

## Evaluación de los efectos de las acciones térmicas y la retracción del hormigón en un edificio en paredes de hormigón moldeados *in Situ*

L. B. Vargas<sup>1</sup> , A. Lübeck<sup>1</sup> , A. B. S. Santos Neto<sup>1\*</sup> 

\*Autor de Contacto: [almir.neto@ufsm.br](mailto:almir.neto@ufsm.br)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i1.591>

Recibido: 21/02/2022 | Correcciones recibidas: 06/08/2022 | Aceptado: 25/10/2022 | Publicado: 01/01/2023

### RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo analizar los efectos de la variación térmica y la retracción por secado en un edificio con paredes de hormigón moldeados *in situ*. Las paredes y losas del edificio fueron discretizadas en el programa SAP2000 utilizando el Método de Elementos Finitos. Se analizaron los principales esfuerzos de tracción en las paredes y losa de cubierta, y se verificó el Estado Límite de Servicio de Formación de Grietas. Los resultados muestran que los efectos de la acción de la temperatura y la retracción por secado del hormigón desarrollan esfuerzos principales de tracción superiores a la resistencia a la tracción del hormigón prevista en la NBR 6118 (ABNT, 2014). Se encontró que las cargas térmicas y de retracción pueden resultar en el agrietamiento de las paredes y la losa del techo, cuando no se toman en cuenta.

**Palabras clave:** paredes de hormigón; efecto térmico; retracción del hormigón; análisis numérico, formación de grietas.

**Citar como:** Vargas, L. B., Lübeck, A., Santos Neto, A. B. S. (2023), “Evaluación de los efectos de las acciones térmicas y la retracción del hormigón en un edificio en paredes de hormigón moldeados *in Situ*”, Revista ALCONPAT, 13 (1), pp. 112 – 130, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i1.591>

<sup>1</sup> Programa de Posgrado en Estructuras y Construcción Civil – Universidade Federal de Santa Maria – RS, Brasil.

#### Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor Vargas, L. B. contribuyó al desarrollo del modelo numérico (100%), recolección de resultados y redacción original del manuscrito (100%). El autor Lübeck, A. contribuyó con la idea original (50%), revisión de la redacción y mejoras en la discusión de análisis numéricos, resultados y conclusiones (50%). El autor Santos Neto, A. B. S. contribuyó con la idea original (50%), revisión de la redacción y mejoras en la discusión de análisis numéricos, resultados y conclusiones (50%).

#### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2023.

## Evaluation of the effects of thermal variation and shrinkage of concrete in a building with cast-in-place concrete walls

### ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effects of thermal variations and shrinkage of concrete in a building with cast-in-place concrete walls. The walls and slabs of the building were modeled in SAP2000 commercial software with a Finite Element Method. The main tensile stresses in the walls and ceiling slab were verified against the serviceability limit state of fissure formation (SLS-F). Results showed that the effects of temperature variations and shrinkage from concrete drying developed main tensile stresses greater than the tensile strength of the concrete as prescribed by standard NBR 6118 (ABNT, 2014). Consequently, it was concluded that durability of the structure could be compromised by cracking from thermal and shrinkage loads.

**Keywords:** cast-in-place concrete walls; thermal variations; concrete shrinkage; numerical analysis, crack formation.

## Avaliação dos efeitos das ações térmicas e de retração do concreto sobre uma edificação em paredes de concreto moldadas *in Loco*

### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar os efeitos da variação térmica e da retração por secagem em um edifício de paredes de concreto moldadas *in loco*. As paredes e lajes da edificação foram discretizadas no programa SAP2000 por meio do Método dos Elementos Finitos. Foram analisadas as tensões principais de tração em quatro paredes e laje de cobertura, sendo verificado o Estado-Limite de Serviço de Formação de Fissuras. Os resultados mostram que os efeitos da ação da temperatura e principalmente da retração por secagem do concreto desenvolvem tensões principais de tração superiores a resistência à tração do concreto, prevista na NBR 6118 (ABNT, 2014). Assim, os carregamentos térmicos e de retração podem resultar na fissuração das paredes e laje de cobertura, colocando em risco a durabilidade da estrutura.

**Palavras-chave:** paredes de concreto; efeito térmico; retração do concreto; análise numérica, formação de fissuras.

### Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUCCIÓN

Caracterizado por alta productividad, racionalidad y economía, el sistema de construcción en paredes de hormigón moldeado *in situ* ha sido ampliamente utilizado en el mercado brasileño. Además de posibilitar un mayor control de la calidad tecnológica, este proceso constructivo también permite una reducción considerable de los desperdicios en obra, convirtiéndose así en un ejemplo de industrialización en la Construcción Civil (Braguim, 2013).

El sistema de paredes de hormigón está definido por la NBR 16055 (ABNT, 2012), como un elemento estructural autoportante, moldeado en el lugar, con una longitud superior a diez veces su espesor y capaz de soportar cargas en el mismo plano que la pared. Todas las paredes de cada ciclo constructivo de un edificio se moldean en un solo paso de hormigonado, interactuando también las losas de hormigón armado con las paredes, haciendo monolítico el sistema estructural.

En cuanto a los refuerzos, se recomienda diseñar el proyecto estructural considerando el uso de mallas soldadas para el proceso de encofrado de las paredes de hormigón, con el fin de aumentar la productividad y racionalización en la obra. Además, los encofrados de barras de refuerzo deben usarse principalmente para fortalecer regiones específicas, como alrededor de aberturas, bordes libres, periferia de agujeros, dinteles o regiones donde la tensión de tracción es alta y localizada.

Una de las principales preocupaciones del sistema en paredes de hormigón es la formación de grietas (Wendler y Monge, 2018). Este tipo de patología, además de transmitir inseguridad a los usuarios, reduce la durabilidad de la estructura, haciéndola susceptible a la entrada de agentes agresivos que dañan el hormigón y provocan la corrosión de las armaduras (Nakamura y Pinto, 2017).

Con el fin de identificar las regiones donde se presenta con mayor frecuencia el agrietamiento en este sistema constructivo, se realizaron algunos seguimientos (Resende et.al., 2018; Lima et.al., 2020; Netto et.al., 2021; Padilha et. al., 2021) que mostraron que las principales regiones susceptibles a la formación de grietas son las esquinas de puertas y ventanas, esquinas de paredes, grandes paneles de pared, especialmente en el piso junto a la cimentación y paredes y losas de pavimento de cobertura.

Thomaz y Carneiro (2013) explican que los principales motivos de la aparición de estas fisuras en edificios en paredes de hormigón se deben a los efectos de las variaciones de temperatura y la retracción del hormigón.

Cuando están libres de restricciones, estas acciones provocan el movimiento de expansión o contracción de la pieza de hormigón, sin embargo, cuando se impiden, conducen al desarrollo de esfuerzos de tracción que pueden superar la resistencia a la tracción del hormigón y, en consecuencia, provocar la formación de fisuras en la pieza de hormigón (Micallef et.al., 2017).

La temperatura ambiente, la radiación solar y los rayos infrarrojos son los factores ambientales que más influyen en el comportamiento de la temperatura. Por lo tanto, la temperatura ambiente es la principal responsable de la variación de temperatura de toda la estructura, y está representada por la componente de variación uniforme de temperatura ( $\Delta T_u$ ). La radiación solar y los rayos infrarrojos, por su parte, son los principales factores que generan variaciones de gradiente de temperatura ( $\Delta T_M$ ), resultantes de la exposición solar de parte del edificio durante periodos relativamente cortos, calentando la cara exterior mientras que el interior permanece a menor temperatura. (Larsson, 2009).

El efecto de la variación de temperatura uniforme ( $\Delta T_u$ ) da como resultado una expansión o contracción axial de la pieza en caso de calentamiento y enfriamiento, respectivamente, y el efecto de la variación del gradiente de temperatura lineal ( $\Delta T_M$ ) induce el movimiento de flexión. Solo cuando estos movimientos están restringidos se desarrollan tensiones térmicas (O'Brien et.al., 2015).

El proceso de retracción, a su vez, está asociado a una reducción volumétrica de la estructura de la pasta de cemento, que se desencadena por la pérdida de agua por evaporación en las primeras edades del hormigón mientras aún se encuentra en su fase plástica y continúa ocurriendo durante su estado endurecido (Rodrigues y Bauer, 2010). Este proceso se puede dividir en varios tipos, los cuales son carbonatación, plástico, térmico, químico, autógeno y contracción por secado (Markovski et al., 2012). La porción denominada retracción por secado suele ser un proceso agresivo, desarrollándose fisuras de gran abertura que atraviesan todo el espesor de la pieza, afectando principalmente a piezas con grandes superficies de exposición (Recena, 2014).

La deformación específica por contracción por secado se puede considerar de manera similar al efecto de la variación uniforme de la temperatura. Cuando la pieza está bajo la influencia de la retracción y está restringida al movimiento de acortamiento, se desarrollan esfuerzos de tracción en el elemento estructural. Con ello, es posible obtener un valor de variación de temperatura ( $\Delta T$ ) correspondiente a la deformación específica por retracción ( $\epsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$ ), en función del coeficiente de dilatación térmica del hormigón ( $\alpha$ ), (Laranjeiras, 2017).

Para la evaluación del agrietamiento en piezas de concreto, la NBR 6118 (ABNT, 2014) establece que el Estado Límite para la Formación de Grietas (ELS-F) es el estado en el que comienzan a formarse grietas, o sea, cuando las tensiones de tracción actuantes superan la resistencia a la tracción del hormigón.

De esta forma, el presente trabajo presenta un análisis de las principales tensiones de tracción que actúan sobre cuatro paredes y sobre la losa de cubierta de un edificio con paredes de hormigón moldeados *in situ* cuando se aplican diferentes cargas térmicas, acción de retracción por secado y cargas permanentes y variables, identificando regiones que presentan tensiones de tracción superiores a la resistencia a tracción del hormigón que provoquen la formación de fisuras en la pieza.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Edificio Analizado

El edificio evaluado es de uso residencial, multifamiliar, de tres planos de planta típicos, con una superficie total por planta de 210,06 m<sup>2</sup> y dimensiones en planta de 18,42 m x 13,82 m. Los planos de planta típicos (ver Figura 1) están compuestos por cuatro departamentos, distribuidos simétricamente. La distancia entre plantas es de 2,70 m y la altura total es de 8,10 m. La estructura del edificio consta de paredes de hormigón armado moldeadas *in situ* con un espesor de 120 mm y losas macizas de hormigón armado con un espesor de 100 mm. Todavía en la Figura 1, se presentan las 4 paredes analizadas, donde las paredes 1 y 4 son externas al edificio, estando bajo la influencia de la luz solar directa (carga térmica de gradiente lineal), y las paredes 2 y 3 son internos al edificio. Solo la pared 2 tiene una sección expuesta a la luz solar directa. Todas las paredes tienen marcos de ventanas y puertas, como se muestra en la Figura 1.

