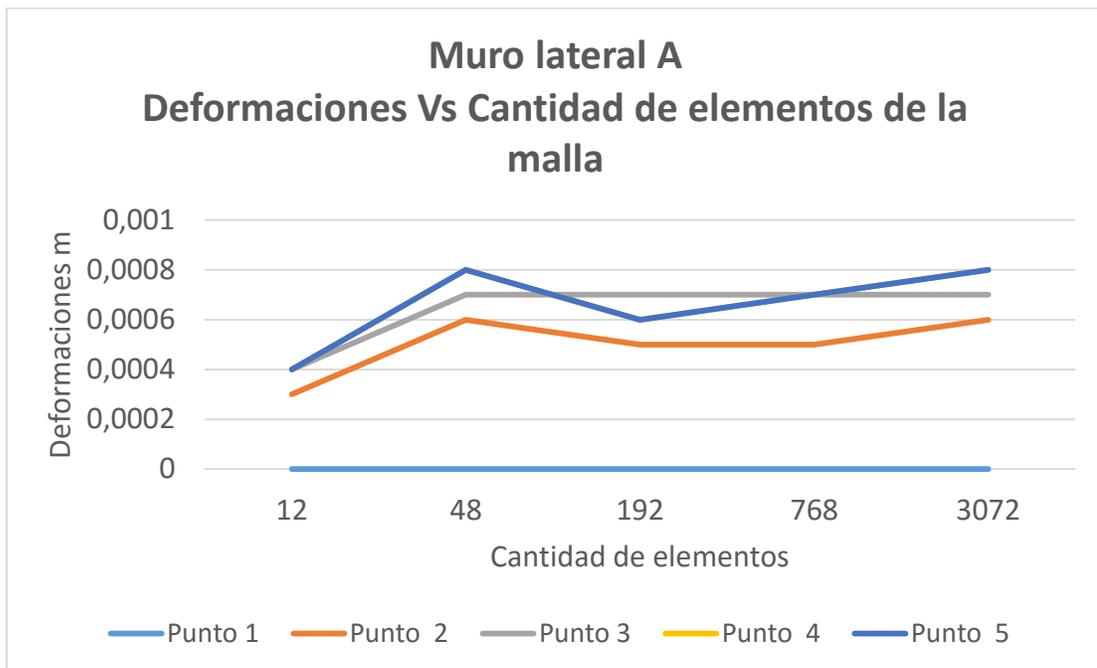


Figura 2.15 Deformaciones en el muro lateral A. (Elaboración propia)

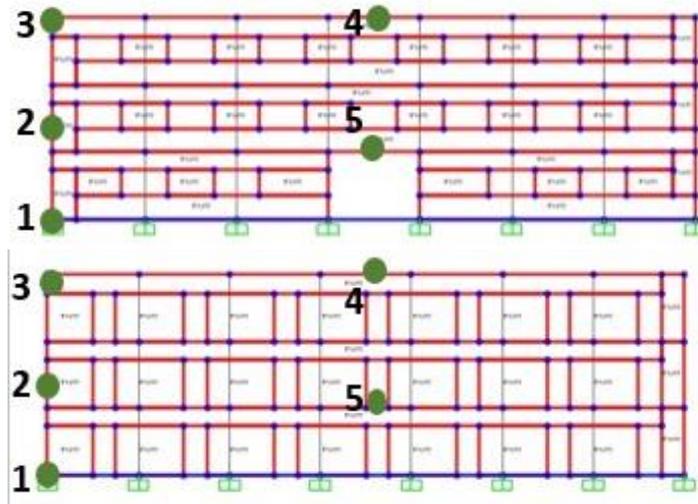


Figura 2.16 Puntos del muro frontal. (Elaboración propia en SAP 2000)

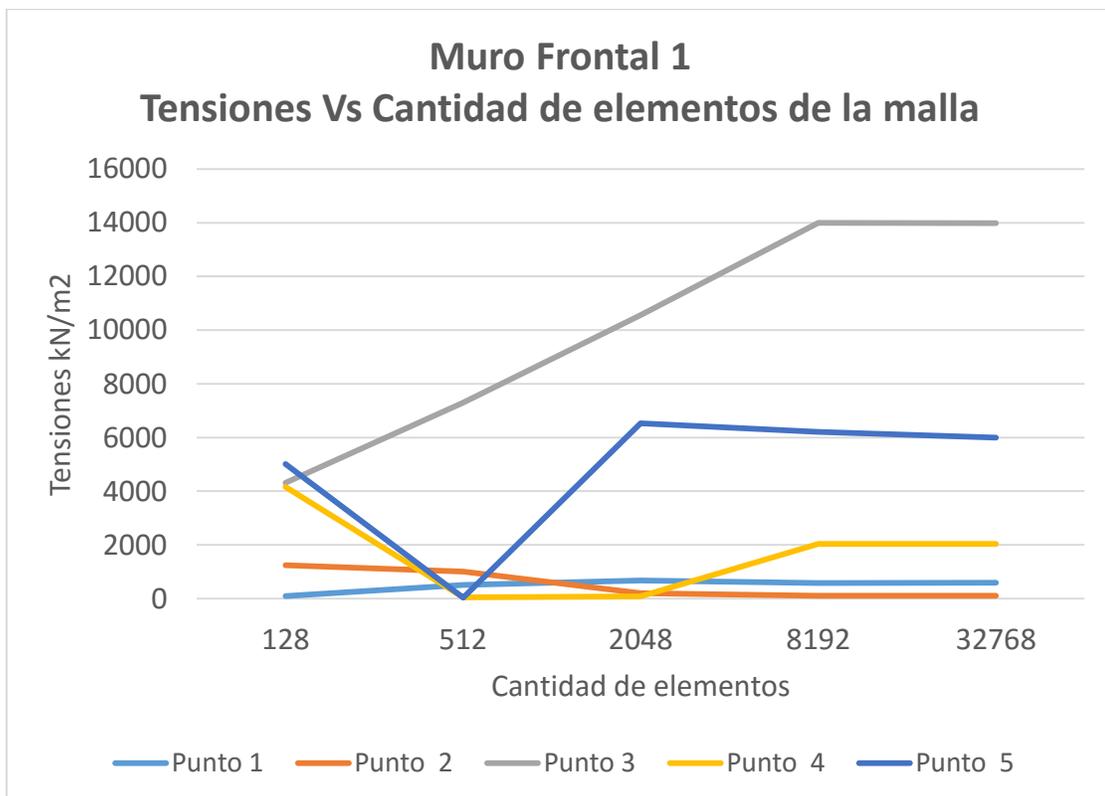


Figura 2.17 Tensiones en el muro frontal 1. (Elaboración propia)

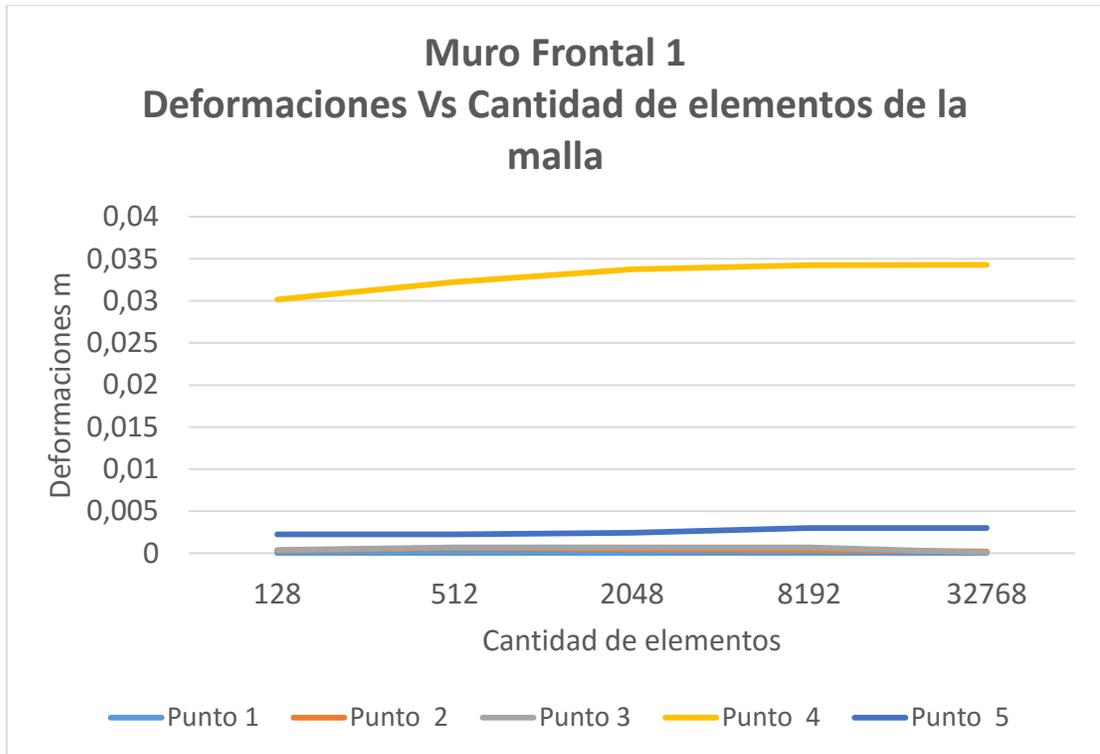


Figura 2.18 Deformaciones en el muro frontal 1. (Elaboración propia)

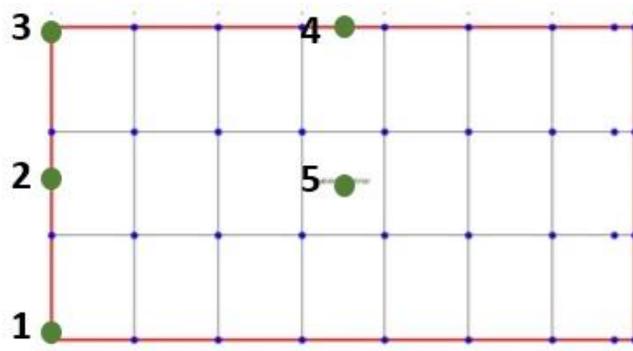


Figura 2.19 Puntos de losa de cubierta. (Elaboración propia en SAP 2000)

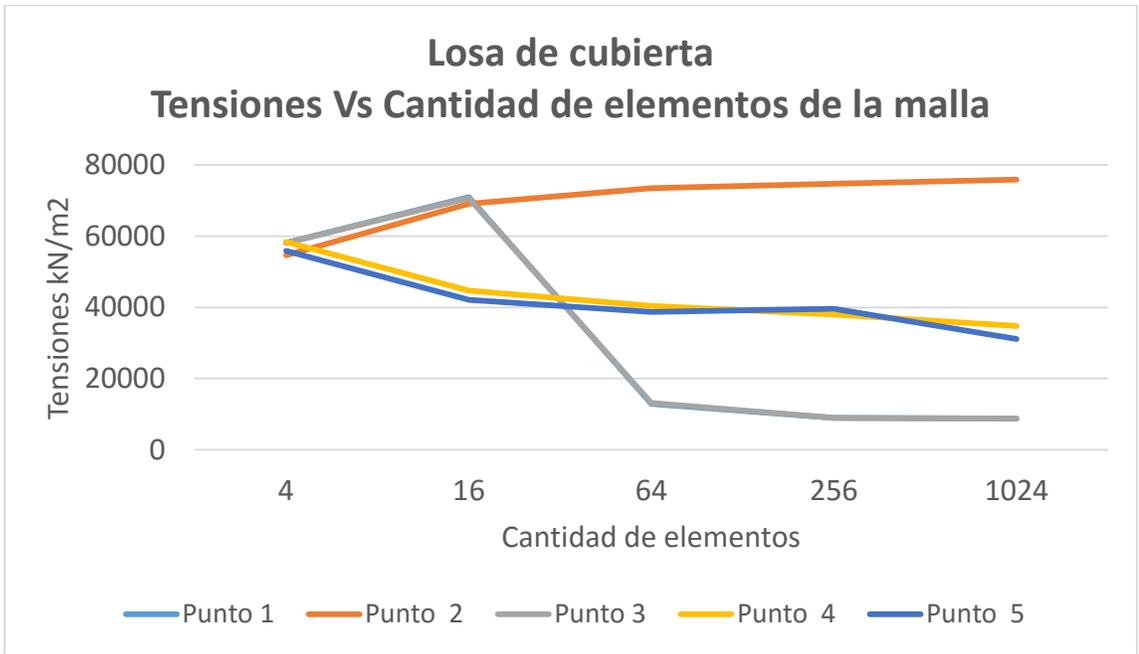


Figura 2.20 Tensiones en losa de cubierta. (Elaboración propia)

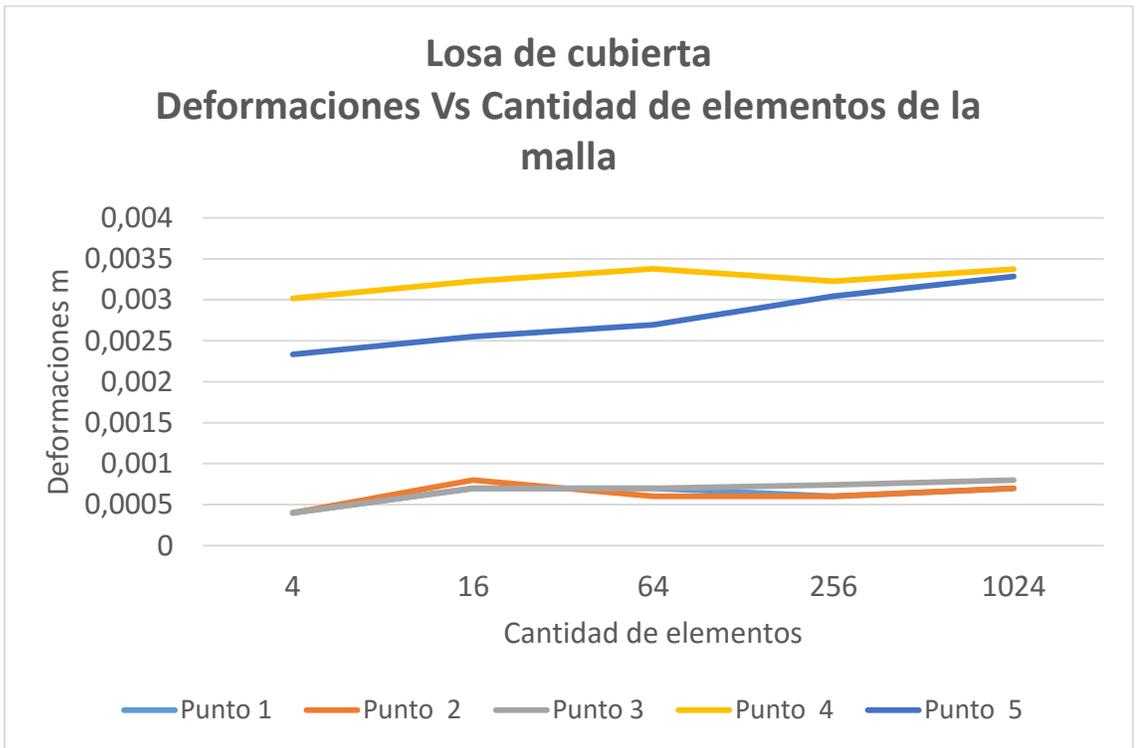


Figura 2.21 Deformaciones en losa de cubierta. (Elaboración propia)

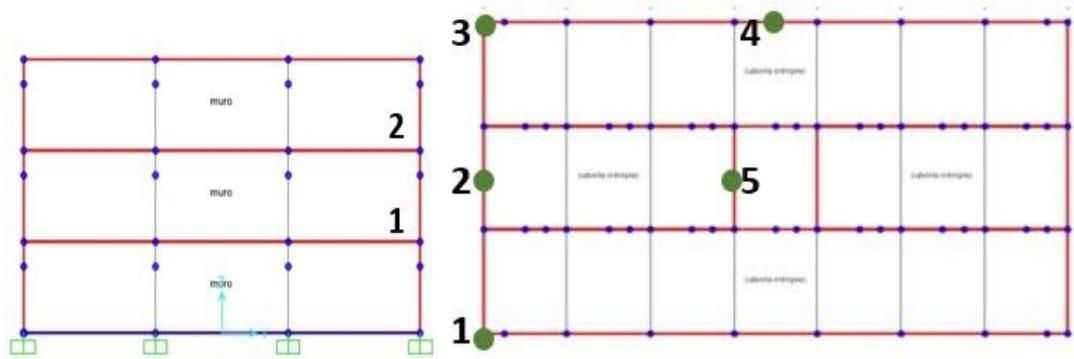


Figura 2.22 Número de entrepisos. Puntos de losa de entrepisos. (Elaboración propia en SAP 2000)

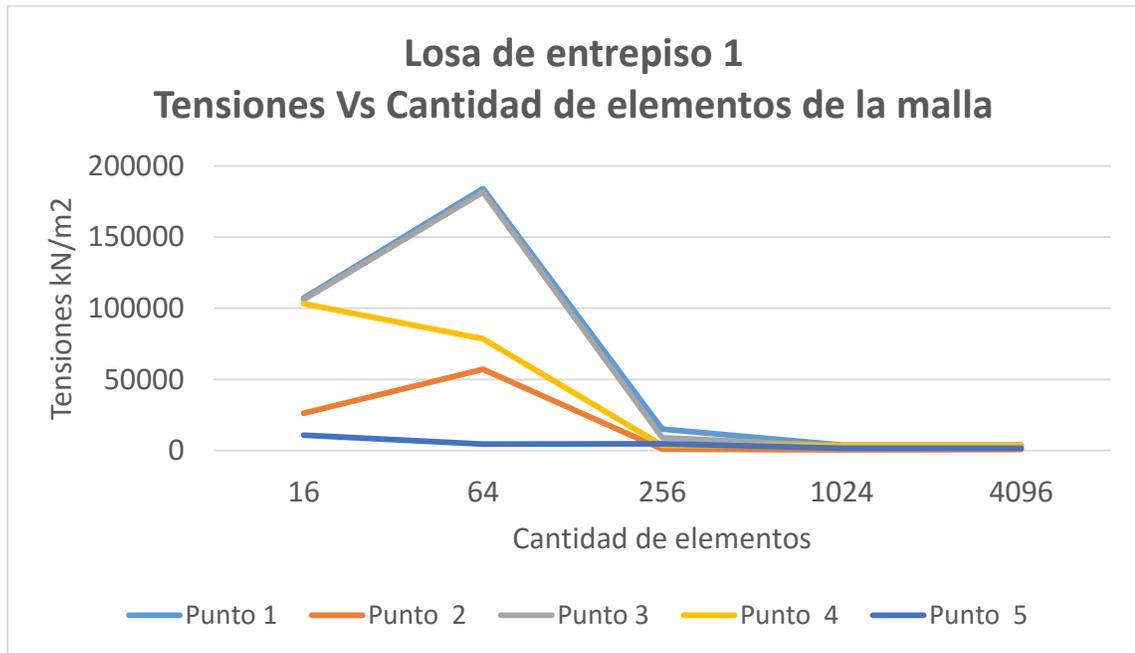


Figura 2.23 Tensiones en losa de entrepiso 1. (Elaboración propia)

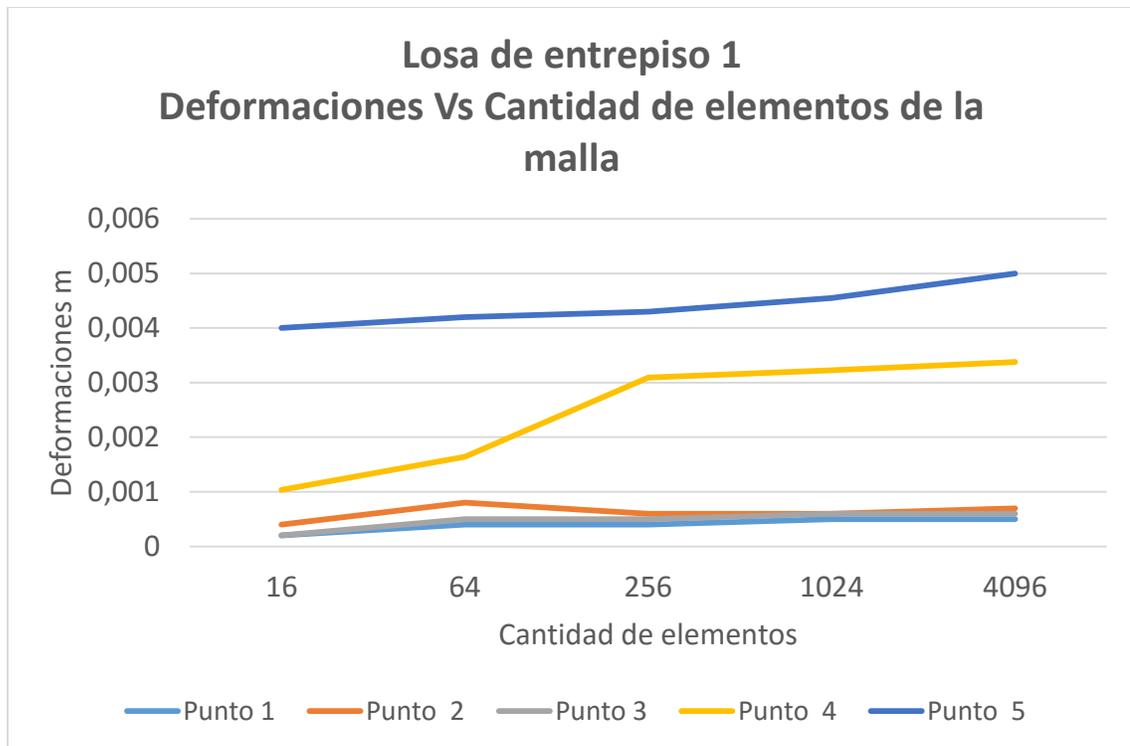


Figura 2.24 Deformaciones en losa de entrepiso 1. (Elaboración propia)

En los gráficos anteriores se observa como las curvas de tensiones y deformaciones a medida que aumenta la cantidad de elementos de la malla van tomando una forma constante, mostrando el ajuste del modelo. Para una mejor comprensión del proceso de ajuste y refinamiento de la malla se pueden ver los gráficos que muestran el comportamiento de los elementos restantes del modelo en el anexo 3.

Discretizar mucho el modelo aumenta el costo computacional, lo que hace imposible con los recursos computacionales con que se cuentan para la investigación realizar un modelo con una mayor cantidad de elementos. Como se sabe, el MEF utiliza los valores de los nudos para interpolar los resultados en el elemento (Shell en este caso). Por lo tanto la dimensión (lados) de los elementos es un aspecto a tener en cuenta en la discretización. Una vez que los elementos tengan una dimensión lo suficientemente pequeña como para aceptar los resultados que se obtienen en los elementos, se puede decir que el modelo está lo suficientemente ajustado, aun cuando en realidad se pudiera mejorar más, aumentando por supuesto el costo computacional.

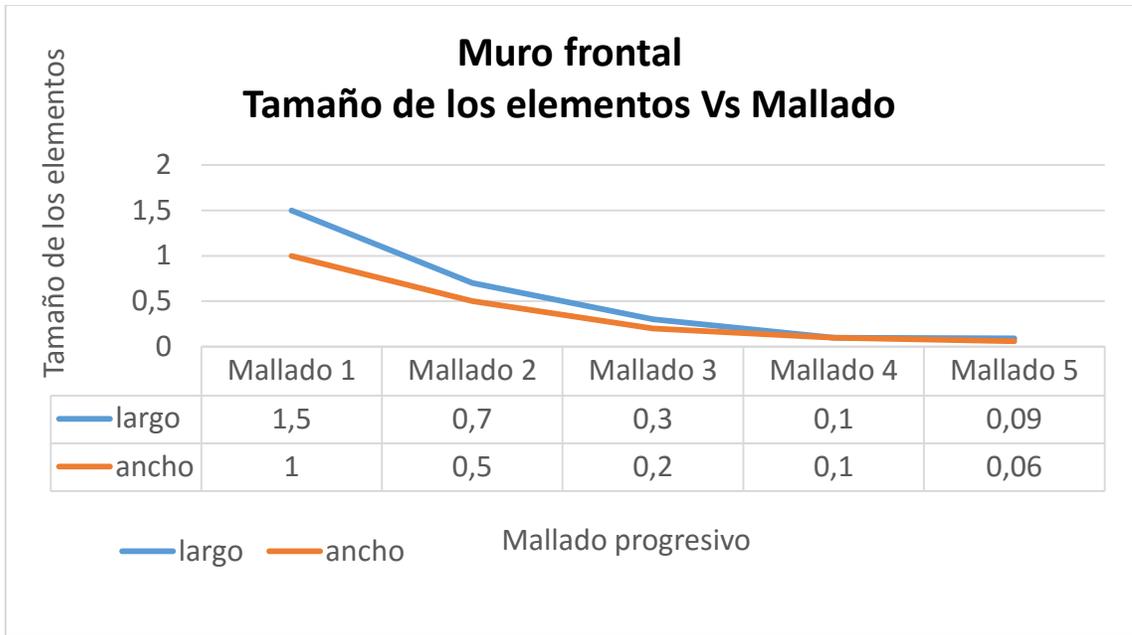


Figura 2.25 Tamaño de los elementos de la malla en muros frontal. (Elaboración propia)

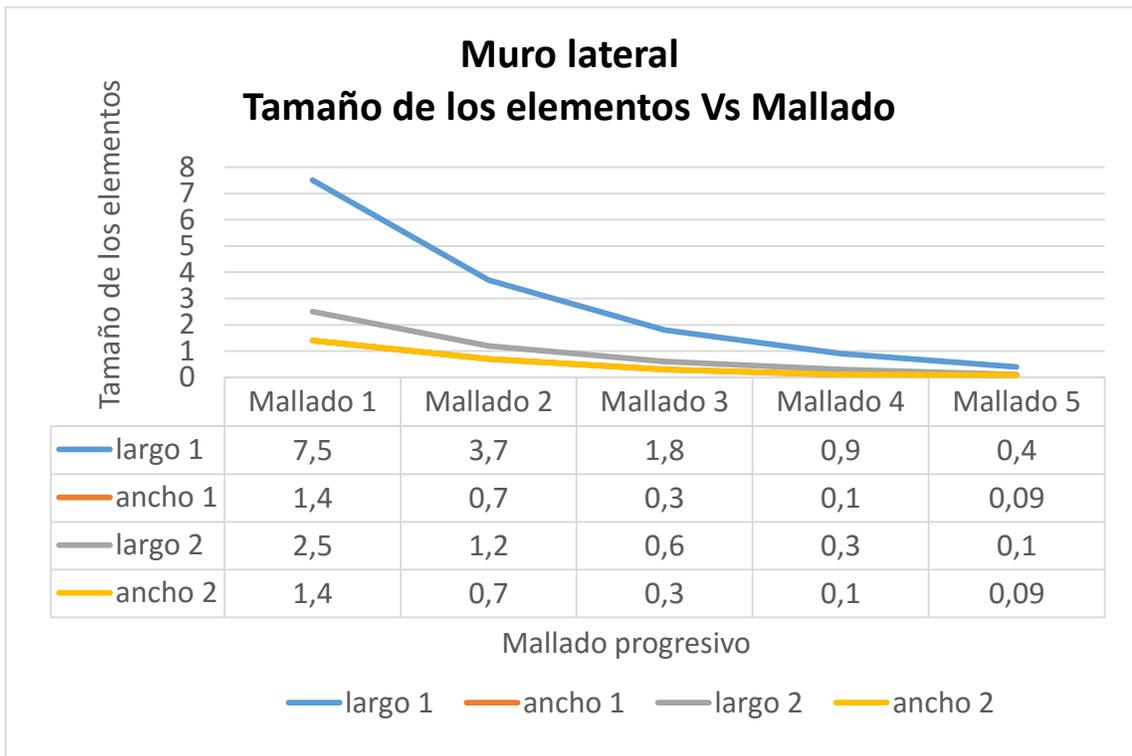


Figura 2.26 Tamaño de los elementos de la malla en muros lateral. (Elaboración propia)

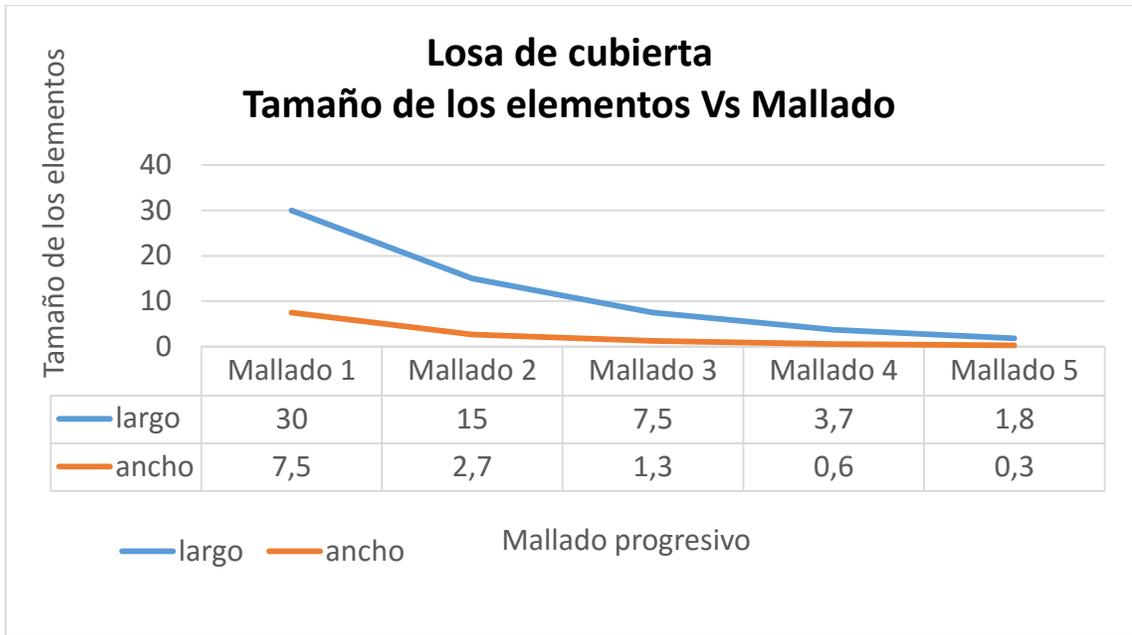


Figura 2.27 Tamaño de los elementos de la malla en cubierta. (Elaboración propia)

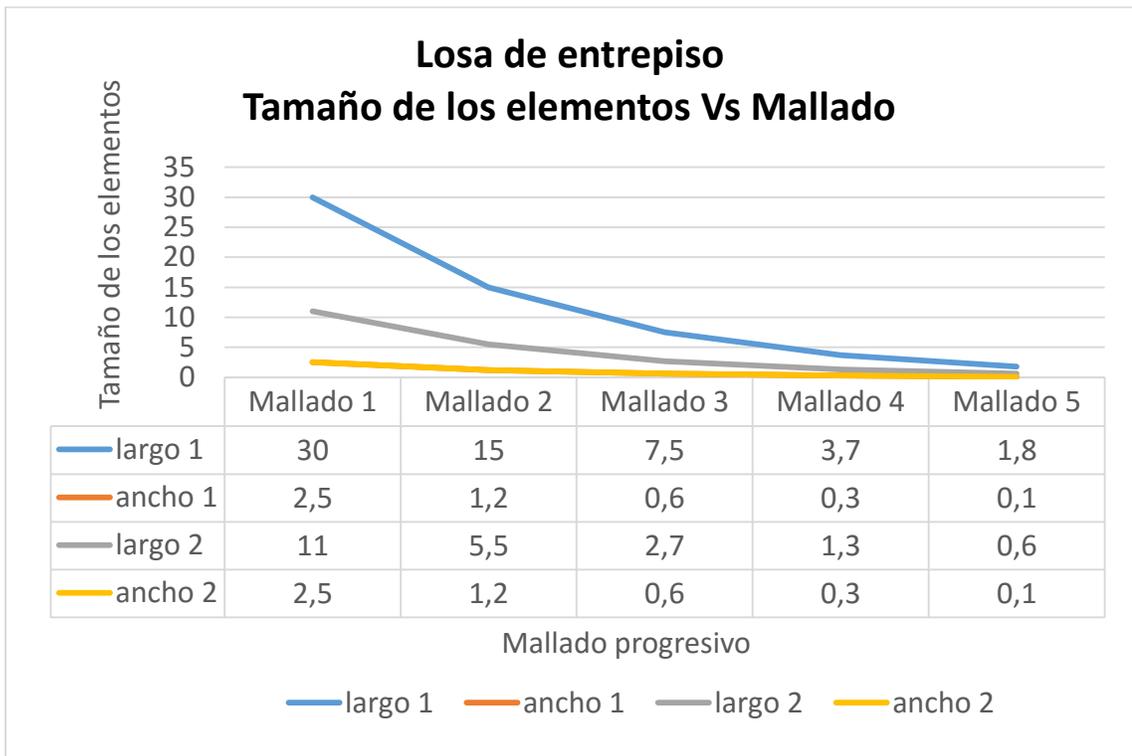


Figura 2.28 Tamaño de los elementos de la malla en entresos. (Elaboración propia)

2.3 Conclusiones parciales del capítulo

- En ambos modelos: aislado y total elaborados en SAP2000, el tipo de elemento finito usado es Shell, y el material empleado (hormigón) tiene un comportamiento lineal elástico.
- Se incluyen las cargas permanentes de peso propio de los elementos, solución de cubierta y entrepisos; carga de uso teniendo en cuenta un edificio de habitaciones; y carga por temperatura.
- Se realiza el ajuste de los modelos realizando un mallado progresivo 2^n . En el módulo aislado se consigue estabilizar tanto las tensiones como las deformaciones, en el mallado número seis y el módulo total se acepta una vez que los elementos tienen una dimensión lo suficientemente pequeña y se puede decir que el modelo está ajustado.

