

INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE CORDOALHAS ENGRAXADAS E PLASTIFICADAS EM PROJETOS DE LAJES LISAS PROTENDIDAS

Caroline Luize de Moraes Vettori ¹; Mauricio Sgarbi ²; Fabio Albino de Souza ³

¹ Engenheira Civil; caroline_moraes@outlook.com.br

² Msc, Professor da Universidade Federal Fluminense - UFF; mauricio.sgarbi@sigma1.eng.br

³ Unicamp; IDD; EBPX; Departamento de Estruturas - DES; fabio@ebpx.com.br

Resumo

O concreto protendido não é uma tecnologia construtiva nova e vem sendo utilizado no Brasil em vários elementos, principalmente em lajes lisas protendidas. Aliando-se as lajes lisas com a protensão não-aderente, tem-se um sistema muito eficiente e com possibilidade de utilização de grandes vãos, apresentando bons resultados de desempenho. O desafio dos projetistas estruturais é escolher o melhor sistema estrutural para cada projeto quanto ao custo, facilidade de execução e desempenho estrutural, mas mesmo após essa definição, ainda há várias outras a serem feitas. No projeto de lajes lisas protendidas não é diferente, é preciso definir o melhor traçado das cordoalhas engraxadas, para melhor desempenho da laje em serviço. Sendo assim, o presente artigo visa analisar projetos de lajes lisas e verificar a influência da distribuição das cordoalhas engraxadas em lajes lisas protendidas. Neste trabalho foram analisados apenas opções de arranjo dos cabos concentrados em uma direção e distribuídos na outra. Foram analisados quatro projetos, sempre com duas variações, diferenciados entre si somente pelo arranjo dos cabos, totalizando oito modelos. Por fim, os oito projetos que foram analisados no software TQS, foram comparados quanto aos deslocamentos totais, quantitativos e custos. Percebeu-se que ao manter os deslocamentos bem próximos entre os projetos de mesma dimensão, os quantitativos de armadura ativa foram menores nos primeiros modelos, enquanto que de armadura passiva foram variáveis em cada estudo. Ao comparar os custos finais de armaduras ativas e passivas, verificou-se que houve uma diferença muito baixa entre os modelos, variações irrelevantes do ponto de vista da engenharia. Esse resultado era esperado, visto que foi realizada a homogeneização dos esforços para os dimensionamentos, e mostra que para cada projeto deve existir uma maneira ideal de distribuir os cabos, considerando outras características.

Palavras chave: Concreto protendido; Lajes lisas protendidas; Arranjo dos cabos.

Abstract

The prestressed concrete is not a new constructive technology and has been used in Brasil in several elements, specially on prestressed flat slabs. By combining the flat slabs with the non-adherent prestressing, results in a very efficient system with the possibility of using large span, presenting good performance results. The challenge of structural designers is to choose the best structural system for each project in term of cost, ease of construction and structural performance. But even after this definition there are still others to be done. It is not different in prestressed flat slabs projects, it is necessary to define the best tendon layouts, to improve the performance of the slabs in service. Thus, the present article aims to analyse flat slabs designs and verify the influence of tendons arrangement on prestressed flat slabs. In this work were analysed only tendon arrangements banded-distributed layout. Four designs were analyzed, always with two variations, differentiated from each other only by tendon arrangement, totaling eight models. Finally, the eight designs analyzed using the TQS program were compared for total displacements, quantities and cost. The quantities of active reinforcement were smaller in the firsts designs even with similar displacements, while passive reinforcement were variable in each study. When comparing the active and passive reinforcement final costs it was found that was very small difference between the models, irrelevant variations from engineering point of view. This result was expected, since the efforts of the sizing were homogenized, and shows that for each project there should be an ideal way to distribute the tendons, considering other characteristics.

Keywords: Prestressed concrete; Prestressed flat slabs; Tendons arrangement.

Introdução

O concreto protendido já é bastante utilizado para projetos de pontes, lajes, vigas, radiers e demais elementos estruturais, e, portanto, não é uma tecnologia construtiva nova. Podemos analisá-lo apenas como uma variação do concreto armado, inserindo a armadura ativa.

Mesmo sendo bastante utilizada pelo mundo, a protensão ainda é pouco utilizada na região sul do Brasil e merece ser mais estudada e analisada, pois infelizmente ainda há um conservadorismo por parte dos construtores quanto ao uso desse sistema estrutural.

Sabe-se que a estrutura é parte importante no custo de uma edificação e por isso desafio dos engenheiros civis é analisar as alternativas de sistemas estruturais para cada caso e buscar as opções mais econômicas e de boa qualidade para a execução dos empreendimentos.

Quando se fala em protensão para projetos lajes de edifícios residenciais e comerciais, as cordoalhas engraxadas são mais utilizadas e muitos são os caminhos a serem seguidos e analisados para a definição de um projeto: lajes lisas protendidas, lajes nervuradas protendidas, lajes nervuradas apoiadas em vigas faixa protendidas, entre outros. Mesmo definindo-se um tipo de laje a ser utilizada em um projeto, ainda existe várias maneiras de distribuir as cordoalhas engraxadas.

Aalami (2014) explica que no caso de lajes lisas protendidas, quase sempre o projetista opta por realizar o lançamento dos cabos concentrados nas faixas dos pilares em uma direção, e distribuídos na direção ortogonal à primeira. Segundo Aalami (2014), este traçado de cabos possibilita a otimização das excentricidades dos cabos e evita interferências entre os mesmos.

Porém, Salomão e Marques (2017) comentam que o comportamento estrutural de elementos protendidos pode variar de acordo com o traçado e a distribuição dos cabos em planta. Ou seja, invertendo-se os lançamentos dos cabos concentrados e distribuídos nas direções das plantas, tem-se um comportamento da estrutura diferente em termos de esforços, deslocamentos e quantitativos.

Em vista desses fatos, a presente pesquisa estudou sobre a influência da distribuição das cordoalhas engraxadas em projetos de lajes lisas protendidas, analisando deslocamentos, quantitativos de materiais e custos com diferentes vãos e distribuição de cabos, analisando alguns modelos no Software TQS.

Concreto Protendido

A NBR 6118:2014 define os elementos de concreto protendido como sendo aqueles nos quais parte das armaduras 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, bem como propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado-limite último (ELU).

Cauduro (2002) explica que o concreto protendido é o concreto armado ao qual se acrescenta mais um carregamento através de cabos de protensão. O autor ainda cita que são peças de concreto, tais como vigas e lajes, nas quais tensões internas são induzidas por meio de aço de protensão.

De acordo com Emerick (2005), atualmente existe basicamente dois sistemas de acordo com o momento de aplicação da protensão: o sistema com pré-tração, no qual os cabos são tensionados antes da concretagem do elemento estrutural, e o sistema com pós-tração, em que o tensionamento dos cabos é feito após o concreto ter atingido uma resistência mínima especificada no projeto. A pré-tração é bastante utilizada nas indústrias de pré-moldados, sendo

realizado em pistas de concretagens. Já a pós tração pode ser classificada quanto à aderência dos cabos e o concreto nos sistemas aderente e não aderente. (EMERICK, 2005).

Segundo Salomão e Marques (2017) os cabos aderentes consistem em um tubo previamente corrugado, preenchido por cabos e ligados ao concreto, o que em caso de rompimento, faz com que a força de protensão não se dissipe totalmente do elemento. Os autores explicam que diferente dos cabos aderentes, as monocordoalhas engraxadas (cabos não aderentes) consistem em um conjunto de fios inseridos em uma bainha plástica engraxada para diminuir o atrito. Quanto à facilidade de execução e manutenção, as monocordoalhas engraxadas se destacam por serem flexíveis e leves, além de possibilitar o recabeamento e consequente reprotensão no caso de rompimento.

