

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Luciano Cielo

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA EXCENTRICIDADE DE
CORDOALHAS ENGRAXADAS NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE
LAJES LISAS PROTENDIDAS**

SANTA MARIA, RS

2021

Luciano Cielo

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA EXCENTRICIDADE DE
CORDOALHAS ENGRAXADAS NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE
LAJES LISAS PROTENDIDAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Cattelan Antochaves de Lima

Coorientador: Prof. Dr. Almir Barros da Silva Santos Neto

Santa Maria, RS
2021

Cielo , Luciano
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA EXCENTRICIDADE
DE CORDOALHAS ENGRAXADAS NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE
LAJES LISAS PROTENDIDAS / Luciano Cielo .- 2021.
110 p.; 30 cm

Orientador: Rogério Cattelan Antochaves de Lima
Coorientador: Almir Barros da Silva Santos Neto
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2021

1. concreto protendido 2. protensão não aderente 3.
excentricidade de cordoalhas 4. manifestações patológicas
I. Cattelan Antochaves de Lima, Rogério II. Barros da
Silva Santos Neto , Almir III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

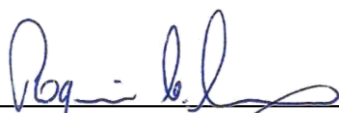
Declaro, LUCIANO CIELO , para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Luciano Cielo

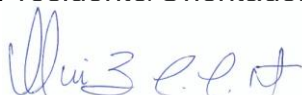
**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA EXCENTRICIDADE DE
CORDOALHAS ENGRAXADAS NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE
LAJES LISAS PROTENDIDAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 18 de fevereiro de 2021:



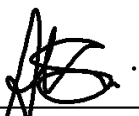
Rogério Cattelan Antochaves de Lima, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Almir Barros da Silva Santos Neto, Dr. (UFSM)
(Coorientador)



André Lübeck, Dr. (UFSM)



Alisson Simonetti Milani, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2021

Dedico este trabalho aos meus pais, Jair e Janete e ao meu irmão, Leandro, que sempre me incentivaram e ajudaram para que este sonho se tornasse realidade. E ao meu tio avô, Ovílio, *in memoriam*, que foi um grande incentivador para tudo em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer meus pais, Jair e Janete, por dedicar todo esforço possível para que pudessem me possibilitar a oportunidade de focar nos estudos, desde a época do Ensino Fundamental e principalmente a partir do início do Ensino Médio.

Agradeço ao meu irmão, Leandro, por me dar suporte sempre, em todos os sentidos e momentos possíveis, do período de faculdade e atualmente no mestrado.

Agradeço aos demais membros da minha família, representados pelo nome da tia Neli e da nona Redenta, que com a união e apoio de todos foram a base para minha formação pessoal.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Rogério Cattelan Antochaves de Lima, pela oportunidade da vaga para ser seu orientado, pelo auxílio em definição e delimitação do tema da pesquisa, pelo alto nível de exigência e ajuda no decorrer dos estudos.

Agradeço ao meu coorientador, professor Dr. Almir Barros da Silva Santos Neto, por acreditar na ideia do assunto da pesquisa desde o início, auxiliar em todas etapas da dissertação, cobrança pelo melhor resultado possível e entendimento do que era possível ser oferecido.

Agradeço aos professores, Dr. André Lübeck e Dr. Alisson Simonetti Milani, por aceitarem o convite de participar na banca de defesa final e sugestões oferecidas, na etapa da qualificação.

Agradeço ao meu amigo Glédson Rodrigues, a pessoa que me apresentou, primeiramente, a oportunidade de fazer o mestrado na UFSM e todo auxílio que me forneceu para que eu pudesse conseguir a vaga e seguir no decorrer dos estudos.

Agradeço ao meu amigo e colega de algumas matérias, Filipe Gimenez Ramos, pelo incentivo em fazer o mestrado, inúmeras caronas e viagens à Santa Maria para as aulas, auxílio e conselhos durante todo o período que precedeu esta jornada.

Agradeço novamente ao Filipe Gimenez Ramos, mas agora como sócio de escritório, e também ao Marcus Thompsen Primo pelo incentivo e total apoio para as viagens às aulas, auxiliando para conciliar as tarefas do escritório com os estudos.

Agradeço ao amigo, Luka Bornes, pela parceria de um semestre de viagens às aulas, que tornavam as horas de estrada muito mais leves e agradáveis.

Agradeço aos meus amigos, representando todos pelo nome de Gustavo Kraemer, Paola Rudek e Ronise Wentz, por me incentivarem e apoiarem nos momentos que eu não conseguia participar das confraternizações e receptividade, de quando voltava de um longo dia de aulas e viagem.

Agradeço a minha namorada, Nadine Freddi, pelo incentivo, apoio e compreensão, principalmente nesta reta final para conclusão das atividades necessárias.

Agradeço a amiga e engenheira civil, professora Dra. Ana Paula Maran, por me auxiliar no decorrer da pesquisa e especialmente na fase final para o aprimoramento do trabalho.

Agradeço a Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI-SA) pela formação acadêmica que me auxiliou para que eu pudesse conseguir uma das vagas para ingressar no Mestrado.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pelo apoio, pela infraestrutura das aulas e por toda credibilidade que a Instituição representa.

Agradeço a todos e a Deus, que direta ou indiretamente me auxiliaram até o presente momento.

Não dependa da motivação. Dependenda de hábitos e da disciplina. Essa é a dupla mais eficaz para realizar seus sonhos.

Eduardo Tevah

RESUMO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA EXCENTRICIDADE DE CORDOALHAS ENGRAXADAS NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LAJES LISAS PROTENDIDAS

AUTOR: Luciano Cielo

ORIENTADOR: Rogério Cattelan Antochaves de Lima

COORIENTADOR: Almir Barros da Silva Santos Neto

O correto posicionamento das cordoalhas na montagem e execução de lajes em concreto protendido é imprescindível para que o sistema estrutural apresente o comportamento real *in loco* conforme o que foi projetado, sem alterações nas tensões atuantes na estrutura, evitando o surgimento de manifestações patológicas, como fissuras não previstas, deslocamentos verticais excessivos, redução na capacidade de carga ou, até mesmo, o colapso da estrutura, em casos mais extremos. Neste estudo, realizou-se o dimensionamento de quatro modelos arquitetônicos distintos, no sistema estrutural de lajes lisas em concreto protendido não aderente, com cordoalhas engraxadas, sendo posteriormente inseridas variações nas excentricidades verticais, e assim, analisar as novas tensões de pré compressão, tensões nas faces inferior e superior, deslocamentos verticais, balanceamentos de cargas e armaduras passivas das lajes. Ao final do trabalho, pode-se verificar que a redução das excentricidades verticais na face inferior da laje, proporcionaram maiores perdas de tensões aplicadas pela protensão, em relação a modificação das excentricidades da face superior, apresentando diminuições nos balanceamentos de cargas, aumentos nos deslocamentos verticais e nas tensões normais de tração nas faces da laje, principalmente, ultrapassando os limites normativos da ABNT NBR 6118:2014 para as tensões máximas admissíveis na posição sobre os pilares, na face superior. Tendo em vista que, os valores dos critérios analisados, mantiveram-se atendendo os limites especificados, o máximo aumento dos valores de cobrimentos, em relação as excentricidades das cordoalhas nas faces das lajes, é de 16,7%.

Palavras-chave: concreto protendido, protensão não aderente, excentricidade de cordoalhas, manifestações patológicas.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE VARIATION OF EXCENTRICITY OF UNBONED TENDONS ON THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF POST-TENSIONED FLAT SLABS

AUTHOR: Luciano Cielo

ADVISOR: Rogério Cattelan Antochaves de Lima

CO-ADVISOR: Almir Barros da Silva Santos Neto

The correct positioning of the tendons in the assembly and execution of prestressed concrete slabs is essential for the structural system to present the real behavior in place as designed, without changes in the stresses acting on the structure, avoiding the appearance of pathological manifestations, such as unforeseen cracks, excessive vertical displacements, reduced load capacity or even the collapse of the structure, in more extreme cases. In this study, four distinct architectural models were dimensioned, in the structural system of flat slabs in post-tensioned concrete, with unbonded tendons, and later variations in vertical eccentricities were inserted, and thus, to analyze the new pre-compression stresses, stresses on the lower and upper faces, vertical displacements, load balancing and passive reinforcement of the slabs. At the end of the work, it can be seen that the reduction of vertical eccentricities on the lower face of the slab, provided greater losses of stresses applied by prestressing, in relation to the modification of the eccentricities of the upper face, showing decreases in load balancing, increases in displacements vertical and normal tensile stresses on the slab faces, mainly, exceeding the normative limits of ABNT NBR 6118:2014 for the maximum allowable stresses in the position on the columns, on the upper face. Bearing in mind that, the values of the analyzed criteria, remained in compliance with the specified limits, the maximum increase in the values of overlayings, in relation to the eccentricities of the tendons on the faces of the slabs, is 16,7 %.

Keywords: prestressed concrete, post-tensioned prestressed concrete, eccentricity of tendons, pathological manifestations.

LISTA DE FIGURAS

APRESENTAÇÃO

Figura 1 - Produção de cordoalhas engraxadas CP 190 RB pela Belgo Bekaert Arames no Brasil entre 2009 e 2018.....	20
Figura 2 - Deformação dos espaçadores de apoio pontual durante a concretagem: (a) - Manuseio da mão de obra em contato com a armadura. (b) – Espaçador danificado e mal posicionado.	21
Figura 3 - Zonas de esforços em uma peça de concreto uniformemente carregada.	25
Figura 4 - Cargas balanceadas devido à protensão aplicada internamente.....	26
Figura 5 - Comportamento de uma viga de concreto armado.....	26
Figura 6 - Comportamento de uma viga de concreto protendido.	27
Figura 7 - Montagem de laje nervurada com protensão não aderente.....	29
Figura 8 - Laje com protensão não aderente montada em um edifício.	29
Figura 9 - Viga com protensão não aderente.....	30
Figura 10 - Posicionamento das cordoalhas e fixação das placas de ancoragem. ..	37
Figura 11 - Modelo de tensões aplicadas pelo cabo tensionado.....	40
Figura 12 - Ondulações do cabo e bainha de polietileno entre apoios.....	41
Figura 13 - Deformação imediata do concreto tensionado.....	42
Figura 14 - Perdas imediatas de protensão.	42
Figura 15 - Posicionamento da ancoragem passiva no interior de uma viga.	44
Figura 16 - Fixação da placa de ancoragem ativa na forma.	44
Figura 17 - Cordoalhas excêntricas posicionados na laje.	45
Figura 18 – Disposição de cordoalhas em uma laje.	45
Figura 19 - Falha no posicionamento da face inferior das cordoalhas na laje.....	47
Figura 20 - Falha no posicionamento da face superior das cordoalhas na laje.....	47
Figura 21 - Cordoalhas posicionados em curva.....	48
Figura 22 - Reparo estrutural em laje com protensão.....	50
Figura 23 - Processo de troca de cordoalha após rompimento.....	51
Figura 24 - Fluxograma com as delimitações da pesquisa.	52
Figura 25 - Layout das cordoalhas engraxadas para as laje lisas.....	54
Figura 26 - Pontos de redução da excentricidade para o Topo.....	55

Figura 27 - Pontos de redução da excentricidade para o Base.....	56
Figura 28 - Pontos de redução da excentricidade para o Crítico.	56
Figura 29 - Posicionamento vertical das cordoalhas na laje.	57
Figura 30 - Disposição vertical do perfil das cordoalhas no dimensionamento de referência do Modelo M 7,0 (medidas em mm).	58
Figura 31 - Linhas de suporte e regiões tributárias na laje.	62
Figura 32 - Análise com os valores das tensões de pré compressão da laje para a laje M 9,0 – H 0 (valores em MPa).....	63
Figura 33 - Apresentação da análise das tensões normais na face inferior para a laje M 7,0 - H 0 (valores em MPa).....	64
Figura 34 - Tensões normais médias na face superior da laje M 8,0 - H 0 (valores em MPa).	64
Figura 35 - Isovalores de deslocamentos verticais, para a laje M 7,0 – H 0 (valores em mm).....	65

ARTIGO

Figura 1. Deformação dos espaçadores de apoio pontual durante a concretagem: (a) - Manuseio da mão de obra em contato com a armadura. (b) – Espaçador danificado e mal posicionado.	85
Figura 2. Fluxograma com as delimitações da pesquisa.	87
Figura 3. Layout das cordoalhas engraxadas na laje lisa protendida.	89

LISTA DE QUADROS

APRESENTAÇÃO

Quadro 1 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.	35
Quadro 2 - Características básicas dos sistemas de protensão aderente e não aderente.	36
Quadro 3 - Relação entre vão livre e espessura da laje.	38
Quadro 4 - Modelos arquitetônicos com seus respectivos vãos entre pilares, relação índice de esbeltez e as espessuras das lajes.	53
Quadro 5 - Ponto de aplicação da variação de excentricidade e abreviação para cada caso.	55
Quadro 6 - Hipóteses das variações de excentricidades com suas nomenclaturas e os valores de redução das excentricidades.	57
Quadro 7 - Apresentação dos valores de cobrimentos das armaduras, cargas utilizadas e resistência característica à compressão do concreto.	59
Quadro 8 - Critérios analisados com os limites e respectivas fontes indicadas.	61

ARTIGO

Quadro 1. Modelos arquitetônicos com seus respectivos vãos entre pilares, relação índice de esbeltez e as espessuras das lajes.	88
Quadro 2. Ponto de aplicação da variação de excentricidade e nomenclatura para cada caso.	90
Quadro 3. Hipóteses das variações de excentricidades com suas nomenclaturas e os valores de redução das excentricidades.	90
Quadro 4. Apresentação dos valores de cobrimentos das armaduras, cargas utilizadas e resistência característica à compressão do concreto.	92
Quadro 5. Critérios analisados com os limites e respectivas fontes indicadas.	93

LISTA DE TABELAS

APRESENTAÇÃO

Tabela 1 - Verificação das tensões de pré compressão nas lajes.	66
Tabela 2 - Verificação da análise das tensões normais na face inferior nas lajes.	68
Tabela 3 - Verificação da análise das tensões na face superior nas lajes.	69
Tabela 4 - Análise dos deslocamentos verticais nas lajes.	70
Tabela 5 - Análise do balanceamento de cargas para as lajes.	72
Tabela 6 - Resultado armadura positiva das lajes.	72
Tabela 7 – Resultado da armadura negativa das lajes.	73

ARTIGO

Tabela 1. Verificação das tensões de pré compressão nas lajes.	94
Tabela 2. Verificação da análise das tensões normais na face inferior nas lajes.	96
Tabela 3. Verificação da análise das tensões na face superior nas lajes.	97
Tabela 4. Análise dos deslocamentos verticais nas lajes.	98
Tabela 5. Análise do balanceamento de cargas para as lajes.	99
Tabela 6. Resultado armadura positiva das lajes.	100
Tabela 7. Armadura negativa das lajes.	101

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – Normas para publicação na revista IBRACON de Estruturas e Materiais.....	106
--	-----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 JUSTIFICATIVA.....	19
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 Objetivo principal	22
1.2.2 Objetivos específicos	23
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	24
2. CONCRETO PROTENDIDO	25
2.1 UTILIZAÇÕES DO CONCRETO PROTENDIDO	28
2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS.....	30
2.3 SISTEMAS E NÍVEIS DE PROTENSÕES.....	34
2.4 FATORES INFLUENTES PARA A ESCOLHA DA PROTENSÃO.....	36
2.5 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO.....	37
2.6 PERDAS DE PROTENSÃO	38
2.7 PROCESSOS CONTRUTIVOS E MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS	43
3. METODOLOGIA	52
3.1 GEOMETRIA DAS LAJES LISAS PROTENDIDAS	53
3.4 ANÁLISES DO <i>SOFTWARE</i> DE DIMENSIONAMENTO.....	62
4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	66
4.1 TENSÕES DE PRÉ COMPRESSÃO.....	66
4.2 TENSÕES NORMAIS MÁXIMAS NA LAJE	67
4.3 DESLOCAMENTOS VERTICAIS	70
4.4 BALANCEAMENTO DE CARGAS.....	71
4.5 ARMADURAS PASSIVAS	72
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
5.1 CONCLUSÕES	74
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ARTIGO – ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA EXCENTRICIDADE DE CORDOALHAS ENGRAXADAS NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LAJES LISAS PROTENDIDAS	81

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é uma área que auxilia no desenvolvimento econômico de um país, é capaz de receber inovações tecnológicas e agregar novidades nos sistemas construtivos. Em virtude do excelente desempenho estrutural e das vantagens econômicas dos edifícios em concreto protendido não aderente, os Estados Unidos e outras regiões do mundo, como Austrália, Oriente Médio, América do Sul, Sudeste Asiático e Reino Unido, também incorporaram este sistema construtivo às suas construções (AALAMI, 2000; SANTOS, 2017; SILVA, 2018).

A implementação deste sistema construtivo somente foi inserido no American Concrete Institute ACI 318, em 1963 após a realização de diversas obras pelo mundo (AALAMI, 2000; KANG e BONDY, 2008).

No Brasil, de acordo com Carvalho (2017), o uso de lajes lisas com protensão não aderente teve início apenas no ano de 1997, sendo, portanto, empregado no país há pouco mais de 20 anos.

Conceitos arquitetônicos que primam por maiores vãos livres, a redução do 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).

Além disso, Aalami (2000) complementa que o desenvolvimento de aços de alta resistência, juntamente com a evolução de *softwares* de dimensionamento, provaram ser outro avanço decisivo na aplicação efetiva da protensão na construção civil.

Silva *et al.* (2018) contextualizaram que nos últimos anos houve uma evolução dos métodos construtivos empregados no Brasil, principalmente no que se refere às estruturas de concreto. Para Almeida (2001), o projetista de estruturas deve procurar sempre a estrutura mais econômica, que satisfaça os critérios de segurança e de bom comportamento em serviço.

Nas lajes lisas com protensão não aderente as cordoalhas são, na maioria das vezes, dispostas em formato parabólico, com excentricidades em relação as faces superior e inferior, visando aumentar ao máximo a eficiência para o balanceamento das cargas (LOUREIRO, 2006). Este fator traz a necessidade de montagem das cordoalhas o mais próximo possível das alturas verticais de projeto, visto que o

posicionamento vertical equivocado pode ocasionar o surgimento de manifestações patológicas, tais como flechas não previstas em projeto, ou até mesmo, o colapso da estrutura nos casos mais extremos (AALAMI, 1990; SILVA et al., 2018; ROMANICHEN e SOUZA, 2019).

A fixação das cordoalhas posicionadas com cobrimento inferior ao especificado em projeto, no ato de protensão, podem provocar manifestações patológicas, como o rompimento da capa de concreto. Quando as cordoalhas são posicionadas com um cobrimento superior ao especificado em projeto, pode ocorrer uma redução da eficiência estrutural da laje. Este comportamento acontece devido a redução da força de elevação das cordoalhas em relação às cargas atuantes, uma vez que as tensões atuantes nas cordoalhas são menores que as tensões dimensionadas em projeto (AALAMI e BOMMER, 1999).

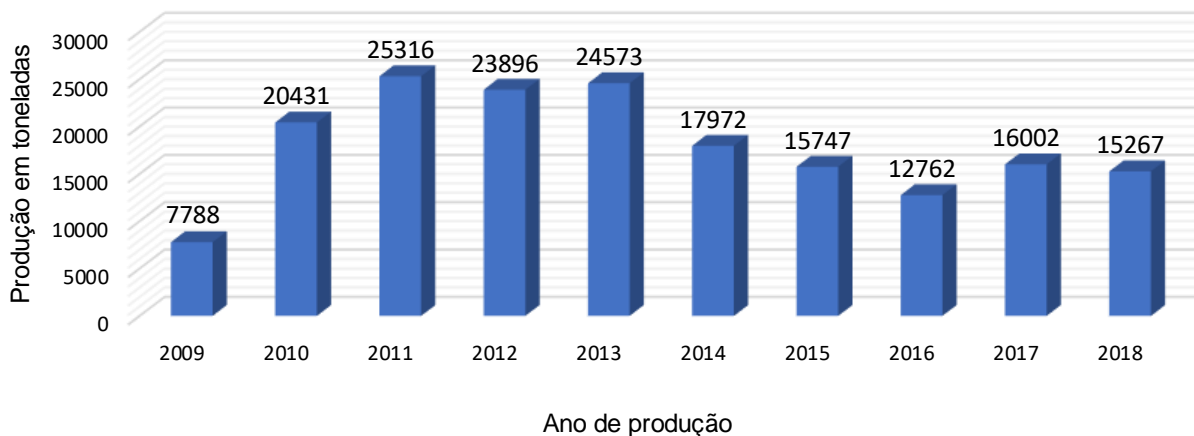
1.1 JUSTIFICATIVA

As obras que utilizam o sistema construtivo em concreto protendido estão em processo de crescimento (Aalami, 2000; Kang e Bondy, 2008; Hanai, 2005) e estudos sobre a influência da excentricidade das cordoalhas no dimensionamento estrutural e seus efeitos, quando as mesmas não são posicionadas perfeitamente em obra, conforme as especificações do projeto estrutural, são pouco encontrados na literatura.

De acordo com dados divulgados pela Belgo Bekaert Arames (2019), em 2009, a empresa produziu aproximadamente 8.000 toneladas do aço do tipo 7 fios para protensão não aderente, praticamente triplicando a produção no ano seguinte, com cerca de 20.000 toneladas produzidas em 2010. No ano de 2013, chegou ao seu maior volume histórico, devido as obras esportivas (Copa do Mundo de 2014 e Olimpíadas de 2016), com cerca de 25.000 toneladas. Nos anos seguintes apresentou uma queda, acompanhando a economia nacional, mesmo assim mantendo média próximo a 15.000 toneladas de produção por ano.

Na Figura 1 é apresentado os dados de produtividade divulgadas pela Belgo Bekaert Arames (2019) no Brasil durante os anos de 2009 a 2018.

Figura 1 - Produção de cordoalhas engraxadas CP 190 RB pela Belgo Bekaert Arames no Brasil entre 2009 e 2018.



Fonte: Adaptado de BelgoBekaert Arames (2019).

Estes dados de aumento anual da produção de cordoalhas no país, fundamentam a necessidade de estudos na área, visando apresentar o porquê, com informações técnicas, da necessidade da montagem das cordoalhas, o mais próximo possível, do especificado nos projetos estruturais.

De maneira geral, a mão de obra nacional da construção civil tem em sua rotina a montagem de lajes em concreto armado do tipo maciças, com vigotas treliçadas ou lajes nervuradas. Devido aos sistemas tradicionais, o emprego do sistema em protendido exige treinamento e acompanhamento da mão de obra, para garantir a correta maneira de montagem do sistema, visando agilizar a aprendizagem e evitar inconformidades com o projeto (SANTOS, 2017).

O mesmo autor enfatiza que durante a etapa de montagem, devem ser combatidas as variações e os danos dos espaçadores de apoio pontual, pois são eles os responsáveis por sustentar as cordoalhas na posição especificada em projeto.

Estes espaçadores são fornecidos industrialmente nos modelos plásticos ou de aço, com controle rigoroso no processo de produção industrial da altura de cada unidade. Contudo, quando a produção destes espaçadores de apoio pontual são feitos em obra, com dobra de barras de aço, o controle da produção é variável, apresentando alterações nas alturas (ALMEIDA, 2001).

Além disso, situações como a deformação decorrente do contato da mão de obra com a armadura e o dano causado pela mangueira de concretagem são

circunstâncias recorrentes visualizadas nos canteiros de obras, como mostram as Figuras 2 (a) e 2 (b), respectivamente.

Figura 2 - Deformação dos espaçadores de apoio pontual durante a concretagem: (a) - Manuseio da mão de obra em contato com a armadura. (b) – Espaçador danificado e mal posicionado.



(a)

(b)

Fonte: Autor (2020).

