

Análise da influência da variação da excentricidade de cordoalhas engraxadas no comportamento estrutural de lajes lisas protendidas

R. Cattelan¹*, L. Cielo¹, A. Lübeck¹, A. B. S. Santos Neto¹

* Autor de Contato: rogerio@ufsm.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.570>

Recepção: 11/11/2021 | Aceitação: 26/02/2022 | Publicação: 01/05/2022

RESUMO

Neste estudo, avaliou-se a influência de variações de excentricidade dos cabos em lajes lisas protendidas. O correto posicionamento das cordoalhas na montagem de lajes lisas protendidas é imprescindível para que o sistema estrutural alcance desempenho e segurança adequados. Analisou-se quatro modelos diferentes com modificação da altura dos cabos em diferentes pontos e quantidades. Foram avaliadas tensões de pré-compressão, tensões nas faces inferior e superior, flechas, balanceamentos de cargas e armaduras passivas. Utilizou-se o programa ADAPT Floor Pro para as análises, sendo o dimensionamento regido pela NBR 6118:2014 e recomendações do ACI 318:2019. Constatou-se que a variação na excentricidade vertical das cordoalhas na face inferior da laje, reduzem mais os valores das tensões, em comparação com a variação na face superior.

Palavras-chave: concreto protendido; protensão não aderente; excentricidade de cordoalhas.

Citar como: Cattelan, R., Cielo, L., Santos Lübeck, A., Neto, A. B. S. (2022), "*Análise da influência da variação da excentricidade de cordoalhas engraxadas no comportamento estrutural de lajes lisas protendidas*", Revista ALCONPAT, 11 (2), pp. 210 – 226, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.570>

¹ Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000 Cidade Universitária Bairro - Camobi, Santa Maria - RS, 97105-900, Brazil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, todos os autores contribuíram igualmente na concepção e definição do programa experimental. O autor Cielo contribuiu com o desenvolvimento do modelo (100%), análise e discussão dos resultados (25%) e redação do trabalho (100%). O autor Lima contribuiu com a orientação do trabalho (50%), análise e discussão dos resultados (25%) e revisão do manuscrito (34%). O autor Santos Neto contribuiu com a orientação do trabalho (50%), análise e discussão dos resultados (25%) e revisão do manuscrito (33%). O autor Lübeck análise e discussão dos resultados (25%) e revisão do manuscrito (33%).

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 primeiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2022.

Numerical analysis of the effect of variation of eccentricity of unbonded post-tensioned tendons on the structural behavior of flat slabs

ABSTRACT

In this study, the effect of variations of eccentricity of tendons in unbonded post-tensioned flat slabs was evaluated. The correct positioning of strands in the assembly of unbonded post-tensioned flat slabs is essential for the structural system to achieve adequate performance and safety. Four different slab models were analyzed with variations in the height of the strands at different positions providing the change in eccentricity and increases in the number of tendons. Pre-compression stresses, stresses on the bottom and top faces, center vertical displacements, load balancing and passive reinforcement of the slabs were evaluated. The ADAPT Floor Pro commercial software was used for the analyses with the design conforming with standard NBR 6118:2014 and recommendations from standard ACI 318:2019. For the models evaluated, it was found that the variation in the eccentricity of the strands in the bottom face of the slab reduced the applied stresses more than variations in the top face.

Keywords: post-tensioned concrete, unbonded tendons, strand eccentricity.

Análisis de la influencia de la variación de excentricidad de tendones no-adherentes en el comportamiento estructural de losas planas postensadas

RESUMEN

En este estudio se evaluó la influencia de las variaciones de excentricidad de los cables en modelos con losas planas postensadas. El correcto posicionamiento de los tendones en el montaje de losas planas postensadas es fundamental para que el sistema estructural logre un adecuado rendimiento y seguridad. Se analizaron cuatro modelos arquitectónicos diferentes con modificación de la altura de los cables en diferentes puntos y cantidad. Se evaluaron tensiones de pre compresión, tensiones extremas en el tope y base, desplazamientos verticales, balanceo de carga y cantidad de acero pasivo de las losas. Para el análisis se utilizó el software ADAPT Floor Pro. El proyecto sigue las recomendaciones de la NBR 6118:2014 y ACI 318:2019. Para los modelos evaluados, se encontró que la variación en la excentricidad vertical de los tendones en la base de la losa reduce aún más los valores de las tensiones aplicadas, en comparación con la variación en el tope.

Palabras clave: hormigón postensado; postensión no-adherente; excentricidad de los tendones.

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

O uso da protensão com cordoalhas não aderentes em edifícios é muito utilizada em países economicamente desenvolvidos como Estados Unidos e Austrália. Pode-se citar também regiões do Oriente Médio, Sudeste Asiático e Reino Unido e alguns países da América do Sul, em virtude do excelente desempenho estrutural e das vantagens econômicas (Aalami, 2000; Santos, 2017; Silva et al., 2018).

A implementação deste sistema de protensão somente foi incluída na norma do American Concrete Institute (ACI) 318 em 1963, após a realização de diversas obras pelo mundo (Aalami, 2000; Kang and Bondy, 2008). No Brasil, o uso de lajes lisas com protensão não aderente teve início apenas no ano de 1997 (Carvalho, 2017). Projetos arquitetônicos que propõem grandes vãos livres, com reduzido número de pilares e vigas, principalmente em edifícios e residências de alto padrão, impulsionou o uso de lajes com protensão não aderente no país (Santos, 2017; Almeida, 2001; Loureiro, 2006). Pode-se citar também o desenvolvimento de aços de alta resistência, juntamente com a evolução de softwares de dimensionamento, além da praticidade executiva do sistema, como fatores decisivos para o avanço na aplicação efetiva da protensão na construção civil (Carvalho, 2017; Loureiro, 2006).

Além do benefício financeiro, a protensão traz melhorias no desempenho no Estado Limite de Serviço (ELS) e na segurança das estruturas de concreto, com destaque para a durabilidade, pois a ausência ou redução da fissuração garante maior proteção das armaduras, inibindo o fenômeno da corrosão (NBR 6118, 2014; Cholfe and Bonilha, 2018; Silva, 2003).

Nas lajes lisas com protensão não aderente as cordoalhas são, na maioria das vezes, com traçados em formato parabólico, resultando assim em excentricidades em relação ao centro laje, que permitem aumentar a eficiência das forças aplicadas pelos cabos, aumentando também a capacidade de balanceamento das cargas (Pfeil, 1984; Vicente and Albino, 1994). O conceito de carga balanceada, tem como princípio básico propiciar que as cargas verticais equivalentes da protensão equilibrem uma fração das cargas permanentes atuantes, ficando a estrutura, para esse nível de carregamento, submetida somente a tensões de compressão (Silveira, 2002; Aalami, 1990; Aalami and Bommer, 1999).