CAPÍTULO 3: " MODELACIÓN DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO "

Luego de ajustados los modelos se determinan las Tensiones Máximas y de Von Misses para comparar con el módulo de rotura del hormigón y comprobar si el gradiente de temperatura influye o no en la fisuración de los elementos planos de hormigón armado.

3.1 Módulo aislado

3.1.1 Tensiones Máximas y Tensiones Von Misses

Para analizar la influencia del gradiente de temperatura se aplica la carga de manera gradual, comenzando por los 25°C por considerarse temperatura promedio hasta alcanzar los 34,3°C por ser la máxima registrada en el año 2018, luego se determinan las Tensiones Máximas y de Von Misses en los seis puntos analizados para la calibración del modelo y en un séptimo punto donde se observa concentración de tensiones, para ver donde el hormigón alcanza la rotura y si influye o no la temperatura en la rotura.

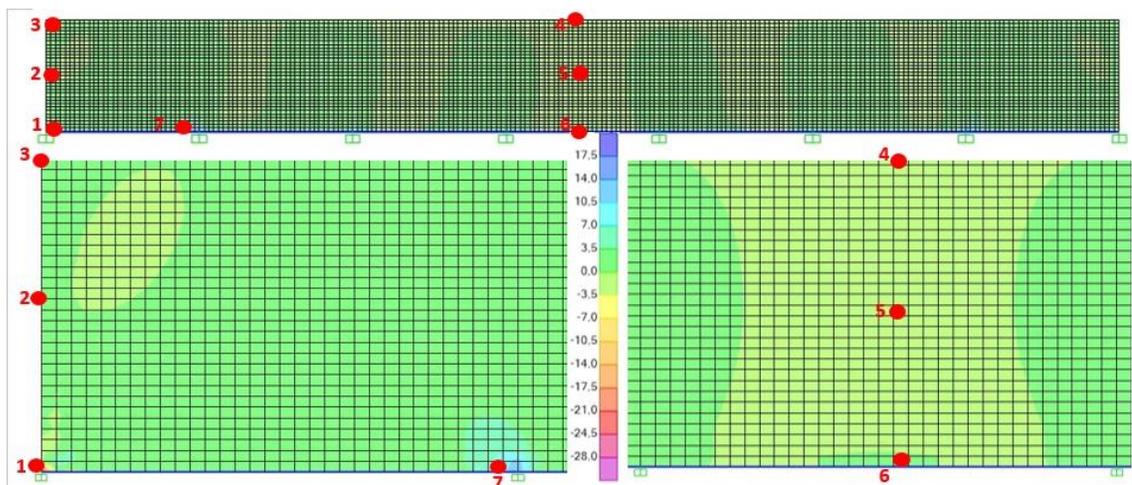


Figura 3.1 Puntos comprobados para determinar las Tensiones Máximas en el muro de hormigón. (Elaboración propia en SAP 2000)

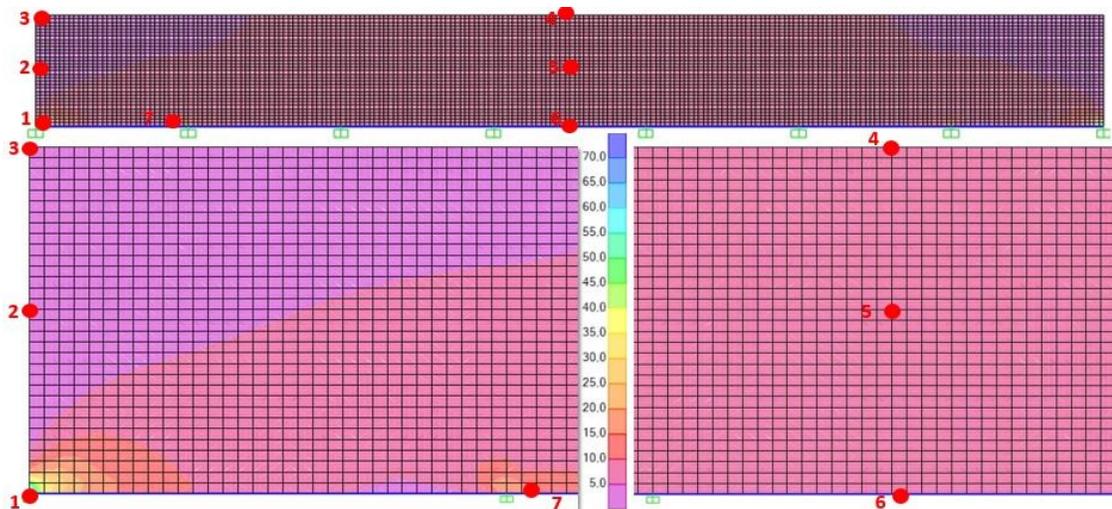


Figura 3.2 Puntos comprobados para determinar las Tensiones Von Misses en el muro de hormigón. (Elaboración propia en SAP 2000)

Los gráficos siguientes muestran el comportamiento del material en cada punto evaluado (ver anexo 4) luego de aplicar de manera gradual la temperatura al muro de hormigón. Se observan las curvas de tensiones máximas, de Von Misses y la rotura del hormigón.

La tensión máxima establecida para el hormigón ha sido determinada mediante la siguiente expresión.

Tensión de rotura del Hormigón

$$0.62\sqrt{f'_c}$$

Ecuación 3.1

Donde: f'_c es la resistencia a compresión del hormigón.

$$f'_c = 30\text{Mpa}$$

$$0.62\sqrt{f'_c} = 0.62\sqrt{30} = 3.395879 \text{ Mpa}$$

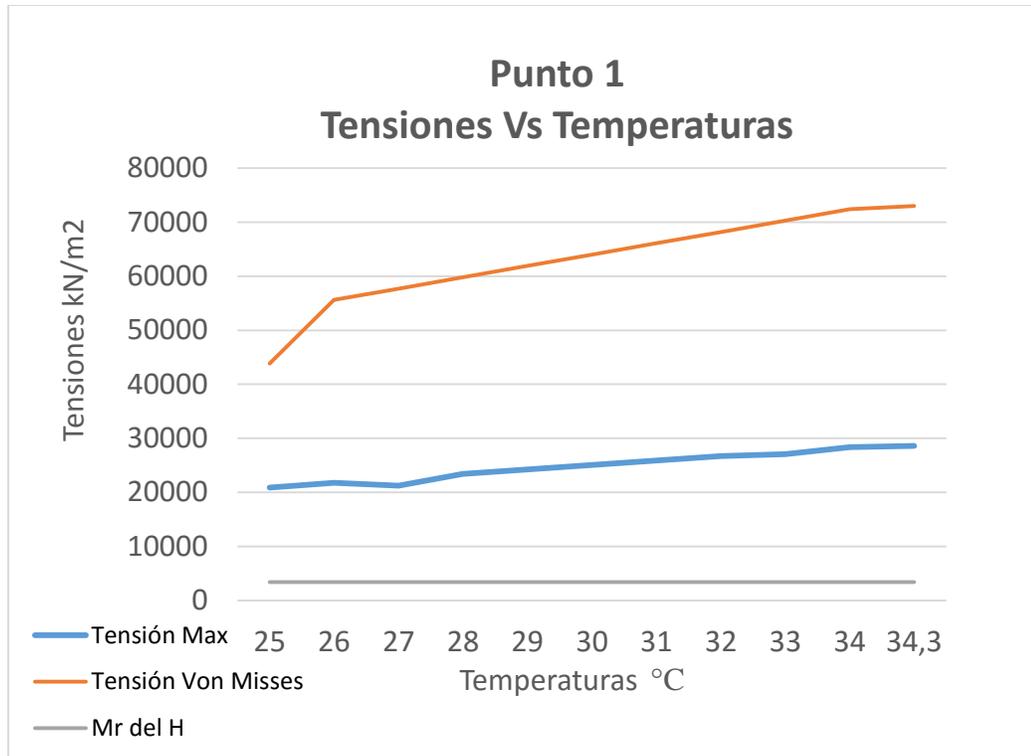


Figura 3.3 Tensiones en el muro aplicada la temperatura. (Elaboración propia)

En el gráfico anterior se observa como las tensiones máximas y de Von Misses aumentan en el punto 1 ubicado sobre el apoyo del muro a medida que se incrementa la temperatura. En este punto las tensiones en general tienen valores altos, superando en todo momento el módulo de rotura del hormigón. Hay que tener en cuenta que las tensiones son calculadas con todas las cargas CP y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de cargas restantes. En este punto de análisis la aplicación gradual de la carga de temperatura produce propiamente ella un aumento de 7,69 MPa para las máximas y 29,16 MPa para las de Von Misses, por lo que se puede concluir que hay un alto efecto térmico.

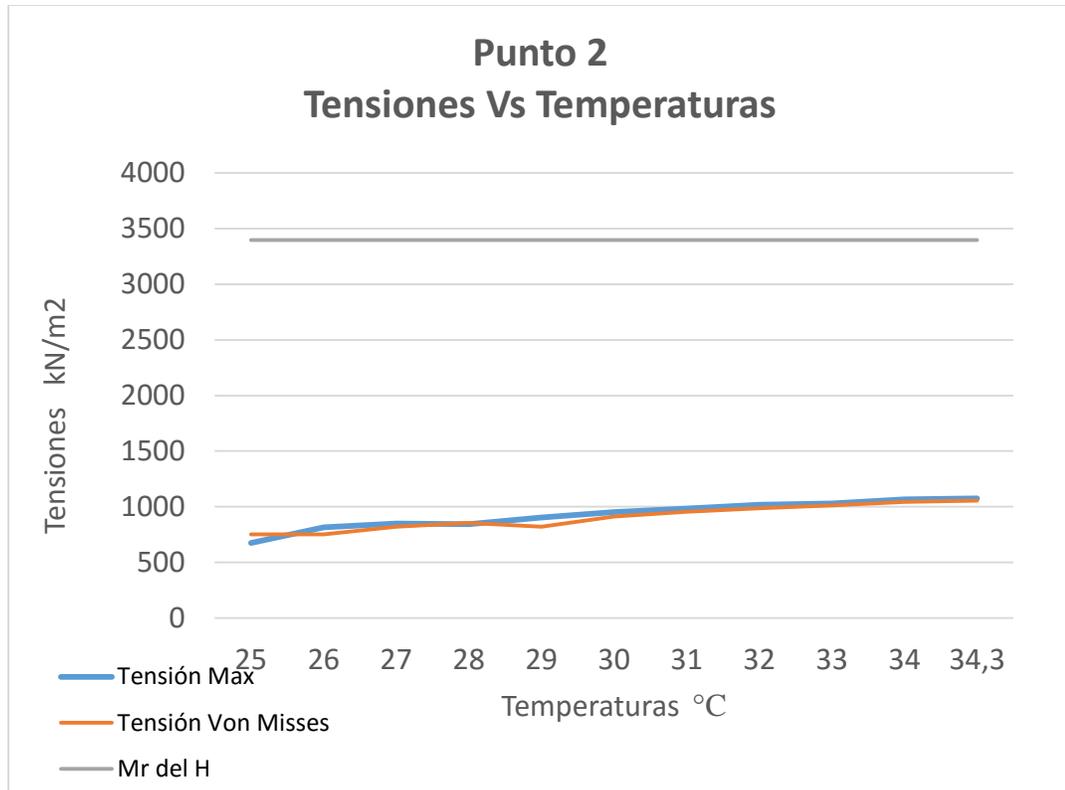


Figura 3.4 Tensiones en el muro aplicada la temperatura. (Elaboración propia)

En el punto 2 situado en el centro del borde del muro las tensiones máximas y de Von Misses se comportan de manera discreta. Se puede afirmar que en este punto las tensiones en ningún momento llegan alcanzar el módulo de rotura del hormigón, independientemente en este punto la aplicación gradual de la carga de temperatura produce propiamente ella un aumento de 0,40 MPa para las máximas y 0,30 MPa para las de Von Misses, por lo que se puede concluir que hay un efecto térmico bajo, pues el aumento de tensiones no es significativo.

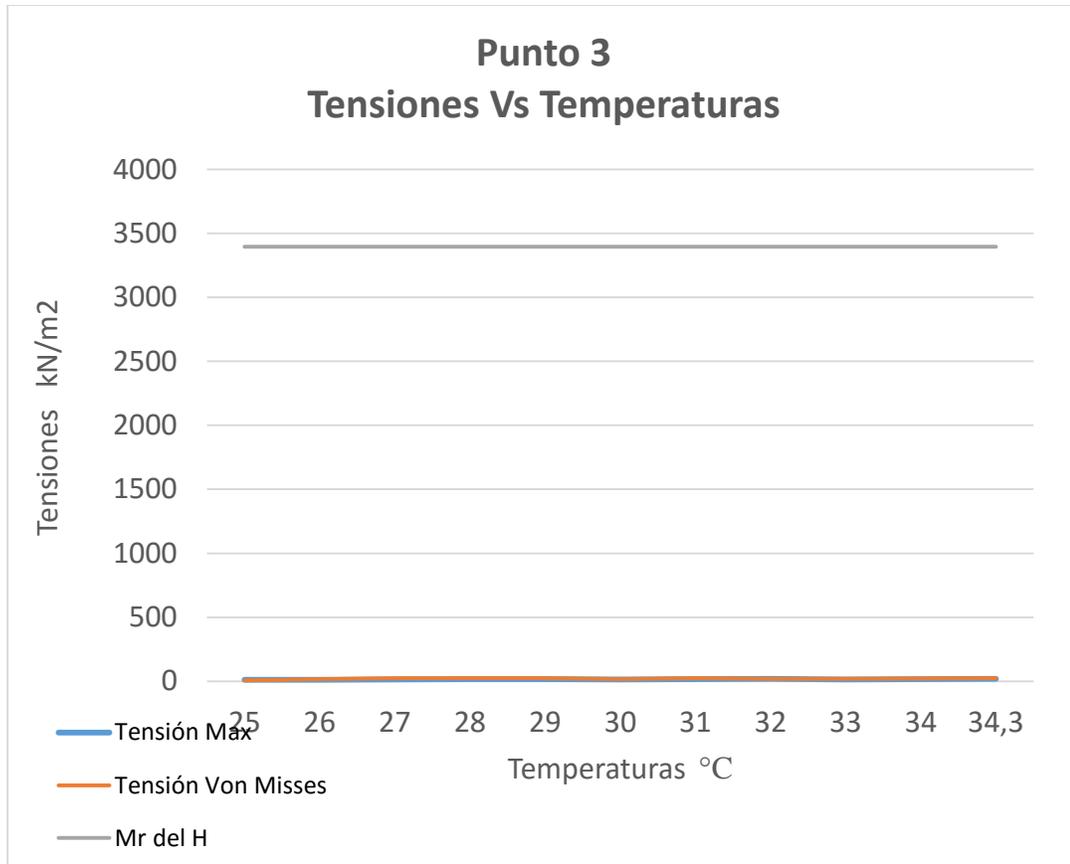


Figura 3.5 Tensiones en el muro aplicada la temperatura. (Elaboración propia)

El gráfico correspondiente al punto 3 ubicado en la esquina superior del borde del muro muestra un comportamiento discreto, donde se observa que las tensiones no superan el módulo de rotura del hormigón, sin embargo en este punto la aplicación gradual de la carga de temperatura produce propiamente ella un aumento de 0,008 MPa para las máximas y 0,017 MPa para las de Von Misses, por lo que se puede concluir que hay un efecto térmico extremadamente bajo, pues la pendiente de la función de comportamiento es prácticamente nula.

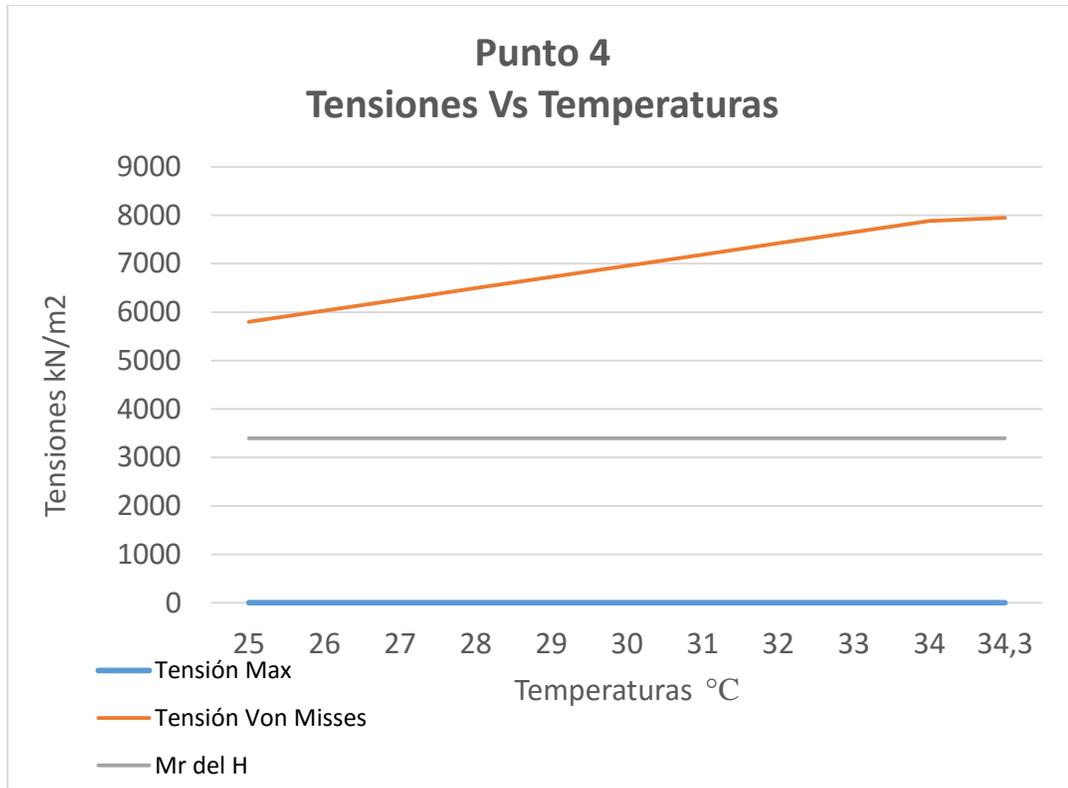


Figura 3.6 Tensiones en el muro aplicada la temperatura. (Elaboración propia)

En el punto 4 situado en el borde superior del centro del muro las tensiones máximas ascienden de forma discreta ante el aumento de temperatura, manteniendo en todo momento valores inferiores al módulo de rotura del hormigón. En este punto las tensiones de Von Misses superan la rotura del hormigón ante los 25°C, temperatura más baja aplicada al modelo, aumentando de valor las tensiones con el incremento de la misma. Hay que tener en cuenta que las tensiones son calculadas con todas las cargas CP y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de cargas restantes. En este punto de análisis la aplicación gradual de la carga de temperatura produce propiamente ella un aumento de 0,0014 MPa para las máximas y 2,14 MPa para las de Von Misses, por lo que se puede concluir que hay un efecto térmico mayor en las tensiones de Von Misses que en el de las tensiones normales, donde es prácticamente despreciable.

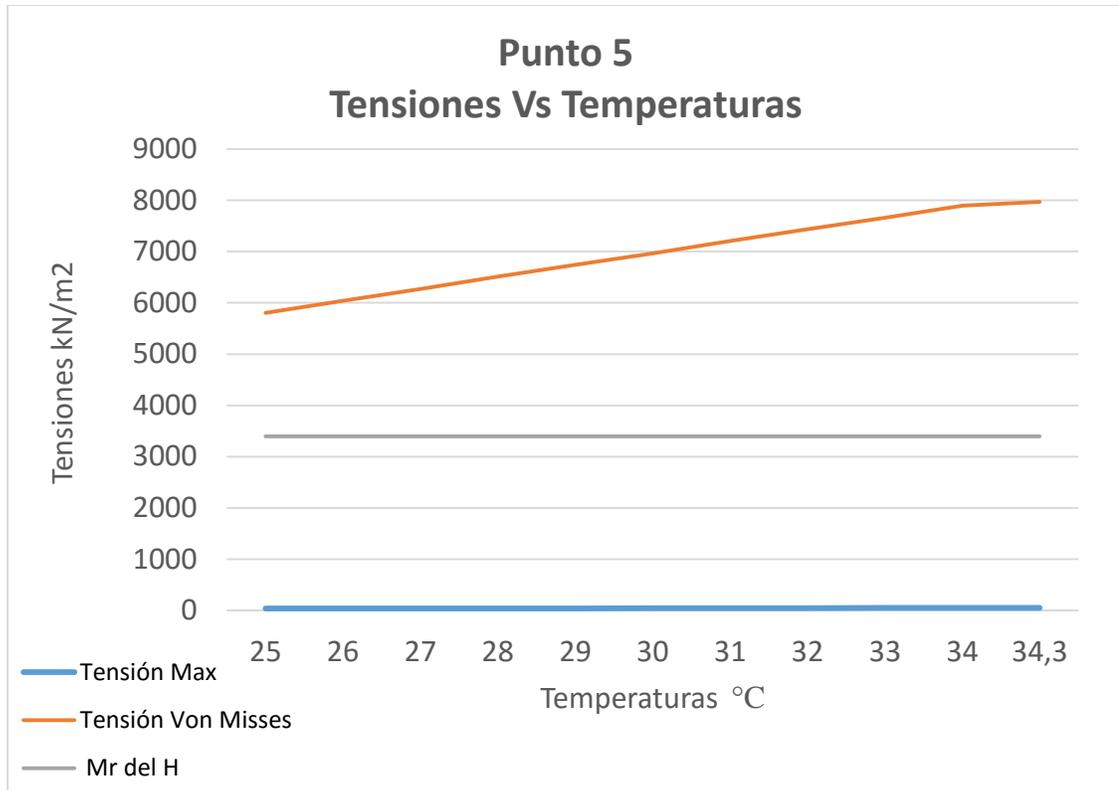


Figura 3.7 Tensiones en el muro aplicada la temperatura. (Elaboración propia)

El gráfico anterior corresponde al punto situado en el centro del muro, del mismo se puede decir que las tensiones máximas ascienden de forma discreta ante el aumento de temperatura, manteniendo en todo momento valores inferiores al módulo de rotura del hormigón, sin embargo las tensiones de Von Misses superan la rotura del hormigón en todo momento que fue aplicada de forma gradual la temperatura. Al tener en cuenta todas las cargas CP y T se puede decir que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de cargas restantes. En este punto de análisis la aplicación gradual de la carga de temperatura produce propiamente ella un aumento de 0,013 MPa para las máximas y 2,16 MPa para las de Von Misses, por lo que se puede concluir que hay un efecto térmico muy similar al punto analizado anteriormente.

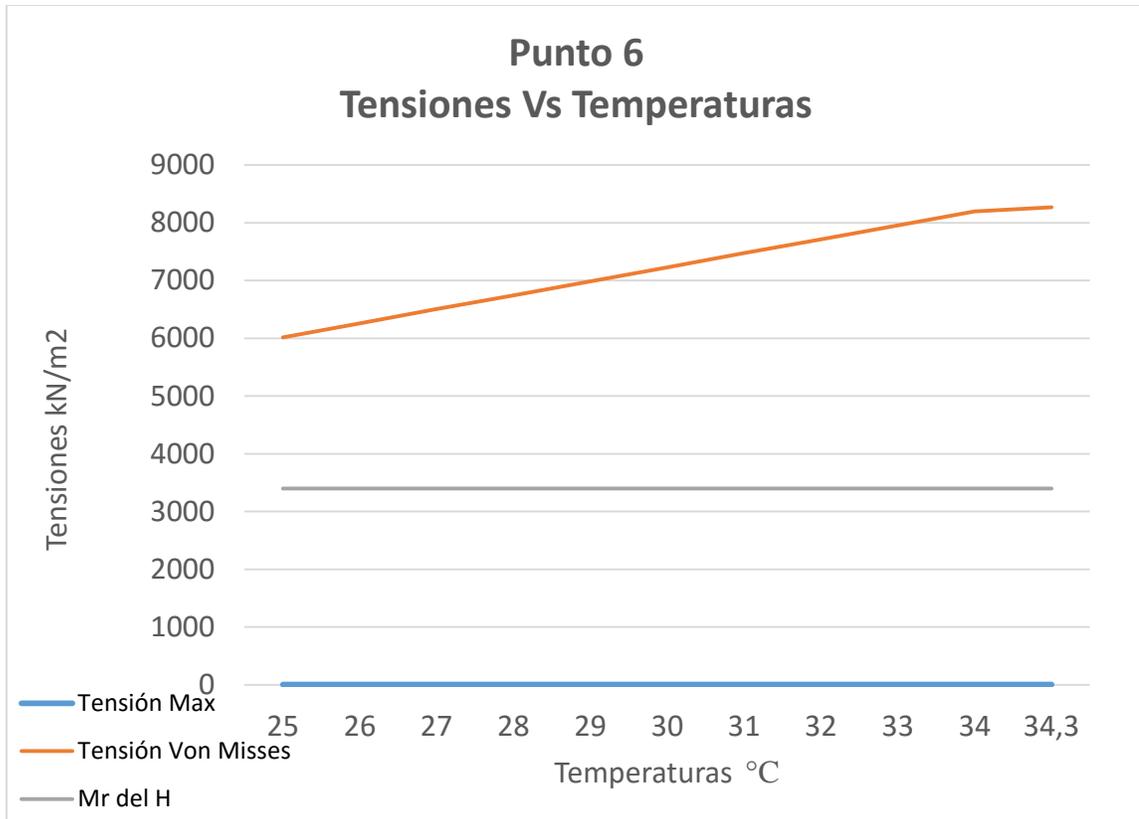


Figura 3.8 Tensiones en el muro aplicada la temperatura. (Elaboración propia)

El punto 6 se encuentra en el borde inferior del centro del muro, las tensiones máximas aumentan con el aumento de temperatura pero nunca llegan alcanzar el módulo de rotura del hormigón; de las tensiones de Von Misses se puede decir que ascienden con el incremento de temperatura y superan en todo momento de la aplicación de la carga térmica el módulo de rotura del hormigón. Hay que tener en cuenta que las tensiones son calculadas con todas las cargas CP y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de cargas restantes. En este punto de análisis la aplicación gradual de la carga de temperatura produce propiamente ella un aumento de 0,0012 MPa para las máximas y 2,25 MPa para las de Von Misses, por lo que se puede concluir que hay un efecto térmico muy similar a los dos puntos analizados anteriormente.