El edificio mantuvo sus principales características geométricas. Sin embargo, para simplificar el modelado numérico fue necesario adaptar la geometría a múltiples medidas de 200 mm. De esta forma se modeló la estructura sin cambios mayores a 300 mm entre el modelo numérico y la arquitectura, permitiendo así la validez de los resultados obtenidos.

### 2.2 Discretización del Modelo Estructural

Para el modelado y análisis de la estructura se utilizó el programa informático SAP2000 V18, el cual permitió modelar las tres plantas del edificio mediante el método de los elementos finitos (MEF), pudiendo generar el comportamiento completo de la estructura dado por la interacción entre

todos los elementos (paredes y losas) en un análisis elástico lineal. En el trabajo se utilizó el programa SAP 2000 debido a que permite analizar los efectos térmicos y retracción del concreto. Se utilizaron elementos cuadriláteros de lámina delgada (*shell-thin*) y la malla adoptada para todos los elementos estructurales tiene lados de dimensión de 200 x 200 mm, permitiendo así una perfecta conexión entre los nudos generados por la malla en los encuentros pared con pared, pared con losa y aberturas de puerta y ventanas. El espesor adoptado para los elementos de malla siguió el espesor de los elementos estructurales, siendo 120 mm para las paredes y 100 mm para las losas. La Figura 2 presenta una vista tridimensional del modelo de construcción, siendo generados en este modelo 49,169 elementos de cubierta.

En cuanto a las condiciones de contorno, en todos los nudos ubicados en la base del edificio se consideraron únicamente restricciones de traslación, evitando así desplazamientos en todas las direcciones. En esta etapa del análisis, los efectos de la interacción suelo-estructura (ISE) no fueron tomados en cuenta, ya que la adopción de apoyos no desplazables desarrolla mayores esfuerzos en la base del edificio, que es el caso de análisis más crítico para paredes conectados directamente a la cimentación.

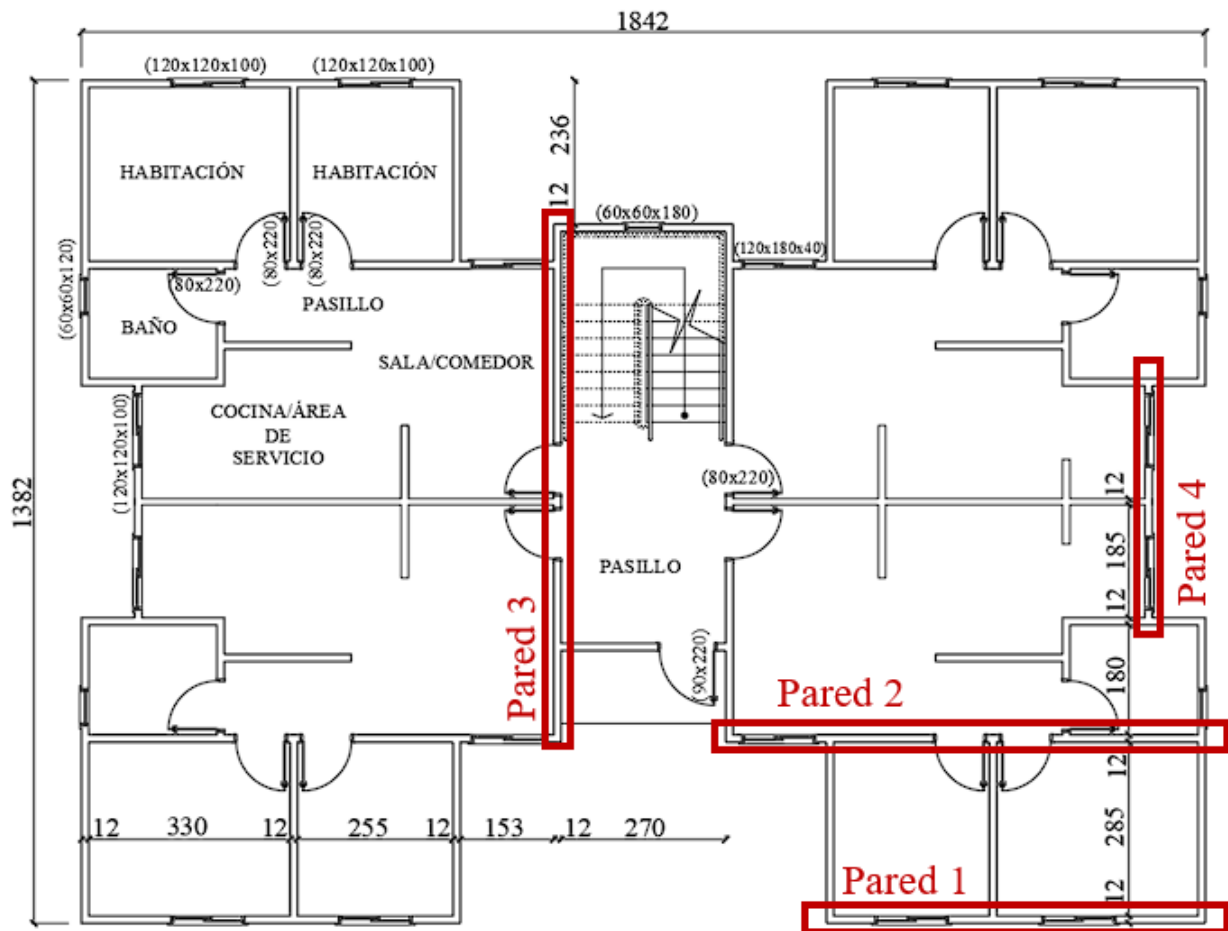


Figura 1. Planta baja de la arquitectura (dimensiones en centímetros).

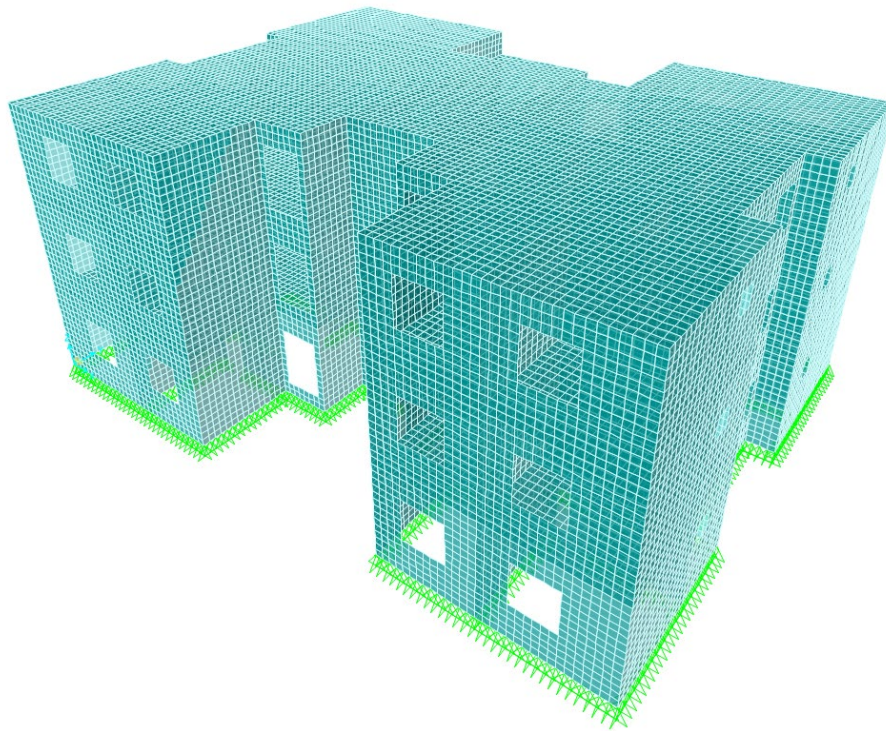


Figura 2. Discretización tridimensional del modelo en el programa SAP2000.

### 2.3 Variación térmica y de retracción del hormigón

Se consideraron las cargas térmicas relacionadas con la temperatura ambiente (variación uniforme) y la incidencia solar sobre el edificio (gradiente). Debido a la variación de temperatura entre los periodos de invierno y verano, se consideraron los casos de temperatura ambiente para las dos estaciones del año, donde se adoptó un valor negativo para las temporadas de invierno y un valor positivo para los periodos de verano.

La temperatura ambiente se aplicó uniformemente a todos los elementos del edificio, considerando hipotéticamente que toda la estructura se ejecutó en el mismo período, con una única temperatura promedio en todos los elementos. Así, las temperaturas ambiente verano-invierno se aplicaron de forma equivalente, cambiando únicamente el signo, con un valor positivo para el aumento de temperatura y negativo para el enfriamiento.

La incidencia de los rayos solares produce una variación de temperatura en el elemento estructural donde la cara expuesta al sol tiene una temperatura mayor que la cara no expuesta, resultando en un gradiente térmico a lo largo del espesor de la pieza. Esta variación de temperatura se consideró como una carga térmica de gradiente lineal sobre la estructura, asumiendo que la variación térmica entre caras ocurre linealmente a lo largo del espesor del elemento.

Como los rayos del sol llegan al edificio de forma desigual, se realizó un estudio para comprobar una situación real de incidencia solar. Con la ayuda del *software* SOL-AR se analizó el período de insolación de todas las paredes exteriores, pudiendo concluir que las paredes de las caras Noreste y Noroeste, resaltados en rojo en la Figura 3, presentan el mismo período de insolación y, por lo tanto, estará sujeta a una carga térmica de gradiente lineal.

Considerando que las losas del techo están expuestas a la luz solar durante todo el período de exposición, también se aplicó una carga térmica de gradiente lineal a todo el techo del edificio.

