

INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE DIFERENTES LAYOUTS DE PROTENSÃO EM LAJES LISAS COM CORDOALHAS ENGRAXADAS E PLASTIFICADAS

INFLUENCE OF DISTRIBUTION OF DIFFERENT LAYOUTS IN A POST-TENSIONED FLAT SLABS WITH PRESTRESSED UNBONDED TENDONS

Thomas Bertochi Rigotti¹, Marcelo Correia Alcantara Silveira², Fábio Albino de Souza³

¹ **Engenheiro Civil;** thomas@rigotttiengenharia.com

² **Dr, MD Engenheiros e Associados;** md@md.eng.br

³ **Msc, Unicamp; IDD; EBPX; Departamento de Estruturas – DES;**
fabio@ebpx.com.br

Resumo

O presente artigo visa realizar um estudo sobre a influência de dois diferentes layouts de protensão com cordoalhas engraxadas não-aderentes em uma laje plana protendida. Atualmente a construção civil busca por inovações tecnológicas com o intuito de melhorar o desempenho das estruturas, ou seja, os projetos em lajes planas protendidas estão cada vez mais presentes em nosso dia-a-dia. Portanto, serão estudados, baseados em uma fundamentação teórica, dois layouts de distribuição, sendo eles, concentradas em uma direção e distribuídas em outra e distribuídas nas duas direções, buscando atingir a protensão completa nos dois casos, atendendo as exigências normativas da NBR 6118:2014. Através do auxílio da ferramenta computacional TQS V21, serão estudados os dois modelos sofisticados, a fim de contribuir com estudos técnicos sobre o assunto, com o objetivo de auxiliar projetistas e empresas do ramo e também motivar outros estudos semelhantes para que dessa forma possamos entender e melhorar o sistema em nosso país e difundir ainda mais essa solução já tão utilizada em países desenvolvidos, para que as estruturas sejam cada vez melhor dimensionadas e consequentemente mais seguras e econômicas.

Palavras-chave: laje plana protendida, protensão completa, cordoalhas engraxadas não-aderentes.

Abstract

The following paper aims to conduct a study on the influence of two different full prestressed layouts with non-adherent greased strands on a post-tensioned flat slab. Nowadays, the civil construction sector searches for technological innovations in order to improve the performance of structures, that is, projects with the concept of post-tensioned flat slabs are increasingly present in daily life. That being said, these slabs will be studied based on a thick theoretical foundation and two distribution layouts, being one concentrated in one direction and distributed in another, and other distributed in two directions, seeking to achieve complete post-tensioned in both cases, attending the normative standards of NBR 6118:2004. Through the aid of computer tool TQS V21, the two sophisticated models will be studied, aiming to contribute with technical studies on the subject and with the goal of helping project designers and companies in the field and also to motivate other similar studies so that this system, which is widely used in developed countries, can be more comprehended and enhanced in our country,

so that structures can be better measured and, as a consequence, be also more economical and safer.

Keywords: post-tensioned flat slab, complete post-tensioned, non-adherent greased strands.

1. INTRODUÇÃO

No século XIX a indústria da construção civil apresentou diversas inovações no intuito de melhorar o desempenho das estruturas, bem como, promover uma maior economia na construção das novas edificações. Dentre estas inovações estão novas formas de gerir as obras, novos materiais e novas técnicas de construção. Uma destas técnicas é a utilização do concreto protendido. VERÍSSIMO (1998).

Nesse sentido, em meados do século XX, foi desenvolvido um novo tipo de sistema com protensão não-aderente que utiliza cordoalhas engraxadas plastificadas, técnica construtiva que se destaca pela fácil execução e racionalização de materiais.

Segundo PEDROZO (2008), embora bastante desenvolvida, principalmente nos Estados Unidos, a tecnologia de projeto e construção de pavimentos com lajes usando a protensão está bastante incipiente no Brasil. Os estudos mais aprofundados sobre a protensão de lajes são na sua maioria de origem norte-americana, com pequenas quantidades de textos nacionais, enfocando principalmente o comportamento na flexão, à punção e ao estudo do desempenho em relação à aderência das cordoalhas, e as cordoalhas engraxadas que vem sendo utilizadas no país.

A solução estrutural em lajes planas protendidas vem ganhando espaço positivamente em edificações residenciais, visto que, um de seus principais motivos é a busca por flexibilidade arquitetônica. Sendo assim, a protensão vem como um artifício técnico capaz de introduzir em uma estrutura um estado prévio de tensões, com a principal função de melhorar a sua resistência e o seu comportamento. Através da combinação de cabos de aço tracionados e de concretos de alta resistência, o concreto protendido visa limitar ou anular qualquer tipo de tensão de tração, criando estruturas rígidas à flexão a diversos tipos de carregamentos em serviço, visando eliminar outros tipos de elementos estruturais para combate a este esforço e aperfeiçoar as peças estruturais, com a finalidade de criar grandes vãos, reduzir o número de pilares e consequentemente a flexibilização dos elementos em planta.

Projetos arquitetônicos exigem do projetista estrutural cada vez mais atenção e cuidado no dimensionamento devido aos grandes vãos e/ou balanços, que apesar do uso de materiais de alta resistência, ainda assim se tornam um desafio para os calculistas quando se trata de segurança e economia para o cliente. A solução da protensão, busca a união desses materiais que estão cada vez sendo mais estudados a fim de potencializar ainda mais o uso da solução, melhorando não só os projetos como também a execução da mão-de-obra.

Contudo, com o mercado da construção civil visando um crescimento na utilização da protensão como solução estrutural com potencial competitivo, o estudo e aprimoramento dos métodos de cálculo e análise são uma necessidade.

Segundo AALAMI (2014), a maioria dos projetistas fazem a concepção estrutural da protensão com o layout de lançamento dos cabos concentrados em uma direção e distribuídos na outra, com o objetivo de usar ao máximo as excentricidades, fazendo que o sistema seja mais bem aproveitado e evitar interferências executivas na obra.

Portanto, a fim de contribuir com estudos técnicos sobre lajes planas protendidas, este artigo irá apresentar um modelo sofisticado de cálculo para entender a influência da distribuição dos cabos em uma laje plana protendida, com o objetivo de auxiliar

projetistas e empresas do ramo técnico e também motivar outros estudos semelhantes para que dessa forma possamos entender e melhorar o sistema no nosso país e difundir ainda mais essa solução já tão utilizada em países desenvolvidos, para que as estruturas sejam cada vez melhor dimensionadas e, conseqüentemente, mais seguras e econômicas.