Este fator traz a necessidade de montagem das cordoalhas o mais próximo possível das posições verticais indicadas no projeto, pois um posicionamento vertical equivocado pode ocasionar o surgimento de manifestações patológicas, flechas diferentes das previstas em projeto ou, até mesmo, em casos mais extremos, o colapso da estrutura (Silva et al., 2018; Aalami and Bommer, 1999; Romanichen and Souza, 2019).

Para manter as cordoalhas na posição vertical especificada em projeto, são utilizados espaçadores de apoio pontuais. Estes espaçadores quando industrializados, são em modelos plásticos ou de aço, com controle rigoroso no processo de produção da altura. Contudo, excepcionalmente, a produção destes espaçadores é feita em obra, com a dobra de barras de aço, não apresentando na maioria das vezes o adequado controle da produção e, por consequência, uma variabilidade nas suas alturas (Loureiro, 2006; Aalami, 2014). Além disso, outras situações como a falta de atenção no manuseio com a armadura, associada com os danos causados nas operações de concretagem, podem causar a quebra ou deslocamento desses espaçadores (Figura 1).

Ainda, mesmo havendo o controle e o cuidado com relação aos aspectos citados anteriormente, há também o próprio erro humano no posicionamento destes espaçadores durante a etapa de montagem das cordoalhas. Circunstâncias como essas podem produzir um posicionamento vertical das cordoalhas, com uma altura e excentricidade diferentes do valor especificado pelo projetista.

Os problemas provenientes do mau posicionamento das cordoalhas podem ser relacionados com o surgimento de situações, tais como: fissuração da laje, deslocamentos verticais excessivos, tensões

atuantes diferentes das calculadas em projeto superando os limites de tração ou compressão do concreto no elemento estrutural. Pode-se ainda citar o deslocamento do concreto em função de menores cobrimentos e a aceleração no processo de corrosão do aço em virtude de falta de cobrimento (Souza, 2018; Xin and Xianyan, 2012).



Figura 1. Operação de concretagem: (a) Manuseio da mão de obra em contato com a armadura. (b) Espaçador danificado e mal posicionado.

Respeitar o correto posicionamento vertical das cordoalhas especificado em projeto, durante a etapa de montagem, é o principal fator influente para o desempenho do sistema (Carvalho, 2017; Souza Junior and Oliveira, 2016; Caro et al., 2013).

Cauduro (2002) recomenda que desvios verticais na posição das cordoalhas sejam tolerados até ± 5 mm, em lajes que não ultrapassem a espessura de 200 mm e tolerância máxima de ± 10 mm, em lajes com espessura entre 200 mm e 600 mm. Além disso, o autor também indica que os pontos altos e baixos são as posições mais críticas e que a posição horizontal das cordoalhas não é crucial, porém deve-se evitar oscilações excessivas. No entanto, valores aceitáveis de desvios absolutos que independem da geometria da estrutura e esforços envolvidos podem resultar em insegurança na avaliação estrutural. As variações de excentricidade dos cabos de protensão podem ser mais ou menos influentes a depender da espessura da laje, ou seja, o erro relativo de excentricidade, vão entre apoios e carregamento aplicado.

Neste estudo é avaliada a influência de variações de excentricidade dos cabos em lajes lisas protendidas. Foram desenvolvidos modelos variando-se as espessuras e vãos das lajes, além do erro relativo de excentricidade do cabo. O dimensionamento das lajes lisas protendidas seguiu as especificações da ABNT NBR 6118:2014 e algumas recomendações do ACI 318:2019.

2. METODOLOGIA

2.1 Geometria das Lajes e Traçado dos Cabos

Os modelos estruturais testados são compostos por um pavimento de laje, apoiada diretamente nos pilares, sem a existência de vigas, como apresentado na Figura 2. Os vãos entre pilares são todos iguais em cada modelo e variaram de 7,0 a 10,0 m, resultando em quatro modelos estruturais, com vãos de 7,0 m x 7,0 m até 10,0 x 10,0 m, variando de metro em metro, sendo os modelos nomeados de M7, M8, M9 e M10.

Os modelos estruturais apresentam espessuras de lajes diferentes, definidas aproximadamente pela relação $L/42$ (ACI 318, 2019), onde L é o vão da laje. Na Tabela 1 são apresentados os modelos estruturais, com suas nomenclaturas, vãos entre pilares e as espessuras para cada uma das lajes.

O traçado dos cabos de protensão seguiu a premissa de dispor as faixas de cordoalhas concentradas

na maior dimensão da laje (direção x) e, cordoalhas distribuídas na direção perpendicular (direção y), Figura 3.

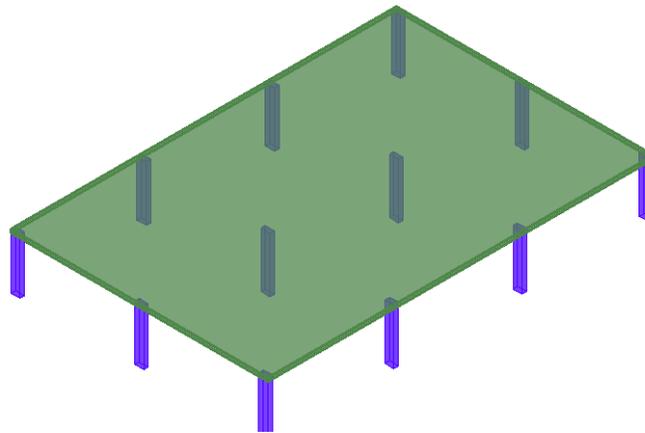


Figura 2. Modelo estrutural do pavimento para as análises.

Tabela 1. Nomenclatura e dimensões dos modelos estruturais.