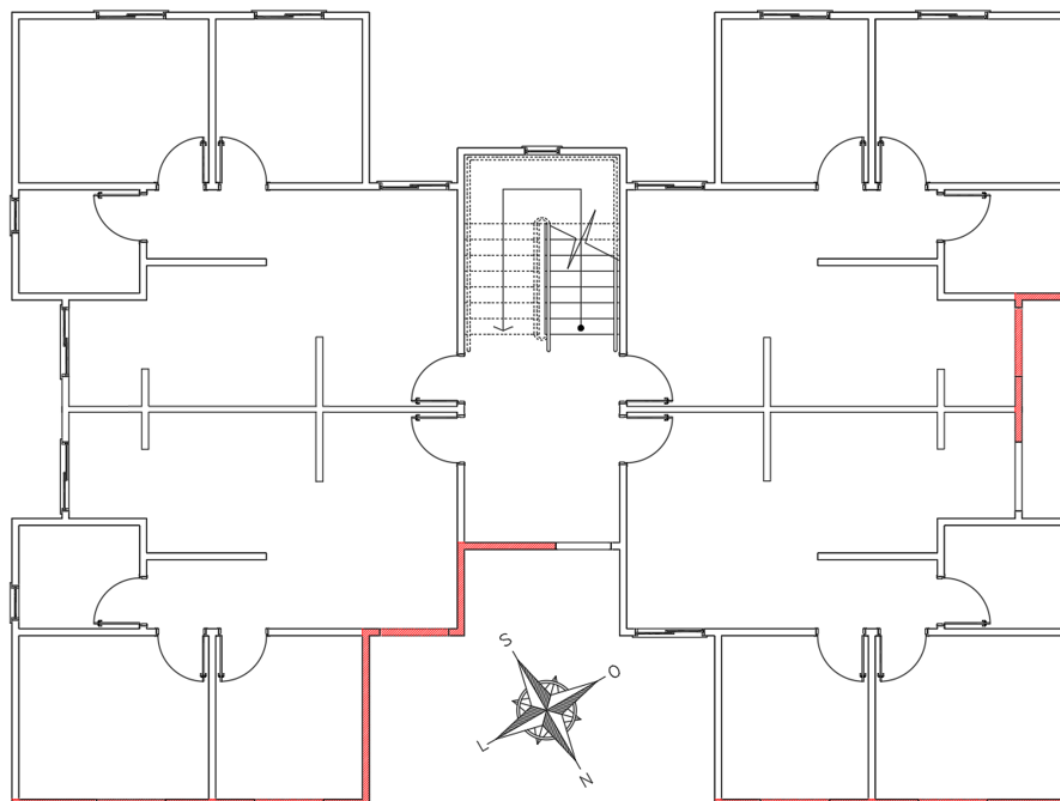


Figura 3. Incidencia solar en las paredes externas del edificio.

El efecto de la retracción por secado se consideró a partir del coeficiente de dilatación térmica del hormigón, donde se obtuvo una variación de temperatura equivalente a la deformación específica por retracción. La retracción se consideró, por tanto, como una carga térmica constante a lo largo del espesor de la pieza de hormigón y con valor negativo (efecto de acortamiento), actuando sobre todas las paredes y losas del edificio.

## 2.4 Propiedades de los Materiales

Considerando los requisitos de la NBR 6118 (ABNT, 2014) se adoptaron para el hormigón, resistencia característica a la compresión,  $f_{ck}$ , igual a 30 MPa, peso específico de 25 kN/m<sup>3</sup>, módulo de elasticidad secante de 27 GPa, coeficiente de Poisson de 0,20, coeficiente de dilatación térmica de  $1,0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  y módulo de elasticidad transversal de 12,92 GPa.

## 2.5 Cargas y combinaciones de acciones

Cargas permanentes y variables se consideraron de acuerdo con los requisitos de la NBR 6120 (ABNT, 2019). En los planos de planta típicos se consideró una carga permanente en las losas de 1,0 kN/m<sup>2</sup> por carga de subsuelo de hormigón y suelo de hormigón y carga de 0,25 kN/m<sup>2</sup> proveniente del techo de cartón de yeso.

La carga variable sobre las losas, resultante del uso del edificio, se estableció de acuerdo con la categoría de ocupación del ambiente. De esta forma, se adoptó 3,0 kN/m<sup>2</sup> para zonas comunes, pasillos y escaleras. Para el área de servicio y lavandería se utilizó 2,0 kN/m<sup>2</sup> y 1,5 kN/m<sup>2</sup> para el resto de ambientes.

Para la losa de cubierta se definieron las mismas cargas permanentes de las plantas estándar, sin embargo, la carga variable utilizada se refiere a la cubierta con acceso sólo para mantenimiento, de 1,0 kN/m<sup>2</sup>.

La acción del viento no fue considerada en el análisis ya que esta carga afecta directamente las tensiones de las paredes a lo largo de la cimentación, distorsionando estos valores en mayor o menor medida, dependiendo de la dirección del viento aplicado. Debido a que el objetivo del presente trabajo es analizar los efectos de las variaciones térmicas y la retracción, se decidió no considerar las cargas de viento.

Para la temperatura ambiente, se consideraron los valores propuestos por Laranjeiras (2017), donde, independientemente de las dimensiones de las piezas, se recomienda utilizar cargas térmicas con temperaturas uniformes de +15 °C y -15 °C, refiriéndose a los periodos de verano e invierno, respectivamente. Por otro lado, para la carga térmica de gradiente lineal se consideró una variación de temperatura de 15 °C, de modo que al sumar sus efectos con la temperatura de calentamiento uniforme, las paredes bajo incidencia solar tienen una temperatura en la cara interior de +15 °C. y en la cara exterior, expuesta al sol, de +30 °C.

La retracción por secado se consideró como una variación de temperatura uniforme equivalente. Así, según la NBR 6118 (ABNT, 2014), para una humedad ambiental media del 75% compatible con el Estado de Rio Grande do Sul (Brasil), espesores ficticios de piezas de 200 mm y hormigón de edad de 60 días, la retracción específica por deformación es de -0,30 ‰, que corresponde a una temperatura uniforme de -30 °C.

El efecto de la retracción por secado del hormigón se consideró como una acción permanente indirecta. Las variaciones de temperatura se consideraron acciones variables indirectas.

Para el análisis del Estado Límite de formación de grietas (ELS-F) en las paredes y losa de techo, la NBR 6118 (ABNT, 2014) establece que las combinaciones de Frecuente de Servicio (CF) y Poco Frecuente de Servicio (CR) pueden ser utilizadas para este fin. Dado que las cargas térmicas solo deben tomarse como acciones variables secundarias y el coeficiente de atenuación  $\psi_1$  recomendado para las combinaciones de poco frecuente de servicio tiene un valor de 0,50, mayor que el coeficiente de atenuación  $\psi_2$  de valor 0,30, utilizado para las combinaciones de frecuentes de servicio, se optó por usar en el presente estudio solo combinaciones poco frecuente de servicio, con el fin de identificar las tensiones de tracción más altas desarrolladas por acciones térmicas.

Los autores propusieron seis combinaciones poco frecuente de servicio (ver Tabla 1), donde las primeras cuatro incluyen el peso propio, acciones permanentes, variables, variaciones de temperatura y acción de retracción, y la acción de retracción se consideró en todas las combinaciones.

Aunque no se indica en la norma, el CR 5 se preparó para medir los efectos de las variaciones térmicas como acciones variables principales cuando las acciones variables habituales se toman como acciones secundarias.

CR 6 presenta únicamente las cargas habituales gravitatorias, permanentes y accidentales habituales (cargas de uso), lo que permite identificar el comportamiento de la estructura cuando no está sometida a cargas de retracción y temperatura. En Vargas (2021) también se presentan resultados donde solo se consideró el peso propio y las acciones térmicas y retracción para analizar un periodo de vida del edificio donde aún está en construcción y ya está sujeto a acciones térmicas y retracción por el secado.

Según la NBR 6118 (ABNT, 2014) la resistencia a la tracción del hormigón está dada por el valor de  $f_{ctk,inf}$  y para un hormigón clase C30 se tiene 2,02 MPa. De esta forma, las paredes de hormigón y la losa de cubierta serán verificadas en cuanto las tensiones principales de tracción obtenidas a través de las combinaciones de acciones, siendo considerado como valor límite de inicio de fisura la resistencia a la tracción del hormigón ( $f_{ctk,inf}$ ).



Tabla 1. Combinaciones de acciones.

| Nº de la Combinación | Combinación de acciones (ELS – Raras)     |
|----------------------|---|
| CR 1                 | $1,0*PP+1,0*RET+1,0*G+1,0*Q$              |
| CR 2                 | $1,0*PP+1,0*RET+1,0*G+1,0*Q+0,5*RU$       |
| CR 3                 | $1,0*PP+1,0*RET+1,0*G+1,0*Q+0,5*AU$       |
| CR 4                 | $1,0*PP+1,0*RET+1,0*G+1,0*Q+0,5*(AU+AGL)$ |
| CR 5                 | $1,0*PP+1,0*RET+1,0*G+1,0*(AU+AGL)+0,4*Q$ |
| CR 6                 | $1,0*PP+1,0*G+1,0*Q$                      |

Siendo: PP (peso propio), G (Permanente), Q (Variable), AU (Calentamiento uniforme), RU (Enfriamiento uniforme), AGL (Calentamiento gradiente lineal), RET (Retracción del hormigón).

### 3. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se presentan y discuten los resultados obtenidos del análisis numérico, el cual se realiza con foco en las tensiones de tracción principales para cuatro paredes indicadas en la Figura 1 y para la losa de techo del edificio. La tensión de tracción se limitó al valor de 2,02 MPa, referente a la resistencia a la tracción del hormigón C30 definida en la NBR 6118 (ABNT, 2014). En las imágenes, las regiones azul oscuro se refieren a tensiones superiores a este límite.

La Figura 4 muestra las tensiones principales obtenidas del análisis en el programa SAP2000 V18 referente a la combinación CR1 para las paredes 1 y 2. En la primera planta, junto a la base de las paredes, se puede observar que las tensiones principales de tracción superan el valor de resistencia a la tracción del hormigón de 2,02 MPa, que alcanzan niveles del orden de 8,6 MPa y 6,0 MPa para las paredes 1 y 2, respectivamente.

Este comportamiento tensional es inducido por los elementos de cimentación, que restringen el movimiento de acortamiento del hormigón provocado por la retracción por secado, generando tensiones de tracción más elevadas a lo largo de la base de la estructura, en comparación con los pisos superiores. Así, cuando se verifica el ELS-F, se nota que tienden a formarse grietas en estas regiones y, en consecuencia, se exigen tasas de acero más altas.

Estudios realizados Mikalleg e.al. (2017) y Gottsäter et.al. (2019) también observaron este comportamiento de las paredes bajo el efecto de la retracción por secado con fisura cerca de la base, cuando están restringidos por elementos de cimentación, lo que indica que se requieren mayores tasas de refuerzo para reducir dichas fisuras.