Situações como estas podem acarretar um posicionamento vertical incorreto da altura das cordoalhas em obra, em desacordo com os valores especificados em projeto. Ainda, mesmo havendo o controle e o cuidado com relação aos aspectos citados anteriormente, há também o próprio erro humano no posicionamento dos 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.

Embora os cuidados durante a concretagem sejam enfatizados na literatura, principalmente no foco para evitar modificações nas alturas dos espaçadores de apoio pontual, não há nenhum limite normativo que oriente o projetista no sentido para uma tolerância aceitável, caso algum tipo de variação venha a acontecer (AALAMI, 2014).

Cauduro (2002) recomenda que desvios verticais da posição das cordoalhas sejam tolerados até $\pm 0,5$ cm em concretos que não ultrapassem a espessura de

20,0 cm e a tolerância máxima de +/- 1,0 cm em concretos com espessura entre 20,0 cm e 60,0 cm. Além disso, o autor 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.

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; PFEIL, 1984).

Os problemas provenientes deste fator podem ser relacionados com o surgimento de situações, tais como: fissuração da laje, deslocamentos verticais excessivos, tensões atuantes divergentes com as calculadas em projeto, com maiores índices de tração no elemento estrutural ou, inclusive, excesso de compressão (NAWY, 2002).

Pode-se ainda citar o deslocamento do concreto em função de menores cobrimentos, redução da capacidade de carga devido às reduções de excentricidades das cordoalhas e a aceleração no processo de corrosão do aço em virtude da falta de cobertura (CAVACO et al.; XIN, 2012).

As diversas situações rotineiras, já apresentadas, que acontecem nos canteiros de obra nas etapas de montagem das cordoalhas preocupam pelas possíveis manifestações patológicas, citadas, que possam surgir nas lajes.

O aumento da utilização do sistema em concreto protendido, no cenário nacional da construção civil, os variados problemas, já citados, rotineiros nas obras e, a carência de estudos científicos, que apresentam valores admissíveis para variações das alturas das cordoalhas, em obra, em relação ao especificado em projeto estrutural, são os três principais fatores que justificam a necessidade desta pesquisa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal desta pesquisa é analisar a influência, no dimensionamento estrutural, da variação das excentricidades verticais de cordoalhas em lajes lisas protendidas não aderentes para diferentes vãos entre pilares.

1.2.2 Objetivos específicos

Em decorrência do objetivo principal, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Verificar as variações nos resultados dos critérios de tensões normais nas faces inferior e superior da laje, tensões de pré compressão, deslocamentos verticais e armaduras passivas nos modelos avaliados;
- b) Analisar a mudança nos valores de balanceamento de cargas decorrentes da variação de excentricidades verticais das cordoalhas;
- c) Definir um valor máximo aceitável de variação na excentricidade vertical das cordoalhas, em lajes lisas com cordoalhas engraxadas em concreto protendido não aderente, para os diferentes modelos arquitetônicos e hipóteses desenvolvidas nesta pesquisa.

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O presente trabalho delimita-se à análise da influência, no dimensionamento estrutural, da variação das excentricidades verticais de cordoalhas em lajes lisas protendidas não aderentes, para diferentes vãos entre pilares. As cordoalhas utilizadas para a pesquisa foram unicamente do tipo CP 190 RB Ø 12,7 mm e concreto com resistência característica à compressão em 35 MPa. As espessuras das lajes foram mantidas proporcionais, a partir de um mesmo índice de esbelteza, com valores $L/42$.

Foram criadas hipóteses de variações das excentricidades e casos distintos de locais de aplicação destas mudanças nas alturas. No caso do Topo, foram alteradas as alturas das excentricidades dos espaçadores de apoio pontual exclusivamente no topo dos pilares, o caso Base variaram-se as alturas apenas na face inferior da laje e, por fim, o caso Crítico, foram aplicadas reduções das excentricidades da face inferior e superior, simultaneamente.

Foram aplicadas hipóteses de variações das alturas nos três casos. Primeiramente foi dimensionado os modelos de referência e, a partir destes, fez-se as modificações das alturas em 0,5 cm, 1,0 cm, 1,5 cm e 2,0 cm nos espaçadores.

Em cada modelo arquitetônico foram analisadas as tensões de pré compressão, tensões nas faces superior e inferior, balanceamento de cargas, deslocamentos verticais e também as armaduras passivas positivas e de flexão negativa das lajes. Nos dimensionamentos não foram analisados os efeitos de punção na ligação entre laje e pilar.

Por fim, fez-se um compilado dos resultados das variações que atenderam aos limites normativos apresentados na pesquisa e definido um limite máximo tolerado de variação de excentricidade de cordoalhas para os modelos arquitetônicos estudados.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação possui estrutura dividida em 5 capítulos e, por fim, um artigo, conforme é apresentado na sequência a seguir.

No capítulo 1 é apresentada uma introdução do trabalho, contemplando contextualização, a importância do tema e a justificativa pela lacuna de pesquisa, além de definir os objetivos deste trabalho e suas delimitações. A revisão da literatura, no Capítulo 2, apresenta conceitos e o comportamento do concreto protendido, utilizações do sistema, vantagens e desvantagens em relação ao concreto armado, define os sistemas e os níveis de protensão, fatores influentes para a escolha da protensão, critérios de dimensionamento, processos construtivos e manifestações patológicas.

No capítulo 3 estão descritas as etapas da metodologia da pesquisa, iniciando com um fluxograma, após subitem com a geometria das lajes lisas protendidas, materiais utilizados, critérios de dimensionamento, layout das cordoalhas e efeitos causados na variação das excentricidades. O capítulo 4 expõe os resultados dos dimensionamentos realizados para os diferentes modelos arquitetônicos e discussões sobre os dados encontrados.

A dissertação finaliza no capítulo 5, apresentando as considerações finais, conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros. Por fim, as referências bibliográficas citadas ao longo do texto constam em seguida. Posteriormente, é apresentado um artigo, em formato para publicação na revista Ibracon de estruturas e materiais, com a mesma delimitação da pesquisa da dissertação.

2. CONCRETO PROTENDIDO

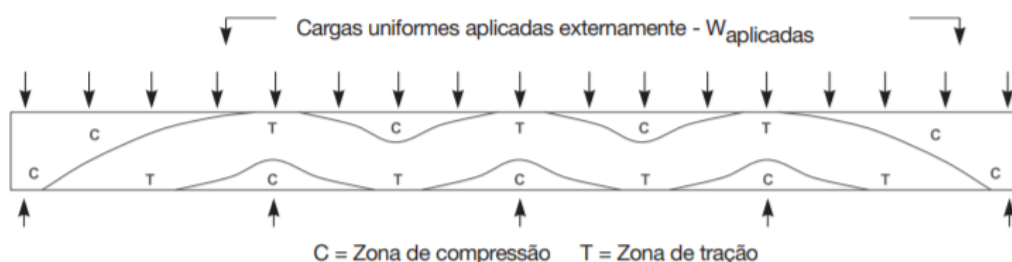
Pfeil (1984) define protensão como sendo um artifício de introduzir, numa estrutura, um estado prévio de tensões, de modo a melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob ação de diversas solicitações.

Elementos em concreto protendido são definidos pela ABNT NBR 6118:2014 como sendo aqueles nos quais parte da armadura é previamente alongada por equipamentos especiais de protensão com a finalidade de, em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura e propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado limite último.

Bastos (2006) define o concreto protendido como sendo um refinamento do concreto armado, onde a premissa básica é aplicar tensões prévias de compressão nas regiões da peça que, serão tracionadas, pela ação do carregamento externo aplicado. Assim, são diminuídas as tensões de tração ou, até mesmo, anuladas pelas tensões de compressão pré-existentes ou pré-aplicadas, podendo contornar a característica negativa de baixa resistência do concreto à tração.

Na Figura 3, conforme Cauduro (2002), são apresentados os esforços nas zonas de tração e compressão do concreto, em um elemento com carregamentos externos uniformes e apoio (pilares) distribuídos com mesmo espaçamento. De acordo com estes esforços é que os cabos de protensão são lançados, buscando combater estas tensões e equilibrar a peça.

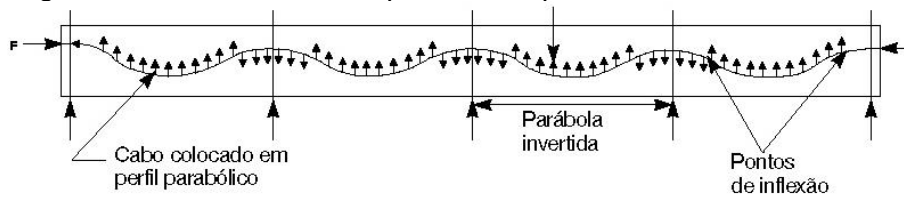
Figura 3 - Zonas de esforços em uma peça de concreto uniformemente carregada.



Fonte: Adaptado de Cauduro (2002).

A Figura 4 apresenta o comportamento das cordoalhas sob efeito de protensão, buscando combater os esforços de tração o qual o concreto está submetido, visando assim, balancear as cargas atuantes com a força aplicada pelos cabos.

Figura 4 - Cargas balanceadas devido à protensão aplicada internamente.



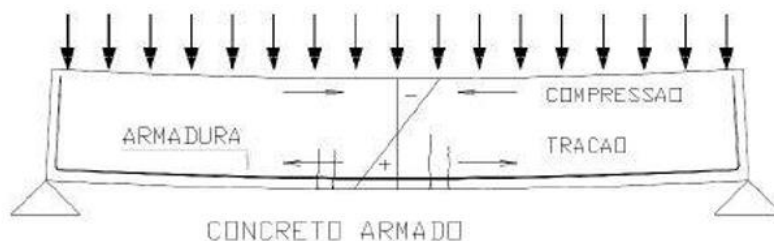
Fonte: Adaptado de Cauduro (2002).

Conforme Pfeil (1984), o artifício da protensão tem uma importância única no caso do concreto, visto que é um dos materiais da construção mais importantes, pois utiliza elementos como cimento, areia, brita e água que são de baixo custo e facilmente encontrados no mercado da construção civil.

Por outro lado, o concreto tem pequena resistência a tração, na ordem de 10% da resistência à compressão. A resistência a tração, além de pequena, é pouco confiável, pois quando a execução não é de boa qualidade o material pode sofrer fissuras, que eliminam a resistência a tração antes dos esforços solicitantes atuarem (PFEIL, 1984).

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados o comportamento de uma viga biapoiada, em concreto armado e em concreto protendido, respectivamente, visando apresentar como se comportam os esforços atuantes no elemento.

Figura 5 - Comportamento de uma viga de concreto armado.



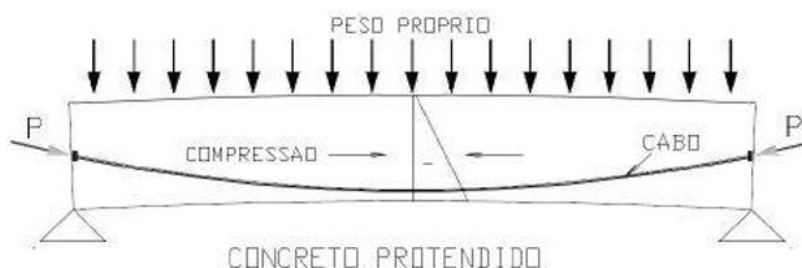
Fonte: Adaptado de Cauduro (2002).

Conforme apresenta a Figura 5, na face inferior da viga, região com tensão normal de tração, surge a fissuração, em virtude da flexão do elemento estrutural. Nos elementos em concreto armado, o aço adere ao concreto e passa a combater estas tensões atuantes após a desforma (BASTOS, 2006).

Nos elementos estruturais em concreto protendido, as cordoalhas são lançadas, geralmente, como é apresentado no layout vertical da Figura 6,

assemelhando-se aos momentos fletores da viga, fazendo com que após a protensão o concreto seja comprimido, eliminando as tensões de tração e, conseqüentemente, a fissuração (CAUDURO, 2002).

Figura 6 - Comportamento de uma viga de concreto protendido.



Fonte: Adaptado de Cauduro (2002).

O concreto é um material com propriedades distintas quando comparado as tensões aceitáveis de compressão e tração, podendo melhorar o desempenho aplicando-se compressão, introduzindo forças através da compressão, nas regiões onde as tensões produzem tração (CHOLFE e BONILHA, 2018).

Melges (2001) explica que com o intuito de reduzir ou mesmo eliminar as fissuras devido à tração, aplica-se uma força axial ou excêntrica no elemento na direção longitudinal. O elemento estrutural sem fissuras apresenta maior resistência à flexão, à torção e, também, ao cisalhamento.

No concreto armado, composto geralmente pela armadura longitudinal em barras de aço, é preciso retirar o escoramento da estrutura para o concreto que envolve as barras de aço comece a deformar e o sistema passe a atuar conforme o dimensionamento.

Todavia, no concreto protendido, mesmo com escoramento, a armadura longitudinal principal já está sob carga. Isto ocorre porque o aço de protensão é tracionado por macacos hidráulicos externos à estrutura e, dessa maneira, a armadura entra em ação independentemente da movimentação do concreto (CARVALHO, 2017).

Segundo Silva (2003), o controle da fissuração no concreto é importante para a segurança estrutural em serviço do elemento, condições de funcionalidade, estética, durabilidade e impermeabilidade.

Conforme Loureiro (2006), é importante notar que as lajes em concreto protendido passam por uma grande avaliação no ato da protensão: a cordoalha está submetida a uma tensão máxima de tração, normalmente 80,0% da sua tensão de ruptura e a força de compressão no concreto na região das ancoragens também é máxima, quando a resistência do concreto ainda é da ordem de 65,0% de sua resistência última.

2.1 UTILIZAÇÕES DO CONCRETO PROTENDIDO

Conforme Aalami (1990), desde que tiveram o início de suas utilizações nos Estados Unidos, há aproximadamente meio século, as lajes de concreto protendido tornaram-se um dos principais sistemas para a maioria dos tipos de edifícios.

São utilizados elementos em concreto protendido para os mais variados casos e situações de aplicações. Geralmente associa-se o sistema às obras de arte como as pontes e viadutos, onde os elementos estruturais apresentam dimensões imponentes. Com o advento do concreto protendido não aderente, a utilização do sistema alavancou mundialmente, principalmente na área das edificações (AALAMI, 2014).

Conforme Collins e Mitchell (1987), Hanai (2005) e Aalami (2014) pode ser utilizado protensão nos portos em caixões flutuantes, cais de atracação, diques secos, plataformas marítimas de petróleo, pistas de aeroportos, piscinas, estações de tratamento de esgoto, reservatórios, barragens, silos, radiers, pisos industriais e tirantes de contenção em solo ou rocha. Além de pisos industriais e comerciais, artefatos de concreto como estacas, dormentes, postes, vigotas, pré-lajes, mourões e na recuperação de estruturas.

Segundo Carvalho (2017), o sistema em concreto protendido pode ser utilizado nas fundações, como estacas pré-moldadas, radiers, vigas baldrames, reforço de blocos de fundação com tamanho elevado e em pavimentos sobre o solo. O autor também comenta que pode ser utilizada a protensão em lajes, vigas, coberturas, painéis de fechamento, pontes em balanço, pontes estaiadas e em alguns outros tipos de estruturas, como silos, reservatórios, contenção de taludes, monumentos e passarelas.

A busca por vãos maiores, redução de pilares e vigas, especialmente em edifícios e residências de alto padrão, são fatores favorecidos pelo uso de lajes protendidas. É nesta área da construção civil, principalmente, que as lajes maciças com protensão não aderentes estão sendo implantadas com êxito (LOUREIRO, 2006).

A laje maciça é empregada devida a facilidade de montagem e bom retorno custo-benefício. No entanto, para algumas situações particulares, buscando alcançar maiores vãos e redução de peso próprio podem ser adotadas outras soluções, como a laje nervurada protendida, Figura 7.

Figura 7 - Montagem de laje nervurada com protensão não aderente.



Fonte: Autor (2019).

Almeida (2001) e Silveira (2002) afirmam que as cordoalhas engraxadas e plastificadas vêm sendo amplamente utilizadas no mundo em placas para fundações, pisos industriais e em edificações comerciais e residenciais. Na Figura 8 é mostrada a utilização do sistema em uma laje de edifício.

Figura 8 - Laje com protensão não aderente montada em um edifício.



Fonte: Autor (2018).

Concomitantemente ao aumento da utilização de lajes em concreto protendido não aderente, verifica-se também a utilização em vigas neste sistema, buscando auxiliar na redução dos deslocamentos e diminuição da seção, como é apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Viga com protensão não aderente.



Fonte: Autor (2019).

2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS

As estruturas em concreto com protensão promovem diversos benefícios, tais como redução da fissuração, possibilidade de vãos maiores e menor taxa de armadura, em relação a lajes de mesma espessura, em concreto armado. Após os estudos de Freyssinet solucionando o problema de relaxação do aço ao longo do tempo, o sistema passou a ter maior confiabilidade na cordoalha e a difusão com a implantação em obras (AALAMI, 1990).

Emerick (2002), afirma que para vãos superiores a 7,5 metros a utilização de lajes protendidas são financeiramente mais viáveis ao invés do sistema em concreto armado.

Além das vantagens econômicas, a eliminação das vigas do piso e a redução no peso e na altura da construção tornam o pós-tensionamento particularmente adequado para regiões de alto risco sísmico (AALAMI, 1990).

Conforme Cholfe e Bonilha (2018), a protensão traz melhorias no desempenho estrutural no estado limite de serviço e na segurança das estruturas de concreto, com

destaque para a durabilidade, visto que a ausência ou redução da fissuração garante maior proteção das armaduras, inibindo o fenômeno da corrosão, que é um dos grandes responsáveis pela diminuição da vida útil das estruturas.

Takata (2017) e Carvalho (2017) analisam que a manutenção nas estruturas protendidas torna-se menos onerosa, visto que a fissuração é impedida na região de tração do concreto.

Com estas características, as lajes protendidas se tornam adequadas também para os locais de classes de agressividade ambiental forte (marinha) e muito forte (respingos de maré), ou seja, CAA III e IV, conforme ABNT NBR 6118:2014.

Para Loureiro (2006), o uso de materiais de alta resistência, cordoalhas CP 190 RB e concretos com f_{ck} maior ou igual a 30 MPa e, portanto, com maior módulo de elasticidade, contribui, também, para um melhor desempenho no Estado Limite de Serviço e maior resistência no Estado Limite Último.

De acordo com Pfeil (1983), as resistências do concreto utilizado nas protensões são até duas vezes maiores que as utilizadas em concreto armado e os aços nos cabos de protensão possuem resistência de três a cinco vezes maiores quando comparados aos usuais no concreto armado.

Com relação ao comparativo entre os aços utilizados, constata-se que a resistência das cordoalhas no concreto protendido chegam a quatro vezes mais, visto que, conforme a ABNT NBR 7483:2020, são utilizadas cordoalhas do tipo CP 190 ($f_{ptk} = 1900$ MPa) e CP 210 ($f_{ptk} = 2100$ MPa) e no concreto armado CA 50 ($f_{yk} = 500$ MPa) e CA 60 ($f_{yk} = 600$ MPa), segundo a ABNT NBR 6118:2014.

Segundo Hanai (2005), a utilização de materiais com altas resistências não são argumentos suficientes para garantir a total confiabilidade do sistema, visto que neste tipo de sistema construtivo, é importante ter um rigoroso controle de qualidade dos materiais e dos componentes executados. Os cuidados rigorosos devem iniciar nos cálculos do projetista e posteriormente por todas as etapas de execução.

Loureiro (2006) explica que as lajes em concreto protendido sem vigas permitem o uso de pés-direitos menores, resultando menor altura total do edifício ou no maior número de pavimentos. É comum nos estacionamentos de shopping centers o uso de pé-direito de 2,50 metros, visando diminuir as escavações dos subsolos e o comprimento das rampas de acesso.

O mesmo autor complementa que nestes casos, a adoção de lajes lisas protendidas ou de lajes cogumelos é a solução estrutural mais adequada, tendo em vista que os vãos a serem vencidos são da ordem de 8,0 metros. Nos edifícios residenciais e comerciais, o uso de lajes lisas protendidas permite grande flexibilização na utilização dos espaços e o menor número de pilares pode aumentar as vagas de garagem.

Segundo Melges (2001) e Veríssimo e Lenz Jr. (1998), as lajes lisas com ausência de vigas apresentam pequena rigidez à esforços horizontais, encontrados pela ação do vento, desaprumo e excentricidades. Isto pode comprometer a estabilidade global, por isso, utiliza-se sistemas de núcleos rígidos como pilares parede nos poços de elevador, escada e paredes estruturais.

Pfeil (1984) e Figueiredo Filho (1989) elencam algumas vantagens apresentadas pelo concreto protendido em relação ao concreto armado convencional, citadas a seguir:

- a) Reduz as tensões de tração provocadas pela flexão e pelos esforços cortantes;
- b) Reduz a incidência de fissuras;
- c) Reduz as quantidades necessárias de concreto e de aço, devido ao emprego eficiente de materiais de maior resistência;
- d) Permite vencer vãos maiores que o concreto armado convencional e para o mesmo vão possibilita reduzir a altura necessária da viga e/ou laje;
- e) Facilita o emprego generalizado de pré-moldagem, devido a protensão evitar fissuração durante o transporte;
- f) Durante a operação da protensão, tanto o concreto quanto o aço a tensões, geralmente maiores que as solicitantes no estado de serviço, fazendo com que haja uma espécie de prova de carga no elemento estrutural.

Loureiro (2006) afirma que a simplicidade de execução da fôrma plana, a facilidade de fixação das ancoragens individuais e de baixo peso, bem como, a agilidade no manuseio das cordoalhas engraxadas resulta numa maior rapidez de execução da estrutura. Além disso, a operação de protensão não aderente é simples e rápida, pois utiliza equipamentos mais leves quando comparadas à protensão aderente.

A cordoalha engraxada de \varnothing 12,7 mm, mais utilizada mundialmente, tem peso de 0,89 Kg/m, apresentando fácil manuseio na obra, visto que são lançadas individualmente, não prejudicando a trabalhabilidade (AALAMI, 2014; HANAI, 2005).

Segundo Aalami (2000), as lajes em concreto protendido são capazes de vencer grandes vãos utilizando pequenas espessuras quando comparadas aos sistemas em concreto armado, apresentando menor relação de altura sobre vão, ou seja, maior esbeltez.

Além da da tensão de pré compressão, a protensão balanceia grande parte das cargas permanentes e somente uma parte da carga total provoca flechas e tensões de tração no concreto (AALAMI, 2000).

As placas de ancoragem com as cunhas são os acessórios que garantem o tensionamento das cordoalhas durante a vida útil. Esse conjunto não apresenta proteção contra a corrosão, sendo necessário cuidados especiais quanto à fissuração do concreto e também que os cobrimentos sejam seguidos conforme preconiza a ABNT NBR 6118:2014.

Em lajes com concreto protendido não é indicado a realização de furos ou aberturas após a protensão executada, pois os furos podem danificar os cabos ou provocar novas tensões atuantes no elemento que anteriormente não estavam previstas, criando manifestações patológicas (AALAMI, 2014).

Como as lajes lisas não possuem vigas e os esforços de cisalhamento (punção) ocorrem no encontro com os pilares, faz-se necessário combater estes esforços. Segundo Pilakoutas e Li (2003) existem várias formas de evitar os problemas da punção.

Os autores elencam algumas soluções, como reduzir o carregamento aplicado, reduzir os vãos das lajes, aumentar a espessura total da laje, aumentar a espessura do pilar ou da laje apenas na região da ligação, aumentar o tamanho do pilar ou usar armadura de cisalhamento.

No entanto, exceto a última opção, são soluções propostas que interferem em fatores estéticos, custos, concepções arquitetônicas que inviabilizam a proposta inicial. Portanto, a solução mais usual para os casos que se verifica o problema de punção é a inserção de armadura para evitar o cisalhamento (PILAKOUTAS e LI, 2003).

