

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

VINÍCIOS VILELA COSTA

ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES EM LAJES ALVEOLARES

Belo Horizonte

2023

Vinícios Vilela Costa

ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES EM LAJES ALVEOLARES

Trabalho de Conclusão apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Estruturas".

Orientador: Prof. Sebastião Salvador Real Pereira

Belo Horizonte

2023

C837a

Costa, Vinícios Vilela.

Análise de deformações em lajes alveolares [recurso eletrônico] /
Vinícios Vilela Costa. – 2023.

1 recurso online (32 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Sebastiao Salvador Real Pereira.

“Monografia apresentada à Escola de Engenharia da Universidade
Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de
Especialista em Estruturas”

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de estruturas. 2. Lajes. 3. Deformações e tensões.
I. Pereira, Sebastiao Salvador Real. II. Universidade Federal de Minas
Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA / TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

Aos **seis** dias do mês de **julho de 2023**, às 08h, o estudante **Vinícios Vilela Costa**, matrícula 2022682607, defendeu o Trabalho intitulado “**Análise de Deformações em Lajes Alveolares**”.

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar; assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 90 (noventa pontos)

Orientador(a): Prof. Sebastião Salvador Real Pereira

Nota: 90 (noventa pontos)

Examinador(a): Prof. Pedro Vianna Pessoa de Mendonça



Documento assinado eletronicamente por **Sebastião Salvador Real Pereira, Professor do Magistério Superior**, em 20/07/2023, às 19:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Vianna Pessoa de Mendonca, Subchefe de departamento**, em 01/08/2023, às 09:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2441709** e o código CRC **682CA36B**.

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus cujas bênçãos proporcionaram as oportunidades para desenvolver este trabalho. Ao meu orientador Prof. Sebastiao Salvador Real Pereira pela confiança, pela atenção e por todas as orientações dadas. Aos companheiros de trabalho em especial a Ecídia Maria Pinto Soares por todos seus conselhos e apoio. Aos meus pais e amigos pelo carinho e incentivo.

RESUMO

A laje alveolar é um elemento de piso pré-fabricado amplamente usado, especialmente em estruturas com vãos maiores. Este estudo consiste em apresentar uma análise estatística descritiva de dados reais das contra-flechas observadas em lajes alveolares de 15 cm de espessura. Essas deformações surgem pelo do uso de armaduras protendida. Além dos dados estatísticos, são apresentados também os valores estimados por meio de cálculos analíticos. No embasamento teórico, são abordadas as prescrições normativas pertinentes ao elemento estrutural, e uma conclusão é apresentada acerca da notável variabilidade nos valores obtidos em lajes de geometria, seção, armação e propriedades do concreto similares.

Palavras-chave: lajes alveolares; pré-fabricados; protensão; contra-flecha.

ABSTRACT

Hollow core slabs are widely used precast floor elements, especially in structures with larger spans. This study aims to provide a descriptive statistical analysis of real data on deflections observed in 15 cm thick hollow core slabs. These deformations occur due to the use of prestressed reinforcement. In addition to the statistical data, estimated values are also presented through analytical calculations. The theoretical framework includes relevant normative prescriptions for this structural element, and a conclusion is drawn regarding the notable variability in the values obtained for slabs with similar geometry, section, reinforcement, and concrete properties.

Keywords: hollow core slabs; precast; prestressing; deflection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seções transversais de lajes alveolares	15
Figura 2 – Relação entre vão e sobrecarga admissível para alveolares de 15cm	16
Figura 3 - Relação entre vão e sobrecarga admissível para alveolares de 20cm.....	16
Figura 4 - Projeto de montagem do edifício estacionamento	22
Figura 5 - Dados do projeto das lajes	23
Figura 6 - Dados do levantamento topográfico referente a lajes armadas com 5 cabos.....	25
Figura 7 - Gráfico de deslocamentos estimados para lajes armadas com 5 cordoalhas	26
Figura 8 - Dados do levantamento topográfico referente a lajes armadas com 6 cabos.....	27
Figura 9 - Gráfico de deslocamentos estimados para lajes armadas com 6 cordoalhas	28
Figura 10 - Dados do levantamento topográfico de todo o pavimento do edifício	29

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Limites para deslocamentos verticais de elementos de piso ou elementos lineares	18
Tabela 2 - Valores do coeficiente ξ em função do tempo	19
Tabela 3 - Valores característicos superiores da deformação específica de retração $\epsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$ e do coeficiente de fluência $j(t_{\infty}, t_0)$	20
Tabela 4 - Dados referente a lajes armadas com 5 cabos de protensão.....	25
Tabela 5 - Dados referente a lajes armadas com 6 cabos de protensão.....	27
Tabela 6 - Dados referente a todas as lajes do pavimento.....	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	11
3	REVISÃO DA LITERATURA	12
3.1	Estruturas de Concreto Armado	12
3.2	Estruturas de Concreto Protendido	12
3.3	Estruturas de Concreto pré-tracionadas	12
3.4	Estruturas pré-fabricadas	13
3.5	Lajes alveolares	14
3.6	Contra-flecha de elementos protendidos	17
3.7	Fluência	18
3.8	Retração	19
3.9	Anexo A da norma 6118.....	20
4	METODOLOGIA.....	22
5	ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES EM PEQUENAS REGIÕES	24
5.1	Deformações das lajes com 5 cabos	24
5.2	Deformações das lajes com 6 cabos	26
6	ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES DE TODO O PAVIMENTO	28
7	CONCLUSÕES.....	30
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

O sistema de lajes de piso com lajes alveolares obteve um grande sucesso no mercado da construção civil. Uma grande eficiência estrutural das lajes alveolares é sua capacidade de vencer grandes vãos, o que facilita o layout e otimiza sua estrutura de apoio, que pode ser moldada in loco, metálica, de elementos pré-fabricados ou até mesmo de alvenaria estrutural.

Conforme o manual Munte (2004), por ser geralmente uma peça protendida, ela apresenta uma contra-flecha natural decorrente de suas características intrínsecas. Traz ainda que não é possível determinar com exatidão a contra-flecha de uma laje, pois ela depende de inúmeros fatores. O foco desse trabalho está direcionado para elaboração de uma estatística descritiva acerca dos deslocamentos reais iniciais obtidas por levantamento topográfico de elementos idênticos e também apresentação dos valores estimados por modelos matemáticos.

A primeira parte do trabalho consiste na apresentação da revisão bibliográfica do assunto, com ênfase nas prescrições normativas e fatores que interferem nos valores das contra-flecha. Em seguida, a apresentação da metodologia do estudo mostrando os dados do projeto das lajes e da obra que foi estudada. Na sequência são apresentados os dados coletados e feito uma análise estatística das deformações obtidas e são apresentados os valores estimados em cálculos. Por fim, traz-se uma conclusão com relação ao trabalho efetuado.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo consiste em realizar uma análise das deformações iniciais em lajes alveolares protendidas. Para alcançar tal propósito, foi conduzida uma investigação de valores reais das contra-flechas observadas em um edifício estacionamento localizado em Belo Horizonte.