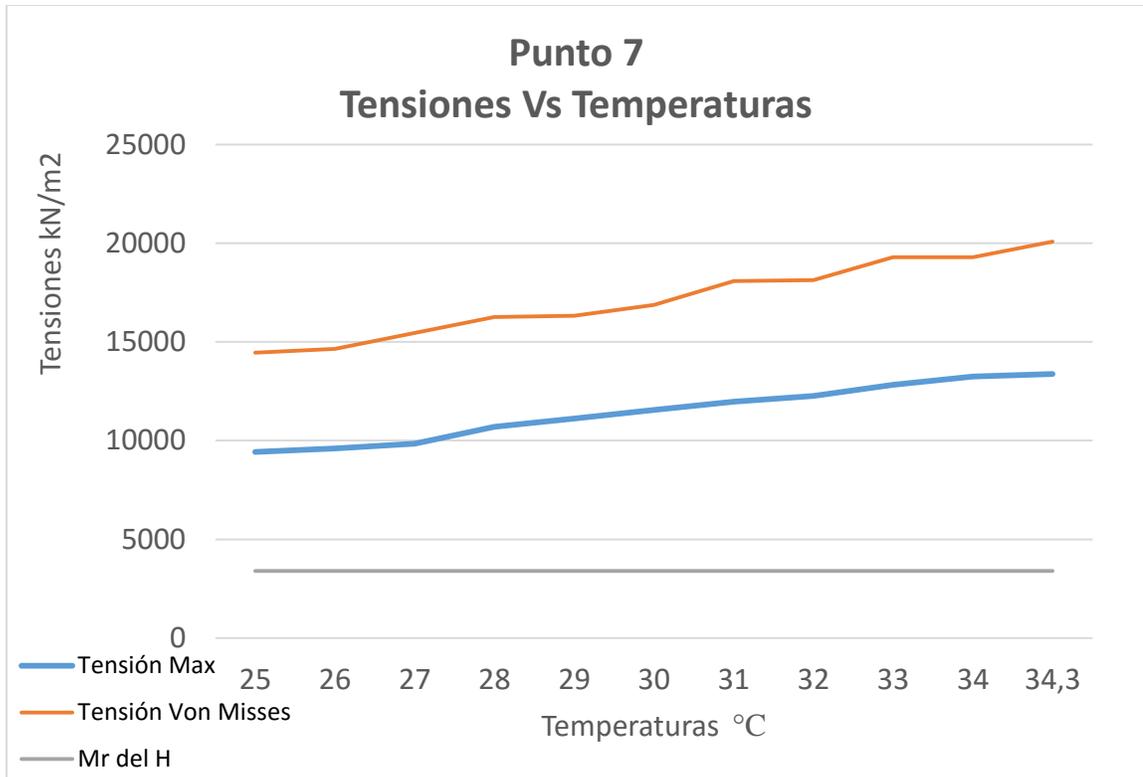


Figura 3.9 Tensiones en el muro aplicada la temperatura. (Elaboración propia)

El punto 7 se encuentra ubicado sobre el segundo apoyo, donde se produce la mayor concentración de tensiones del muro. En el gráfico se observa como las tensiones máximas y de Von Misses aumentan a medida que se incrementa la temperatura, superando en todo momento el módulo de rotura del hormigón. En este punto de análisis la aplicación gradual de la carga de temperatura produce propiamente ella un aumento de 3,95 MPa para las máximas y 5,62 MPa para las de Von Misses, por lo que se puede concluir que hay un efecto térmico considerable, pues el aumento de las tensiones supera el módulo de rotura del hormigón.

3.2 Módulo total

3.2.1 Tensiones Máximas y Tensiones Von Mises

El modelo se somete al gradiente dado por la temperatura del medio circundante y la climatización en el interior de las habitaciones. Se comienzan por el 10% hasta llegar al 100% de la temperatura máxima registrada en el año 2018 para analizar el comportamiento del material ante la variación y ver donde el hormigón alcanza la rotura, determinando las Tensiones Máximas y de Von Mises en los puntos donde se observa concentración de tensiones.

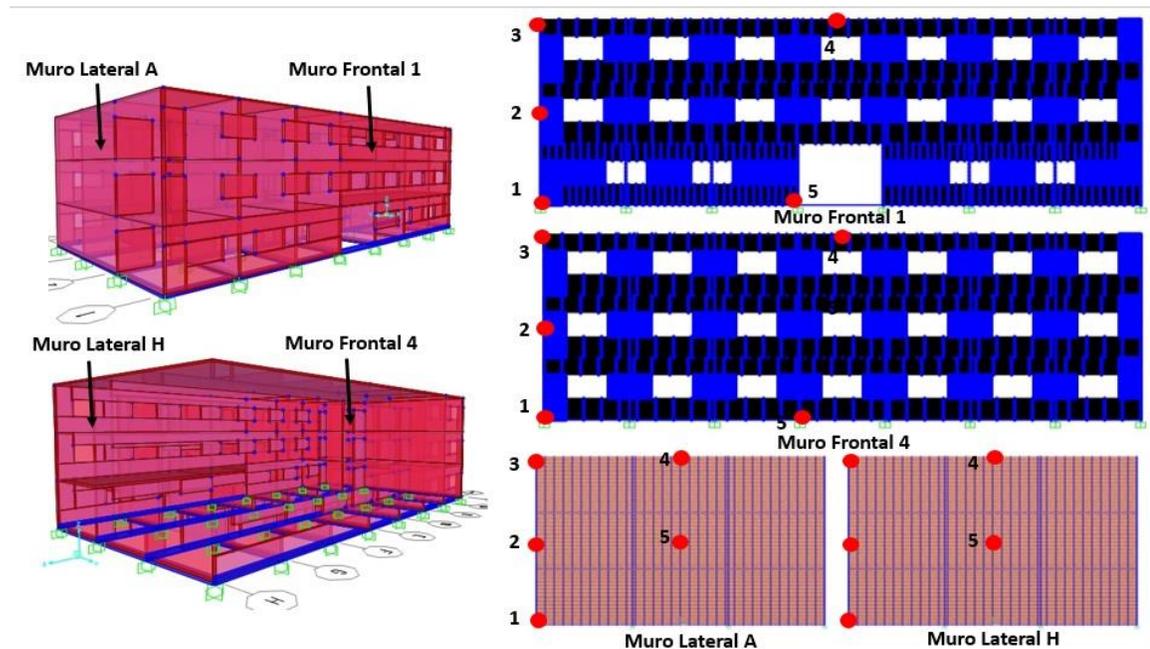


Figura 3.10 Puntos comprobados para determinar las Tensiones Máximas y de Von Mises en muros exteriores sometido a gradiente térmicos. (Elaboración propia en SAP 2000)

Tabla 3.1 Gradientes aplicados al modelo.

16°C temperatura mínima 34,3°C temperatura máxima	
10% del gradiente	1,83° C
20% del gradiente	3,66° C
30% del gradiente	5,49° C
40% del gradiente	7,32° C
50% del gradiente	9,15° C
60% del gradiente	10,98° C
70% del gradiente	12,81° C
80% del gradiente	14,64° C
90% del gradiente	16,47° C
100% del gradiente	18,3° C

Los gráficos siguientes muestran el comportamiento del material en cada punto evaluado (ver anexo 5) de los muros que se encuentran sometido a la variación de temperatura entre el medio circundante y la climatización en el interior.

Al igual que en el modelo anterior la tensión máxima establecida para el hormigón ha sido determinada mediante la siguiente expresión.

Tensión de rotura del Hormigón

$$0.62\sqrt{f'_c}$$

Ecuación 3.1

Donde: f'_c es la resistencia a compresión del hormigón.

$$f'_c = 30\text{Mpa}$$

$$0.62\sqrt{f'_c} = 0.62\sqrt{30} = 3.395879 \text{ Mpa}$$

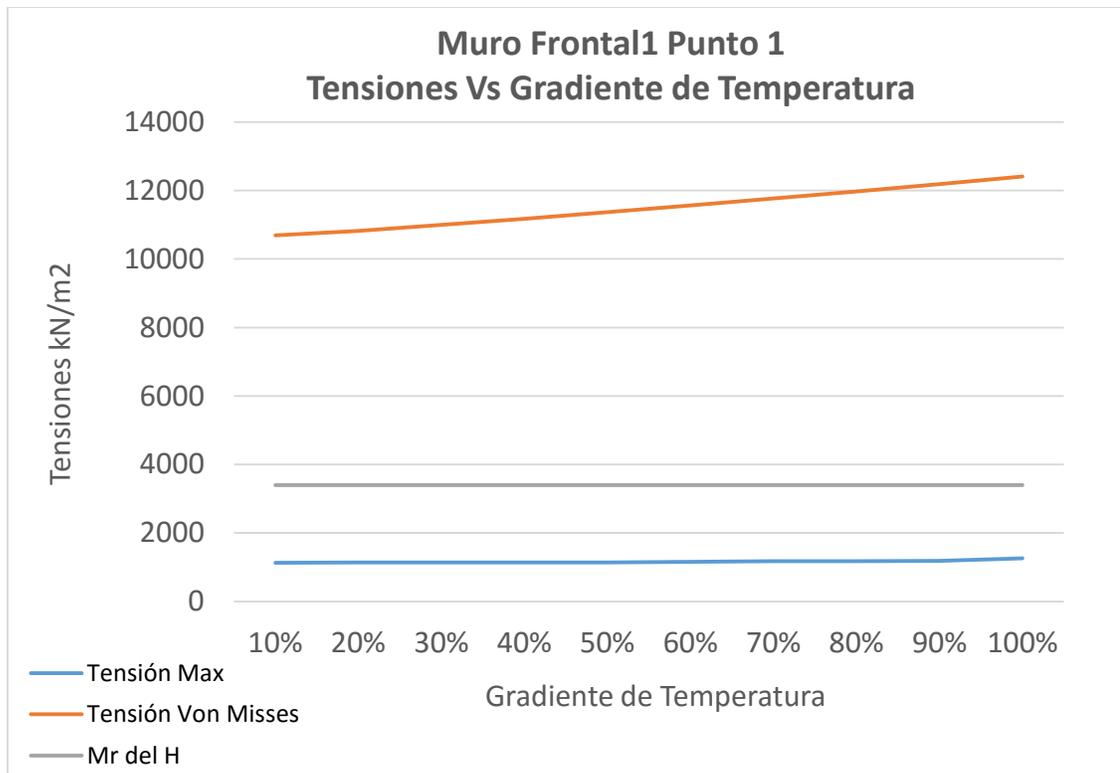


Figura 3.11 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

El grafico anterior representa el punto 1 ubicado sobre el primer apoyo del muro de fachada, se puede observar que las tensiones aumentan a medida que aumenta el gradiente de temperatura. Como se aprecia las tensiones normales no superan el límite de rotura, no siendo así las tensiones de Von Misses, hay que tener en cuenta que las tensiones son calculadas con la combinación de todas las cargas CP, CU y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de las otras cargas. En este caso el aumento del diferencial térmico produce un aumento de las tensiones máximas de 0,13 Mpa y 1,72 MPa de las Von Misses, lo cual demuestra que el aumento y la variación de temperatura tienen efecto sobre los elementos de hormigón, pero en este caso no es muy significativo.

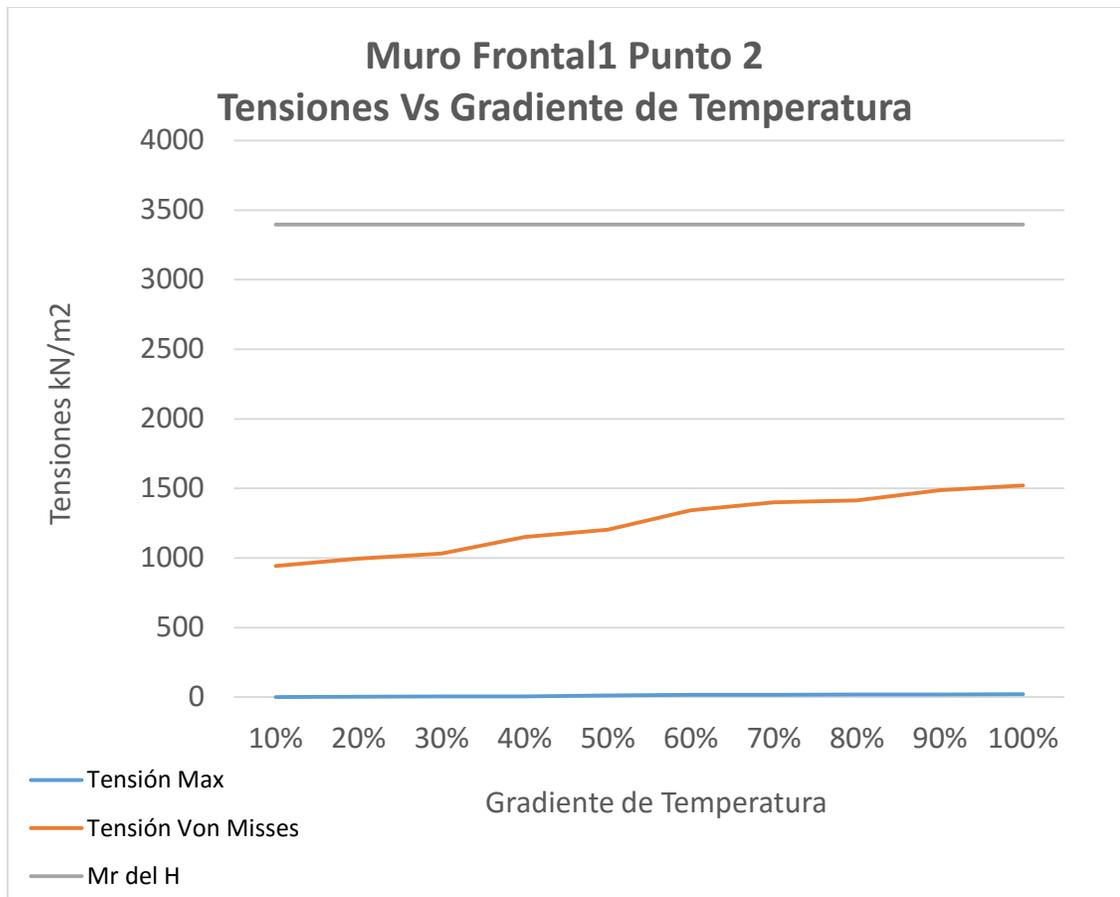


Figura 3.12 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

En el punto 2 situado en el centro del borde del muro de fachada las tensiones crecen a medida que aumenta el gradiente de temperatura. Se puede afirmar que las tensiones en ningún momento alcanzan el módulo de rotura del hormigón. En este caso, a pesar de no intersectarse con la curva de rotura, se produce con el aumento del diferencial térmico un aumento de las tensiones máximas de 0,02 Mpa y 0,57 MPa de las Von Misses, lo cual demuestra que el aumento y la variación de temperatura tienen efecto sobre los elementos de hormigón pero en este caso es muy bajo.

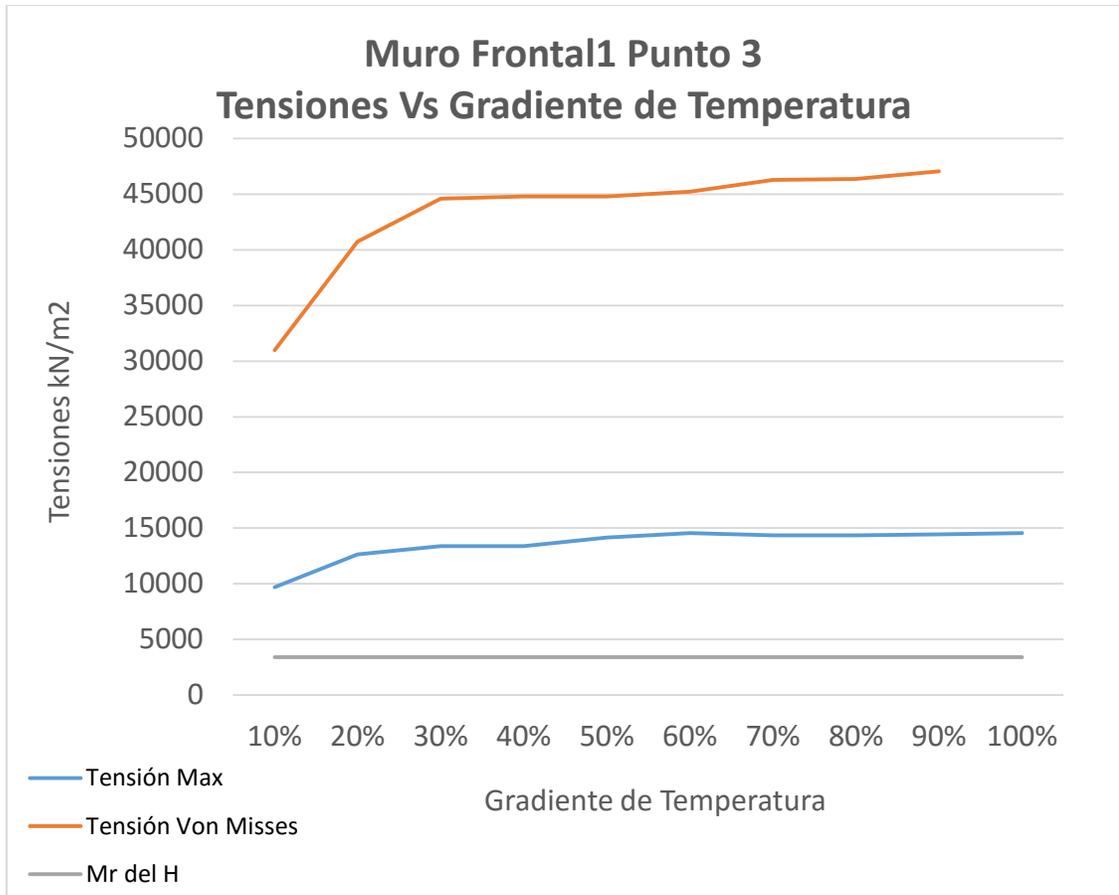


Figura 3.13 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

Se observa como las tensiones en general aumentan en el punto 3 ubicado en la parte superior de la esquina del muro de fachada con el crecimiento del gradiente. Las tensiones tienen valores elevados, superando en todo momento el módulo de rotura del hormigón. Hay que tener en cuenta que las mismas son calculadas con todas las cargas CP, CU y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de cargas restantes. En este punto de análisis la aplicación gradual de la carga de temperatura produce propiamente ella un aumento de 4,84 MPa para las máximas y 18,76 MPa para las de Von Misses, lo cual demuestra que el aumento y la variación de temperatura tienen un alto efecto sobre los elementos de hormigón, siendo el aumento superior al módulo de rotura.

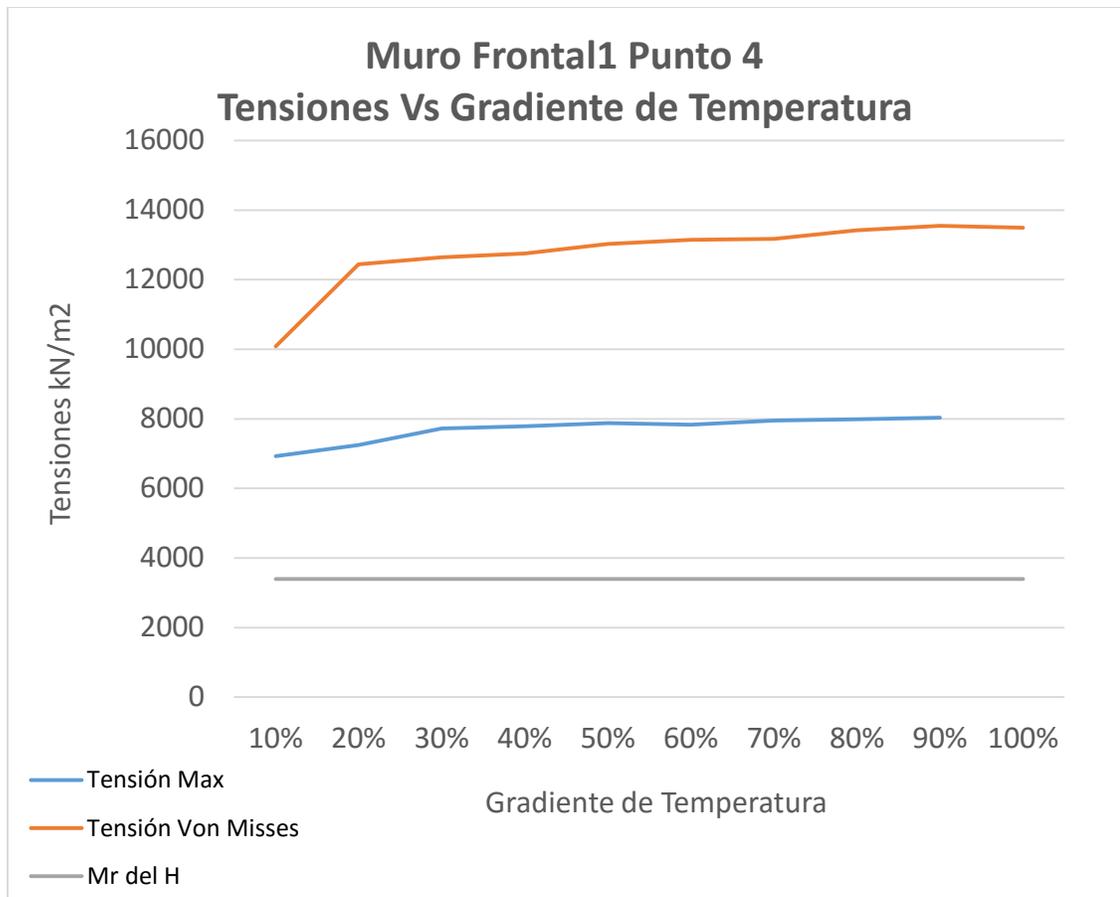


Figura 3.14 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

Se observa como las tensiones en general crecen en el punto 4 ubicado en la parte superior del centro del muro frontal 1 la esquina del muro de fachada con el aumento del gradiente. Las tensiones tienen valores elevados, superando en todo momento el módulo de rotura del hormigón. Hay que tener en cuenta que las mismas son calculadas con todas las cargas CP, CU y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de cargas restantes. En este punto de análisis la aplicación gradual de la carga de temperatura produce propiamente ella un aumento de 2,19 MPa para las máximas y 3,41 MPa para las de Von Misses, lo cual demuestra que el aumento y la variación de temperatura tienen un efecto alto sobre los elementos de hormigón.

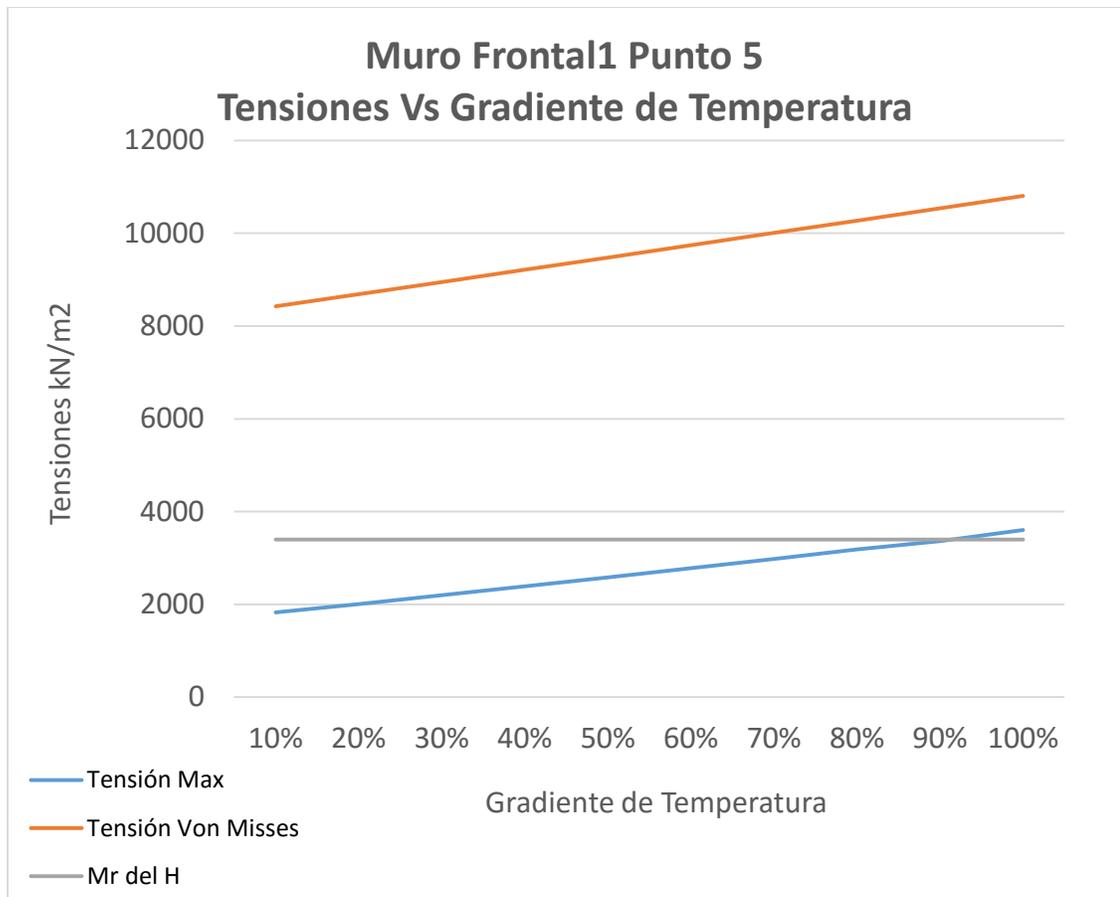


Figura 3.15 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

El gráfico muestra el comportamiento del punto 5 ubicado en el centro del muro de fachada, se puede observar que las curvas de tensiones crecen a medida que aumenta el gradiente. Como se aprecia las tensiones normales no superan el límite de rotura hasta la aplicación del 90% del diferencial térmico, no siendo así las tensiones de Von Misses que superan la rotura en todo momento. Hay que tener en cuenta que las tensiones son calculadas con la combinación de todas las cargas CP, CU y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de las otras cargas. En este caso el aumento del gradiente produce un crecimiento en las tensiones máximas de 1,77 Mpa y 2,38 MPa en las de Von Misses, lo cual demuestra que el aumento y la variación de temperatura tienen efecto sobre los elementos de hormigón, en este caso el aumento de las tensiones es medio, no demasiado alto.

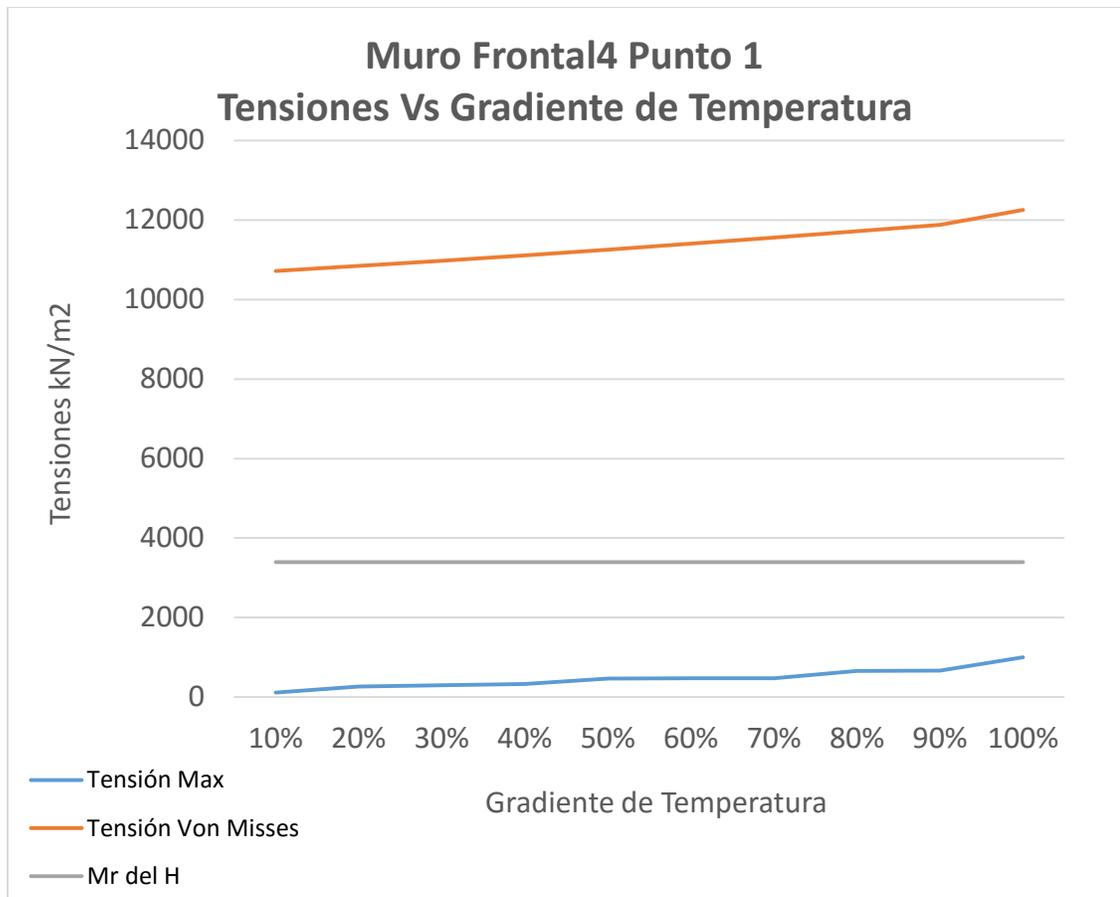


Figura 3.16 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

El gráfico anterior representa el punto 1 ubicado sobre el primer apoyo del muro frontal 4, donde las tensiones aumentan a medida que aumenta el gradiente de temperatura. Como se aprecia las tensiones normales no superan el límite de rotura, no siendo así las tensiones de Von Misses, hay que tener en cuenta que las tensiones son calculadas con la combinación de todas las cargas CP, CU y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de las otras cargas. En este caso el aumento del diferencial térmico produce un aumento de las tensiones máximas de 0,88 Mpa y 1,53 MPa de las Von Misses, lo cual demuestra que el aumento y la variación de temperatura tienen efecto sobre los elementos de hormigón, similar al punto analizado anteriormente pero en este caso aún más bajo.

