

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

L. B. Vargas¹ , A. Lübeck² , A. B. S. Santos Neto^{2*} 

* Autor de Contato: almir.neto@ufsm.br

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

Recebido: 21/02/2022 | Correções recebidas: 25/10/2022 | Aceito: 25/10/2022 | Publicado: 01/01/2023

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 6118:2014. 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.

Citar como: Vargas, L. B., Lübeck, A., Santos Neto, A. B. S. (Ano), "Avaliação dos efeitos das ações térmicas e de retração do concreto sobre uma edificação em paredes de concreto moldadas *in Loco*", Revista ALCONPAT, 13 (1), pp. 112 – 130, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i1.591>

^{1,2} Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – Universidade Federal de Santa Maria – RS, Brasil

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor Vargas, L. B. contribuiu com o desenvolvimento do modelo numérico (100%), coleta de resultados e redação original do manuscrito (100%). O autor Lübeck, A. contribuiu com a ideia original (50%), revisão da redação e melhorias na discussão das análises numéricas, resultados e conclusões (50%). O autor Santos Neto, A. B. S. contribuiu com a ideia original (50%), revisão da redação e melhorias na discussão das análises numéricas, resultados e conclusões (50%).

Licença Creative Commons

Copyright (2021) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 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.

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

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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Caracterizado pela alta produtividade, racionalidade e economia, o sistema construtivo em paredes de concreto moldadas *in loco* vem sendo amplamente empregado no mercado brasileiro. Além de possibilitar um maior controle de qualidade tecnológico, esse processo construtivo também permite reduzir consideravelmente os desperdícios em obra, tornando-se, assim, um exemplo de industrialização na Construção Civil (Braguim, 2013).

O sistema de paredes de concreto é definido pela NBR 16055 (ABNT, 2012), como um elemento estrutural autoportante, moldado no local, com comprimento maior que dez vezes sua espessura e capaz de suportar carregamentos no mesmo plano da parede. Todas as paredes de cada ciclo construtivo de uma edificação são moldadas em uma única etapa de concretagem tendo as lajes em concreto armado também interagindo com as paredes, fazendo com que o sistema estrutural seja monolítico.

Quanto as armaduras, é recomendado que o projeto estrutural seja concebido considerando a utilização de telas soldadas para o processo de armação das paredes de concreto, com objetivo de aumentar a produtividade e racionalização no canteiro de obras. Ainda, armações em vergalhões devem ser utilizadas principalmente para reforço de regiões específicas, tais como entorno de aberturas, bordas livres, periferia de furos, vergas, ou regiões onde a tensão de tração seja alta e localizada.

Uma das grandes preocupações para o sistema em paredes de concreto é a formação de fissuras (Wendler e Monge, 2018). Esse tipo de patologia além de transmitir insegurança aos usuários, reduz a durabilidade da estrutura, tornando-a suscetível a entrada de agentes agressivos que danificam o concreto e provocam a corrosão das armaduras (Nakamura e Pinto, 2017).

A fim de identificar as regiões onde a fissuração ocorre com maior frequência nesse sistema construtivo, alguns acompanhamentos foram realizados (Resende et.al., 2018; Lima et.al., 2020; Netto et.al., 2021; Padilha et.al., 2021) e mostraram que as principais regiões suscetíveis a formação de fissuras são os cantos de portas e janelas, cantos de paredes, grandes panos de paredes, principalmente no pavimento junto a fundação e paredes e lajes do pavimento de cobertura.

Thomaz e Carneiro (2013) explicam que os principais motivos para o surgimento dessas fissuras nas edificações em paredes de concreto são devido aos efeitos de variações de temperatura e a retração do concreto.

Quando livres de restrições, essas ações provocam o movimento de expansão ou contração da peça de concreto, porém, quando impedidos, acarretam o desenvolvimento de tensões de tração que podem superar a resistência à tração do concreto e, conseqüentemente, provocar a formação de fissuras na peça (Micallef et.al., 2017).

A temperatura ambiente, a radiação solar e os raios infravermelhos são os fatores ambientais que mais influenciam no comportamento da temperatura. De modo que a temperatura ambiente é a principal responsável pela variação de temperatura de toda a estrutura, e representada pela componente de variação uniforme de temperatura (ΔT_u). A radiação solar e os raios infravermelhos, por outro lado, são os principais fatores que geram as variações gradientes de temperatura (ΔT_M), resultantes da exposição solar de parte da edificação por períodos relativamente curtos, aquecendo a face exterior enquanto a interior permanece em temperatura menor (Larsson, 2009).

O efeito da variação uniforme de temperatura (ΔT_u) resulta em uma expansão ou contração axial da peça em caso de aquecimento e resfriamento, respectivamente, e o efeito da variação gradiente linear de temperatura (ΔT_M) induz o movimento de curvatura. Apenas quando essas movimentações são restringidas é que as tensões térmicas se desenvolvem (O'Brien et.al., 2015).

O processo de retração, por sua vez, está associado a uma redução volumétrica na estrutura da pasta de cimento, a qual é desencadeada pela perda da água por evaporação logo nas primeiras idades do concreto enquanto este ainda está em sua fase plástica e continua ocorrendo durante seu estado

endurecido (Rodrigues e Bauer, 2010). Esse processo pode ser dividido em diversos tipos, sendo eles retração por carbonatação, plástica, térmica, química, autógena e por secagem (Markovski et al., 2012). A parcela denominada retração por secagem tende a ser um processo agressivo, desenvolvendo fissuras de grande abertura que atravessam toda a espessura da peça, afetando principalmente peças com grande superfície de exposição (Recena, 2014).

A deformação específica de retração por secagem pode ser considerada de forma similar ao efeito da variação uniforme de temperatura. Quando a peça está sob influência da retração e sofre restrição ao movimento de encurtamento, são desenvolvidas tensões de tração no elemento estrutural. Com isso é possível obter um valor de variação de temperatura (ΔT) correspondente à deformação específica de retração ($\varepsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$), em função do coeficiente de dilatação térmica do concreto (α), (Laranjeiras, 2017).

Para a avaliação da fissuração nas peças de concreto, a NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece que o Estado-Limite de Formação de Fissuras (ELS-F) é o estado em que se inicia a formação de fissuras, ou seja, quando as tensões de tração atuantes superam a resistência à tração do concreto.

Desse modo, o presente trabalho apresenta uma análise das tensões principais de tração atuantes em quatro paredes e na laje de cobertura de uma edificação em paredes de concreto moldada *in loco* quando da atuação dos diferentes carregamentos térmicos, ação de retração por secagem e dos carregamentos permanentes e variáveis, identificando regiões que apresentem tensões de tração superiores a resistência à tração do concreto que provoquem a formação de fissuras na peça.

2. METODOLOGIA

2.1 Edificação Analisada

A edificação avaliada é de uso residencial, multifamiliar, de três pavimentos tipo, com área total por pavimento de 210,06 m² e dimensões em planta de 18,42 m x 13,82 m. Os pavimentos tipo (ver Figura 1) são constituídos de quatro apartamentos, distribuídos simetricamente. A distância de entrepisos é de 2,70 m e a altura total é de 8,10 m. A estrutura do edifício é constituída de paredes de concreto armado moldadas *in loco* com espessura de 120 mm e lajes maciças de concreto armado com espessura de 100 mm. Ainda na Figura 1 são apresentadas as 4 paredes analisadas, onde as paredes 1 e 4 são externas a edificação, estando sob influência da insolação direta (carregamento térmico gradiente linear), e as paredes 2 e 3 internas à edificação. Apenas a parede 2 apresenta um trecho exposto a insolação direta. Todas as paredes apresentam aberturas de esquadrias, como indicado na Figura 1.

A edificação teve suas principais características geométricas preservadas. Contudo, para simplificar a modelagem numérica foi necessário adaptar a geometria para medidas múltiplas de 200 mm. Desse modo, a estrutura foi modelada sem que houvesse alterações maiores que 300 mm entre o modelo numérico e a arquitetura, permitindo, portanto, a validade dos resultados obtidos.

2.2 Discretização do Modelo Estrutural

Para a modelagem e análise da estrutura foi utilizado o programa computacional SAP2000 V18, o qual permitiu a modelagem dos três pavimentos da edificação via método dos elementos finitos (MEF), sendo possível gerar o comportamento completo da estrutura dado pela interação entre todos os elementos (paredes e lajes) em uma análise elástico linear. O programa SAP 2000 foi utilizado no trabalho pois permite analisar os efeitos térmicos e retração do concreto.

Foram utilizados elementos quadriláteros de casca fina (*shell-thin*) e a malha adotada para todos os elementos estruturais possui lados de dimensão de 200 x 200 mm, permitindo assim uma perfeita conexão entre os nós gerados pela malha nos encontros de parede-parede, parede-laje e aberturas de portas e janelas. A espessura adotada para os elementos da malha seguiu a própria espessura dos elementos estruturais, sendo 120 mm para as paredes e 100 mm para as lajes. A Figura 2 apresenta

uma vista tridimensional do modelo da edificação, sendo gerados neste modelo 49.169 elementos de casca.

Em relação às condições de contorno, em todos os nós localizados na base da edificação, foram consideradas somente restrições de translação, impedindo, portanto, os deslocamentos em todas as direções. Nesta etapa da análise não se levou em consideração os efeitos da interação solo-estrutura (ISE), visto que a adoção de apoios indeslocáveis desenvolve tensões mais elevadas na base da edificação, sendo este o caso mais crítico de análise para as paredes ligadas diretamente à fundação.