Níveis de Protensão

De acordo com Milani (2006) os níveis de protensão estão relacionados com a intensidade da força de protensão, que é função da proporção de armadura ativa utilizada em relação à armadura passiva. A protensão é classificada em: completa, limitada ou parcial, seguindo as seguintes recomendações segundo Milani (2006) e Emerick (2005):

- Protensão Completa: A armadura ativa é dimensionada visando o não aparecimento de tensões de tração no concreto e a armadura passiva é apenas construtiva ou mínima. Existe protensão completa quando se verificam as seguintes condições:
 - Para as combinações frequentes, é respeitado o Estado Limite de Descompressão.
 - Para as combinações raras, é respeitado o Estado Limite de Formação de Fissuras.
- Protensão Limitada: Neste caso, a armadura ativa é preponderante, não são permitidas fissuras em serviço e normalmente é necessária armadura passiva para atender a verificação à ruptura. É usada normalmente para projetos de lajes em edifícios e é considerada limitada quando se verificam as duas condições seguintes:
 - Para as combinações quase permanentes, é respeitado o Estado Limite de Descompressão.
 - Para as combinações frequentes, é respeitado o Estado Limite de Formação de Fissuras.
- Protensão Parcial: é a combinação de armaduras ativas e passivas, em que as fissuras são permitidas e controladas em serviço. Esse nível de protensão é utilizado quando se verifica a seguinte condição:
 - Para as combinações frequentes de ações, é respeitado o Estado Limite de Abertura de Fissuras com abertura característica menor ou igual a 0,2mm.

Segundo Pedrozo (2008) a protensão completa se aplica nos casos de obras em meios muito agressivos, já que proporciona as melhores condições de proteção das armaduras contra corrosão. Já a protensão limitada, por admitir tensões moderadas de tração em serviço, exige a colocação de armadura passiva adicional, que permite soluções equilibradas e mais econômicas.

Quanto à protensão parcial, Pedrozo (2008) explica que consome menos aço de protensão que os demais níveis, porém, como admite fissuração (não maiores que 0,2 mm), exige armadura passiva suplementar.

Essas condições são previstas na Tabela 13.4 da NBR 6118:2014 conforme apresentada na Tabela 1.

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 protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2 \text{ mm}$	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo ELS-F ELS-D ^a	Combinação frequente Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo ELS-F ELS-D ^a	Combinação rara Combinação frequente

^a A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50 \text{ mm}$ (Figura 3.1).

NOTAS

1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2.

2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.

3 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.

Tabela 1 - Tabela 13.4 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura em função das classes de agressividade ambiental. (Adaptada, NBR 6118, 2014)

É importante destacar que segundo a NBR 6118:2014, no item 3 da tabela 13.4, para lajes lisas e cogumelo protendidas, algumas verificações são dispensadas, bastando ser atendido somente o ELS-F para a combinação frequente das ações em todas as classes de agressividade ambiental.

Lajes lisas protendidas

Emerick (2005) cita que os principais esquemas estruturais adotados para lajes protendidas são as lajes lisas, com ou sem engrossamento na região dos pilares e as lajes nervuradas. O autor ainda explica que as lajes lisas apresentam vantagens em relação às demais sobretudo do ponto de vista da execução. Entretanto, sua resistência é em geral ditada pelo cisalhamento na região da ligação laje-pilar, que pode ser melhorada com o uso de engrossamento da laje nessa região com capitéis ou ainda com o uso de vigas faixas protendidas. Nunes (2019) cita mais duas desvantagens das lajes lisas como sendo menor resistência a esforços laterais e maiores flechas nas lajes, os dois casos devido a inexistência de vigas.

Segundo Leite, Albuquerque e dos Santos (2016), a laje lisa é um sistema estrutural que consiste em lajes conectadas diretamente a pilares sem o auxílio das vigas com ou sem a utilização da protensão. Por isso, Leite Junior (2015) explica que a estabilidade global dos edifícios geralmente é feita através de núcleos rígidos ou paredes de contraventamento. Loureiro (2006) relata que essas lajes são as mais vantajosas dos pontos de vista estético, funcional e construtivo, sendo recomendadas para vãos de até 8,00 m.

Rosa (2018) comenta que ao não se utilizar vigas, os pilares não tem necessidade de estarem alinhados e nem de ficarem na borda do edifício, o que oferece maior flexibilidade no lançamento, com vantagens na obtenção de varandas e fachadas mais simples para execução.

Silveira e Silveira (2012) explicam que o projeto de lajes planas protendidas pode ser resumido em quatro etapas básicas que são: modelagem estrutural, análise estrutural, dimensionamento de amaduras e detalhamento. A modelagem estrutural consiste na concepção da estrutura com algumas definições: localização e dimensões dos pilares, geometria e espessura da laje,

cobrimento das armaduras passivas e ativas e da resistência ao fogo. São escolhidos os demais elementos que compõem a estrutura e aplicam-se as cargas atuantes.

Nesta etapa, é importante definir a espessura da laje a ser utilizada. A NBR 6118:2014 em seu item 13.2.4.1 recomenda uma espessura mínima para lajes lisas de 16 cm. Loureiro (2006) explica que o ACI 318-05 recomenda as seguintes esbeltezes: $L/h \leq 42$ para lajes de piso e $L/h \leq 48$ para lajes de forro. Já o PTI (Post Tensioning Institute) indica que a relação vão/espessura (esbeltez) deve ser: $40 \leq L/h \leq 45$, para lajes de piso; e $45 \leq L/h \leq 48$, para lajes de forro. Neste sentido, a NBR 6118:2014 não faz referência a índices de esbeltez das lajes lisas protendidas.

Ainda sobre essa relação, Fonseca (2018) cita que Aalami (2014) recomenda uma relação vão/altura de 40 a 45 para lajes planas. A autora ainda comenta que o ACI 318-14 indica que essa mesma relação seja de 40, mesmo valor recomendado pelo Cement & Concrete Association of Australia (2003), para uma carga acidental de $2,0 \text{ kN/m}^2$.

Retornando às etapas básicas do projeto de lajes lisas protendidas, Silveira e Silveira (2012) explicam que a análise estrutural consiste na verificação da estabilidade global da estrutura, na determinação dos esforços (momentos e cortantes), na verificação das tensões e dos estados limites, sendo que os métodos mais usados para a análise de estruturas protendidas são: Método dos Pórticos Equivalentes e Método dos Elementos Finitos (Grelhas ou Placa).

Os autores ainda citam que no dimensionamento das armaduras passivas calculam-se as seções de aço necessárias para controlar a fissuração e garantir segurança à ruína definida no Estado Limite Último. Finalmente procede-se ao detalhamento executivo do projeto com emissão dos desenhos que irão para a obra.

Silveira e Silveira (2012) explicam que para a análise estrutural se faz necessário que se escolha primeiramente, a distribuição, lay-out e perfil dos cabos na laje e que se determine a força de protensão que se irá aplicar na mesma.

Em outro momento, os autores Silveira e Silveira (2012) comentam que uma das características dos projetos em lajes protendidas, é que depende diretamente do engenheiro projetista a determinação da quantidade de protensão que irá aplicar à laje, a disposição e o perfil dos cabos e que alternado os critérios adotados, resultará em projetos totalmente diferentes.