2. JUSTIFICATIVA

O presente artigo visa dimensionar de acordo com as exigências normativas da NBR 6118, a planta tipo de um projeto estrutural de uma edificação residencial, buscando através da solução estrutural em lajes planas protendidas entender a influência sobre a distribuição das cordoalhas engraxadas não-aderentes. A partir da modelagem do pavimento, será estudado o posicionamento de diferentes layouts de faixas protendidas, como faixas concentradas x faixas distribuídas e faixas distribuídas x faixas distribuídas. Após a modelagem e análise com protensão completa, utilizando o software TQS V21, serão apresentados os resultados a fim de buscar a solução do layout mais favorável tanto economicamente quanto executivamente.

De acordo com PEDROZO (2008), a protensão ajuda a resolver problemas de deformação e, como o sistema permite melhor uso da área de concreto, a espessura da laje pode ser reduzida. Lajes mais finas significam economia de materiais, diminuição do tempo de construção e mão-de-obra. Além disso, como os cabos têm uma resistência muito mais alta do que as barras de aço convencionais, a laje protendida pode ser construída com uma redução considerável do peso de aço exigido nas obras em concreto armado. Essa vantagem em grandes vãos, resulta em mais espaço para instalações de redes hidráulicas, elétricas e outras utilidades, facilitando a mão-de-obra dos executores. Em relação aos aspectos construtivos das lajes protendidas, temos uma aceleração no processo de montagem, desmontagem e reutilização das formas, o que retrata uma produtividade maior na execução.

Contudo, o fator determinante do uso da solução comparado às estruturas convencionais, são em relação ao desempenho em serviço, ou seja, a protensão elimina ou limita a fissuração e deformações excessivas, o que justifica uma estrutura mais segura e com menor chance de patologias, aumentando assim sua vida útil de utilização.

Com o potencial crescimento desta solução construtiva em nosso país, tanto para engenheiros calculistas como para construtoras e investidores, se faz necessário estudos desta técnica construtiva que visa uma grande racionalização dos materiais mais aplicados atualmente na construção civil do Brasil, buscando um desenvolvimento técnico desta solução para fugirmos dos padrões arquitetônicos antigos e inovarmos a construção civil em nosso país.

3. OBJETIVOS

3.1 GERAL

O estudo de caso apresentado neste trabalho tem como principal objetivo dimensionar uma laje protendida no estado limite de serviço, analisando todas as etapas como concepção, esforços, deslocamentos e relatar a influência sobre a distribuição da protensão através de diferentes tipos de distribuição de cordoalhas não aderentes, avaliando o layout mais favorável, respeitando as recomendações normativas brasileiras.

3.2 ESPECÍFICOS

Pretende-se neste artigo estudar a influência da distribuição de diferentes layouts de faixas protendidas, como faixas concentradas x faixas distribuídas e faixas distribuídas x faixas distribuídas a fim de justificar sua melhor utilização econômica e executivamente, a partir da sequência abaixo:

- Realizar um estudo da planta do pavimento tipo da edificação que será modelada no software TQS V21 com lajes planas maciças protendidas.
- A partir do modelo padrão, analisar a distribuição da protensão completa não-aderente, no estado limite de serviço, a partir de faixas concentradas x faixas distribuídas.
- Analisar a distribuição de faixas distribuídas x faixas distribuídas do mesmo pavimento.

Em seguida, com o lançamento e análise de diferentes layouts de traçados de cabos, serão analisados e comparados os resultados das duas modelagens e assim verificada a melhor solução, baseando-se nas recomendações das normas vigentes para este tipo de estrutura.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com MORAES (1999), as normas atuais definem como peças estruturais de concreto protendido as peças de concreto nas quais através da introdução de forças torna-se comprimido, de tal forma a eliminar as tensões de tração quando colocada em serviço, ou ainda, eliminar apenas uma parcela dessas tensões.

Segundo CAUDURO (2002), quando um componente da estrutura é projetado para – sob condições de carga de trabalho – não houver nenhuma tensão de tração nele, então o concreto é chamado totalmente protendido, protensão completa ou total. Teoricamente, tal componente necessitaria de substancial quantidade de aço de protensão. Por outro lado, as tensões de tração são permitidas em um componente da estrutura sob carga de trabalho, ele é chamado de parcialmente protendido. Para a protensão parcial, moderada quantidade de barras de aço comum (passivo) pode ser requerida para o controle de fissuras sob tração.

Conforme a Figura 1 ilustra a ação da protensão nas tensões atuantes do concreto considerando protensão completa, a mesma que será foco do artigo, ou seja, eliminando totalmente as tensões de tração na peça em serviço. (EMERICK, 2002)

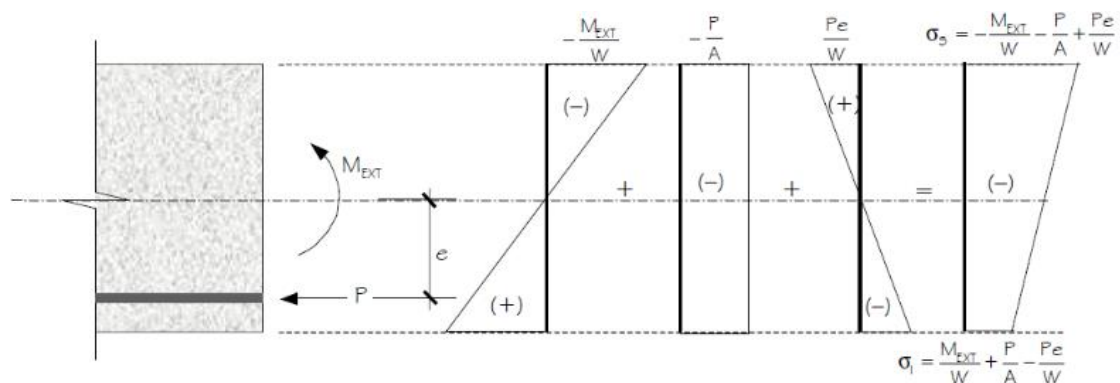


Figura 1– Protensão completa (EMERICK, 2002)

Segundo a NBR 6118 no subitem 9.2.2, existem três tipos de protensão relacionados com os níveis de intensidade da força aplicada que, por sua vez, são função

da proporção de armadura ativa utilizada em relação à passiva. Dessa forma, conforme a tabela do subitem 13.4.2 da NBR 6118, a protensão pode ser classificada como completa, limitada ou parcial, sendo que cada tipo deve respeitar as exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função da classe de agressividade ambiental.

Segundo a Tabela 1, tem como exigência normativa armadura ativa pré-tracionada nas classes de agressividade III e IV.

Tabela 1 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função da classe de agressividade ambiental (NBR 6118:2014)

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	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ 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	Combinação frequente
		ELS-D ^a	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D ^a	Combinação frequente

^a A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ 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.