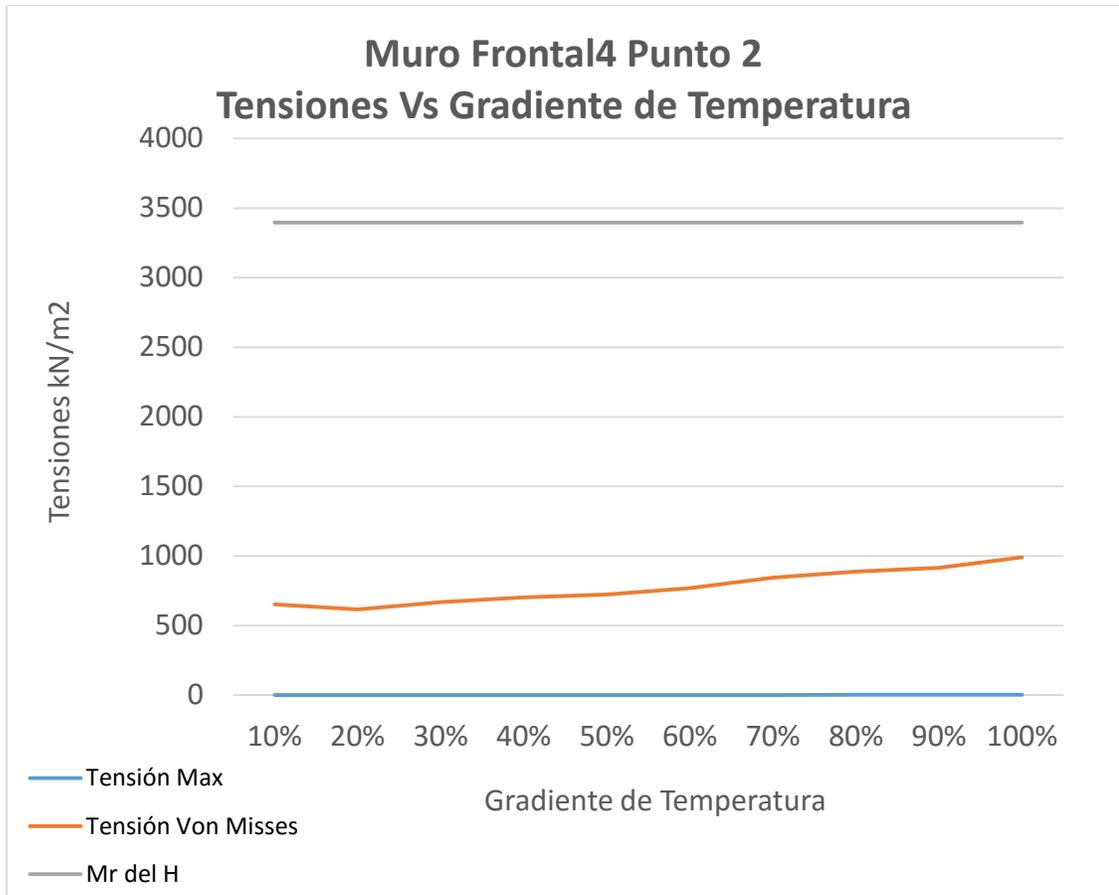


Figura 3.17 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

En el punto 2 situado en el centro del borde del muro las tensiones crecen a medida que aumenta el gradiente de temperatura. Se puede afirmar que las tensiones en ningún momento alcanzan el módulo de rotura del hormigón. En este caso, a pesar de no intersectarse con la curva de rotura, se produce con el aumento del diferencial térmico un aumento de las tensiones máximas de 0,0027 Mpa y 0,33 MPa de las Von Misses, lo cual demuestra que el aumento y la variación de temperatura tienen efecto muy bajo sobre los elementos de hormigón.

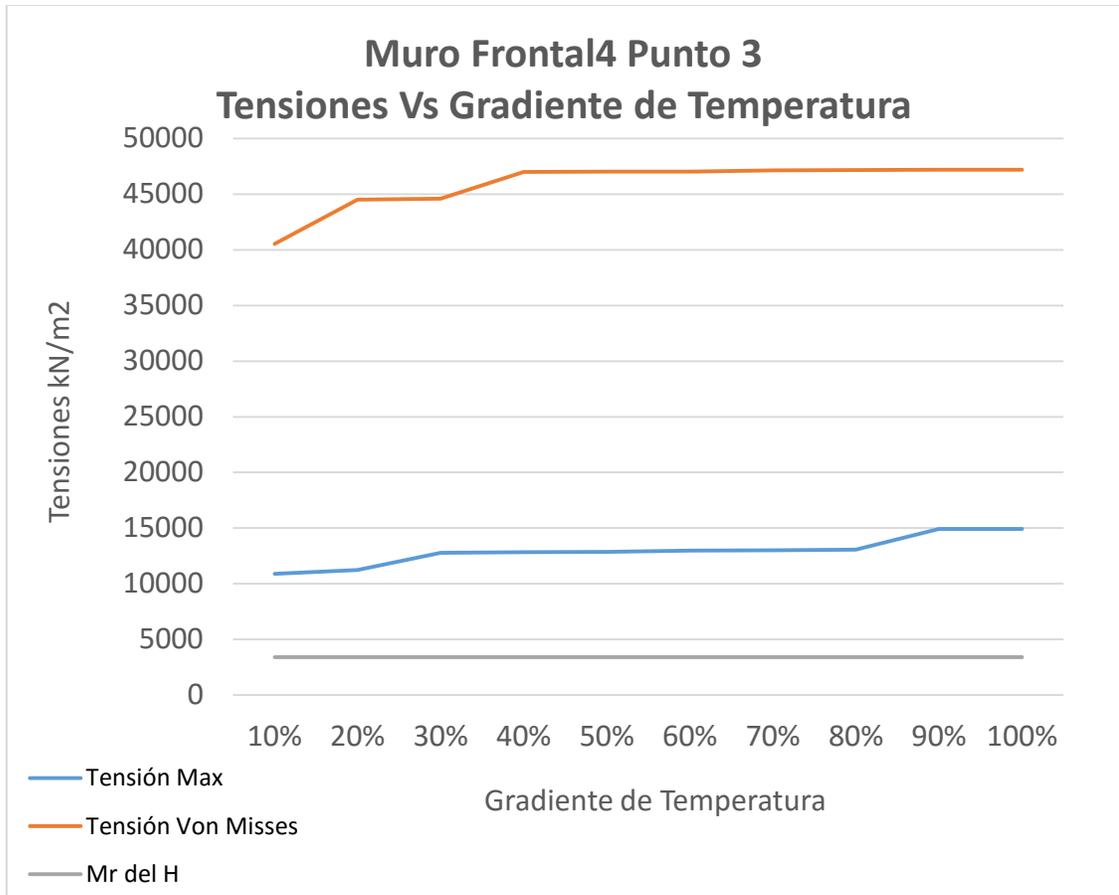


Figura 3.18 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

Se observa como las tensiones aumentan en el punto 3 ubicado en la parte superior de la esquina del muro con el crecimiento del gradiente. Las tensiones tienen valores elevados, superando en todo momento el módulo de rotura del hormigón. Hay que tener en cuenta que las mismas son calculadas con todas las cargas CP, CU y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de cargas restantes. En este punto de análisis la aplicación del gradiente de temperatura produce propiamente un aumento de 4,03 MPa para las máximas y 6,66 MPa para las de Von Misses, lo cual demuestra que el aumento y la variación de temperatura tienen efecto sobre los elementos de hormigón, en este caso la influencia es significativa.

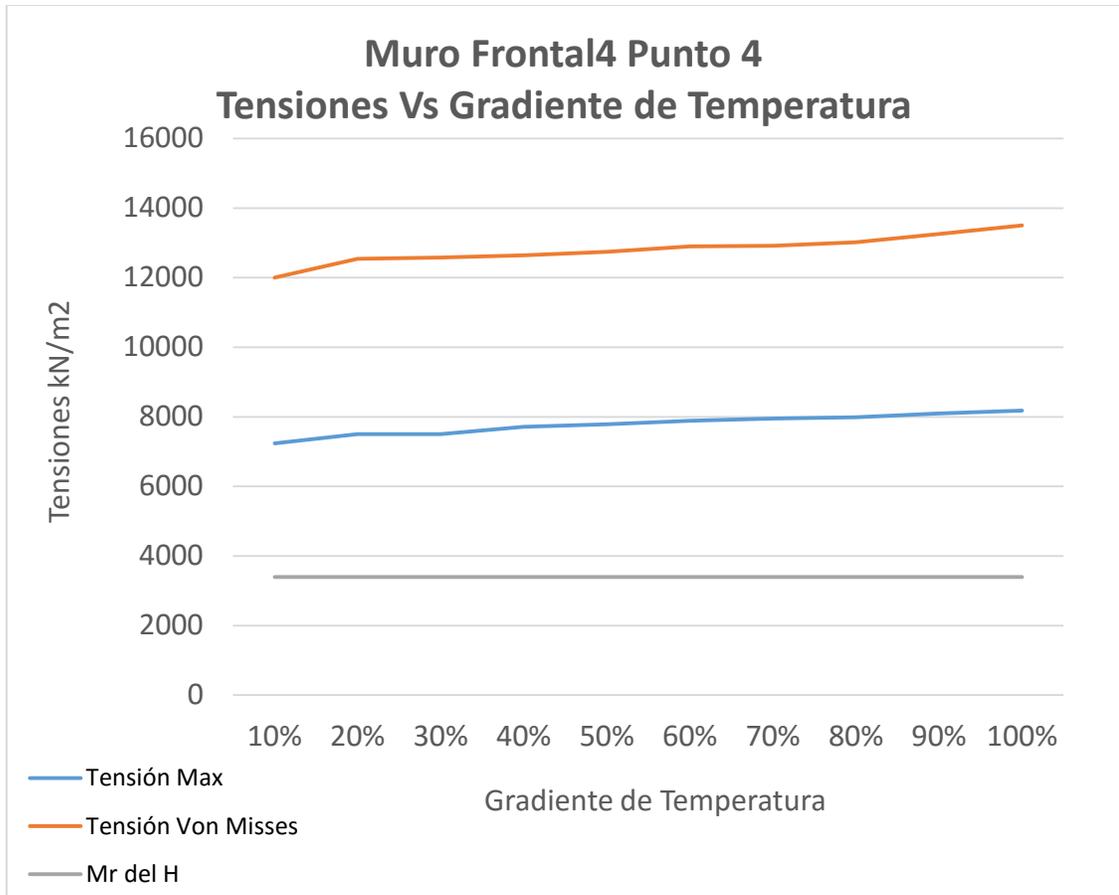


Figura 3.19 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

Se observa como las tensiones en general aumentan en el punto 4 ubicado en la parte superior del centro del muro con el crecimiento del gradiente. Las tensiones tienen valores elevados, superando en todo momento el módulo de rotura del hormigón. Hay que tener en cuenta que las mismas son calculadas con todas las cargas CP, CU y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de cargas restantes. En este punto de análisis la aplicación del gradiente de temperatura produce propiamente un aumento de 0,94 MPa para las máximas y 1,50 MPa para las de Von Misses, lo cual demuestra que el aumento y la variación de temperatura tienen efecto poco significativo sobre los elementos de hormigón.

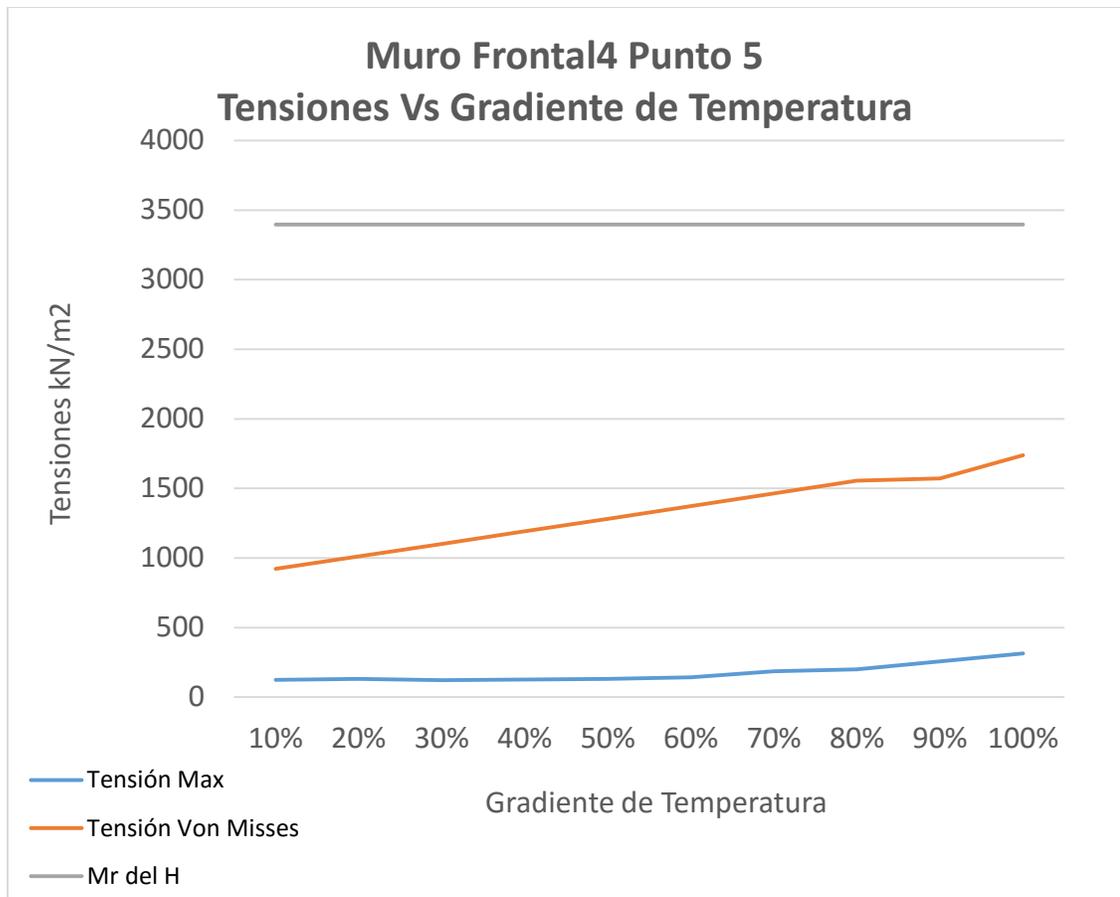


Figura 3.20 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

En el punto 5 situado en el centro del muro las tensiones crecen a medida que aumenta el gradiente de temperatura. Se puede afirmar que las tensiones en ningún momento llegan alcanzar el módulo de rotura del hormigón. En este caso, a pesar de no intersectarse con la curva de rotura, se produce con el aumento del diferencial térmico un aumento de las tensiones máximas de 0,18 Mpa y 0,81 MPa de las Von Misses, lo cual demuestra que el aumento y la variación de temperatura tienen un efecto bajo sobre los elementos de hormigón, en este caso el aumento no es significativo.

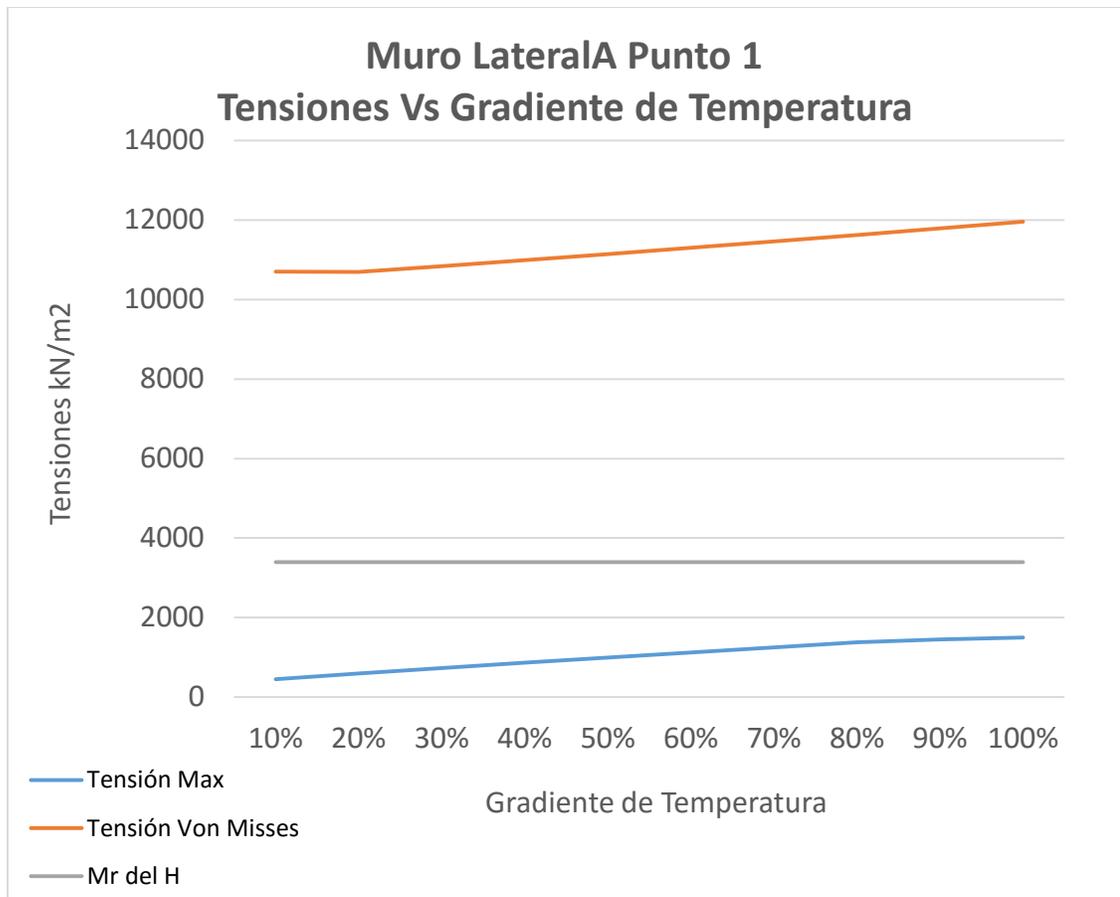


Figura 3.21 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

El gráfico muestra el comportamiento del punto 1 ubicado sobre el primer apoyo del muro lateral exterior, se puede observar que las tensiones aumentan a medida que aumenta el gradiente de temperatura. Como se aprecia las tensiones normales no superan el límite de rotura, no siendo así las tensiones de Von Misses, hay que tener en cuenta que las tensiones son calculadas con la combinación de todas las cargas CP, CU y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de las otras cargas. En este caso el aumento del diferencial térmico produce un aumento de las tensiones máximas de 1,04 Mpa y 1,26 MPa de las Von Misses, lo cual demuestra que el aumento y la variación de temperatura tienen efecto sobre los elementos de hormigón, en este caso un aumento medio.

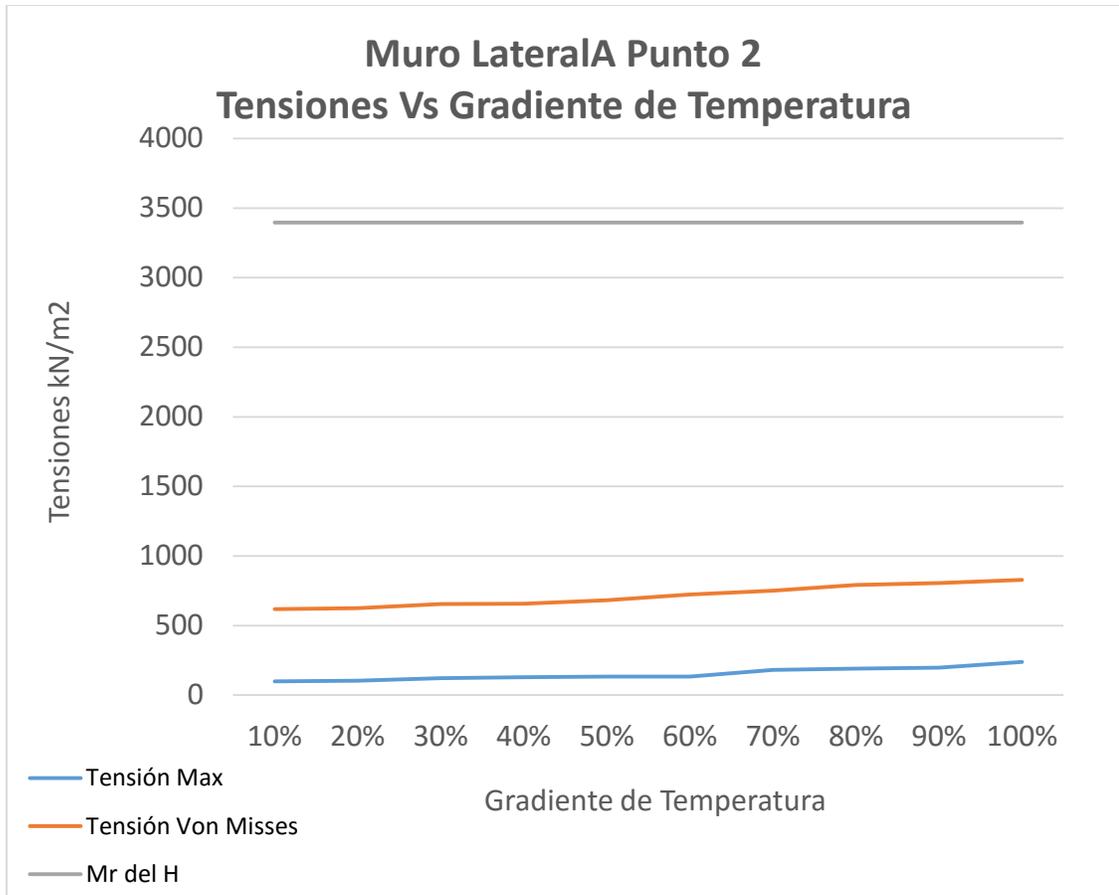


Figura 3.22 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

En el punto 2 situado en el centro del borde del muro lateral las tensiones crecen a medida que aumenta el gradiente de temperatura. Se puede afirmar que las tensiones en ningún momento llegan alcanzar el módulo de rotura del hormigón. En este caso, a pesar de no intersectarse con la curva de rotura, se produce con el aumento del diferencial térmico un aumento de las tensiones máximas de 0,13 Mpa y 0,21 MPa de las Von Misses, lo cual demuestra que el aumento y la variación de temperatura tienen un efecto sobre los elementos de hormigón muy bajo.

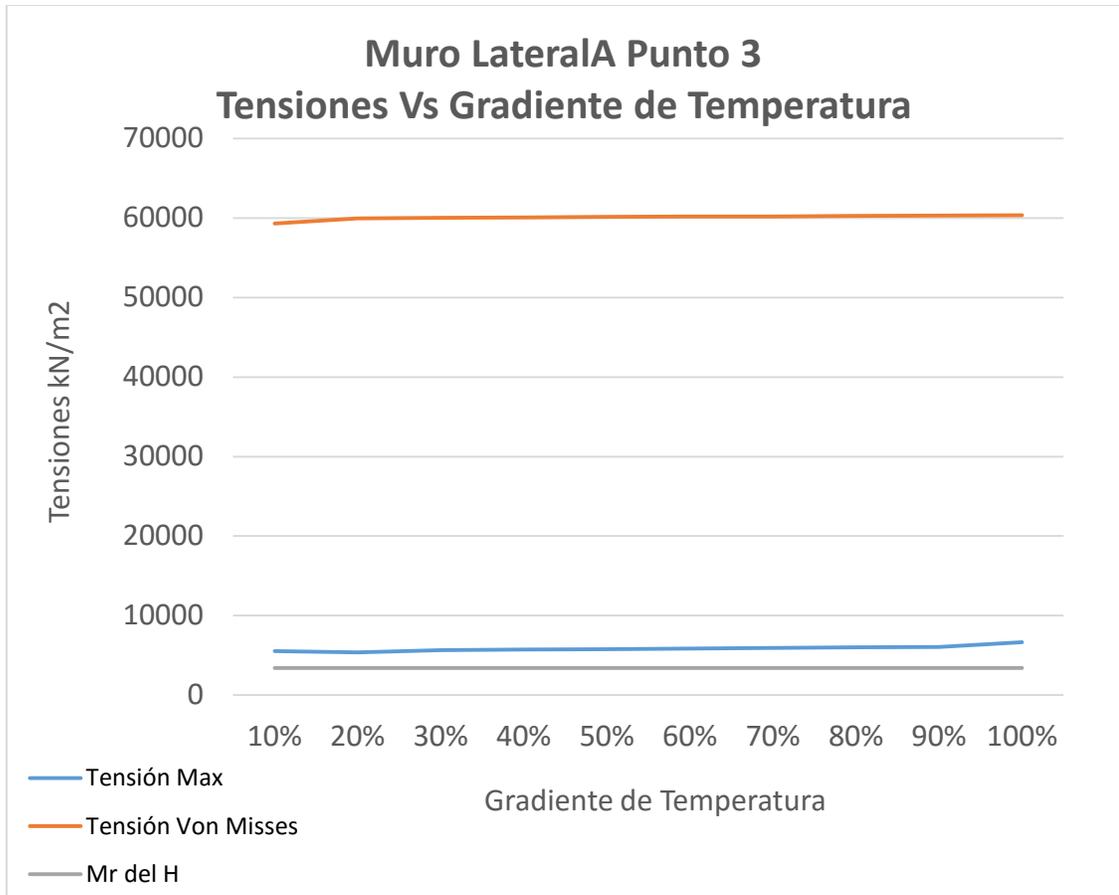


Figura 3.23 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

Se observa como las tensiones en general aumentan en el punto 3 ubicado en la parte superior de la esquina del muro con el crecimiento del gradiente. Las tensiones tienen valores elevados, superando en todo momento el módulo de rotura del hormigón. Hay que tener en cuenta que las mismas son calculadas con todas las cargas CP, CU y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de cargas restantes. Se produce con el aumento del diferencial térmico un aumento de las tensiones máximas de 1,11 Mpa y 1,04 MPa de las Von Misses, lo cual muestra un efecto medio del aumento y la variación de temperatura.

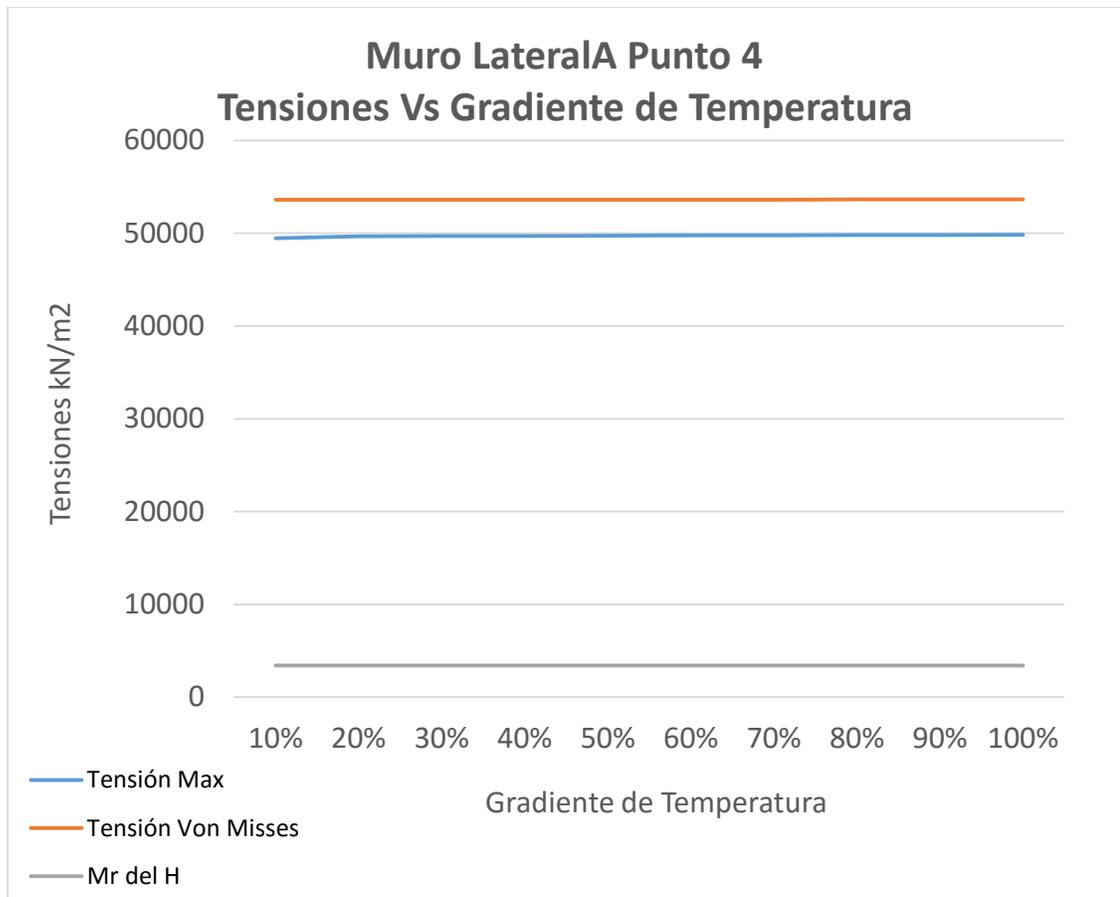


Figura 3.24 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

En el gráfico se observa el crecimiento de tensiones en el punto 4 ubicado en la parte superior del centro del muro ante el aumento del gradiente. Las tensiones tienen valores elevados, superando en todo momento el módulo de rotura del hormigón. Hay que tener en cuenta que las mismas son calculadas con todas las cargas CP, CU y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de cargas restantes. En este punto de análisis se produce con el aumento del diferencial térmico un aumento de las tensiones máximas de 0,35 Mpa y 0,024 MPa de las Von Misses, mostrando un comportamiento similar al punto anterior.