Arranjo dos cabos

Aalami (2014) explica que o arranjo bidirecional dos cabos protendidos de maneira correta em lajes serve para vários propósitos: melhorar o desempenho da laje em serviço e estado último, facilitar a execução e utilizar de forma eficiente todos os cabos. O autor ainda explica que o código Europeu EC2 não apresenta recomendações quanto ao arranjo dos cabos, desde que o mesmo atenda aos requisitos em serviço e segurança. Já a NBR 6118:2014 e a norma americana ACI 318 apresentam orientações específicas para que os sistemas atendam um desempenho satisfatório.

Silveira e Silveira (2012) explicam que como regra prática, para definir a disposição dos cabos na laje, deve-se inicialmente, no caso de lajes protendidas em duas direções (sistema bidirecional), determinar uma série de linhas de suporte em cada uma das duas direções principais. Essas linhas unem os pilares adjacentes e devem estabelecer os caminhos mais curtos que as cargas verticais (permanentes e acidentais) deverão seguir de cada ponto da laje para os apoios.

Emerick (2005) explica que os esforços em uma laje cogumelo, concentram-se com maior intensidade nas regiões das faixas dos apoios. Portanto, é recomendável que essas regiões apresentem uma maior concentração de cabos e por isso o autor cita que uma recomendação do

ACI 423 para a distribuição dos cabos é agrupar 65 a 75 % os cabos na faixa dos pilares e distribuir os cabos que sobram na faixa central (Figura 1).

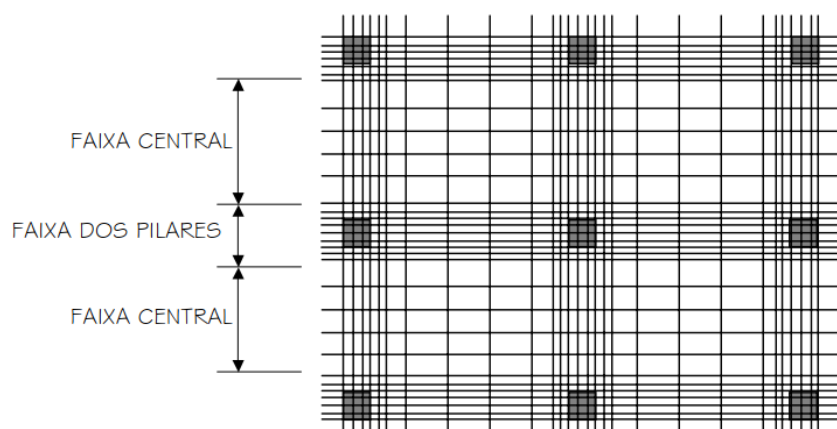


Figura 1 - Distribuição dos cabos concentrando nas faixas dos pilares. (EMERICK, 2005)

Algumas vantagens descritas pelo autor ao se utilizar essa distribuição de cabos são: melhor aproximação com a distribuição de momentos na laje, aumento da resistência à punção e aumento da resistência próximo ao pilar para a transferência de momentos de ligação laje-pilar. Entretanto, Emerick (2005) aponta que pode ser encontrada dificuldade para concentrar os cabos nas faixas dos pilares, devido às altas taxas de armadura existentes nesses. O autor indica que se utilize um mínimo de 2 cabos passando sobre cada pilar.

Para a distribuição dos cabos nas lajes, Silveira e Silveira (2012) explicam que normalmente adota-se um layout onde os cabos são concentrados em uma direção e distribuídos na direção ortogonal, como forma de tornar mais produtiva a execução da armação das lajes. Na direção onde os cabos são concentrados os mesmos devem seguir o alinhamento determinado pelas linhas de suporte, ligando os diversos pilares que a compõem.

Aalami (2014) comenta que esse arranjo facilita a execução e pode alcançar melhores perfis de cabos já que minimiza as interseções entre os mesmos.

O autor ainda comenta que um estudo realizado na Universidade do Texas apontou que é possível obter um dimensionamento necessário para uma laje lisa protendida utilizando a mesma quantidade de cabos protendidos, porém com projetos de diferentes distribuições, conforme a Figura 2. (AALAMI, 2014)

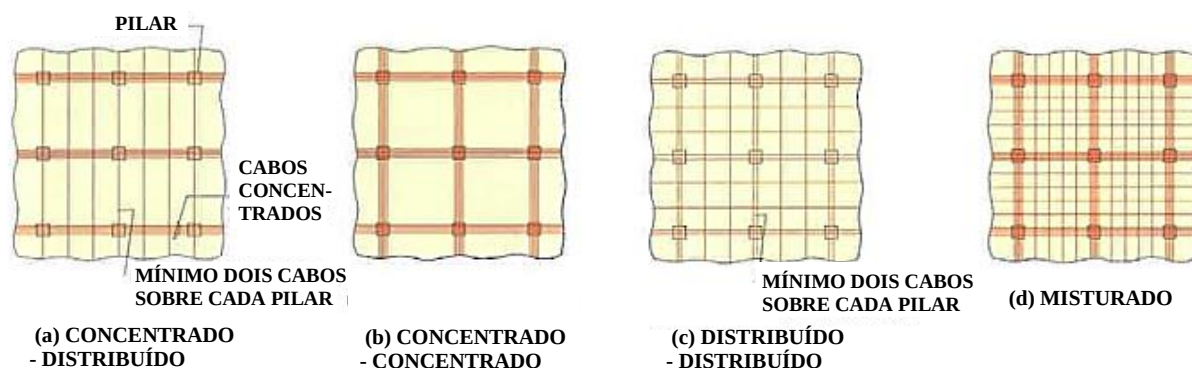


Figura 2 - Alternativas para diferentes distribuições dos cabos. (Adaptada, AALAMI, 2014)

Aalami (2014) cita que é preferível utilizar a direção para os cabos concentrados àquela em que os pilares não estão alinhados, conforme Figura 3.

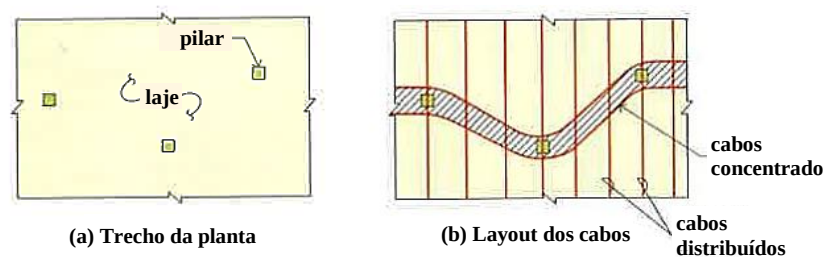


Figura 3 - Layout dos cabos para pilares não alinhados. (Adaptada, AALAMI, 2014)

Ainda sobre o arranjo e distribuição dos cabos em lajes lisas protendidas, Aalami (2014) explica que é aconselhável selecionar o layout de cabos de modo a minimizar o número de áreas triangulares entre os feixes sem tensões devido ao alongamento dos cabos e que necessitam que armadura passiva adicional. A Figura 4 apresenta essas áreas triangulares e o arranjo preferencial é apresentado na letra C.

Esse arranjo é geralmente utilizado por projetistas, em que se concentra os cabos no maior sentido da planta e distribui no menor sentido.



Figura 4 - Opções de arranjo dos cabos concentrados. (Adaptada, AALAMI, 2014)

Modelos, resultados e análises

Para a análise de influência da distribuição das cordoalhas engraxadas nos projetos de lajes lisas protendidas, foram feitos quatro projetos, sempre com duas variações, diferenciados entre si somente pela distribuição dos cabos, totalizando oito modelos. Entre os quatro projetos foram alterados os vãos na horizontal e na vertical e, por último, incluídos dois balanços.