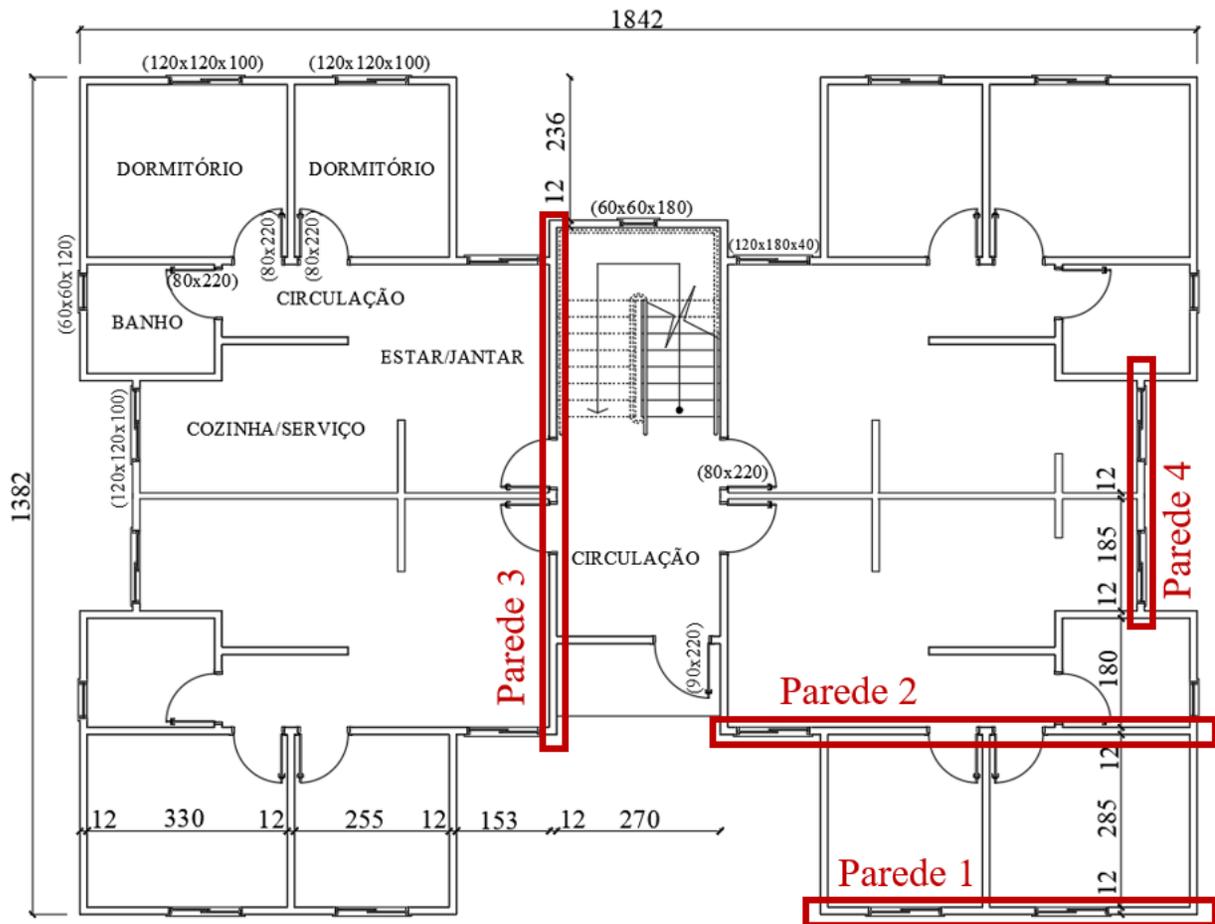


Figura 1. Planta baixa da arquitetura (dimensões em centímetros).

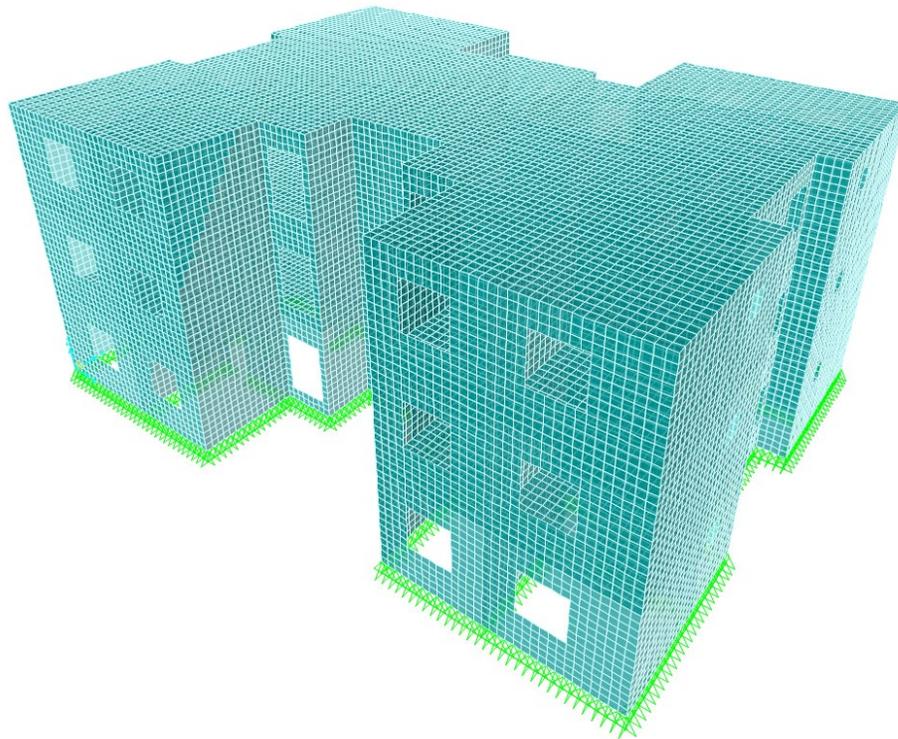


Figura 2. Discretização tridimensional do modelo no programa SAP2000.

2.3 Variação Térmica e Retração do Concreto

Foram consideradas as cargas térmicas referentes a temperatura ambiente (variação uniforme) e a incidência solar na edificação (gradiente). Devido à variação de temperatura entre os períodos de inverno e verão, foram considerados os casos de temperatura ambiente para as duas estações do ano, onde foi adotado um valor negativo para épocas de inverno e positivo para os períodos de verão.

A temperatura ambiente foi aplicada de maneira uniforme em todos os elementos da edificação, considerando de maneira hipotética que toda a estrutura foi executada em um mesmo período, com uma temperatura média única em todos os elementos. Deste modo, as temperaturas ambientes de verão-inverno foram aplicadas de maneira equivalente, mudando apenas o sinal, com valor positivo para aumento de temperatura e valor negativo para o resfriamento.

A incidência dos raios solares produz uma variação de temperatura no elemento estrutural onde a face exposta ao sol apresenta uma temperatura mais elevada do que a face não exposta, resultando em um gradiente térmico ao longo da espessura da peça. Essa variação de temperatura foi considerada como uma carga térmica gradiente linear na estrutura, sendo adotado que a variação térmica entre faces se dá de forma linear ao longo da espessura do elemento.

Como os raios solares atingem a edificação de forma desigual, realizou-se um estudo para verificar uma situação real de incidência solar. Com o auxílio do *software* SOL-AR foi analisado o período de insolação de todas as paredes externas, sendo possível concluir que as paredes das faces Nordeste e Noroeste, destacadas em vermelho na Figura 3, apresentam o mesmo período de insolação e, portanto, serão submetidas a carga térmica gradiente linear.

Considerando que as lajes de cobertura estão sob incidência solar durante todo o período de exposição, foi aplicado também o carregamento térmico gradiente linear em toda a cobertura da edificação.