También es posible notar que junto a las aberturas de puertas y ventanas, surgen concentraciones de tensiones de tracción que superan el valor límite de resistencia establecido, alcanzando niveles del orden de 6.9 MPa y 6.0 MPa para las paredes 1 y 2, respectivamente. Como prescribe la NBR 16055 (ABNT, 2012), se deben prever refuerzos alrededor de las aberturas para combatir estos efectos.

Lo muestran Padilha et.al. (2021) y Lima et.al. (2020) que el no uso o mala disposición de estos refuerzos complementarios puede conducir a la formación de grietas caracterizadas por su posición, a partir de la esquina de las aberturas, patrón evidenciado en la Figura 4.

Otro factor que influye en el nivel de tensión es el encuentro con paredes perpendiculares.

Estos cruces restringen el libre movimiento del hormigón, así como de los elementos de cimentación y, con eso, aumentan los niveles de tensión de tracción. En la pared 1 es posible observar este efecto entre las dos aberturas de las ventanas, tramo donde ocurre el encuentro con una pared interior. Para la pared 2, los niveles de tensión se acentúan cerca de la abertura de la ventana, entre las aberturas de las puertas y en el extremo derecho de la pared. Estas regiones de cruce de paredes, principalmente las cercanas a las aberturas, deben tener marcos reforzados para evitar grietas.

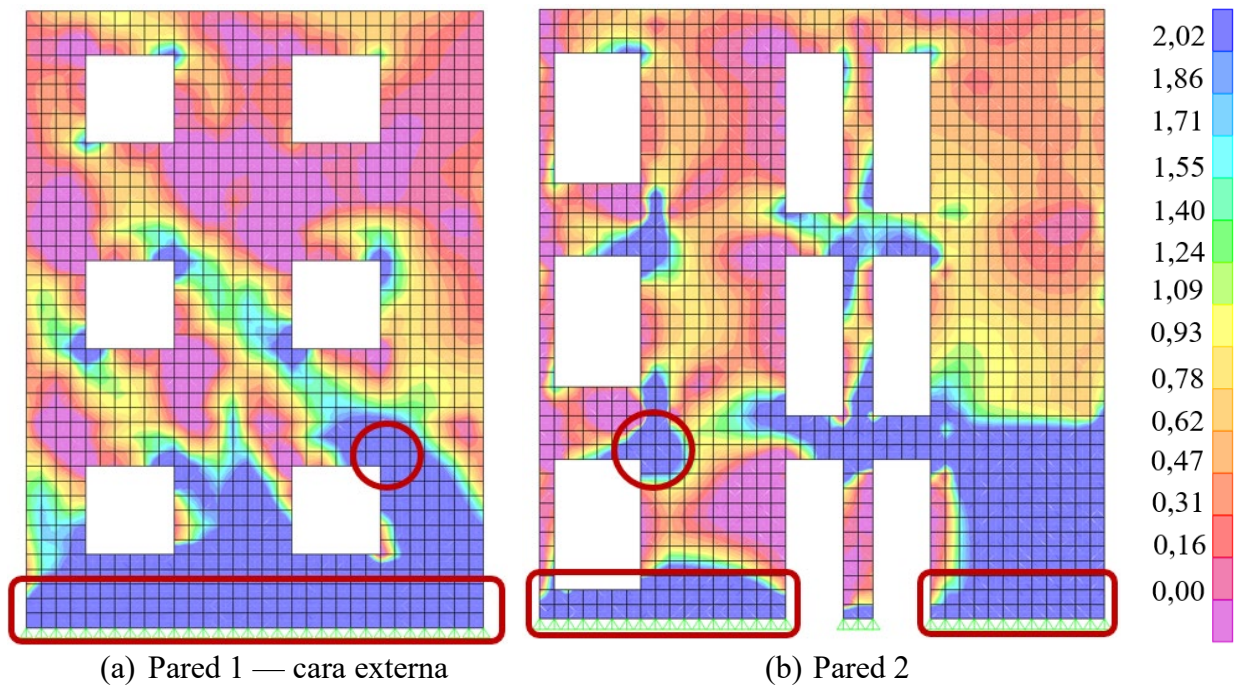


Figura 4. Distribución de tensiones principales referentes a CR1 en Mpa para las paredes 1 y 2.

Los resultados referidos a CR2 son muy similares a los desarrollados por la combinación CR1. En la Figura 5 se puede observar que las tensiones principales de tracción tienen el mismo patrón de comportamiento ya visto, pero con un incremento en los niveles de tensiones, del orden de 10.8 MPa y 8.0 MPa para la base de las paredes. Para los esfuerzos próximos a las aberturas de puertas y ventanas, los valores más altos identificados fueron de 8,6 MPa y 8,0 MPa, para las paredes 1 y 2, respectivamente. El aumento en los niveles principales de tensión de tracción se debe a que la acción térmica de enfriamiento uniforme actúa de manera similar a la contracción por secado en el modelo numérico, lo que hace que la pieza se acorte.

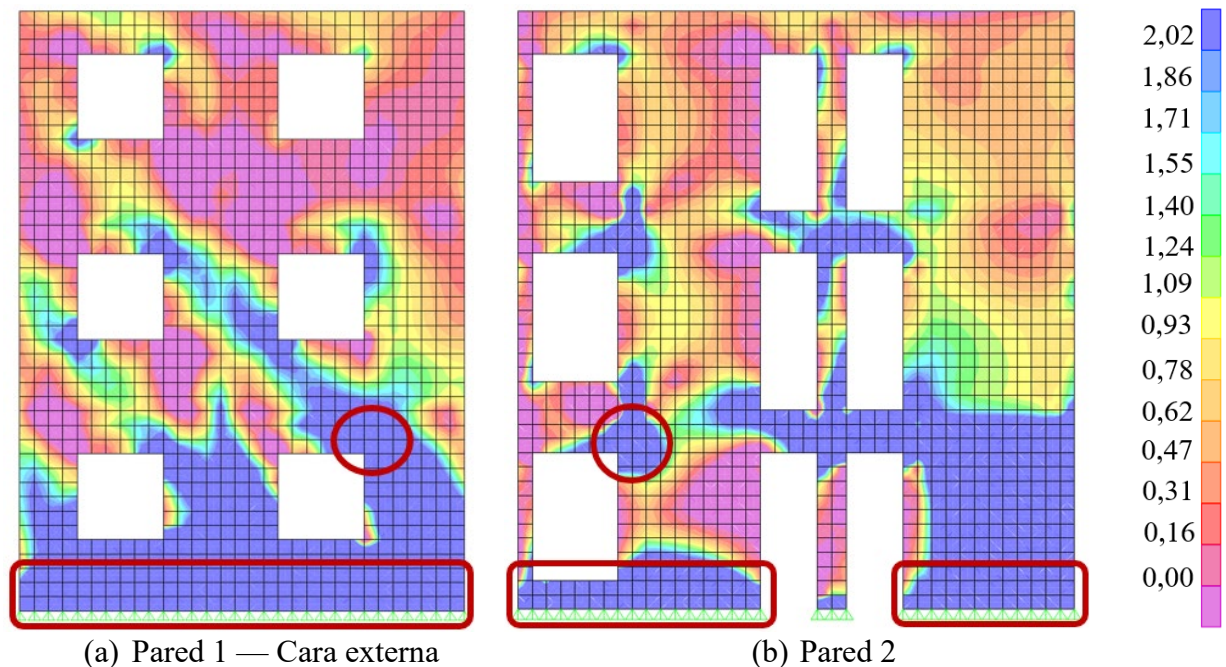


Figura 5. Distribución de tensiones principales referentes a CR2 en Mpa para las paredes 1 y 2.

Las tensiones provocadas por la CR3 se muestran en la Figura 6, donde es posible identificar reducciones en las regiones con mayores concentraciones de tensión de tracción. Las mayores tensiones de tracción se encontraron para la pared 1, del orden de 6,4 MPa y 5,2 MPa, y para la Pared 2, de 5,0 MPa y 6,0 MPa para la base del edificio y cerca de la abertura de las ventanas, respectivamente. Este comportamiento está dado por la acción térmica del calentamiento uniforme que actúa en contra de la retracción por secado, induciendo al hormigón a un movimiento de expansión. Aunque inferiores a los resultados de las combinaciones CR1 y CR2, estas tensiones de tracción principales permanecen por encima del límite de resistencia a la tracción del hormigón de 2,02 MPa y requieren refuerzos complementarios para combatir la formación de grietas.

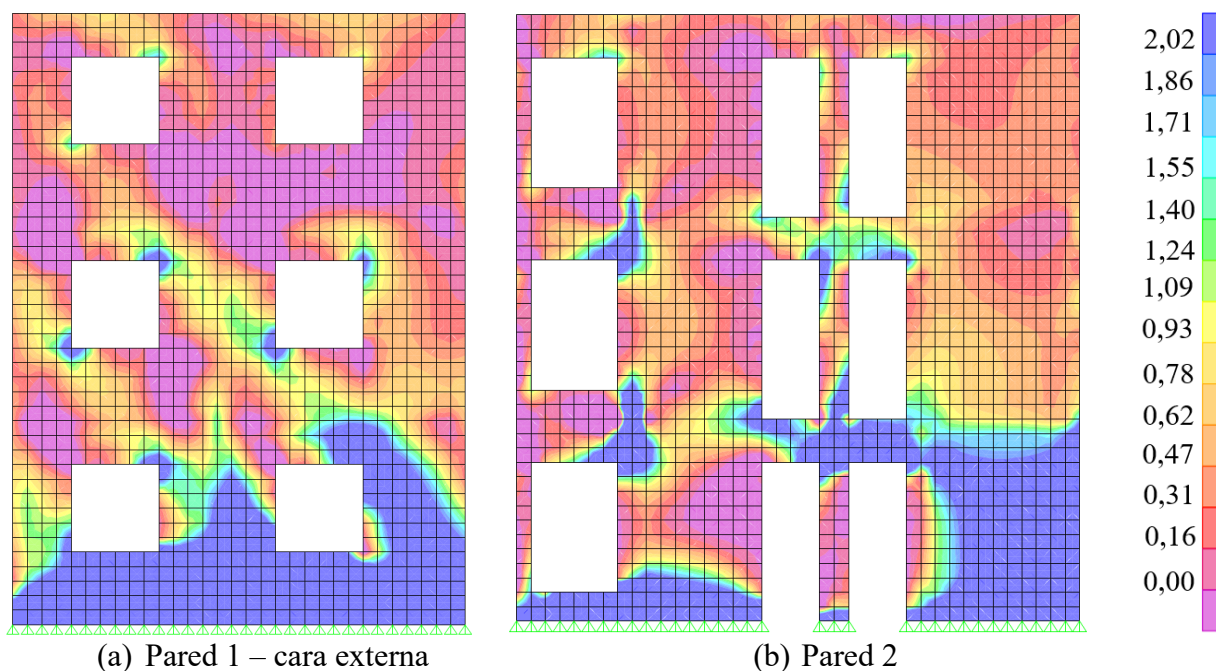


Figura 6. Distribución de tensiones principales referentes a CR3 en Mpa para las paredes 1 y 2.