Adicionalmente, realizar uma revisão bibliográfica abrangendo o sistema construtivo de elementos pré-fabricados, a utilização do concreto protendido e as diretrizes normativas pertinentes às deformações estruturais. O objetivo principal é apresentar os dados reais das deformações, alcançados por meio do levantamento topográfico para obter uma comparação com os valores estimados em cálculos. Essa comparação permitirá uma análise dos resultados observados, e então apresentar uma conclusão sobre o estudo.

Dessa forma, busca-se fornecer contribuições para a compreensão das deformações iniciais em lajes alveolares protendidas. Levando em consideração o concreto protendido e as normas vigentes relacionadas às suas deformações.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Estruturas de Concreto Armado

A NBR 6118 (item 3.1.2) define Elementos de Concreto Simples como elementos estruturais elaborados com concreto que não possui qualquer tipo de armadura ou que a possui em quantidade inferior ao mínimo exigido para o concreto armado. Define também no seu item 3.1.3 que elementos de concreto armado são aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência.

3.2 Estruturas de Concreto Protendido

De acordo com a NBR 6118 (item 3.1.4) elementos de concreto protendido são aqueles nos quais parte das armaduras é previamente alongada por equipamentos de protensão, com a finalidade de impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura, bem como também propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado-limite último.

O concreto protendido é utilizado em diversas aplicações, como pontes, edifícios residenciais, sistemas de drenagem, viadutos, entre outras. O uso desse material pode resultar em estruturas mais leves, redução de custos de construção e manutenção, além de maior durabilidade devido maior precisão nos controles de abertura de fissuras.

3.3 Estruturas de Concreto pré-tracionadas

O concreto com armadura ativa pré-tracionada a NBR 6118 (item 3.1.7) é o concreto protendido em que o pré-alongamento da armadura ativa é feito utilizando-se apoios independentes do elemento estrutural, antes do lançamento do concreto, sendo a ligação da armadura de protensão com os referidos apoios desfeita após o endurecimento do concreto. A ancoragem no concreto nesse caso realiza-se somente pela aderência aço concreto.

Segundo Bastos (2021), a pretensão é frequentemente utilizada na produção de peças pré-fabricadas. Em uma pista de protensão, as armaduras são pré-esforçadas antes da concretagem. A pista é uma base plana e reta, sobre a qual são feitas peças em fila. Em suas extremidades, existem estruturas para ancoragem das armaduras, constituídas por elementos de aço onde se

encontram os cabos ou fios e por blocos de reação fixados ao solo por meio de elementos de fundação.

Ainda conforme Bastos (2021), as cordoalhas são presas em uma extremidade da pista e na outra extremidade o fio é alongado através de um atuador hidráulico apoiado na estrutura de reação. A tensão de tração exercida pelo atuador deve estar sempre abaixo do limite de tração do regime elástico do aço. Após a conclusão da operação de macaqueamento, o fio é conectado ao dispositivo de fixação conhecido também como bainhas, assim o atuador é retirado.

Uma vez que os fios tenham sido alongados e presos às ancoragens da pista de protensão o concreto é despejado na forma, envolvendo e aderindo ao aço de protensão. Após o tempo de cura do concreto, os cabos são soltos das ancoragens. É neste momento que o pré-esforço é transferido para a peça, uma vez que o fio tende elasticamente a retornar à deformação inicial. Dessa forma comprime parte ou toda a seção transversal da peça. Como a protensão é transferida ao concreto devido à aderência entre os dois materiais, tem-se a pré-tensão com aderência inicial. Na sequência, o fio pode ser cortado e a peça pode ser desmoldada e transferida para um local de armazenamento para iniciar um novo ciclo de produção. BASTOS (2021)

3.4 Estruturas pré-fabricadas

As estruturas pré-fabricadas são estruturas que usam elementos como viga, lajes, escadas e pilares produzidos em uma fábrica, em vez de serem construídas no local de construção. Pela definição dada pela NBR 9062 (item 3.9), esses elementos devem ser produzidos em instalações permanentes de empresa destinada para este fim, que se enquadram e atendem aos requisitos mínimos dados no seu item 12.1.2 sendo eles: mão de obra treinada e especializada, inspeção de matéria prima, utilização de máquinas que racionalizam e qualificam o processo e cura controlada. Depois de construídas, as estruturas são transportadas para o local de construção e montadas.

Pelo fato de os elementos serem produzidos em ambiente controlados, permite que sejam reduzidos os impactos ambientais no local da obra. Tem-se também ganhos em velocidade de construção o que pode significar um ganho financeiro, destaca-se também qualidade mais consistente e controlada devido os materiais e mão de obra especializados.

É possível citar algumas desvantagens desse método construtivo com por exemplo as limitações de design e arquitetura, necessidade de transporte que gera custos e demanda equipamentos e mão de obra especializada tanto para fabricação, planejamento e montagem.

Já os elementos pré-moldados, é definido pela norma NBR 9062 (item 3.8), como elementos moldados fora do local de utilização definitivo e conforme seu item 12.1.1, devem ser executados conforme prescrições das normas ABNT NBR 14931 Execução De Estruturas De Concreto Armado, Protendido E Com Fibras — Requisitos e ABNT NBR 12655 Concreto De Cimento Portland - Preparo, Controle, Recebimento E Aceitação - Procedimento.

A grande diferença entre elementos pré-fabricados para elementos pré-moldados segundo NBR 9062 (item 12.1) é que nos seus requisitos mínimos referentes ao controle de qualidade e inspeção é dispensado a exigência de laboratório e demais instalações congêneres próprias.