	Nomenclatura	Vãos entre pilares	Espessura da laje
Modelo	M7	7,0 m x 7,0 m	170 mm
	M8	8,0 m x 8,0 m	190 mm
	M9	9,0 m x 9,0 m	210 mm
	M10	10,0 m x 10,0 m	240 mm

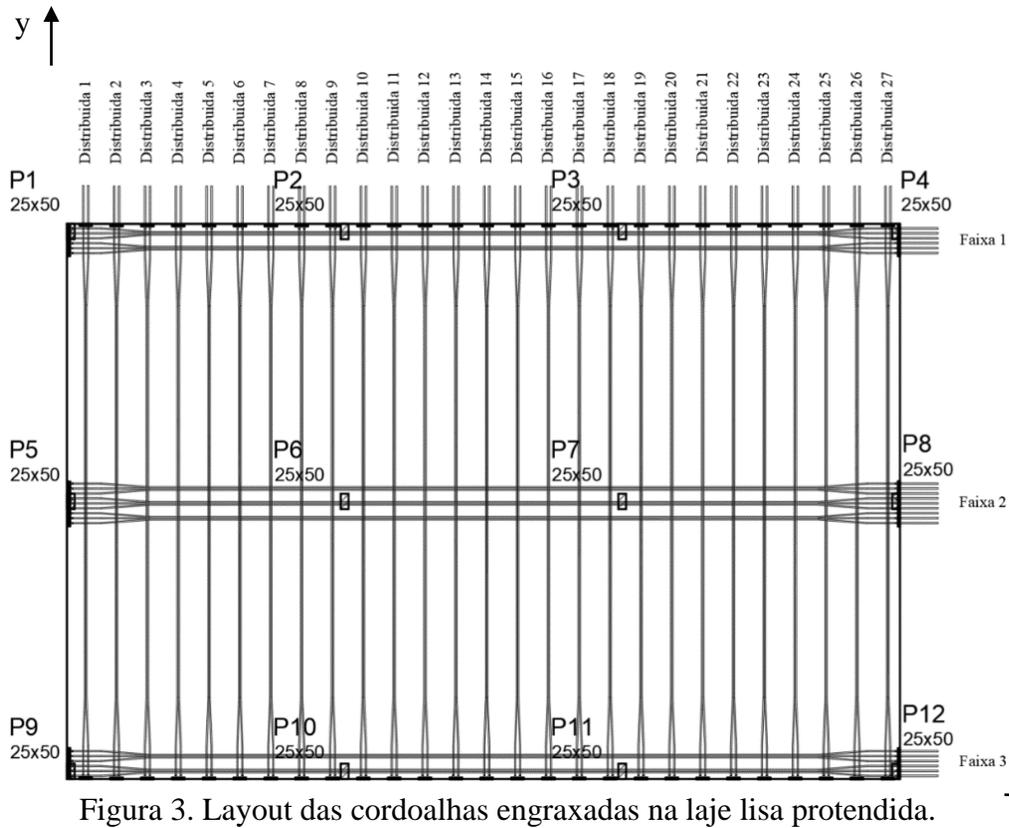


Figura 3. Layout das cordoalhas engraxadas na laje lisa protendida.

Analisou-se, exclusivamente, a faixa central de cordoalhas da direção x, em virtude de ser esta a faixa que concentra os maiores carregamentos e, assim, é mais influenciada pelas variações de

excentricidade aplicadas em cada modelo proposto.

As variações das excentricidades foram testadas sobre os pilares (topo) e no centro dos vãos (base), de maneira isolada e também combinada, conforme o esquema da Figura 4. No primeiro caso foram reduzidas as excentricidades das cordoalhas unicamente na face superior da laje (topo), nas regiões dos pilares P6 e P7. Posteriormente, diminuiu-se a excentricidade exclusivamente nas regiões entre os apoios, na face inferior da laje (base). No terceiro caso realizou-se a análise com variações em conjunto, denominada como combinação crítica, reduzindo as excentricidades das cordoalhas simultaneamente nas regiões entre os apoios e também no topo dos pilares P6 e P7.

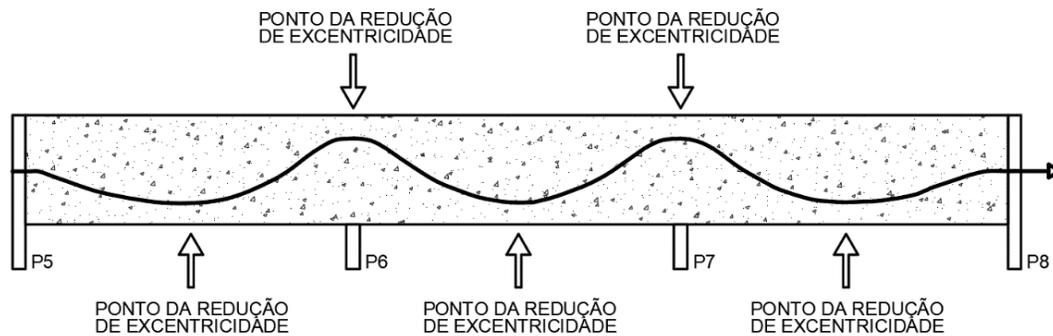


Figura 4. Pontos de redução da excentricidade para as lajes.

Para cada um dos quatro modelos (Tabela 1) foram desenvolvidas quatro hipóteses de variações de excentricidades, com valores de 5 mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm. Esses valores foram adotados no estudo em virtude de que geralmente nos projetos os pontos de apoios verticais são apresentados nesta formatação, visando viabilizar a conferência in loco. Além disso, os estudos apresentados em (Cauduro, 2002) mostram valores limites de 5 mm e 10 mm de redução nas excentricidades das cordoalhas das lajes, para espessuras de lajes iguais ou maiores que as definidas neste estudo. Na Tabela 2 são apresentadas as hipóteses de variações, com suas nomenclaturas e as respectivas reduções das excentricidades.

Tabela 2. Hipóteses das variações de excentricidades.

Hipótese	Nomenclatura	Redução de excentricidade
Referência	H0	0
Hipótese 1	H5	5
Hipótese 2	H10	10
Hipótese 3	H15	15
Hipótese 4	H20	20

Nas análises, o vão entre o P5 e P6 foi nomeado como “primeiro”, o vão entre o P6 e P7 recebeu a denominação “central” e, por fim, o vão entre o P7 e P8, recebeu a denominação de “último”, conforme o esquema da Figura 5.

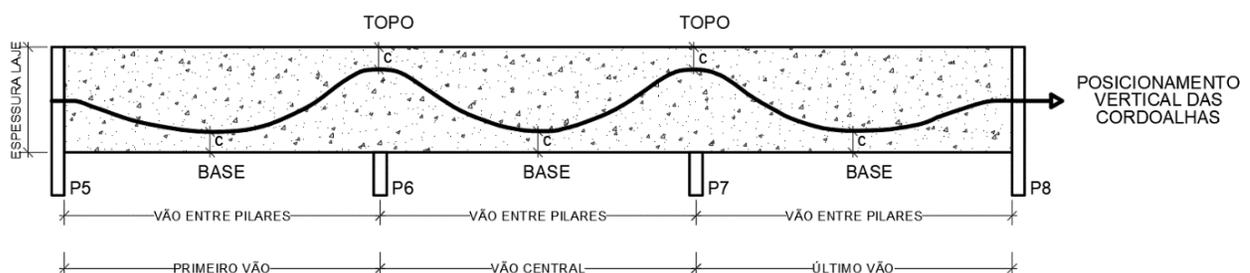


Figura 5. Posicionamento vertical das cordoalhas na laje.