Los resultados para la combinación CR4 presentados en la Figura 7 señalan un aumento generalizado en las regiones traccionadas para ambas las paredes. La pared 1 que recibe una carga térmica gradiente lineal presenta nuevas regiones con tensiones principales de tracción superiores a 2,02 MPa, siendo ellas situadas en la intersección de una pared en el tercer piso, con niveles de 2,1 MPa y en las confluencias con las losas del piso y cubierta del tercer piso, con tensiones de 2,1 MPa y 2,2 MPa, respectivamente. Se muestra así que esos lugares deben recibir soportes adecuados para luchar contra la formación de grietas.

El aumento en las tensiones principales de tracción en el tercer piso es explicado por Laranjeiras (2017) y El-Tayeb et. al. (2019), visto que cuando los elementos horizontales están sujetos a las acciones térmicas de calentamiento ocurre el movimiento de expansión de la pieza que, consecuentemente, causa aumentos de esfuerzos en los elementos verticales. Dicho efecto también puede ser observado en la pared 2, donde aunque no se tenga identificado ninguna nueva región con formación de grietas, hay un aumento de tensiones de tracción en el tercer piso.

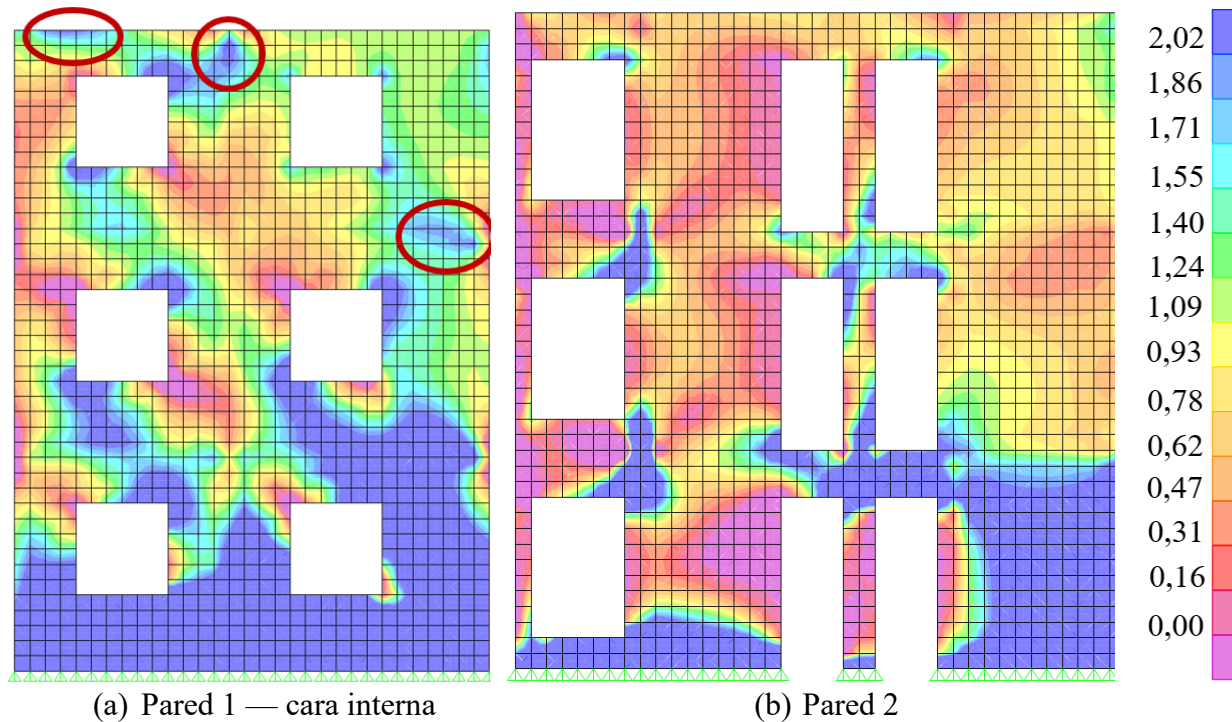


Figura 7. Distribución de tensiones principales referentes a CR4 en MPa para las paredes 1 y 2.

Analizando ahora la combinación CR5 (no prevista en norma), se puede visualizar que ambas paredes presentan un comportamiento muy semejante a aquello producido por la CR4, con pequeño aumento en la intensidad de las tensiones principales, como es demostrado en la Figura 8. Además de eso, se identifica en la pared 2 una nueva región, próxima a la losa de cubierta, con tensiones arriba de 2,02 MPa. Con eso, se percibe que los valores encontrados superan la resistencia a la tracción del hormigón señalando, así, que habrá agrietamiento de la pared de hormigón en esas regiones.

En la Figura 9 se presenta el comportamiento de las tensiones para las paredes 1 y 2 cuando se le somete a la carga de la combinación CR6, donde son identificadas algunas regiones próximas a las aberturas y junto a la losa de cubierta con tensiones principales de tracción no más grandes que 0,93 MPa, valor inferior a resistencia a la tracción del hormigón. Además de eso, las regiones junto a los elementos de cimiento, que antes presentaban tensiones de tracción superiores a 2,02 MPa, ahora tienen la predominancia de tensiones principales de compresión. Por lo tanto, se percibe que solo con la utilización de cargas permanentes y accidentales usuales no se puede identificar las regiones en las caras de las paredes que son propensas a agrietar, siendo así necesario considerar las acciones térmicas y retracción por secado en la verificación del ELS-F.

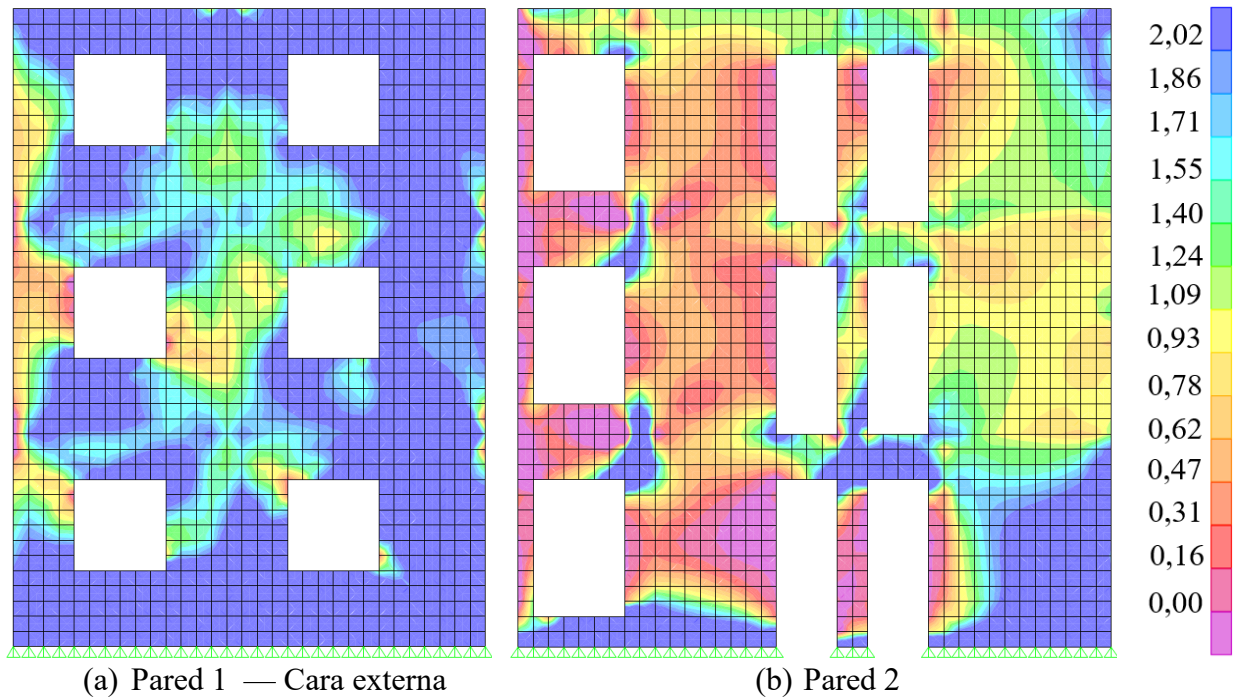


Figura 8. Distribución de tensiones principales referentes a CR5 en MPa para las paredes 1 y 2

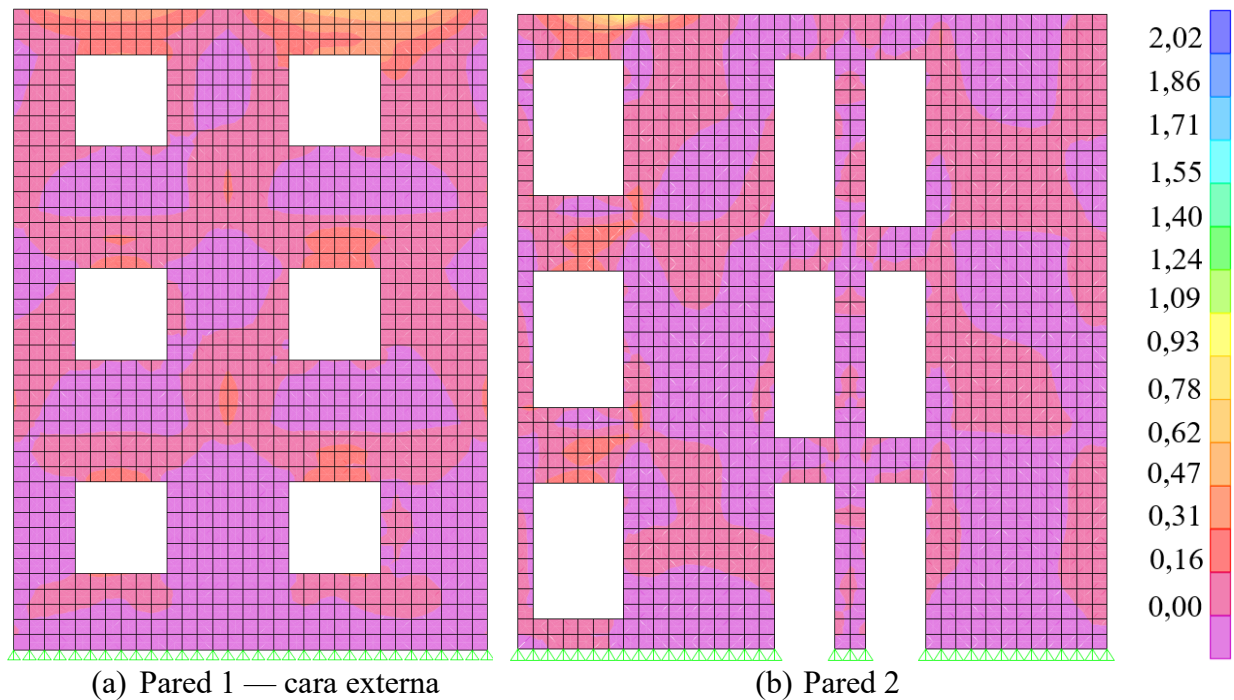


Figura 9. Distribución de tensiones principales referentes a CR6 en MPa para las paredes 1 y 2.