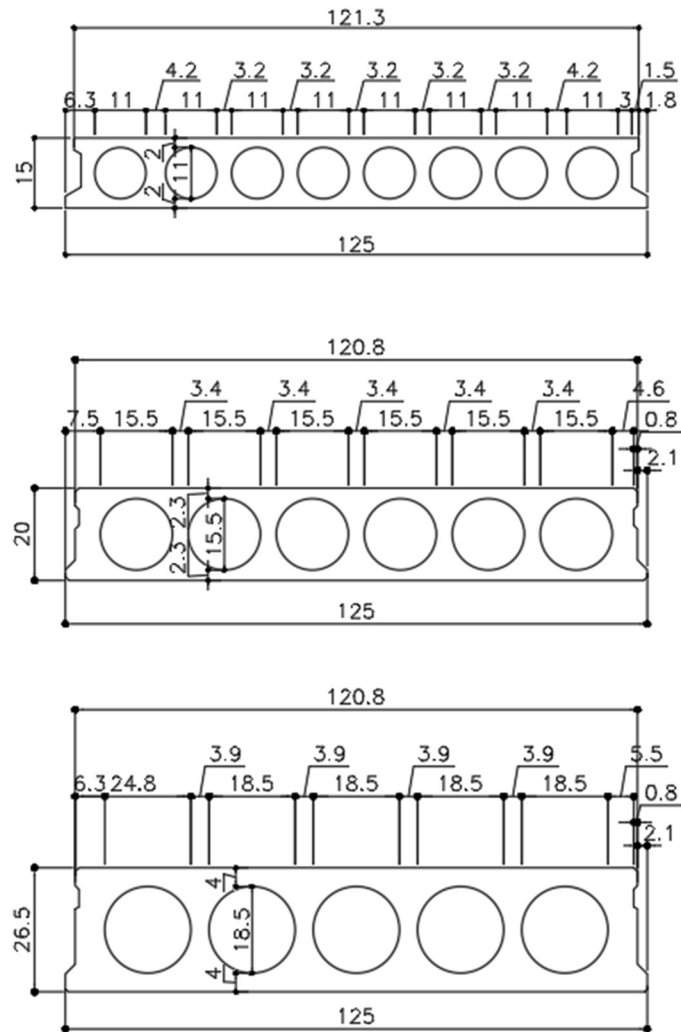
3.5 Lajes alveolares

Lajes alveolares segundo a NBR 14861 (item 3.5) é um elemento com seção transversal vazada, com a presença de nervuras de concreto e alvéolos, que podem ter geometria variada. Caracterizada por conter armaduras principais longitudinais ativas por pré-tensionamento e pela não obrigatoriedade de armadura transversal de cisalhamento. Esses painéis, geralmente são produzidos por um processo de extrusão do concreto em que apresentam várias vantagens sobre as lajes de concreto tradicionais.

Elas geralmente são mais leves, o que os torna mais fáceis de manusear e transportar, e exigem menos concreto para produzir, o que os torna mais sustentáveis. Também apresentam melhores propriedades de isolamento térmico e acústico devido às bolsas de ar no interior das lajes. Lajes construídas a partir desse elemento fornecem um sistema de piso e teto mais eficientes em relação as lajes convencionas.

Estruturalmente, uma laje alveolar agrega a eficiência de um membro protendido na capacidade de carga, extensão e controle de deflexão. Eles são especialmente úteis em estruturas de grandes vãos e podem ser usadas para uma variedade de aplicações, incluindo edifícios residenciais, comerciais, pontes e túneis. A Figura 1 mostra algumas seções transversais de lajes alveolares comumente encontradas no mercado.

Figura 1 - Seções transversais de lajes alveolares



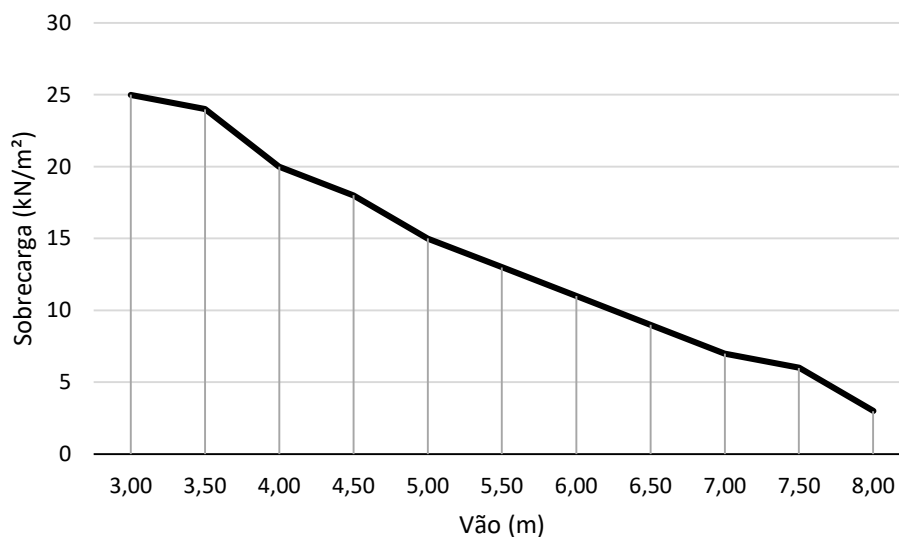
Fonte: Autores (2023)

Geralmente os cabos protendidos é a única armação na laje alveolar e não necessita de reforço contra cisalhamento. As principais limitações das lajes alveolares quando sobrecarregadas podem ser:

- Comportamento à flexão, falha por flexão pura e problema de falha de ancoragem.
- Comportamento sob cisalhamento, problema de falha de tensão de cisalhamento e falha de compressão de cisalhamento.
- Deslocamentos excessivos e tendencia a vibração.

A Figura 2 apresenta um gráfico que correlaciona o vão em metros com a carga máxima admissível em kN/m^2 para lajes alveolares de 15 cm de espessura. Nesse gráfico foi considerado as lajes simplesmente apoiadas com um capeamento estrutural de 5 cm de espessura sem considerar cargas pontuais.

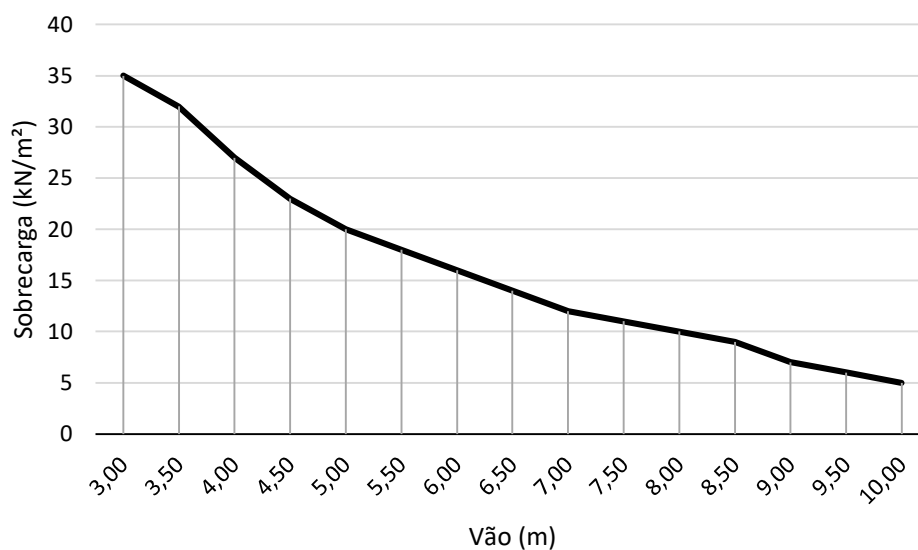
Figura 2 – Relação entre vão e sobrecarga admissível para alveolares de 15cm



Fonte: Autores (2023)

De maneira análoga às lajes de 15cm, a Figura 3 apresenta um gráfico que correlaciona o vão em metros com a carga máxima admissível em kN/m^2 para lajes alveolares de 20 cm de espessura.

Figura 3 - Relação entre vão e sobrecarga admissível para alveolares de 20cm



Fonte: Autores (2023)

3.6 Contra-flecha de elementos protendidos

Segundo Petrucelli (2009), uma das questões adversas relacionadas à deformação em lajes é a ocorrência de contra-flecha excessiva, essa apresenta desafios durante a fase de montagem dos painéis e durante o processo de concretagem do capeamento. A ausência de controle adequado dessas deformações pode resultar em desperdício de materiais, pois uma curvatura demasiada das peças requer uma maior quantidade de concreto nas extremidades durante a concretagem, a fim de alcançar a espessura prevista no projeto no centro do vão.