2.2 Materiais e Parâmetros Normativos

Foi considerado um carregamento variável (sobrecarga) com o valor mínimo recomendado na (NBR 6120, 2019) para salas de uso geral de edificações comerciais, igual a 2,5 kN/m². Adotou-se também um carregamento permanente de revestimento de valor igual a 1,0 kN/m². Além desses dois carregamentos, foi aplicado o peso próprio calculado em função da espessura da laje, em cada caso.

Adotou-se o valor de 2,5 cm para o cobrimento das armaduras passivas e 3,0 cm para o cobrimento das armaduras ativas. Nas modelagens adotou-se concreto classe C35, com f_{ck} de 35,0 MPa e módulo de elasticidade (E) de 39,7 GPa.

As cordoalhas utilizadas foram do tipo CP 190 RB ($f_{ptk} = 1900$ MPa), com diâmetro nominal de 12,7 mm e área de aço nominal 100,9 mm².

Nas análises dos modelos das lajes seguiram-se inicialmente três parâmetros fundamentais normatizados: tensão de pré-compressão mínima, tensão normal limite de tração e deslocamentos verticais máximos. Após estes critérios alcançados ajustou-se as demais considerações, como balanceamento de cargas e deslocamentos finais. Após realizadas estas primeiras análises, as lajes foram dimensionadas para o Estado-limite de Serviço (ELS) e Estado-limite Último (ELU).

A tensão de pré-compressão, em qualquer ponto da laje, teve respeitado o valor mínimo de 1,0 MPa, (ACI 318, 2019; NBR 6118, 2014). Nos modelos, no processo de pré-dimensionamento, em que a pré-compressão de 1,0 MPa não foi suficiente para atender o limite da máxima tensão normal de tração no concreto ou deslocamentos, a quantidade de cordoalhas foi aumentada, até que este parâmetro fosse alcançado.

Adotou-se, quando possível, para o parâmetro de balanceamento de cargas, resultados entre 60% a 80% da carga permanente, valores estes usuais para lajes de edifícios residenciais, comerciais e garagens, (Loureiro, 2006).

Definiu-se para o dimensionamento a utilização da protensão limitada, (NBR 6118, 2014). Ainda, conforme a referida norma, nos projetos com laje lisa protendida, basta ser atendido o ELS-F (Estado Limite de Serviço de Formação de Fissuras), para a combinação frequente das ações, em qualquer das classes de agressividade ambiental. O valor limite de tensão normal de compressão no concreto no ato da protensão, foi limitado em 15,75 MPa e no estado limite de formação de fissuras (ELS-F) de 21,0 MPa, (ACI 318, 2019).

A norma (NBR 6118, 2014) limita os deslocamentos verticais, para a aceitabilidade sensorial, de vigas e lajes, na relação $L/250$ (sendo L o vão livre entre pilares). Este valor foi tomado como limite para os modelos antes da inserção de variações nas excentricidades das cordoalhas.

As armaduras passivas positivas e negativas foram calculadas para os diferentes modelos, conforme os critérios apresentados em (NBR 6118, 2014). A Tabela 3 resume os parâmetros utilizados na verificação das lajes.

Após a inserção das variações de excentricidades, foram feitas as análises para confirmar quais modelos mantiveram-se atendendo a estes limites e, assim, calcular as armaduras passivas e definir a posição e o valor máximo de variação admissível da excentricidade das cordoalhas.

2.3 Análises de Dimensionamento

O dimensionamento das lajes foi realizado com o auxílio do programa Adapt Floor 2017 PRO. Este programa é específico para análise e dimensionamento de concreto protendido e discretiza a laje em elementos finitos de placa, verificando os efeitos da protensão de acordo com a geometria e força das cordoalhas, em cada elemento.

O programa permite a geração automática da malha de elementos finitos, cabendo ao usuário a definição do tamanho dos elementos desta malha. Neste trabalho foram testados dois tamanhos de dimensão máxima dos elementos. Como não foram encontradas diferenças significativas nos

resultados, definiu-se utilizar para as análises uma dimensão máxima para os elementos de 500 mm de malha. A Figura 6 mostra a malha de elementos finitos para o Modelo M8.

Tabela 3. Critérios analisados com os limites e respectivas fontes indicadas.

Critério analisado	Limite	Parâmetro	Unidade	Fonte
Tensão de pré-compressão	Mínimo	1,0	MPa	NBR 6118, 2014 e ACI 318, 2019
Tensão de tração nas faces inferior e superior	Máximo	3,38	MPa	NBR 6118, 2014
Tensão de compressão máxima para o Ato da Protensão	Máximo	15,0	MPa	ACI 318, 2019
Tensão de compressão máxima para o ELS-F	Máximo	21,0	MPa	ACI 318, 2019
Balanceamento de cargas	Recomendação	60 a 80	%	Loureiro, 2006 e Hanai, 2005
Deslocamentos verticais diferidos	Máximo	L/250	-	NBR 6118, 2014

Para as análises dos modelos das lajes foram lançadas linhas de suporte no alinhamento dos pilares. Essas linhas permitem ao programa definir “*design sections*”, no qual são apresentados ao usuário os valores médios das tensões na laje. Logo, essas tensões são analisadas a partir de regiões tributárias que compilam os resultados das áreas definidas pelas linhas de suporte.

A quantidade de cordoalhas, para a faixa central dimensionada, para os Modelos M7, M8, M9 e M10 foram de 10, 17, 25 e 33 unidades, respectivamente.

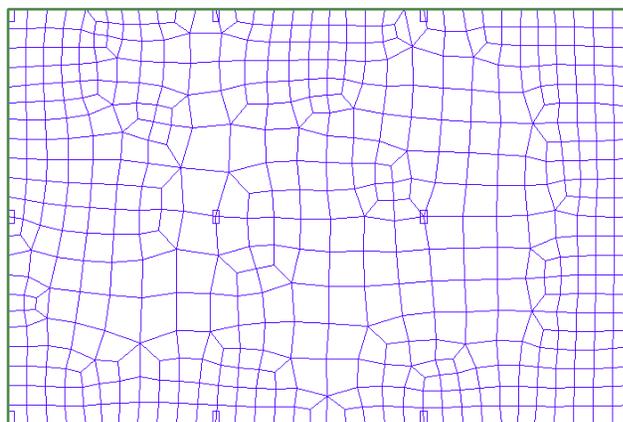


Figura 6. Malha de elementos finitos da laje.