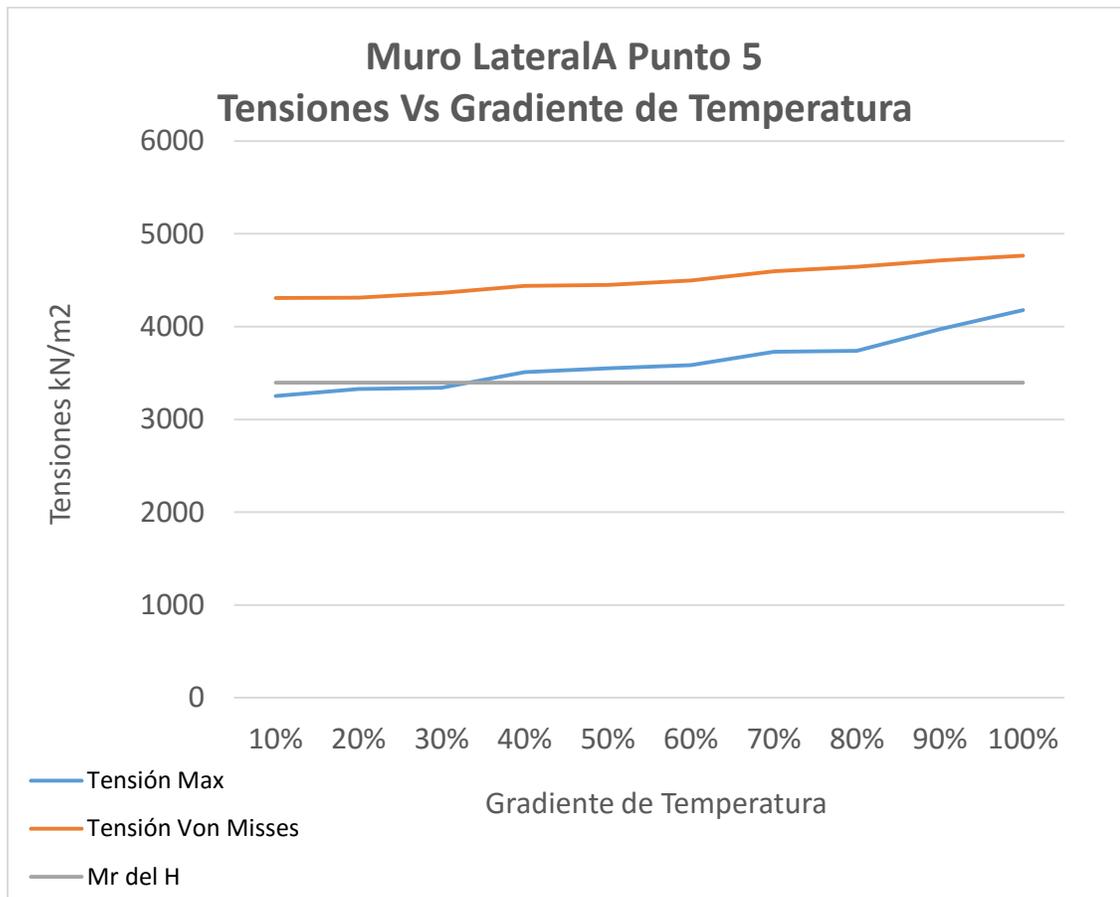


Figura 3.25 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

El gráfico representa el punto 5 ubicado en el centro del muro, se puede observar que las tensiones crecen a medida que aumenta el gradiente de temperatura. Como se aprecia las tensiones normales no superan el límite de rotura hasta la aplicación del 40% de la carga térmica, no siendo así las tensiones de Von Mises que se comportan en todo momento superior al límite de rotura establecido. Hay que tener en cuenta que las tensiones son calculadas con la combinación de todas las cargas CP, CU y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de las otras cargas. En este caso el aumento del diferencial térmico produce un aumento de las tensiones máximas de 0,92 Mpa y 0,45 MPa de las Von Mises, lo cual demuestra que el aumento y la variación de temperatura tienen un efecto significativo sobre los elementos de hormigón.

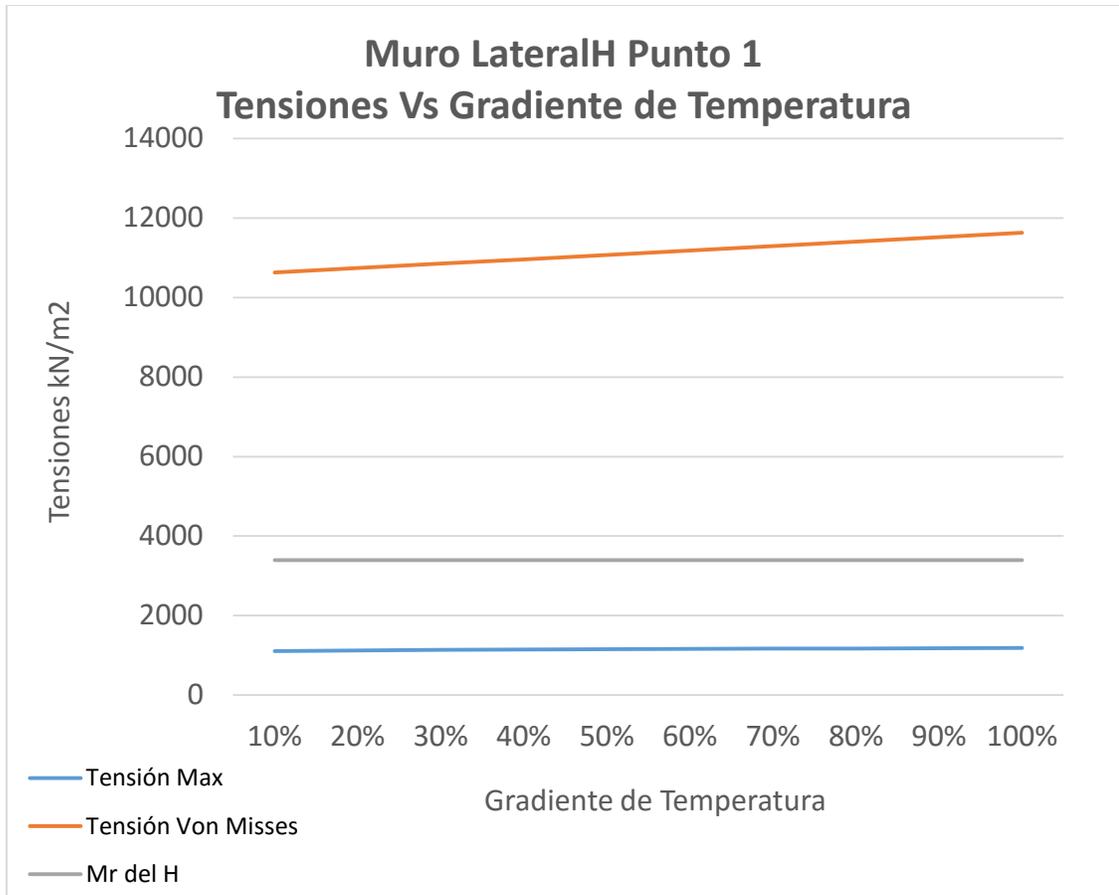


Figura 3.26 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

En el punto 1 ubicado sobre el primer apoyo del muro lateral se observa que las tensiones aumentan a medida que aumenta el gradiente de temperatura. Como se aprecia las tensiones normales no superan el límite de rotura, no siendo así las tensiones de Von Misses, hay que tener en cuenta que las tensiones son calculadas con la combinación de todas las cargas CP, CU y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de las otras cargas. En este caso el aumento del diferencial térmico produce un aumento de las tensiones máximas de 0,08 Mpa y 0,99 MPa de las Von Misses, lo cual demuestra un aumento poco significativo.

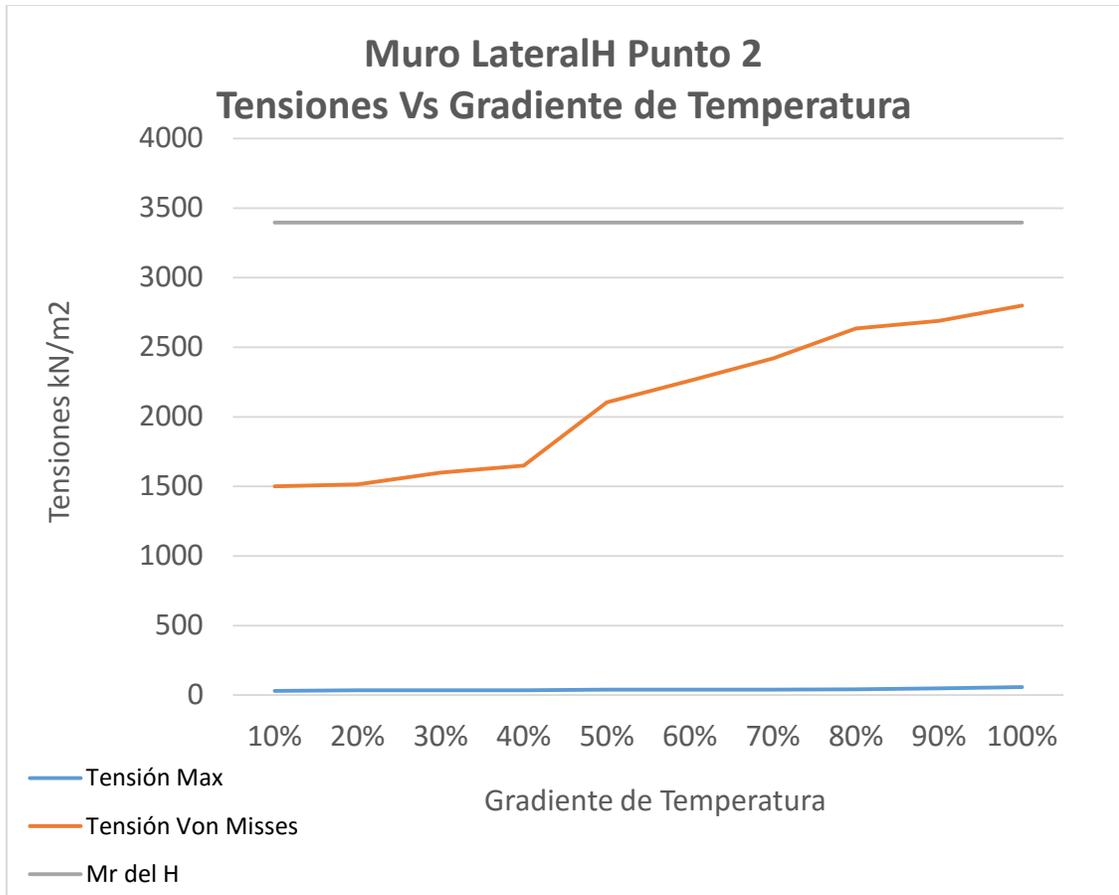


Figura 3.27 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

En el punto 2 situado en el centro del borde del muro las tensiones crecen a medida que aumenta el gradiente de temperatura. Se puede afirmar que las tensiones en ningún momento alcanzan el módulo de rotura del hormigón. En este caso, a pesar de no intersectarse con la curva de rotura, se produce con el aumento del diferencial térmico un aumento de las tensiones máximas de 0,026 Mpa y 1,29 MPa de las Von Misses, lo cual demuestra que el aumento y la variación de temperatura es bajo.

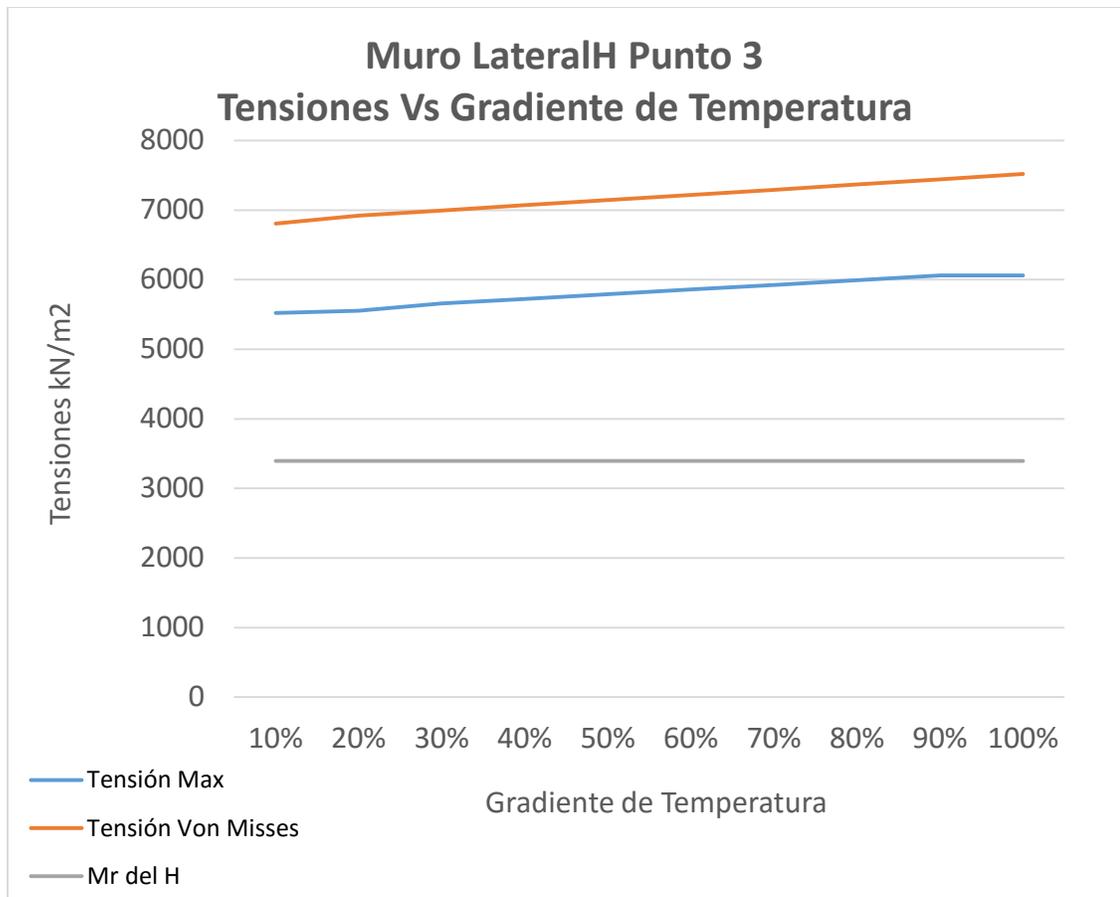


Figura 3.28 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

Se observa como las tensiones en general aumentan en el punto 3 ubicado en la parte superior de la esquina del muro con el crecimiento del gradiente. Las tensiones tienen valores elevados, superando en todo momento el módulo de rotura del hormigón. Hay que tener en cuenta que las mismas son calculadas con todas las cargas CP, CU y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de cargas restantes. En este caso el aumento del diferencial térmico produce un aumento de las tensiones máximas de 0,53 Mpa y 0,71 MPa de las Von Misses, existiendo un aumento con efecto medio en el muro de hormigón.

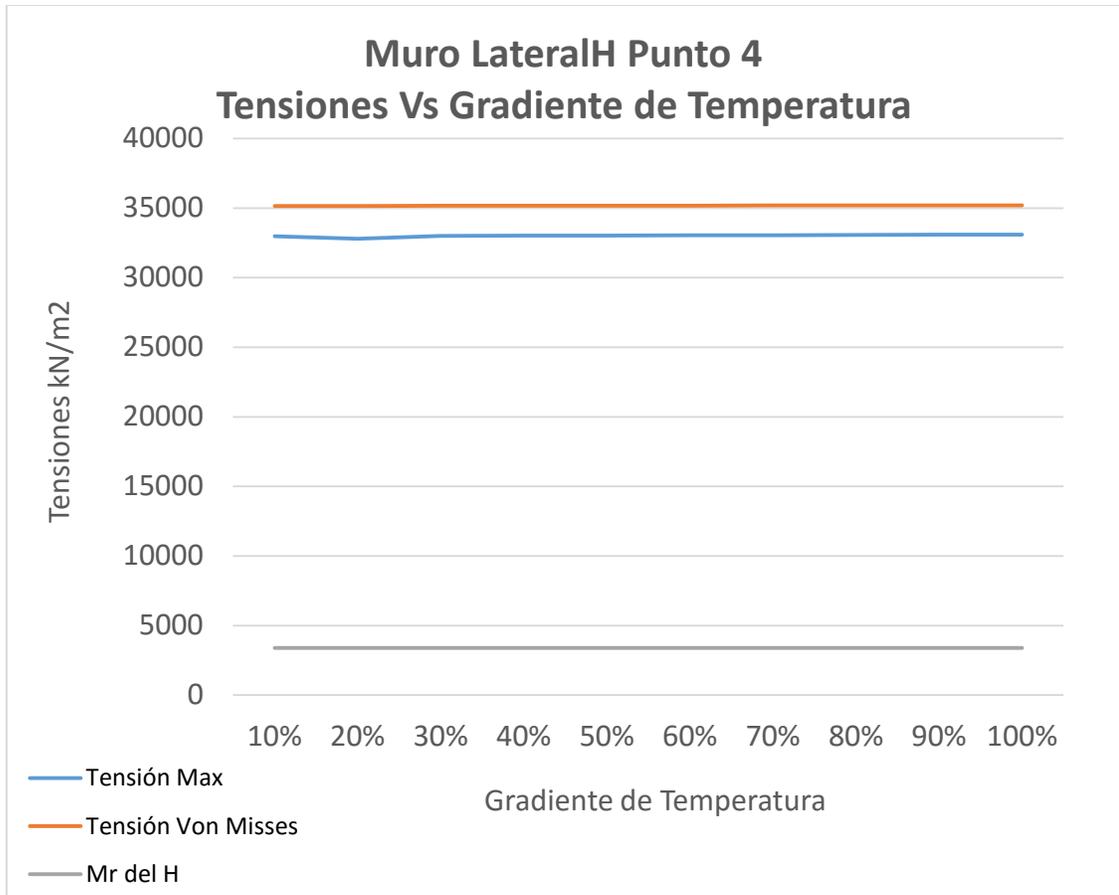


Figura 3.29 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

Se observa como las tensiones en general aumentan en el punto 4 ubicado en la parte superior del centro del muro con el crecimiento del gradiente. Las tensiones tienen valores elevados, superando el módulo de rotura del hormigón. Hay que tener en cuenta que las mismas son calculadas con todas las cargas CP, CU y T, por lo que se alcanza la rotura no por la temperatura sino por la aplicación de cargas restantes. El aumento del diferencial térmico produce un aumento de las tensiones máximas de 0,11 Mpa y 0,043 MPa de las Von Misses, teniendo así un efecto poco significativo sobre los elementos de hormigón.

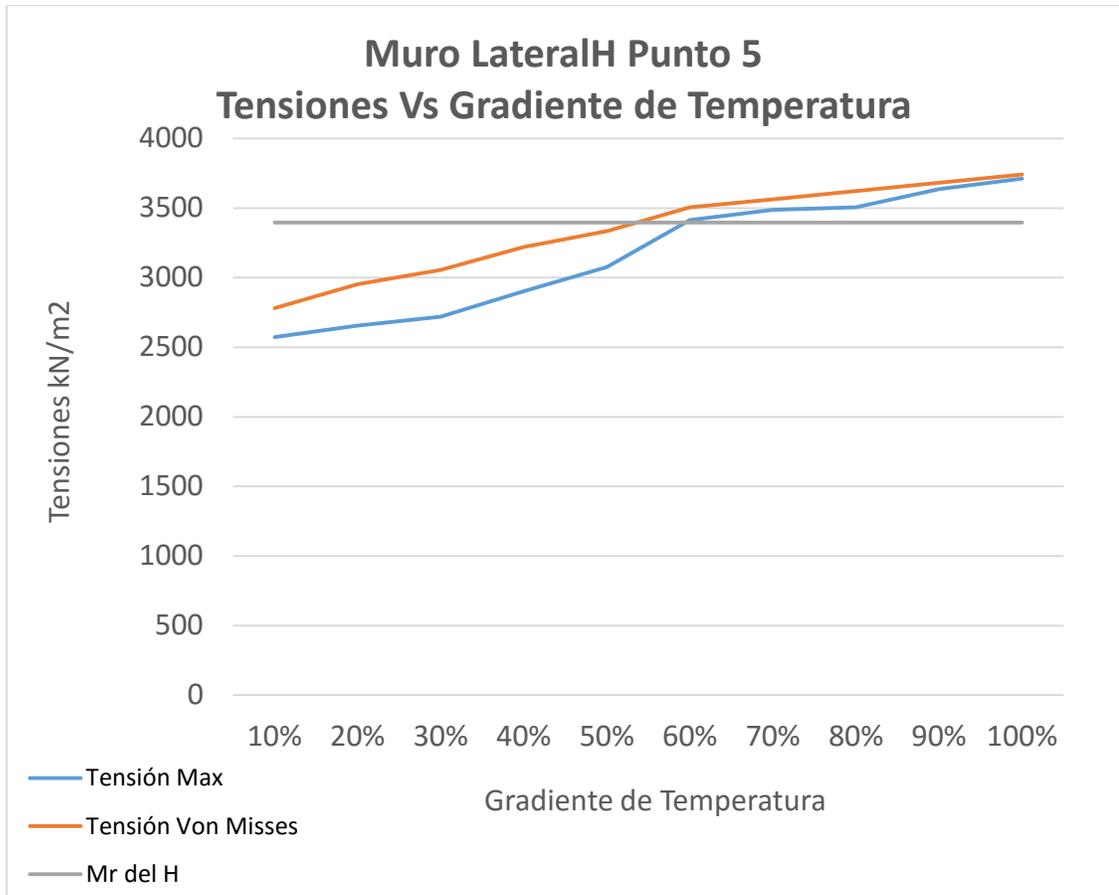


Figura 3.30 Tensiones en el muro aplicado el gradiente. (Elaboración propia)

En el punto 5 situado en el centro del muro lateral H las curvas de tensiones crecen a medida que aumenta el gradiente. Como se aprecia las tensiones no superan el límite de rotura hasta la aplicación del 50% del diferencial térmico. En este caso el aumento del gradiente produce un crecimiento en las tensiones máximas de 1,13 Mpa y 0,96 MPa en las de Von Misses, lo cual demuestra que el aumento y la variación de temperatura tienen efecto sobre los elementos de hormigón, en este caso el efecto es importante a tener en cuenta.

3.3 Conclusiones parciales del capítulo

- En el módulo aislado los puntos 1 y 7 que se encuentran ubicados sobre los apoyos se aprecia que un aumento de la temperatura aplicada produce un aumento de tensión considerable, en el resto de los puntos el comportamiento de las tensiones producto del aumento de la temperatura es casi constante por lo que se puede concluir que el efecto de la temperatura en ellos es muy bajo.
- En el módulo total los puntos 3, 4 y 5 que son los que se encuentran en el borde superior de la esquina y los que están en el centro del tramo analizado se aprecia que un aumento del gradiente de temperatura produce un aumento de tensión elevado, en el resto de los puntos el comportamiento de las tensiones producto del aumento de la temperatura es casi constante por lo que se puede concluir que el efecto de la temperatura en ellos es bajo.

CONCLUSIONES

1. A nivel mundial el uso de la modelación estructural se ha extendido en el estudio del comportamiento ante cargas térmicas de estructuras de hormigón armado, entre ellos elementos planos: muros y losa, empleando sobre todo el método de elementos finitos.
2. La modelación estructural es una herramienta ampliamente utilizada en el estudio del comportamiento de las tensiones en elementos estructurales, todo modelo elaborado en cualquier *software* debe ser ajustado, refinando el mallado del elemento hasta obtener estabilidad en los parámetros medidos (tensiones y deformaciones).
3. Las tensiones que se generan en los puntos analizados se incrementan según aumenta el gradiente de temperatura aplicada, demostrándose el efecto de la misma sobre los elementos.
4. Las tensiones que se generan en los elementos planos de hormigón armado producto al gradiente de temperatura superan las tensiones que puede soportar el material, fisurándose, alcanzando la rotura no solo por la temperatura sino por la aplicación de cargas restantes. El aumento del diferencial térmico produce un aumento de las tensiones por lo que se puede decir que existe un efecto por temperatura en los elementos planos de hormigón armado.

RECOMENDACIONES

1. Ampliar el estudio realizado a edificaciones que se construyan o ya estén en explotación ubicadas en zonas de altas temperaturas y que tengan climatización interior, las cuales pueden padecer o estar padeciendo de afectaciones producto del gradiente térmico, aspecto estudiado en esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIRRE, M. E. U. & AGUIRRE, G. J. A. J. G. T. 2018. Efecto del tiempo de exposición al fuego en la resistencia a flexión de vigas de hormigón armado. 19, 7-18.
- BITENCOURT, L. A. G., MANZOLI, O. L., TRINDADE, Y. T., RODRIGUEZ, E. A. & DIAS DA COSTA, D. 2018. Modeling reinforced concrete structures using coupling finite elements for discrete representation of reinforcements. *Finite Elements in Analysis and Design*, 149, 32-44.
- BUSTAMANTE, G. R. & VÁSQUEZ, F. D. 2018. Comparación de tiempo y costo entre el hormigón tradicional y elementos prefabricados para edificios de mediana altura en la ciudad de Cuenca. Universidad del Azuay.
- CAPOTE, J. A., ALVEAR, D., LÁZARO, M., CRESPO, J., FLETCHER, I., WELCH, S. & TORERO, J. 2011. Modelado de las solicitaciones de los elementos estructurales de hormigón en edificios de gran altura en incendios reales. *Informes de la Construcción* 63, 83-91.
- CARRERA, S. P. & IRIGOYEN, M. V. 2018. Diseño estructural en condiciones de incendio del sistema de entrepiso del edificio “Torino” aplicando un método de cálculo basado en la modelación estructural del edificio. Quito, 2018.
- CHALCO, C. G. & PROAÑO, M. R. J. C. 2018. Juntas de dilatación en edificios. 17.
- CROPPI, J. I. & SÁNCHEZ, P. J. J. R. T. Y. C. 2018. Modelo Termo-Mecánico para el Análisis de Estructuras de Hormigón a Edades Tempranas. 66-78.
- GALLARDO, D. 2019. Análisis estructural de la cubierta del Hipódromo de la Zarzuela de Eduardo Torroja mediante SAP2000.
- GARCÍA, J. A. 2016. Modelación numérica de pisos industriales en concreto rígido Camilo Cienfuegos, Matanzas.
- HAILOO, H. & GREEN, M. F. 2019. GFRP reinforced concrete slabs in fire: Finite element modelling. *Engineering Structures*, 183, 1109-1120.
- HERNÁNDEZ, E. 2017. Hormigón armado y pretensado.

- LARRUA, R. & PIGNATTA, V. J. R. T. D. L. F. D. I. U. D. Z. 2013. Modelación térmica del ensayo de conexiones acero-hormigón a elevadas temperaturas. 36, 210-218.
- LEONARDO, Z. S. 2017. Elaboración de un software en base a MATLAB para el cálculo y diseño de losas macizas y nervadas. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.
- MEDINA, M. J. 2017. Reproducción en FDS de un incendio real de aparcamiento. Universidad Politècnica de Catalunya Barcelona.
- PÈREZ, J. 2016. Patologies de estructures de hormigòn armado.
- QUIROGA, F. E. 2017. Modelación, análisis y diseño estructural de una edificación de tres plantas de uso público con seccion compuesta usando el espectro de diseño, nec-15 y etabs Guayaquil-Ecuador
- QUIZA, R. 2015. Introducción al Método de Elementos Finitos. Universidad de Matanzas.
- SÁNCHEZ, W. 2018 Modelación de las tensiones en las zonas cercanas a los ganchos de izaje en las losas del sistema GP-IV Camilo Cienfuegos, Matanzas.
- VERA, C. M. 2017. Estudio y analisis de reforzamiento de una losa de dos direcciones usando la fibra de carbono, ubicado en la ciudad de Babahoyo provincia de Los Rios Universidad de Guayaquil Ecuador.
- XENOS, D. & GRASSL, P. 2016. Modelling the failure of reinforced concrete with nonlocal and crack band approaches the damage-plasticity model CDPM2. Finite Elements in Analysis and Design, 117-118, 11-20.
- YELA, J. R. 2017. Determinación del gradiente térmico en losas de pavimentos de concreto hidráulico Universidad de San Carlos de Guatemala.
- ZAFRA, F. T. & CASTELLANOS, N. T. J. R. D. L. E. C. D. I. 2019. Conceptos básicos y principales metodologías del diseño estructural para condiciones de incendio según normas internacionales, aplicadas al Reglamento Colombiano de Construcciones Sismorresistentes (NSR-10). 35-47.