Sendo assim é necessária a verificação de duas condições:

- Para as combinações raras de ações, deve ser atendido o estado limite de formação de fissuras (ELS-F).
- Para as combinações frequentes de ações, deve ser atendido o limite de descompressão (ELS-D). Neste caso, quando todas as cargas permanentes e as sobrecargas frequentes estão atuando, não deve existir tração no concreto.

Existem dois tipos de sistemas protendidos que podem ser utilizados como a protensão aderente e a protensão não aderente, sendo que a principal diferença é em relação a aderência ou não entre o cabo e o concreto.

A protensão sem aderência é aplicada sobre uma peça de concreto já endurecido não havendo, entretanto, aderência entre os cabos e o concreto. A inexistência de aderência refere-se somente à armadura ativa, já que a armadura passiva deve estar aderente ao concreto. Os cabos são compostos basicamente por uma ancoragem em cada extremidade e uma cordoalha de aço envolta com graxa e capa de polietileno de

alta densidade (PEAD). A graxa possibilita a movimentação das cordoalhas nas bainhas, por ocasião da protensão. (PEDROZO, 2008)

No estudo de caso, irá ser utilizado apenas a protensão não-aderente. Não existe nenhuma diferença das cordoalhas pela sua fabricação ou resistência, sendo que a cordoalha não aderente, recebe um revestimento de PEAD-polietileno de alta densidade, impermeável a água, com grande resistência e durabilidade. A cordoalha nua recebe este revestimento em toda sua extensão, o que permite a livre movimentação do cabo no seu interior e garante a não aderência ao concreto, sendo que este conjunto deve estar de acordo com as especificações do PTI (Post-Tensioning Institute). As bitolas de fabricação da cordoalha são de 12,7 mm e 15,2 mm.

De acordo com a NBR 6118, as lajes lisas são aquelas que se apoiam diretamente sobre os pilares, sem a presença de capitéis, sistema que será adotado neste artigo.

Segundo LORENCI (2010), é ainda bastante comum o uso do termo laje plana para designar esse tipo de estrutura, sendo que, se houver aumentos de espessura nas regiões do apoio, as lajes são denominadas cogumelo.

A seguir serão apresentados alguns dos tipos mais comuns de concepções estruturais em lajes protendidas, com algumas indicações e recomendações normativas.

- **Lajes lisas (Flat plates)**



Figura 2 – Lajes Lisas (LOUREIRO, 2006)

Este tipo de sistema de lajes são recomendadas para vãos até 8,00m, sendo mais vantajosas funcionalmente e construtivamente.

A NBR 6118, no seu item 13.2.4.1 recomenda uma espessura mínima de 16cm para lajes lisas, e não faz nenhuma referência quanto a índices de esbeltez, apenas delimita valores limites para as flechas nas lajes.

A punção passa a ser um fator determinante na escolha da espessura, uma vez que existe um limite de tensões de punção, sendo necessário analisar a espessura da laje para atender às tensões máximas.

- **Lajes lisas com capitéis (Flat slab with drop caps or drop panels)**

Para auxiliar em problemas como tensões elevadas de punção, e vencer vãos até 12,00m, é indicado o uso de capitéis, onde existe uma região de engrossamento ao redor dos pilares, denominadas lajes cogumelo. A NBR 6118 recomenda uma espessura mínima de 14cm.

- **Lajes com faixas chatas e largas (Slabs with wide shallow beams or banded slabs)**

Indicado quando existe uma predominância dos vãos em uma direção em relação a outra, sendo que a espessura deve ser calculada em função do maior vão. Na direção

dos vãos maiores, é realizado então uma faixa de concreto mais espessa que a laje, sendo que as recomendações para as faixas são: $h \leq 2t$ e $b \geq 3h$, sendo t a espessura da laje e b e h , respectivamente a largura e altura da faixa. Vão máximo recomendado é de 13,00m.

- **Lajes nervuradas com trechos maciços sobre os pilares (Waffle slabs)**

Recomendado a utilização para vãos de até 13,00m, mas economicamente vantajoso devido a redução do peso próprio da laje em função das nervuras. Em torno dos pilares, trechos maciços também são projetados a fim de melhorar as condições de momentos negativos sobre os apoios e efeitos de punção. A NBR 6118 permite que, para espaçamento entre eixos de nervuras até 90cm e largura média das nervuras maior que 12cm, a verificação das nervuras ao cisalhamento seja feita como lajes. A espessura da mesa deve ser maior ou igual a 1/15 da distância entre nervuras.

- **Lajes nervuradas com faixas maciças sobre os apoios (Waffle slabs with soli column lines)**

No Brasil este sistema com lajes nervuradas em concreto armado, apoiadas em faixas maciças protendidas vem sendo muito utilizado. As faixas maciças devem ser calculadas como vigas protendidas, que recebem as lajes nervuradas em concreto armado.

Segundo o PTI, as esbeltezes recomendadas para vigas protendidas são: no caso de vãos contínuos, $L/h=30$ para lajes de piso e $L/h=35$ para lajes de forro; e no caso de um só vão $L/h=25$ para lajes de piso e $L/h=30$ para lajes de forro.

SILVEIRA E SILVEIRA (2012), explicam que o projeto de lajes planas protendidas pode ser resumido em quatro etapas básicas que são a seguir: modelagem estrutural, análise estrutural, dimensionamento de armaduras e detalhamento. A modelagem estrutural consiste na concepção da estrutura. Nesta, o engenheiro define a distribuição dos pilares na planta com suas respectivas dimensões, determina a geometria em planta da laje e escolhe a sua espessura em função do vão, do 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. Em seguida, a análise estrutural consiste na verificação das tensões e dos estados limites. Os métodos mais usados para a análise das estruturas em concreto protendido são: Método dos Pórticos Equivalentes e o Método dos Elementos Finitos.

O método do pórtico equivalente, é indicado como a primeira opção de cálculo de momentos e cortantes para lajes protendidas em duas direções pelo ACI 318, sendo que a estrutura deve ser considerada como um conjunto de pórticos equivalentes, seguindo linhas que unem os pilares, linhas de apoio, nas direções longitudinais e transversais. Cada pórtico é composto por suas linhas de apoio e uma faixa de laje, faixa tributária, limitada lateralmente pelas linhas que unem os pontos médios dos painéis de lajes adjacentes à linha do apoio. A faixa de laje é considerada ligada aos pilares através de membros transversais à direção do vão, em cada lado do pilar, sendo que esses membros submetidos à torção são constituídos da porção da laje que tem a mesma largura do pilar na direção do vão, mais a alma da viga transversal existente, segundo o item 13.7 do ACI 318 (2005).