En lo que se refiere a las combinaciones desarrolladas en ese estudio, para el análisis del ELS-F para las paredes 3 y 4 son presentadas las Figuras 10 y 11 con el resumen de los niveles de tensiones principales de tracción para la base de las paredes junto al cimiento, esquinas de aberturas, intersección con paredes y confluencia con la losa de cubierta. Como se puede ver, las tensiones principales de tracción superiores a resistencia a la tracción del hormigón para todas las combinaciones son identificadas, excepto de aquella sin retracción por secado o acciones térmicas, lo que demuestra que todas las paredes están sujetas a formación de grietas y deben tener soportes

apropiados. En esas figuras, el límite de tensión de tracción de 2,02 MPa es indicado por la línea horizontal.

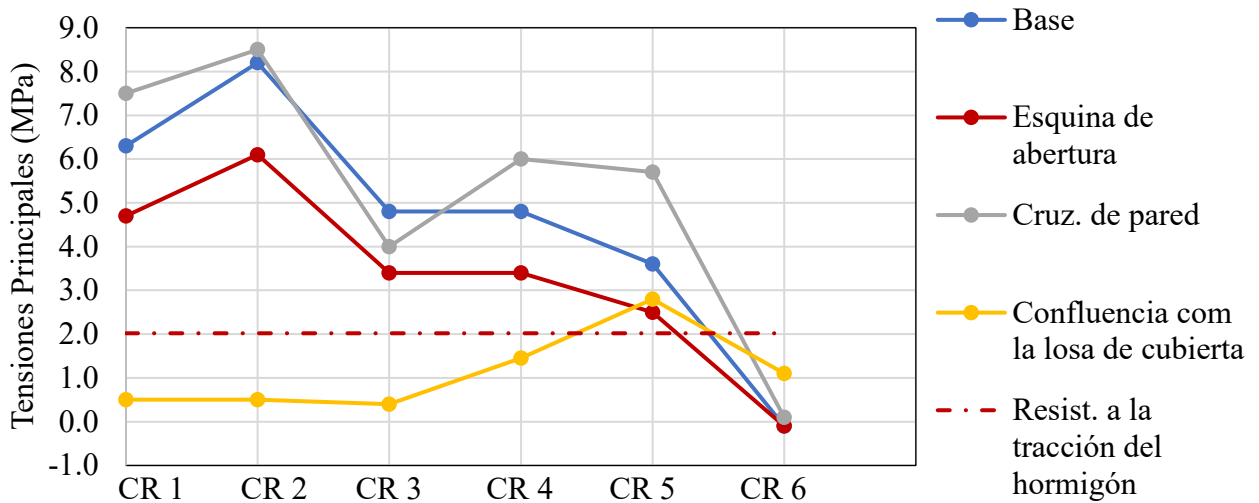


Figura 10. Resumen de las tensiones principales de tracción, en MPa para la pared 3.

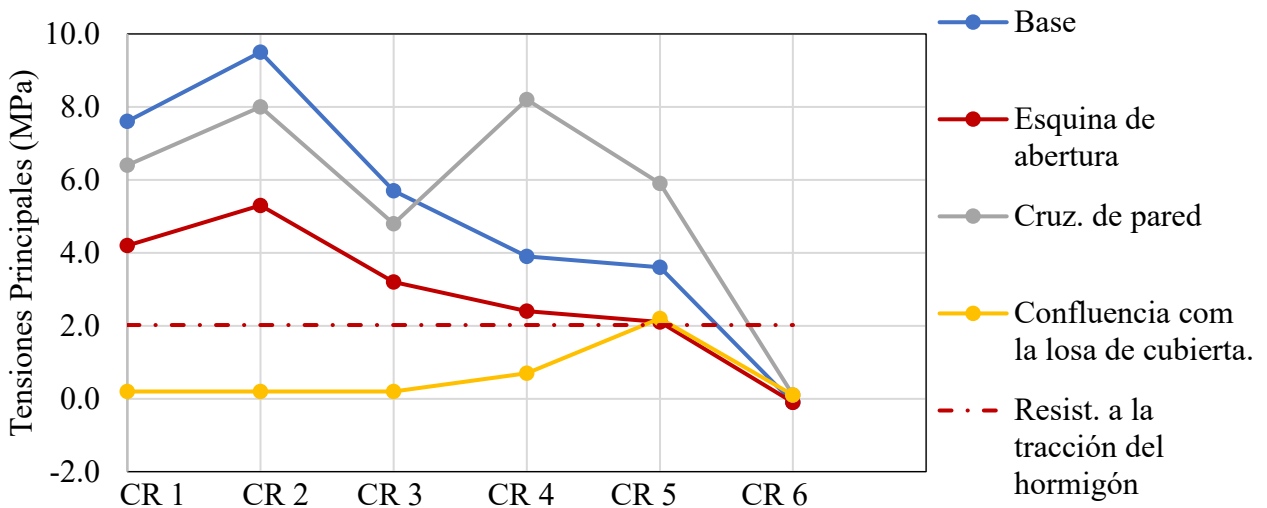


Figura 11. Resumen de las tensiones principales de tracción, en MPa para la pared 4.

### 3.2 Análisis Losa de Cubierta

Los resultados de las combinaciones se presentan para las caras superior e inferior de la losa, sin embargo, debido a la simetría bilateral de la estructura, solo la mitad de la losa será presentada en las figuras.

En la Figura 12 se puede ver que para la CR1 hay el desarrollo de tensiones principales de tracción de aproximadamente 2,5 MPa, superiores al límite establecido para la verificación del ELS-F, en la región de estrechamiento en la geometría de la losa de cubierta. Dicho comportamiento ocurre tanto por la reducción del área de losa en la región central de la edificación como por la existencia de la pared 3, la cual restringe el movimiento de acortamiento producido por la retracción por secado, además del comportamiento natural de la estructura de jalar la cara superior de la losa en razón del apoyo que es dado por la pared.

Para combatir la formación de grietas dado por el patrón de tensiones de tracción presentado es necesario chequear las armaduras negativas definidas en el dimensionamiento y, caso sean insuficientes para los nuevos niveles de tensiones, se debe recalibrar con tasas de acero compatibles. Otro procedimiento que se puede adoptar para combatir el desarrollo de elevadas tensiones de tracción, arriba de 2,02 MPa, es la utilización de juntas de dilatación en las regiones de estrechamiento, combatiendo así la formación de grietas en la losa.