2.3 SISTEMAS E NÍVEIS DE PROTENSÕES

Existem diferenças entre os sistemas e os níveis de protensão. Os sistemas de protensão condizem basicamente a protensão com aderência inicial, com aderência posterior e sem aderência. Os níveis de protensão contemplam a intensidade de protensão, dividida em parcial, limitada e completa (CARVALHO, 2017).

De acordo com Veríssimo e Lenz Jr. (1998), o sistema de protensão com aderência inicial é usualmente empregado na fabricação de pré-moldados de concreto protendido. O processo é todo realizado em pistas de protensão onde a armadura ativa é posicionada de forma retilínea, ancorada em blocos nas cabeceiras e tracionada antes mesmo do concreto ser lançado.

No caso da protensão não aderente, o tensionamento das cordoalhas é efetuado sobre o elemento de concreto já endurecido, sem que as cordoalhas tenham qualquer contato com o concreto, apenas as ancoragens e as cunhas possuem a função de manter a cordoalha protendida (VERÍSSIMO e LENZ JR., 1998).

Hanai (2005) e Carvalho (2017) colocam que neste método a cordoalha é envolta por uma camada de graxa e coberta por uma capa de polietileno com função de permitir o deslizamento livre do aço no interior do concreto.

Segundo Hanai (2005), na protensão com pós tração não aderente o pré-alongamento da armadura ativa é realizado após o endurecimento do concreto, sendo utilizados, como apoios, partes do próprio elemento estrutural. Mesmo assim, não há aderência com o concreto, ficando a armadura ligada ao concreto apenas em pontos localizados.

Contudo, os níveis de protensão estão relacionados aos níveis de intensidade da força de protensão com função de impedir ou limitar a fissuração em condições de uso. A ABNT NBR 6118:2014 preconiza que os níveis de protensão também estão relacionados à classe de agressividade ambiental assumida para a estrutura, às exigências relativas à fissuração e às combinações de ações de serviço.

Para Leonhardt e Monig (1978), o nível de protensão é definido para o caso de peças fletidas, como a relação entre o momento fletor de descompressão e o momento fletor característico máximo na estrutura.

No Quadro 1 são apresentadas as exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e a à orientação da armadura em função das classes de agressividade ambiental. Este é um dos fatores que auxiliam a definição do nível de protensão a ser usado.

Quadro 1 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	-
Concreto armado	CAA I CAA II e CAA III CAA IV	ELS-W WK \leq 0,4 mm ELS-W WK \leq 0,3 mm ELS-W WL \leq 0,2 mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 1 (Protensão parcial)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W Wk \leq 0,2 mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (Protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	ELS-F ELS-D	Combinação frequente Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (Protensão total)	Pré-tração com CAA III e IV	ELS-F ELS-D	Combinação rara Combinação frequente

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

As condições de protensão limitada devem ser atendidas em elementos com armadura pré-tracionada em ambientes de CAA II ou com armadura pós-tracionada em ambientes de CAA III e IV. Mesmo para classes de agressividade menores é recomendado a utilizado da protensão limitada, buscando deixar todo elemento estrutural com protensão suficiente para evitar a fissuração do concreto (SOUZA, 2018).

Hanai (2005) explica que na protensão limitada admitem-se tensões de tração, porém sem ultrapassar o estado limite de formação de fissuras. Com combinações quase-permanentes de ações, como por exemplo com peso próprio, protensão e cargas permanentes de longa duração (alvenaria, equipamentos fixos, empuxos), deve-se respeitar o estado limite de descompressão.

Da mesma maneira, as condições de protensão parcial devem ser atendidas no caso de elementos com armadura pré-tracionada em ambientes de CAA I ou com armadura pós-tracionada em ambientes de CAA I e II. Nas situações de protensão

parcial, é aceitável fissuração com abertura características de até 0,2 mm. O controle da fissuração assim é garantido por meio de armadura passiva.

2.4 FATORES INFLUENTES PARA A ESCOLHA DA PROTENSÃO

Atualmente, nas lajes de edifícios com utilização da protensão, na grande maioria dos casos opta-se pela utilização de cordoalha engraxada com protensão não aderente. Na utilização do sistema com protensão não aderente – cordoalhas engraxadas – o aço é envolto por uma capa de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) protetora, resistente as adversidades corriqueiras de obras e, quando sofre danos, é de fácil manutenção do material. Quando a capa de polietileno sofre cortes, como o concreto não pode entrar em contato com o aço, geralmente é colocado algum tipo de fita no trecho danificado para posterior liberação da concretagem (LOUREIRO, 2006; AALAMI, 2014).

No Quadro 2 são apresentadas as características básicas dos sistemas com protensão aderente e não aderente.

Quadro 2 - Características básicas dos sistemas de protensão aderente e não aderente.

SISTEMA ADERENTE	SISTEMA NÃO ADERENTE
Usa bainha metálica para até 4 cordoalhas por bainha, em trechos de 6 m com luvas de emenda e vedação.	Sem bainha metálica. As cordoalhas vêm de fábrica com graxa e bainha plástica contínua.
O manuseio (enrolar e desenrolar) é feito com quatro cordoalhas ao mesmo tempo (aproximadamente 3,2 kg/m).	O manuseio é feito com uma cordoalha por vez (cerca de 0,89 Kg/m)
Usa macaco de furo central que precisa ser enfiado pela ponta da cordoalha (aproximadamente 50 cm da face do concreto).	Usa macaco de dois cilindros que se apoia na cordoalha junto à face do concreto.
A protensão é feita em quatro níveis de pressão hidráulica, seguidas das respectivas leituras de alongamento, correção da tabela e medida da perda por acomodação da ancoragem.	A protensão é feita em uma só elevação de pressão, pois não há retificação da cordoalha (bainha justa).

Fonte: Cauduro (1997).

Como a capa protetora de PEAD já possui preenchimento de fábrica com graxa para diminuir a aderência com o cabo, reduzindo as perdas por atrito, no ato da protensão não se faz mais o uso de injeção de calda de cimento, como ocorre no uso de cabos de aço envoltos com bainha metálica.

Loureiro (2006) cita que a cordoalha engraxada tem coeficientes de atrito muito baixos, o que reduz consideravelmente as perdas por atrito ao longo dos cabos, resultando numa maior força efetiva de protensão.

Inclusive o autor explica que o conjunto cordoalha, graxa e capa de polietileno é relativamente delgado, possibilitando o uso de maiores excentricidades dos cabos na laje. Isto permite um aumento na amplitude e ganho na eficiência da aplicação da força dos cabos, em comparação às cordoalhas com bainhas metálicas.

Além disso, o macaco hidráulico possui peso menor quando comparado aos equipamentos utilizados para protensão aderente, possibilitando que uma pessoa consiga carregar e manusear o dispositivo.

Assim como as ancoragens passivas e ativas possuem dimensões pequenas, cerca de 6,0 x 13,0 cm cada placa de ancoragem, possibilitando a colocação entre as ferragens e fácil fixação na forma, como é apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Posicionamento das cordoalhas e fixação das placas de ancoragem.



Fonte: Autor (2019).

Nasser (1969) enfatiza que a força de protensão nas cordoalhas de protensão não aderente é suportada apenas pelas ancoragens nos dois extremos do elemento estrutural. Caso algum problema no conjunto de ancoragens, cunhas, concreto e cordoalhas seja detectado, pode ocorrer a ruptura total da estrutura, pois não há aderência em mais nenhum ponto no decorrer do elemento.

2.5 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

A ABNT NBR 6118:2014 recomenda que a espessura mínima de lajes lisas protendidas seja de 16 cm. Já a ACI 318:2019 não faz exigência de espessura mínima no caso de lajes protendidas, mas estipula limites para as flechas das mesmas.

A ACI 318:2019 recomenda que a esbeltez da laje tenha uma relação de vão sobre espessura menor ou igual a 42 para lajes de piso e $L/h \leq 48$ para lajes de forro.

De acordo com Emerick (2002), na prática utiliza-se uma relação muito próxima a apresentada no Quadro 3, onde geralmente para uma faixa econômica, entre 7 a 10 metros de vão livre em lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas, faz-se uso de uma espessura entre 16 e 24 cm.

Quadro 3 - Relação entre vão livre e espessura da laje.

Vão livre entre apoios (m)	Espessura mínima (cm)
Até 7,0	16
De 7,0 a 8,0	18
De 8,0 a 9,0	20
De 9,0 a 10,0	22
De 10,0 a 11,0	24

Fonte: Adaptado de Emerick (2002).

A disposição das cordoalhas distribuídas, segundo a ACI 318:2019, o espaçamento máximo entre a armadura deve ser de no máximo oito vezes a espessura da laje, não ultrapassando 150,0 cm. A ABNT NBR 6118:2014 exige o espaçamento máximo de seis vezes a espessura da laje, não ultrapassando 120 cm.

Conforme explica Nilson (1987), para cordoalhas não aderentes não é necessário concentrar os cabos na faixa dos pilares nas duas direções, pois a resistência à flexão das lajes com cordoalhas posicionadas nas duas direções parece estar mais relacionada com a taxa de armadura passiva aderente e a resistência total dos cabos, do que com a maneira de distribuição.

Loureiro (2006) explana que para minimizar as perdas na força axial de compressão e evitar grandes momentos nos pilares extremos, os elementos verticais de grande rigidez, como caixas de elevadores e pilares paredes, devem estar situados próximo ao centro da laje.

2.6 PERDAS DE PROTENSÃO

No momento da elaboração de um projeto estrutural deve-se calcular as perdas de protensão. Esse fenômeno ocorre ao longo da vida útil da estrutura e para todos os critérios de utilização.

De acordo com Veríssimo e Lenz Jr. (1998), a protensão introduz numa peça estrutural uma força inicial que está diretamente relacionada com o alongamento ocorrido na armadura ativa. O acionamento dos macacos hidráulicos, a liberação dos cabos e a transferência da força de protensão originam uma série de efeitos que conduzem a uma diminuição da força inicial de protensão.

Ao longo do cabo há uma diminuição do esforço de protensão, sendo de responsabilidade do projetista calculá-las para que em todas as combinações de carregamentos e em todas seções do elemento, tanto as condições de ELS quanto ELU sejam atendidas. Estas diminuições de esforços de protensão que ocorrem ao longo dos cabos são as chamadas perdas de protensão (CARVALHO, 2017).

O autor ainda coloca que ao calcular uma peça protendida pode-se estimar as perdas de protensão, onde é possível implantar uma sobretensão que deve ser aplicada visando compensar as perdas, suficientes para neutralizar em todo ou em parte os efeitos de tração causados pelos carregamentos na estrutura.

As perdas são normalmente classificadas como imediatas e diferidas ou ao longo do tempo. As imediatas ocorrem sobretudo devido a forma como é realizado o procedimento da protensão e das propriedades elásticas do aço e do concreto. Já as perdas diferidas se devem principalmente as propriedades visco elásticas tanto do concreto como do aço (HANAI, 2015; CARVALHO, 2017).

De acordo com Caro et al. (2013), Nawy (2002) e Hanai (2005), considerando a protensão não aderente com cordoalhas engraxadas, as três principais perdas imediatas são:

- I. Perda por atrito, normalmente devido ao contato do cabo com a bainha;
- II. Perda por deformação das ancoragens, passiva e ativa;
- III. Perda por deformação imediata do concreto.

Fazendo a mesma análise para as perdas diferidas, podem ser apresentadas como:

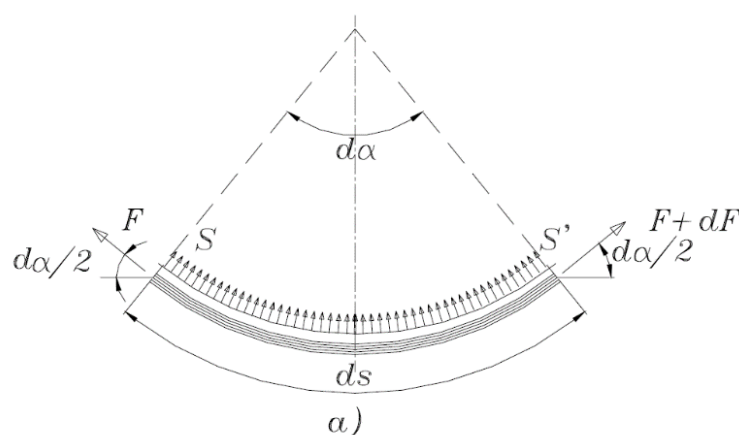
- I. Perda por retração do concreto;
- II. Perda por efeito de fluência do concreto;
- III. Perda por relaxação da armadura de protensão.

Hurst (1998) explica que como a probabilidade de o carregamento de projeto ocorrer com seu valor total é pequeno, além de coeficientes de segurança embutidos

no dimensionamento, raramente se justifica a determinação das perdas com enorme acurácia. No entanto, segundo Montanari (1988), é necessário calcular as perdas por atrito, perdas por deformação lenta, retração e por fluência do concreto. Além disso, é preciso ter em mente o seu encurtamento elástico.

A primeira perda imediata citada, perda por atrito entre a cordoalha e bainha, acontece devido à tendência de retificação do cabo, apresentada na Figura 11. Isso faz com que em todos os trechos curvos existam forças radiais do cabo no concreto.

Figura 11 - Modelo de tensões aplicadas pelo cabo tensionado.

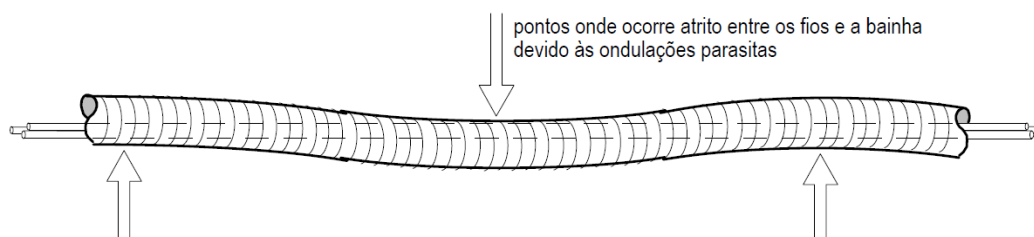


Fonte: Carvalho (2017).

Carvalho (2017) explica que com esta definição de forças radiais nos cabos curvos, entenderia-se que em cabos retilíneos não teriam forças de atrito, porém existem. Isto deve-se a maneira de posicionar a armadura, principalmente por duas causas, uma é que os espaçadores de apoio pontual que definem as excentricidades são dispostos geralmente a cada um metro, fazendo com que o cabo não fique perfeitamente reto, chamado de deformações parasitárias. Outro fator é a maneira de fixação das cordoalhas nos espaçadores de apoio pontual, pois geralmente usam pontos de arame que mesmo com pouca pressão, acabam aplicando alguma resistência no deslizamento do cabo dentro da bainha plástica.

Veríssimo e Lenz Jr. (1998) complementam que a sinuosidade da bainha é chamada ondulação parasita, ocorrendo tanto nos trechos curvos como nos retilíneos, devido à rigidez insuficiente, defeitos de montagem da armadura de protensão, insuficiência de pontos de amarração do cabo e ao empuxo do concreto durante a concretagem, como mostra a Figura 12.

Figura 12 - Ondulações do cabo e bainha de polietileno entre apoios.



Fonte: Veríssimo e Lenz (1998)

Confirma-se que apenas para o caso de pós tensão são contabilizadas as perdas por atrito, pois na pré tração os cabos são tensionados sem materiais que o envolvem. O fato de a cordoalha ser engraxada faz com que a perda por atrito seja pequena, porém mesmo que não haja aderência posterior, o cálculo da perda por atrito não é eliminado (CARVALHO, 2017).

Na sequência de perdas imediatas, a segunda citada, é a perda por acomodação da ancoragem. Quando se aplica a protensão, sempre há uma deformação da ancoragem no concreto, provocando uma diminuição de tensão efetiva aplicada no cabo.

Conforme Veríssimo e Lenz Jr. (1998), dependendo do dispositivo de ancoragem utilizado, no momento da liberação dos cabos dos macacos e, conseqüente, transferência dos esforços de protensão para a peça de concreto, ocorre uma acomodação das peças de ancoragem. Essas perdas também são chamadas de perda por encunhamento.

Romanichen e Souza (2019) analisam que os dispositivos de ancoragem dos fios e cordoalhas são normalmente compostos por cunhas ranhuradas que impedem que os fios retornem a sua posição original após tracionados. Normalmente, as cunhas de ancoragem em sistemas de pós-tensão sofrem uma acomodação/cravação que provoca uma perda de aproximadamente 6 mm no alongamento inicial das cordoalhas.

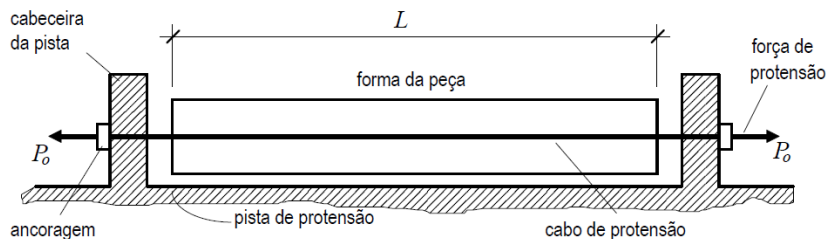
A terceira perda imediata citada é a perda por deformação imediata do concreto. Quando se protende um cabo, ele provoca uma deformação elástica no concreto (um encurtamento) que acaba provocando perda de protensão nos cabos já protendidos.

Veríssimo e Lenz Jr. (1998) explicam que ao receber a ação da força de protensão, a peça de concreto sofre uma deformação elástica imediata, encurtando-se. Concomitantemente, ocorre um encurtamento da armadura de protensão correspondente à um alívio de tensões nos cabos, ocorrendo uma perda de protensão.

Conforme Carvalho (2017), de um modo geral as perdas devido à deformação imediata do concreto são pequenas e acabam sendo, na maioria das vezes, desprezadas no dimensionamento.

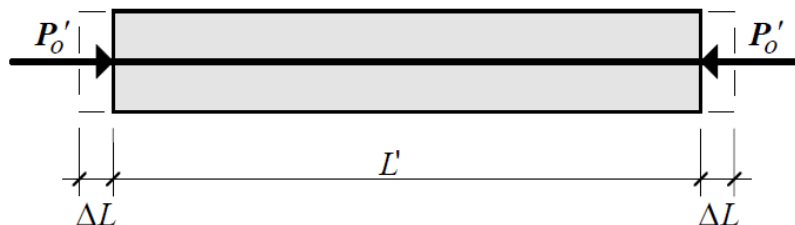
Nas Figuras 13 e 14 são ilustradas, respectivamente, as perdas por deformação imediata do concreto tensionado e, também, as perdas imediatas de protensão.

Figura 13 - Deformação imediata do concreto tensionado.



Fonte: Veríssimo e Lenz (1998).

Figura 14 - Perdas imediatas de protensão.



Fonte: Veríssimo e Lenz (1998).

As perdas ao longo do tempo são ocasionadas por fenômenos reológicos do concreto já endurecido e pelo aço tensionado. A armadura de protensão obtém a maior parte de esforço a partir do estiramento que é mantido através das ancoragens.

Dessa forma, caso a estrutura de concreto se deforme ao longo do tempo, parte do estiramento da armadura desaparece, ou seja, existe uma perda de protensão da armadura. Estas perdas se dão devido a retração e fluência do concreto.

Quando a armadura é tensionada e mantida nesta forma, existe uma tendência desta tensão diminuir com o tempo, fenômeno que causa perda por relaxação do aço (CARVALHO, 2017).

2.7 PROCESSOS CONTRUTIVOS E MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

Uma das grandes preocupações do sistema construtivo em concreto protendido são as possíveis ocorrências de manifestações patológicas advindas da má montagem e execução da protensão.

Um dos principais critérios influentes para o correto desempenho estrutural é o posicionamento vertical das cordoalhas. Autores como Aalami (1990), Hanai (2005), Xin e Xianyan (2012), Cavaco et al. (2017) e Romanichen e Souza (2019) citam diversas situações que podem acontecer em virtude destas variações, tais como:

- Fissuras;
- Deslocamentos excessivos;
- Tensões atuantes divergentes das calculadas em projeto, com maiores índices de tração ou, até mesmo, excesso de compressão;
- Deslocamento do concreto em função de menores cobrimentos;
- Menor capacidade de carga devido a menores excentricidades dos cabos;
- Processo de corrosão do aço acelerado em virtude da falta de cobertura nos cabos.

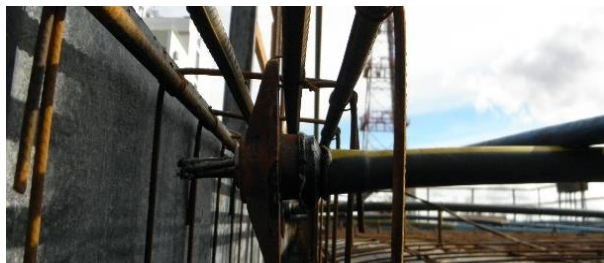
Conforme Aalami (2014), todas as etapas são importantes para o correto desempenho do sistema, desde o recebimento das cordoalhas na obra até a protensão e corte da última cordoalha, sempre com os mesmos cuidados e atenção.

A capa de polietileno protetora das cordoalhas em algum momento pode sofrer danos, fato que geralmente é solucionado envolvendo fita plástica para vedar a ranhura e impedir o contato do concreto com o aço (AALAMI, 2014).

Após o corte das cordoalhas nas dimensões especificadas em projeto, é efetuada a etapa de pré-blocagem com o objetivo de fixar em uma das extremidades das cordoalhas a placa de ancoragem com as cunhas para criar a zona de aderência

requerida envolvida pelo concreto (HANAI, 2005). Na Figura 15 é apresentado a cordoalha pré blocada fixada na posição de projeto especificada.

Figura 15 - Posicionamento da ancoragem passiva no interior de uma viga.



Fonte: Autor (2019).

Para que as cordoalhas sejam posicionadas na laje, é interessante que já esteja concluída a fixação da ancoragem ativa em uma extremidade da forma na correta posição vertical e horizontal, conforme projeto. A Figura 16 mostra esta etapa.

Figura 16 - Fixação da placa de ancoragem ativa na forma.



Fonte: Autor (2019).

Assim como em qualquer ponto do elemento estrutural faz-se necessário que as placas de ancoragem estejam fixadas de maneira que o eixo das cordoalhas possa ser posicionado conforme projeto, sem variações da excentricidade da cordoalha. Santos (2017) descreve que para facilidade de execução da montagem das cordoalhas na laje e protensão, as cordoalhas são colocadas exatamente no centro de gravidade da seção transversal da laje e conforme se distancia da borda da laje são formadas uma sucessão de parábolas até que chegue na outra extremidade, também em seu respectivo centro de gravidade da seção transversal.

Cauduro (2002) recomenda que as cordoalhas sejam fixadas na extremidade da ancoragem passiva e lançados até a ancoragem ativa, já com os espaçadores

verticais de apoio pontual posicionados, para que então sejam soltos os cabos sobre os mesmos e fixados, evitando mudanças da posição.

Na Figura 17 é apresentado o lançamento das cordoalhas com as excentricidades sendo dispostas em formato parabólico, conforme os momentos atuantes do elemento estrutural.

Figura 17 - Cordoalhas excêntricas posicionados na laje.



Fonte: Autor (2019).

De acordo com Almeida (2001), no projeto de estruturas protendidas quando os cabos têm uma geometria composta por trechos curvilíneos, geralmente descritos por parábolas, possuem uma representação bastante adequada. Além da simplicidade da equação do segundo grau, para pequenas inclinações do cabo, a parábola apresenta raio de curvatura praticamente constante.

Para que sejam alcançadas as alturas necessárias de projeto das cordoalhas na laje, tanto nos pontos extremos inferiores como os mais elevados, são utilizados espaçadores verticais de apoio pontual fixados no fundo do painel. Na Figura 18, é apresentado uma obra com espaçadores de apoio pontual de aço produzidos *in loco*.