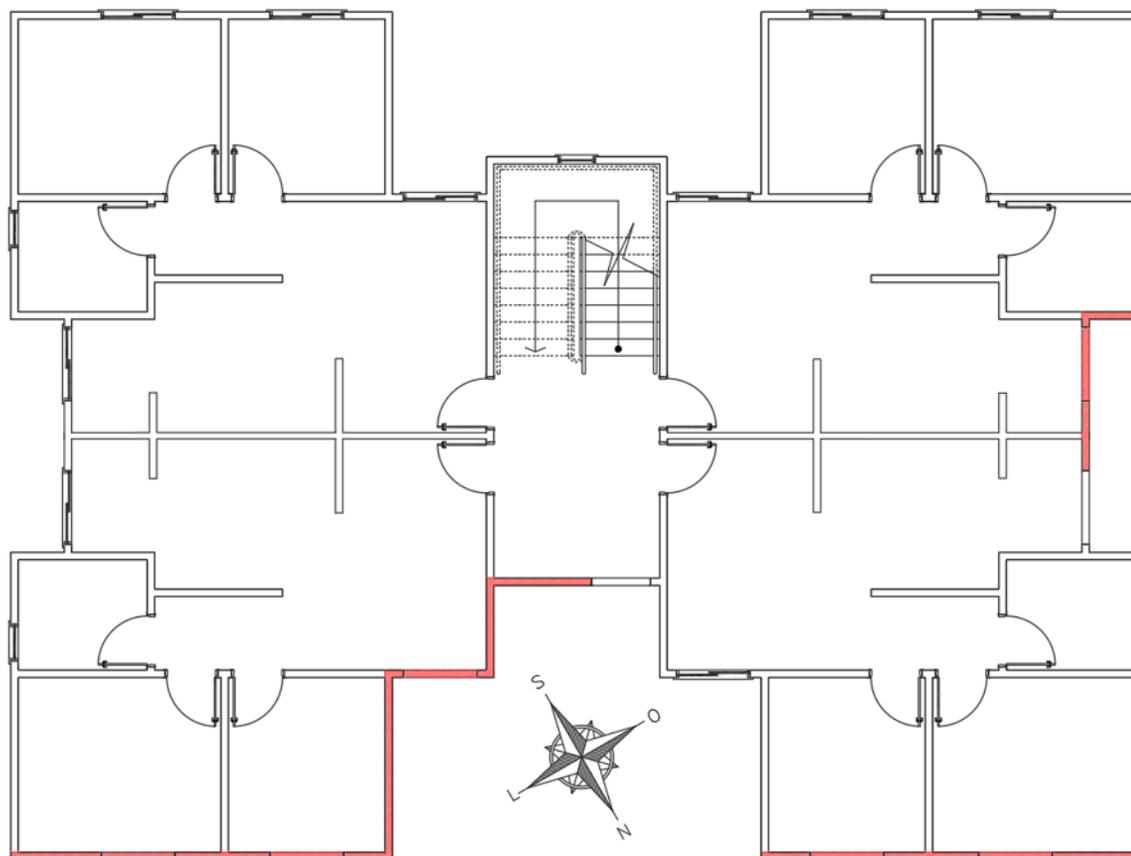


Figura 3. Incidência solar nas paredes externas da edificação.

O efeito da retração por secagem foi considerado a partir do coeficiente de dilatação térmica do concreto, onde foi obtido uma variação de temperatura equivalente à deformação específica de retração. A retração foi considerada, portanto, como uma carga térmica constante ao longo da espessura da peça de concreto e com valor negativo (efeito de encurtamento), atuando em todas as paredes e lajes da edificação.

2.4 Propriedades dos Materiais

Considerando as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014) foram adotadas para o concreto resistência característica à compressão, f_{ck} , igual a 30 MPa, peso específico de 25 kN/m³, módulo de elasticidade secante de 27 GPa, coeficiente de Poisson de 0,20, coeficiente de dilatação térmica de $1,0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e módulo de elasticidade transversal de 12,92 GPa.

2.5 Carregamentos e Combinações de Ações

Os carregamentos permanentes e variáveis foram considerados conforme as prescrições da NBR 6120 (ABNT, 2019). Nos pavimentos tipo foram considerados um carregamento permanente nas lajes de 1,0 kN/m² decorrente do carregamento de contrapiso e piso e um carregamento de 0,25 kN/m² proveniente do forro de gesso acartonado.

A carga variável nas lajes, decorrente do uso da edificação, foi estabelecido em conformidade com a categoria de ocupação do ambiente. Desta maneira, foi adotado 3,0 kN/m² para áreas de uso comum, corredores e escada. Para a área de serviço e lavanderia foi utilizado 2,0 kN/m² e para os ambientes restantes 1,5 kN/m².

Para a laje de cobertura, foram definidos os mesmos carregamentos permanentes dos pavimentos tipo, contudo, o carregamento variável utilizado é referente a cobertura com acesso apenas para manutenção, de $1,0 \text{ kN/m}^2$.

Não foi considerada a ação do vento na análise visto que esse carregamento afeta diretamente as tensões das paredes junto a fundação, distorcendo esses valores para mais ou para menos, a depender da direção do vento aplicada. Pelo fato do objetivo do presente trabalho ser de analisar os efeitos das variações térmicas e retração, optou-se por não considerar as cargas de vento.

Para a temperatura ambiente foram considerados os valores propostos por Laranjeiras (2017), onde independente das dimensões das peças é recomendável utilizar cargas térmicas com temperaturas uniformes de $+15 \text{ }^\circ\text{C}$ e $-15 \text{ }^\circ\text{C}$, referentes aos períodos de verão e inverno, respectivamente. Por outro lado, para a carga térmica gradiente linear foi considerada uma variação de temperatura de $15 \text{ }^\circ\text{C}$, de modo que ao somar seus efeitos com a temperatura uniforme de aquecimento, as paredes sob incidência solar apresentam uma temperatura na face interna de $+15 \text{ }^\circ\text{C}$ e na face externa, exposta ao sol, de $+30 \text{ }^\circ\text{C}$.

A retração por secagem foi considerada como uma variação de temperatura uniforme equivalente. Assim, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), para uma umidade média ambiente de 75% compatível com o estado do Rio Grande do Sul, espessura fictícia das peças de 200 mm e concreto com idade de 60 dias, a deformação específica de retração é de $-0,30 \text{ }^\circ\text{C}$, o qual corresponde a temperatura uniforme de $-30 \text{ }^\circ\text{C}$.

O efeito da retração por secagem do concreto foi considerado como uma ação permanente indireta. As variações de temperatura foram consideradas ações variáveis indiretas.

Para a análise do Estado Limite de formação de fissuras (ELS-F) nas paredes e laje de cobertura, a NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece que podem ser utilizadas para esse fim as combinações Frequente de Serviço (CF) e a Rara de Serviço (CR). Uma vez que as cargas térmicas devem ser tomadas apenas como ações variáveis secundárias e o coeficiente de minoração ψ_1 recomendado para as combinações raras de serviço tem valor 0,50, maior que o coeficiente de minoração ψ_2 de valor 0,30, utilizado para as combinações frequentes de serviço, optou-se por utilizar no presente estudo apenas combinações raras de serviço, a fim de identificar as maiores tensões de tração desenvolvidas pelas ações térmicas.

Foram propostas pelos autores seis Combinações Raras de Serviço (ver Tabela 1), onde as quatro primeiras contemplam o peso próprio, ações permanentes, variáveis, variações de temperatura e ação de retração, sendo que a ação de retração foi considerada em todas as combinações.

Embora não seja indicada em norma, a CR 5 foi elaborada a fim de mensurar os efeitos das variações térmicas como ações variáveis principais quando as ações variáveis usuais são tomadas como secundárias.

A CR 6 apresenta apenas os carregamentos usuais gravitacionais, permanentes e acidentais (cargas de uso), permitindo identificar o comportamento da estrutura quando não submetida aos carregamentos de retração e temperatura. Em Vargas (2021) também são apresentados resultados onde apenas o peso próprio e as ações térmicas e retração foram consideradas a fim de analisar um período de vida da edificação onde ela ainda está em fase de construção e já está sujeita as ações térmicas e retração por secagem.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) a resistência à tração do concreto é dada pelo valor de $f_{ctk,inf}$ e para um concreto de classe C30, tem-se $2,02 \text{ MPa}$. Desta maneira as paredes de concreto e a laje de cobertura serão verificadas quanto às tensões principais de tração obtidos através das combinações de ações, sendo considerado como valor limite de início da fissuração a resistência à tração de concreto ($f_{ctk,inf}$).

Tabela 1. Combinações de ações.

Nº da Combinação	Combinação de Ações (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	$1,0*PP+1,0*G+1,0*Q$

Sendo: PP (Peso próprio), G (Permanente), Q (Variável), AU (Aquecimento uniforme), RU (Resfriamento uniforme), AGL (Aquecimento gradiente linear), RET (Retração do concreto).

3. DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

São apresentados e discutidos os resultados obtidos da análise numérica, sendo esta realizada com foco nas tensões principais de tração para quatro paredes indicadas na Figura 1 e para a laje de cobertura da edificação. A tensões de tração foi limitada ao valor de 2,02 MPa, referente a resistência à tração do concreto C30 definida na NBR 6118 (ABNT, 2014). Nas imagens, as regiões em azul escuro são referentes a tensões maiores que esse limite.

Na Figura 4 mostram-se as tensões principais obtidas da análise no programa SAP2000 V18 referente a combinação CR1 para as Paredes 1 e 2. No primeiro pavimento, junto a base das paredes, pode-se observar que as tensões principais de tração ultrapassam o valor de resistência à tração do concreto de 2,02 MPa, os quais atingem níveis da ordem de 8,6 MPa e 6,0 MPa para as paredes 1 e 2, respectivamente.

Esse comportamento de tensões é induzido pelos elementos de fundações, que restringirem o movimento de encurtamento do concreto causado pela retração por secagem, gerando tensões de tração mais elevadas junto a base da estrutura, se comparado com os pavimentos superiores. Desse modo, quando verificado o ELS-F é perceptível que nessas regiões tende a ocorrer a formação de fissuras e, conseqüentemente, demanda-se maiores taxas de aço.

Estudos realizados Mikalleg e.al. (2017) e Gottsäter et.al. (2019) também observaram esse comportamento das paredes sob efeito da retração por secagem com fissuração junto a base, quando restringidas por elementos de fundação, indicando que para reduzir tais fissuras são necessárias maiores taxas de armaduras.

É possível ainda perceber que junto as aberturas de portas e janelas surgem concentrações de tensões de tração que ultrapassam o valor limite de resistência estabelecido, atingindo níveis da ordem de 6,9 MPa e 6,0 MPa para as Paredes 1 e 2, respectivamente. Como prescrito pela NBR 16055 (ABNT, 2012) devem ser previstas armaduras de reforços no entorno de aberturas para combater esses efeitos.