Já o Método dos Elementos Finitos (Grelhas ou Método de Elementos Finitos de Casca (Shell), que é baseado na subdivisão, ou discretização da estrutura em pequenos elementos, onde o seu comportamento pode ser bem definido. Os elementos são

conectados uns aos outros através de nós e estes são responsáveis pela transferência de esforços. No caso de estruturas mais complexas, com geometria não regular ou grandes vazios, que não conseguem ser modeladas pelo método dos pórticos equivalentes, sugere-se utilizar este método para a determinação dos esforços e das deformações das lajes através de uma modelagem inteira do piso de uma única vez.

No dimensionamento das armaduras passivas calculam-se todas as seções de aço necessárias para controlar a fissuração e garantir a segurança à ruína definida no ELU. Finalmente a isso procede-se ao detalhamento executivo do projeto com a emissão dos desenhos que irão para a obra.

Apesar da sequência acima citada, o projeto em lajes protendidas depende de cada engenheiro projetista, o qual irá estudar tanto o nível de protensão que será aplicado quanto a disposição dos cabos entre outros critérios. Dessa forma, o objetivo principal deste estudo deve ser necessária a distribuição, layout e perfil dos cabos, para que assim seja avaliada a situação mais favorável.

De acordo com LOUREIRO (2006), o primeiro passo a ser dado no projeto, é a definição do caminho das cargas até os apoios (load path). Normalmente, são escolhida as linhas que unem os apoios, em cada uma das direções longitudinais e transversais. Cada linha de apoio (support line) é associada a uma área tributária. Os apoios e os trechos de lajes correspondentes à área tributária constituem o que se chama de faixa de projeto (design strip).

É recomendável segundo EMERICK (2005), que quando o projetista concentrar os cabos na direção dos pilares, haverá uma maior concentração de tensões nessas regiões, porém, tem-se uma melhor aproximação com a distribuição dos momentos da laje, aumento a resistência à punção e aumento da resistência próximo ao pilar para transferência de momentos na ligação laje-pilar. Entretanto, em alguns casos, pode-se encontrar dificuldades de realizar essa concentração de cabos nas linhas dos pilares, devido as altas taxas de armaduras, mas o autor indica que se utilize no mínimo 2 cabos passando sobre cada pilar.

AALAMI (2014) explica que, para se ter uma melhora no desempenho da laje em serviço e no estado limite último, facilitar a execução e utilizar de forma correta para que se tenha uma eficiência na distribuição, é necessário realizar um estudo dos arranjos em cada projeto, buscando a alternativa mais correta. O autor comenta um estudo realizado na Universidade do Texas, que é possível obter um dimensionamento para uma laje lisa protendida utilizando a mesma quantidade de cabos, porém com layout de distribuição diferentes, conforme Figura 3 abaixo.

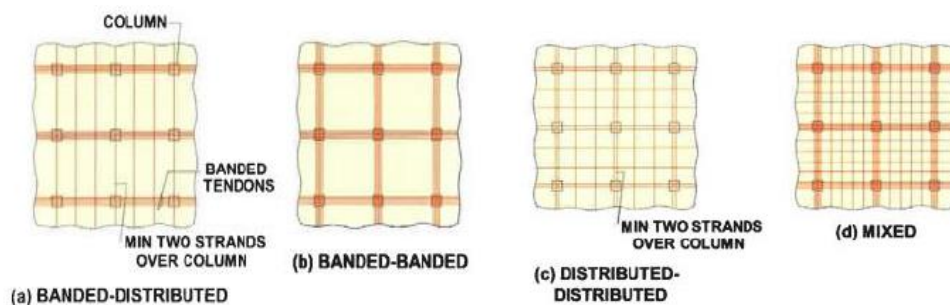


Figura 3 – Alternativas para distribuição dos cabos (AALAMI, 2014, p. 4-69)

AALAMI (2014) através da Figura 4, explica que o arranjo preferencial é o da letra C, que é aplicado por diversos projetistas, concentrando os cabos no maior sentido e distribuindo no menor.

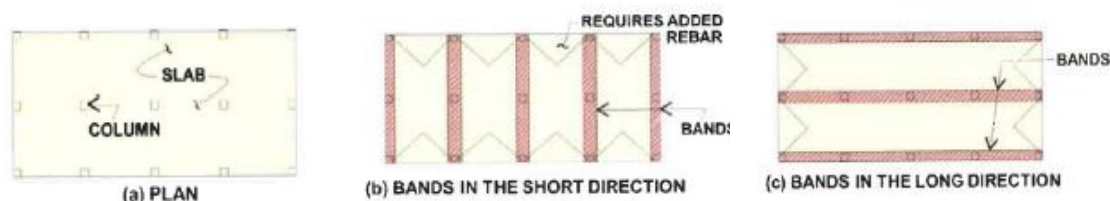


Figura 4 – Opções de arranjo de cabos concentrados (AALAMI, 2014, p. 4-70)

Irá ser desenvolvida uma sequência de projeto, baseada de acordo com as normas técnicas vigentes, para que assim se desenvolva por final a análise do pavimento, em software específico.

5. CRITÉRIOS DE PROJETO

Para que se desenvolva uma sequência de projeto, as normativas brasileiras tomam por base que os critérios de segurança devem respeitar os Estados Limites. As solicitações correspondentes ao Estado Limite Último (ELU), são devido ao escoamento do aço ou esmagamento do concreto, instabilidade da estrutura ou fadiga do material. No caso de lajes lisas, a verificação do ELU é para flexão ou punção. Já o Estado Limite de Serviço (ELS), é utilizado para verificação de controle de fissuras, deformações, vibrações, resistência ao fogo e proteção contra a corrosão.

5.1 DADOS PARA O PROJETO

Escolhido o sistema estrutural em lajes planas protendidas com cordoalhas engraxadas não-aderentes e definido a geometria dos elementos em planta, ou seja, espessura da laje, dimensões de pilares, verificação da estabilidade global do sistema, foi necessário a escolha de alguns dados para iniciar o projeto. A Figura 5 e Figura 6, planta de formas e imagem 3D da estrutura, respectivamente, representam as características do projeto estrutural.

- Resistência característica à compressão do concreto $F_{ck} = 30\text{MPa}$;
- Resistência característica à compressão do concreto na idade da aplicação da protensão (5 dias) $= F_{ckj} = 21\text{MPa}$
- $E_{ci} = 30.672\text{ MPa}$
- $E_{cs} = 26.071\text{ MPa}$
- Na idade da protensão $E_{ci} = 21.813\text{ MPa}$
- Classe de agressividade ambiental II – Moderada – Urbana: CAA II – 35mm;
- Cordoalha de 7 fios engraxada e plastificada CP 190 RB Ø12.7mm;
- $F_{ptk} = 1.900\text{ MPa}$;
- Espessura da laje adotada em função do vão em 20 centímetros. Esbeltez $L/h = 40,5$

Considerando que o pavimento será utilizado como residencial e que as divisões internas vão ser executadas em alvenaria de vedação, a partir dos carregamentos abaixo:

- Peso próprio: $Y_c = 2,5\text{tf/m}^3$
- Sobrecarga principais/permanentes: $0,15\text{tf/m}^2$
- Sobrecargas acidentais: $0,15\text{tf/m}^2$

- Alvenarias internas e no contorno da laje para vedação com espessura final de 17cm: 0,65tf/m.