A NBR 6118 (item 13.3) traz que os deslocamentos-limites são valores práticos usados na verificação do estado-limite de deformações excessivas em uma estrutura. Esses deslocamentos são classificados em quatro grupos: aceitabilidade sensorial, efeitos específicos que podem impedir sua utilização adequada, efeitos em elementos não estruturais e efeitos em elementos estruturais que podem afetar o comportamento do elemento. Eles abrangem desde vibrações indesejáveis e efeitos visuais desagradáveis até a influência nos elementos estruturais e não estruturais da construção, exigindo considerações em relação às tensões, estabilidade e funcionamento adequado da estrutura.

A ABNT NBR 14861 (2022) Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido - Requisitos e procedimentos prescreve no seu item 7.3.5 que o estado limite de deformações sejam verificados conforme ABNT NBR6118 a partir das combinações quase permanente de serviço, considerando o módulo de elasticidade do concreto e coeficiente de fluência para estimativa das deformações diferidas no tempo. O mesmo item traz também que os limites de deslocamentos verticais de elementos de piso estejam de acordo com a ABNT NBR 9062 que é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Limites para deslocamentos verticais de elementos de piso ou elementos lineares

Caso	Limite
Contra-flecha imediata de fabricação	$L/300$
Flecha inicial positiva imediatamente após montagem da peça individual sob ação do seu peso próprio (sem solidarização)	$L/500$
Contra-flecha inicial no momento de montagem da peça	$L/250$
Flecha inicial positiva após a execução da estrutura(solidarizada) sem sobrecarga	$L/350$
Flecha da peça solidarizada final diferida no tempo ($L \leq 15$ m)	$L/250$
Flecha da peça solidarizada final diferida no tempo (15 m $< L \leq 20$ m)	$L/300$
Flecha da peça solidarizada final diferida no tempo ($L > 20$ m)	$L/350$
L é o vão do elemento linear.	

Fonte: Tabela 9 da ABNT NBR 9062 (2017)

Conforme determinado pela NBR 9062 (item 5.4.2.4), para efeito de estimativa de flecha devem ser levados em conta o esquema estático e o carregamento para cada etapa construtiva, bem como a eventual contribuição da seção composta e o histórico de carregamento. Traz ainda que o dimensionamento e verificação dos elementos sejam feitos para as fases de fabricação, manuseio, armazenamento, transporte montagem, fases transitórias construtivas e obra finalizada.

Ainda conforme NBR9062 (item 5.3.1.2), traz que se deve levar em conta a fluência, a retração do concreto e a relaxação do aço na determinação dos esforços solicitantes seguindo a ABNT NBR 6118. Essas, são propriedades dependentes do tempo e afetam a deflexão a longo prazo dos elementos de concreto armado e protendido.

3.7 Fluência

A fluência do concreto é uma deformação que depende do carregamento, sendo caracterizada pelo aumento da deformação inicial. Devido a essa deformação imediata, ocorrerá uma redução de volume da peça, provocando uma expulsão da água quimicamente inerte das camadas mais internas para regiões superficiais da peça, onde ela já tenha se evaporado. Tal ação desencadeia

um processo em que se verifica ao longo do tempo um crescimento da deformação inicial, até um valor máximo no tempo infinito. (AMORIM, 2022 p.1.20)

A NBR 6118 (item 19.3.1) preceitua que o estado limite de deformação das lajes devem seguir os mesmos critérios das vigas. A mesma, prescreve ainda no item 14.6.4.1 que para verificação das flechas, devem obrigatoriamente ser consideradas a fissuração e fluência.

No item 17.3.2.1.3 da NBR 6118 tem-se que para os elementos estruturais com armaduras ativas, é suficiente considerar $(EI)_{eq} = E_{cs}I_c$, desde que não seja ultrapassado o estado-limite de formação de fissuras. Segundo item 17.3.2.1.2 a flecha adicional diferida, em função da fluência, pode ser calculada de maneira aproximada pela multiplicação da flecha imediata por um fator que está correlacionado a um coeficiente ξ , este em função do tempo, que pode ser obtido diretamente pela Tabela 2.

Tabela 2 - Valores do coeficiente ξ em função do tempo

Tempo (t) meses	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	≥ 70
Coeficiente $x(t)$	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

sendo:

t o tempo, em meses, quando se deseja o valor da flecha diferida;

Fonte: Tabela 17.1 da ABNT NBR 6118 (2014)

3.8 Retração

Segundo Amorim (2022), a retração no concreto é uma deformação volumétrica que ocorre devido à perda de parte da água dissociada quimicamente do processo de produção do concreto, sendo assim, independente do carregamento. A retração depende basicamente da umidade relativa do ambiente, da consistência do concreto no lançamento e de uma espessura fictícia da peça.

Segundo a NBR 6118 (item 8.2.11) em casos em que não é necessária grande precisão, os valores finais do coeficiente de fluência $\phi(t_{\infty}, t_0)$ e da deformação específica de retração $\epsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$ do concreto, podem ser obtidos, por interpolação linear, a partir da Tabela 3.

Tabela 3 - Valores característicos superiores da deformação específica de retração $e_{cs}(t_{\infty}, t_0)$ e do coeficiente de fluência $j(t_{\infty}, t_0)$

Umidade média ambiente %		40		55		75		90		
Espessura fictícia $2A_c/u$ cm		20	60	20	60	20	60	20	60	
$j(t_{\infty}, t_0)$ Concreto das classes C20 a C45	to dias	5	4,6	3,8	3,9	3,3	2,8	2,4	2,0	1,9
		30	3,4	3,0	2,9	2,6	2,2	2,0	1,6	1,5
		60	2,9	2,7	2,5	2,3	1,9	1,8	1,4	1,4
$j(t_{\infty}, t_0)$ Concreto das classes C50 a C90	to dias	5	2,7	2,4	2,4	2,1	1,9	1,8	1,6	1,5
		30	2,0	1,8	1,7	1,6	1,4	1,3	1,1	1,1
		60	1,7	1,6	1,5	1,4	1,2	1,2	1,0	1,0
$e_{cs}(t_{\infty}, t_0)$ ‰	to dias	5	- 0,53 - 0,47		- 0,48 - 0,43		- 0,36 - 0,32		- 0,18 - 0,15	
		30	- 0,44 - 0,45		- 0,41 - 0,41		- 0,33 - 0,31		- 0,17 - 0,15	
		60	- 0,39 - 0,43		- 0,36 - 0,40		- 0,30 - 0,31		- 0,17 - 0,15	

Fonte: Tabela 8.2 da ABNT NBR 6118 (2014)

Ainda segundo NBR 6118 (item 8.2.11), deformações específicas devidas à fluência e à retração mais precisas podem ser calculadas segundo indicação presente em seu Anexo A.