Nas variações dos projetos foram alterados apenas a forma de distribuição das cordoalhas engraxadas. A primeira variação dos projetos foi definida por concentrar os cabos na horizontal e maior direção da laje e distribuir os cabos na vertical e menor direção da laje (projetos ímpares). A segunda variação é o contrário: distribuir os cabos na horizontal e maior direção e concentrar na vertical e menor direção da laje (projetos pares).

Todos os projetos foram modelados no software TQS e analisados pela analogia de grelha. Foi adotada a metodologia de definição das linhas de suporte sobre os pilares, também utilizado pelo Método dos Pórticos Equivalentes, tanto para os cabos concentrados e distribuídos. No caso do TQS essa linha de suporte é representada pelas RPU (região de protensão uniforme), que é a posição que os cabos estarão distribuídos. As RTEs (região de tratamento de esforços) foram utilizadas somente para os cabos concentrados, limitadas pelo eixo entre os apoios. Também foi considerado sempre os cabos com a ancoragem ativa e passiva alternadas, a fim de minimizar diferenças nos deslocamentos e facilitar as comparações.

Para analisar e comparar os projetos de mesma dimensão, foi adotado o balizador como sendo os deslocamentos totais. Ou seja, os projetos ímpares foram modelados e analisados e ao serem aprovados quanto aos deslocamentos, os mesmos foram utilizados para analisar os projetos pares, de forma que os projetos de mesma dimensão ficassem com deslocamentos parecidos.

É importante citar que, para todos os projetos, não foi tomado o cuidado de que os projetos de mesma dimensão ficassem com o número igual de cordoalhas engraxadas na mesma posição.

Por exemplo, a RPU central em X do Projeto 1 (concentrada) não necessariamente possui o mesmo número de cordoalhas que a RPU central em X (distribuída) do Projeto 2. O que definiu a quantidade de cordoalhas para cada RPU foram os deslocamentos finais, e os cabos foram alterados de forma que os mesmos ficassem parecidos entre os projetos de mesma dimensão.

Os projetos seguiram um padrão de dados iniciais de seção, cargas e critérios de análise: lajes maciças de 20 cm apoiadas diretamente sobre os pilares; Pilares 25x50; Classe de agressividade II; Concreto de 35 MPa; Aço ativo CP 190 RB 12,7mm; cobrimento da armadura passiva de 2,5cm; cobrimento da armadura ativa de 3,0cm; cargas de garagem (revestimento de 1,5kN/m² e acidental de 3,0 kN/m²).

Para análise dos modelos foram utilizados os critérios de atendimento às tensões de serviço, ou seja, ao ELS-F com combinação frequente e ao ELS-DEF, garantindo a protensão limitada. Além disso, foram verificadas, em todos os modelos, pré-compressões médias de no mínimo 1,0 MPa e no máximo de 3,5 MPa.

A Figura 5 apresenta os projetos analisados com seus respectivos vãos, em centímetros.

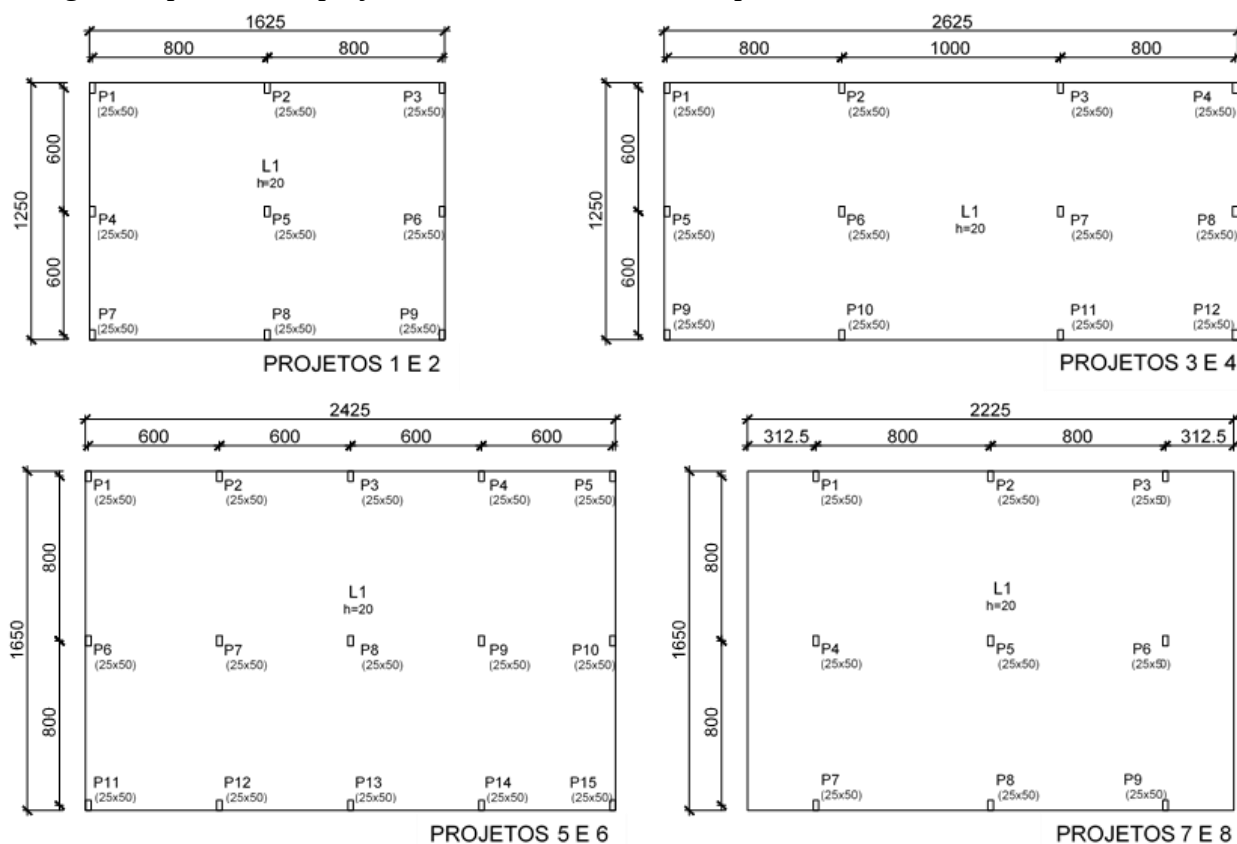


Figura 5 - Planta de formas dos projetos analisados. (A autora, 2019)

Os deslocamentos máximos apresentados nas figuras para cada projeto foram analisados com a combinação para verificação de flecha total apresentada na Equação 1.

$$\delta_{\text{total}} = 2,3 \cdot \text{PP} + 2,0 \cdot \text{PERM} + 0,7 \cdot \text{ACID} + 2,5 \cdot \text{PROT} \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo “PP” = peso próprio; “PERM” = cargas permanentes; “ACID” = cargas acidentais; “PROT” = protensão.

As Figuras 6 e 7 apresentam as distribuições dos cabos e os deslocamentos para a combinação de deformação total para os projetos 1 e 2, respectivamente. No projeto 1 os cabos concentrados são: centro com 6 feixes de 4 cabos e bordos 4 feixes de 2 cabos. Já os cabos distribuídos foram 16 feixes de 2 cabos. No projeto 2 os cabos concentrados são: centro com 4 feixes de 4 cabos e nos bordos 3 feixes de 3 cabos. Neste projeto os cabos distribuídos foram 20 feixes de 2 cabos.