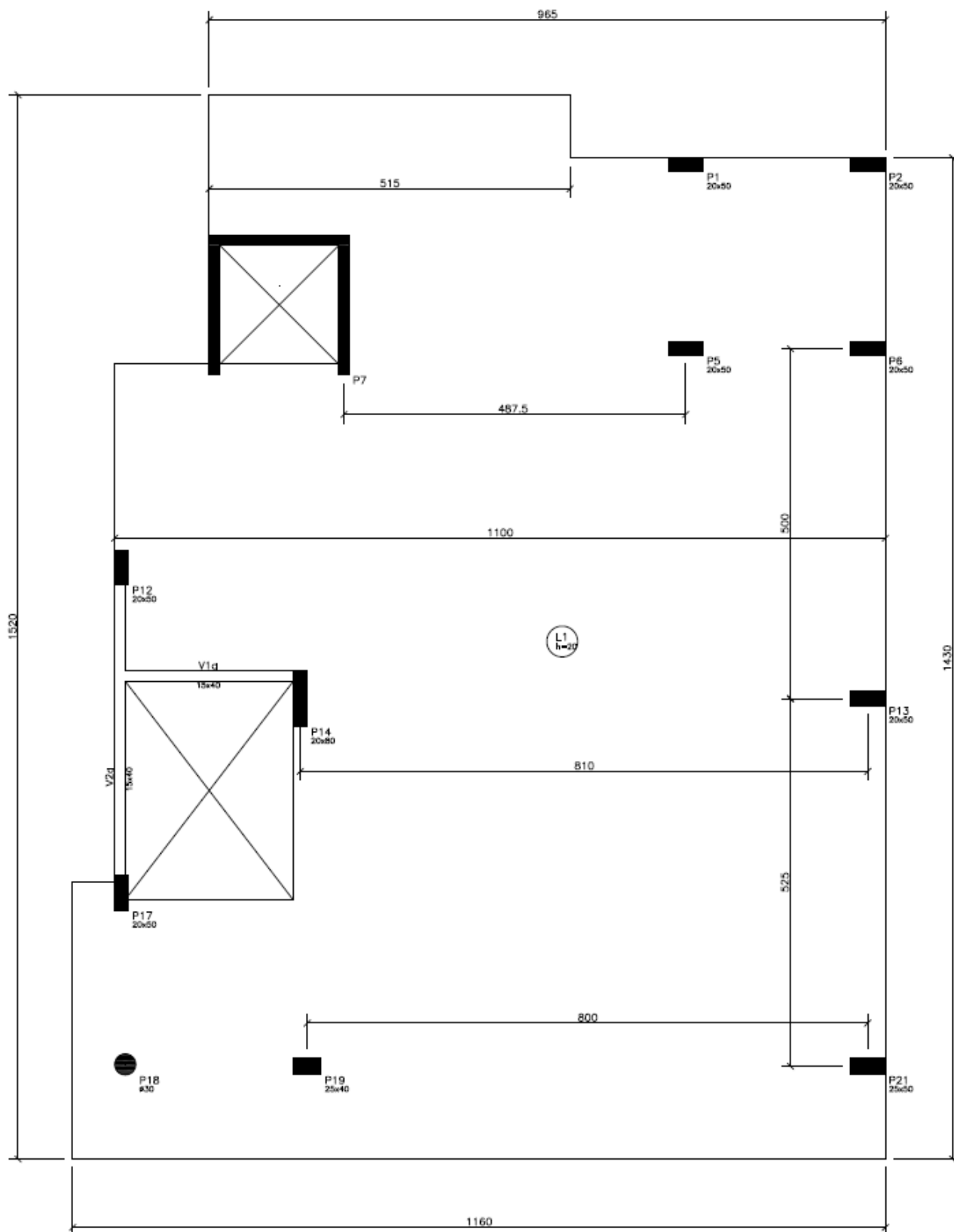


Figura 5 – Planta de Formas (Autor)