3.9 Anexo A da norma 6118

As determinações do anexo A da NBR6118 tem caráter informativo e fala sobre o efeito do tempo no concreto estrutural. Quando não há impedimento à livre deformação do concreto, e ele é submetido uma tensão constante em um intervalo de tempo, o referido anexo traz que a sua deformação total em um tempo qualquer corresponde a uma parcela de deformação

imediate pela ocasião do carregamento somado a uma deformação por fluência e uma deformação por retração.

Conforme o Anexo A da ABNT NBR 6118, a deformação por fluência por sua vez é composta por duas partes, uma rápida e outra lenta. A deformação rápida é irreversível e ocorre durante as primeiras 24 horas após a aplicação da carga que a originou. A deformação lenta é, por sua vez, composta por duas outras parcelas: a deformação lenta irreversível e a deformação lenta reversível. Para o cálculo desses efeitos, são considerados as seguintes hipóteses:

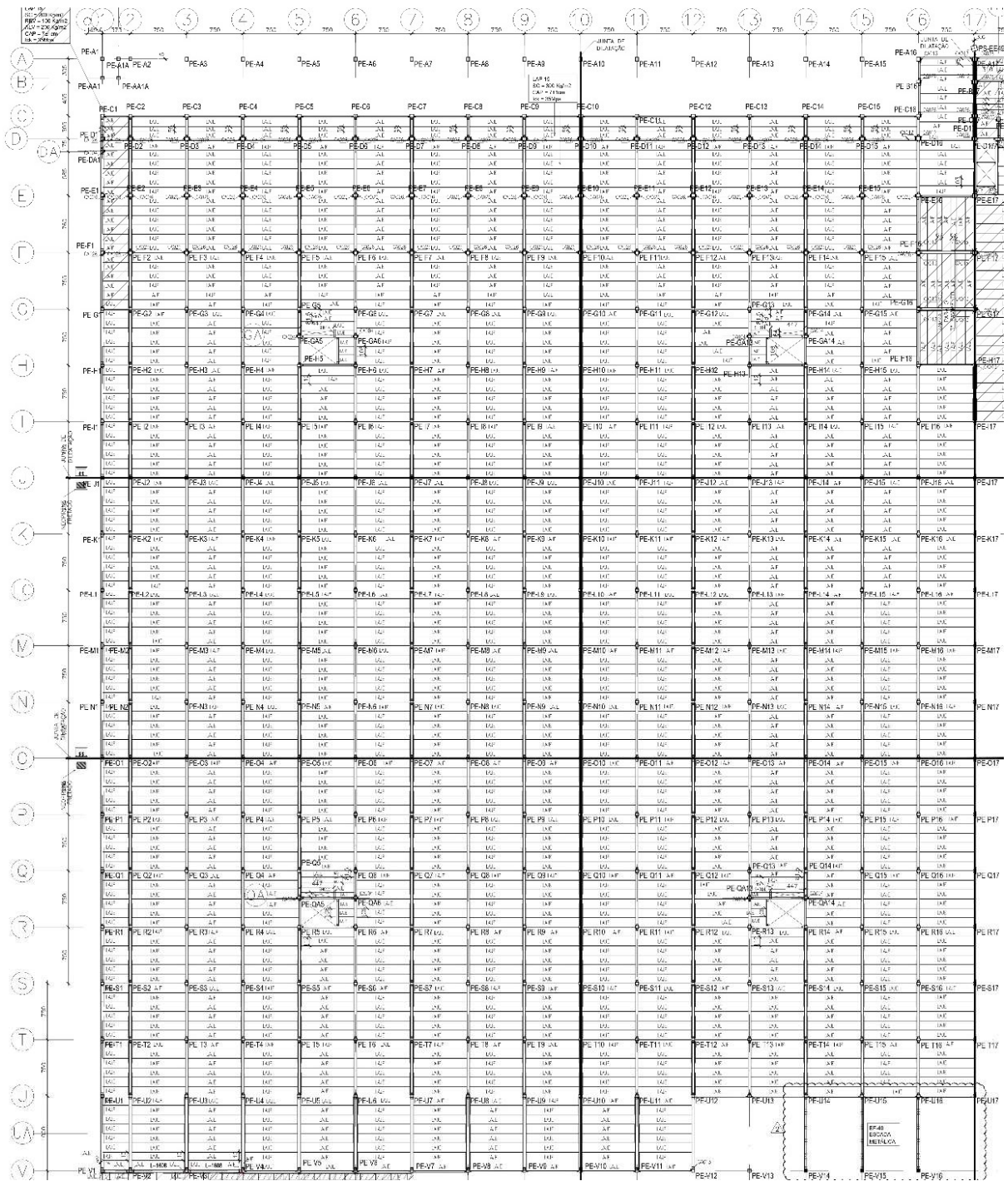
- a) a deformação por fluência varia linearmente com a tensão aplicada;
- b) para acréscimos de tensão aplicados em instantes distintos, os respectivos efeitos de fluência se superpõem;
- c) a deformação rápida produz deformações constantes ao longo do tempo; os valores do coeficiente são função da relação entre a resistência do concreto no momento da aplicação da carga e a sua resistência final;
- d) o coeficiente de deformação lenta reversível depende apenas da duração do carregamento, o seu valor final e o seu desenvolvimento ao longo do tempo são independentes da idade do concreto no momento da aplicação da carga;
- e) coeficiente de deformação lenta irreversível depende da umidade relativa do ambiente consistência do concreto no lançamento, da espessura fictícia da peça, da idade fictícia do concreto no instante da aplicação da carga e idade fictícia do concreto no instante considerado
- f) para o mesmo concreto, as curvas de deformação lenta irreversível em função do tempo, correspondentes às diferentes idades do concreto no momento do carregamento, são obtidas, umas em relação às outras, por deslocamento paralelo ao eixo das deformações

Referente à retração o Anexo A da ABNT NBR 6118 informa que seu valor depende da umidade relativa do ambiente, consistência do concreto no lançamento e espessura fictícia da peça. Além dessas hipóteses básicas, apresenta também ábacos, tabelas e modelos de cálculo para os coeficientes e parâmetros.

4 METODOLOGIA

Por meio de um levantamento topográfico foi obtido os dados das contra-flechas reais observadas nas lajes alveolares de um edifício estacionamento que possui três pavimentos, cada um dele possui aproximadamente 16.500 m² de piso, como ilustrado na Figura 4.