Figura 18 – Disposição de cordoalhas em uma laje.



Fonte: Autor (2020).

Com todas as cordoalhas posicionadas é efetuada a verificação e a liberação da laje para concretagem. Durante o adensamento do concreto, principalmente nas placas de ancoragem, é necessário evitar o aparecimento de nichos de concretagem, visto que são as placas de ancoragem em conjunto com as cunhas que suportam toda a força aplicada pelo macaco hidráulico (ABNT NBR 14931:2004).

Após a etapa de execução e cura do elemento, espera-se o concreto adquirir a resistência à compressão especificada em projeto para que a operação de protensão seja realizada (AALAMI, 2014).

Cholfe e Bonilha (2018) salientam que os operários e o engenheiro precisam fiscalizar todas as etapas de montagem e execução, uma vez que as cordoalhas são responsáveis pela distribuição das forças após sua protensão.

Conforme a ABNT NBR 6118:2014 preconiza, todas as armaduras devem possuir cobrimentos de acordo com a classe de agressividade ambiental submetida. No sistema construtivo em concreto protendido caso a espessura seja menor à normatizada, a armadura pode ficar aparente, provocando um funcionamento inadequado da estrutura, redução da resistência ao fogo e problemas precoces de degradação, como o processo acelerado de corrosão.

Cavaco et al. (2017) explicam que a corrosão tem um elevado impacto sobre o desempenho de estruturas de concreto, tanto para o concreto armado convencional quanto para o sistema protendido, acelerando sua deterioração e envelhecimento, e reduzindo a segurança e vida útil esperado de projeto.

Schroeder (1999) enfatiza que principalmente em áreas com classes de agressividades ambientais mais rigorosas o cobrimento é preponderante maior para a durabilidade da estrutura a longo prazo.

No concreto protendido, além do fator da corrosão, as cordoalhas que não possuam o cobrimento requerido no ato da protensão podem romper a pequena camada de concreto que os envolvem e, desta forma, ficarem expostas ao ambiente, provocando problemas ao funcionamento adequado do elemento estrutural.

Na Figura 19 é apresentada uma situação em que duas cordoalhas sofreram problemas devido ao baixo cobrimento da face inferior da laje, rompendo a pequena camada de concreto quando submetidas a protensão.

Figura 19 - Falha no posicionamento da face inferior das cordoalhas na laje.



Fonte: Rav projects (2019).

Este mesmo problema também pode ocorrer na face superior da laje. Na Figura 20, é mostrado um caso em que foi efetuado um rebaixo na parte superior da laje, sem a compatibilização da altura das cordoalhas com o projeto de protensão. Com isso, no ato da protensão, a cordoalha rompeu a pequena camada de concreto superior que a envolvia devido ao baixo cobrimento.

Figura 20 - Falha no posicionamento da face superior das cordoalhas na laje.



Fonte: Autor (2020).

Em ambas ocorrências, as cordoalhas modificaram as tensões de projeto previstas em cálculo com as reais aplicadas no concreto. Situações como estas fazem com que seja necessária análise do projetista estrutural para decidir sobre as possibilidades e necessidades de reparo (VICENTE e ALBINO, 1994).

Ao protender as cordoalhas e as mesmas romperem as camadas de concreto inferior ou superior, fazem com que diminua a capacidade de carga da região em questão, pois não estão aplicando tensões no elemento estrutural nestes trechos.

Além da preocupação estrutural, o rompimento de concreto é um fato perigoso, que pode causar lesões às pessoas que estiverem próximas.

Nas ocasiões em que não acontecem estes fatos atípicos, Aalami (2014) explica que, uma vez concluído o ato de protensão e aprovado o alongamento de todas as cordoalhas, a laje pode ser liberada para desforma e retirada do escoramento. O excesso das cordoalhas, que ficam para fora da laje, deve ser cortado para colocação de um adaptador plástico com graxa, que posteriormente será preenchido com graute para proteger o conjunto de agentes agressivos.

Nos casos de prédios, geralmente as lajes são executadas em prazos relativamente curtos, por isso a forma da laje é retirada para reutilização no lance superior, desta maneira é realizado o reescoramento da mesma para suportar os carregamentos do pavimento acima.

Nos trechos que existem caixas de passagem para tubulações hidrossanitárias, pluvial, rede elétrica ou outras, deixa-se uma certa distância da face do cabo até a caixa de passagem, mínimo de 7,5 cm (CAUDURO, 2002). Estes detalhes construtivos podem fazer com que as cordoalhas façam curvas que necessitam da colocação de grampos, feitos com barras de aço, visando combater as tensões radiais, não deixando a cordoalhas retificar.

Na Figura 21 é mostrada uma faixa de cordoalhas que possui variações horizontais na laje, devido a situação particular da arquitetura e dimensionamento estrutural.

Figura 21 - Cordoalhas posicionados em curva.



Fonte: Autor (2020).

Além disso, também é imprescindível que o posicionamento das cordoalhas no eixo vertical seja o mais próximo possível do especificado em projeto, pois discrepâncias no posicionamento fazem com que a cordoalha tensionada crie esforços não previstos na peça. Desta forma, podem surgir fissuras e outras situação que necessitem de realização de reforços estruturais para inibir maiores danos ao elemento (AALAMI e BOMMER, 1999).

Os pontos verticais extremos inferior e superior são os maiores influentes para os balanceamentos das cargas da laje. De acordo com Lin (1963), o conceito de carga balanceada (load-balancing), tem como princípio básico fazer com que as cargas verticais equivalentes da protensão equilibrem uma fração das cargas permanentes atuantes, ficando a estrutura, para esse nível de carregamento, submetida somente às tensões de compressão.

A armadura de protensão é colocada na peça não somente para comprimir e gerar as tensões de compressão necessárias para que o concreto possa absorver as tensões de tração gerada pelo carregamento, mas também para resistir aos carregamentos externos atuantes (SOUZA JUNIOR e OLIVEIRA, 2016).

Os mesmos autores afirmam que desta maneira oferece redução do esforço cortante solicitante pela ação da componente vertical gerada pela protensão dos cabos inclinados, bem como aumento das tensões de compressão e redução das tensões de tração, reduzindo flechas e fissuração ao longo de sua vida útil.

Leonhardt (1979) explica que a protensão longitudinal parabólica introduz nas peças de concreto armado tensões de compressão que contribuem para a redução das tensões de tração. Assim, as fissuras de cisalhamento configuram-se com menor inclinação, conforme maior a parábola.

Souza Junior e Oliveira (2016) explicam que os deslocamentos verticais das lajes são menores à medida que se aumentam as parábolas das cordoalhas. Isto, em virtude de que com maiores parábolas, as cordoalhas conseguem aplicar maiores forças de elevação na laje, após a protensão.

Contudo, quando os pontos extremos não se encontram conforme projeto, podem ocorrer manifestações patológicas que demandam reparos estruturais, como apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Reparo estrutural em laje com protensão.



Fonte: Autor (2019).

Neste exemplo da Figura 22, os pontos verticais máximos posicionados na face superior das cordoalhas foram fixados fora da projeção do pilar, em desconformidade com o projeto estrutural, aplicando tensões de tração maiores que as previstas em cálculo na face inferior, fissurando a laje.

Para combater estes esforços, nesta situação específica, foram aplicadas faixas de fibras de carbono na face inferior da laje, com o intuito de combater as tensões atuantes não previstas em cálculo.

Outro fator que pode provocar danos ao elemento são as tensões aplicadas erroneamente nos cabos. Isso pode acontecer devido à bomba hidráulica não estar aferida, descuido do operador da bomba hidráulica, cordoalhas com danificações na capa de polietileno protetora, possibilitando a entrada de concreto e o contato com o aço, aumentando o atrito e, neste caso, reduzindo o alongamento efetivo.

De acordo com a ABNT NBR 14931:2004, os cabos cujos alongamentos estejam dentro do intervalo de $\pm 10\%$ dos valores previstos podem ser liberados, salvo alguma observação específica em projeto. Logo, estes cabos devem ser analisados individualmente antes da liberação para o corte.

No entanto, podem ocorrer situações extremas como o rompimento da cordoalha, fazendo com que a mesma passe a não exercer tensões ao elemento estrutural. Nesta ocorrência, torna-se, geralmente, imprescindível a troca da cordoalha, um processo trabalhoso e oneroso, porém necessário. Na Figura 23 é

mostrado um rompimento parcial, resultando na possibilidade de processo de troca de cordoalhas.

Figura 23 - Processo de troca de cordoalha após rompimento.



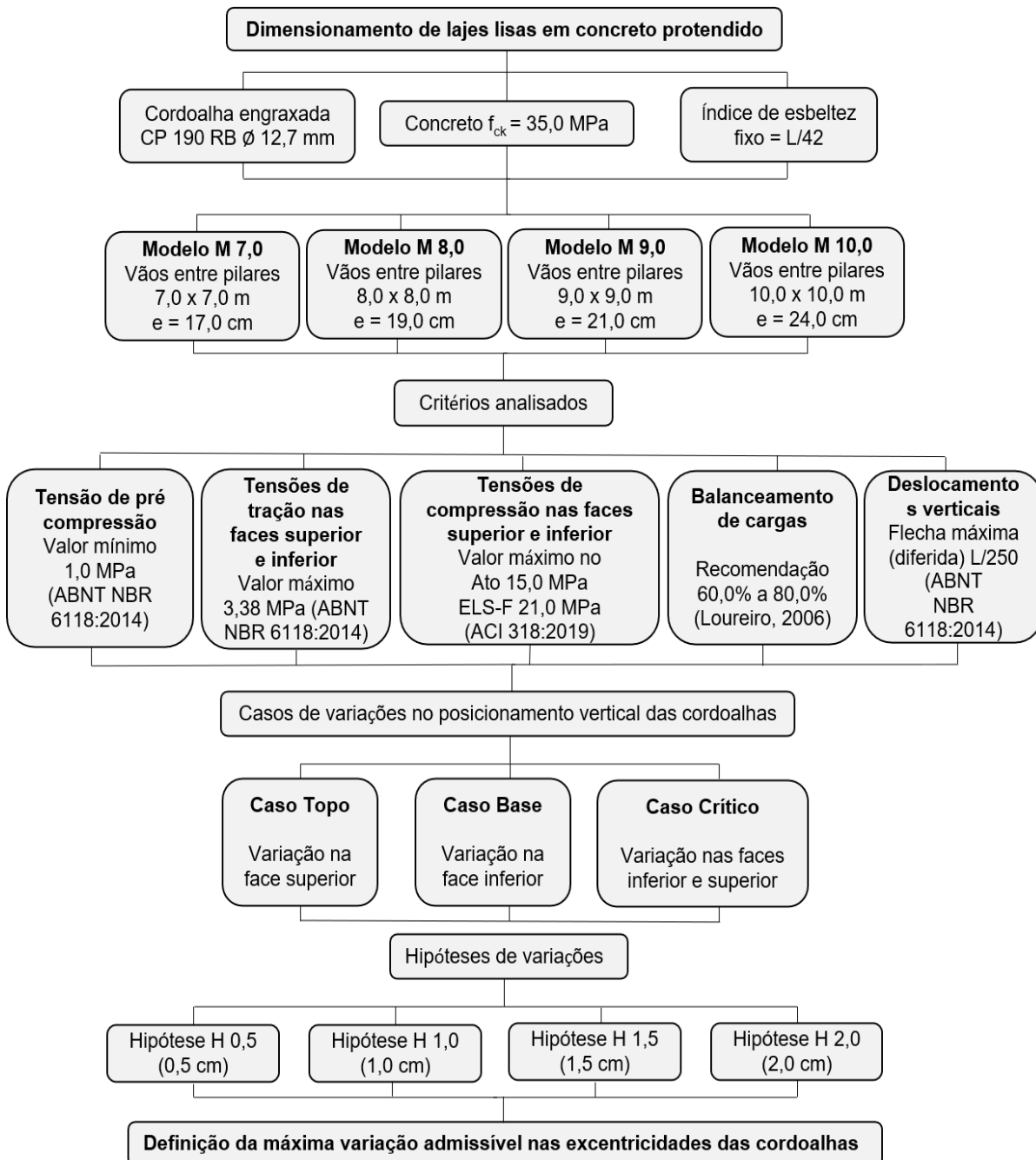
Fonte: Autor (2019).

O rompimento de cordoalhas pode ocorrer devido a alguns fatores, tais como o excesso de força aplicada no ato da protensão devido a bomba hidráulica sem aferição ou descuido do operador da máquina, posicionamento incorreto das placas de ancoragens, deixando-as inclinadas, podendo ocasionar cisalhamento das cordoalhas com a placa em virtude de esforços excessivos de cisalhamento ou até mesmo cordoalhas com falhas na produção (AALAMI, 2014).

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada é apresentada neste capítulo em subitens, para o melhor entendimento das etapas executivas da pesquisa. Antes disso, é apresentado na Figura 24 um fluxograma geral do estudo.

Figura 24 - Fluxograma com as delimitações da pesquisa.



3.1 GEOMETRIA DAS LAJES LISAS PROTENDIDAS

Os modelos arquitetônicos criados foram compostos unicamente por pilares e lajes lisas, ou seja, sem a existência de vigas. Esta situação fez com que os carregamentos das lajes fossem distribuídos diretamente para os pilares.

Emerick (2002), afirma que para vãos entre pilares, superiores a 7,5 metros, a utilização de lajes lisas em concreto protendido é financeiramente mais viável que as em concreto armado. A partir desta informação, foram definidos os modelos arquitetônicos, com variação de 1,0 m em cada direção, iniciando com vãos de 7,0 m x 7,0 m até 10,0 x 10,0 m, entre espaçamentos de pilares. Cada modelo foi nomeado como Modelo M 7,0, M 8,0, M 9,0 e M 10,0, na ordem crescente de espaçamento entre pilares.

Os modelos arquitetônicos tiveram espessuras de lajes diferentes, regidas por um índice de esbeltez (relação comprimento entre apoios x espessura da laje) fixo. Como a ABNT NBR 6118:2014 não define um índice de esbeltez para lajes em concreto protendido, foi utilizado a recomendação da ACI 318:2019. Esta Norma indica que a espessura da laje tenha uma relação de vão livre entre pilares dividido por 42. Foi utilizado valores exatos de espessuras, arredondando os valores para o qual estava mais próximo.

No Quadro 4 são apresentados os modelos arquitetônicos, com suas nomenclaturas, vãos entre pilares, relação índice de esbeltez e as espessuras para cada uma das lajes.

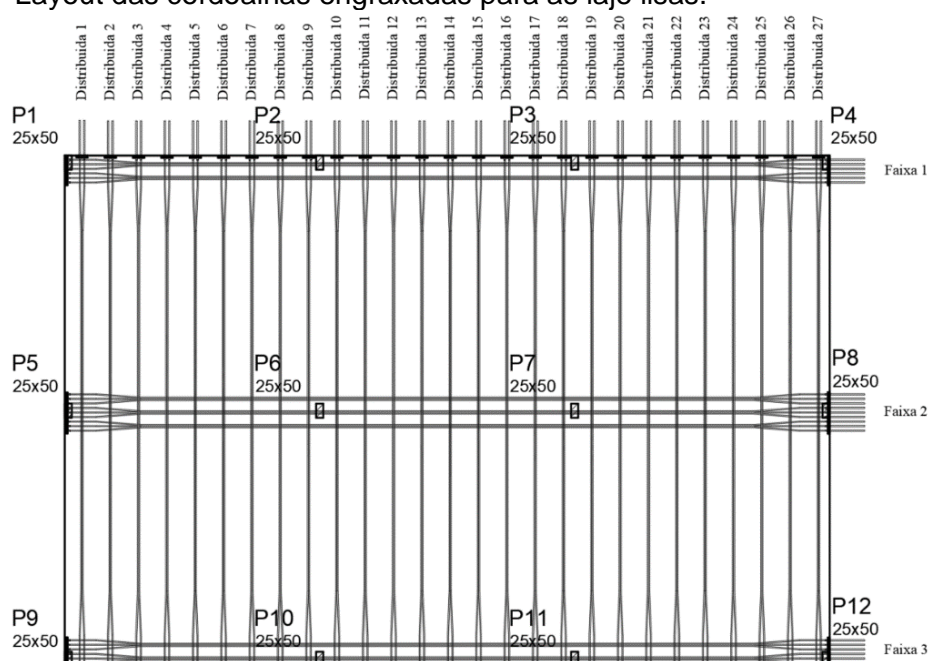
Quadro 4 - Modelos arquitetônicos com seus respectivos vãos entre pilares, relação índice de esbeltez e as espessuras das lajes.

Arquitetura	Nomenclatura	Vãos entre pilares	Relação índice de esbeltez	Espessura da laje
Modelo	M 7,0	7,0 m x 7,0 m	L/42	17,0 cm
	M 8,0	8,0 m x 8,0 m		19,0 cm
	M 9,0	9,0 m x 9,0 m		21,0 cm
	M 10,0	10,0 m x 10,0 m		24,0 cm

3.2 POSICIONAMENTO HORIZONTAL E VERTICAL DAS CORDOALHAS NAS LAJES

O layout de posicionamento das cordoalhas seguiu a premissa, de dispor, as faixas de cordoalhas na direção de maior dimensão da laje (direção x) e as cordoalhas distribuídas, posicionadas no sentido perpendicular (direção y), como é apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Layout das cordoalhas engraxadas para as laje lisas.



Analisou-se, unicamente, a faixa central de cordoalhas da direção x, em virtude de ser a faixa que sofre maior atuação de cargas, e assim, maiores influências das variações aplicadas a cada situação proposta, sendo nestas as variações de excentricidades.

A maneira de disposição vertical das cordoalhas, no eixo transversal da laje, foi proposta iniciando o traçado no eixo para não gerar esforços na borda da laje e posterior aplicação das excentricidades em formato parabólico.

Dessa maneira, foram realizadas as variações de excentricidades nos pontos críticos, local em que a mesma é máxima, situadas nos pilares (topo) e no vão central entre apoios (base).

As variações de inserção de erros foram divididas em três casos distintos, nas cordoalhas concentradas, cada um com um nível de efeito diferente. Foram aplicadas variações pontuais nos espaçadores, que tiveram como consequência, redução da parábola em todo trecho.

No primeiro caso foram reduzidas as excentricidades das cordoalhas unicamente na face superior da laje (topo), na região dos pilares P6 e P7. No seguinte, diminui-se a excentricidade exclusivamente nas regiões entre os apoios, na face inferior (base) da laje lisa. 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.

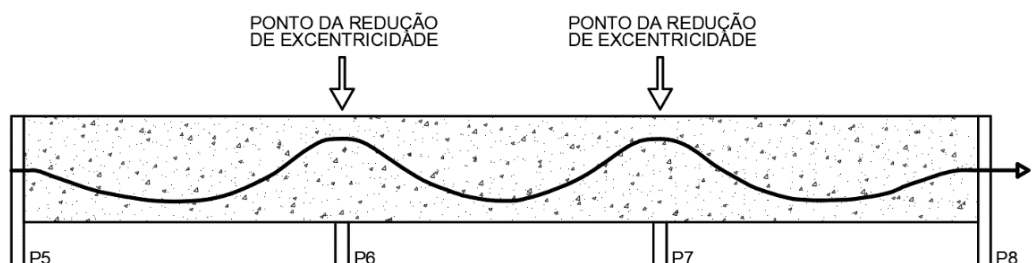
No Quadro 5 são apresentados os pontos de redução da excentricidade e as abreviações criadas para cada caso.

Quadro 5 - Ponto de aplicação da variação de excentricidade e abreviação para cada caso.

Local da variação	Abreviação
Face superior	Topo
Face inferior	Base
Faces superior e inferior	Crítico

No Topo foram aplicadas mudanças nas excentricidades das cordoalhas acima dos pilares P6 e P7, impondo reduções nos pontos de apoios verticais, assim como apresenta a Figura 26.

Figura 26 - Pontos de redução da excentricidade para o Topo.



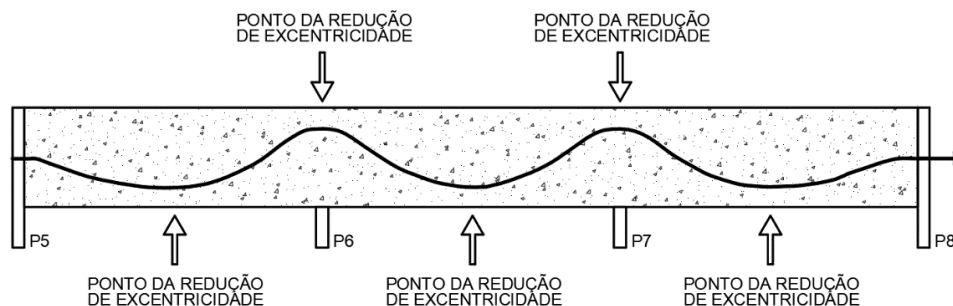
A Figura 27 mostra os pontos em que foram modificadas as excentricidades no Base. Os pontos de aplicação da redução das alturas dos apoios verticais foram na face inferior entre os apoios dos pilares.

Figura 27 - Pontos de redução da excentricidade para o Base.



No Crítico foram realizados os dois processos concomitantemente, reduzindo as excentricidades sobre os pilares e também nos centros dos vãos. Na Figura 28 são mostrados os pontos em que foram feitos estes atos.

Figura 28 - Pontos de redução da excentricidade para o Crítico.



Foram aplicadas quatro hipóteses de variações de excentricidades para cada caso, com reduções de excentricidade de 0,5 cm, 1,0 cm, 1,5 cm e 2,0 cm. Variações estas com números exatos e espaçados em 0,5 cm visto que geralmente os pontos de apoios verticais nas obras são apresentados nesta formatação, visando viabilizar a conferência *in loco*.

Esta decisão também foi tomada com base na referência de Cauduro (2002), que apresenta referências limites de 0,5 cm e 1,0 cm de variação na excentricidade, das cordoalhas das lajes para espessuras iguais e maiores que as definidas para este

estudo. Desta maneira, consegue-se comparações diretas entre este estudo e as recomendações de Cauduro (2002).

No Quadro 6 são informadas as hipóteses de variações com suas nomenclaturas e as respectivas reduções das excentricidades.

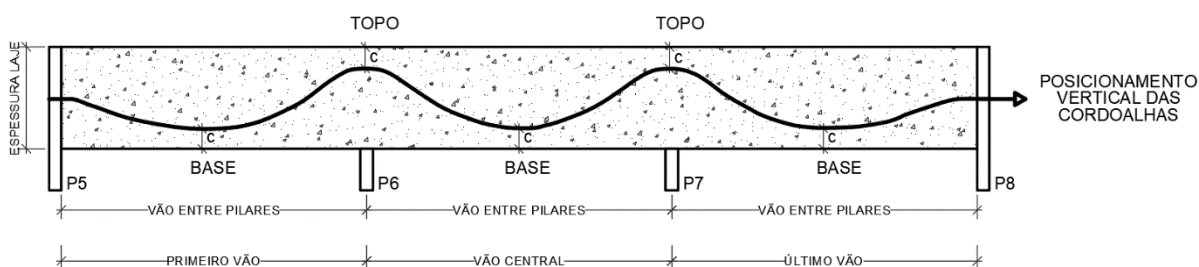
Quadro 6 - Hipóteses das variações de excentricidades com suas nomenclaturas e os valores de redução das excentricidades.

Hipótese	Nomenclatura	Redução de excentricidade (cm)
Referência	H 0	0,0
Hipótese 1	H 0,5	0,5
Hipótese 2	H 1,0	1,0
Hipótese 3	H 1,5	1,5
Hipótese 4	H 2,0	2,0

O trecho do P5 ao P6 foi nomeado como “primeiro”, o vão entre o P6 e P7 recebeu a denominação “central” e, por fim, entre o P7 e P8, recebeu a denominação de “último”.