É mostrado por Padilha et.al. (2021) e Lima et.al. (2020) que a não utilização ou disposição errônea dessas armaduras complementares pode ocasionar na formação de fissuras caracterizadas pela sua posição, partindo do canto das aberturas, padrão este evidenciado na Figura 4.

Outro fator que apresenta influência no nível de tensões é o encontro com paredes perpendiculares. Esses cruzamentos provocam a restrição do livre movimento do concreto, assim como os elementos de fundação e, com isso, elevam os níveis de tensões de tração. Na Parede 1 é possível observar esse efeito entre as duas aberturas de janelas, trecho em que ocorre o encontro com uma parede interna. Já para a Parede 2 os níveis de tensões são acentuados próximo a abertura de janela, entre aberturas de portas e na extremidade direita da parede. Essas regiões de cruzamentos de paredes, principalmente aquelas próximas às aberturas, devem ter armações reforçadas a fim de evitar fissurações.

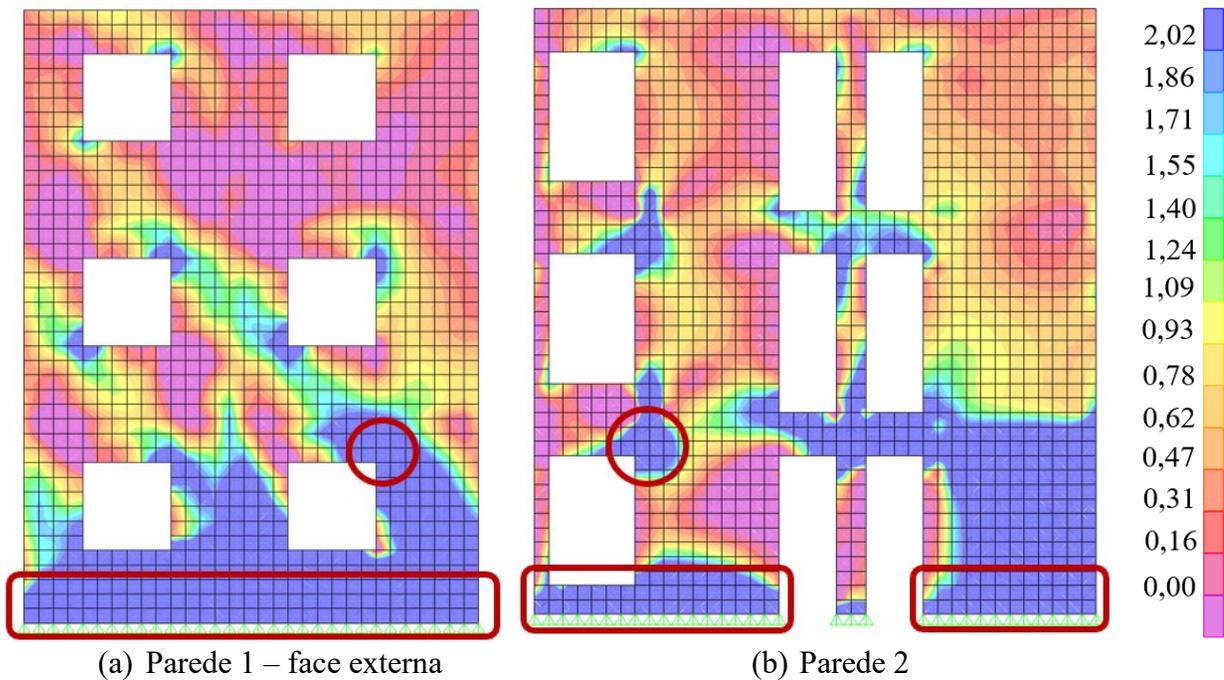


Figura 4. Distribuição de tensões principais referentes a CR1 em MPa para as Paredes 1 e 2.

Os resultados referentes a CR2 apresentam-se muito semelhantes aos desenvolvidos pela combinação CR1. Na Figura 5 pode ser percebido que as tensões principais de tração possuem o mesmo padrão de comportamento já visto, porém com um aumento nos níveis de tensões, da ordem de 10,8 MPa e 8,0 MPa para a base das paredes. Para as tensões próximas as aberturas de portas e janelas, os maiores valores identificados foram de 8,6 MPa e 8,0 MPa, para as paredes 1 e 2, respectivamente. O aumento nos níveis das tensões principais de tração se dá pela ação térmica de resfriamento uniforme atuar de forma similar a retração por secagem no modelo numérico, provocando o encurtamento da peça.

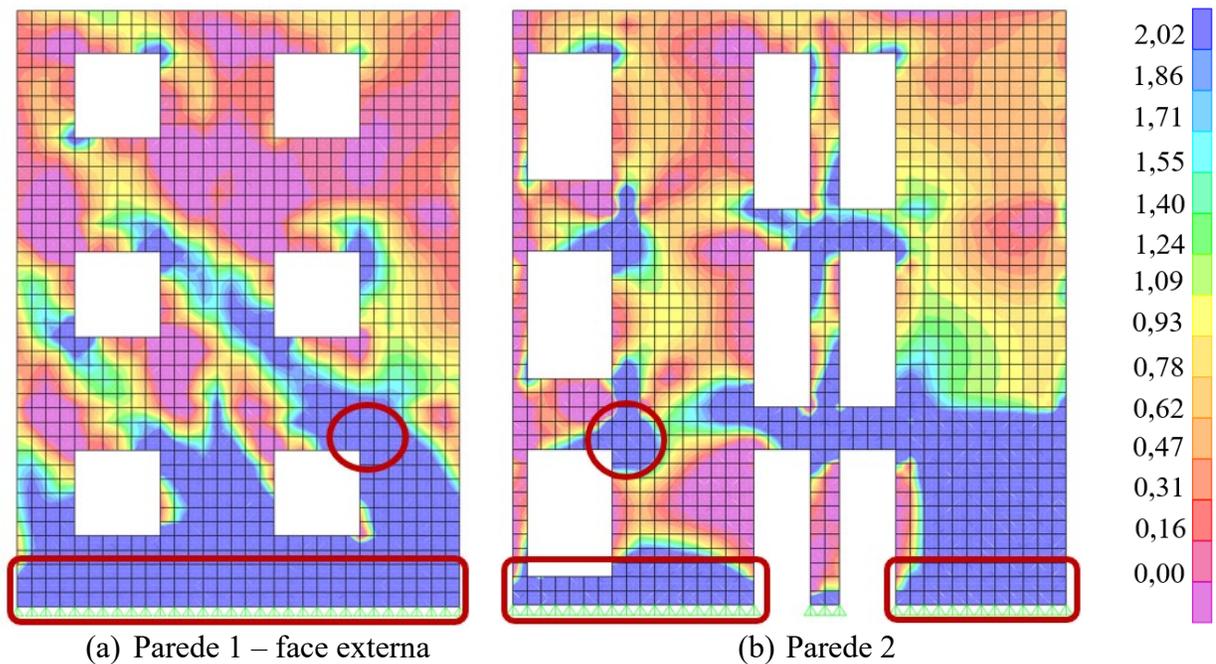


Figura 5. Distribuição de tensões principais referentes a CR2 em MPa para as Paredes 1 e 2.

As tensões provocadas pela CR3 são apresentadas na Figura 6 onde é possível identificar reduções nas regiões de maiores concentrações de tensões de tração. Sendo as maiores tensões principais de tração encontradas para a Parede 1, da ordem de 6,4 MPa e 5,2 MPa e para a Parede 2, de 5,0 MPa e 6,0 MPa para a base da edificação e próximo a abertura de janelas, respectivamente. Esse comportamento é dado pela ação térmica de aquecimento uniforme atuar de modo contrário à retração por secagem, induzindo o concreto a um movimento de expansão. Embora inferiores aos resultados das combinações CR1 e CR2, essas tensões principais de tração se mantêm acima do limite de resistência à tração do concreto de 2,02 MPa e necessitam de armações complementares para combater a formação de fissuras.