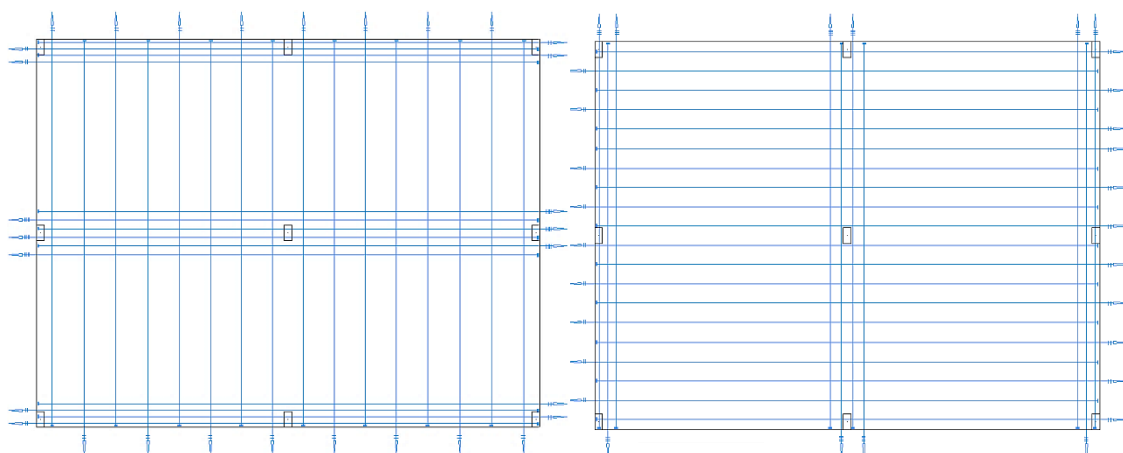


Figura 6 - Distribuições das cordoalhas engraxadas dos projetos 1 e 2. (A autora, 2019)

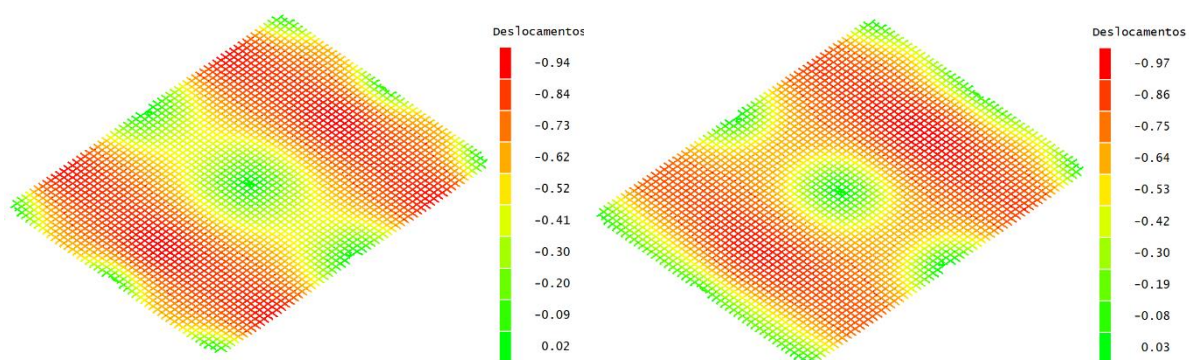


Figura 7 - Deslocamentos máximos dos projetos 1 e 2, em centímetros. (A autora, 2019)

As Figuras 8 e 9 apresentam as distribuições dos cabos e os deslocamentos para a combinação de deformação total para os projetos 3 e 4, respectivamente. O projeto 3 apresentou nos cabos concentrados: centro com 9 feixes de 3 cabos e bordos com 4 feixes de 3 cabos; os cabos distribuídos foram 26 feixes de 2 cabos. Já o projeto 4 apresentou no sentido concentrado nos centros 6 feixes de 4 cabos e bordos 5 feixes de 2 cabos e no distribuído 23 feixes de 2 cabos.

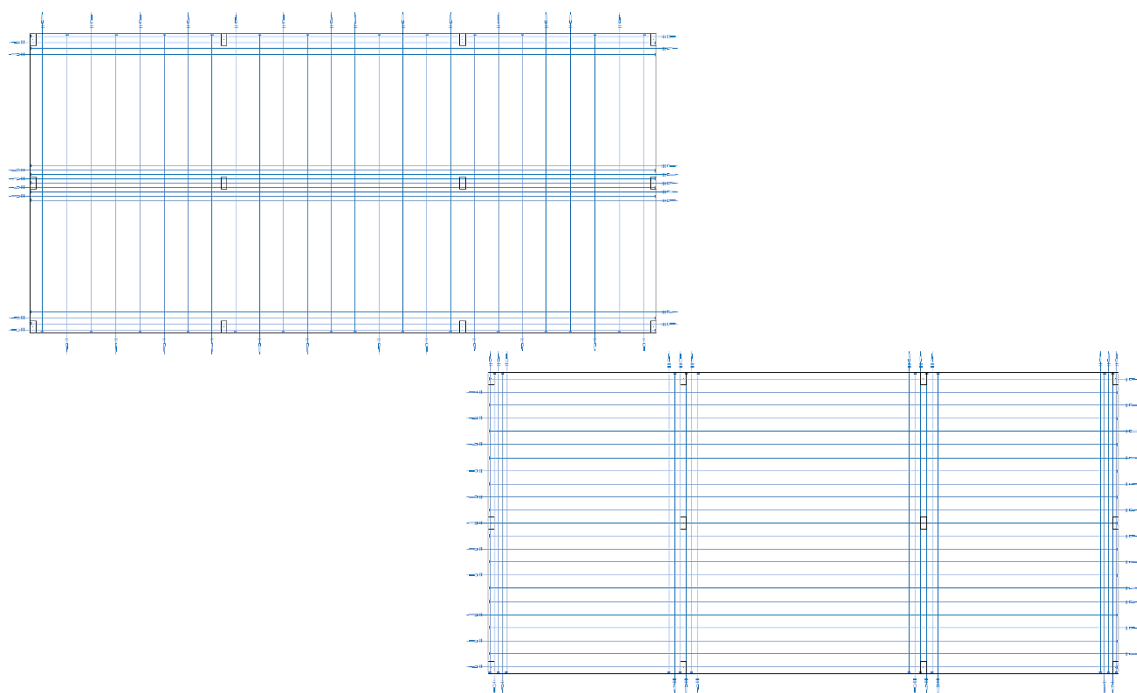


Figura 8 - Distribuições das cordoalhas engraxadas dos projetos 3 e 4. (A autora, 2019)

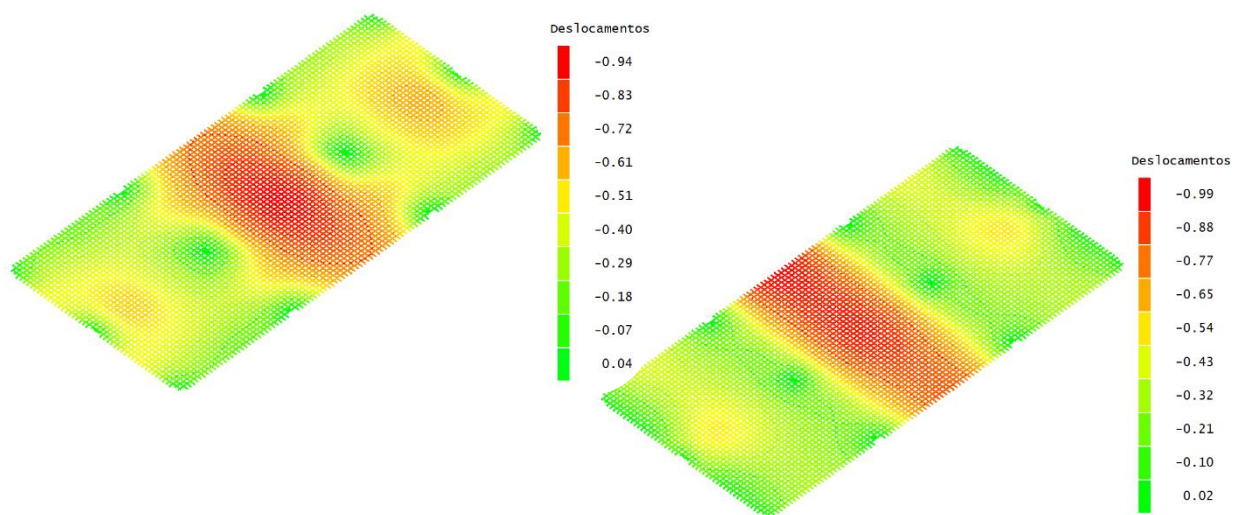


Figura 9 - Deslocamentos máximos dos projetos 3 e 4, em centímetros. (A autora, 2019)