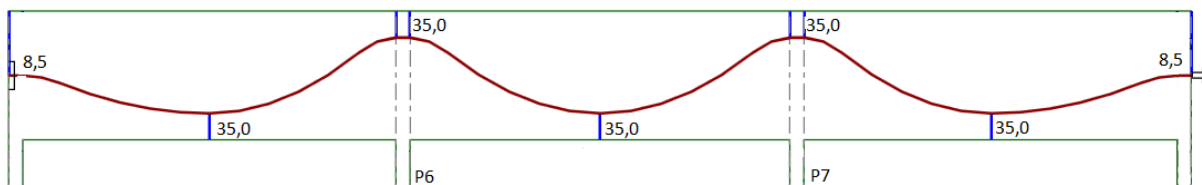
A Figura 29 apresenta a nomenclatura dos vãos com a posição dos mesmos e os pontos onde foram aplicadas as variações das excentricidades nas faces da laje.

Figura 29 - Posicionamento vertical das cordoalhas na laje.



Na Figura 30 é apresentada a visualização do perfil das cordoalhas, da faixa de análise, do Modelo M 7,0 na hipótese de referência H 0, com as excentricidades aplicadas e suas respectivas distâncias dos eixos das cordoalhas até as faces da laje.

Figura 30 - Disposição vertical do perfil das cordoalhas no dimensionamento de referência do Modelo M 7,0 (medidas em mm).



A seta na extremidade direita indica a face lateral a ser efetuada a protensão da cordoalha. As cotas nas extremidades laterais (8,5 cm) indicam o centro geométrico da seção da laje e as cotas nas faces superiores e inferiores (35,0 mm) representam a distância entre a borda da laje até o centro das cordoalhas.

3.3 MATERIAIS E PARÂMETROS NORMATIVOS UTILIZADOS PARA O DIMENSIONAMENTO

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, a tipologia mais utilizada nacionalmente, em obras com o sistema de lajes lisas de concreto protendido com cordoalhas engraxadas não aderentes. A carga mínima à ruptura é de 187 kN e a força de aplicação no ato do tensionamento é em 150 kN, atendendo os requisitos das Normas ABNT NBR 7483:2020 e ABNT NBR 6349:2008.

Foram seguidos, como referência, os critérios da ABNT NBR 6118:2014 e também critérios complementares indicados pela ACI 318:2019 para lajes em concreto protendido não aderente. Foi adotada também a ABNT NBR 6120:2019 como referência para as recomendações de carregamentos.

Para a definição da resistência do concreto e cobrimento das armaduras (ativas e passivas) foi considerada Classe de Agressividade Ambiental II, onde o risco de deterioração da estrutura é pequeno, com classe de agressividade ambiental moderada (ABNT NBR 6118:2014). Isto porque, esta classificação enquadra-se para projetos em ambientes localizados em terrenos urbanos, onde são construídas grande parte das obras prediais civis.

A mínima resistência característica à compressão do concreto para o sistema em concreto protendido com cordoalhas engraxadas, conforme a ABNT NBR

6118:2014 é de 30 MPa. Para este trabalho foi utilizado concreto de 35 MPa, uma classe de resistência maior que o mínimo necessário para o sistema, e módulo de elasticidade (E) de 39,7 GPa, em virtude da Classe de Agressividade Ambiental, os vãos entre pilares especificados e os carregamentos utilizados para as lajes.

Foi utilizado como carregamento referente a carga variável, o valor mínimo recomendado pela ABNT NBR 6120:2019 para locais de edificações comerciais, para salas de uso geral, 2,5 kN/m², e os valores de revestimento de pisos para edifícios residenciais e comerciais, 1,0 kN/m².

No Quadro 7 são apresentados os valores de carregamentos utilizados, a resistência característica à compressão do concreto e os valores de cobrimentos para as armaduras.

Quadro 7 - Apresentação dos valores de cobrimentos das armaduras, cargas utilizadas e resistência característica à compressão do concreto.

Itens especificados	Valor	Unidade
Cobrimento para as armaduras passivas	2,5	cm
Cobrimento para as armaduras ativas	3,0	cm
Carga permanente	1,0	kN/m ²
Carga variável	2,5	kN/m ²
Resistência característica à compressão do concreto	35,0	MPa

Na análise das armaduras ativas para as lajes, seguiram-se três parâmetros fundamentais normatizados: tensão de pré compressão mínima, tensão normal de tração máxima admissível para o concreto e deslocamentos verticais máximos, para somente após estes critérios alcançados ajustar as demais referências, como balanceamento de cargas e deslocamentos. Foram realizadas estas análises, com a apresentação dos valores encontrados, para o ELS-F e, também, efetuada a verificação no dimensionamento, para o ato da protensão para todos estes critérios.

Todos os dimensionamentos das lajes iniciaram, com tensão de pré compressão em qualquer ponto do elemento com o mínimo de 1,0 MPa, seguindo as recomendações da ABNT NBR 6118:2014 e ACI 318:2019.

A ABNT NBR 6118:2014 limita a deslocamentos verticais para lajes, com este tipo de utilização, na relação de vão livre entre pilares dividido por 250 (L/250), então

este valor foi tomado como limite para os modelos antes da inserção de variações nas excentricidades das cordoalhas.

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

Definiu-se a utilização da protensão limitada, seguindo as recomendações de Souza (2018). Conforme a Nota 3 da Tabela 13.4 da ABNT NBR 6118:2014, nos projetos com laje lisa protendida basta atender o ELS-F (Estado Limite de Serviço de Formação de Fissuras), para a combinação frequente das ações, em qualquer das classes de agressividade ambiental.

Para a protensão limitada, admitem-se tensões de tração no concreto no ELS-F. Foi calculada a resistência média à tração ($f_{ct,m}$) através da Equação 1 e posteriormente calculado a resistência inferior ($f_{ctk,inf}$) com a Equação 2, a partir do item 8.2.5 da ABNT NBR 6118:2014.

$$f_{ct,m} = 0,3 \times f_{ck}^{2/3} \quad (1)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \times f_{ct,m} \quad (2)$$

onde: $f_{ct,m}$ = resistência média a tração; f_{ck} = resistência característica do concreto a compressão; $f_{ctk,inf}$ = resistência inferior.

Existem variações nas tensões máximas admissíveis de tração no concreto em função da seção transversal do elemento estrutural. Para seções retangulares deve ser utilizado o fator de forma $\alpha = 1,5$, como é informado no item 17.3 da ABNT NBR 6118:2014. Após estas etapas foi possível definir para concreto de resistência característica à compressão de 35 MPa, o valor de 3,38 MPa de resistência à tração.

O máximo valor admissível de tensão normal de compressão no concreto, no ELS-F é 60 % do valor do f_{ck} , resultando em 21,0 MPa, por isso, nesta combinação, este é o máximo valor de tensão normal de compressão admissível na laje. Assim como, no ato da protensão, nas verificações, os valores de tensão normal de compressão no concreto são no máximo de 45 % do f_{ck} do concreto, com isso, os valores dimensionados devem ficar abaixo de 15,75 MPa, ACI:318 (2019).

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, assim a quantidade de cordoalhas foi aumentada, até que este parâmetro fosse alcançado.

As armaduras passivas positivas e as armaduras de combate a flexão negativa no topo dos pilares foram calculadas para os modelos de referência e também para os casos e hipóteses que atenderam os critérios da ABNT NBR 6118:2014 e ACI 318:2019 para tensões admissíveis nas faces, na pré compressão e os máximos deslocamentos verticais, buscando verificar as variações da taxa para cada mudança de excentricidade de cordoalhas de cada laje analisada.

No Quadro 8 são apresentadas as recomendações de limites para tensão de pré compressão, balanceamento de cargas, deslocamentos verticais e tensão normal de tração nas faces inferior e superior.

Quadro 8 - Critérios analisados com os limites e respectivas fontes indicadas.

Critério analisado	Limite	Parâmetros de controle	Unidade	Fonte
Tensão normal de pré compressão	Mínimo	1,0	MPa	ABNT NBR 6118:2014 e ACI 318:2019
Tensão de tração nas faces inferior e superior	Máximo	3,38	MPa	ABNT NBR 6118:2014
Tensão de compressão máxima para o Ato	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	60,0 a 80,0	%	Loureiro (2006) e Aalami (2014)
Deslocamentos verticais	Máximo	L/250	cm	ABNT NBR 6118:2014

Foram estes os valores usados como balizadores para os dimensionamentos dos modelos hipótese de referência. 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.

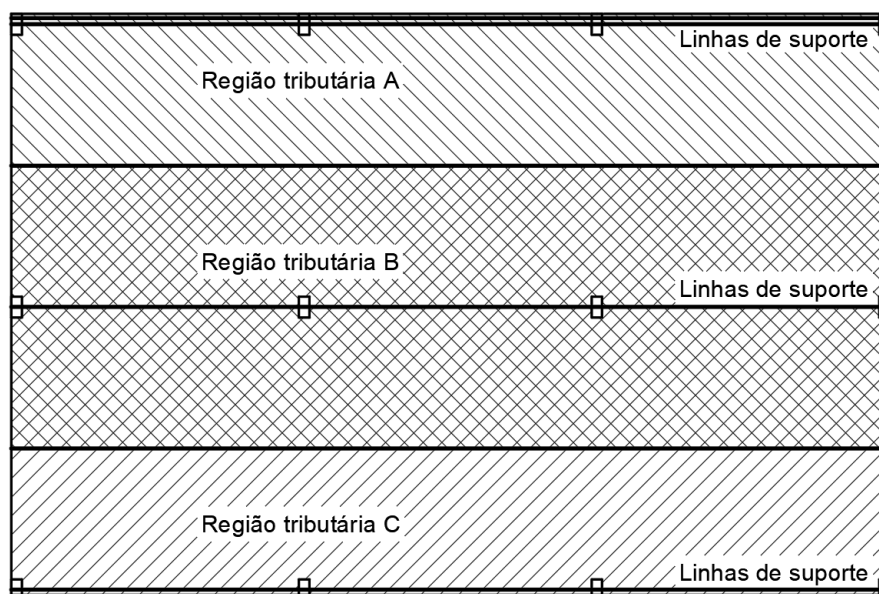
3.4 ANÁLISES DO SOFTWARE DE DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento estrutural das lajes foi realizado com o auxílio de ferramenta computacional, a partir do uso do *software* Adapt Floor 2017, versão Pro. Este programa é específico para análise e dimensionamento de concreto protendido, discretiza a laje em elementos de casca, verificando os efeitos da protensão de acordo com a geometria e a força das cordoalhas, em cada elemento.

Ao iniciar o processo de dimensionamento das lajes foram lançadas linhas de suporte no alinhamento dos pilares, para que o *software* calculasse a média dos esforços desta região. Estes esforços foram analisados a partir das regiões tributárias que compilam os resultados das áreas definidas pelas linhas de suporte.

Na Figura 31 são apresentadas a localização das linhas de suporte, assim como a área de atuação das regiões tributárias. Para o modelo arquitetônico foram criadas três regiões tributárias, sendo a região tributária A e C iguais e a região tributária B diferente, com maior área de abrangência.

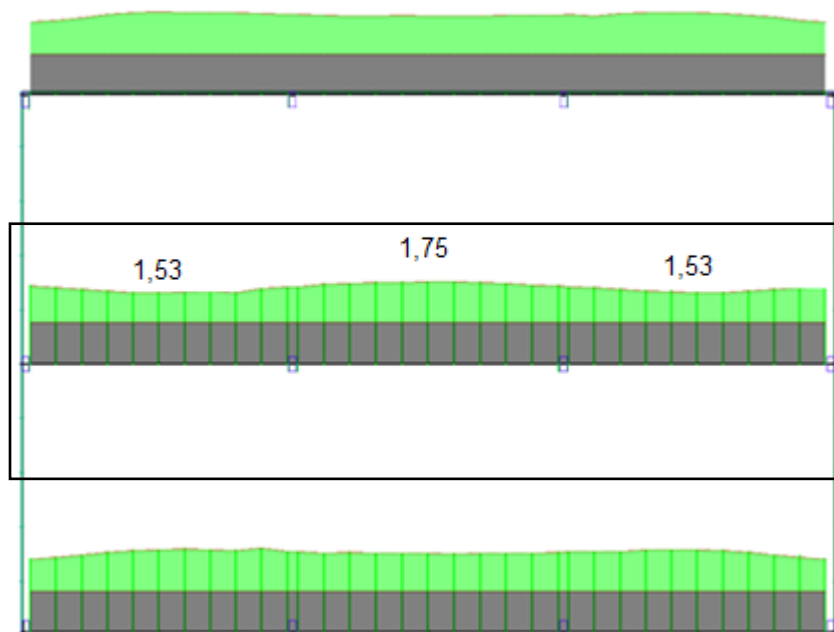
Figura 31 - Linhas de suporte e regiões tributárias na laje.



Inicialmente analisam-se as tensões de pré compressão, com o intuito de verificar o valor mínimo normativo de 1,0 MPa em todos pontos da faixa de análise. Nesta faixa, foi primordial que em todos os trechos analisados nos modelos hipótese de referência obtivessem este mínimo, atendendo os limites estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2014 e ACI 318:2019.

A marcação com um retângulo, na Figura 32, tem como objetivo indicar para o leitor o trecho em análise das tensões de pré compressão médias, das tributárias, na faixa central da laje e como são apresentados os resultados pelo *software*.

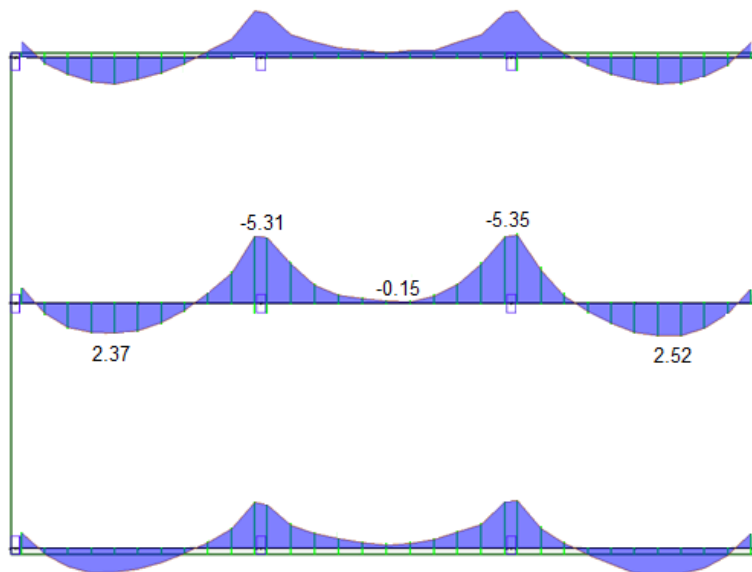
Figura 32 - Análise com os valores das tensões de pré compressão da laje para a laje M 9,0 – H 0 (valores em MPa).



Verificado o valor limite mínimo de 1,0 MPa de pré compressão, na laje lisa protendida, são analisadas as tensões nas faces inferior e superior do elemento estrutural. Os valores das tensões de tração nas faces para os modelos hipótese de referência deveriam apresentar o máximo admissível de 3,38 MPa, definido pela ABNT NBR 6118:2014.

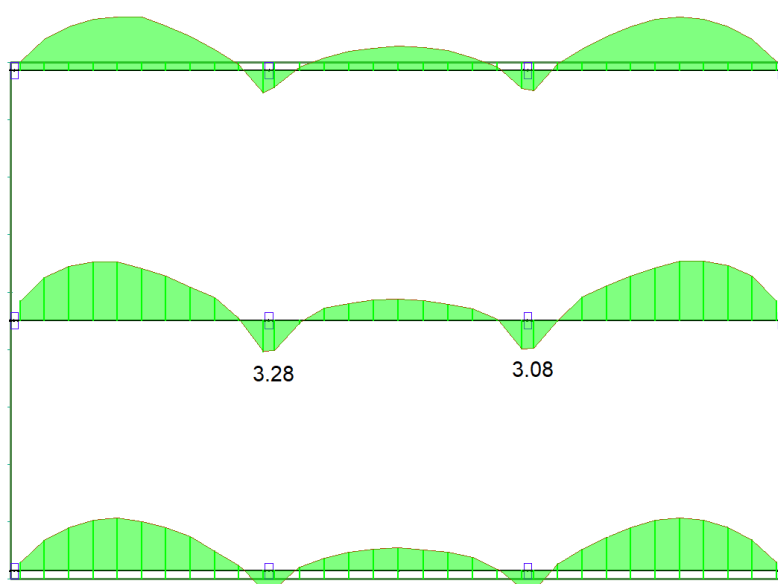
Na Figura 33 são apresentados os valores das tensões normais na face inferior de uma laje, na direção x. Os valores negativos indicam tensões normais de compressão, já os positivos, tensões normais de tração.

Figura 33 - Apresentação da análise das tensões normais na face inferior para a laje M 7,0 - H 0 (valores em MPa).



Em paralelo as análises das tensões na face inferior das lajes foram efetuadas as verificações na face superior. A Figura 34 mostra como é apresentado pelo *software* as tensões médias das tributárias, com as informações das tensões sobre os pilares, na face superior de uma laje. Os valores apresentados sobre os pilares são de tensões normais de tração.

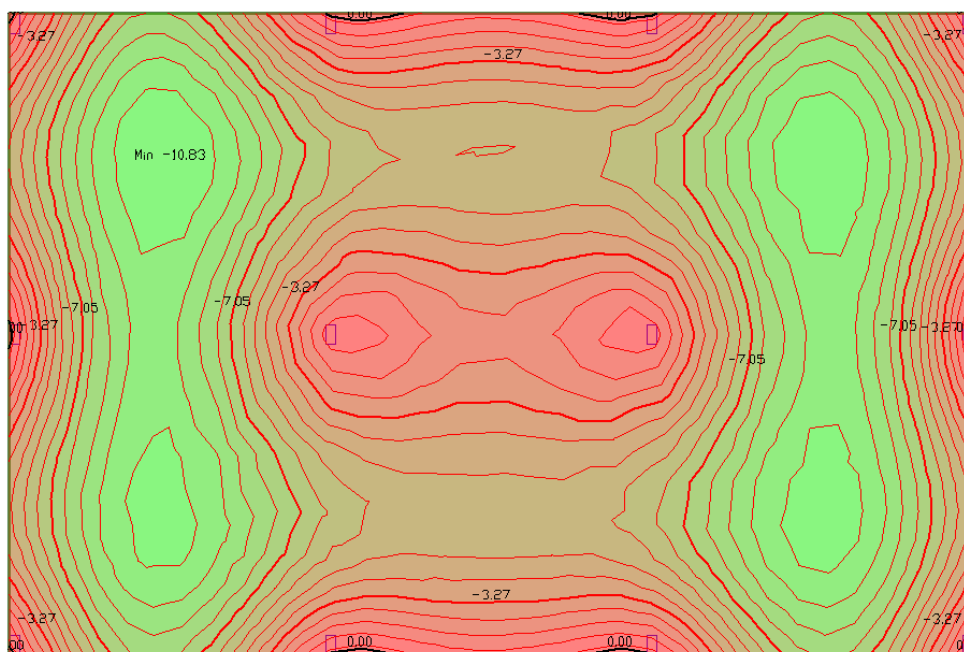
Figura 34 - Tensões normais médias na face superior da laje M 8,0 - H 0 (valores em MPa).



Após o término da análise preliminar, onde são avaliadas as tensões normais de pré compressão, as tensões normais de tração nas faces inferior e a superior da laje, é dado início à análise dos deslocamentos e balanceamentos de cargas.

A Figura 35 apresenta como são apresentados os isovalores de deslocamentos verticais de uma laje.

Figura 35 - Isovalores de deslocamentos verticais, para a laje M 7,0 – H 0 (valores em mm).



Posteriormente as análises de tensões de pré compressão, tensões nas faces superior e inferior, balanceamentos de cargas e verificação dos deslocamentos verticais para os modelos hipótese de referência, foram feitas as análises, destes mesmos critérios, para as hipóteses com variações de excentricidades.

A quantidade de cordoalhas, para a faixa central, para os Modelos M 7,0 a M 10,0 foram de 10, 17, 25 e 33 unidades, respectivamente.

Ao final, foram realizados os cálculos das armaduras passivas positivas e negativas para os modelos hipótese de referência com suas respectivas hipóteses que atenderam aos limites normatizados de tensão de pré compressão, tensão normal nas faces superior e inferior e os deslocamentos verticais estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2014.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados encontrados através das simulações computacionais para os modelos arquitetônicos e as hipóteses de combinações de variações das excentricidades das cordoalhas.

4.1 TENSÕES DE PRÉ COMPRESSÃO

A Tabela 1 apresenta os valores dos resultados encontrados para as tensões de pré compressão nas lajes.

Tabela 1 - Verificação das tensões de pré compressão nas lajes.

Análise das tensões de pré compressão na laje (Valores em MPa)														
Modelo		M 7,0												
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	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		M 8,0												
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	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		M 9,0												
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	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		M 10,0												
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	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

As tensões 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.

Ao atender a condição da tensão de pré compressão mínima especificada na ABNT NBR 6118:2014, 1,0 MPa, constatou-se que para o menor vão livre entre pilares, o modelo M 7,0, conseguiu-se atender os limites de tensões normais máximas de tração nas faces da laje e também os deslocamentos verticais máximos, dada a importância deste critério, principalmente para vãos menores.

Para os modelos M 8,0, M 9,0 e M 10,0, não foi possível dimensioná-los com a tensão mínima de 1,0 MPa. Tornou-se necessário a inserção de cordoalhas para que os modelos alcançassem os valores mínimos para os demais critérios analisados: tensão normal de tração máxima nas faces superior e inferior, no valor de 3,38 MPa, e deslocamentos verticais máximos, na relação máxima de $L/42$. Consequentemente, ao aumentar estas cordoalhas, os valores de pré compressão também aumentaram.

Confirmou-se que em todos os modelos, as tensões de pré compressão em todas hipóteses de variações de excentricidades, mantiveram-se com a tensão mínima de 1,0 MPa, atendendo os limites da ABNT NBR 6118:2014.

4.2 TENSÕES NORMAIS MÁXIMAS NA LAJE

As tensões normais de tração na face inferior da laje, para os quatro modelos, mesmo com as mudanças no posicionamento vertical das excentricidades das cordoalhas, mantiveram-se atendendo o limite máximo de tensão normal de tração, 3,38 MPa, estabelecido pela ABNT NBR 6118:2014.

Os valores de tensão de compressão encontrados nas análises, em nenhuma hipótese de dimensionamento, ultrapassou o valor de 3,0 MPa, sendo que os limites máximos admissíveis são de 15,0 MPa e 21,0 MPa, para as tensões aplicadas no ato e no ELS-F, respectivamente.

Na Tabela 2 são apresentados os valores dos resultados das tensões normais encontradas na face inferior da laje, para os três vãos existentes.

Tabela 2 - Verificação da análise das tensões normais na face inferior nas lajes.

Análise das tensões na face inferior na laje (Valores em MPa)														
Modelo		M 7,0												
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	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		M 8,0												
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	2,52	2,55	2,59	2,62	2,65	2,63	2,73	2,84	2,94	2,66	2,79	2,93	3,07
	Central	-0,62	-0,54	-0,45	-0,36	-0,28	-0,56	-0,49	-0,42	-0,35	-0,47	-0,31	-0,15	0,01
	Último	2,48	2,51	2,54	2,57	2,61	2,58	2,69	2,79	2,90	2,62	2,75	2,89	3,03
Modelo		M 9,0												
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	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	-1,37	-1,28	-1,18	-1,08	-1,25	-1,17	-1,09	-1,02	-1,15	-0,98	-0,81	-0,64
	Último	2,63	2,66	2,72	2,74	2,78	2,67	2,79	2,90	3,01	2,71	2,82	3,01	3,16
Modelo		M 10,0												
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	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

O vão central atende os valores máximos do estado limite de serviço de formação de fissuras (ELS-F) com menor dificuldade que os vãos das extremidades, o primeiro e último vão. Nos modelos de referência, no trecho central, obtiveram-se tensões de compressão na face inferior, devido a maior força de protensão neste trecho em relação ao primeiro e último da laje.