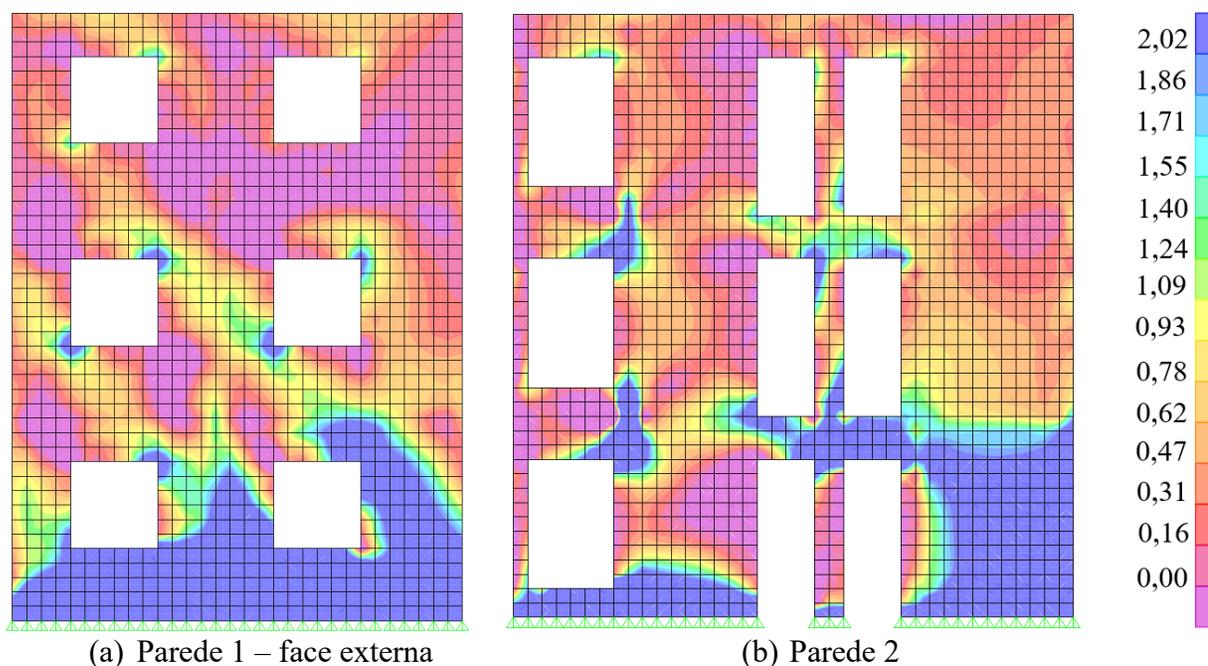


Figura 6. Distribuição de tensões principais referentes a CR3 em MPa para as Paredes 1 e 2.

Os resultados para a combinação CR4 apresentados na Figura 7, indicam um acréscimo generalizado nas regiões tracionadas para ambas as paredes. A Parede 1 que recebe a carga térmica gradiente linear apresenta novas regiões com tensões principais de tração superiores a 2,02 MPa, sendo elas situadas no cruzamento de uma parede no terceiro pavimento, com níveis de 2,1 MPa e nos encontros com as lajes do piso e cobertura do terceiro pavimento, com tensões de 2,1 MPa e 2,2 MPa, respectivamente. Mostrando assim que esses locais devem receber armações adequadas para combater a formação de fissuras.

O acréscimo nas tensões principais de tração no terceiro pavimento é explicado por Laranjeiras (2017) e El-Tayeb et.al. (2019), dado que quando os elementos horizontais estão sujeitos às ações térmicas de aquecimento, há o movimento de expansão da peça que, conseqüentemente, provoca acréscimos de esforços nos elementos verticais. Esse efeito também pode ser visto na Parede 2, onde embora nenhuma nova região com formação de fissuras foi identificada, há um aumento de tensões de tração no terceiro pavimento.

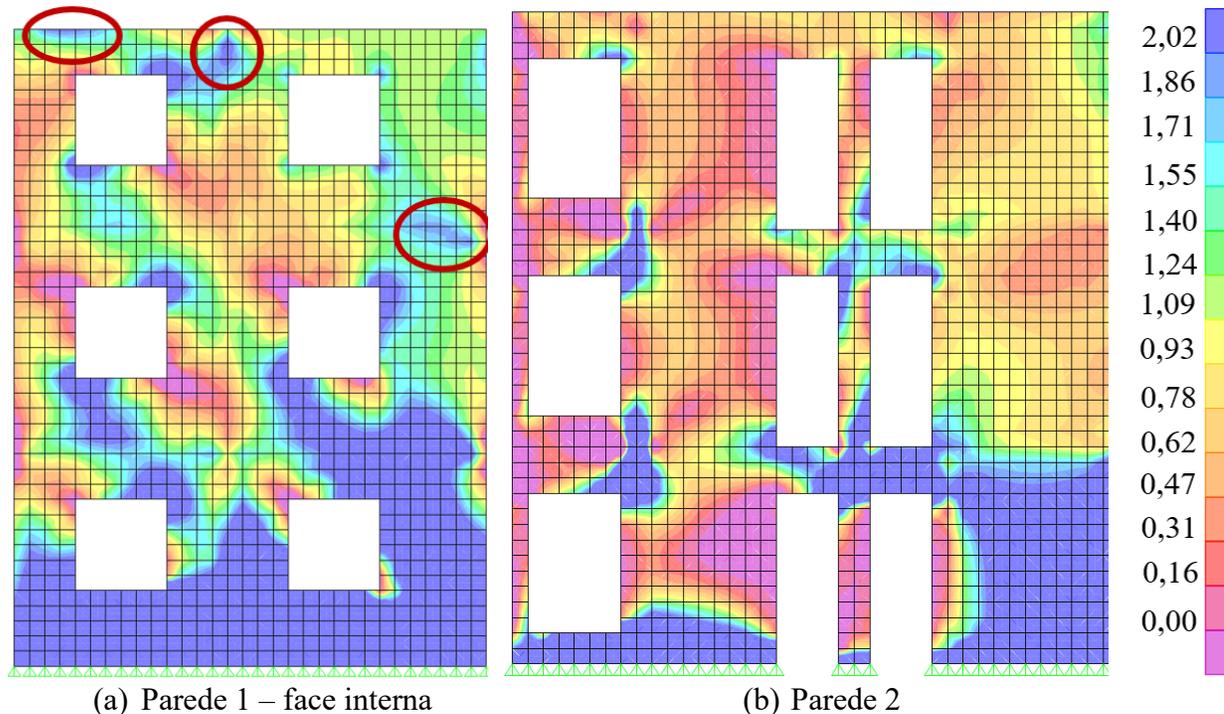


Figura 7. Distribuição de tensões principais referentes a CR4 em MPa para as Paredes 1 e 2.

Analisando agora a combinação CR5 (não prevista em norma), pode-se visualizar que ambas as paredes apresentam um comportamento muito semelhante àquele produzido pela CR4, com pequeno aumento na intensidade das tensões principais, como mostrado na Figura 8. Além disso é possível identificar na parede 2 uma nova região, próxima a laje de cobertura, com tensões acima de 2,02 MPa. Com isso, é possível perceber que os valores encontrados superam a resistência à tração do concreto indicando, portanto, que haverá fissuração da parede de concreto nessas regiões. Na Figura 9 é apresentado o comportamento das tensões para as paredes 1 e 2, quanto submetido ao carregamento da combinação CR6, onde se identificam algumas regiões próximas as aberturas e junto a laje de cobertura com tensões principais de tração não maiores que 0,93 MPa, valor inferior a resistência à tração do concreto. Além disso, as regiões junto aos elementos de fundação que antes apresentavam tensões de tração superiores a 2,02 MPa, agora possuem tensões principais de compressão em predominância. Portanto percebe-se que apenas utilizando carregamentos permanentes e acidentais usuais não é possível identificar as regiões nas faces das paredes que tendem a fissurar, sendo necessário considerar as ações térmicas e retração por secagem na verificação do ELS-F.

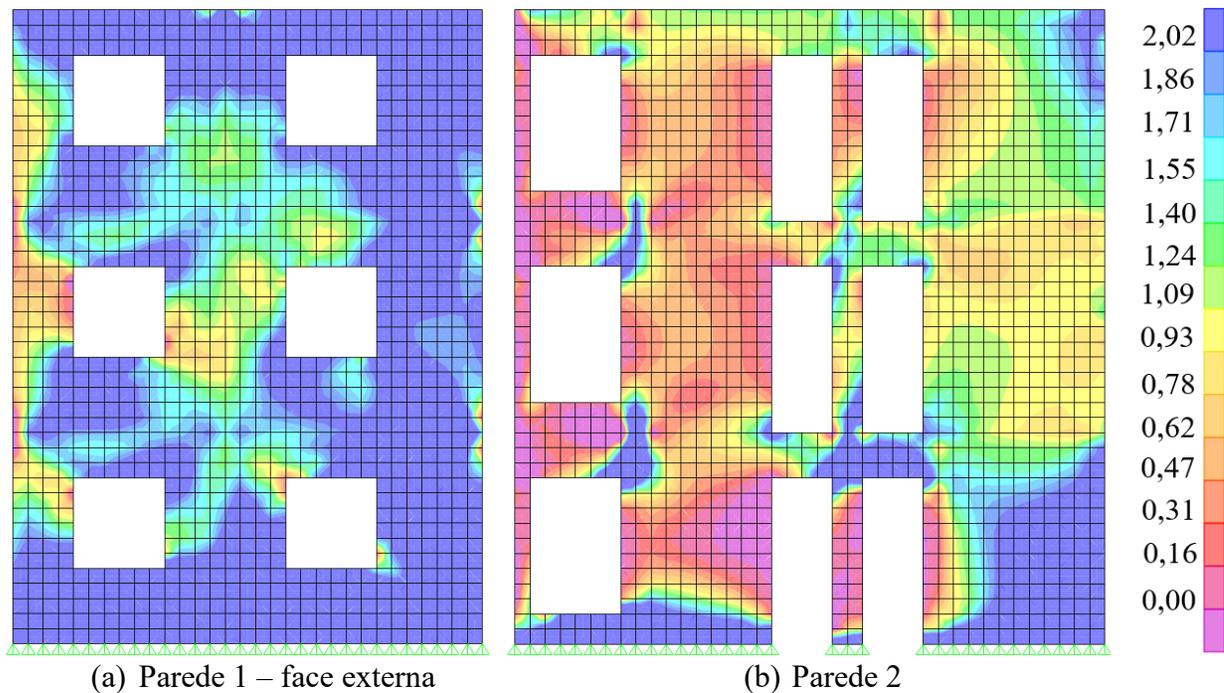


Figura 8. Distribuição de tensões principais referentes a CR5 em MPa para as Paredes 1 e 2.