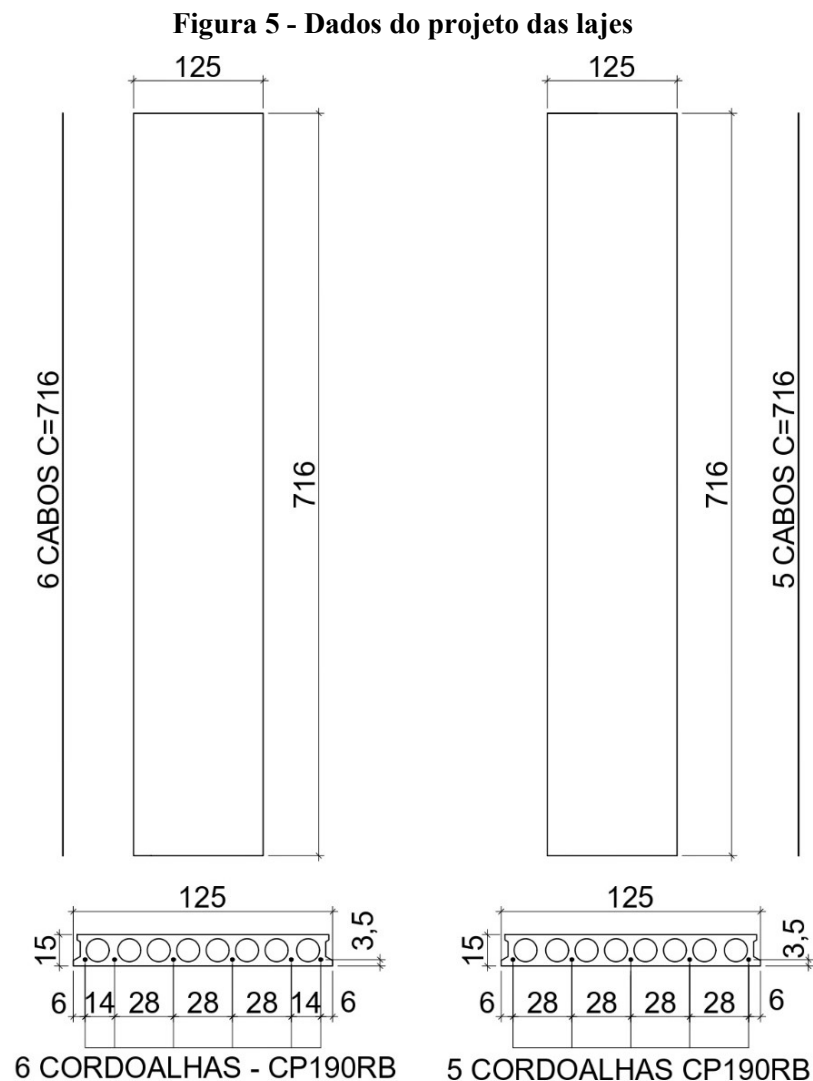
Figura 4 - Projeto de montagem do edifício estacionamento



Fonte: Autores (2023)

Todas as lajes em questão possuem espessura de 15 cm e comprimento de 7,16 m. No âmbito do cálculo estrutural, foi considerado uma camada de capeamento de 7 cm e carga acidental de 3 kN/m², sem revestimentos. É válido ressaltar que as análises que serão apresentadas nesse trabalho se referem a lajes que possuem essa mesma geometria e carregamento.

As lajes em análise estão divididas em dois grupos: o primeiro são lajes das extremidades e as situadas em interfaces com as juntas de dilatação, onde nos critérios de cálculo considerou-se continuidade em apenas um de seus lados. Para tal, as lajes foram armadas com 6 cabos de protensão. O segundo grupo são as lajes consideradas contínuas em ambas as extremidades, essas foram armadas com 5 cabos de protensão. O detalhe da armação das lajes é mostrado na Figura 5. Essa informação é importante dado que o número de cordoalhas tem grande influência nos valores das deformações.



Antes da execução do capeamento, foi realizado um levantamento topográfico da região a ser concretada, visando assegurar que o nível definido para o piso acabado seja suficiente para garantir a espessura mínima requerida de capeamento conforme especificado no projeto. Esse levantamento consiste em medir o nível de três pontos em cada laje, no centro em cada uma das extremidades.

Esses dados subsidiaram a elaboração de um projeto para especificar a cota mínima do topo do capeamento em cada região, garantindo o desempenho estrutural adequado da laje, de acordo com o projeto original. Esse processo permite otimizar a conformação do capeamento, concentrando-a apenas em pontos estrategicamente definidos, em vez de abranger toda a superfície da concretagem.

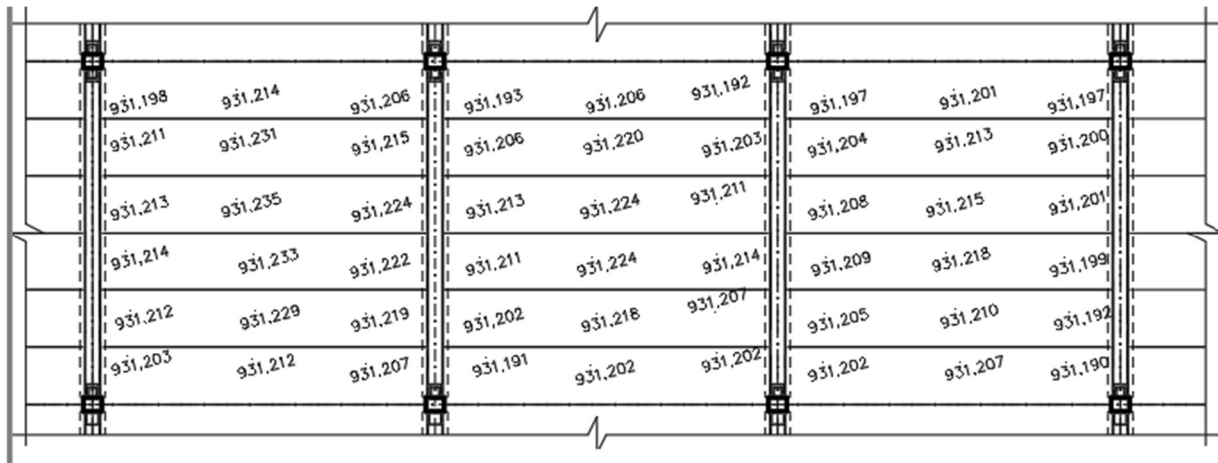
A análise dos dados deste trabalho se divide em duas partes, a primeira se restringe a pequenas áreas de concretagem, com o objetivo de garantir que as lajes tenham sido produzidas na mesma pista de protensão. Na segunda parte é apresentado uma análise com os dados de todo o pavimento onde obviamente as lajes não foram produzidas na mesma pista, todavia garantindo ainda as propriedades de projeto como armação, f_{ck} do concreto e geometria.

5 ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES EM PEQUENAS REGIÕES

5.1 Deformações das lajes com 5 cabos

A Figura 6 exibe as cotas de nível das lajes a partir do levantamento topográfico em uma pequena região. Nesse caso, as lajes foram fabricadas em pistas de produção com capacidade para 150 metros lineares. Ressalta-se que todas as lajes possuem o mesmo comprimento, a mesma armadura e as mesmas propriedades do concreto. Ao selecionar pequenos trechos de concretagem, é admissível considerar que as lajes foram fabricadas na mesma pista devido à metodologia de produção adotada, a qual seguem uma sequência predefinida de montagem.

Figura 6 - Dados do levantamento topográfico referente a lajes armadas com 5 cabos



Fonte: Autores (2023)

A Tabela 4 apresenta os dados resultantes da análise estatística da amostra das contra-flechas desse grupo de 18 lajes. Essas lajes possuem continuidade em ambos os lados e foram armadas com 5 cabos de protensão.