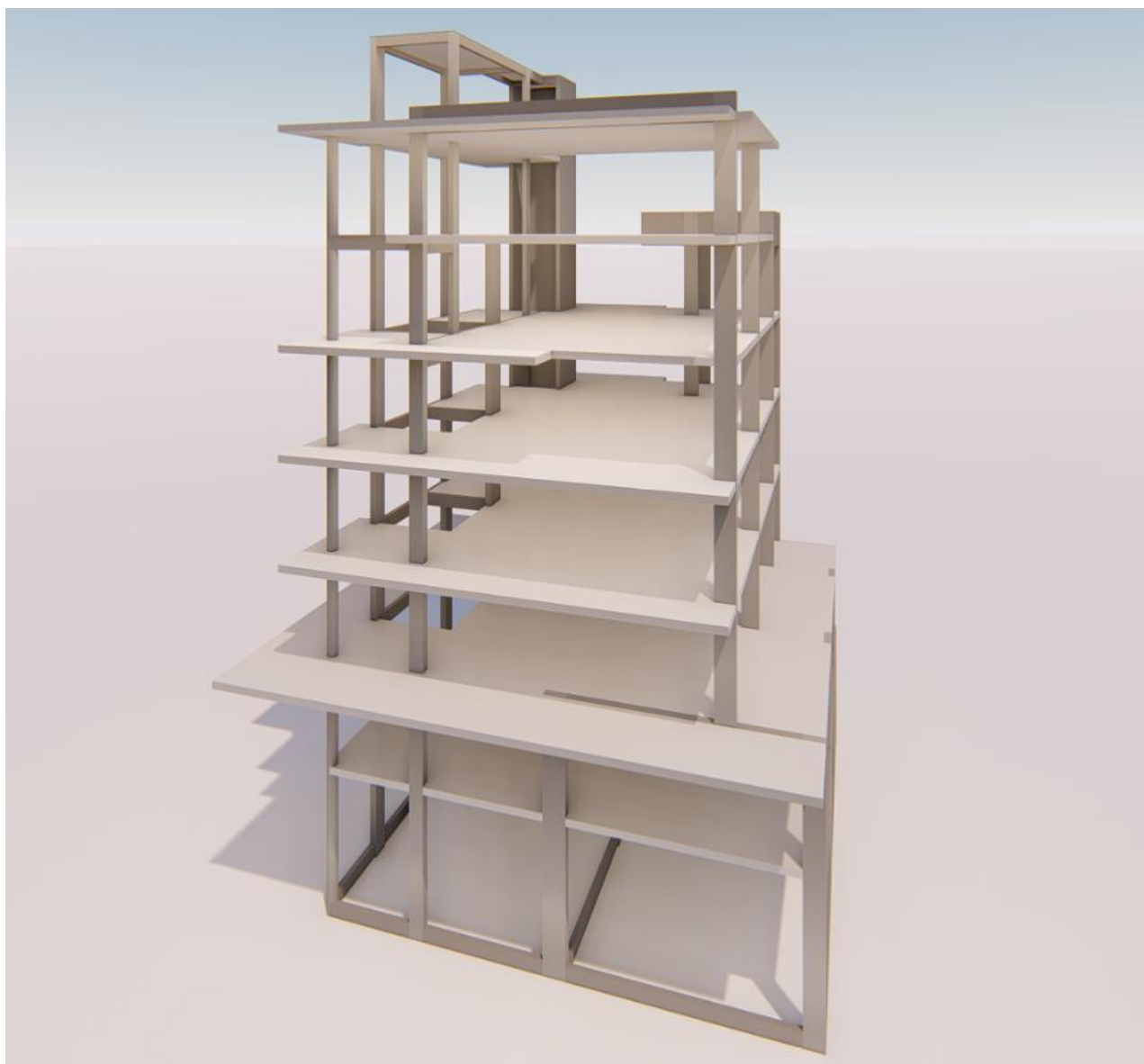


Figura 6 – 3D estrutural (Autor)

Os limites para escolha da força de protensão são estabelecidos para que a mesma não ultrapasse o limite elástico do aço de protensão e para que não haja ruptura dos cabos. Nas cordoalhas engraxadas é usual se utilizar uma tensão inicial de protensão de 1500Mpa, que equivale a 0,79f_{ptk}, ou seja, tem-se para a cordoalha de Ø12.7mm, P_i = 150 kN.

A NBR 6118, delimita tensões admissíveis na armadura de protensão pós-tracionada, por ocasião da aplicação da força P_i, a tensão na armadura na saída do aparelho de tração deve respeitar os limites entre 0,74 f_{ptk} e 0,82f_{pyk} para aços de relaxação baixa.

Os cabos devem ser posicionados nas excentricidades máximas nos apoios e no meio dos vãos, como o objetivo de se obter a flecha máxima, o que resulta em um valor maior de carga balanceada, fazendo com que seja potencializado o uso da protensão no sistema. Em relação as extremidades, os cabos devem ser posicionados no centro de gravidade da laje. Segundo (LOUREIRO 2006), na prática, é adotado um perfil dos cabos, em cada vão, parábolas reversas com pontos de inflexão de 0,10*L nos apoios.

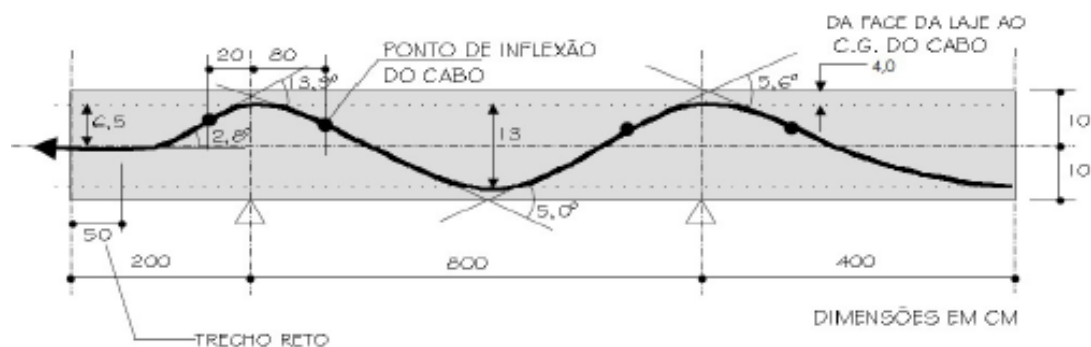


Figura 7 – Perfil dos cabos (VIEIRA, 2016)

Para lajes de edifícios residenciais, é usual balancear entre 60% a 80% da carga permanente em cada vão, para que assim se obtenha um dimensionamento econômico e flechas satisfatórias. Segundo VIEIRA (2016), um critério bastante usual para a definição da carga a ser balanceada pela protensão é equilibrar o peso próprio mais 10% do carregamento total do pavimento.

A força de protensão **P**, necessária para balancear uma carga **w**, de um vão com comprimento igual a **L**, cujos cabos apresentem uma flecha **f**, vale:

$$P = wL^2/8f$$

Segundo LOUREIRO (2006), o número de cordoalhas é calculado admitindo-se que a força efetiva de protensão nas mesmas vale 80% da força de protensão inicial, ou seja, considera 20% para as perdas totais de protensão. Adota-se geralmente, para uma cordoalha com diâmetro de Ø12.7mm, uma força efetiva de protensão de 120KN

A NBR 6118 não faz nenhuma exigência com relação à pré-compressão média a ser considerada no cálculo da protensão. Segundo o ACI 318, exige uma um valor de no mínimo 0.9Mpa na seção transversal da laje, após a consideração de todas as perdas de protensão.

Recomenda-se na prática, a utilização de um valor máximo de 2,0 MPa para a pré-compressão média, sendo que em alguns estudos é permitido valores mais altos, até 3,5 MPa, porém demandam de uma verificação mais refinada.

Tensões Máximas Admissíveis	No ato da protensão (Após perdas iniciais)		No ELS-F (Formação de fissuras) (Após todas as perdas)	
	ACI 318-05	NBR 6118/2003	ACI 318-05	NBR 6118/2003
De Compressão	0,60.fci'	0,70.fckj	(1) 0,45.fc' (2) 0,60.fc'	Não indica
De Tração	$0,25\sqrt{fci'}$	$0,36\times\sqrt[3]{fckj^2}$	$0,5\sqrt{fc'}$	$0,315\times\sqrt[3]{fck^2}$
De tração p/ fck=30MPa fckj=20MPa	1,12 MPa	2,65 MPa	2,74 MPa	3,04 MPa

(1) Devido a protensão mais cargas quase permanentes (*sustained loads*).

(2) Devido a protensão mais cargas totais.

Obs.: A tensão de compressão admissível menor para a combinação quase-permanente é justificada pelo ACI para evitar a ruptura do concreto devido às cargas repetidas e para diminuir os efeitos da deformação lenta do concreto.