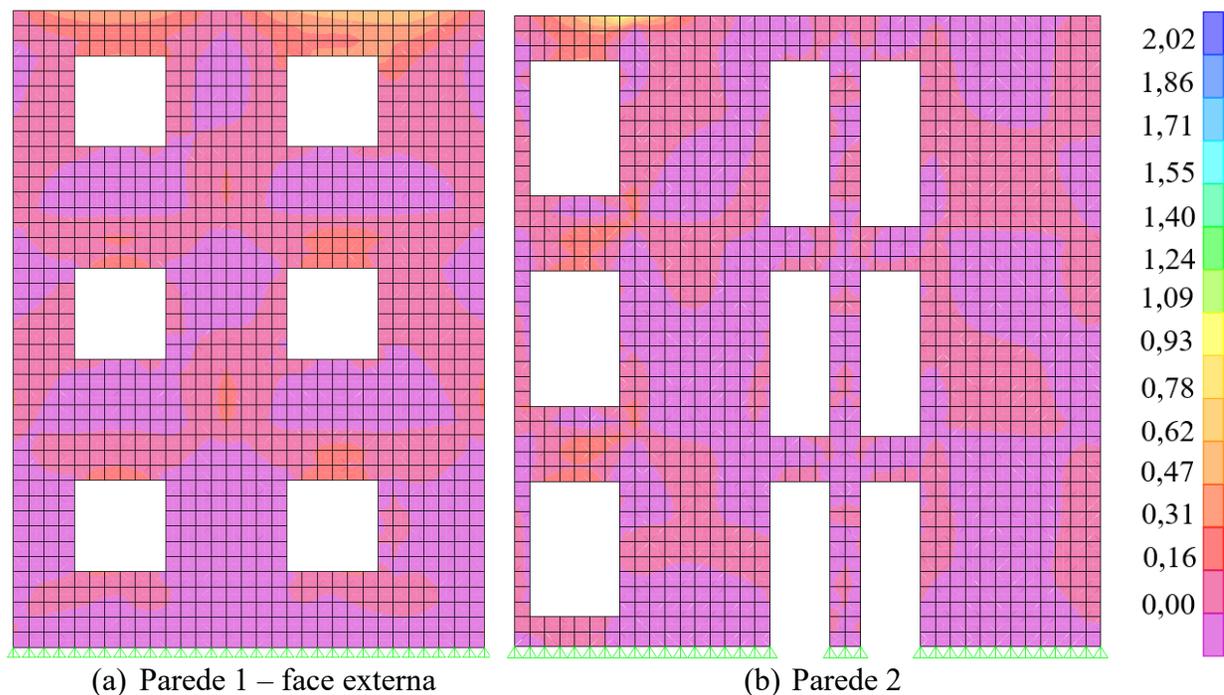


Figura 9. Distribuição de tensões principais referentes a CR6 em MPa para as Paredes 1 e 2.

Para a análise do ELS-F para as Paredes 3 e 4 quanto as combinações desenvolvidas nesse estudo, são apresentadas as Figuras 10 e 11 com o resumo dos níveis de tensões principais de tração para a base das paredes junto a fundação, cantos de aberturas, cruzamento com paredes e encontro com a laje de cobertura. Como pode ser visto, são identificadas tensões principais de tração superiores a resistência à tração do concreto para todas as combinações, com exceção daquela sem retração por secagem ou ações térmicas, mostrando que todas as paredes estão sujeitas a formação de fissuras

e devem ter armações apropriadas. Nestas figuras o limite de tensão de tração de 2,02 MPa é indicado pela linha horizontal.

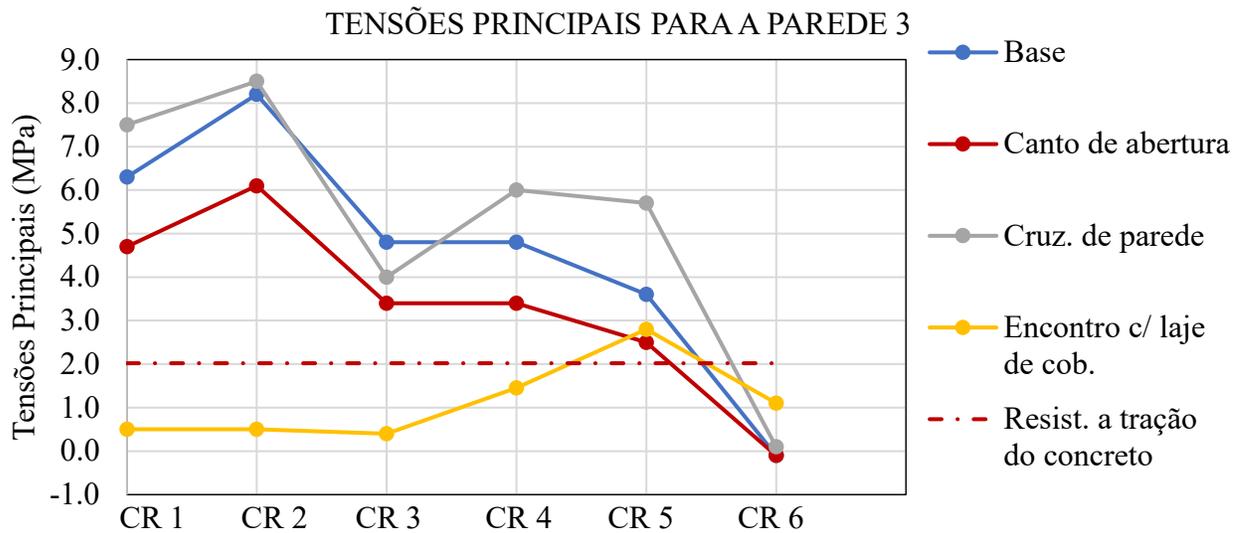


Figura 10. Resumo das tensões principais de tração, em MPa para a Parede 3.

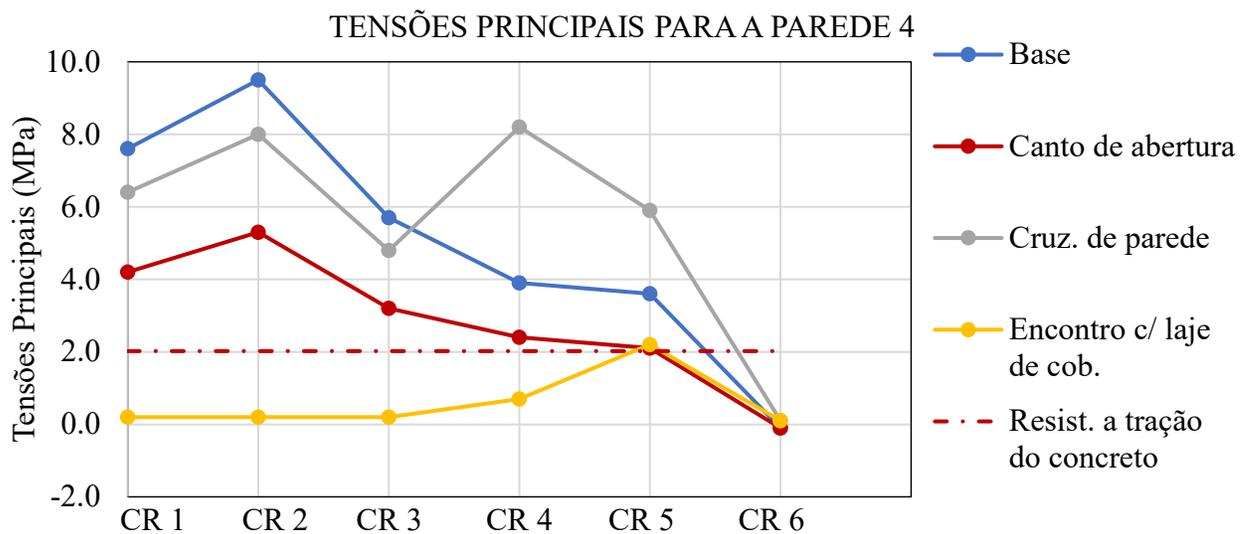


Figura 11. Resumo das tensões principais de tração, em MPa para a Parede 4.

3.2 Análise Laje Cobertura

Os resultados das combinações são apresentados para as faces superior e inferior da laje, porém devido a simetria bilateral da estrutura, apenas metade da laje será apresentada nas figuras.

Na Figura 12 pode ser visto que para a CR1, há o desenvolvimento de tensões principais de tração de aproximadamente 2,5 MPa, superiores ao limite estabelecido para a verificação do ELS-F, na região de estreitamento na geometria da laje de cobertura. Esse comportamento se dá tanto pela redução da área de laje na região central da edificação quanto pela existência da Parede 3 a qual restringe o movimento de encurtamento produzido pela retração por secagem, além do comportamento natural da estrutura de tracionar a face superior da laje em função do apoio dado pela parede.