Ao modificar as excentricidades das cordoalhas, exclusivamente no topo dos pilares, as tensões sofrem menores variações ao comparar com as reduções das 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, limite máximo admissível pela ABNT NBR 6118:2014.

Além da análise das tensões na face inferior, foi realizado o mesmo processo na face superior da laje. Este foi o critério verificado com maiores índices de

impedimentos de hipóteses de variações de excentricidades, devido ao limite aceitável de tensões impostos da referida Norma, no valor de 3,38 MPa.

A variação de excentricidade no topo dos pilares, na hipótese H 0,5 de modificações das alturas dos espaçadores, foram as únicas que obtiveram os resultados de tensões normais de tração na face superior atendendo o limite de 3,38 MPa, especificado pela ABNT NBR 6118:2014.

Nesta hipótese, o modelo M 8,0 igualou o limite do valor máximo aceitável de 3,38 MPa de tensão normal de tração na face superior da laje, já os demais modelos, nesta mesma hipótese ficaram com sobra entre os valores encontrados e o máximo aceitável. A Tabela 3 indica o resumo das análises deste critério.

Tabela 3 - Verificação da análise das tensões na face superior nas lajes.

Análise das tensões na face superior na laje (Valores em MPa)														
Modelo		M 7,0												
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	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		M 8,0												
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	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		M 9,0												
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	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		M 10,0												
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	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

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 M 7,0 e M 9,0, foram os únicos que na hipótese H 0,5 de modificação dos valores de

excentricidades do caso Base, tiveram seus valores de tensões normais de tração menores que 3,38 MPa.

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

4.3 DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Na Tabela 4 são apresentados os valores obtidos para os deslocamentos diferidos verticais das lajes.

Tabela 4 - Análise dos deslocamentos verticais nas lajes.

Análise dos deslocamentos verticais na laje (Valores em mm)														
Modelo		M 7,0												
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	18,54	18,75	18,95	19,16	19,37	19,07	19,61	20,14	20,68	19,28	20,02	20,77	21,52
	Central	5,42	5,81	6,26	6,63	7,03	5,73	6,03	6,32	6,63	6,13	6,92	7,52	8,21
	Último	19,06	19,25	19,43	19,63	19,82	19,56	20,06	20,56	21,07	19,75	20,44	21,14	21,83
Modelo		M 8,0												
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	24,18	24,43	24,69	24,94	25,19	24,88	25,59	26,30	27,01	25,14	26,10	27,17	28,04
	Central	4,78	5,13	5,49	6,45	7,06	5,29	5,61	6,12	7,13	5,75	6,72	7,69	8,66
	Último	23,93	24,23	24,56	24,84	25,12	24,74	25,48	26,26	29,98	25,02	26,05	27,09	28,13
Modelo		M 9,0												
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	35,74	35,89	36,46	36,78	37,13	36,05	36,65	36,96	37,87	36,27	36,76	37,94	39,19
	Central	4,97	5,76	6,56	7,36	8,14	6,54	7,06	7,58	8,32	7,26	8,44	9,65	10,86
	Último	35,59	35,87	36,21	36,68	37,04	35,99	36,33	36,75	37,64	36,10	36,53	37,74	38,96
Modelo		M 10,0												
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	35,35	35,68	36,35	37,98	39,04	36,25	37,15	38,05	40,10	36,85	39,31	41,60	42,51
	Central	2,72	3,26	4,96	8,92	10,14	3,29	5,89	8,99	10,25	4,01	6,57	9,87	12,02
	Último	34,83	35,19	35,87	37,41	38,34	35,75	36,69	37,61	39,56	36,11	38,89	39,98	42,14

Os modelos M 7,0 e M 8,0 foram os dois, que mantiveram-se atendendo aos limites normativos de deslocamentos, em todas as hipóteses e casos de variações, os

valores de deslocamentos verticais atendendo os limites de 28,0 mm e 32,0 mm, respectivamente.

O modelo M 9,0, apenas no vão central, obteve valores abaixo de 36,0 mm de deslocamentos verticais, limite estabelecido pela ABNT NBR 6118:2014 para a distância entre pilares deste modelo.

Por fim, o modelo M 10,0, teve seus valores de deslocamentos verticais abaixo de 40,0 mm, limite da ABNT NBR 6118:2014, em todas as variações de excentricidades para o caso Topo de modificações nas alturas das cordoalhas.

Para os quatro modelos, os deslocamentos verticais, atenderam os limites máximos especificado pela ABNT NBR 6118:2014, unicamente na primeira hipótese de variação no caso Topo, com redução na excentricidade no topo dos pilares.

4.4 BALANCEAMENTO DE CARGAS

Os valores de balanceamentos de cargas aumentam a partir da inserção de cordoalhas impostas para solucionar os critérios de tensões normais de tração na face inferior, superior e pré compressão da laje.

Somente o modelo M 7,0 foi o que atendeu as recomendações de Loureiro (2006) e Aalami (2014), para as recomendações de valores de balanceamento de cargas, entre 60% e 80%.

Como este critério foi utilizado com o objetivo de parâmetro auxiliar de análise, mesmo que os valores estivessem fora destas recomendações, não foram classificados como inaceitáveis para a avaliação do estudo.

A Tabela 5 mostra o resumo dos valores de balanceamentos de cargas para todos os conjuntos avaliados.

Tabela 5 - Análise do balanceamento de cargas para as lajes.

Análise dos balanceamentos de cargas na laje (Valores em %)														
Modelo		M 7,0												
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		M 8,0												
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		M 9,0												
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		M 10,0												
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

4.5 ARMADURAS PASSIVAS

Na Tabela 6 são apresentados os resultados do cálculo das armaduras passivas positivas para os modelos de referência, a hipótese H 0,5 para os casos de variação de excentricidade no topo e base e as demais hipóteses para o caso Topo.

Tabela 6 - Resultado armadura positiva das lajes.

Modelo de análise	Hipóteses e casos de cálculo					
	Referência		H 0,5 - Topo		H 0,5 - Base	
	Vão 1 e 3	Vão central	Vão 1 e 3	Vão central	Vão 1 e 3	Vão central
	Área de aço (cm ² /m)		Área de aço (cm ² /m)		Área de aço (cm ² /m)	
M 7,0	2,54	2,11	2,54	2,11	2,64	2,22
M 8,0	2,72	2,10	2,72	2,10	Não dimensionado.	
M 9,0	3,26	2,40	3,26	2,40		
M 10,0	3,74	2,46	3,74	2,46		

Para as variações nas hipóteses H 0,5 com o ponto de mudança da excentricidade no 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. O vão central apresentou menores valores de taxas de armadura em função das tensões normais de tração serem menores.

Foi efetuado o dimensionamento das armaduras passivas negativas para os quatro modelos de referência e também para hipótese H 0,5 para os casos de variação de excentricidade no topo e na base e as demais hipóteses para o caso Topo. Na Tabela 7 são apresentados os cálculos das armaduras de combate à flexão negativa.

Tabela 7 – Resultado da armadura negativa das lajes.

Modelo de análise	Hipóteses e casos de cálculo					
	Referência		H 0,5 - Topo		H 0,5 - Base	
	Quantidade de aço					
	Barras	Área de aço (cm ² /m)	Barras	Área de aço (cm ² /m)	Barras	Área de aço (cm ² /m)
M 7,0	26 - Ø16,0 mm	7,4	26 - Ø16,0 mm	7,4	27 - Ø16,0 mm	7,7
M 8,0	42 - Ø16,0 mm	10,5	42 - Ø16,0 mm	10,5	Não dimensionado.	
M 9,0	55 - Ø16,0 mm	12,2	55 - Ø16,0 mm	12,2		
M 10,0	78 - Ø16,0 mm	15,6	78 - Ø16,0 mm	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 H 0,5 de variação de excentricidade para o caso de mudança no topo. Isto porque, a redução de 0,5 cm na altura das excentricidades das cordoalhas, posicionadas no topo dos pilares, não apresentou novos esforços suficientes para aumentar a quantidade de aço neste critério.

A variação da excentricidade das cordoalhas na face inferior para o modelo M 7,0, fez com que fosse necessário aumento da taxa de armadura de combate a flexão negativa sobre os pilares, variando em relação ao modelo hipótese de referência, do mesmo modelo arquitetônico.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme proposta inicial desta pesquisa, realizou-se a análise e dimensionamento de quatro modelos de lajes lisas protendidas, com variação 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 de combate a flexão.

5.1 CONCLUSÕES

Através da averiguação efetuada na presente pesquisa foi possível concluir que:

- A redução nas excentricidades das cordoalhas interferiram diretamente nos esforços das lajes lisas protendidas, principalmente causando reduções na parcela de tensões normais combatidas pela protensão;
- A redução 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 M 7,0 foi o único que obteve valores dos critérios analisados, atendendo os limites da ABNT NBR 6118:2014, com variações das excentricidades na hipótese H 0,5, para os casos Topo e Base de posição da variação das alturas;
- Nos Modelos M 8,0, M 9,0 e M 10,0, apenas na variação para a hipótese H 0,5, no caso Topo, apresentou resultados das tensões normais de tração abaixo do limite de 3,38 MPa, estabelecido da ABNT NBR 6118:2014;
- Os fatores responsáveis pelas tensões de pré compressão no elemento estrutural foram exclusivamente as quantidades 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 M 7,0 e M 8,0 foram os únicos que permaneceram abaixo dos limites normativos, $L/250$, da ABNT NBR 6118:2014 para todas as hipóteses de variações de excentricidades aplicadas;
- O critério de balanceamento de cargas manteve-se atendendo aos limites recomendados por Aalami (2014) e Loureiro (2006) apenas no Modelo M 7,0. Como são critérios complementares, não normatizados, podem ser aceitos nos dimensionamentos, mesmo com valores não recomendados por estes autores;
- As taxas de armaduras passivas positivas e negativas mantiveram-se iguais nos modelos de referência e a hipótese H 0,5 de variação da excentricidade do caso Topo.
- O máximo aumento dos valores de cobrimentos, em relação as excentricidades das cordoalhas nas faces das lajes, é de 16,7%. Dessa forma, os critérios analisados mantém seus valores atendendo aos limites especificados anteriormente.
- É admissível, para as lajes lisas protendidas com protensão não aderente, com cordoalhas engraxadas, do tipo CP 190 RB Ø 12,7 mm, com vãos entre pilares de 7,0 m a 10,0 m, uma tolerância máxima de 0,5 cm de redução no posicionamento vertical das cordoalhas na face superior. Esta análise é mais limitada quando comparadas às tolerâncias encontradas na literatura (CAUDURO, 2002).

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se citar:

- a) Avaliar, para o mesmo estudo, a utilização de cordoalhas do tipo CP 190 RB, mas com diâmetro de 15,2 mm. Incluindo também cordoalhas do tipo CP 210 RB nos diâmetros de 12,7 mm e 15,2 mm;
- b) Avaliar a variação da excentricidade das cordoalhas para uma mesma laje que tenha vãos de comprimentos diferentes, como geralmente acontece em projetos reais;
- c) Aplicar variações nas excentricidades nos pontos de topo e base de todas as cordoalhas de uma laje para analisar todas as faixas de análise do elemento estrutural;

- d) Aplicar variações nas excentricidades nas cordoalhas de projetos reais de diferentes projetistas e analisar a interferência destas modificações, buscando maiores quantidades de dados para análise.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7483: Cordoalhas de aço para concreto protendido**. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2019.

AALAMI, BIJAN O. **Load Balancing: A Comprehensive Solution to Post-Tensioning**. ACI Structural Journal. p 662-670. November/December 1990.

AALAMI, Bijan O. & BOMMER, Allan. **Design Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors**. First Edition. April, USA, 1999.

AALAMI, Bijan O. **Structural Modeling of Post-Tensioned Members**. Journal of Structural Engineering, Vol. 126 N^o. 2. p. 157-162. Fev, 2000.

AALAMI, Bijan O. **Post-Tensioned Manual**. 1^a. ed. California: ADAPT, v. 1, 500 p. 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318 - Building Code Requirements for Structural Concrete**. ACI Committee, 2019.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto armado**. Apostila de ensino. Bauru, Faculdade de Engenharia. Universidade Estadual Paulista. 92 p. 2006.

BELGO BEKAERT ARAMES S. A. **Fios e Cordoalhas para Concreto Protendido**. Catálogo Técnico, 2019.

CARO, Libardo A., VARGAS José R. Martí, ROS, Pedro Serna . **Prestress losses evaluation in prestressed concrete prismatic specimens**. *Engineering Structures*. Vol. 48, pages 704-715. march, 2013.

CARVALHO, Roberto Chust. **Estruturas em concreto protendido: cálculo e detalhamento**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2017.

CAUDURO, Eugenio Luiz. **Em Favor da Leveza**. Revista Técnica. São Paulo, 1997.

- CAUDURO, Eugenio Luiz. **Manual para a boa execução de estruturas protendidas usando cordoalhas de aço engraxadas e plastificadas**. 2. ed. São Paulo, 2002.
- CAVACO, Eduardo S.; BASTOS, Afonso; Santos, Filipe. **Effects of corrosion on the behaviour of precast concrete floor systems**. Journal Construction and Building Materials. Lisboa, 2017.
- CHOLFE, Luis; BONILHA, Luciana. **Concreto protendido: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2018.
- COLLINS, Michael P. and MITCHELL, Denis. **Prestressed Concrete Basics**. Canadian Prestressed Concrete Institute, 1987.
- ALMEIDA, Sylvia Regina Mesquita de. **Contribuição ao projeto ótimo de cabos em vigas de concreto protendido**. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2001.
- EMERICK, Alexandre Anozé. **Projeto e execução de lajes protendidas**. Apostila de ensino. 118 p. Brasília. 2002.
- Falha em protensão de laje**. Rav Projects, 2018. Disponível em: <<https://ravprojects.com.br/patologias-de-lajes/>>. Acesso em 14 de outubro de 2019.
- FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Sistemas Estruturais de Lajes Sem Vigas: subsídios para o projeto e execução**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo: São Carlos, 1989.
- HANAI, João Bento de. **Fundamentos do Concreto Protendido**. E-book de apoio para o curso de engenharia civil. São Carlos, 2005.
- HURST, M. K. **Prestressed Concrete Design**. 2. Ed. Routedge, Londres, 1988.
- KANG, Thomas e BONDY, Kenneth B. **Recommendations for Design of Post-Tensioned Slab-Column Connections Subjected to Lateral Loading**. PTI Journal, Post Tensionig Institute. Vol. 6, nº 1, Fevereiro, 2008.
- LOUREIRO, GIORDANO JOSÉ. **Projeto de Lajes Protendidas com Cordoalhas Engraxadas**. IBRACON, Ed. 44, Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte, 2006.
- LEONHARDT, Fritz; MONIG, Eduard. **Construções de concreto: casos especiais de dimensionamento de estruturas de concreto armado**. Rio de Janeiro, Vol. 2, Ed. Interciência Ltda, 1978.

- LEONHARDT, Fritz. **Construções de Concreto**. Editora Interciência, Vol. 5, Rio de Janeiro, 1979.
- LIN, T. Y. **Design on Prestressed Concrete Structures**. 2. ed. Wiley, New York, 1963.
- MELGES, José Luiz Pinheiro. **Análise Experimental da Punção em Lajes de concreto armado e protendido**. Tese de Doutorado. São Carlos, 2001.
- MONTANARI, Ilio. **Concreto protendido**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1988.
- NASSER, George D. **A look at prestressed flat plate construction**. PCI Journal, Vol. 14, n. 6. 1969.
- NAWY, Edward G. **Prestressed concrete: a fundamental approach**. 4 ed. Upper Saddle River: Prentice Hall. New Jersey, 2002.
- NILSON, Arthur H. **Design of prestressed concrete**. 2. ed. Edição. John Wiley & Sons, New York, 1987.
- PFEIL, Walter. **Concreto protendido: Processos construtivos e perdas de protensão**, 2. Ed. Livros Técnicos e Científicos Editora S/A. Vol. 2. Rio de Janeiro, 1983.
- PFEIL, Walter. **Concreto Protendido – Introdução**. Volume 1. LTC Editora, Rio de Janeiro, 1984.
- PILAKOUTAS, Kypros; LI, X. **Alternative shear reinforcement for reinforced concrete flat slabs**. Journal of Structural Engineering. pp. 1164 – 1172. New York, 2003.
- ROMANICHEN, R. M. e SOUZA, R. A. **Reinforced concrete corbels strengthened with external prestressing**. *Revista Ibracon de estruturas e materiais*. Vol 12, Number 4, p. 812 – 831. August, 2019.
- SANTOS, Arley R. D. **Workshop em Concreto Protendido**. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria, 2019.
- SANTOS, J. S. D. **Desconstruindo o Projeto Estrutural de Edifícios: Concreto Armado e Protendido**. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, 127 p. 2017.
- SCHROEDER, Roberto Moreira. **Comportamento eletroquímico e susceptibilidade à corrosão sob tensão do aço ABNT 1080 utilizado em armaduras de concreto protendido**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-

Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre, 1999.

SILVA, R.C. **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, USP, Departamento de Engenharia de Estruturas. 328 p. São Carlos, 2003.

SILVA, Gildemir; PRATA, Bruno; ALBUQUERQUE, Augusto. **Análise da eficiência dos sistemas estruturais para edifícios em concreto.** Ambiente Construído. Vol. 18, n. 1, p. 313-325. Porto Alegre, Jan./Mar., 2018.

SILVEIRA, Marcelo C. Alcântara. **Práticas de Projeto e Execução de Edificações Protendidas com Cordoalhas Engraxadas e Plastificadas.** IBRACON, 44º Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte, 2002.

SOUZA, Fábio Albino de. **Radier simples, armado e protendido – Teoria e Prática.** 3. Ed. Editora Catarse. São Paulo, 2018.

SOUZA JUNIOR, Orivaldo A. e OLIVEIRA, Denio R. C. **Influence of the tendon's layout on the shearing resistance of prestressed concrete beams.** Revista Ibracon de estruturas e materiais. Vol. 9, Number 5, p. 765 – 795. October, 2016.

TAKATA, L. T. **Tecnologia e Concepção de Sistemas Estruturais Híbridos de Concreto para Edifícios de Múltiplos Pavimentos no Brasil.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2017.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; JR, Kléos M. Lenz, César. **Concreto Protendido: Fundamentos Básicos.** Manual de ensino. Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Engenharia Civil. 4. Ed. Viçosa, 1998.

VICENTE, C. M. D. S.; ALBINO, J. P. D. C. **Lajes em Concreto Armado e Protendido.** 1ª. ed. Rio de Janeiro: da Universidade Federal Fluminense, 1994.

XIN, Feng; XIANYAN, Zhou. **Experimental research on crack width of retard bonded partially prestressed concrete beams.** Engineering Village. 1. ed. International Conference on Advances in Civil Infrastructure Engineering. Hunan, 2012.

ARTIGO – ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA EXCENTRICIDADE DE CORDOALHAS ENGRAXADAS NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LAJES LISAS PROTENDIDAS

Este artigo será submetido à Revista IBRACON de Estruturas e Materiais - RIEM, ISSN: 1983-4195 (versão eletrônica), Engenharias 1, Qualis B1 (quadriênio 2013-2016). O artigo está formatado conforme o modelo disponibilizado para a publicação nesse periódico, as quais estão descritas no anexo A.

Página de Rosto

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

Autores:

Luciano Cielo^{1*}, Rogério Cattelan Antochaves de Lima², Almir Barros da Silva Santos Neto³

¹Aluno de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFSM, lucianocieloeng@gmail.com, Brasil.

²Professor, Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria, rogerio@ufsm.br, Brasil.

³Professor, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Federal de Santa de Santa Maria, almir.neto@ufsm.br, Brasil.

Autor Correspondente:

Luciano Cielo

Av. Roraima, nº 1000, Prédio do INPE - Sala 2061, Universidade Federal de Santa Maria, Cidade Universitária, Bairro Camobi, 97015-070, Santa Maria - RS, Brasil.

Contato: +55 (55) 3220-8837

lucianocieloeng@gmail.com

Analysis of the influence of variation of eccentricity of unbonded tendons on the structural behavior of post-tensioned flat slabs

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

Luciano Cielo^a

Rogério Cattelan Antochaves de Lima^b

Almir Barros da Silva Santos Neto^b

a Aluno de mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

b Professor, Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

Abstract

The correct positioning of the tendons in the assembly of prestressed concrete slabs is essential for the structural system does not have changes in relation to the design in the stresses acting on the structure, such as unforeseen cracks, excessive vertical displacements, reduced load capacity or even, the collapse. In this study, architectural models were dimensioned, with smooth slabs in prestressed unbonded concrete, and variations were subsequently inserted in the vertical eccentricities, and thus, to analyze the pre-compression stresses, stresses in the lower and upper faces, vertical displacements, balancing of loads and passive reinforcement of the slabs. At the end of the work, it was found that the variation in the vertical eccentricity of the tendons on the lower face of the slab, further reduced the values of applied stresses, compared to the variation on the upper face.

Keywords: prestressed concrete, post-tensioned prestressed concrete, eccentricity of tendons, pathological manifestations.

Resumo

O correto posicionamento das cordoalhas na montagem de lajes em concreto protendido é imprescindível para que o sistema estrutural não tenha alterações em relação ao projeto nas tensões atuantes na estrutura, como fissuras não previstas, deslocamentos verticais excessivos, redução na capacidade de carga ou, até mesmo, o colapso. Neste estudo, realizou-se o dimensionamento de modelos arquitetônicos, com lajes lisas em concreto protendido não aderente, sendo posteriormente inseridas variações nas excentricidades verticais, e assim, analisar as tensões de pré compressão, tensões nas faces inferior e superior, deslocamentos verticais, balanceamentos de cargas e armaduras passivas das lajes. Ao final do trabalho, constatou-se que a variação na excentricidade vertical das cordoalhas na face inferior da laje, reduzem mais os valores das tensões aplicadas, em comparação com a variação na face superior.

Palavras-chave: concreto protendido, protensão não aderente, excentricidade de cordoalhas, manifestações patológicas.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é uma área que auxilia no desenvolvimento econômico de um país, pois é capaz de promover inovações tecnológicas e agregar novidades nos sistemas construtivos. Em virtude do excelente desempenho estrutural e das vantagens econômicas dos edifícios em concreto protendido não aderente, os Estados Unidos e outras regiões do mundo, como Austrália, Oriente Médio, América do Sul, Sudeste Asiático e Reino Unido, também incorporaram este sistema construtivo às suas construções [1] - [3].

A implementação deste sistema construtivo somente foi inserido no American Concrete Institute (ACI) 318 [4], em 1963 após a realização de diversas obras pelo mundo [1], [5]. No Brasil, o uso de lajes lisas com protensão não aderente teve início apenas no ano de 1997 sendo, portanto, empregado no país há pouco mais de 20 anos [6].

Conceitos arquitetônicos que primam por maiores vãos livres, a redução do número de pilares e vigas, principalmente em edifícios e residências de alto padrão, impulsionou o uso de lajes com protensão não aderente no país [2], [7] – [9].

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 mundial [6], [8].

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 [10] - [13].

Nas lajes lisas com protensão não aderente as cordoalhas são, na maioria das vezes, dispostas com excentricidades, em formato parabólico, visando aumentar ao máximo a eficiência para o balanceamento das cargas [14] – [16]. Os pontos verticais extremos inferior e superior são os maiores influentes para os balanceamentos das cargas da laje. 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 [17] - [19].

Este fator traz a necessidade de montagem das cordoalhas o mais próximo possível das alturas verticais de projeto, pois o posicionamento vertical equivocado pode ocasionar o

surgimento de manifestações patológicas, flechas não previstas em projeto, ou até mesmo em casos mais extremos, o colapso da estrutura [3], [19], [20].

Para manter as cordoalhas na posição vertical especificada em projeto são utilizados espaçadores de apoio pontual. Estes espaçadores são fornecidos industrialmente em modelos plásticos ou de aço, com controle rigoroso no processo de produção da altura de cada unidade. Contudo, constantemente a produção destes espaçadores é feita em obra, com a dobra de barras de aço, não apresentando adequado controle da produção, e por consequência, uma variabilidade nas suas alturas [8], [21].