As Figuras 10 e 11 apresentam as distribuições dos cabos e os deslocamentos para a combinação de deformação total para os projetos 5 e 6, respectivamente. O projeto 5 apresentou nos cabos concentrados: centro com 6 feixes de 3 cabos e bordos com 3 feixes de 2 cabos; os cabos distribuídos foram 38 feixes de 2 cabos. Já o projeto 6 apresentou no sentido concentrado no centro 6 feixes de 3 cabos, aos lados 5 feixes de 4 cabos e bordos 3 feixes de 3 cabos e no distribuído 16 feixes de 2 cabos.

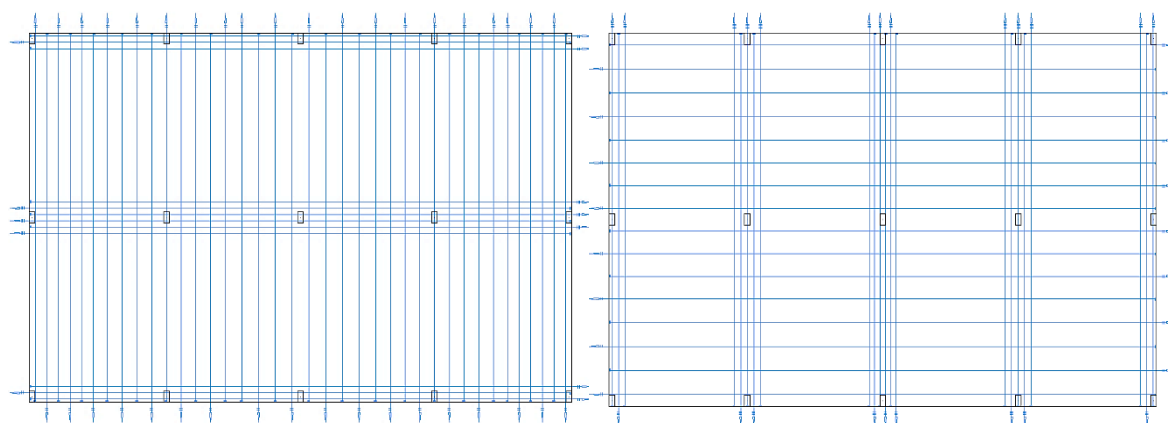


Figura 10 - Distribuições das cordoalhas engraxadas dos projetos 5 e 6. (A autora, 2019)

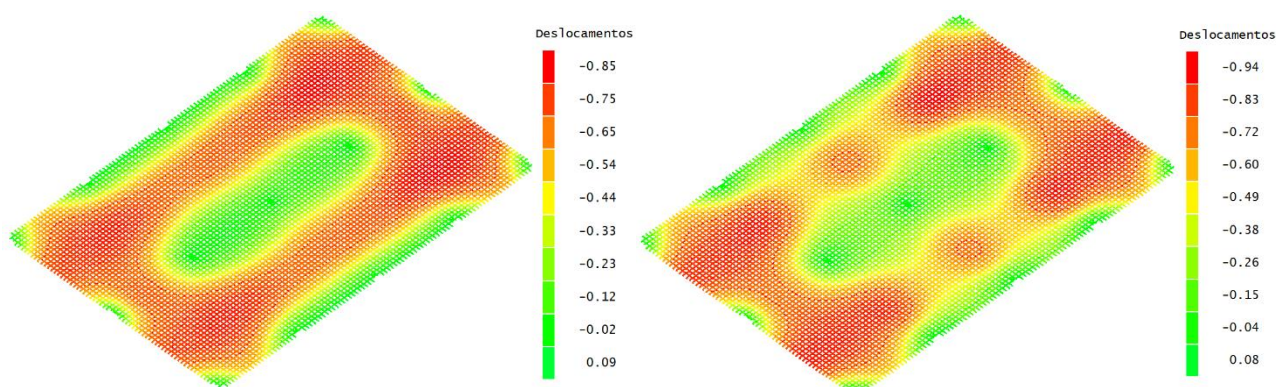


Figura 11 - Deslocamentos máximos dos projetos 5 e 6, em centímetros. (A autora, 2019)

As Figuras 12 e 13 apresentam as distribuições dos cabos e os deslocamentos para a combinação de deformação total para os projetos 7 e 8, respectivamente. No projeto 7 os cabos concentrados são: centro com 7 feixes de 4 cabos e bordos 5 feixes de 2 cabos. Já os cabos distribuídos foram 33 feixes de 2 cabos. No projeto 8 os cabos concentrados ficaram com 7 feixes de 4 cabos e os cabos distribuídos com 18 feixes de 2 cabos.

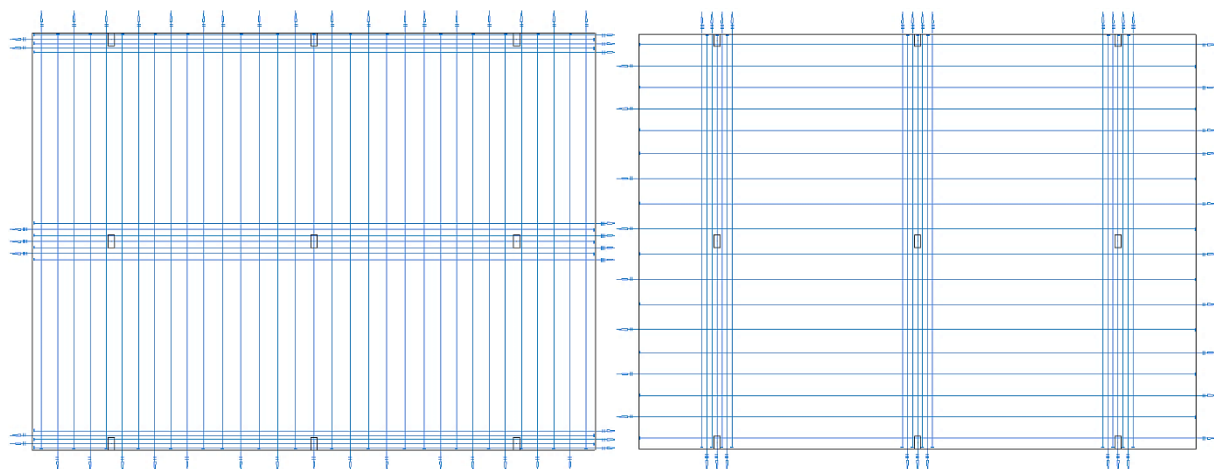


Figura 12 - Distribuições das cordoalhas engraxadas dos projetos 7 e 8. (A autora, 2019)