ANEXOS

Anexo 1 Tablas de las tensiones en los puntos comprobados para el ajuste del modelo total

Anexo 1.1 Resultado de las tensiones en los puntos comprobados en muros laterales

	Tensiones en muro lateral A (kN/m ²)				
Cant de elementos	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
12	2508,23054	1667,557642	19586,200235	21132,487001	4085,53433
48	5186,827871	1073,430644	24222,664672	24751,326797	3183,188576
192	677,631706	137,046589	24007,124661	26023,069397	2094,288392
768	319,480867	264,070709	22574,596069	26724,465374	3023,684880
3072	314,08115	227,804668	25325,676036	22616,220994	1745,172972
	Tensiones en muro lateral B (kN/m ²)				
12	12,034981	1,949666	2,073345	2,073345	3,029222
48	184,318459	4,740692	0,757551	0,757551	4,740692
192	363,387439	0,667465	0,51848	0,51848	0,667465
768	559,504427	0,161689	0,295829	0,295829	0,161689
3072	538,0064	3,117395	0,453475	0,453475	3,117395
	Tensiones en muro lateral C (kN/m ²)				
12	12,034981	1,949666	2,073345	2,073345	3,029222
48	184,318459	4,740692	0,757551	0,757551	4,740692
192	363,387439	0,667465	0,51848	0,51848	0,667465
768	559,504427	0,161689	0,295829	0,295829	0,161689
3072	538,0064	3,117395	0,453475	0,453475	3,117395
	Tensiones en muro lateral D (kN/m ²)				
12	12,034981	1,949666	2,073345	2,073345	3,029222
48	400,840146	142,9106	86,000909	35,544337	1783,730421
192	883,020991	352,697117	35,397308	23,413141	2231,570802
768	751,243452	101,301584	5,178139	6,6448	585,877011

3072	629,440064	118,174923	3,215727	6,632966	53,634821
	Tensiones en muro lateral E (kN/m2)				
12	994,715393	516,142023	169,98517	209,560052	826,675795
48	159,790812	459,260194	86,779316	58,9066	1609,953438
192	742,202362	842,389341	73,279851	44,272218	2982,774152
768	538,007138	111,870895	7,506659	8,284908	1230,457606
3072	556,483214	114,092237	5,758435	3,683154	1094,53828
	Tensiones en muro lateral F (kN/m2)				
12	4028,028122	510,337686	158,272847	191,810375	911,285974
48	184,318459	4,740692	0,757551	0,757551	4,740692
192	363,387439	0,667465	0,51848	0,51848	0,667465
768	559,504427	0,161689	0,295829	0,295829	0,161689
3072	538,0064	3,117395	0,453475	0,453475	3,117395
	Tensiones en muro lateral G (kN/m2)				
12	12,034981	1,949666	2,073345	2,073345	3,029222
48	184,318459	4,740692	0,757551	0,757551	4,740692
192	363,387439	0,667465	0,51848	0,51848	0,667465
768	559,504427	0,161689	0,295829	0,295829	0,161689
3072	538,0064	3,117395	0,453475	0,453475	3,117395
	Tensiones en muro lateral H (kN/m2)				
12	6279,340811	1791,324166	18876,637755	21847,639804	4298,249055
48	4499,495536	1090,343358	23083,890789	24855,801768	3514,974814
192	104,576913	483,4121`21	23314,733544	26127,019253	2593,288279
768	1460,322147	3457,706258	44798,146221	26338,896827	1992,894757
3072	841,221702	3250,951615	4780,934665	14997,924143	1922,629018

Anexo 1.2 Resultado de las tensiones en los puntos comprobados en muros frontales

	Tensiones en muro frontal 1 (kN/m ²)				
Cant de elementos	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
128	90,685473	1240,614933	4309,297063	4157,048679	5009,772142
512	505,180082	1007,572159	7299,437582	44,242071	35,89482
2048	672,691608	199,107528	10563,501822	83,473829	6529,130161
8192	580,343385	100,364193	14001,405584	2042,170822	6209,747834
32768	588,484899	108,435627	13980,657892	2040,156789	6000,674589
	Tensiones en muro frontal 2 (kN/m ²)				
128	1790,694548	1678,769517	32387,931903	16957,452493	1123,014071
512	3156,263481	6605,708418	14670,842534	101,830814	949,860216
2048	363,096891	190,776529	9901,318108	2618,910212	858,614814
8192	322,450251	39,696929	502,315577	2038,768814	1091,822645
32768	320,465789	40,536587	458,365874	2053,578876	1100,758839
	Tensiones en muro frontal 3 (kN/m ²)				
128	1790,694548	1678,769517	32387,931903	16957,452493	1123,014071
512	3314,119639	6509,947539	14307,427929	107,069465	800,220546
2048	291,151423	167,300926	9454,788395	2727,907943	858,614814
8192	221,021237	174,205932	470,203486	434,882004	510,475723
32768	225,754367	183,753258	452,753246	468,864223	559,853389
	Tensiones en muro frontal 4 (kN/m ²)				
128	373,690394	2285,205475	4206,362386	4009,087456	8,000614
512	704,122045	234,466762	7344,686993	63,493496	3,03664
2048	3302,556738	25,606938	10801,064377	74,370188	4,841656
8192	1255,223318	62,915617	11501,465868	10315,794208	118,929283
32768	1264,765388	69,764325	11693,643268	11553,87537	120,753267

Anexo 1.3 Resultado de las tensiones en los puntos comprobados en cubierta

	Tensiones en losa de cubierta (kN/m ²)				
Cant de elementos	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
4	58141,460016	54606,875904	58072,080216	58387,14475	55864,415923
16	70954,308864	69133,623761	70677,346225	44677,811752	42127,848063
64	12886,243093	73477,329598	13161,627582	40397,284032	38682,761306
256	8945,283837	74786,070140	8900,681863	37952,460031	39622,701117
1024	8782,045738	75895,653796	8719,731537	34726,801713	31104,504353

Anexo 1.4 Resultado de las tensiones en los puntos comprobados en entrepisos

	Tensiones en losa de entrespiso 1 (kN/m ²)				
Cant de elementos	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
16	107285,226271	26328,841707	105981,432984	103145,756904	10915,960439
64	184168,017602	57105,494792	181633,555504	78489,118703	4592,738613
256	15042,081664	908,595691	9096,916919	3639,403028	4841,772931
1024	3845,762639	536,521898	3144,896067	3650,692932	1731,156337
4096	3840,674523	785,598068	3100,224675	3608,471617	1700,476725
	Tensiones en losa de entrespiso 2 (kN/m ²)				
16	107406,451755	31370,521607	107376,710689	102869,088346	10108,509816
64	181913,676371	64210,917178	181998,715788	77011,032176	4790,704786
256	12659,088211	12466,119592	14020,765997	4233,402035	6089,273647
1024	9093,629517	12409,957403	15536,414839	1441,415629	1292,472939
4096	9519,933548	12246,743988	13284,529949	1757,457662	1226,555329

Anexo 2 Tablas de las deformaciones en los puntos comprobados para el ajuste del modelo total

Anexo 2.1 Resultado de las deformaciones en los puntos comprobados en muros laterales

	Deformaciones en muro lateral A (m)				
Cant de elementos	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
12	0	0,0003	0,0004	0,0004	0,0004
48	0	0,0006	0,0007	0,0008	0,0008
192	0	0,0005	0,0007	0,0006	0,0006
768	0	0,0005	0,0007	0,0007	0,0007
3072	0	0,0006	0,0007	0,0008	0,0008
	Deformaciones en muro lateral B (m)				
12	0	0,00005373	0,00006232	0,00006232	0,00005373
48	0	0,0000723	0,00008062	0,00008062	0,0000723
192	0	0,00008715	0,00009422	0,00009422	0,00008715
768	0	0,0008	0,0007	0,0008	0,0008
3072	0	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006
	Deformaciones en muro lateral C (m)				
12	0	0,00005373	0,00006232	0,00006232	0,00005373
48	0	0,0000723	0,00008062	0,00008062	0,0000723
192	0	0,00008715	0,00009422	0,00009422	0,00008715
768	0	0,0008	0,0007	0,0008	0,0008
3072	0	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006
	Deformaciones en muro lateral D (m)				
12	0	0,00005373	0,00006232	0,00006232	0,00005373
48	0	0,00006668	0,00006898	0,00008478	0,0001
192	0	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006
768	0	0,0005	0,0007	0,0007	0,0007
3072	0	0,0006	0,0007	0,0008	0,0008

Deformaciones en muro lateral E (m)					
12	0	0,00004262	0,0000473	0,0001	0,0001
48	0	0,00004339	0,00004547	0,0002	0,0002
192	0	0,00004	0,0005	0,0003	0,0003
768	0	0,0004	0,0005	0,0003	0,0003
3072	0	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004
Deformaciones en muro lateral F (m)					
12	0	0,00004116	0,00004561	0,0001	0,0001
48	0	0,0000723	0,00008062	0,00008062	0,0000723
192	0	0,00008715	0,00009422	0,00009422	0,00008715
768	0	0,0008	0,0007	0,0008	0,0008
3072	0	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006
Deformaciones en muro lateral G (m)					
12	0	0,00005373	0,00006232	0,00006232	0,00005373
48	0	0,0000723	0,00008062	0,00008062	0,0000723
192	0	0,00008715	0,00009422	0,00009422	0,00008715
768	0	0,0008	0,0007	0,0008	0,0008
3072	0	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006
Deformaciones en muro lateral H (m)					
12	0	0,0003	0,0004	0,0004	0,0004
48	0	0,0005	0,0007	0,0008	0,0008
192	0	0,0006	0,0008	0,0007	0,0007
768	0	0,0005	0,0007	0,0007	0,0007
3072	0	0,0006	0,0007	0,0008	0,0008

Anexo 2.2 Resultado de las deformaciones en los puntos comprobados en muros frontales

	Deformaciones en muro frontal 1 (m)				
Cant de elementos	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
128	0	0,0003	0,0004	0,03015	0,00225
512	0	0,0006	0,0007	0,03225	0,00224
2048	0	0,0005	0,0007	0,03376	0,00242
8192	0	0,0004	0,0007	0,03426	0,003
32768	0	0,0002	0,00008526	0,03428	0,003
	Deformaciones en muro frontal 2 (m)				
128	0	0,0008	0,0013	0,00852	0,0029
512	0	0,0007	0,0012	0,008129	0,0030
2048	0	0,0002	0,0001	0,00813	0,0040
8192	0	0,0004	0,0002	0,0082	0,0041
32768	0	0,0004	0,0003	0,0083	0,0042
	Deformaciones en muro frontal 3 (m)				
128	0	0,0008	0,0013	0,00852	0,0029
512	0	0,0007	0,0012	0,008129	0,0030
2048	0	0,0002	0,0001	0,00813	0,0040
8192	0	0,0004	0,0002	0,0082	0,0041
32768	0	0,0004	0,0003	0,0083	0,0042
	Deformaciones en muro frontal 4 (m)				
128	0	0,0003	0,0004	0,003016	0,02958
512	0	0,0006	0,0007	0,003226	0,03602
2048	0	0,0006	0,0007	0,003270	0,03640
8192	0	0,0007	0,0007	0,003313	0,036523
32768	0	0,0007	0,0008	0,003403	0,036537

Anexo 2.3 Resultado de las deformaciones en los puntos comprobados en cubierta

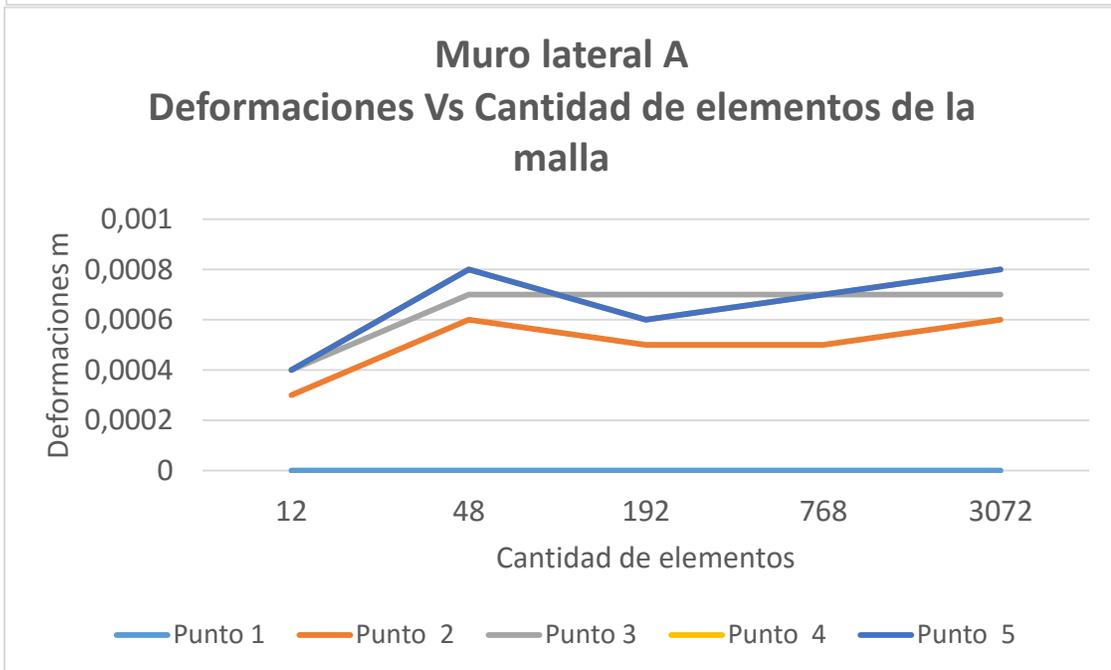
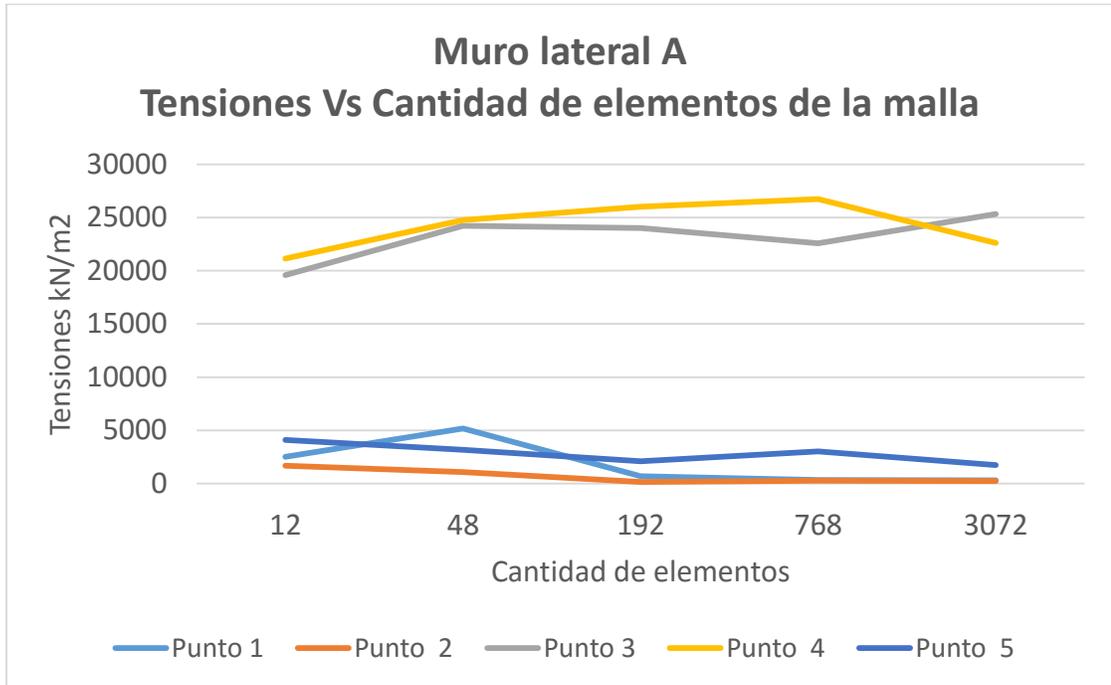
	Deformaciones en losa de cubierta (m)				
Cant de elementos	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
4	0,0004	0,0004	0,0004	0,003016	0,002332
16	0,0007	0,0008	0,0007	0,003226	0,00255
64	0,0007	0,0006	0,0007	0,003379	0,002693
256	0,0006	0,0006	0,00074	0,003225	0,003045
1024	0,0007	0,0007	0,0008	0,003376	0,003284

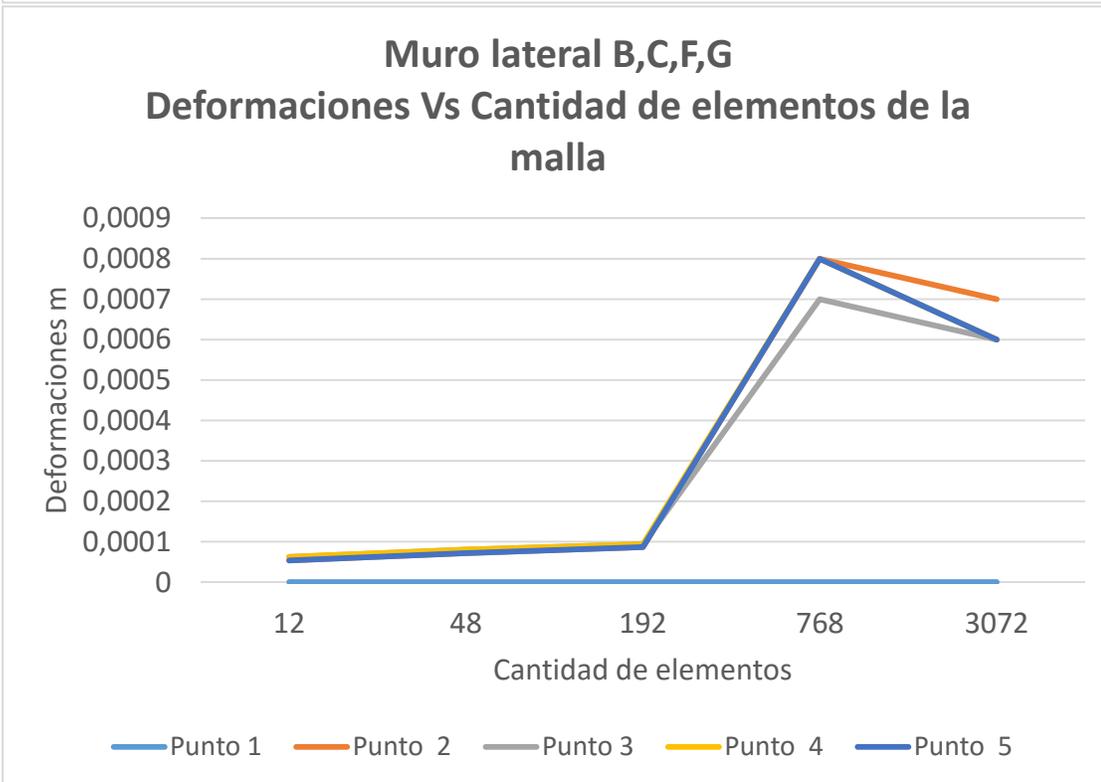
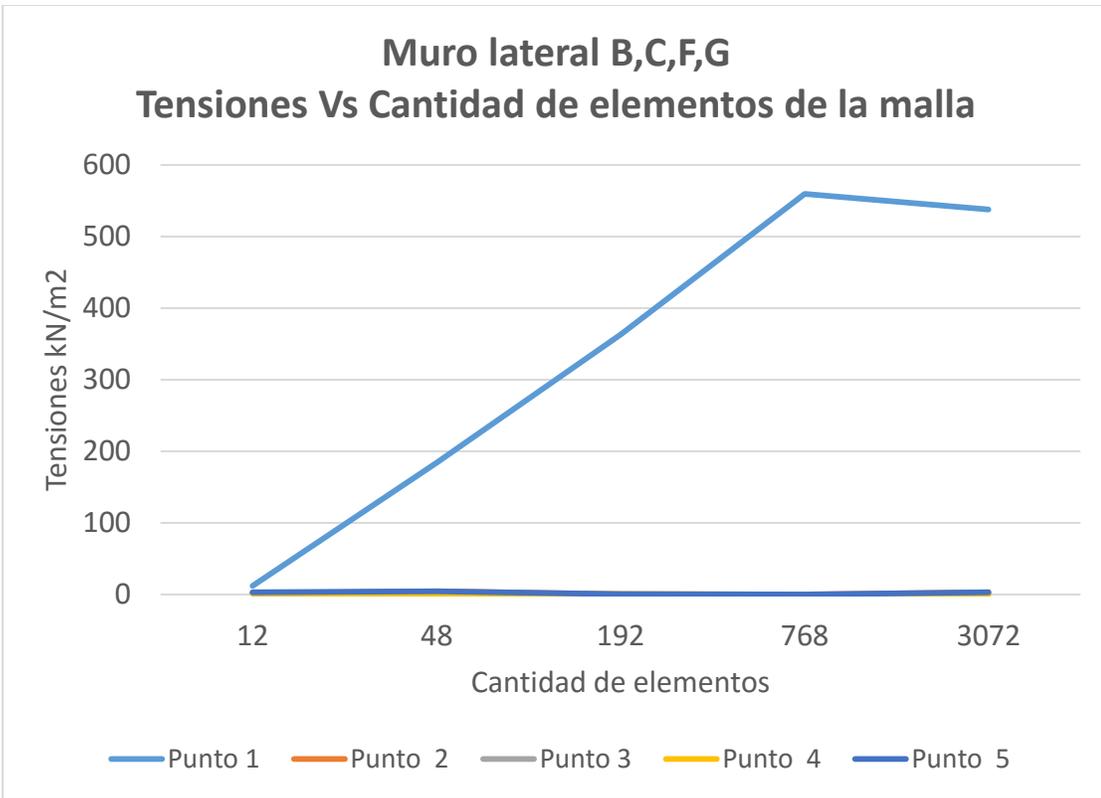
Anexo 2.4 Resultado de las deformaciones en los puntos comprobados en entrepisos

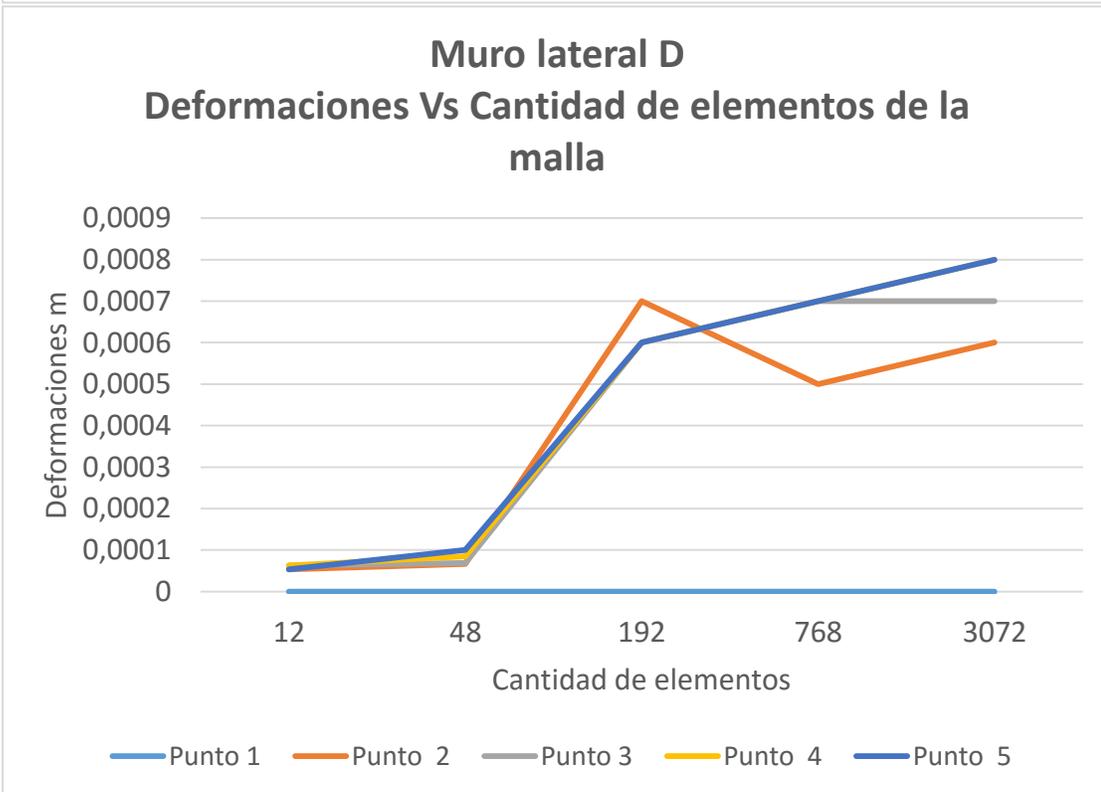
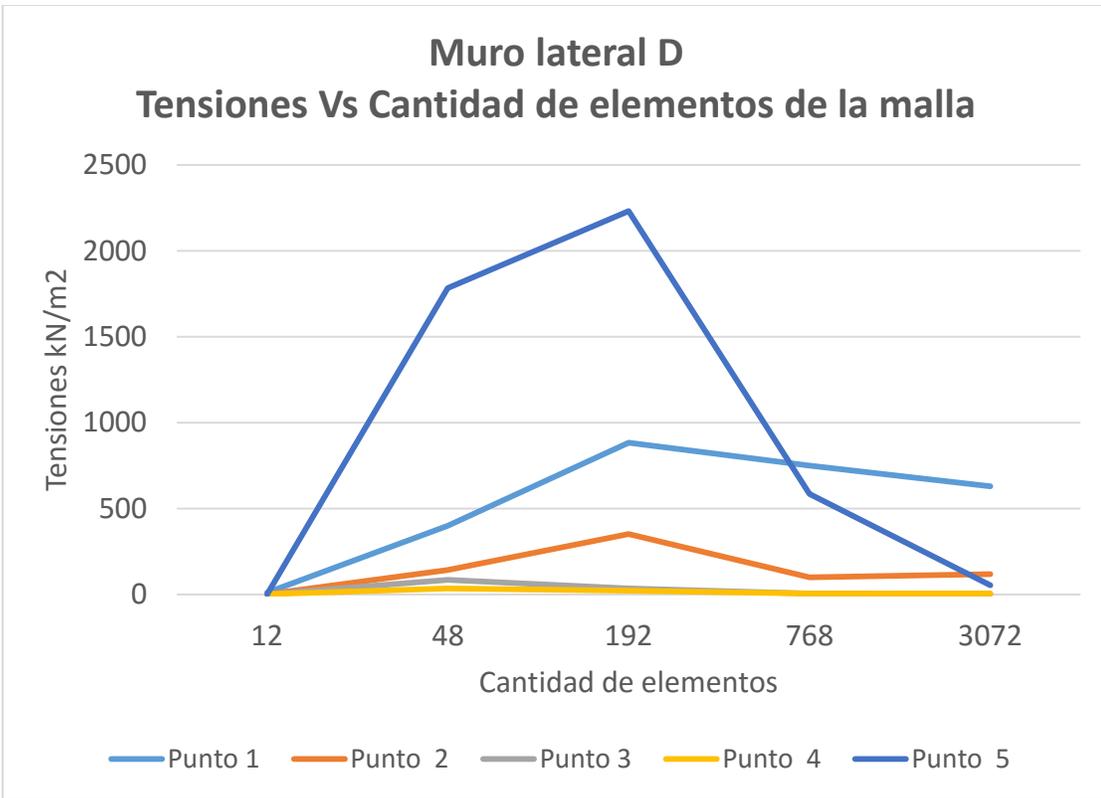
	Deformaciones en losa de entrespiso 1 (m)				
Cant de elementos	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
16	0,0002	0,0004	0,0002	0,001037	0,004
64	0,0004	0,0008	0,0005	0,00164	0,0042
256	0,0004	0,0006	0,0005	0,003093	0,0043
1024	0,0005	0,0006	0,0006	0,003226	0,0045
4096	0,0005	0,0007	0,0006	0,003379	0,005
	Deformaciones en losa de entrespiso 2 (m)				
16	0,0004	0,0004	0,0004	0,00111	0,0024
64	0,0007	0,0007	0,0007	0,001539	0,0025
256	0,0006	0,0006	0,0008	0,0017	0,0027
1024	0,0006	0,0006	0,00074	0,0017	0,0027
4096	0,0007	0,0007	0,0008	0,0017	0,0028

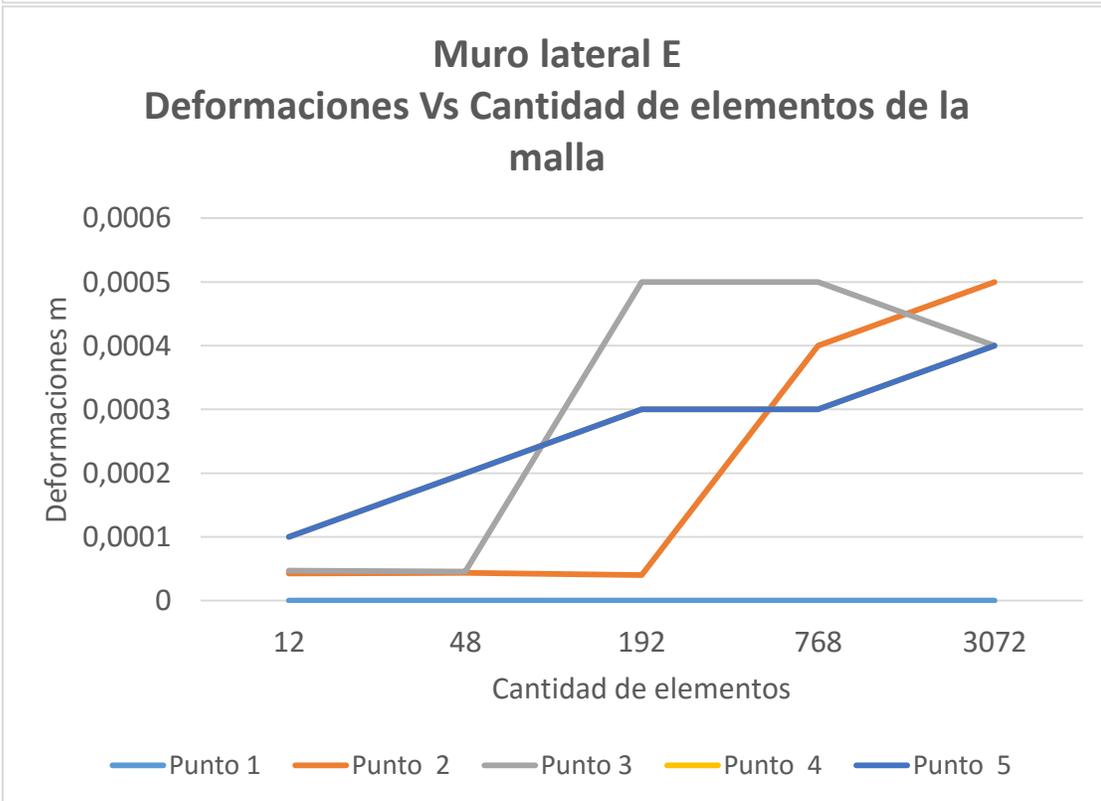
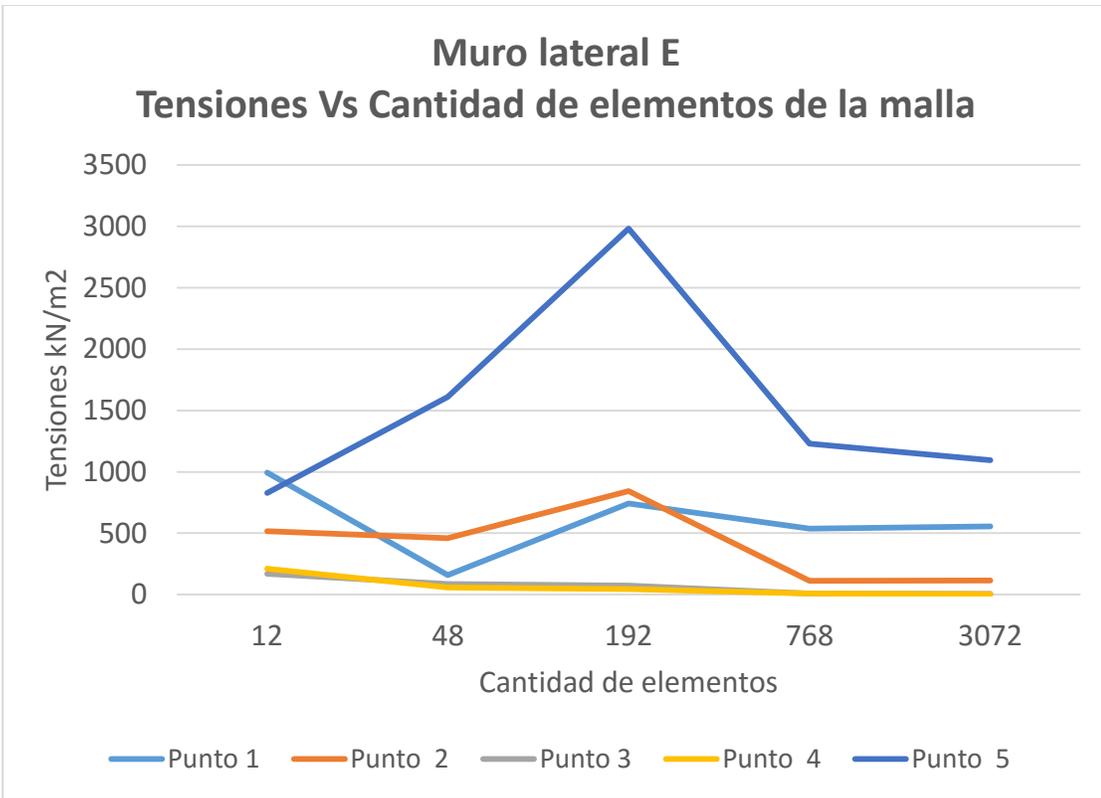
Anexo 3 Gráficos de tensiones y deformaciones de los elementos planos de hormigón en el proceso de ajuste