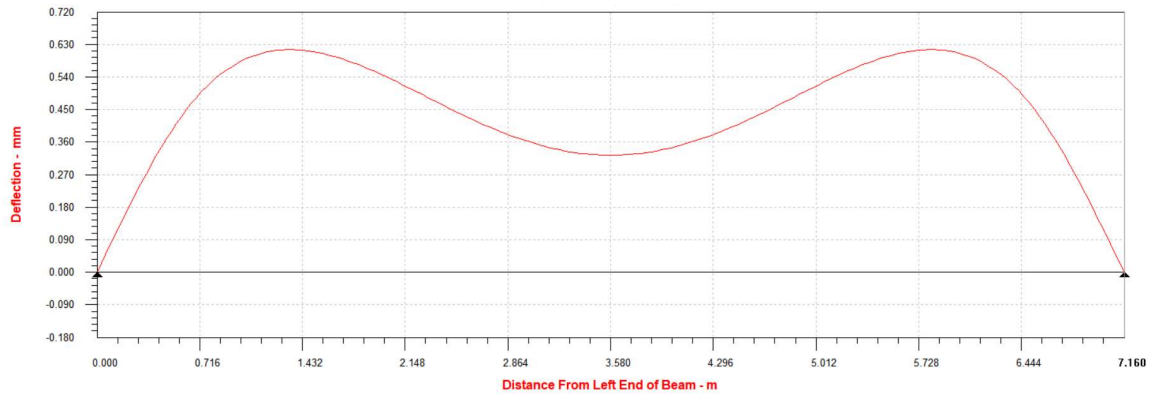
Tabela 4 - Dados referente a lajes armadas com 5 cabos de protensão

Média	12 mm
Desvio padrão	4 mm
Variância da amostra	13
Intervalo	14 mm
Mínimo	4 mm
Máximo	18 mm

Fonte: Autores (2023)

A Figura 7 traz o gráfico de deslocamento estimado por cálculos, gerado com o auxílio do software Concise. A contra-flecha teórica estimada considera uma série de propriedades do concreto, incluindo a resistência característica à compressão (f_{ck}) em diferentes idades, o slump (abatimento) do concreto, a umidade do ar, a temperatura ambiente, a granulometria dos agregados, a seção transversal da laje, a geometria da laje e a idade estimada das lajes.

Figura 7 - Gráfico de deslocamentos estimados para lajes armadas com 5 cordoalhas

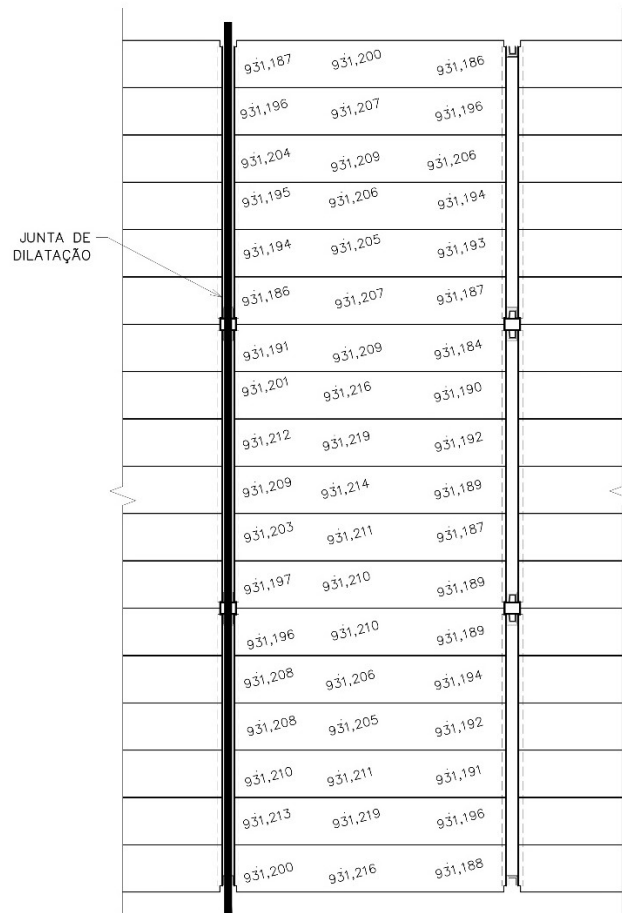


Fonte: Autores (2023)

5.2 Deformações das lajes com 6 cabos

A Figura 8 apresenta uma área de estudo de lajes que estão localizadas na região da junta de dilatação, o que impede a possibilidade de considerar a continuidade em ambas as extremidades. A junta de dilatação é um elemento fundamental em estruturas que estão sujeitas a movimentos térmicos ou deformações estruturais. A presença dessa junta exige uma abordagem diferenciada no cálculo estrutural das lajes e as lajes dessa região foram armadas com 6 cabos de protensão

Figura 8 - Dados do levantamento topográfico referente a lajes armadas com 6 cabos



Fonte: Autores (2023)

Os resultados das contra-flechas referentes a essa região estão disponibilizados na Tabela 5. A tabela apresenta as medidas de média, desvio padrão, variância intervalo, valores máximos e mínimos das deformações negativas obtidas para cada elemento estrutural nessa área específica de análise

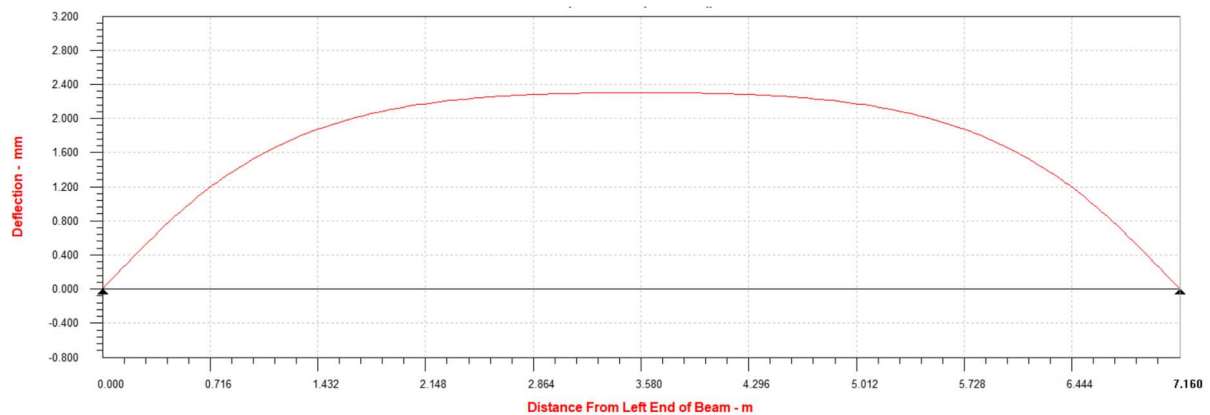
Tabela 5 - Dados referente a lajes armadas com 6 cabos de protensão

Média	14 mm
Desvio padrão	6 mm
Variância da amostra	32
Intervalo	18 mm
Mínimo	4 mm
Máximo	22 mm

Fonte: Autores (2023)

O gráfico exibido na Figura 9 ilustra a estimativa de deformação para as lajes alveolares da região apontada. A curva de deformação representa os valores em milímetros da variação da deformação da laje ao longo do seu comprimento e foi obtido com o auxílio do software Concise.