Na Figura 7 são apresentadas as tensões normais na direção “x” para as faces superior e inferior da laje, para a combinação frequente, do Modelo M8.

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Tensões de pré-compressão

A Tabela 4 apresenta os resultados para os valores das tensões normais de pré-compressão nas lajes. As tensões normais de pré-compressão não variam em função da modificação da posição vertical das cordoalhas e sim em virtude da quantidade de cordoalhas e intensidade da força

aplicada pelas mesmas. Uma densidade maior de cordoalhas, necessária para equilibrar os modelos com vãos maiores, resultou em valores de tensão de pré-compressão também maiores. Para o modelo M7 as tensões variaram entre 1,0 e 1,11 MPa, entre vãos. Enquanto para o modelo M10 variaram entre 1,43 e 1,60 MPa, entre vãos.

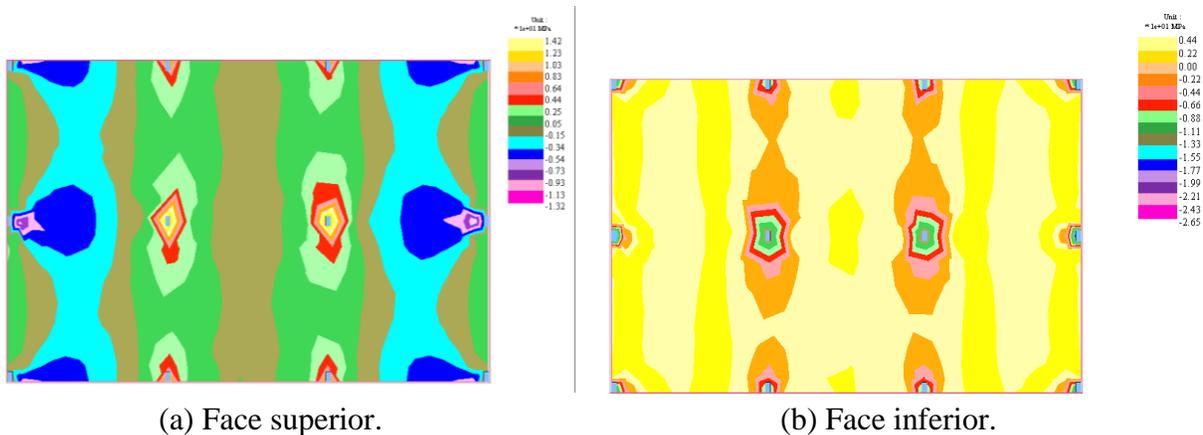


Figura 7. Tensões normais (direção x), para combinação frequente, da laje modelo M8, em MPa.

Tabela 4. Verificação das tensões de pré-compressão nas lajes (valores em MPa).

Modelo		M7												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Central	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
	Último	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Modelo		M8												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
	Central	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
	Último	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31
Modelo		M9												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
	Central	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
	Último	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
Modelo		M10												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43
	Central	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
	Último	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50

3.2 Tensões normais máximas na laje

As tensões normais de tração na face inferior da laje (Tabela 5), para os quatro modelos, mesmo com as mudanças no posicionamento vertical das excentricidades das cordoalhas, atenderam o valor limite máximo de 3,38 MPa no ELS-F, conforme estabelecido na (NBR 6118, 2014).

Nos modelos de referência, no trecho do vão central, foram encontradas tensões de compressão na face inferior da laje, devido a maior força de protensão neste trecho em relação ao primeiro e último vãos.

Ao modificar as excentricidades das cordoalhas, exclusivamente no topo dos pilares, as tensões sofrem menores variações quando comparadas com as reduções das tensões provocadas nos modelos com variações de excentricidades na base. As reduções das excentricidades, na combinação crítica, são mais desfavoráveis. Mesmo assim, em todas as hipóteses as tensões normais de tração na face inferior da laje mantiveram-se atendendo o limite de 3,38 MPa, (NBR 6118, 2014). As análises das tensões na face superior encontram-se resumidas na Tabela 6. Em amarelo foram destacadas as tensões que ultrapassaram o limite normativo. A variação de excentricidade no topo dos pilares, nas hipóteses H5 foram as únicas que apresentaram resultados de tensões normais de tração na face superior atendendo o limite normativo de 3,38 MPa, (NBR 6118, 2014). A redução de excentricidade na face inferior da laje gera maiores tensões normais de tração na face superior do elemento, na região do apoio (pilares), em comparação à variação da excentricidade na face superior. Os modelos M7 e M9, foram os únicos que na hipótese H5 de modificação dos valores de excentricidades do caso “Base”, tiveram seus valores de tensões normais de tração menores que 3,38 MPa.

Tabela 5. Verificação da análise das tensões normais na face inferior nas lajes (valores em MPa).

Modelo		M7												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	2,37	2,39	2,42	2,45	2,47	2,45	2,54	2,63	2,72	2,48	2,60	2,71	2,83
	Central	-0,15	-0,12	0,00	0,05	0,12	-0,10	0,00	0,02	0,05	-0,03	0,09	0,22	0,36
	Último	2,52	2,55	2,58	2,60	2,63	2,61	2,69	2,78	2,86	2,63	2,75	2,86	2,97
Modelo		M8												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	2,52	2,55	2,71	2,74	2,77	2,66	2,76	2,87	2,98	2,68	2,83	2,97	3,12
	Central	-0,62	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,6	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	-0,3	-0,2	0,01
	Último	2,48	2,51	2,54	2,57	2,61	2,58	2,69	2,79	2,9	2,62	2,75	2,89	3,03
Modelo		M9												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	2,64	2,65	2,71	2,74	2,77	2,66	2,76	2,87	2,98	2,68	2,83	2,97	3,12
	Central	-1,49	-1,4	-1,3	-1,2	-1,1	-1,3	-1,2	-1,1	-1	-1,2	-1	-0,8	-0,6
	Último	2,63	2,66	2,72	2,74	2,78	2,67	2,79	2,9	3,01	2,71	2,82	3,01	3,16
Modelo		M10												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	2,70	2,73	2,77	2,80	2,83	2,81	2,91	3,01	3,12	2,84	2,97	3,10	3,24
	Central	-1,41	-1,33	-1,24	-1,15	-1,07	-1,34	-1,27	-1,20	-1,13	-1,26	-1,10	-0,93	-0,77
	Último	2,69	2,73	2,76	2,79	2,82	2,80	2,90	3,01	3,11	2,83	2,97	3,10	3,24

Tabela 6. Verificação da análise das tensões na face superior nas lajes (valores em MPa).