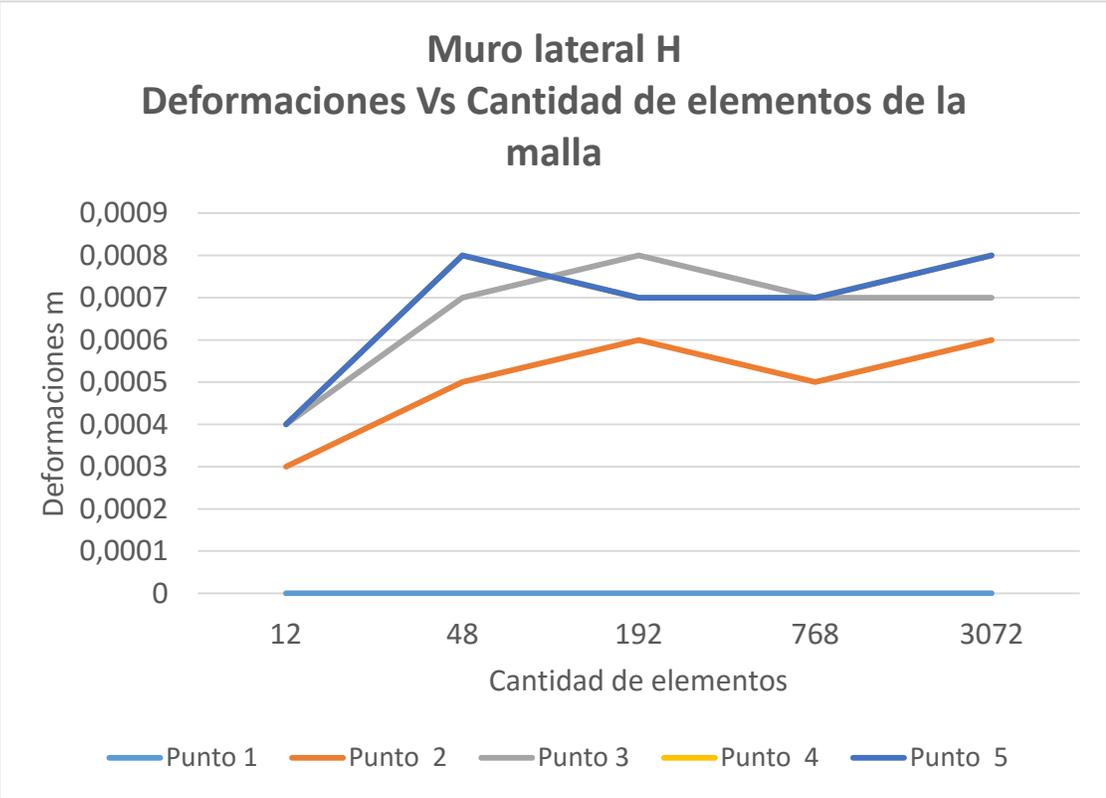
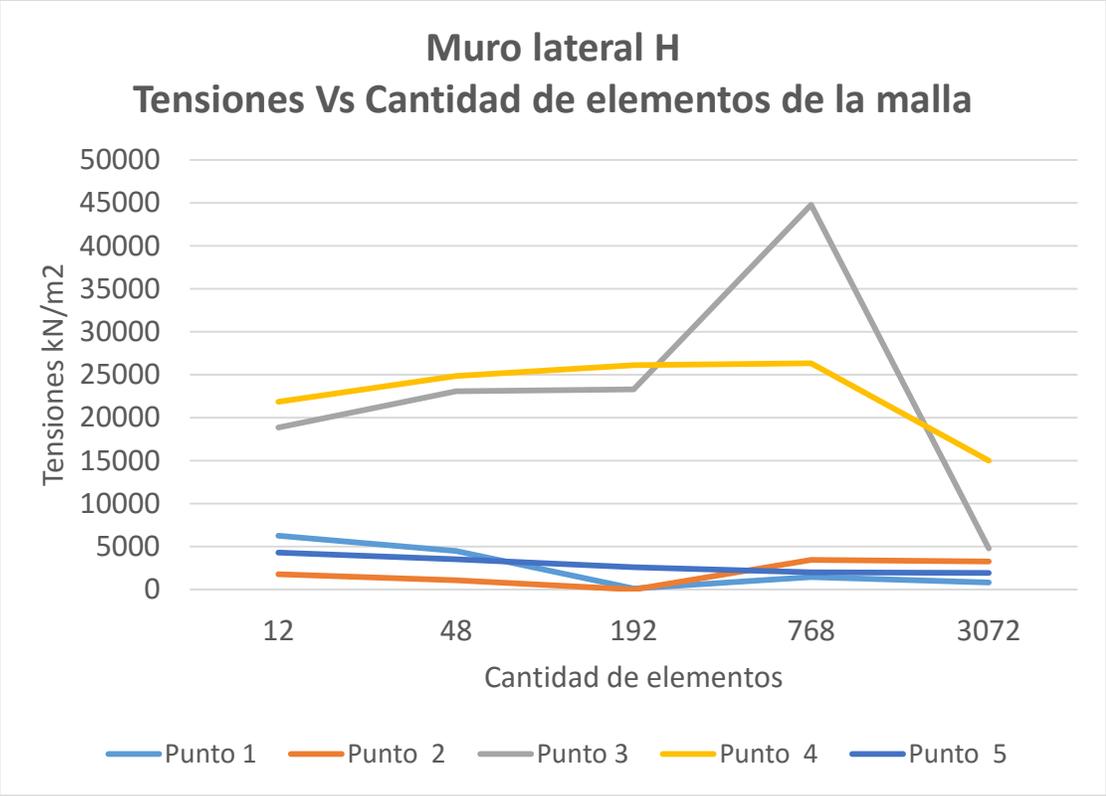
Anexo 3.1 Gráficos de tensiones y deformaciones de muros laterales



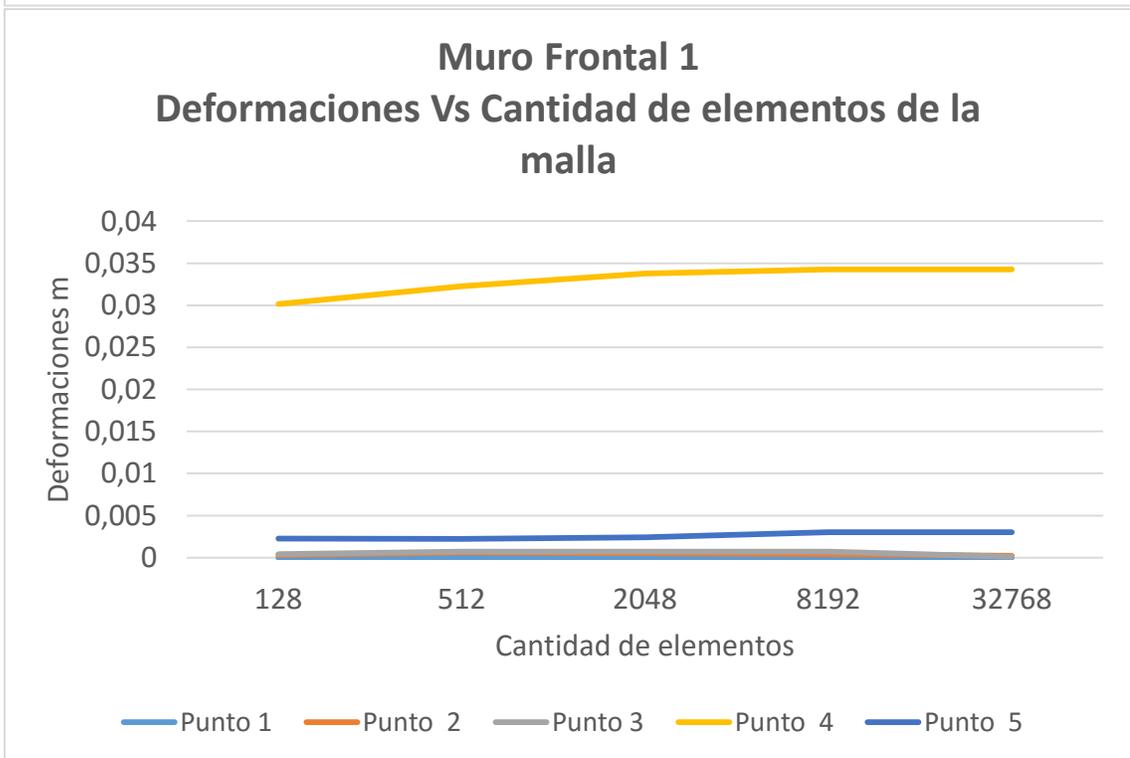
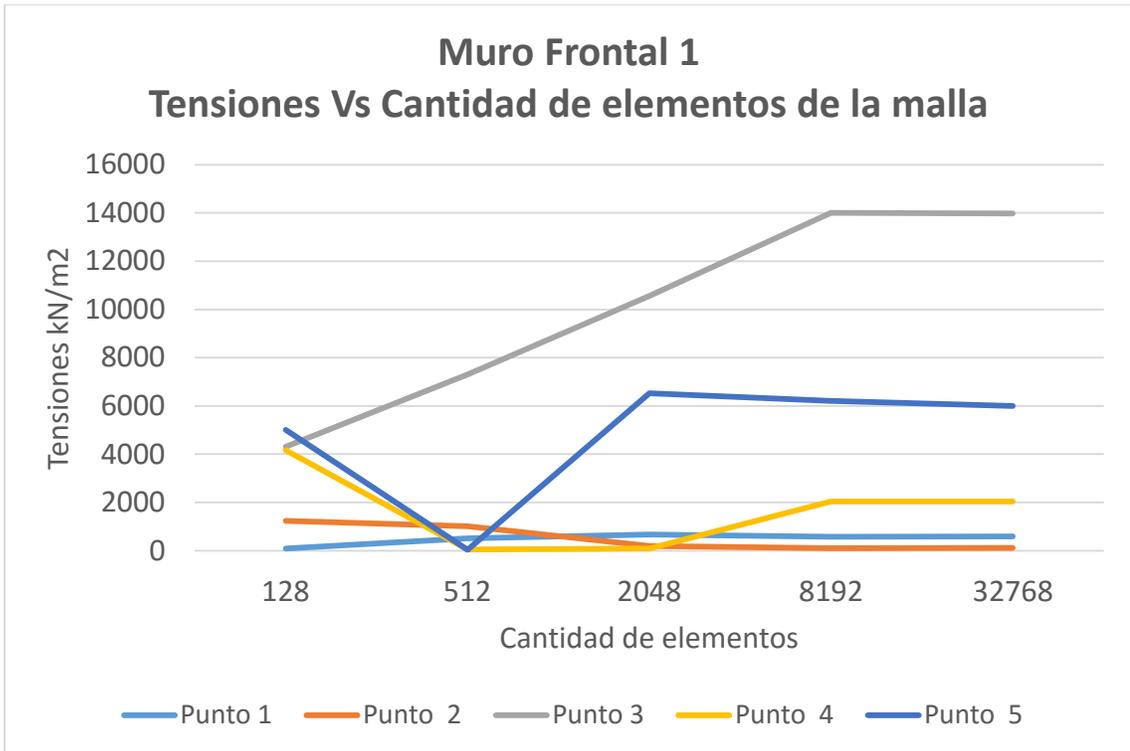


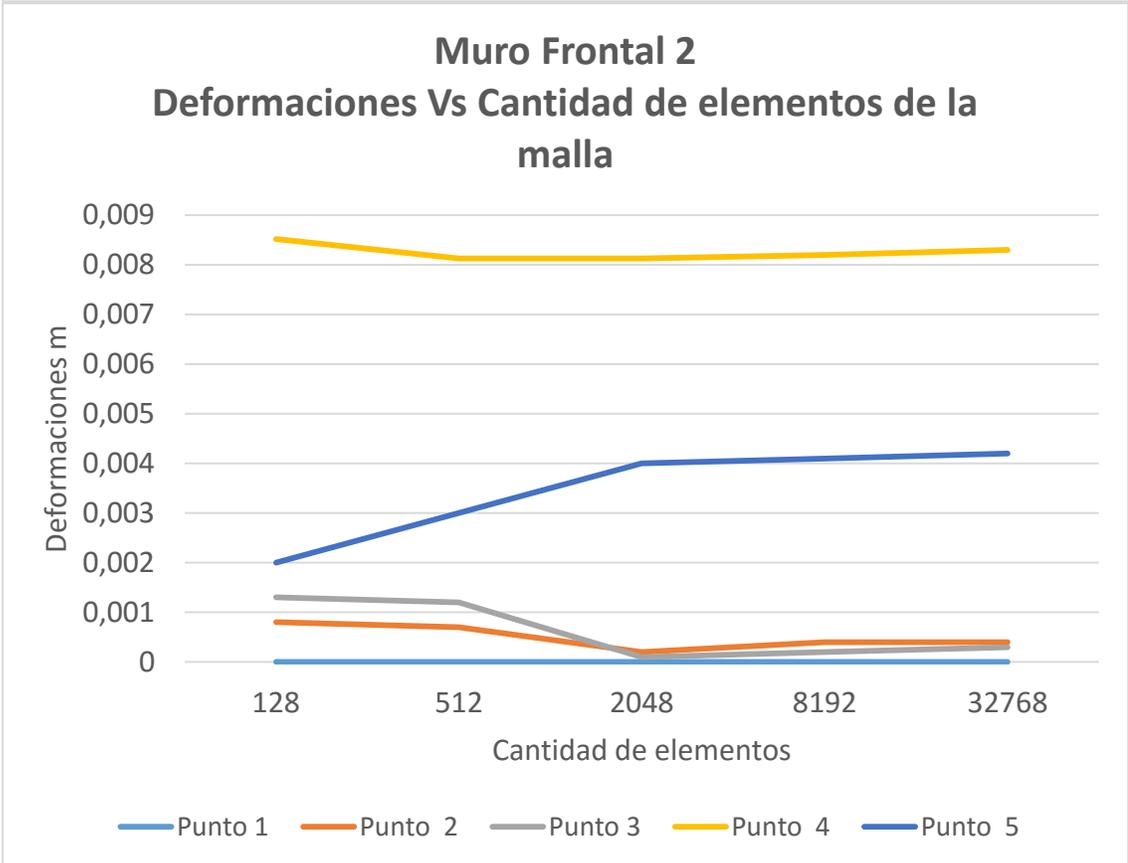
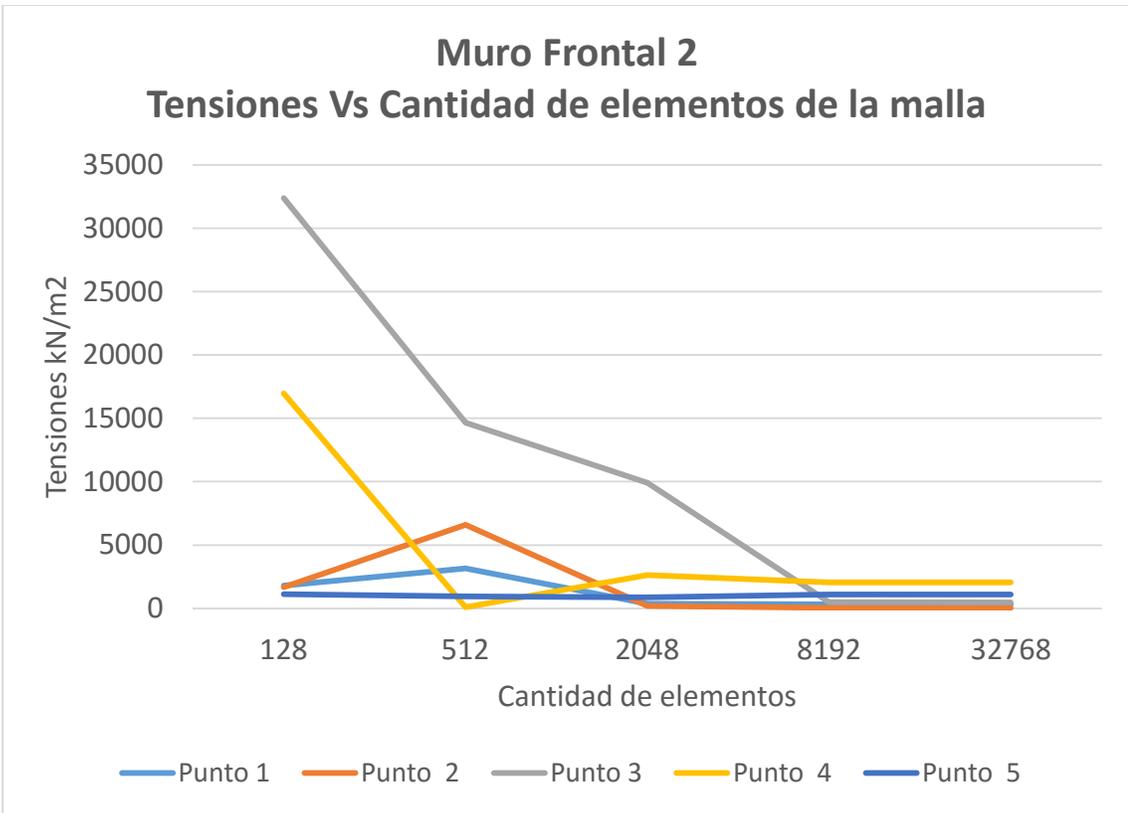


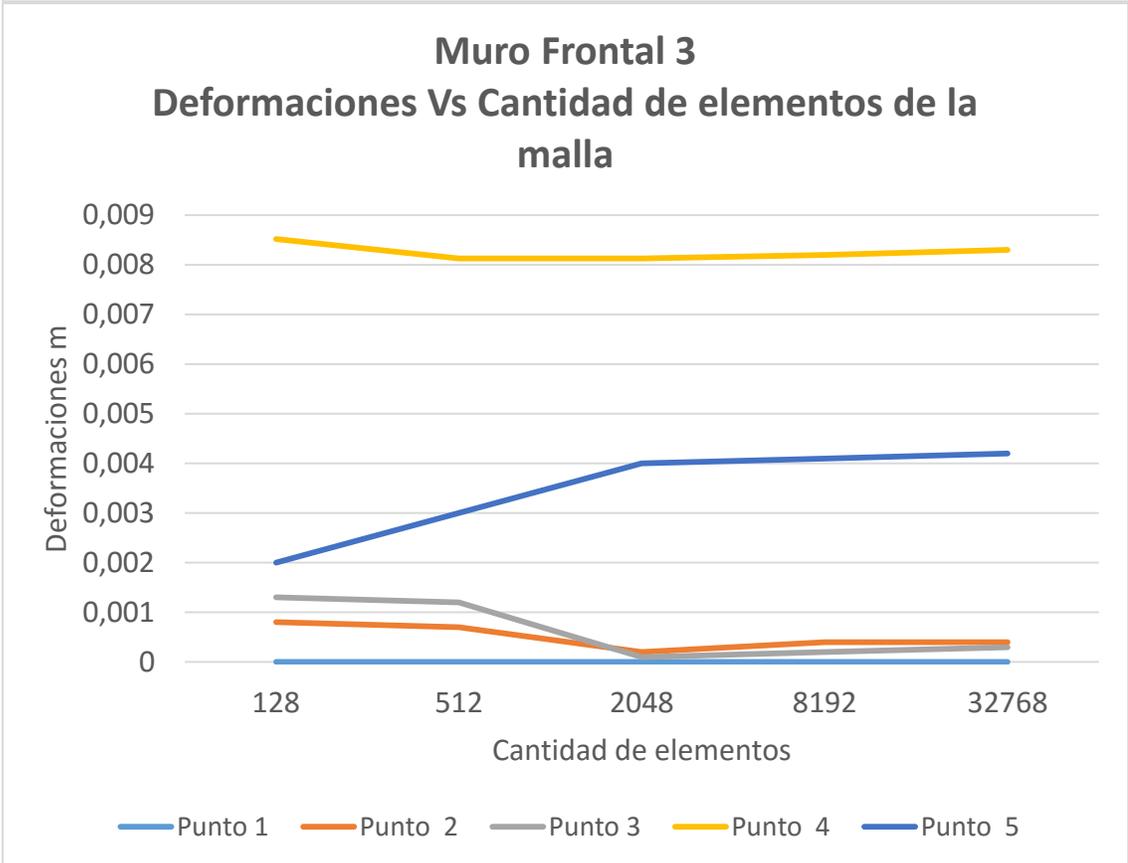
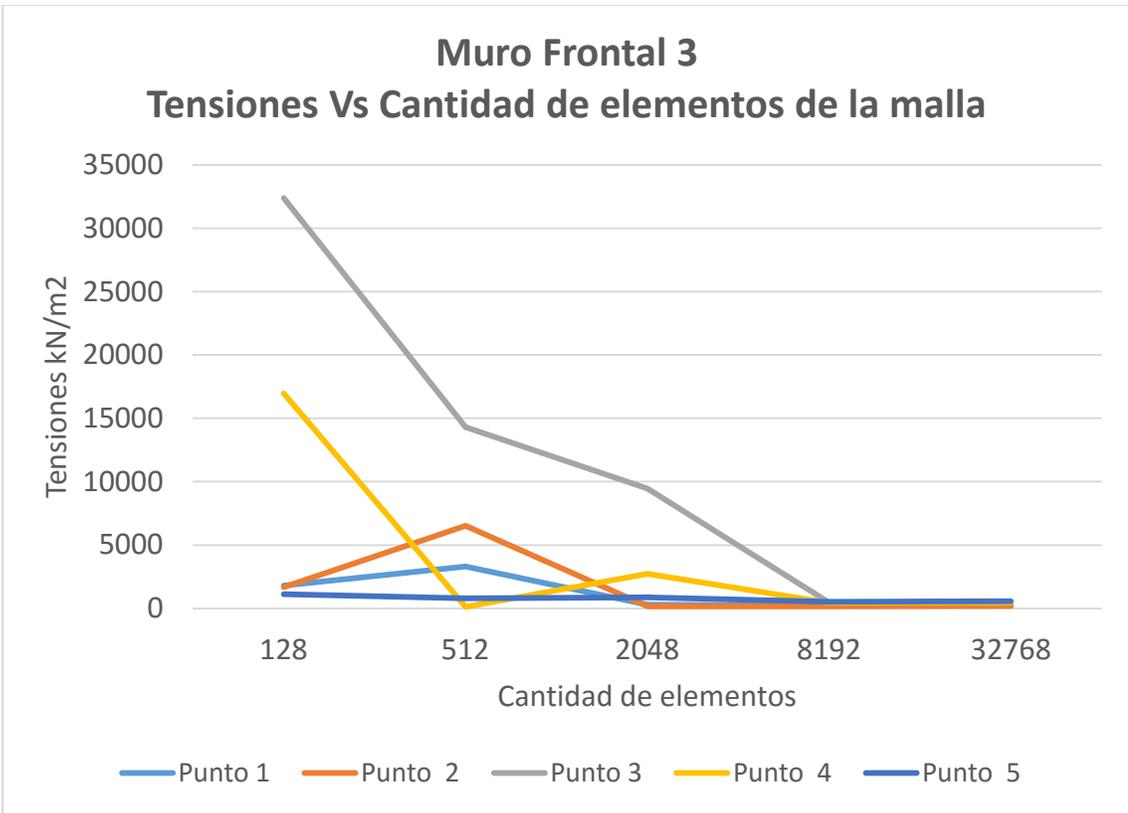


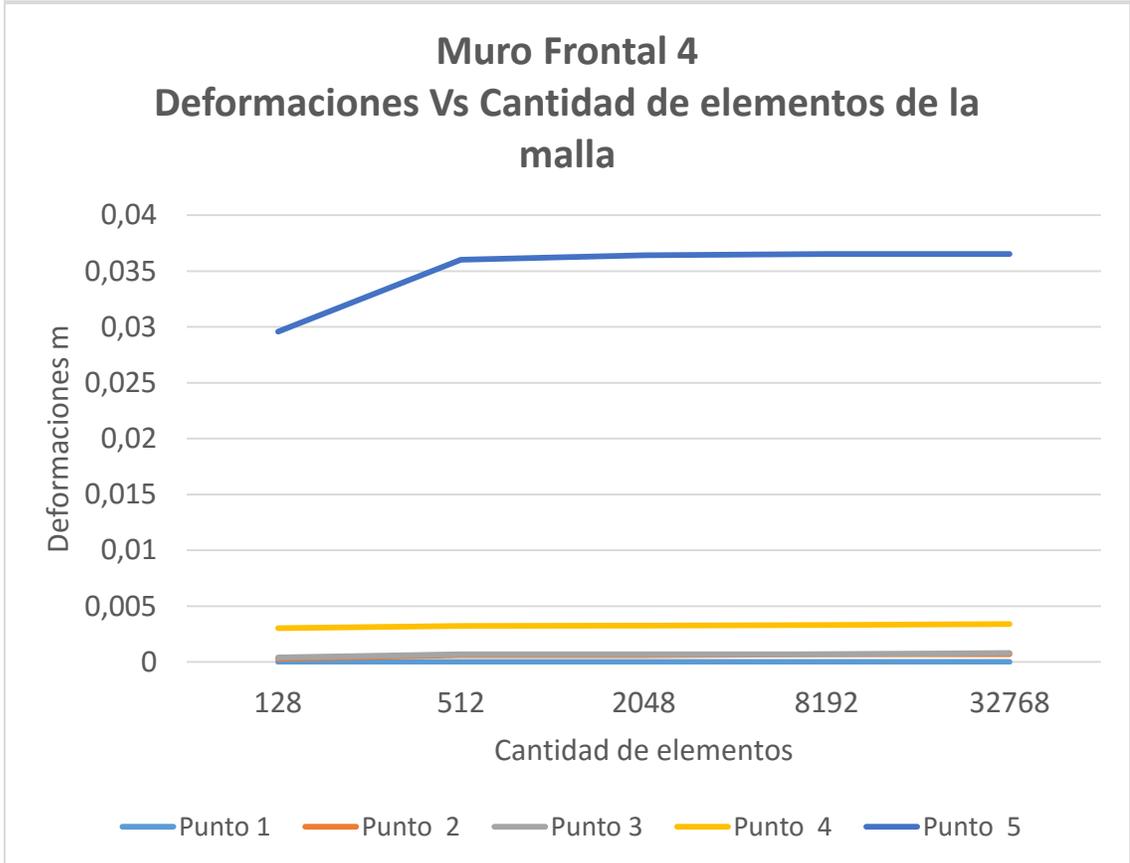
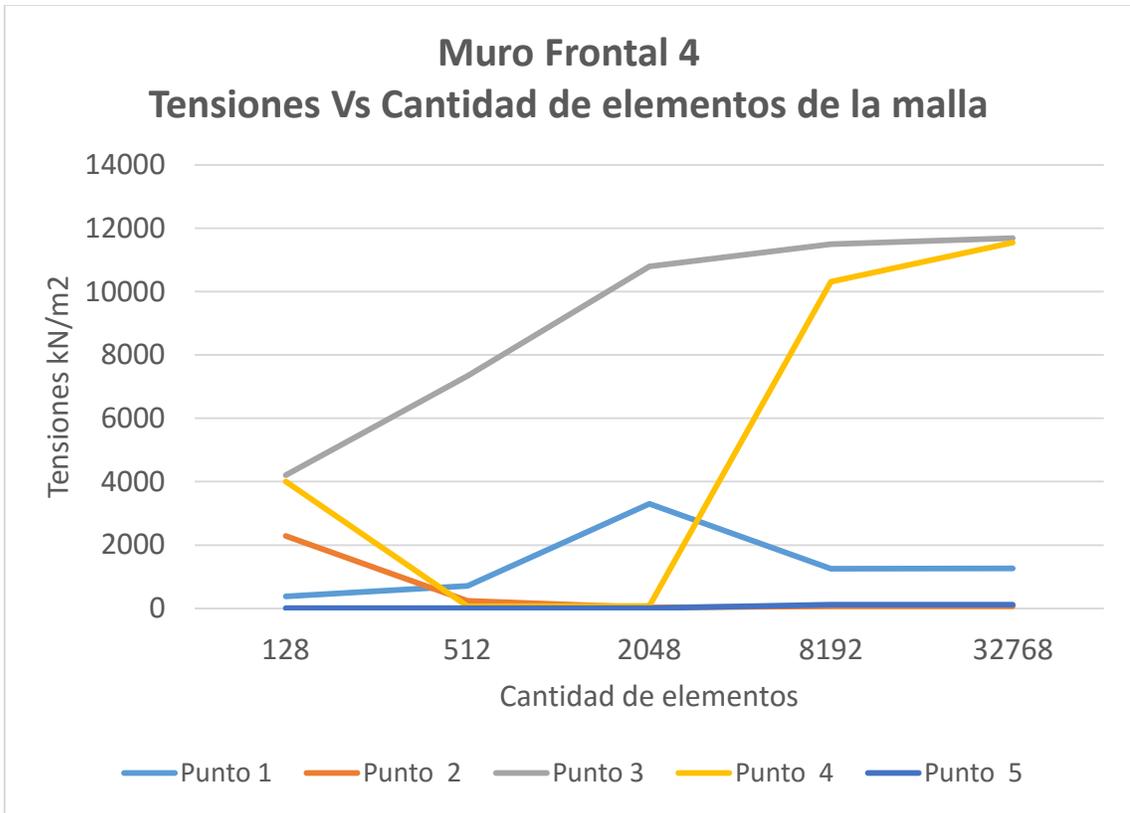