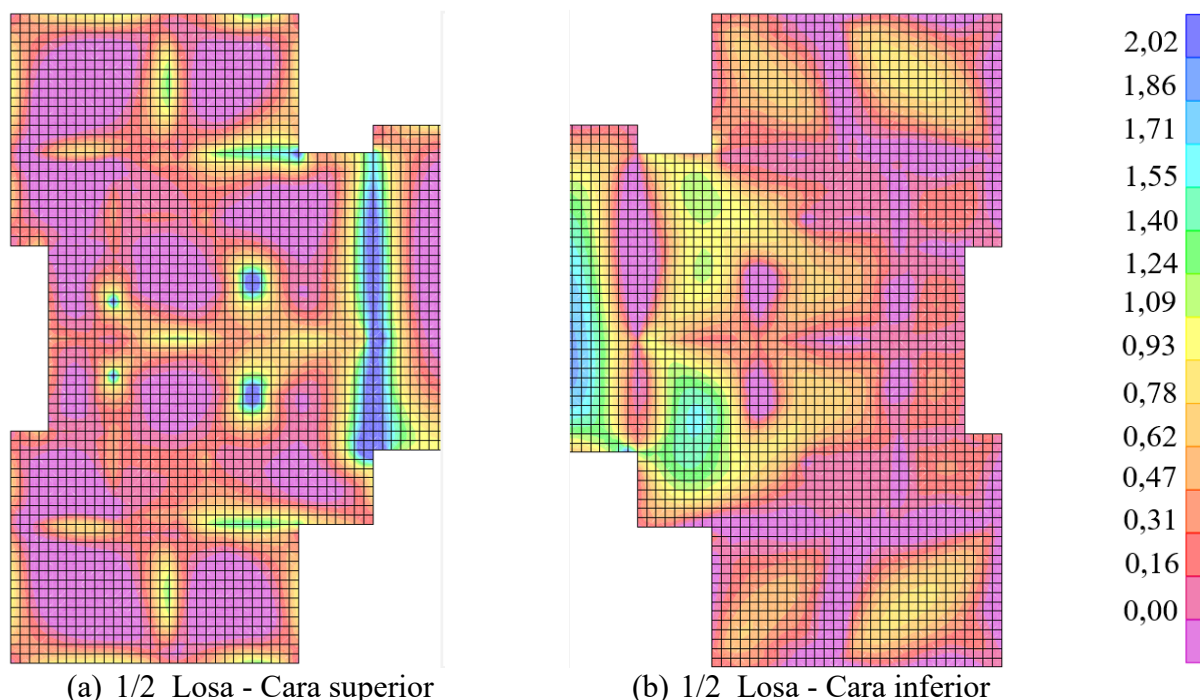


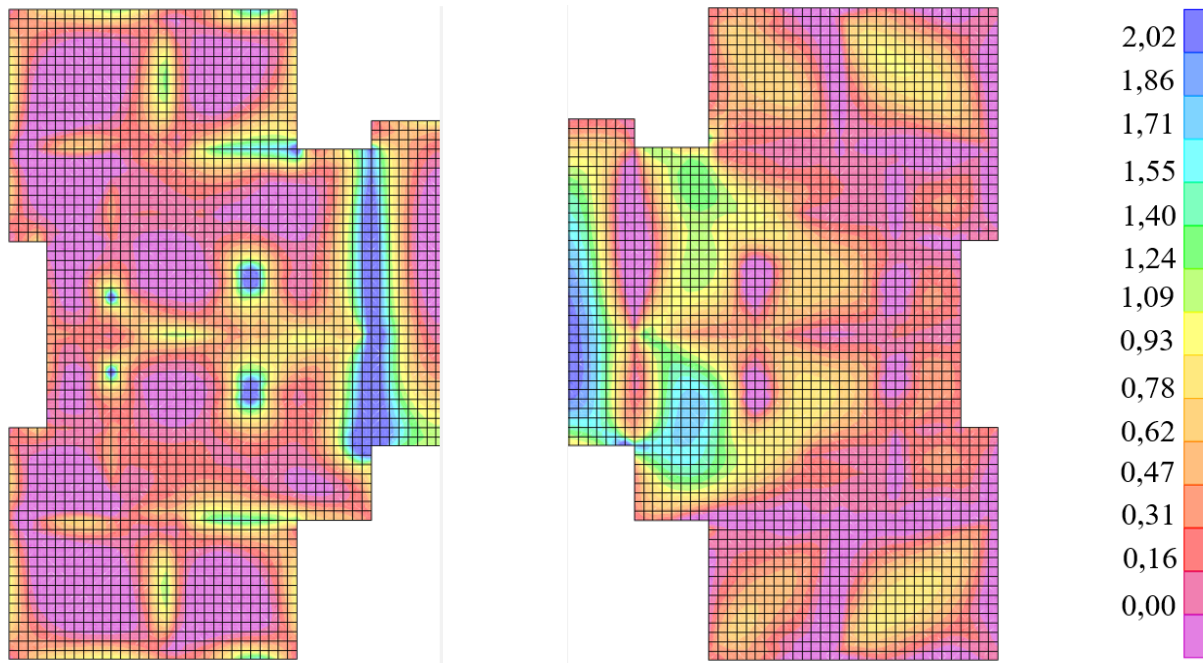
Figura 12. Distribución de tensiones principales referentes a CR1 en MPa para Losa de Cubierta.

Cuando se analiza el efecto de enfriamiento uniforme (Figura 13), se puede observar un aumento de la región crítica para la formación de grietas en la cara superior de la losa, que atinge niveles de tensiones de tracción de la orden de 3,5 MPa. Para la CR2 también se verifica que la cara inferior de la losa presenta tensiones de aproximadamente 2,10 MPa, arriba del límite establecido.

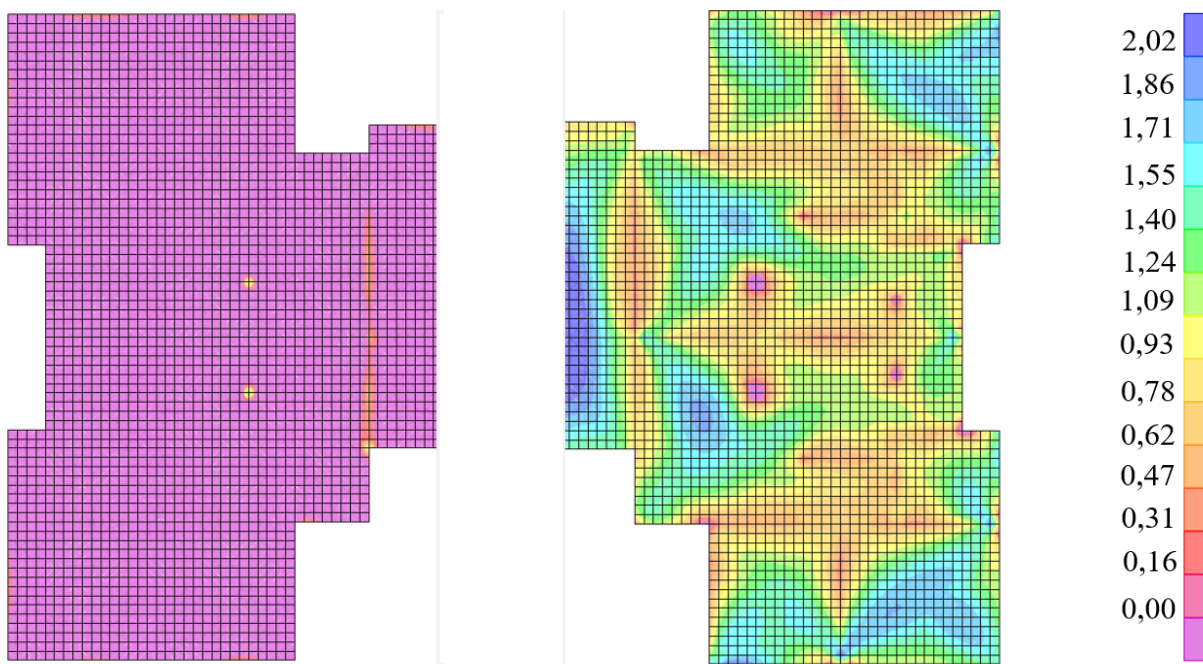
Conforme se verificó para las paredes de hormigón, la variación uniforme de temperatura, cuando actúa sin la insolación directa, provoca la reducción de las tracciones principales de tracción. Debido a ese hecho, la CR3, que cuenta solo con esa carga térmica de calentamiento no será analizada.

En la Figura 14 se presentan los resultados para la CR4, que considera la variación gradiente lineal de temperatura (insolación directa en la losa). Para dicha combinación se puede verificar que la cara superior de la losa tiene, en su mayoría, tensiones de compresión mientras hay el aumento generalizado de tensiones principales de tracción en la cara inferior de la losa, donde el panel central presenta niveles de tensiones de 2,10 MPa. Debido al aumento en el nivel de las tensiones en la cara inferior es necesario chequear la configuración de armaduras positivas adoptadas y, si necesario, recalibrarlas para combatir el agrietamiento de la losa.

En la Figura 15 se presenta los resultados para la combinación no normalizada (CR5), identificándose que la gran mayoría de los paneles de losas presentan tensiones arriba del límite adoptado para la formación de grietas cuando las cargas térmicas son elegidas como acciones variables principales. De esa manera, el mismo procedimiento aconsejado para la CR4 debe ser adoptado para todos los demás paneles que presentan tensiones arriba de 2,02 MPa.



(a) 1/2 Losa - Cara superior (b) 1/2 Losa - Cara inferior  
 Figura 13. Distribución de tensiones principales referentes a CR2 en MPa para Losa de Cubierta.



(a) 1/2 Losa - Cara superior (b) 1/2 Losa - Cara inferior  
 Figura 14. Distribución de tensiones principales referentes a CR4 en MPa para las paredes 1 y 2.

En la Figura 16 se puede ver el comportamiento de la losa de cubierta cuando no es sometida a acción de retracción por secado o cargas térmicas. Para dicha combinación (CR6) hay el desarrollo de tensiones principales de tracción en la cara superior de la losa en la confluencia con las paredes y en la región central de los paneles de losas en la cara inferior.



Aunque ambas caras de la losa de cubierta presenten tensiones de tracción, solo con las cargas gravitacionales usuales no se puede identificar regiones donde la formación de grietas pueda ocurrir.

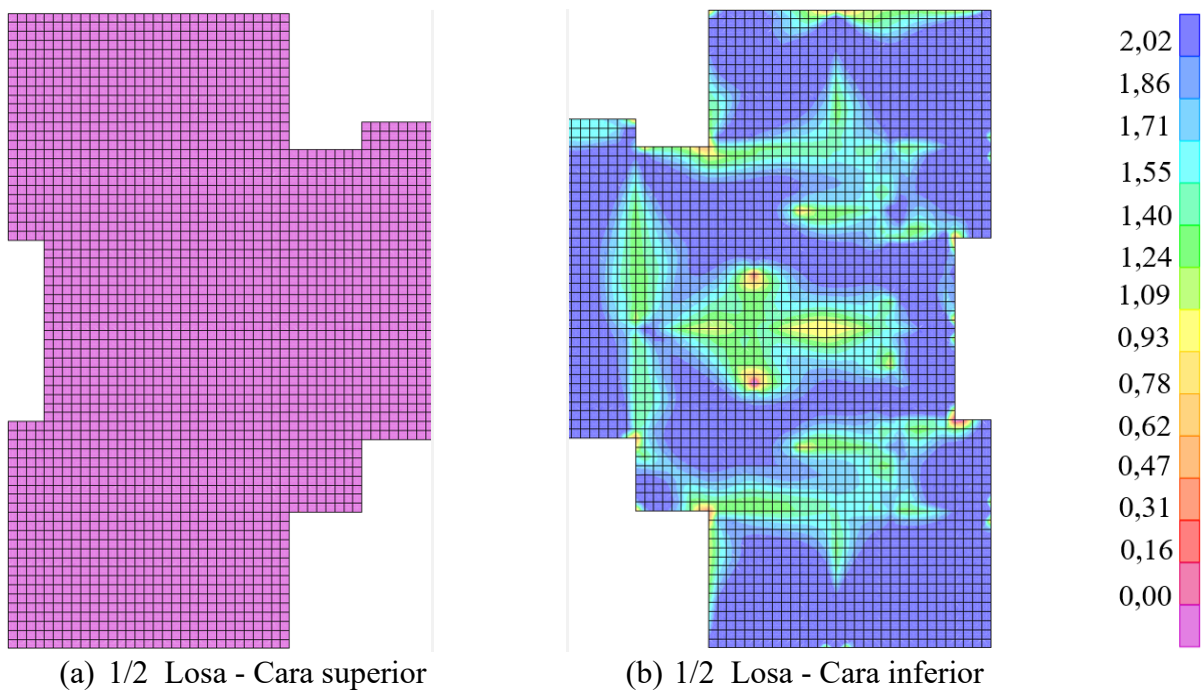


Figura 15. Distribución de tensiones principales referentes a CR5 en MPa para Losa de Cubierta.