Modelo		M7												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	P5	3,04	3,12	3,21	3,29	3,37	3,15	3,25	3,36	3,46	3,23	3,42	3,61	3,80
	P6	3,26	3,33	3,41	3,48	3,56	3,36	3,45	3,55	3,65	3,43	3,61	3,78	3,96
Modelo		M8												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	P5	3,28	3,38	3,47	3,56	3,65	3,40	3,52	3,65	3,77	3,50	3,71	3,93	4,14
	P6	3,08	3,18	3,28	3,37	3,47	3,21	3,33	3,46	3,58	3,30	3,53	3,75	3,97
Modelo		M9												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	P5	3,09	3,19	3,29	3,40	3,51	3,24	3,34	3,42	3,55	3,26	3,49	3,72	3,95
	P6	3,13	3,22	3,31	3,45	3,53	3,29	3,42	3,56	3,57	3,39	3,64	3,88	4,12
Modelo		M10												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	P5	3,28	3,37	3,47	3,56	3,66	3,40	3,52	3,65	3,77	3,50	3,71	3,93	4,15
	P6	3,23	3,32	3,42	3,52	3,65	3,33	3,47	3,65	3,77	3,45	3,67	3,88	4,11

Além disso, na combinação crítica, em nenhuma das variações de excentricidades, as tensões normais de tração obtidas foram menores que o limite normativo estabelecido de 3,38 MPa, para o ELS na combinação frequente, (NBR 6118, 2014).

3.3 Deslocamentos verticais

Na Tabela 7 são apresentados os valores obtidos para os deslocamentos verticais diferidos das lajes. Os modelos M7 e M8 apresentaram para todas as hipóteses e casos de variações, valores de deslocamentos verticais atendendo os limites de 28,0 mm e 32,0 mm, respectivamente. O modelo M9, apenas no vão central, obteve valores menores que 36,0 mm de deslocamentos verticais. Por fim, o modelo M10, teve seus valores de deslocamentos verticais abaixo de 40,0 mm, limite normativo (NBR 6118, 2014), em todas as variações de excentricidades para o caso “Topo” de modificações nas alturas das cordoalhas.

Tabela 7. Análise dos deslocamentos verticais nas lajes (valores em mm).

Modelo		M7												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	18,5	18,8	19,0	19,2	19,4	19,1	19,6	20,1	20,7	19,3	20,0	20,8	21,5
	Central	5,4	5,8	6,3	6,6	7,0	5,7	6,0	6,3	6,6	6,1	6,9	7,5	8,2
	Último	19,1	19,3	19,4	19,6	19,8	19,6	20,1	20,6	21,1	19,8	20,4	21,1	21,8
Modelo		M8												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	24,2	24,4	24,7	24,9	25,2	24,9	25,6	26,3	27,0	25,1	26,1	27,2	28,0
	Central	4,8	5,1	5,5	6,5	7,1	5,3	5,6	6,1	7,1	5,8	6,7	7,7	8,7
	Último	23,9	24,2	24,6	24,8	25,1	24,7	25,5	26,3	30,0	25,0	26,1	27,1	28,1
Modelo		M9												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	35,7	35,9	36,5	36,8	37,1	36,1	36,7	37,0	37,9	36,3	36,8	37,9	39,2
	Central	5,0	5,8	6,6	7,4	8,1	6,5	7,1	7,6	8,3	7,3	8,4	9,7	10,9
	Último	35,6	35,9	36,2	36,7	37,0	36,0	36,3	36,8	37,6	36,1	36,5	37,7	39,0
Modelo		M10												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	35,4	35,7	36,4	38,0	39,0	36,3	37,2	38,1	40,1	36,9	39,3	41,6	42,5
	Central	2,7	3,3	5,0	8,9	10,1	3,3	5,9	9,0	10,3	4,0	6,6	9,9	12,0
	Último	34,8	35,2	35,9	37,4	38,3	35,8	36,7	37,6	39,6	36,1	38,9	40,0	42,1

Para melhor compreensão dos efeitos da alteração da excentricidade dos cabos no comportamento à flexão da laje, foi desenvolvido o gráfico da Figura 8. Neste gráfico no eixo das ordenadas, a relação f/L representa, na forma de denominador de fração, a flecha equivalente, por exemplo $L/430$, onde o valor $L/250$ é a flecha limite. No eixo das abscissas estão colocadas as excentricidades relativas, ou seja, o valor do deslocamento dado ao cabo (excentricidade), em relação à espessura da laje. A excentricidade relativa (ou variação da excentricidade relativa) pode ser mais ou menos influente para os diferentes casos. Observando o alinhamento dos pontos, percebe-se que para todos

os modelos de lajes a hipótese crítica conduz a maiores variações de deslocamentos. As linhas tracejadas foram inseridas para demonstrar os casos testados, M7 a M10.