Figura 8 – Tensões admissíveis no concreto (VIEIRA, 2016)

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo da influência da distribuição de diferentes traçados de protensão completa em lajes lisas com cordoalhas engraxadas não-aderentes, foi realizada a partir de dois lançamentos de distribuição de cabos de protensão, sendo eles concentrados em uma direção e distribuídos na outra, e distribuídos nas duas direções, conforme a Figura 9 respectivamente. Com objetivo de se obter o tema principal que é a influência dos dois layouts em uma laje plana protendida foi possível obter dados para conclusões e recomendações.

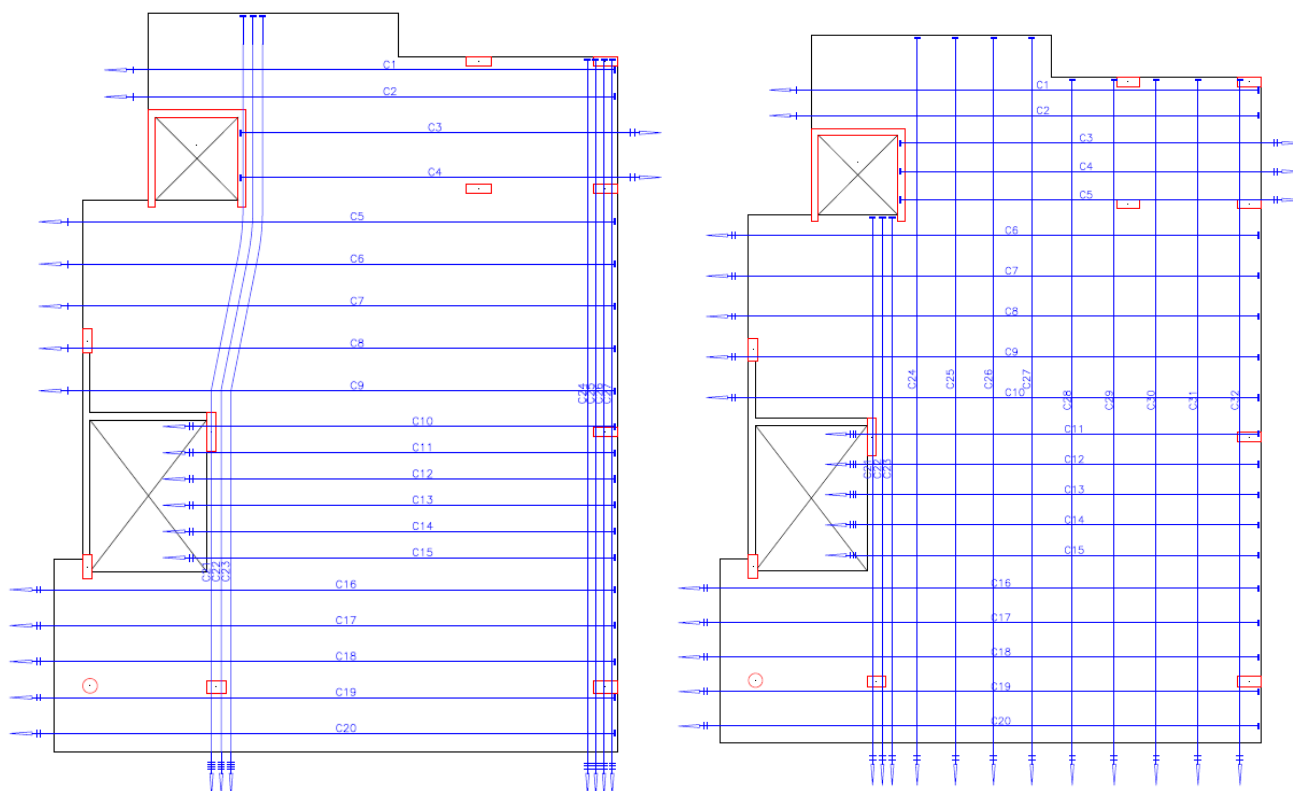


Figura 9 – Distribuição Concentrada x Distribuída e Distribuída x Distribuída (Autor)

A análise dos dois casos desenvolveu-se a partir da concepção estrutural anteriormente estudada e utilizando o software TQS V21 como ferramenta de auxílio e então foi realizado o lançamento das regiões de protensão uniformes (RPU's) e regiões de tratamento de esforços (RTE's) nos dois sentidos, principal e secundário, para que assim através deste lançamento, fosse possível obter os dados para a análise dos esforços na laje plana, alterando as excentricidades e quantidades dos cabos até que se atingisse os valores normativos aceitáveis para o correto funcionamento da estrutura em serviço e buscando a protensão completa da laje

As protensões foram dimensionadas seguindo os critérios de projeto acima citados e realizando um levantamento dos dados, como os deslocamentos (flechas) nas combinações de carregamento mais importantes para o dimensionamento, conforme a Tabela 2 e Tabela 3 abaixo.

Os quantitativos de materiais como cordoalhas CP 190 RB Ø12.7mm, ancoragens e taxas de aço em relação a metragem quadrada da forma, também foram

levadas em consideração para obtermos uma relação de custos dos dois lançamentos, que será avaliado na conclusão deste trabalho.

Tabela 2 – Distribuição cabos concentrados x distribuídos
DISTRIBUIÇÃO CABOS CONCENTRADOS x DISTRIBUÍDOS

COMBINAÇÕES DE CARREGAMENTO	DESLOCAMENTOS	
	FLECHAS (cm)	CONTRA FLECHAS (cm)
Hiperestático de Protensão	0,53	-0,07
Forças de Alívio de Protensão	0,52	-0,09
ATOPRO/PP+FORALI	0,37	-0,31
CFREQ/PP+PERM+0.4ACID+FORALI	0,31	-1,05
DIFER/1.3PP+PERM+0.4ACID+1.3FORALI	0,23	-1,14
LENTA/2.3PP+2PERM+0.4ACID+2.5FORALI	0,54	-1,98

Tabela 3 – Distribuição cabos distribuídos x distribuídos
DISTRIBUIÇÃO CABOS DISTRIBUÍDOS x DISTRIBUÍDOS

COMBINAÇÕES DE CARREGAMENTO	DESLOCAMENTOS	
	FLECHAS (cm)	CONTRA FLECHAS (cm)
Hiperestático de Protensão	0,7	-0,06
Forças de Alívio de Protensão	0,69	-0,08
ATOPRO/PP+FORALI	0,12	-0,34
CFREQ/PP+PERM+0.4ACID+FORALI	0,14	-1,04
DIFER/1.3PP+PERM+0.4ACID+1.3FORALI	0,16	-1,13
LENTA/2.3PP+2PERM+0.4ACID+2.5FORALI	0,29	-1,96

Para melhor entendimento das combinações analisadas no software TQS, seguem discriminadas:

- ATOPRO – Combinação de carregamento no ato da protensão;
- CFREQ – Combinação de carregamento frequente;
- DIFER – Combinação de carregamento diferida no tempo;
- LENTA – Combinação de carregamento no final da vida útil da estrutura;
- FORALI – Forças de alívio (aplicação da protensão);
- PP – Peso próprio;
- PERM – Peso permanente;
- ACID – Carregamentos acidentais;

Para se ter como base de comparativos, os vãos na parte central da laje são na ordem de 8,10 metros, configurando assim uma deformação normativa aceitável ($L/250$) em um valor de 3,24cm.