Além disso, outras situações como a falta de atenção, em obra, no manuseio com a armadura, os danos causados pela mangueira de concretagem, tais como a quebra ou mesmo o desprendimento dos espaçadores de apoio pontual são circunstâncias recorrentes, por vezes, visualizadas nos canteiros de obras, Figura 1.



(a)

(b)

Figura 1. Deformação dos espaçadores de apoio pontual durante a concretagem: (a) - Manuseio da mão de obra em contato com a armadura. (b) - Espaçador danificado e mal posicionado.

Situações como estas podem acarretar um posicionamento vertical incorreto da altura das cordoalhas em obra, em desacordo com os valores especificados em projeto. Ainda, mesmo havendo o controle e o cuidado com relação aos aspectos citados anteriormente, há também o próprio erro humano no posicionamento dos 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.

Embora os cuidados durante a concretagem sejam enfatizados na literatura, principalmente no foco para evitar modificações nas alturas dos espaçadores de apoio pontual,

não há nenhum limite normativo que oriente o projetista no sentido para uma tolerância aceitável, caso algum tipo de variação venha a acontecer [21].

A referência [22] recomenda que desvios verticais da posição das cordoalhas sejam tolerados até $\pm 0,5$ cm em concretos que não ultrapassem a espessura de 20,0 cm e a tolerância máxima de $\pm 1,0$ cm em concretos com espessura entre 20,0 cm e 60,0 cm. 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.

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 [6], [14] – [23], [24].

Os problemas provenientes deste fator podem ser relacionados com o surgimento de situações, tais como: fissuração da laje, deslocamentos verticais excessivos, tensões atuantes divergentes com as calculadas em projeto com maiores índices de tração no elemento estrutural ou até mesmo excesso de compressão. Pode-se ainda citar o deslocamento do concreto em função de menores cobrimentos, redução da capacidade de carga devido à reduções de excentricidades das cordoalhas e a aceleração no processo de corrosão do aço em virtude de falta de cobrimento [25] – [28].

Devido a estes fatos explanados, este trabalho tem como objetivo analisar a influência no dimensionamento de uma laje lisa com protensão não aderente da variação da excentricidade vertical das cordoalhas. Tal análise considera possíveis erros na montagem das cordoalhas na altura dos espaçadores, simulando assim excentricidades diferentes das especificadas em projeto.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada é apresentada neste capítulo em subitens, para o melhor entendimento das etapas executivas da pesquisa. Antes disso, é apresentado na Figura 2, um fluxograma geral do estudo.

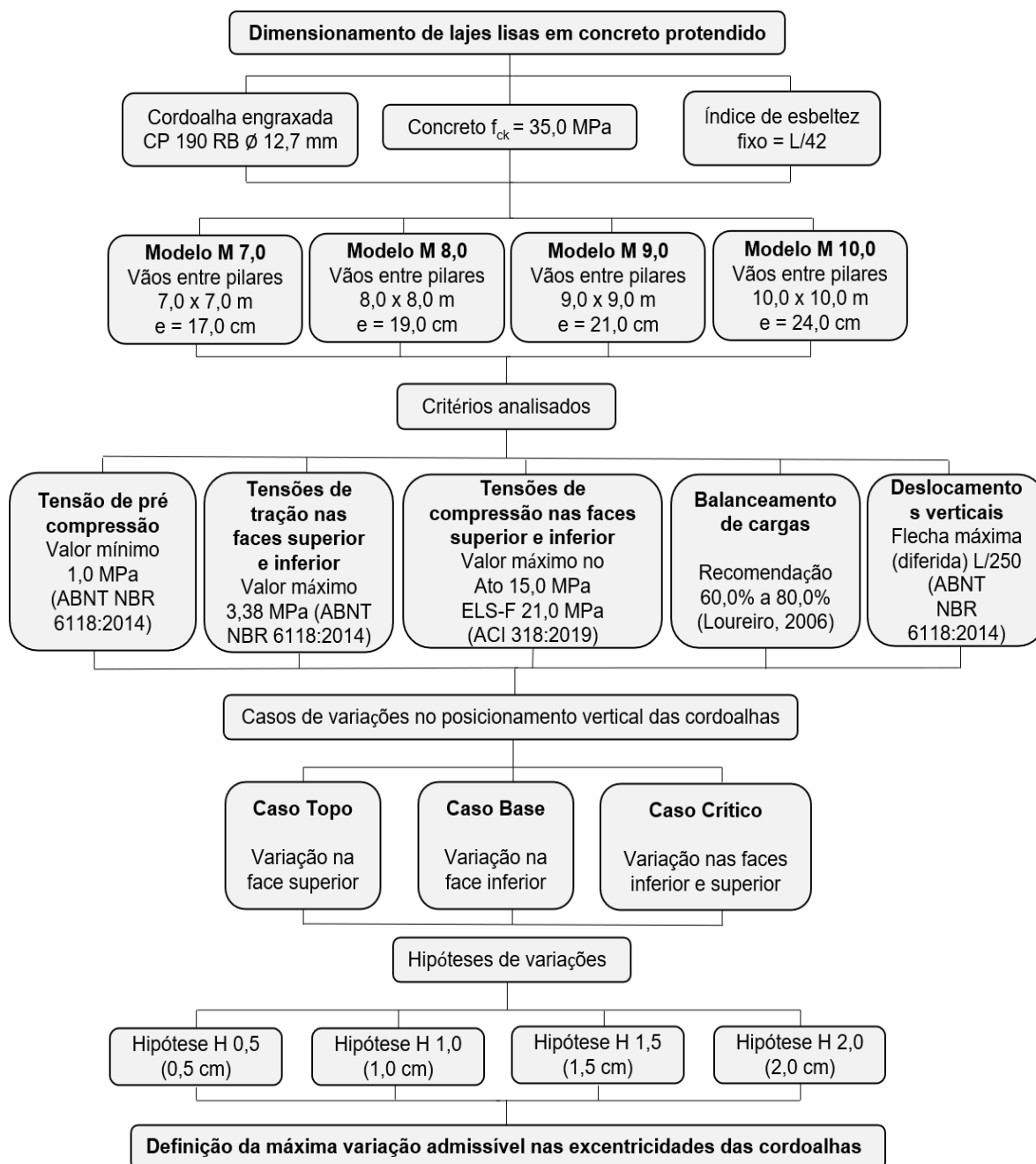


Figura 2. Fluxograma com as delimitações da pesquisa.

2.1 Geometria das lajes lisas protendidas

Os modelos arquitetônicos criados foram compostos unicamente por pilares e lajes lisas, ou seja, sem a existência de vigas. Esta situação fez com que os carregamentos das lajes se distribuísssem diretamente para os pilares.

Foram definidos quatro modelos arquitetônicos, sendo esses com variações de 1,0 m de distância em cada direção, iniciando com vãos de 7,0 m x 7,0 m até 10,0 x 10,0 m. Cada modelo foi nomeado como Modelo M 7,0, M 8,0, M 9,0 e M 10,0, na ordem crescente de espaçamento entre pilares.

Os modelos arquitetônicos tiveram espessuras de lajes diferentes, regidas por um índice de esbeltez (relação comprimento entre apoios x espessura da laje) fixo. Como a referência [10] não define um índice de esbeltez para lajes em concreto protendido, foi utilizado a recomendação da referência [4]. Esta referência indica que a espessura da laje tenha a relação de esbeltez em $L/42$. Foi utilizado valores exatos de espessuras, arredondando os valores para o qual estava mais próximo.

No Quadro 1 são apresentados os modelos arquitetônicos, com suas nomenclaturas, vãos entre pilares, relação índice de esbeltez e as espessuras para cada uma das lajes.

Arquitetura	Nomenclatura	Vãos entre pilares	Relação índice de esbeltez	Espessura da laje
Modelo	M 7,0	7,0 m x 7,0 m	L/42	17,0 cm
	M 8,0	8,0 m x 8,0 m		19,0 cm
	M 9,0	9,0 m x 9,0 m		21,0 cm
	M 10,0	10,0 m x 10,0 m		24,0 cm

Quadro 1. Modelos arquitetônicos com seus respectivos vãos entre pilares, relação índice de esbeltez e as espessuras das lajes.

2.2 Posicionamento horizontal e vertical das cordoalhas nas lajes

O layout de posicionamento das cordoalhas seguiu a premissa, de dispor, as faixas de cordoalhas na direção de maior dimensão da laje (direção x) e as cordoalhas distribuídas, posicionadas na direção perpendicular (direção y), como é apresentado na Figura 3.

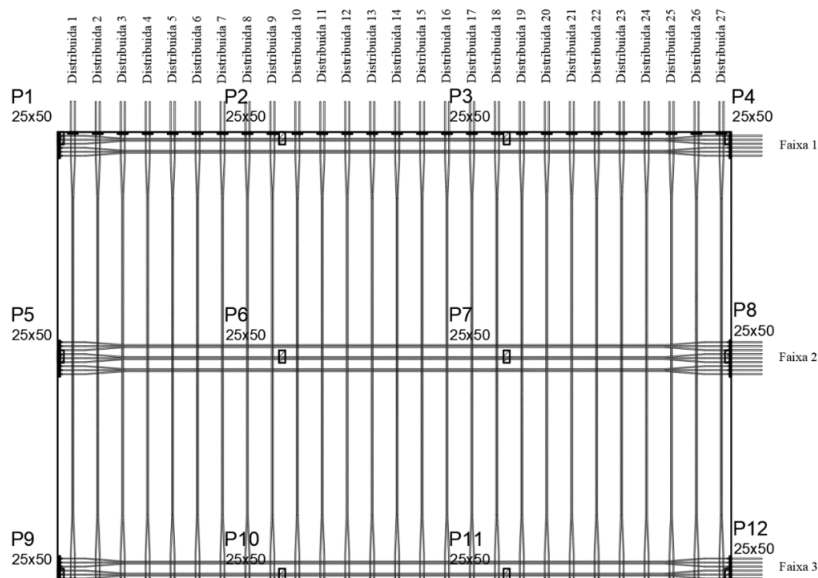


Figura 3. Layout das cordoalhas engradadas na laje lisa protendida.

Analisou-se, exclusivamente, a faixa central de cordoalhas da direção x , em virtude de ser a faixa que sofre maior atuação de cargas, e assim, maiores influências das variações aplicadas a cada situação proposta, sendo nestas as variações de excentricidades.

A maneira de disposição vertical das cordoalhas, no eixo transversal da laje, foi proposta iniciando o traçado no eixo para não gerar esforços na borda da laje e posterior aplicação das excentricidades em formato parabólico.

Dessa maneira, foram realizadas as variações de excentricidades nos pontos críticos, local em que a mesma é máxima, situadas nos pilares (topo) e no vão central entre apoios (base).

As variações de inserção de erros foram divididas em três casos distintos, cada um com um nível de efeito diferente. Foram aplicadas variações pontuais nos espaçadores, que tiveram como consequência, redução da parábola em todo trecho.

No primeiro caso foram reduzidas as excentricidades das cordoalhas unicamente na face superior da laje (topo), na região dos pilares P6 e P7. No seguinte, diminui-se a excentricidade exclusivamente nas regiões entre os apoios, na face inferior (base) da laje lisa. 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.

No Quadro 2 são apresentados os pontos de redução da excentricidade e as abreviações criadas para cada caso.

Local da variação	Abreviação
Face superior	Topo
Face inferior	Base
Faces superior e inferior	Crítico

Quadro 2. Ponto de aplicação da variação de excentricidade e nomenclatura para cada caso.

A Figura 4 mostra as posições das variações de excentricidades, sobre os pilares e também, no vão entre os pilares.

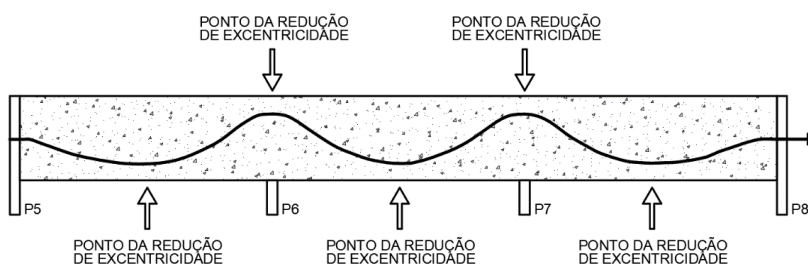


Figura 4. Pontos de redução da excentricidade para o Topo.

Para cada um dos três casos (Quadro 1), foram desenvolvidas quatro hipóteses de variações de excentricidades, com valores de reduções de 0,5 cm, 1,0 cm, 1,5 cm e 2,0 cm. Esses valores, com números exatos e espaçados em 0,5 cm, foram adotados no estudo em virtude de que geralmente os pontos de apoios verticais nos projetos são apresentados nesta formatação, visando viabilizar a conferência *in loco*. Além disso, os estudos de [28], apresentam valores limites de 0,5 cm e 1,0 cm de redução na excentricidade das cordoalhas das lajes para espessuras de lajes iguais ou maiores que as definidas neste estudo. Desta maneira consegue-se comparações diretas entre este estudo e as recomendações apresentadas por [28].

No Quadro 3 são informadas as hipóteses de variações com suas nomenclaturas e as respectivas reduções das excentricidades.

Hipótese	Nomenclatura	Redução de excentricidade (cm)
Referência	H 0	0,0
Hipótese 1	H 0,5	0,5
Hipótese 2	H 1,0	1,0
Hipótese 3	H 1,5	1,5
Hipótese 4	H 2,0	2,0

Quadro 3. Hipóteses das variações de excentricidades com suas nomenclaturas e os valores de redução das excentricidades.

O trecho do P5 ao P6 foi nomeado como “primeiro”, o vão entre o P6 e P7 recebeu a denominação “central” e, por fim, entre o P7 e P8, recebeu a denominação de “último”. A Figura 5 apresenta a nomenclatura dos vãos com a posição dos mesmos e os pontos onde foram aplicadas as variações das excentricidades nas faces da laje.

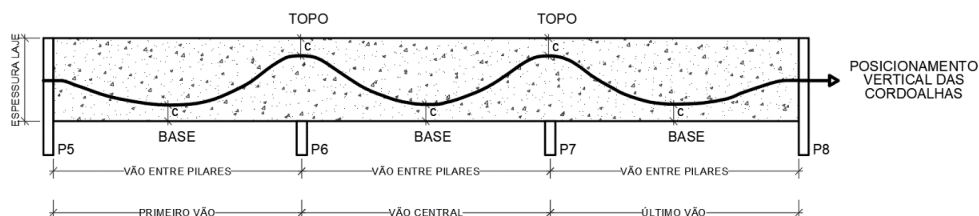


Figura 5. Posicionamento vertical das cordoalhas na laje.

2.3 Materiais e parâmetros normativos utilizados para o dimensionamento

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, a tipologia mais utilizada nacionalmente, em obras com o sistema de lajes lisas de concreto protendido com cordoalhas engraxadas não aderentes. A carga mínima à ruptura é de 187 kN e a força de aplicação no ato do tensionamento é em 150 kN, atendendo os requisitos das Normas [29] e [30].

Para a definição da resistência do concreto e cobrimento das armaduras (ativas e passivas) foi considerado Classe de Agressividade Ambiental II, onde o risco de deterioração da estrutura é pequeno, com classe de agressividade ambiental moderada [10]. Isto porque, esta classificação enquadra-se para projetos em ambientes localizados em terrenos urbanos, onde são construídas grande parte das obras prediais civis.

Para este trabalho, foi utilizado concreto de 35,0 MPa e módulo de elasticidade (E), 39,7 GPa, devido a Classe de Agressividade Ambiental, os vãos entre pilares e os carregamentos nas lajes. O máximo valor admissível de tensão normal de compressão no concreto, no ato da protensão, é de 15,75 MPa e no ELS-F, é de 21,0 MPa [4], por isso, nesta combinação, esta é a máxima de tensão normal de compressão admissível.

Foi utilizado como carregamento referente a carga variável, o valor mínimo recomendado pela referência [31] para locais de edificações comerciais, para salas de uso geral, 2,5 kN/m², e os valores de revestimento de pisos para edifícios residenciais e comerciais, 1,0 kN/m².

No Quadro 4 são apresentados os valores de carregamentos utilizados, a resistência característica à compressão do concreto e os valores de cobrimentos para as armaduras.

Itens especificados	Valor	Unidade
Cobrimento para as armaduras passivas	2,5	cm
Cobrimento para as armaduras ativas	3,0	cm
Carga permanente	1,0	kN/m ²
Carga variável	2,5	kN/m ²
Resistência característica à compressão do concreto	35,0	MPa

Quadro 4. Apresentação dos valores de cobrimentos das armaduras, cargas utilizadas e resistência característica à compressão do concreto.

Na análise das armaduras ativas para as lajes, seguiram-se três parâmetros fundamentais normatizados: tensão de pré compressão mínima, tensão normal de tração máxima admissível para o concreto e deslocamentos verticais máximos, para somente após estes critérios alcançados ajustar as demais referências, como balanceamento de cargas e deslocamentos. Foram realizadas estas análises, com a apresentação dos valores encontrados, para o ELS-F, e também, efetuada a verificação no dimensionamento, para o ato da protensão, para todos estes critérios.

Todos os dimensionamentos das lajes iniciaram, com tensão de pré compressão em qualquer ponto do elemento, com o mínimo de 1,0 MPa, [10] e [4].

A referência [10] limita a deslocamentos verticais para lajes, com este tipo de utilização, na relação de vão livre entre pilares dividido por 250 ($L/250$), então este valor foi tomado como limite para os modelos antes da inserção de variações nas excentricidades das cordoalhas.

Adotou-se, quando possível, para o parâmetro de balanceamento de cargas, resultados entre 60% a 80% da carga permanente, valores esses usuais para lajes de edifícios residenciais, comerciais e garagens [8].

Definiu-se a utilização da protensão limitada [25]. Conforme a Nota 3 da Tabela 13.4 da referência [10], 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.

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.

As armaduras passivas positivas e as armaduras de combate a flexão negativa no topo dos pilares foram calculadas para os modelos de referência e também para os casos e hipóteses que atenderam os critérios das referências [10] e [4], para tensões admissíveis nas faces, na pré compressão e os máximos deslocamentos verticais, buscando verificar as variações da taxa para cada mudança de excentricidade de cordoalhas de cada laje analisada.

No Quadro 5 são apresentadas as recomendações de limites para tensão de pré compressão, balanceamento de cargas, deslocamentos verticais e tensão normal de tração nas faces inferior e superior.

Critério analisado	Limite	Parâmetros de controle	Unidade	Fonte
Tensão de pré compressão	Mínimo	1,0	MPa	[4], [10]
Tensão de tração nas faces inferior e superior	Máximo	3,38	MPa	[10]
Tensão de compressão máxima para o Ato	Máximo	15,0	MPa	[4]
Tensão de compressão máxima para o ELS-F	Máximo	21,0	MPa	[4]
Balanceamento de cargas	Recomendação	60,0 a 80,0	%	[8], [27]
Deslocamentos verticais diferidos	Máximo	L/250	cm	[10]

Quadro 5. Critérios analisados com os limites e respectivas fontes indicadas.

Estes foram os valores usados como balizadores para os dimensionamentos dos modelos hipótese de referência. 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.

2.4 Análises do *software* de dimensionamento

O dimensionamento estrutural das lajes foram realizados com o auxílio de ferramenta computacional, a partir do uso do *software* Adapt Floor 2017, versão Pro. Este programa é específico para análise e dimensionamento de concreto protendido, discretiza a laje em elementos de casca, verificando os efeitos da protensão de acordo com a geometria e a força das cordoalhas, em cada elemento.

Ao iniciar o processo de dimensionamento das lajes foram lançadas linhas de suporte no alinhamento dos pilares, para que o *software* calculasse a média dos esforços desta região. Estes esforços foram analisados a partir das 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 M 7,0 a M 10,0 foram de 10, 17, 25 e 33 unidades, respectivamente.

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados encontrados através das simulações computacionais para os modelos arquitetônicos e as hipóteses de combinações de variações das excentricidades das cordoalhas.

3.1 Tensões de pré compressão

A Tabela 1 apresenta os valores dos resultados das tensões de pré compressão nas lajes.

Análise das tensões de pré compressão na laje (Valores em MPa)														
Modelo		M 7,0												
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	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		M 8,0												
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	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		M 9,0												
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	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		M 10,0												
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	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

Tabela 1. Verificação das tensões de pré compressão nas lajes.

As tensões 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.

Ao atender a condição da tensão de pré compressão mínima [10], no valor de 1,0 MPa, constatou-se que para o menor vão livre entre pilares, o modelo M 7,0, conseguiu-se atender os limites de tensões normais máximas de tração nas faces da laje e também os deslocamentos verticais máximos, dada a importância deste critério, principalmente para vãos menores.

Para os modelos M 8,0, M 9,0 e M 10,0, não foi possível dimensioná-los com a tensão mínima de 1,0 MPa. Tornou-se necessário a inserção de cordoalhas para que os modelos alcançassem os valores mínimos para os demais critérios analisados: tensão de tração máxima nas faces superior e inferior, no valor de 3,38 MPa, e deslocamentos verticais máximos, na relação máxima de $L/42$. Conseqüentemente, ao aumentar estas cordoalhas, os valores de pré compressão também aumentaram.

Confirmou-se que em todos os modelos, as tensões de pré compressão em todas hipóteses de variações de excentricidades, mantiveram-se com a tensão mínima de 1,0 MPa, [10].

3.2 Tensões normais máximas na laje

As tensões normais de tração na face inferior da laje, para os quatro modelos, mesmo com as mudanças no posicionamento vertical das excentricidades das cordoalhas, mantiveram-se atendendo o limite máximo de tensão normal de tração, 3,38 MPa, estabelecido pela referência [10].

Na Tabela 2 são apresentados os valores dos resultados das tensões normais encontradas na face inferior da laje, para os três vãos existentes.

Análise das tensões na face inferior na laje (Valores em MPa)														
Modelo		M 7,0												
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	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		M 8,0												
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	2,52	2,55	2,59	2,62	2,65	2,63	2,73	2,84	2,94	2,66	2,79	2,93	3,07
	Central	-0,62	-0,54	-0,45	-0,36	-0,28	-0,56	-0,49	-0,42	-0,35	-0,47	-0,31	-0,15	0,01
	Último	2,48	2,51	2,54	2,57	2,61	2,58	2,69	2,79	2,90	2,62	2,75	2,89	3,03
Modelo		M 9,0												
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	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	-1,37	-1,28	-1,18	-1,08	-1,25	-1,17	-1,09	-1,02	-1,15	-0,98	-0,81	-0,64
	Último	2,63	2,66	2,72	2,74	2,78	2,67	2,79	2,90	3,01	2,71	2,82	3,01	3,16
Modelo		M 10,0												
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	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 2. Verificação da análise das tensões normais na face inferior nas lajes.

O vão central atende os valores máximos do estado limite de serviço de formação de fissuras (ELS-F) com menor dificuldade que os vãos das extremidades, o primeiro e último vão. Nos modelos de referência, no trecho central, obtiveram-se tensões de compressão na face inferior, devido a maior força de protensão neste trecho em relação ao primeiro e último da laje.

Ao modificar as excentricidades das cordoalhas, exclusivamente no topo dos pilares, as tensões sofrem menores variações ao comparar com as reduções das 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, limite máximo admissível pela referência [10].

Além da análise das tensões na face inferior, foi realizado o mesmo processo na face superior da laje. Este foi o critério verificado com maiores índices de impedimentos de hipóteses de variações de excentricidades, devido ao limite aceitável de tensões impostos da referida Norma, no valor de 3,38 MPa. A Tabela 3 indica o resumo das análises deste critério.

Análise das tensões na face superior na laje (Valores em MPa)														
Modelo		M 7,0												
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	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		M 8,0												
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	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		M 9,0												
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	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		M 10,0												
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	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

Tabela 3. Verificação da análise das tensões na face superior nas lajes.