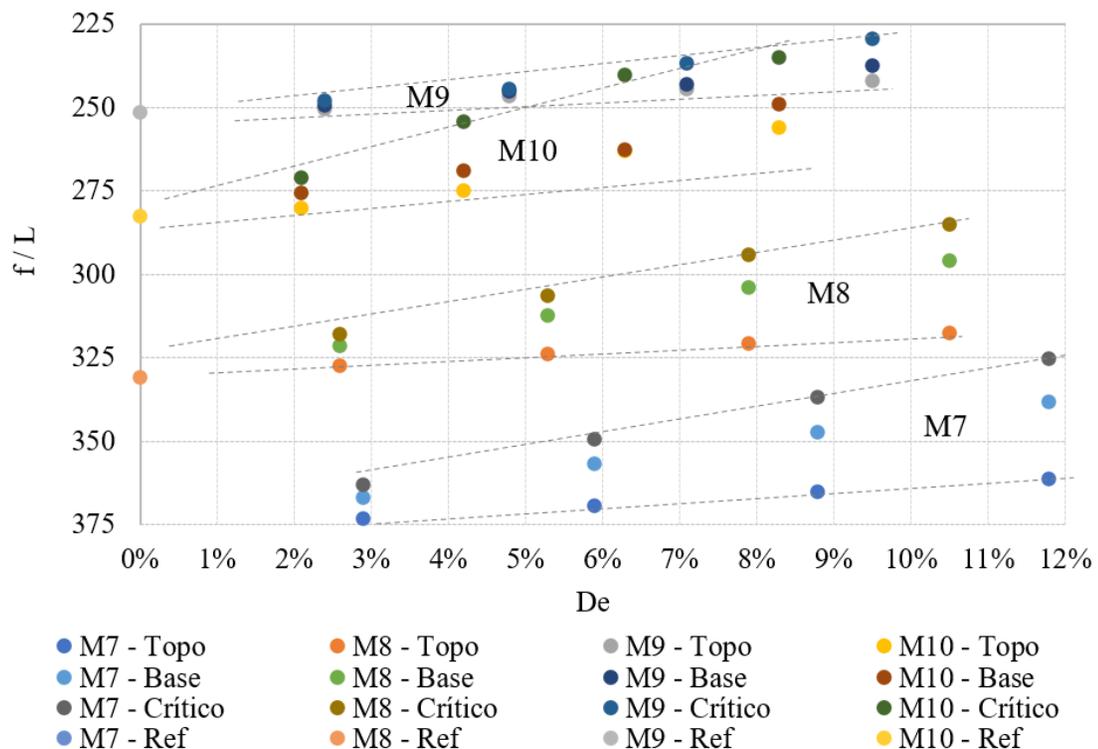


Figura 8. Deslocamentos relativos para os diferentes modelos de lajes.

Para os casos M9 e M10, a posição da excentricidade, topo, base ou crítica, foi menos influente do que para os casos M7 e M8. A amplitude de variação das flechas aumentou quando se aumentou a excentricidade relativa. Para o caso M9 – Crítico, o aumento da excentricidade relativa de 2,4% para 9,5% resultou em um acréscimo de flecha de $L/248$ para $L/230$. Já para o caso M7 – Crítico, um aumento da excentricidade relativa de 2,9% para 11,8%, resultou em um aumento da flecha de $L/363$ para $L/325$.

3.4 Balanceamento de cargas

Os valores de balanceamentos de cargas aumentam a partir da inserção de cordoalhas impostas para atender os limites de tensões normais de tração nas faces inferior, superior e pré-compressão da laje. A Tabela 8 mostra o resumo dos valores de balanceamentos de cargas para todos os conjuntos avaliados.

Somente o modelo M7 foi o que atendeu as recomendações de (Loureiro, 2006; Aalami, 2014), para valores de balanceamento de cargas, entre 60% e 80%. Nos demais modelos, o balanceamento variou entre 59 e 95% das cargas permanentes.

Tabela 8. Análise do balanceamento de cargas para as lajes (valores em %).

Modelo		M7												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
Vão entre pilares	Primeiro	73	73	72	72	71	73	72	72	71	72	71	70	69
	Central	74	72	71	69	68	72	71	69	68	71	68	64	61
	Último	80	79	79	78	77	79	78	77	75	78	76	74	72
Modelo		M8												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
Vão entre pilares	Primeiro	82	81	80	79	78	81	80	78	77	80	78	75	73
	Central	92	89	87	84	82	89	87	84	82	87	82	77	72
	Último	87	87	86	85	84	86	84	83	81	85	82	80	78
Modelo		M9												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
Vão entre pilares	Primeiro	88	87	86	85	83	60	59	57	56	60	57	54	52
	Central	94	92	90	88	85	61	60	58	57	60	56	53	50
	Último	87	86	85	84	83	59	58	57	56	58	56	54	52
Modelo		M10												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
Vão entre pilares	Primeiro	97	96	95	94	93	95	93	91	89	94	91	88	85
	Central	93	92	90	88	86	92	90	88	86	90	86	83	79
	Último	88	87	87	86	85	87	95	83	81	86	83	80	77

3.5 Armaduras passivas

Na Tabela 9 são apresentados os resultados do cálculo das armaduras passivas positivas.

Tabela 9. Resultado armadura positiva das lajes.

Modelo de análise	Hipóteses e casos de cálculo					
	Referência		H5 - Topo		H5 - Base	
	Vão primeiro e último	Vão central	Vão primeiro e último	Vão central	Vão primeiro e último	Vão central
	Área de aço (cm ² /m)		Área de aço (cm ² /m)		Área de aço (cm ² /m)	
M7	2,54	2,11	2,54	2,11	2,64	2,22
M8	2,72	2,10	2,72	2,10		
M9	3,26	2,40	3,26	2,40		
M10	3,74	2,46	3,74	2,46		

Para as variações nas hipóteses H5 no caso “Topo”, as taxas de armaduras passivas positivas

mantiveram-se iguais aos seus respectivos modelos de referência. As mudanças de taxas de armaduras aconteceram nos mesmos modelos, mas em diferentes trechos. Na Tabela 10 são apresentados os cálculos das armaduras de combate à flexão negativa no caso H5.

Tabela 10. Armadura negativa das lajes.

Modelo de análise	Hipóteses e casos de cálculo		
	Referência	H5 - Topo	H5 - Base
	Área de aço (cm ² /m)		
M7	7,4	7,4	7,7
M8	10,5	10,5	
M9	12,2	12,2	
M10	15,6	15,6	

A taxa de armadura passiva, de combate a flexão negativa, manteve-se a mesma, para os modelos hipótese de referência em comparação com os modelos na hipótese H5 de variação de excentricidade para o caso “Topo”. Isto porque, a redução de 5 mm na altura das excentricidades das cordoalhas, posicionadas no topo dos pilares, não apresentou novos esforços suficientes para aumentar a quantidade de aço neste caso.

A variação da excentricidade das cordoalhas na face inferior para o modelo M7, fez com que fosse necessário aumentar a taxa de armadura de combate à flexão negativa sobre os pilares, em relação ao modelo de referência, para a mesma distância entre pilares analisada.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho realizou-se a análise e o dimensionamento de quatro modelos de lajes lisas protendidas, com variação dos vãos e das excentricidades das cordoalhas, no intuito de simular possíveis erros de montagem no posicionamento dos espaçadores de apoio vertical. Foram analisadas nos diferentes modelos as tensões de pré-compressão, tensões normais nas faces inferior e superior da laje, balanceamentos de cargas e deslocamentos verticais. Também foram dimensionadas as armaduras passivas positivas e negativas.