Analisando os resultados obtidos, temos um valor semelhante em relação as flechas obtidas nas duas distribuições. Da mesma forma, foi respeitado as tensões nas fibras superiores e fibras inferiores da seção transversal, sendo que todas as peças foram comprimidas, não havendo portando tração no concreto, configurando uma protensão

completa nos dois casos. De acordo com as combinações de carregamento utilizadas para dimensionamento e análise da laje, foi atendido também valores aceitáveis de acordo com a NBR 6118:2014 para a combinação rara de ações, atendendo o estado limite de formação de fissuras (ELS-F) e para a combinação frequente de ações, atendendo ao estado limite de descompressão (ELS-D), confirmando que as tensões de tração no concreto foram eliminadas. Em ambos os traçados também foi atingido a segurança à ruína no estado limite último (ELU) e valores normativos aceitáveis em relação a combinação da deformação lenta.

7. CONCLUSÕES

Ao se comparar os dois estudos da distribuição da protensão, concluiu-se que o layout que apresenta melhor eficiência é a concentração dos cabos na maior direção da laje e a distribuição na menor direção. Conforme citado no trabalho, este tipo de arranjo é bastante favorável pois é possível projetar os cabos buscando sua maior excentricidade com poucas interferências construtivas, justificando sua utilização na grande maioria dos projetos em protensão. Vale ressaltar que, não foram levantados dados para dimensionamento e quantidades para armaduras passivas nas lajes e armações de punção.

Na distribuição favorável encontrada, foi necessário um quantitativo total de 628Kg de cordoalhas engraxadas, 57 ancoragens (ativas e passivas) e cunhas obtendo-se uma taxa de aço de 4,19 kg/m², sendo a laje total 150m².

No layout desfavorável entrado, ou seja, distribuído nas duas direções, foram necessários um quantitativo total de 704Kg de cordoalhas engraxadas, 67 ancoragens (ativas e passivas) e cunhas obtendo-se uma taxa de aço de 4,69 kg/m², concluindo que, nas análises anteriormente citadas, obteve-se valores aproximados de deslocamentos (flechas) dentro dos limites aceitáveis pela NBR 6118:2004 e que os custos totais de cada laje da edificação foi reduzido apenas pela distribuição do layout dos cabos.

Em relação a parâmetros construtivos, foi possível identificar que as elevações finais dos cabos em planta são mais satisfatórias na concentração dos cabos em uma direção e a na distribuição na outra, pois dessa forma, conseguimos obter uma maior excentricidade nos cabos e poucas interferências de alturas dos mesmos, obtendo-se assim uma melhor eficácia da protensão e otimizando o tempo de construção e também de execução. Foi identificado que, na distribuição nas duas direções, temos uma interferência em vários pontos da laje na altura dos cabos, o que diminui a eficiência e dificulta a mão-de-obra para execução. Da mesma forma, no momento da protensão dos cabos, é mais viável para a equipe que vai utilizar os macacos hidráulicos não ter que se deslocar muito, pois os equipamentos são pesados, sendo que a concentração dos cabos fica mais simples pois os operários não tem tanta movimentação na laje, diferentemente da distribuição em toda a extensão da laje.

Ainda assim, foi realizada uma análise de tensões e deformações considerando uma mesma quantidade de cordoalhas nos dois casos, sendo que a única diferença é simplesmente na distribuição dos cabos na laje.

Comparando-se os dados adquiridos através da igualdade no consumo de cabos nos dois estudos, temos uma perda de eficiência em torno de 7% nas flechas nas combinações frequentes de ações, nas diferidas no tempo e na combinação lenta, ou seja, a mesma quantidade de protensão aplicada nos dois casos, ainda resulta na concentração e na distribuição como melhor escolha no projeto no caso estudado.

O objetivo desta análise é de que, apesar de sabermos que o layout concentrado e distribuído tem uma maior produtividade, portanto, uma maior economia em obra, isso

não significa que em todos os casos esse tipo de distribuição é sempre o mais favorável resultando em um consumo de cordoalhas menor que na distribuição nas duas direções.

Portanto, a quantidade de protensão é uma escolha de projeto, não um resultado. Ela é imposta pelo projetista, sendo ele responsável pela escolha da aplicação da tensão na laje e assim buscando ter o controle das tensões e deformações no pavimento, até que se atinja valores satisfatórios normativos e com segurança nos estados limites.

A expectativa final é que o trabalho tenha contribuído para estudos técnicos futuros de outros projetistas sobre o assunto, salientando que, o mesmo pode ser aprofundado ao ser estudado também as armações passivas nas lajes protendidas, obtendo uma análise mais completa sobre a influência da distribuição da protensão.

REFERÊNCIAS

AALAMI, B.O. Post- Tensioned Buildings: Design and Construction. Redwood City: Us Edition, 2014.

ACI - 318 (2005). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318 (2005)) and Commentary (ACI 318r-05). ACI Committee 318 Structural Building Code

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos – Apresentação. Rio de Janeiro, 2014 a.

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, Brasília 2002.

MORAES, M.C. – Concreto Protendido: Introdução ao Uso da Cordoalha Engraxada Plastificada – Caderno de Estrutura Nº 14, Brasília – 1999.

LORENCI, G. V. S, Lajes Lisas Protendidas: Comparação dos Métodos de Dimensionamento à Flexão, Porto Alegre 2010.

LOUREIRO, G. J., Projeto de lajes protendidas com cordoalhas engraxadas, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza 2006.

PEDROZO, D.G.E. Estudo de Modelos para Projeto de Lajes Lisas Protendidas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2008.

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

VERÍSSIMO, G. S.; CÉSAR Jr, K. L. M. Concreto Protendido – Fundamentos Básicos, 4ª Ed., Universidade Federal de Viçosa, 1998.

VIEIRA, P.H.S.M. Análise de Lajes Lisas Protendidas com Cordoalha Engraxada Conforme NBR 6118:2014, Universidade Federal de Goiás, Goiânia 2016.