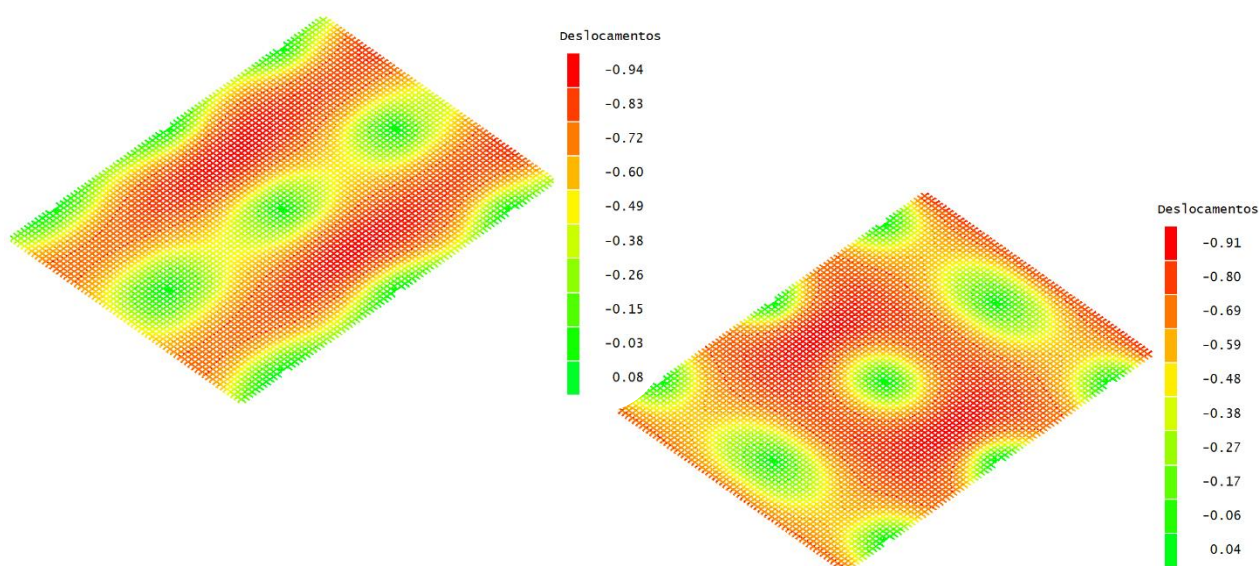


Figura 13 - Deslocamentos máximos dos projetos 7 e 8, em centímetros. (A autora, 2019)

Os demais resultados retirados do software TQS são os quantitativos de armadura ativa e passiva. A armadura ativa foi determinada de forma a manter os deslocamentos e cargas permanentes balanceadas próximas entre os projetos de dimensões iguais.

O cálculo das cargas permanentes balanceadas é um cálculo simplificado, apenas para conferência e comparação de ordem de grandeza entre os projetos. Foi feito o cálculo da diferença dos deslocamentos de cargas de peso próprio e permanentes com os deslocamentos de forças de alívio devido à protensão, sempre tentando manter essa relação de 60 a 80%, aproximadamente.

O resumo dos resultados de deslocamentos máximos, porcentagem de cargas permanentes balanceadas, quantitativos e taxa de armadura ativa são apresentadas na Tabela 2. Na última coluna desta tabela há uma comparação entre os projetos de dimensões iguais quanto ao quantitativo de armadura ativa.

A comparação em porcentagem entre os projetos sempre é em relação ao projeto ímpar (primeira variação). Portanto, se a porcentagem é positiva significa que o quantitativo ou custo teve aumento do segundo projeto em relação ao primeiro, e se for negativa, significa que o segundo projeto apresentou menores valores quanto aos quantitativos ou custo que o primeiro projeto.

Tabela 2 - Comparação dos projetos: cargas permanentes balanceadas, deslocamentos máximos e armadura ativa. (A autora, 2019)

Projetos	Área da laje [m ²]	Deslocamento Final Máximo [cm]	Cargas Permanentes Balanceadas	Peso Armadura Ativa [kg]	Taxa de Armadura Ativa [kg/m ²]	Diferença entre projetos
Projeto 1	203,13	0,94	67,96%	965	4,75	2,49%
Projeto 2	203,13	0,97	66,02%	989	4,87	
Projeto 3	328,13	0,94	80,43%	1813	5,53	3,64%
Projeto 4	328,13	0,99	76,09%	1879	5,73	
Projeto 5	400,13	0,85	69,47%	1808	4,52	2,43%
Projeto 6	400,13	0,94	65,26%	1852	4,63	
Projeto 7	367,13	0,94	72,32%	1968	5,36	1,47%
Projeto 8	367,13	0,91	74,11%	1997	5,44	

A Tabela 2 mostra que os resultados de taxa de armadura ativa variaram entre 4,52 e 5,73 kg/m², taxas usualmente encontradas em projetos de lajes lisas protendidas. Também foi possível notar que as maiores taxas foram dos projetos com maiores vãos e com balanços, resultado esperado já que os esforços são maiores. Verificou-se também que para todos os casos de comparação, a taxa de armadura ativa aumentou na segunda variação, em relação a primeira.

Quanto aos quantitativos de armadura passiva, os mesmos foram retirados o software TQS com alguns ajustes importantes, em alguns casos. Foi desenvolvida uma planilha de verificação das armaduras negativas passivas mínimas sobre os apoios, segundo a NBR 6118:2014 (Equação 2), e constatou-se que os valores estavam diferentes dos resultados no software. Esta verificação e alteração foi realizada em todos os projetos, conforme necessário.

$$A_{s_{\min}} = 0,00075 \times h \times l \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

h = espessura da laje, em centímetros.

l = vão médio da laje, em centímetros.

Já a armadura positiva passiva foi retirada do software TQS, somente com ajustes de detalhamentos e os quantitativos de punção não estão contemplados nestes resultados. Isso porque todos os encontros entre pilares e lajes foram verificados à punção em planilhas e apresentaram exatamente o mesmo resultado nos projetos de mesma dimensão, ou seja, sem diferença de quantitativos. Na maioria dos casos, a armadura passiva adotada, para os momentos positivos e negativos, foi a armadura mínima definida pela NBR 6118:2014.

A Tabela 3 apresenta os resultados de quantitativos das armaduras passivas positivas e negativas para os projetos analisados e a respectiva comparação entre os projetos de mesma dimensão.

Tabela 3 - Comparação dos projetos: armaduras passivas positiva e negativa. (A autora, 2019)

Projetos	Área da laje [m²]	Peso Armadura Passiva Positiva [kg]	Peso Armadura Passiva Negativa [kg]	Peso Armadura Passiva [kg]	Taxa de Armadura Passiva [kg/m²]	Diferença entre projetos
Projeto 1	203,13	700,00	951,00	1651,00	8,13	-7,63%
Projeto 2	203,13	619,00	906,00	1525,00	7,51	
Projeto 3	328,13	1074,00	1490,00	2564,00	7,81	
Projeto 4	328,13	957,00	1572,00	2529,00	7,71	-1,37%
Projeto 5	400,13	1225,00	1877,00	3102,00	7,75	
Projeto 6	400,13	1225,00	1763,00	2988,00	7,47	
Projeto 7	367,13	957,00	1587,00	2544,00	6,93	-3,68%
Projeto 8	367,13	1037,00	1740,00	2777,00	7,56	

Pode-se perceber que a taxa de armadura passiva dos projetos ficou parecida entre os modelos, apresentando valores de 6,93 a 8,13 kg/m², sendo que na maioria das comparações as primeiras variações apresentaram taxas maiores que as segundas variações.

Após o levantamento de quantitativos de armaduras ativas e passivas de todos os modelos, foram feitos orçamentos simples utilizando valores comerciais, de modo a comparar a diferença de custo entre os modelos. Foram usados os valores de R\$15,00 para o quilo da armadura ativa, considerando acessórios e mão de obra para montagem, e R\$5,00 para o quilo da armadura passiva.