Por meio da análise dos resultados é possível concluir que, a redução nas excentricidades das cordoalhas interferiu diretamente nos esforços das lajes lisas protendidas, principalmente causando reduções na parcela de tensões normais combatidas pela protensão. A diminuição da excentricidade das cordoalhas na face inferior da laje interfere negativamente em maior grau que a variação da excentricidade na face superior, afetando o controle das tensões normais na laje, assim como nos critérios de balanceamento de cargas e deslocamentos.

O Modelo M7 foi o único que obteve valores dos critérios analisados, atendendo os limites normativos, com variações das excentricidades na hipótese H5, para os casos “Topo” e “Base”, de posição da variação das alturas das cordoalhas.

Por outro lado, os Modelos M8, M9 e M10, apenas na variação para a hipótese H5, no caso “Topo”, apresentaram resultados das tensões normais de tração abaixo do limite de 3,38 MPa, estabelecido pela norma (NBR 6118, 2014).

O fator responsável pelas tensões de pré-compressão no elemento estrutural foi somente a quantidade de cordoalhas e a força aplicada nas mesmas, sem sofrer reduções nos valores em virtude da modificação vertical do posicionamento.

Os deslocamentos verticais nas lajes sofreram mudanças com a aplicação das variações nas excentricidades. Os modelos M7 e M8 foram os únicos que permaneceram abaixo dos limites normativos de L/250 para todas as hipóteses de variações de excentricidades aplicadas.

O critério de balanceamento de cargas manteve-se atendendo aos limites recomendados apenas no Modelo M7. Como são critérios complementares, não normatizados, podem ser aceitos nos dimensionamentos, mesmo com valores não recomendados.

As taxas de armaduras passivas positivas e negativas mantiveram-se iguais, unicamente, nos modelos de referência e na hipótese H5 de variação da excentricidade do caso “Topo”.

A máxima variação de excentricidade relativa para que os critérios analisados se mantivessem atendendo aos limites estabelecidos, é de 2,1% ao comparar a variação da excentricidade com a espessura de laje, no caso “Topo”, para atender os critérios.

Nas análises é possível afirmar que é admissível, para as lajes lisas protendidas com protensão não aderente, do tipo CP 190 RB ϕ 12,7 mm, com vãos entre pilares de 7,0 m a 10,0 m, uma tolerância máxima de 5 mm de redução no posicionamento vertical das cordoalhas na face superior. Esta análise é mais limitada, quando comparadas às tolerâncias encontradas na literatura.

5. REFERÊNCIAS

- Aalami, B. O. (1990), *Load Balancing: A Comprehensive Solution to Post - Tensioning*. ACI Structural Journal: 662-670.
- Aalami, B. O. (2014), “*Post-Tensioned Manual*”. California: ADAPT, v.1, p. 500.
- Aalami, B. O. (2000), *Structural Modeling of Post-Tensioned Members*. Journal of Structural Engineering. Vol. 126 Nº. 2: 157-162.
- Aalami, B. O., Bommer, A. (1999), “*Design Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors*”. Post-Tensioning Institute (PTI), Farmington Hills, USA.
- Almeida, S. R. M. (2001), “*Contribuição ao projeto ótimo de cabos em vigas de concreto protendido*”. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.2058>.
- American Concrete Institute (2019). *ACI 318 - Building Code Requirements for Structural Concrete*. Farmington Hills, MI.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Caro, L. A., Vargas J. R. M., Ros, P. S. (2013), *Prestress losses evaluation in prestressed concrete prismatic specimens*. Engineering Structures. Vol. 48, p. 704-715. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.11.038>.
- Carvalho, R. C. (2017), “*Estruturas em concreto protendido: cálculo e detalhamento*”. Ed. Pini. São Paulo, Brasil, p. 448.
- Cauduro, E. L. (2002), “*Manual para a boa execução de estruturas protendidas usando cordoalhas de aço engraxadas e plastificadas*”. São Paulo, Brasil.
- Cavaco, E. S., Bastos, A., Santos, F. A. (2017), “*Effects of corrosion on the behaviour of precast concrete floor systems*”. Journal Construction and Building Materials. N. 145: 411-418. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.044>.
- Cholfe, L., Bonilha, L. (2018), “*Concreto protendido: teoria e prática*”. Oficina de Textos. São Paulo, Brasil, p. 360.
- Hanai, J. B. (2005), “*Fundamentos do Concreto Protendido*”. E-book. São Carlos.
- Kang, T., Bondy, K. B. (2008), *Recommendations for Design of Post-Tensioned Slab-Column Connections Subjected to Lateral Loading*. PTI Journal, Post Tensioning Institute. Vol. 6, nº 1.
- Loureiro, G. J. (2006), *Projeto de Lajes Protendidas com Cordoalhas Engraxadas*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, ed. 44.
- Pfeil, W. (1984), “*Concreto Protendido – Introdução*”. LTC. Rio de Janeiro.

- Romanichen, R. M., Souza, R. A. (2019), *Reinforced concrete corbels strengthened with external prestressing*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. V. 12. N. 4, p. 812 – 831. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000400006>.
- Santos, J. S. D. (2017), *“Desconstruindo o Projeto Estrutural de Edifícios: Concreto Armado e Protendido”*. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos. p. 127.
- Silva, G., Prata, B., Albuquerque, A. (2018), *Análise da eficiência dos sistemas estruturais para edifícios em concreto*. Ambiente Construído. Vol. 18, n. 1, p. 313-325. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000100223>.
- Silva, R.C. (2003), *“Vigas de concreto armado com telas soldadas: análise teórica e experimental da resistência à força cortante e do controle da fissuração”*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. p. 328.
- Silveira, M. C. A. (2002). *“Práticas de Projeto e Execução de Edificações Protendidas com Cordoalhas Engraxadas e Plastificadas”*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. 44º Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte.
- Souza, F. A. (2018), *“Radier simples, armado e protendido – Teoria e Prática”*. Editora Catarse. São Paulo, Brasil, p. 312.
- Souza Junior, O. A., Oliveira, D. R. C. (2016), *“Influence of the tendon’s layout on the shearing resistance of prestressed concrete beams”*. Revista Ibracon de estruturas e materiais. Vol. 9, N. 5. p. 765 – 795. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000500008>.
- Vicente, C. M. D. S., Albino, J. P. D. C. (1994), *“Lajes em Concreto Armado e Protendido”*. Editora da Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, Brasil, p. 584.
- Xin, F., Xianyan, Z. (2012). *“Experimental research on crack width of retard bonded partially prestressed concrete beams”*. International Conference on Advances in Civil Infrastructure Engineering. Hunan.