Para combater a formação de fissuras dado pelo padrão de tensões de tração apresentado é preciso verificar as armaduras negativas definidas no dimensionamento e, caso sejam insuficientes para os novos níveis de tensões, deve-se redimensionar com taxas de aço compatíveis. Outro procedimento que pode ser adotado para evitar o desenvolvimento de elevadas tensões de tração, acima de 2,02 MPa, é a utilização de juntas de dilatação nas regiões de estreitamento, evitando a formação de fissuras na laje.

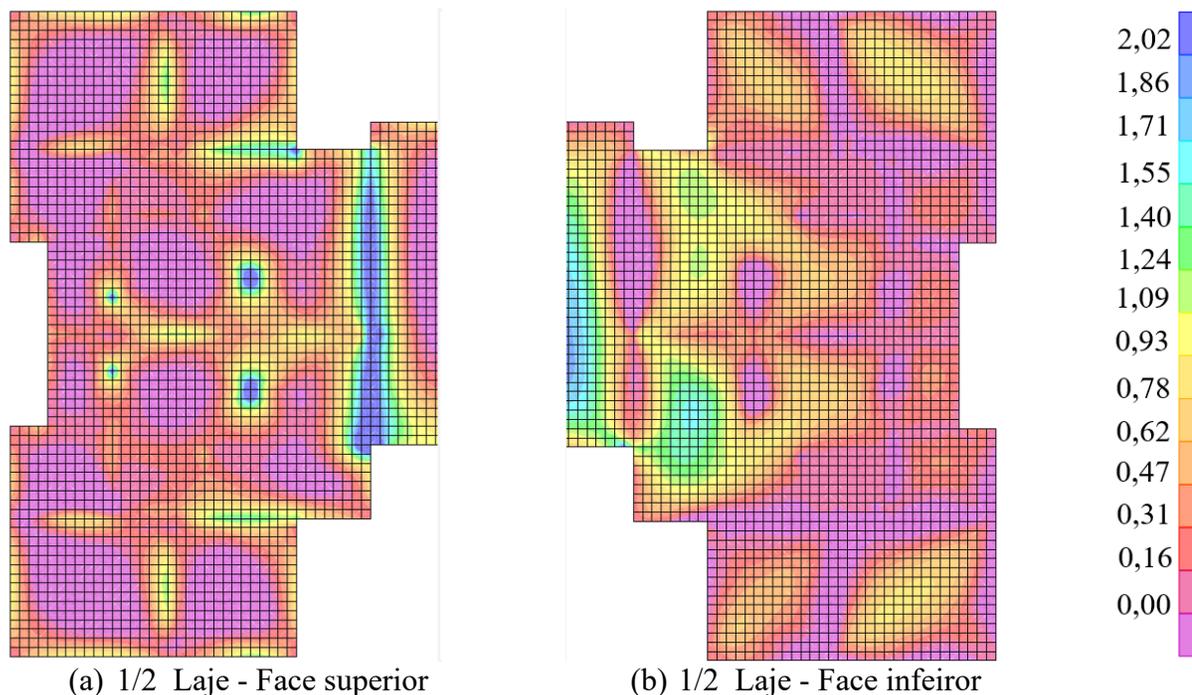


Figura 12. Distribuição de tensões principais referentes a CR1 em MPa para Laje de Cobertura.

Analisando o efeito do resfriamento uniforme (Figura 13), pode ser observado um aumento da região crítica para a formação de fissuras na face superior da laje, o qual atinge níveis de tensões de tração da ordem de 3,5 MPa. Para a CR2 também se verifica que a face inferior da laje apresenta tensões de aproximadamente 2,10 MPa, acima do limite estabelecido.

Conforme verificado para as paredes de concreto, a variação uniforme de temperatura, quando atua sem a insolação direta, provoca a redução das tensões principais de tração. Devido a este fato, a CR3 que conta apenas com essa carga térmica de aquecimento não será analisada.

Na Figura 14 são apresentados os resultados para a CR4, a qual considera a variação gradiente linear de temperatura (insolação direta na laje). Para esta combinação pode ser verificado que a face superior da laje possui em sua maioria, tensões de compressão enquanto há o aumento generalizado de tensões principais de tração na face inferior na laje, onde o painel central apresenta níveis de tensões de 2,10 MPa. Devido ao aumento no nível das tensões de tração na face inferior é preciso verificar a configuração de armaduras positivas adotadas e, caso necessário, redimensioná-las para evitar a fissuração da laje.

Os resultados para a combinação não normatizada (CR5) são apresentados na Figura 15, sendo identificado que a grande maioria dos painéis de lajes apresentam tensões acima do limite adotado para a formação de fissuras quando as cargas térmicas são tomadas como ações variáveis principais. Desse modo, o mesmo procedimento recomendado para a CR4 deve ser adotado para todos os demais painéis que apresentam tensões acima de 2,02 MPa.

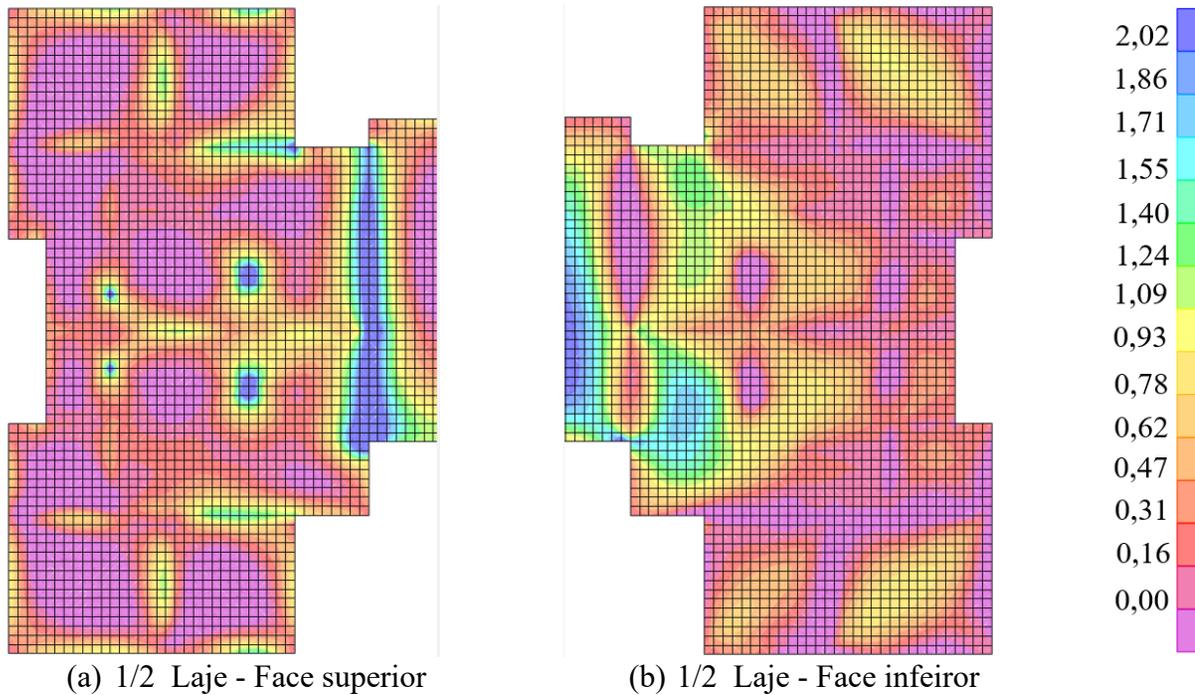


Figura 13. Distribuição de tensões principais referentes a CR2 em MPa para Laje de Cobertura.

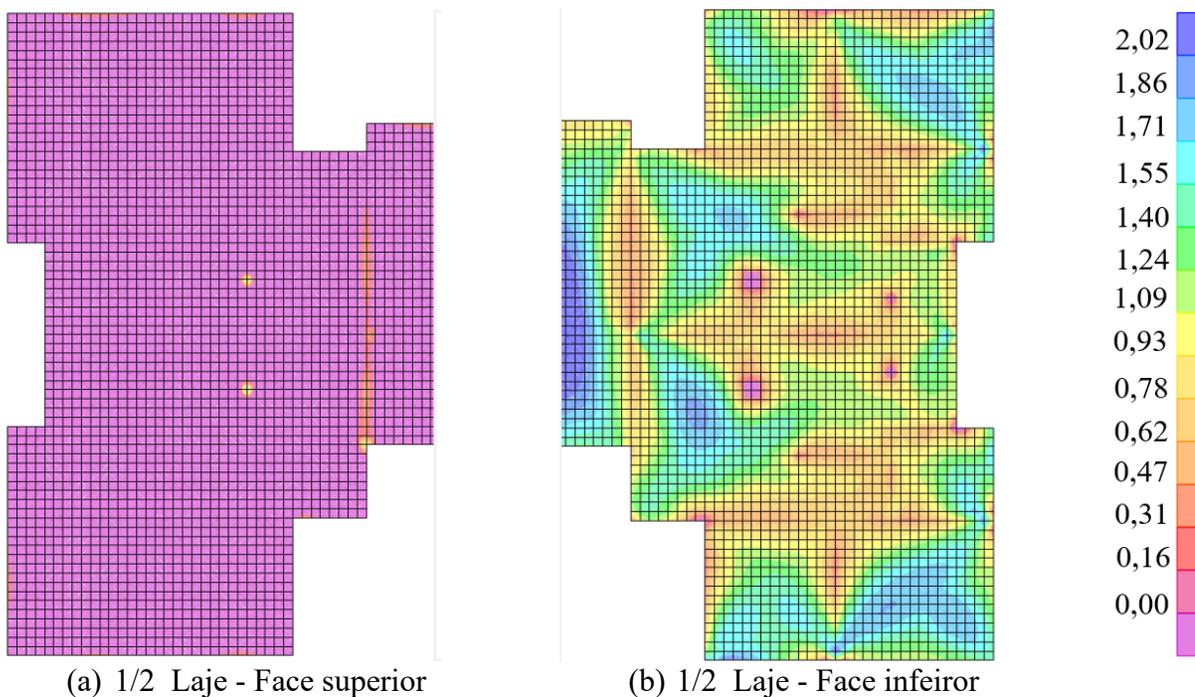


Figura 14. Distribuição de tensões principais referentes a CR4 em MPa para as Paredes 1 e 2.