A Tabela 4 apresenta os custos de armaduras ativas, passivas, total e total por metro quadrado, bem como a comparação dos custos totais de aço entre os projetos de mesma dimensão.

Tabela 4 - Comparação dos projetos: custos de armadura ativa e passiva. (A autora, 2019)

Projetos	Custo Armadura Ativa	Custo Armadura Passiva	Custo Total	Custo Total por metro quadrado	Diferença entre projetos
Projeto 1	R\$ 14.475,00	R\$ 8.255,00	R\$22.730,00	R\$111,90	-1,19%
Projeto 2	R\$ 14.835,00	R\$ 7.625,00	R\$22.460,00	R\$110,57	
Projeto 3	R\$ 27.195,00	R\$ 12.820,00	R\$40.015,00	R\$121,95	
Projeto 4	R\$ 28.185,00	R\$ 12.645,00	R\$40.830,00	R\$124,43	2,04%
Projeto 5	R\$ 27.120,00	R\$ 15.510,00	R\$42.630,00	R\$106,54	
Projeto 6	R\$ 27.780,00	R\$ 14.940,00	R\$42.720,00	R\$106,77	
Projeto 7	R\$ 29.520,00	R\$ 12.720,00	R\$42.240,00	R\$115,06	0,21%
Projeto 8	R\$ 29.955,00	R\$ 13.885,00	R\$43.840,00	R\$119,41	

Através da Tabela 4, é possível perceber que as variações de diferenças de custo entre os projetos são baixas, mostrando custos irrelevantes quando se trata de uma obra como um todo.

Também pode-se notar que o custo de aço por metro quadrado ficou muito próximo entre os projetos comparados, apresentando diferenças muito baixas e irrelevantes ao custo geral da estrutura. Percebe-se também que o projeto que resultou o custo por metro quadrado mais elevado, foi o projeto que possui o maior vão, seguido do projeto com os balanços.

Conclusões

Através do trabalho desenvolvido pode-se verificar que a determinação da distribuição e o arranjo das cordoalhas engraxadas interfere nos resultados de quantitativos de materiais e custos finais, no entanto com poucas variações.

Quanto ao quantitativo de armadura ativa, foi possível constatar que para todos os casos os projetos mais econômicos foram os que se concentrou os cabos no maior sentido da planta, independente dos vãos e existência de balanços. Porém, esta diferença é praticamente insignificante do ponto de vista da engenharia, com resultados em porcentagem de 1,47% a 3,64%, aproximadamente.

Sobre os deslocamentos finais, mesmo utilizando mais cordoalhas engraxadas, a maioria dos modelos com os cabos distribuídos na maior direção da laje apresentou maiores deformações. O único modelo que apresentou resultado de deformação menor no projeto com os cabos distribuídos na maior direção da laje, foi o modelo com balanços (Projetos 7 e 8). Este resultado mostra que para os balanços com essa relação balanço/vão de aproximadamente 0,39 é melhor que sejam dispostos cabos distribuídos, quando analisados os deslocamentos nestes elementos.

Também foi possível analisar que diferente da armadura ativa, os modelos apresentaram variação na economia quanto ao quantitativo das armaduras passivas. As variações foram negativas quando comparados os projetos sem balanço, mostrando que nestes casos, as segundas variações apresentaram menos armadura passiva, com alteração de 1,37 a 7,63%, aproximadamente. A comparação dos projetos com balanço foi a única que apresentou variação positiva de 9,16%, ou seja, neste caso foi necessário utilizar mais armadura passiva na segunda variação em relação à primeira.

Comparando os resultados finais de economia quanto aos preços utilizados atualmente no mercado da região, constatou-se que os modelos mais econômicos no geral, considerando as armaduras ativas e passivas, foram os modelos com os cabos concentrados no maior sentido da laje. Porém, essas diferenças de custo são pouco relevantes, apresentando variações de 0,21% a 3,79%, aproximadamente.

Como já comentado, neste estudo foi utilizada a analogia de grelhas no software TQS, considerando para fins de dimensionamento a homogeneização de faixas, tanto para os traçados concentrados quanto para distribuídos, metodologia que já é consagrada e utilizada inclusive pelo Método dos Pórticos Equivalentes. Como esta metodologia faz a homogeneização dos esforços para dimensionamento nos trechos, mesmo que os cabos estejam concentrados ou distribuídos e o que interfere é a quantidade de cabos em cada trecho, a diferença de custo entre os projetos analisados foi pequena, apresentando variações irrelevantes no âmbito da engenharia civil, resultado esperado para esse estudo.

Haja vista que as diferenças de quantitativos e custos não são significativas, é importante perceber que para cada projeto deverá existir a maneira ideal e mais econômica de distribuir as cordoalhas engraxadas. O que vai governar a definição de qual sentido da laje vai ter o traçado concentrado ou distribuído pode ser a preferência citada pelo Aalami (2014) em selecionar o layout de cabos de modo a minimizar o número de áreas triangulares entre os feixes de cabos sem tensões devido ao alongamento dos cabos, ou seja, concentrar os cabos no maior sentido da planta.

Além dessa premissa, também deve ser levado em consideração a escolha para concentrar os cabos no sentido da planta que facilita o entendimento de “pseudo-vigas” nas posições dos cabos e ligações dos pilares. Ainda, para essa definição, também é necessário analisar as interferências com a arquitetura, shafts, dutos e instalações hidráulicas, para minimizar os problemas de execução devido aos furos nas lajes, o que também gera economia nas obras.

Referências

- AALAMI, B. O.. **Post-Tensioned Buildings: Design and Construction**. Redwood City: Us Edition, 2014. 396 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- CAUDURO, E. L., **Manual para a boa execução de estruturas protendidas usando cordoalhas de aço engraxadas e plastificadas**. Belo Horizonte: Belgo Mineira, 2002.
- EMERICK, A. A. **Projeto e Execução de Lajes Protendidas**. Rio de Janeiro: Interciência, 2005. 191 p.
- FONSECA, Y. F. **Projeto de lajes lisas pós-tracionadas: análise comparativa entre as normas NBR6118:2014, EN1992-1-1:2004 e ACI318-14 e os sistemas de pós-tração aderente e não aderente**. 2018. 262 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.
- LEITE JÚNIOR, J. C. C. **Dimensionamento à punção em apoios internos de lajes protendidas sem aderência**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.
- LEITE, A. R. S. ALBUQUERQUER A.T., DOS SANTOS J.S. Análise da estabilidade global de edifícios com pavimento em laje lisa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 58, 2016, Belo Horizonte. **Anais...**
- LOUREIRO, G. J. Projeto de lajes protendidas com cordoalhas engraxadas. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 6., 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006, p. 1734-1755.
- MILANI, A. C. **Análise de lajes planas protendidas pelo método dos elementos finitos**. 2006. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- NUNES, H. **Análise do sistema construtivo de edifícios de múltiplos pavimentos no Brasil em lajes lisas com cordoalhas engraxadas**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.
- PEDROZO, D. G. E. **Estudo de modelos para projetos de lajes lisas protendidas**. 2008. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- ROSA, J. P. S. **Análise numérica não linear de vigas e lajes de concreto protendido**. 2018. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- SALOMÃO, I. L. MAQUES, I. R. **Análise de laje protendida a partir da distribuição de cabos**. In: CONGRESSO TÉCNICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2017, Belém. **Anais...**
- SILVEIRA, M. SILVEIRA, D. J. **Lajes planas protendidas: Determinação da força de protensão e pré-dimensionamento dos cabos – um processo prático**. 2012. Disponível em: http://www.md.eng.br/v2012/fotos/ARTIGO_PROTENSAO.pdf