Anexo 3.2 Gráficos de tensiones y deformaciones de muros frontales

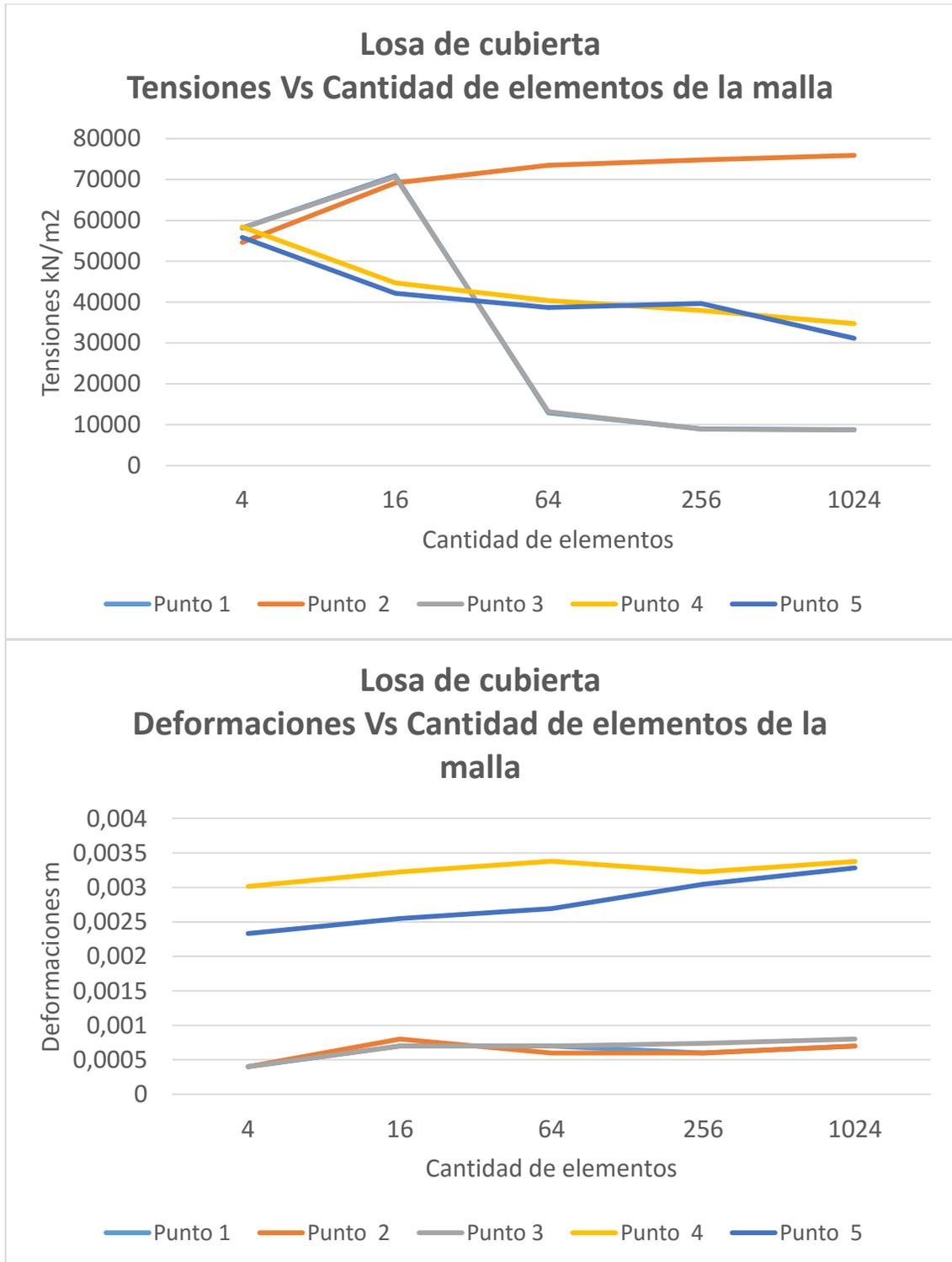




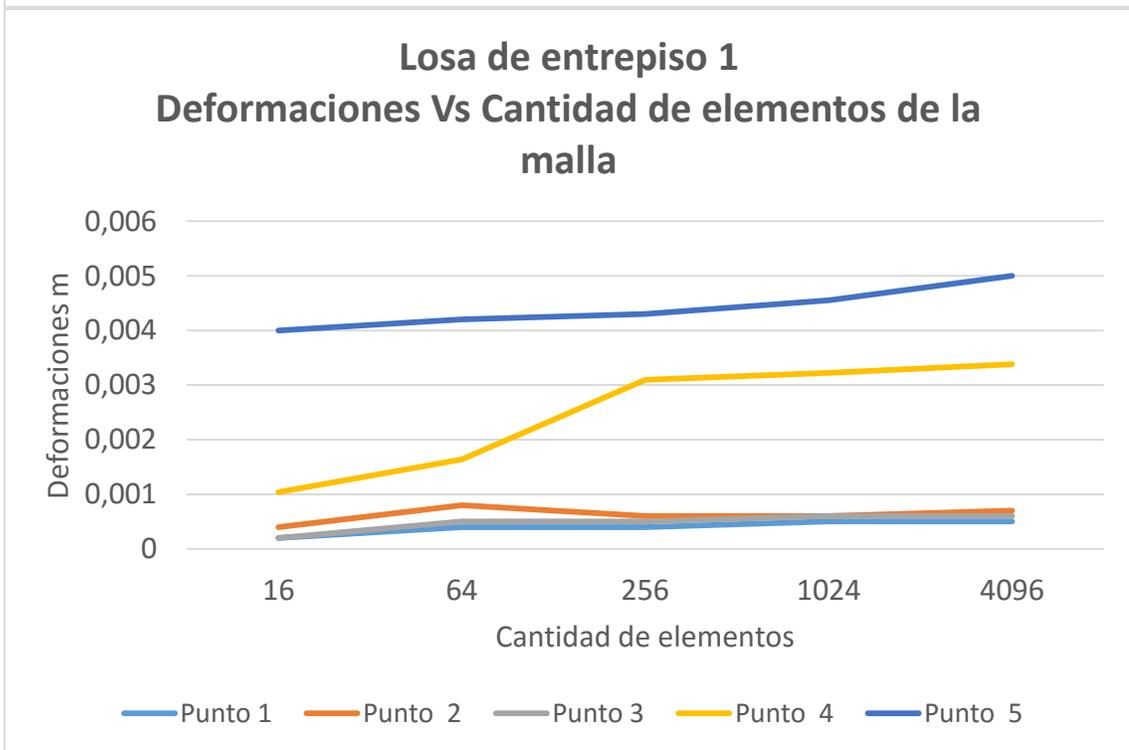
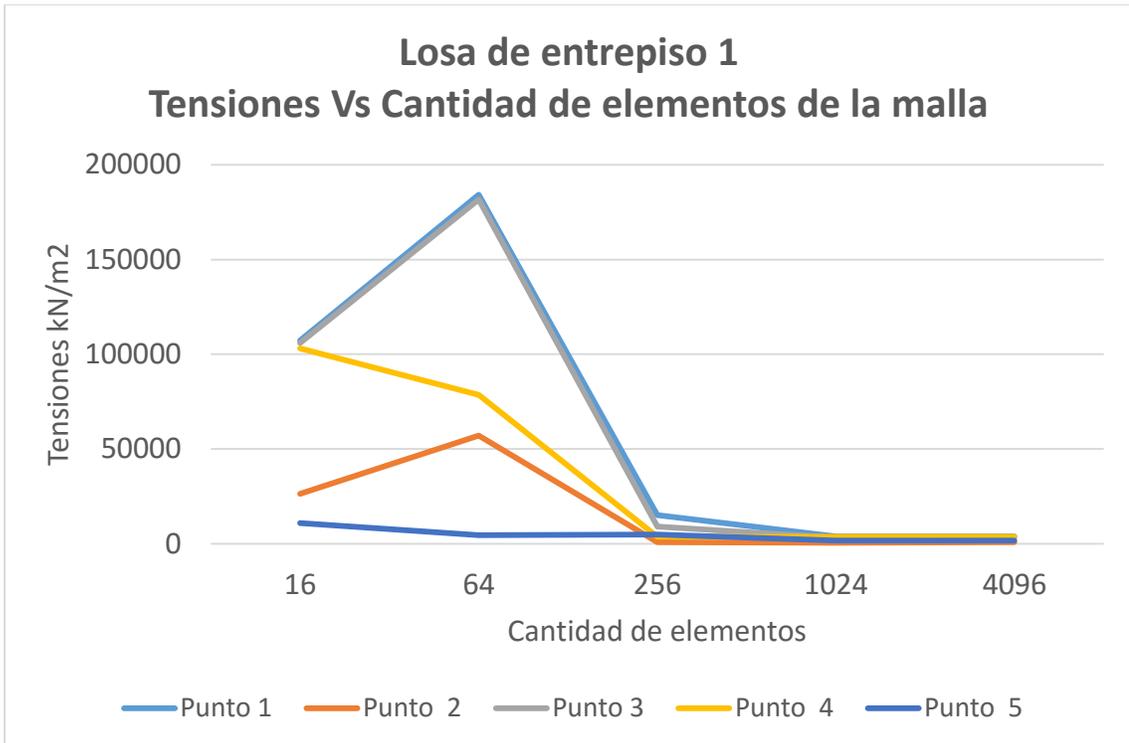




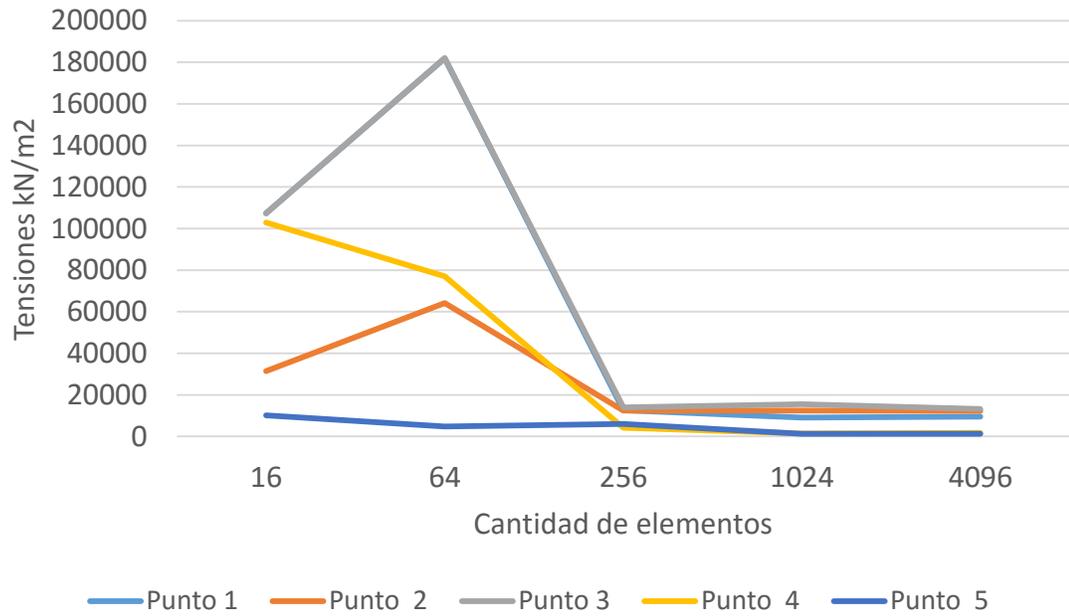
Anexo 3.3 Gráficos de tensiones y deformaciones de cubierta



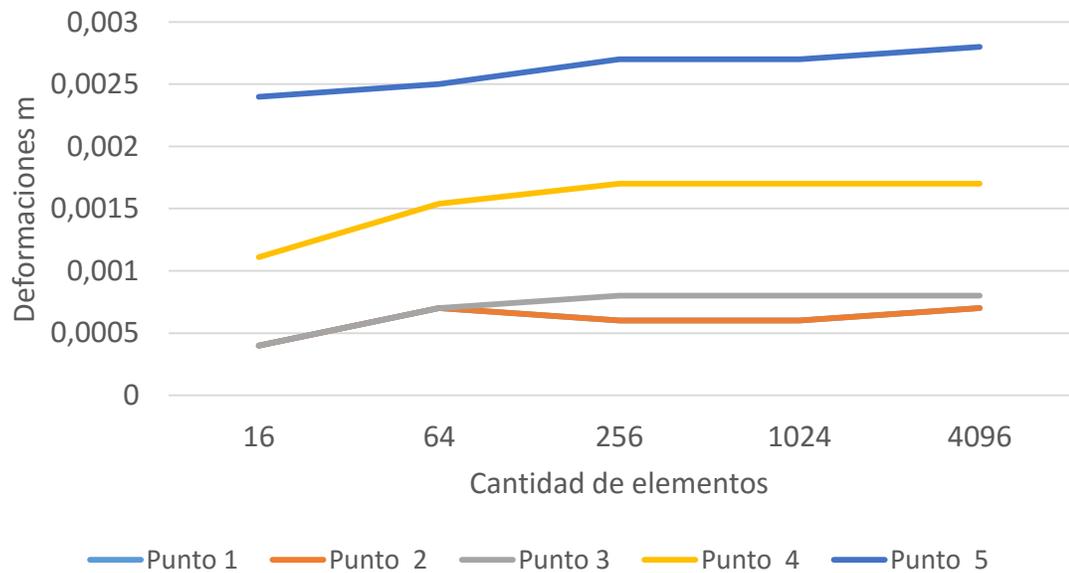
Anexo 3.3 Gráficos de tensiones y deformaciones de entrepisos



Losa de entrepiso 2 Tensiones Vs Cantidad de elementos de la malla



Losa de entrepiso 2 Deformaciones Vs Cantidad de elementos de la malla



Anexo 4 Tabla de Tensiones Máximas y Von Misses luego de aplicar de manera gradual temperatura al módulo aislado

<i>Tensiones Máximas (kN/m²)</i>		<i>Tensiones Von Misses (kN/m²)</i>	
Temperatura 25° C			
Punto 1	20913,477983	Punto 1	43852,591055
Punto 2	674,616476	Punto 2	753,900639
Punto 3	11,434834	Punto 3	6,002347
Punto 4	1,233138	Punto 4	5801,061434
Punto 5	35,590541	Punto 5	5807,062363
Punto 6	3,004226	Punto 6	6014,595704
Punto 7	9425,638873	Punto 7	14450,320052
Temperatura 26° C			
Punto 1	21741,302933	Punto 1	55613,648839
Punto 2	815,185284	Punto 2	752,077688
Punto 3	12,430442	Punto 3	15,709929
Punto 4	1,587521	Punto 4	6030,676826
Punto 5	36,226564	Punto 5	6039,78643
Punto 6	3,006622	Punto 6	6259,0236
Punto 7	9595,224850	Punto 7	14643,314699
Temperatura 27° C			
Punto 1	21224,357553	Punto 1	57711,041261
Punto 2	849,745431	Punto 2	820,847583
Punto 3	14,108862	Punto 3	24,295772
Punto 4	2,410458	Punto 4	6262,494806
Punto 5	37,748174	Punto 5	6270,975002
Punto 6	3,009146	Punto 6	6502,339182
Punto 7	9850,688094	Punto 7	15449,303491
Temperatura 28° C			
Punto 1	23396,944052	Punto 1	59808,437565
Punto 2	844,754328	Punto 2	854,321256

Punto 3	17,100049	Punto 3	23,454604
Punto 4	2,453046	Punto 4	6493,969357
Punto 5	39,952643	Punto 5	6509,181427
Punto 6	3,004915	Punto 6	6743,2732
Punto 7	10700,254274	Punto 7	16265,643563
Temperatura 29° C			
Punto 1	24224,760812	Punto 1	61905,837358
Punto 2	903,683778	Punto 2	820,502331
Punto 3	16,524328	Punto 3	23,485963
Punto 4	2,481262	Punto 4	6724,324207
Punto 5	40,211854	Punto 5	6741,218809
Punto 6	3,046211	Punto 6	6986,665434
Punto 7	11125,075734	Punto 7	16870,914596
Temperatura 30° C			
Punto 1	25052,575371	Punto 1	64003,240297
Punto 2	953,426214	Punto 2	913,091318
Punto 3	14,396684	Punto 3	18,044275
Punto 4	2,506694	Punto 4	6955,627511
Punto 5	42,50359	Punto 5	6965,837072
Punto 6	3,099759	Punto 6	7228,328577
Punto 7	11549,919237	Punto 7	16322,244103
Temperatura 31° C			
Punto 1	25880,387938	Punto 1	66100,646081
Punto 2	984,369298	Punto 2	954,74291
Punto 3	16,408972	Punto 3	23,302442
Punto 4	2,52534	Punto 4	7185,951151
Punto 5	44,147673	Punto 5	7204,152484
Punto 6	3,105588	Punto 6	7475,991729
Punto 7	11974,84322	Punto 7	18081,652748
Temperatura 32° C			
Punto 1	26708,198695	Punto 1	68198,054449

Punto 2	1019,160486	Punto 2	988,216971
Punto 3	18,422362	Punto 3	19,495837
Punto 4	2,52541	Punto 4	7423,497302
Punto 5	44,801316	Punto 5	7435,321471
Punto 6	3,114236	Punto 6	7711,226516
Punto 7	12261,193406	Punto 7	18132,202477
Temperatura 33° C			
Punto 1	27070,31643	Punto 1	70295,465169
Punto 2	1030,187364	Punto 2	1011,720075
Punto 3	15,370282	Punto 3	20,342098
Punto 4	2,598995	Punto 4	7648,949046
Punto 5	48,076083	Punto 5	7660,682302
Punto 6	3,1224623	Punto 6	7955,31806
Punto 7	12824,561271	Punto 7	19292,511686
Temperatura 34° C			
Punto 1	28363,845407	Punto 1	72392,878037
Punto 2	1066,447802	Punto 2	1044,596408
Punto 3	16,022987	Punto 3	22,452685
Punto 4	2,600374	Punto 4	7880,11182
Punto 5	49,209927	Punto 5	7899,123648
Punto 6	3,125432	Punto 6	8197,481237
Punto 7	13249,473477	Punto 7	19295,734260
Temperatura 34,3° C			
Punto 1	28612,157414	Punto 1	73022,102289
Punto 2	1076,50608	Punto 2	1054,459315
Punto 3	20,380624	Punto 3	23,462234
Punto 4	2,634226	Punto 4	7948,37245
Punto 5	49,255718	Punto 5	7973,433161
Punto 6	4,241777	Punto 6	8270,130192
Punto 7	13376,949815	Punto 7	20079,334633

Anexo 5 Tabla de Tensiones Máximas y Von Misses luego de someter el módulo total al gradiente térmico

Anexo 5.1 Tabla de Tensiones Máximas y Von Misses de muros frontales

Muro frontal 1 (kN/m ²)			
<i>Tensiones Máximas (kN/m²)</i>		<i>Tensiones Von Misses (kN/m²)</i>	
10% del gradiente			
Punto 1	1130,96359	Punto 1	10685,371889
Punto 2	0,903265	Punto 2	943,3661982
Punto 3	9698,448375	Punto 3	28273,265204
Punto 4	5842,9992	Punto 4	10080,028
Punto 5	1824,823885	Punto 5	8422,35572
20% del gradiente			
Punto 1	1136,590678	Punto 1	10821,78574
Punto 2	2,902318	Punto 2	995,437787
Punto 3	12637,216428	Punto 3	30978,375
Punto 4	6924,5712	Punto 4	12436,593
Punto 5	2008,119678	Punto 5	8685,513172
30% del gradiente			
Punto 1	1138,755485	Punto 1	10995,623644
Punto 2	4,021896	Punto 2	1031,525843
Punto 3	13370,250581	Punto 3	40723,814
Punto 4	7246,7235	Punto 4	12639,004
Punto 5	2195,312938	Punto 5	8949,078952
40% del gradiente			
Punto 1	1139,126	Punto 1	11177,273761
Punto 2	4,425091	Punto 2	1150,499153
Punto 3	13376,458805	Punto 3	44585,324
Punto 4	7722,1041	Punto 4	12749,884
Punto 5	2386,24905	Punto 5	9212,988313

50% del gradiente			
Punto 1	1139,590717	Punto 1	11366,344141
Punto 2	12,994754	Punto 2	1202,84093
Punto 3	14163,788	Punto 3	44788,763
Punto 4	7781,0946	Punto 4	13025,294
Punto 5	2580,771091	Punto 5	9477,241296
60% del gradiente			
Punto 1	1154,163629	Punto 1	11562,476484
Punto 2	15,503586	Punto 2	1342,7557988
Punto 3	14542,204636	Punto 3	44790,645
Punto 4	7880,1047	Punto 4	13144,96
Punto 5	2778,721427	Punto 5	9741,800616
70% del gradiente			
Punto 1	1172,2668	Punto 1	11766,817611
Punto 2	17,111075	Punto 2	1400,94455
Punto 3	14350,539	Punto 3	45217,809
Punto 4	7835,684	Punto 4	13175,197
Punto 5	2979,943156	Punto 5	10006,641977
80% del gradient			
Punto 1	1176,7585	Punto 1	11974,526618
Punto 2	17,716252	Punto 2	1413,86214
Punto 3	14352,422699	Punto 3	46281,931572
Punto 4	7952,5349	Punto 4	13418,49
Punto 5	3184,281137	Punto 5	10271,743563
90% del gradient			
Punto 1	1183,648783	Punto 1	12189,775623
Punto 2	18,536778	Punto 2	1486,45768
Punto 3	14447,172618	Punto 3	46352,839448
Punto 4	7985,7439	Punto 4	13548,432
Punto 5	3364,648846	Punto 5	10537,085733
100% del gradient			

Punto 1	1262,375147	Punto 1	12410,730367
Punto 2	21,745821	Punto 2	1520,668621
Punto 3	14163,78754	Punto 3	47043,113
Punto 4	8036,5789	Punto 4	13495,432
Punto 5	3601,7016	Punto 5	10802,650758

Muro frontal 4 (kN/m ²)			
<i>Tensiones Máximas (kN/m²)</i>		<i>Tensiones Von Misses (kN/m²)</i>	
10% del gradiente			
Punto 1	110,38445	Punto 1	10718,488
Punto 2	0,239148	Punto 2	651,0983
Punto 3	10898,524439	Punto 3	40547,294202
Punto 4	7232,456785	Punto 4	11998,586177
Punto 5	124,933665	Punto 5	921,393884
20% del gradiente			
Punto 1	269,84881	Punto 1	10843,335
Punto 2	0,315586	Punto 2	614,719248
Punto 3	11230,680281	Punto 3	44497,180517
Punto 4	7500,394371	Punto 4	12541,033426
Punto 5	130,645505	Punto 5	1010,850819
30% del gradiente			
Punto 1	295,29714	Punto 1	10975,192
Punto 2	0,423113	Punto 2	668,098977
Punto 3	12779,065836	Punto 3	44588,374891
Punto 4	7505,285467	Punto 4	12577,672934
Punto 5	121,740867	Punto 5	1100,806385
40% del gradiente			
Punto 1	328,93807	Punto 1	11112,361
Punto 2	1,124096	Punto 2	702,556296
Punto 3	12826,225311	Punto 3	46990,016749

Punto 4	7711,673879	Punto 4	12646,050644
Punto 5	126,259533	Punto 5	1191,147398
50% del gradiente			
Punto 1	465,08652	Punto 1	11255,115
Punto 2	1,290283	Punto 2	723,684088
Punto 3	12878,175011	Punto 3	47012,466242
Punto 4	7784,149035	Punto 4	12742,289611
Punto 5	130,64551	Punto 5	1281,792214
60% del gradiente			
Punto 1	476,70495	Punto 1	11403,257
Punto 2	1,308173	Punto 2	769,021288
Punto 3	12969,847644	Punto 3	47035,384551
Punto 4	7882,157975	Punto 4	12894,451032
Punto 5	143,22447	Punto 5	1372,680549
70% del gradiente			
Punto 1	478,00697	Punto 1	11556,557
Punto 2	1,59623	Punto 2	844,844828
Punto 3	13018,416985	Punto 3	47131,732058
Punto 4	7947,647838	Punto 4	12915,575265
Punto 5	184,93367	Punto 5	1463,76697
80% del gradiente			
Punto 1	654,58905	Punto 1	11714,334
Punto 2	2,203459	Punto 2	886,720593
Punto 3	13067,324489	Punto 3	47164,631661
Punto 4	7985,065409	Punto 4	13021,24928
Punto 5	199,04429	Punto 5	1555,016618
90% del gradiente			
Punto 1	663,56784	Punto 1	11877,802
Punto 2	2,272579	Punto 2	914,120694
Punto 3	14921,166195	Punto 3	47182,700304
Punto 4	8092,372943	Punto 4	13255,224686

Punto 5	255,72193	Punto 5	1571,280573
100% del gradiente			
Punto 1	999,24833	Punto 1	12255,225
Punto 2	2,993088	Punto 2	990,873658
Punto 3	14936,20077	Punto 3	47208,880446
Punto 4	8175,7510036	Punto 4	13501,360991
Punto 5	313,75654	Punto 5	1737,902571

Anexo 5.2 Tabla de Tensiones Máximas y Von Misses de muros laterales

Muro lateral A (kN/m ²)			
<i>Tensiones Máximas (kN/m²)</i>		<i>Tensiones Von Misses (kN/m²)</i>	
10% del gradiente			
Punto 1	452,678247	Punto 1	10700,435377
Punto 2	99,3753	Punto 2	617,808983
Punto 3	5523,0708	Punto 3	59298,279
Punto 4	49482,678	Punto 4	53614,627
Punto 5	3252,0879	Punto 5	4308,1971
20% del gradiente			
Punto 1	592,250791	Punto 1	10697,671578
Punto 2	102,53489	Punto 2	604,345296
Punto 3	5351,9084	Punto 3	59943,897
Punto 4	49688,063	Punto 4	53617,404
Punto 5	3326,3683	Punto 5	4313,2791
30% del gradiente			
Punto 1	729,43987	Punto 1	10841,461816
Punto 2	122,272099	Punto 2	654,312618
Punto 3	5656,3396	Punto 3	60032,995
Punto 4	49708,468	Punto 4	53620,18
Punto 5	3342,6165	Punto 5	4364,3548

40% del gradiente			
Punto 1	864,185323	Punto 1	10989,71426
Punto 2	129,107982	Punto 2	645,751696
Punto 3	5723,2131	Punto 3	60077,565
Punto 4	49723,281	Punto 4	53622,956
Punto 5	3509,9156	Punto 5	4440,4387
50% del gradiente			
Punto 1	996,429384	Punto 1	11142,224189
Punto 2	132,936148	Punto 2	681,126534
Punto 3	5790,2386	Punto 3	60166,75
Punto 4	49752,083	Punto 4	53625,732
Punto 5	3549,204	Punto 5	4448,7459
60% del gradiente			
Punto 1	1126,117439	Punto 1	11298,792293
Punto 2	133,121228	Punto 2	723,384286
Punto 3	5857,4108	Punto 3	60198,279
Punto 4	49766,561	Punto 4	53628,508
Punto 5	3584,2944	Punto 5	4496,9147
70% del gradiente			
Punto 1	1253,198797	Punto 1	13459,225396
Punto 2	180,10314	Punto 2	749,427099
Punto 3	5924,7246	Punto 3	60211,363
Punto 4	49781,092	Punto 4	53631,285
Punto 5	3729,5543	Punto 5	4595,1021
80% del gradiente			
Punto 1	1377,627441	Punto 1	11623,336994
Punto 2	189,982204	Punto 2	791,695559
Punto 3	5992,1751	Punto 3	60255,991
Punto 4	49795,674	Punto 4	53634,061
Punto 5	3740,7643	Punto 5	4645,0915
90% del gradiente			

Punto 1	1499,362756	Punto 1	11790,947659
Punto 2	198,103143	Punto 2	805,185373
Punto 3	6059,7577	Punto 3	60300,633
Punto 4	49810,308	Punto 4	53636,837
Punto 5	3973,6194	Punto 5	4714,4579
100% del gradiente			
Punto 1	1452,158235	Punto 1	11961,885279
Punto 2	237,29425	Punto 2	828,275949
Punto 3	6633,1042	Punto 3	60345,289
Punto 4	49839,732	Punto 4	53639,613
Punto 5	4179,4208	Punto 5	4764,6153

Muro lateral H (kN/m ²)			
<i>Tensiones Máximas (kN/m²)</i>		<i>Tensiones Von Misses (kN/m²)</i>	
10% del gradiente			
Punto 1	1108,8901	Punto 1	10630,167
Punto 2	30,801064	Punto 2	1501,4921
Punto 3	5523,0708	Punto 3	6807,0539
Punto 4	32976,961	Punto 4	35156,159
Punto 5	2572,1724	Punto 5	2780,5715
20% del gradiente			
Punto 1	1118,4176	Punto 1	10740,36
Punto 2	34,583253	Punto 2	1514,0721
Punto 3	5551,9084	Punto 3	6921,5636
Punto 4	32805,145	Punto 4	35160,971
Punto 5	2654,276	Punto 5	2951,641
30% del gradiente			
Punto 1	1136,1609	Punto 1	10850,727
Punto 2	34,698551	Punto 2	1599,5829
Punto 3	5656,3396	Punto 3	6995,2852

Punto 4	33003,024	Punto 4	35165,784
Punto 5	2718,9049	Punto 5	3055,2285
40% del gradiente			
Punto 1	1144,407	Punto 1	10961,262
Punto 2	34,968189	Punto 2	1648,6614
Punto 3	5723,2131	Punto 3	7069,2736
Punto 4	33016,17	Punto 4	35170,596
Punto 5	2902,4025	Punto 5	3220,855
50% del gradiente			
Punto 1	1152,2552	Punto 1	11071,961
Punto 2	38,533698	Punto 2	2104,9133
Punto 3	5790,2386	Punto 3	7143,519
Punto 4	33029,392	Punto 4	35175,408
Punto 5	3076,4734	Punto 5	3333,7255
60% del gradiente			
Punto 1	1159,7192	Punto 1	11182,817
Punto 2	39,460162	Punto 2	2258,5772
Punto 3	5857,4108	Punto 3	7218,012
Punto 4	33042,69	Punto 4	35180,22
Punto 5	3414,2867	Punto 5	3505,4026
70% del gradiente			
Punto 1	1166,8124	Punto 1	11293,827
Punto 2	39,641256	Punto 2	2419,773
Punto 3	5924,7246	Punto 3	7292,7439
Punto 4	33056,064	Punto 4	35185,033
Punto 5	3488,5394	Punto 5	3563,6756
80% del gradiente			
Punto 1	1173,5472	Punto 1	11404,986
Punto 2	41,059633	Punto 2	2635,7656
Punto 3	5992,1751	Punto 3	7367,7061
Punto 4	33069,515	Punto 4	35189,845

Punto 5	3505,2109	Punto 5	3622,4303
90% del gradiente			
Punto 1	1179,9361	Punto 1	11516,289
Punto 2	47,496436	Punto 2	2690,0395
Punto 3	6059,7577	Punto 3	7442,8905
Punto 4	33083,041	Punto 4	35194,657
Punto 5	3637,045	Punto 5	3681,6437
100% del gradiente			
Punto 1	1188,8901	Punto 1	11627,733
Punto 2	57,320021	Punto 2	2798,8736
Punto 3	6061,1042	Punto 3	7518,2893
Punto 4	33096,642	Punto 4	35199,47
Punto 5	3711,5679	Punto 5	3741,294