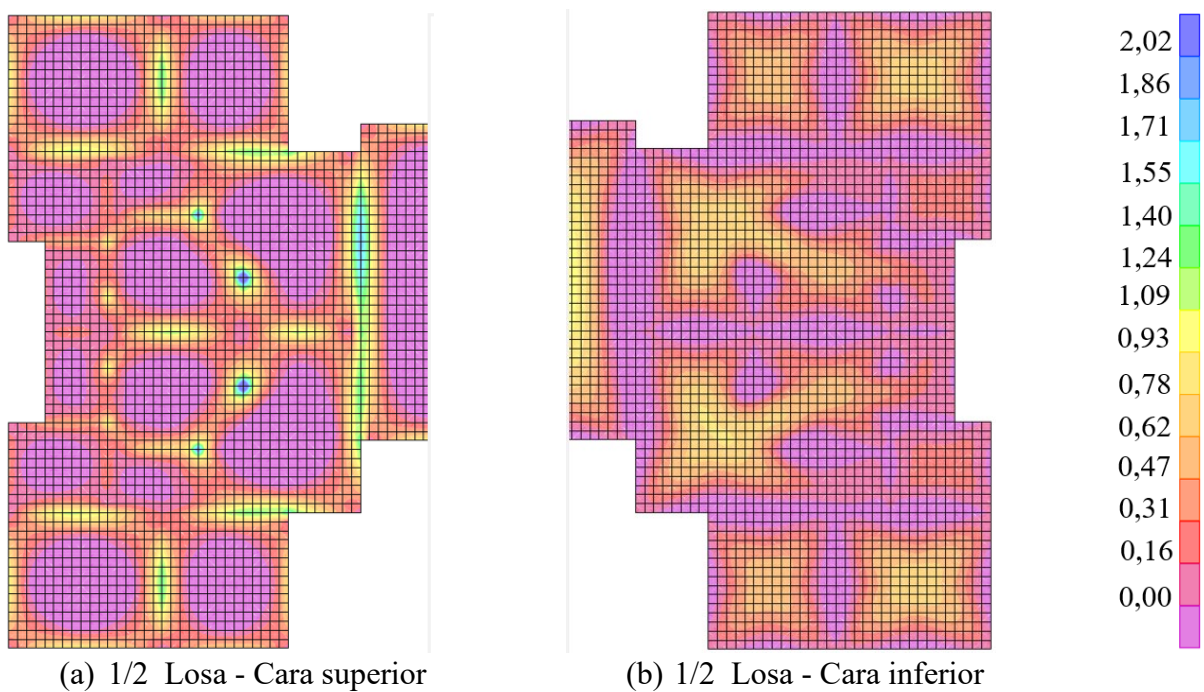


Figura 16. Distribución de tensiones principales referentes a CR6 en MPa para las paredes 1 y 2.

## 4. CONCLUSIÓN

A partir del estudio que se realizó, se puede concluir que la acción de retracción por secado y las cargas térmicas pueden producir, en estructuras en paredes de hormigón moldeado *in situ*, tensiones principales de tracción con niveles arriba del límite de 2,02 MPa previsto en la NBR 6118 (ABNT, 2014) para hormigones de clase C30.

Inclusive se observó que las combinaciones con solo la acción de retracción por secado (CR1) y esta combinada con el enfriamiento uniforme (CR2) producirán las tensiones principales de tracción más elevadas en comparación con las demás, mostrándose más adecuadas para la identificación de las regiones que pueden desarrollar la formación de grietas tanto para las paredes como para la losa de cubierta.

El modelado de la estructura completa se mostró necesario para la validez del comportamiento de las tensiones, una vez que la restricción de los movimientos de expansión y contracción por las paredes, losas y elementos de cimientto actuaron de manera significativa en el comportamiento de las tensiones, pudiéndose ver que cuanto más próximo de los elementos de cimientto o intersección de paredes, más grandes son las tensiones de tracción cuando sujetas a retracción y enfriamiento uniforme.

La variación uniforme de temperatura produjo resultados plausibles de atención solo cuando en combinación con la variación del gradiente lineal de temperatura señalan niveles de tensiones más elevados que la resistencia a la tracción del hormigón, especialmente en la intersección de pared con la losa de cubierta.

De esa manera, para que se mantenga la durabilidad de la estructura es necesario que, para la verificación en cuanto al ELS-F, se tomen en cuenta las acciones térmicas y la retracción por secado, una vez que solo con las cargas usuales de análisis no es posible identificar las regiones propensas a la formación de grietas.

Para futuros estudios se proponen las siguientes consideraciones: a) incluir la acción del viento juntamente con la acción térmica de enfriamiento uniforme y retracción por secado; b) adoptar apoyos flexibles (interacción suelo – estructura) para mejorar el comportamiento de la estructura con los elementos de cimientto y; c) realizar el dimensionamiento de las paredes y losa de cubierta para las cargas usuales y chequear los aumentos de tasas de acero necesarios cuando aplicadas a acciones térmicas y retracción.

## 5. REFERENCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *NBR 6120: Ações para o Cálculo de Estruturas de Edificações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 16055: Parede de Concreto Moldada no Local para a Construção de Edificação: Requisitos e Procedimentos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado*. Rio de Janeiro.
- Braguim, T. C. (2013), “*Utilização de modelos de cálculo para projeto de edifícios de paredes de concreto moldadas no local*”. Disertación de Maestría, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, DOI: <https://doi.org/10.11606/D.3.2013.tde-18082014-144751>
- Computers & Structures Inc. (2016), *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000*. Berkeley, California, USA.
- El-Tayeb, Essam H.; El-Metwally, Salah E.; Askar, Hamed S.; Yousef, Ahmed M. (2017), *Thermal analysis of reinforced concrete beams and frames*. HBRC Journal, 13:1, 8-24, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2015.02.001>

- Gottsäter E., Johansson M., Plos M., Ivanov O. L. (2019), *Crack widths in base restrained walls subjected to restraint loading*. Engineering Structures, Volume 189, Pages 272-285, ISSN 0141-0296, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.089>
- Laranjeiras, A. C. R. (2017), “*Edifício sem juntas*”. Salvador, Brasil. 46 p.
- Larsson, O. (2009), *Modelling of temperature profiles in a concrete slab under climatic exposure*. Structural Concrete. v. 10, n. 4, p. 193-201, ISSN 1464-4177, DOI: <https://doi.org/10.1680/stco.2009.10.4.193>
- Lima, K. B. A.; Borba, F. V.; Rocha, J. P.; Paixão, M. A. S.; Araújo, W. M. P.; Viana, S. W. J. P.; Nunes, L., L., L. (2020), *Fissuras em paredes de concreto em um conjunto residencial, localizado em São José de Ribamar – Maranhão*. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 04, Vol. 05, pp. 148-163. Abril de 2020. ISSN: 2448-0959. Disponible en: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/fissuras-em-paredes>
- Markovski, G., Čeček, M., Šahinagić-Isović, M. (2012), *Shrinkage strain of concrete - causes and types*. GRAĐEVINAR, 64, 9, DOI: <https://doi.org/10.14256/JCE.719.2012>
- Micallef M., Vollum R. L., Izzuddin B. A. (2017), *Crack development in transverse loaded base-restrained reinforced concrete walls*. Engineering Structures, Volume 143, 2017, Pages 522-539, ISSN 0141-0296, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.04.035>.
- Nakamura, J.; Pinto, J. R. *Fissuras põem em risco a vida útil das estruturas de concreto*. Portal AECweb. [S.I.] 2017. Disponible en: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/fissuras-poem-em-risco-a-vida-util-das-estruturas-de-concreto/16243>. Acceso en: 24 de abr. 2021.
- Netto, L. G. R.; Souza, V. V.; Farias, B. M. (2021), *Análise das Manifestações Patológicas no Pós-Obra do Método Construtivo de Paredes de Concreto em Edifícios de Habitações Populares na Cidade do Rio de Janeiro*. Epitaya E-books, [S. l.], v. 1, n. 6, p. 368-397, DOI: <https://doi.org/10.47879/ed.ep.2021250p368>. Disponible en: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/184>. Acceso en: 5 jul. 2022.
- O'Brien, E. J., Keogh, D. L.; O'Conner, A. J. (2015), “*Bridge deck analysis*”. 2 ed. Boca Raton: CRC Press. cap. 2, p. 46-55.
- Padilha, F.; Carneiro, L. R. S.; Poggiali, F. S. J. (2021), “*Análise de manifestações patológicas em sistemas de paredes de concreto moldadas in loco*”. XVI Congreso Latino-Americano de Patología de Construcción y XVIII de Control de Calidad en la Construcción. ISBN: 978-65-86819-19-9, DOI: <https://doi.org/10.4322/conpat2021.461>
- Recena, F. P. (2014), “*Retração do concreto*”. Porto Alegre: EDIPUCRS, 151 p.
- Resende, P. B., Martins, R. J. F., Freitas, M. S. (2018), “*Fissuras causadas por movimentações térmicas no concreto*”. Semana Nacional de Ciência e Tecnologia, p. 1-10.
- Rodrigues, G. S. S.; Bauer, E. (2010), “*Avaliação da retração por secagem a baixas idades em concretos estruturais na região da grande goiânia*”. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza. 52. Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo, 2010. v. 52. p. 1-14. Disponible en: <http://materialsandmateriais.blogspot.com/2013/08/artigo-tecnico-at-08-retracao-do.html>
- Thomaz, E., Carneiro, L. A. V. (2013), “*Manifestações patológicas na construção: alguns casos reais de fissuração em paredes de edifícios de concreto armado*”. in: IX International Congress on Pathology and Repair of Structures, João Pessoa (Brasil), 16 p.
- Vargas, L. B. (2021), *Avaliação das Ações Térmicas e de Retração em uma Edificação em Paredes de Concreto Moldadas in Loco*. Trabajo de Conclusión de la carrera en Ingeniería Civil, Universidade Federal de Santa Maria. 78p.
- Wendler, A., Monge, R. (2018), “*Paredes de concreto – como ter uma obra sem manifestações patológicas*”. Concreto e Construções, São Paulo, Ano XLVI, Ed. 90, p. 38-41, abr./jun. 2018. ISSN: 1809-7197. Disponible en: [http://ibracon.org.br/Site\\_revista/Concreto\\_Construcoes/ebook/edicao90/files/assets/basic-html/page38.html](http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/ebook/edicao90/files/assets/basic-html/page38.html). Acceso en: 20 jul. 2022.