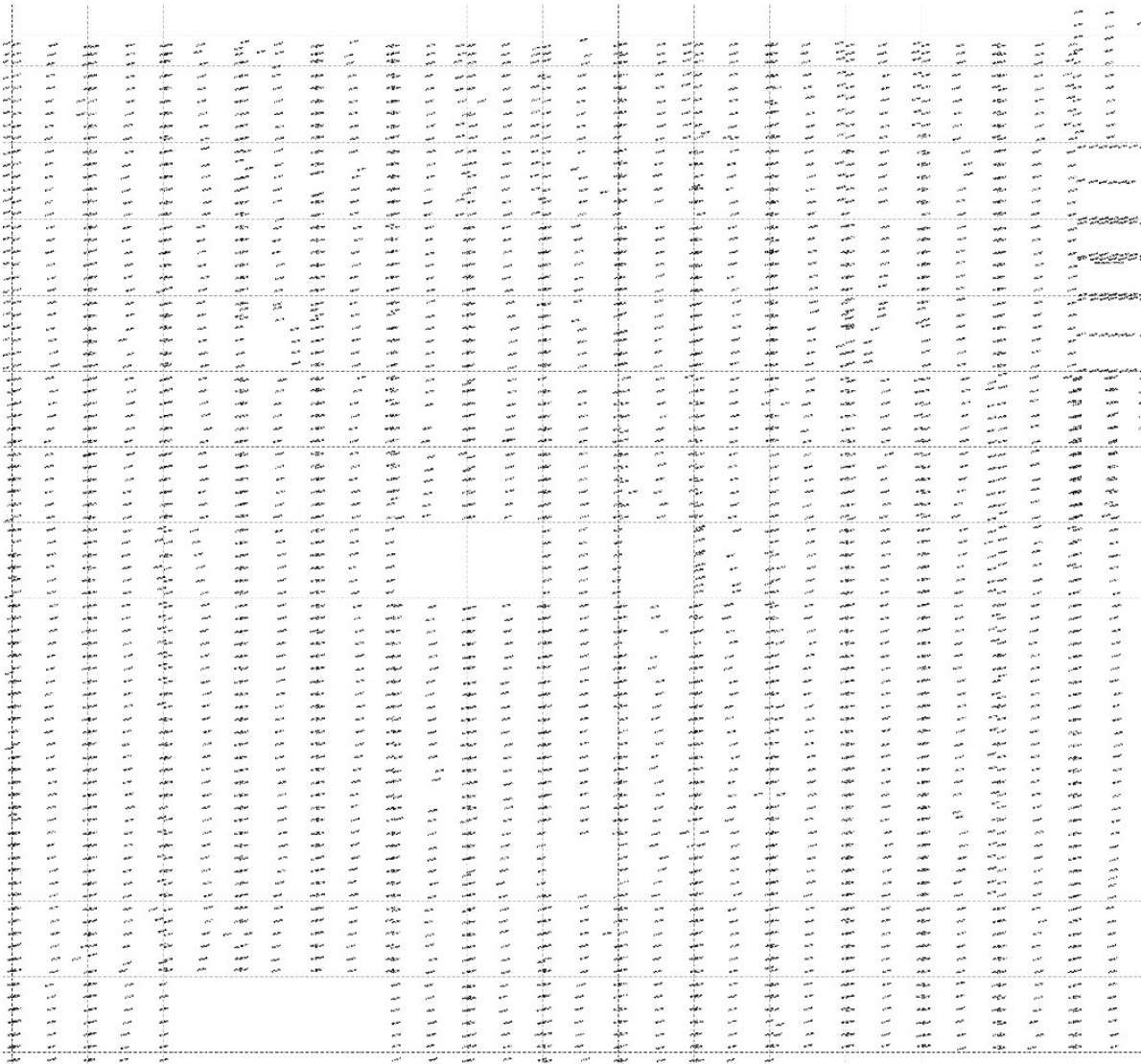
Figura 9 - Gráfico de deslocamentos estimados para lajes armadas com 6 cordoalhas



Fonte: Autores (2023)

6 ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES DE TODO O PAVIMENTO

Utilizando dados mais abrangentes, agora de todo o conjunto de lajes do pavimento conforme apresentado de forma ilustrativa na Figura 10, tem-se os valores de contra-flecha apresentados na Tabela 6. Cabe ressaltar que, neste caso as lajes não possuem a mesma idade nem foram produzidas na mesma pista. Entretanto, é assegurada a uniformidade na seção, comprimento e na armadura utilizadas nas lajes.

Figura 10 - Dados do levantamento topográfico de todo o pavimento do edifício

Fonte: Autores (2023)

Tabela 6 - Dados referente a todas as lajes do pavimento

	Lajes armadas com 5 cabos	Lajes armadas com 6 cabos
Média	9 mm	16 mm
Desvio padrão	5 mm	9 mm
Variância da amostra	26	76
Intervalo	31 mm	45 mm
Mínimo	0 mm	0 mm
Máximo	31 mm	45 mm
Contagem	1269	311

Fonte: Autores (2023)

7 CONCLUSÕES

Por mais que deve-se respeitar os limites normativos de deformação, a NBR 6118 (item 17.3.2), prescreve que existe uma grande variabilidade das deformações reais da estrutura em face da grande variabilidade dos parâmetros de cálculo. Diz ainda em que não se pode esperar, portanto, grande precisão nas previsões de deslocamentos dadas pelos processos analíticos por ela prescritos.

As contra flechas reais obtidas neste estudo apresenta uma variação grande e o desvio padrão é alto. Fatores como a forma de manuseio na fábrica, diferentes tipos de manejo na montagem, estoque e transporte de maneira diferente, cura do concreto, umidade do ar, slump e outros podem contribuir para essas variações. Embora sejam elementos estruturais iguais, submetidos ao mesmo carregamento constata-se neles valores diferentes para contra-flechas.

Ao estabelecer uma análise comparativa entre os valores das deformações reais e as estimadas por cálculo, percebe-se uma discrepância significativa. Os dados das deformações reais indicam que a deformação foi em média 14 vezes maior para lajes armadas com 5 cabos, já para as lajes armadas com 6 cabos, essa diferença em média é 7 vezes maior que o valor estimado.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062 Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado, 2017.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14861 Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido — Requisitos e procedimentos, 2022.

BASTOS, PAULO SÉRGIO. Fundamentos do concreto protendido. Bauru/SP: Universidade Estadual Paulista–UNESP, 2019.

MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS. Manual Munte de projeto em pré-fabricados de concreto. São Paulo: Pini, 2004. 488 p.

PETRUCELLI, N. S. Considerações sobre projeto e fabricação de lajes alveolares protendidas. Dissertação (Mestrado em Construção Civil Universidade Federal de São Carlos, 2009).

SILVA, Ney Amorim. Concreto armado I. Apostila do curso de especialização em estruturas. UFMG, 2022