Na Figura 16 pode ser visto o comportamento da laje de cobertura quando não submetida a ação de retração por secagem ou carregamentos térmicos. Para essa combinação (CR6) há o desenvolvimento de tensões principais de tração na face superior da laje no encontro com as paredes e na região central dos painéis de lajes na face inferior.

Embora ambas as faces da laje de cobertura apresentem tensões de tração, apenas com os carregamentos gravitacionais usuais não é possível identificar regiões em que a formação de fissuras possa ocorrer.

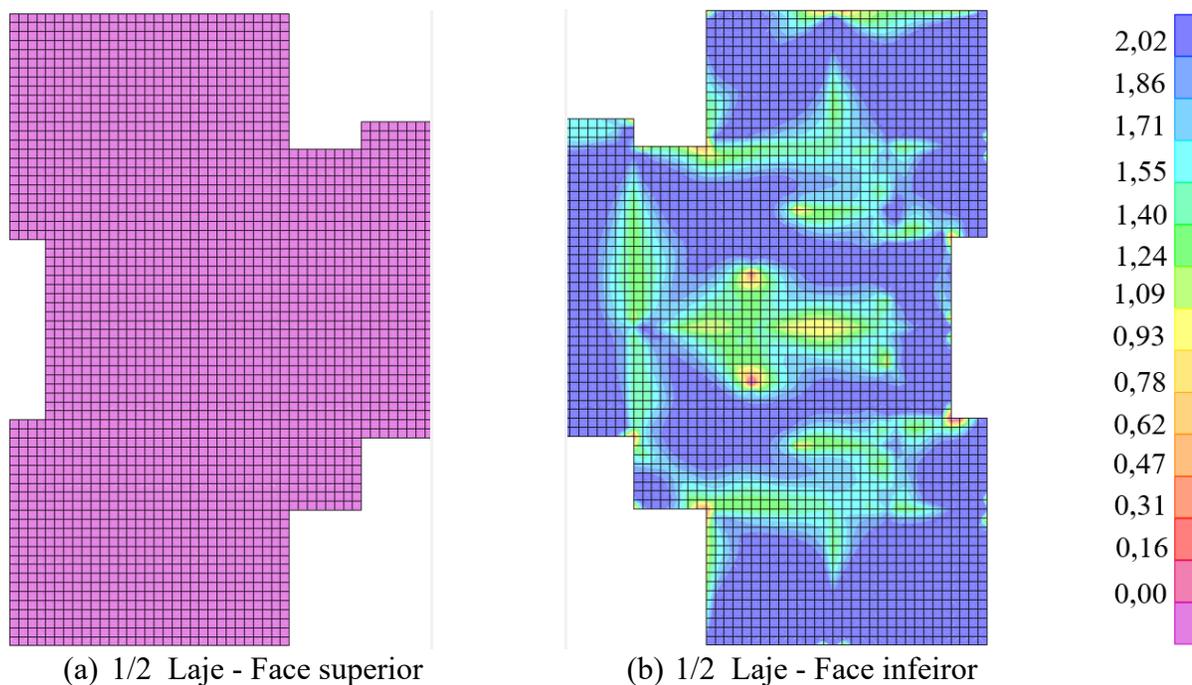


Figura 15. Distribuição de tensões principais referentes a CR5 em MPa para Laje de Cobertura.

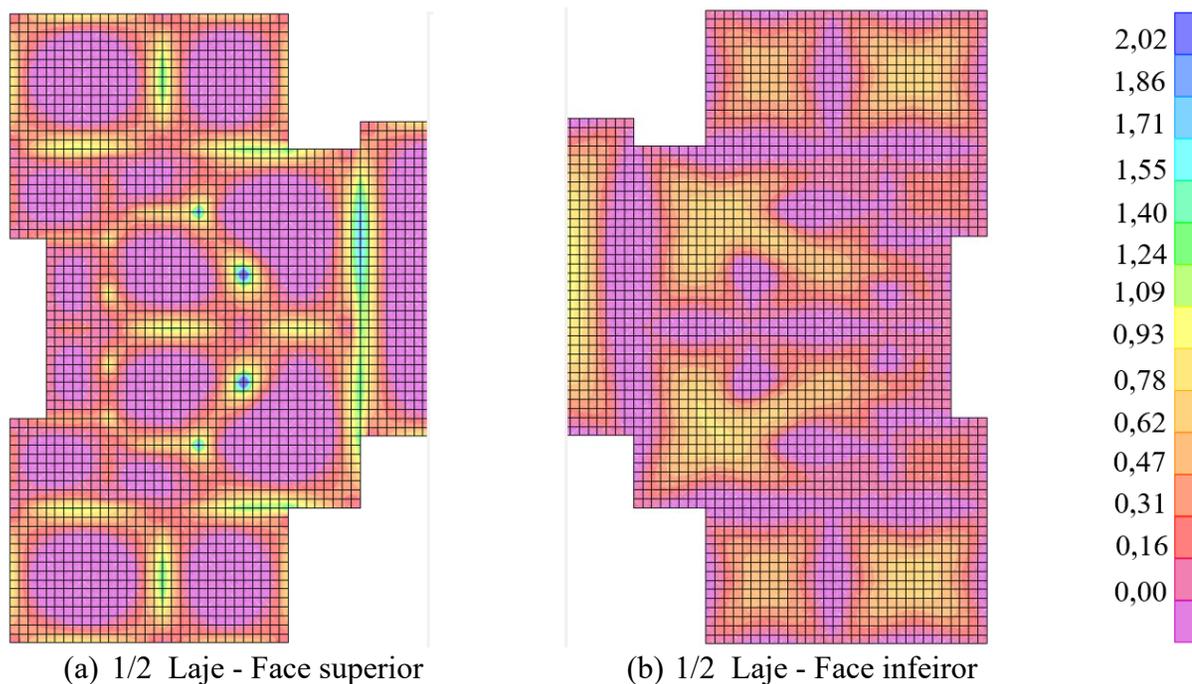


Figura 16. Distribuição de tensões principais referentes a CR6 em MPa para as Paredes 1 e 2.

4. CONCLUSÃO

A partir do estudo realizado é possível concluir que a ação de retração por secagem e os carregamentos térmicos podem produzir em edificações em paredes de concreto moldadas in loco tensões principais de tração com níveis acima do limite de 2,02 MPa previsto na NBR 6118 (ABNT, 2014) para concretos de classe C30.

Ainda, observou-se que as combinações com apenas a ação de retração por secagem (CR1) e esta combinada com o resfriamento uniforme (CR2) produziram as tensões principais de tração mais elevadas em comparação com as demais, mostrando serem as mais adequadas para a identificação das regiões que podem desenvolver a formação de fissuras tanto para as paredes quanto para a laje de cobertura.

A modelagem da edificação completa se mostrou necessária para a validade do comportamento das tensões, visto que a restrição dos movimentos de expansão e contração pelas paredes, lajes e elementos de fundação atuaram de forma significativa no comportamento das tensões, podendo ser visto que quanto mais próximo dos elementos de fundação ou cruzamento de paredes, maiores as tensões de tração quando sujeitas a retração e resfriamento uniforme.

A variação uniforme de temperatura produziu resultados passíveis de atenção apenas quando combinada com a variação gradiente linear de temperatura, mostrando níveis de tensões mais elevados que a resistência à tração do concreto, principalmente no encontro de parede com a laje de cobertura.

Desse modo, para manter a durabilidade da estrutura é necessário que para a verificação quanto ao ELS-F sejam consideradas as ações térmicas e a retração por secagem, visto que apenas com os carregamentos usuais de análise não é possível identificar as regiões que tendem a ocorrer a formação de fissuras.

Para trabalhos futuros são propostas as seguintes considerações: a) incorporar a ação do vento juntamente com a ação térmica de resfriamento uniforme e retração por secagem; b) adotar apoios flexíveis (interação solo-estrutura) para aprimorar o comportamento da estrutura com os elementos de fundação e; c) realizar o dimensionamento das paredes e laje de cobertura para os carregamentos usuais e verificar os acréscimos de taxas de aço necessários quando aplicadas as ações térmicas e retração.

5. REFERÊNCIAS

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”. Dissertação 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. Disponível em: <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. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/fissuras-poem-em-risco-a-vida-util-das-estruturas-de-concreto/16243>. Acesso em: 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>. Disponível em: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/184>. Acesso em: 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 Congresso 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. Disponível em: <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. Disponível em: http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/ebook/edicao90/files/assets/basic-html/page38.html. Acesso em: 20 jul. 2022.