A variação de excentricidade no topo dos pilares (Topo), na hipótese H 0,5 de modificações das alturas dos espaçadores, foram as únicas que obtiveram os resultados de tensões normais de tração na face superior atendendo o limite de 3,38 MPa, especificado pela referência [10].

Nesta hipótese, o modelo M 8,0 igualou o limite do valor máximo aceitável de 3,38 MPa de tensão normal de tração na face superior da laje, já os demais modelos, nestas mesmas hipóteses ficaram com sobra entre os valores encontrados e o máximo aceitável.

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 M 7,0 e M 9,0, foram os únicos que na hipótese H 0,5 de modificação dos valores de excentricidades do caso Base, tiveram seus valores de tensões normais de tração menores que 3,38 MPa.

Além disso, na combinação crítica, em nenhuma das variações de excentricidades, as tensões normais de tração obtidas foram menores que o limite estabelecido de 3,38 MPa, para o ELS na combinação frequente, [10].

3.3 Deslocamentos verticais

Na Tabela 4 são apresentados os valores obtidos para os deslocamentos verticais diferidos das lajes.

Os modelos M 7,0 e M 8,0 foram os dois, que se mantiveram em todas as hipóteses e casos de variações, os valores de deslocamentos verticais atendendo os limites de 28,0 mm e 32,0 mm, respectivamente.

O modelo M 9,0, apenas no vão central, obteve valores abaixo de 36,0 mm de deslocamentos verticais, limite estabelecido pela referência [10] para a distância entre pilares deste modelo.

Por fim, o modelo M 10,0, teve seus valores de deslocamentos verticais abaixo de 40,0 mm, limite normativo [10], em todas as variações de excentricidades para o caso Topo de modificações nas alturas das cordoalhas.

Análise dos deslocamentos verticais na laje (Valores em mm)														
Modelo		M 7,0												
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	18,54	18,75	18,95	19,16	19,37	19,07	19,61	20,14	20,68	19,28	20,02	20,77	21,52
	Central	5,42	5,81	6,26	6,63	7,03	5,73	6,03	6,32	6,63	6,13	6,92	7,52	8,21
	Último	19,06	19,25	19,43	19,63	19,82	19,56	20,06	20,56	21,07	19,75	20,44	21,14	21,83
Modelo		M 8,0												
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	24,18	24,43	24,69	24,94	25,19	24,88	25,59	26,30	27,01	25,14	26,10	27,17	28,04
	Central	4,78	5,13	5,49	6,45	7,06	5,29	5,61	6,12	7,13	5,75	6,72	7,69	8,66
	Último	23,93	24,23	24,56	24,84	25,12	24,74	25,48	26,26	29,98	25,02	26,05	27,09	28,13
Modelo		M 9,0												
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	35,74	35,89	36,46	36,78	37,13	36,05	36,65	36,96	37,87	36,27	36,76	37,94	39,19
	Central	4,97	5,76	6,56	7,36	8,14	6,54	7,06	7,58	8,32	7,26	8,44	9,65	10,86
	Último	35,59	35,87	36,21	36,68	37,04	35,99	36,33	36,75	37,64	36,10	36,53	37,74	38,96
Modelo		M 10,0												
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	35,35	35,68	36,35	37,98	39,04	36,25	37,15	38,05	40,10	36,85	39,31	41,60	42,51
	Central	2,72	3,26	4,96	8,92	10,14	3,29	5,89	8,99	10,25	4,01	6,57	9,87	12,02
	Último	34,83	35,19	35,87	37,41	38,34	35,75	36,69	37,61	39,56	36,11	38,89	39,98	42,14

Tabela 4. Análise dos deslocamentos verticais nas lajes.

Para os quatro modelos, os deslocamentos verticais, atenderam os limites máximos do valor de vão livre entre pilares dividido por 250, especificado pela referência [10], unicamente na primeira hipótese de variação no caso Topo, com redução na excentricidade no topo dos pilares.

3.4 Balanceamento de cargas

Os valores de balanceamentos de cargas aumentam a partir da inserção de cordoalhas impostas para solucionar os critérios de tensões normais de tensão normal de tração na face inferior, superior e pré compressão da laje.

A Tabela 5 mostra o resumo dos valores de balanceamentos de cargas para todos os conjuntos avaliados.

Análise dos balanceamentos de cargas na laje (Valores em %)														
Modelo		M 7,0												
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		M 8,0												
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		M 9,0												
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		M 10,0												
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

Tabela 5. Análise do balanceamento de cargas para as lajes.

Somente o modelo M 7,0 foi o que atendeu as recomendações de [8] e [21], para as recomendações de valores de balanceamento de cargas, entre 60% e 80%.

Como este critério, foi utilizado, com o objetivo de parâmetro auxiliar de análise, mesmo que os valores estivessem fora destas recomendações, não foram classificados como inaceitáveis para a avaliação do estudo.

3.5 Armaduras passivas

Na Tabela 6 são apresentados os resultados do cálculo das armaduras passivas positivas para os modelos de referência e a hipótese H 0,5 para os casos de variação de excentricidade no topo e na base e as demais hipóteses para o caso Topo.

Modelo de análise	Hipóteses e casos de cálculo					
	Referência		H 0,5 - Topo		H 0,5 - Base	
	Vão 1 e 3	Vão central	Vão 1 e 3	Vão central	Vão 1 e 3	Vão central
	Área de aço (cm ² /m)		Área de aço (cm ² /m)		Área de aço (cm ² /m)	
M 7,0	2,54	2,11	2,54	2,11	2,64	2,22
M 8,0	2,72	2,10	2,72	2,10	Não dimensionado.	
M 9,0	3,26	2,40	3,26	2,40		
M 10,0	3,74	2,46	3,74	2,46		

Tabela 6. Resultado armadura positiva das lajes.

Para as variações nas hipóteses H 0,5 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. O vão central apresentou menores valores de taxas de armadura em função das tensões normais de tração serem menores.

Foi efetuado o dimensionamento das armaduras passivas negativas para os quatro modelos de referência e também para hipótese H 0,5 para os casos de variação de excentricidade no topo e na base e as demais hipóteses para o caso Topo. Na Tabela 7 são apresentados os cálculos das armaduras de combate à flexão negativa.

Modelo de análise	Hipóteses e casos de cálculo					
	Referência		H 0,5 - Topo		H 0,5 - Base	
	Quantidade de aço					
	Barras	Área de aço (cm ² /m)	Barras	Área de aço (cm ² /m)	Barras	Área de aço (cm ² /m)
M 7,0	26 - Ø16,0 mm	7,4	26 - Ø16,0 mm	7,4	27 - Ø16,0 mm	7,7
M 8,0	42 - Ø16,0 mm	10,5	42 - Ø16,0 mm	10,5	Não dimensionado.	
M 9,0	55 - Ø16,0 mm	12,2	55 - Ø16,0 mm	12,2		
M 10,0	78 - Ø16,0 mm	15,6	78 - Ø16,0 mm	15,6		

Tabela 7. Armadura negativa das lajes.

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 H 0,5 de variação de excentricidade para o caso Topo. Isto porque, a redução de 0,5 cm na altura das excentricidades das cordoalhas, posicionadas no topo dos pilares, não apresentou novos esforços suficientes para aumentar a quantidade de aço neste critério.

A variação da excentricidade das cordoalhas na face inferior para o modelo M 7,0, fez com que fosse necessário aumento da taxa de armadura de combate a flexão negativa sobre os pilares, variando em relação ao modelo hipótese de referência, do mesmo modelo arquitetônico.

4. CONCLUSÕES

Conforme proposta inicial desta pesquisa, realizou-se a análise e dimensionamento de quatro modelos de lajes lisas protendidas, com variação 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.

Através da averiguação efetuada na presente pesquisa foi 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 M 7,0 foi o único que obteve valores dos critérios analisados, atendendo os limites da referência [10], com variações das excentricidades na hipótese H 0,5, para os casos Topo e Base, de posição da variação das alturas;
- Os Modelos M 8,0, M 9,0 e M 10,0, apenas na variação para a hipótese H 0,5, no caso Topo, apresentaram resultados das tensões normais de tração abaixo do limite de 3,38 MPa, estabelecido pela referência [10];
- Os fatores responsáveis pelas tensões de pré compressão no elemento estrutural foram somente as quantidades 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 M 7,0 e M 8,0 foram os únicos que permaneceram abaixo dos limites normativos de $L/250$ para todas as hipóteses de variações de excentricidades aplicadas [10];
- O critério de balanceamento de cargas manteve-se atendendo aos limites recomendados por [21] e [8] apenas no Modelo M 7,0. Como são critérios complementares, não normatizados, podem ser aceitos nos dimensionamentos, mesmo com valores não recomendados por estes autores;
- As taxas de armaduras passivas positivas e negativas mantiveram-se iguais, unicamente, nos modelos de referência e a hipótese H 0,5 de variação da excentricidade do caso Topo;
- O máximo aumento dos valores de cobrimentos, em relação as excentricidades das cordoalhas nas faces das lajes, é de 16,7%. Dessa forma, os critérios analisados mantêm seus valores atendendo aos limites especificados anteriormente.
- É admissível, para as lajes lisas protendidas com protensão não aderente com cordoalhas engraxadas, do tipo CP 190 RB Ø 12,7 mm, com vãos entre pilares de 7,0 m a 10,0 m, uma tolerância máxima de 0,5 cm de redução no posicionamento vertical das cordoalhas na face superior. Esta análise é mais limitada quando comparadas às tolerâncias encontradas na literatura [22].

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pela estrutura física e de ensino que auxiliaram durante o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AALAMI, Bijan O. Structural Modeling of Post-Tensioned Members. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126 N°. 2. p. 157-162. Fev, 2000.
- [2] SANTOS, J. S. D. *Desconstruindo o Projeto Estrutural de Edifícios: Concreto Armado e Protendido*. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, 127 p. 2017.
- [3] SILVA, Gildemir; PRATA, Bruno; ALBUQUERQUE, Augusto. Análise da eficiência dos sistemas estruturais para edifícios em concreto. *Ambiente Construído*. Vol. 18, n. 1, p. 313-325. Porto Alegre, Jan./Mar., 2018.
- [4] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318 - Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI Commitee, 2019.
- [5] KANG, Thomas e BONDY, Kenneth B. Recommendations for Design of Post-Tensioned Slab-Column Connections Subjected to Lateral Loading. *PTI Journal*, Post Tensionig Institute. Vol. 6, nº 1, Fevereiro, 2008.
- [6] CARVALHO, Roberto Chust. *Estruturas em concreto protendido: cálculo e detalhamento*. 2. ed. São Paulo: Pini, 2017.
- [7] ALMEIDA, Sylvia Regina Mesquita de. *Contribuição ao projeto ótimo de cabos em vigas de concreto protendido*. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2001.
- [8] LOUREIRO, Giordano José. Projeto de Lajes Protendidas com Cordoalhas Engraxadas. *Revista Ibracon de estruturas e materiais*. Ed. 44, Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte, 2006.
- [9] FIGUEIREDO FILHO, J. R. *Sistemas Estruturais de Lajes Sem Vigas: subsídios para o projeto e execução*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo: São Carlos, 1989.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [11] CHOLFE, Luis; BONILHA, Luciana. *Concreto protendido: teoria e prática*. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2018.

- [12] NASSER, George D. A look at prestressed flat plate construction. *PCI Journal*, Vol. 14, n. 6. 1969.
- [13] SILVA, R.C. 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, USP, Departamento de Engenharia de Estruturas. 328 p. São Carlos, 2003.
- [14] PFEIL, Walter. Concreto Protendido – Introdução. Volume 1. LTC Editora, Rio de Janeiro, 1984.
- [15] VICENTE, C. M. D. S.; ALBINO, J. P. D. C. Lajes em Concreto Armado e Protendido. 1ª. ed. Rio de Janeiro: da Universidade Federal Fluminense, 1994.
- [16] LIN, T. Y. Design on Prestressed Concrete Structures. 2. ed. Wiley, New York, 1963.
- [17] SILVEIRA, Marcelo C. Alcântara. 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, 2002.
- [18] AALAMI, BIJAN O. Load Balancing: A Comprehensive Solution to Post- Tensioning. *ACI Structural Journal*. p 662-670. November/December 1990.
- [19] AALAMI, Bijan O. & BOMMER, Allan. Design Fundamentals of Post- Tensioned Concrete Floors. 1. Ed. April, USA, 1999.
- [20] ROMANICHEN, R. M. e SOUZA, R. A. Reinforced concrete corbels strengthened with external prestressing. *Revista Ibracon de estruturas e materiais*. Vol 12, Number 4, p. 812 – 831. August, 2019.
- [21] AALAMI, Bijan O. Post-Tensioned Manual. 1ª. ed. California: ADAPT, v.1, 500 p. 2014.
- [22] CAUDURO, Eugenio Luiz. Manual para a boa execução de estruturas protendidas usando cordoalhas de aço engraxadas e plastificadas. 2. ed. São Paulo, 2002.
- [23] SOUZA JUNIOR, Orivaldo A. e OLIVEIRA, Denio R. C. Influence of the tendon's layout on the shearing resistance of prestressed concrete beams. *Revista Ibracon de estruturas e materiais*. Vol. 9, Number 5, p. 765 – 795. October, 2016.
- [24] CARO, Libardo A., VARGAS José R. Martí, ROS, Pedro Serna. Prestress losses evaluation in prestressed concrete prismatic specimens. *Engineering Structures*. Vol. 48, pages 704-715. march, 2013.
- [25] SOUZA, Fábio Albino de. Radier simples, armado e protendido – Teoria e Prática. 3. Ed. Editora Catarse. São Paulo, 2018.

- [26] CAVACO, Eduardo S.; BASTOS, Afonso; Santos, Filipe. Effects of corrosion on the behaviour of precast concrete floor systems. *Journal Construction and Building Materials*. Lisboa, 2017.
- [27] HANAI, João Bento de. Fundamentos do Concreto Protendido. E-book de apoio para o curso de engenharia civil. São Carlos, 2005.
- [28] XIN, Feng; XIANYAN, Zhou. Experimental research on crack width of retard bonded partially prestressed concrete beams. *Engineering Village*. 1. ed. International Conference on Advances in Civil Infrastructure Engineering. Hunan, 2012.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7483: Cordoalhas de aço para concreto protendido. Rio de Janeiro, 2020.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6349: Barras, cordoalhas e fios de aço para armaduras de protensão – Ensaio de tração. Rio de Janeiro, 2008.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

ANEXO A - NORMAS PARA A PUBLICAÇÃO NA REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS

Título do artigo (em Inglês)

Título do artigo (em Portugues) ou Título do artigo (em Espanhol)

[Certifique-se de usar o caso da sentença como este, não use um período no final]

Nome completo^a <https://orcid.org/...>

Nome completo^b <https://orcid.org/...>

Nome completo^c <https://orcid.org/...>

[O nome dos autores deve ser escrito na íntegra sem abreviaturas, use letras sobrescritivas para identificar a afiliação. Autores sem ORCID são incentivados a se registrar em <https://orcid.org/register>]

a Instituição - SIGLA, Departamento, Cidade, Estado, País

b Instituição - SIGLA, Escola, Departamento, Cidade, Estado, País

[Os nomes das instituições devem estar na língua do país da instituição, ou em inglês quando a língua principal não está no alfabeto romano. A mesma instituição para diferentes autores deve ser agrupada]

Resumo em inglês: Texto com máximo de 10 linhas ou 300 palavras escritas em inglês. O resumo deve suprir ao leitor uma ideia clara do assunto tratado no artigo. O resumo deve ser uma declaração concisa das conclusões e conclusões do artigo principal.

Palavras-chave: máximo de cinco palavras-chave, use minúsculas, separadas por vírgula, com um ponto no final.

Resumo ou Resumon: Versão em português ou espanhol do resumo.

Palavras-chave or Palabras clave: Portuguese ou versão em espanhol das palavras-chave.

Como citar: J. K. Sobrenome, "Título do artigo", Rev. IBRACON Estrut. Mater., vol. xx, no. xx, elocation, ano, <https://doi.org/...>

[Os itens em vermelho serão preenchidos mais tarde pela equipe do jornal]

Autor correspondente: Sobrenome do Primeiro Nome. E-mail: email@email.com

Suporte financeiro: Digite todas as informações de financiamento recebidas, certificando-se de incluir a fonte de financiamento e os números de subvenção nessa ordem. Se você não recebeu financiamento, diga o seguinte: Nenhum.

Conflito de interesses: Digite a declaração de conflito de interesses do seu autor após o cólon. Se todos os autores não tiverem nada a declarar adicione a seguinte declaração: Nada a declarar.

1 INTRODUÇÃO

O estado da arte, os objetivos, a justificativa para este trabalho e o significado devem ser revistos aqui. A sugestão da organização foi ajustada a artigos sobre investigações experimentais, no entanto, os autores podem modificar livremente a sequência de itens. O texto deve ser escrito em Times New Roman de 12 pontos. O número máximo de páginas do manuscrito é 25, comece a contar a partir da seção "Introdução" e incluindo agradecimentos e referências. Se necessário, você pode dividir as seções de texto em subseções usando títulos para esclarecer o texto.

2 NÍVEIS DE POSIÇÃO

Os níveis de posição estabelecem a hierarquia das seções pelo formato ou aparência. As seções e os títulos de subseção devem ser precedidos por numeração progressiva, apresentada em algarismos árabes, a partir de 1. O NÍVEL DE DIREÇÃO 1 (1) deve ser escrito em letras maiúsculas, 12 pontos vezes tipo romano em negrito. O nível de cabeça 2 (1.1) deve ser escrito em letras minúsculas, apenas a inicial em maiúsculas, 12 pontos vezes tipo romana em negrito. O Nível de Título 3 (1.1.1), também deve ser escrito em letras minúsculas, apenas a inicial em maiúscula, 12 pontos vezes tipo romana, mas sem negrito. A Posição do nível 4 (1.1.1.1) apresenta apenas a inicial em letras maiúsculas, 12 pontos vezes tipo romana em itálico. Deixe sempre uma linha em branco antes de um nível de posição 1.

3 MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

Apresentar a caracterização física, química e mecânica dos materiais utilizados no programa experimental. Descreva as investigações e procedimentos laboratoriais.

3.1 Tabelas e números

Tabelas e figuras devem ser numeradas e apresentadas em ordem ascendente e sequencial e referidas no texto nestes formatos: Figura 1 ou (Figura 1), Tabela 1 ou (Tabela 1). Todas as tabelas e figuras devem ter legendas e devem ser incluídas no texto, próximo à sua primeira citação.

3.1.1 Tabelas

Todos os dados mostrados nas tabelas devem ser digitados usando 10 ou 11 pontos. A Tabela 1 é um exemplo dessa situação. Todas as tabelas e gráficos devem estar em formato editável. As tabelas devem ser incluídas no texto próximo de onde são citadas.

Determination	Mass (%)
Ca(OH) ₂	91,00
Mg(OH) ₂	0,56
CaSO ₄	0,49
SiO ₂	1,50
Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	0,89
Water	0,32

Tabela 1. Probabilidade da composição de limão hidratado.

3.1.2 Figuras

Fotografias, gráficos e diagramas devem ser todos chamados de "Figura(s)". Os números devem estar em boa resolução (legível e claro) em .tiff, .png ou .jpg formato. Todos os dados mostrados em números devem ser digitado iguais ao texto. Títulos e notas de rodapé de todas as figuras devem estar em formato editável. Os valores devem ser incluídos no texto próximo de onde são citados.

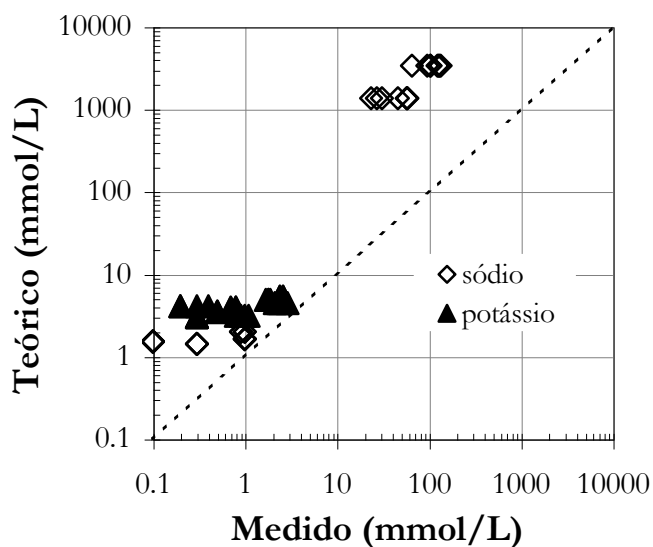


Figura 1. Relação entre a concentração medida e a concentração teórica de íons alcalinos.

3.2 Equações

Certifique-se de que as equações estão em um formato editável. Use o editor de equações do Word (2007 ou posterior) ou MathType para esbordá-los. Não aceitamos equações em formato de imagem. As equações devem ser numeradas e apresentadas em ordem ascendente e sequencial e referidas no texto nestes formatos: Equação 1 ou (Equação 1). Veja o exemplo abaixo (Equação 1):

$$C_r = \frac{V_p \cdot C_0}{V_j} \quad (1)$$

onde V_p = volume de efluentes no ponto de ruptura (cm³); V_j = volume de resina biocida na coluna (cm³); e C_0 = concentração bacteriana inicial (células cm⁻³).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados precisam ser discutidos para apoiar as conclusões.

5 CONCLUSÕES

Escreva um conjunto de conclusões ou um resumo no qual as implicações significativas das informações apresentadas no corpo de papel sejam revisadas.

AGRADECIMENTOS

Se o autor quiser reconhecer quaisquer indivíduos, organizações ou agências para assistência ou apoio ao trabalho relatado. A posição desta e das seguintes seções não deve receber numeração progressiva.

CITAÇÕES

A Revista de Estruturas e Materiais do IBRACON adota o estilo de citação e referência do IEEE. O guia de referência completo está disponível em <https://ieeauthorcenter.ieee.org/wp-content/uploads/IEEE-Reference-Guide.pdf>

Todas as referências precisam ser numeradas no texto em ordem ascendente e consecutiva. Eles devem aparecer na linha, em suportes quadrados, dentro da pontuação. Exemplos: como mostrado [4], [5]; como mencionado anteriormente [2], [4]–[7], [9].

NOTA: Use et al. quando três ou mais nomes forem dados para uma referência citada no texto.

FORMATOS DE REFERÊNCIA

Em todas as referências, o nome dado do autor ou editor é abreviado apenas para a inicial e precede o sobrenome. Use visagens ao redor de Jr., Sr., e III em nomes. Liste os nomes de todos os autores, até seis nomes. Se houver mais de seis nomes listados, use o nome do autor principal seguido por et al. Para obter exemplos adicionais, consulte o Guia de Referência do IEEE, no link abaixo:

<https://ieeauthorcenter.ieee.org/wp-content/uploads/IEEE-Reference-Guide.pdf>

Artigo do revista

[1] J. K. Autor, "Título do artigo", Abreviado. Título de Periódico, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, Abbrev. Mês, ano, <https://doi.org/...>

Artigo do revista online

[2] J. K. Autor, "Título do artigo", Abreviado. Título de Periódico, vol. x, no. x, pp. xxx, Abbrev. Mês, ano. Acesso: Mês, Dia, Ano. [Online]. Disponível: site/path/file

Contribuições do autor: Descrição da contribuição de cada coautor para o estudo. [Exemplo: GC: conceituação, aquisição de financiamento, supervisão, redação; PGL: conceituação, curadoria de dados, análise formal, metodologia, redação; CRS, HGL e NA: curadoria de dados, análise formal.

Editores: Editor Associado Nome, José Luiz Antunes de Oliveira e Sousa, Guilherme Aris Parsekian. [Os itens em vermelho serão preenchidos mais tarde pela equipe do jornal] . tese, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., Cidade de Univ., Abbrev. Estado, ano.